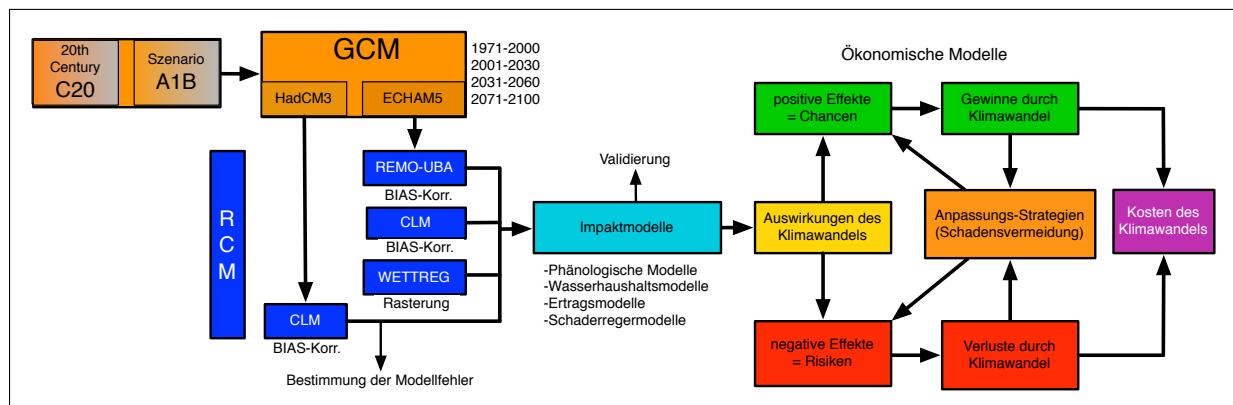




Klimawandel in Hessen (Langversion)

Chancen, Risiken und Kosten für den Obst- und Weinbau (CHARIKO)

Endbericht 10/2009 - 10/2013



Laufzeit des Projektes 10/2009 - 10/2013

Projektleitung: Prof. Dr. Frank-M. Chmielewski

Projektbearbeitung: Dr. Klaus Blümel

Auftraggeber

Fachzentrum Klimawandel Hessen im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie

Projektbetreuung

Fachzentrum Klimawandel Hessen, Dr. Helmut Wolf

Berlin, 31. Oktober 2013



Forschungsprogramm INKLIM-A und weitere Projekte

Hier finden Sie die pdf-Version dieser Langversion und auch den originalen, kürzeren Bericht. http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/CHARIKO_html



Und hier finden Sie unsere Visitenkarte für Nachfragen zum Abspeichern in ihr Adressbuch.



Anschrift:	Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät FG Acker- und Pflanzenbau Professur für Agrarklimatologie Albrecht-Thaer-Weg 5 D-14195 Berlin Projektteam: Prof. Dr. Frank-M. Chmielewski Dr. Klaus Blümel Tel.: 030-2093 46395 Fax.: 030-2093 46488 E-Mail : chmielew@agr.ar.hu-berlin.de E-Mail : Klaus.Bluemel@agr.ar.hu-berlin.de
-------------------	---

Inhaltsverzeichnis

Gliederung	iii
Abkürzungsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xii
Tabellenverzeichnis	xxiv
1 Vorwort	1
1.1 Hinweise zur Nutzung des Berichts	2
1.2 Veränderungen gegenüber dem letzten Zwischenbericht	3
2 Zusammenfassung	4
3 Einleitung und Zielstellung	11
4 Daten und Methodik	14
4.1 Datenbasis	14
4.1.1 Meteorologische Messwerte an den Stationen	14
4.1.1.1 Einschränkungen	14
4.1.2 1 km-Rasterdaten des DWD	18
4.1.2.1 Einschränkungen	18
4.1.3 Phänologische Daten für Hessen	18
4.1.4 Daten der dynamischen regionalen Klimamodelle	19
4.1.4.1 Einschränkungen	21
4.1.5 Daten des statistischen Klimamodells WETTREG2010	21
4.1.5.1 Einschränkungen	22
4.2 Weiterverarbeitung und Ergänzung der Daten	27
4.2.1 Meteorologische Messwerte an den Stationen	27
4.2.2 1 km-Rasterdaten des DWD	29
4.2.3 Phänologische Daten für Hessen	31
4.2.4 Daten der dynamischen regionalen Klimamodelle	32
4.2.5 Daten des statistischen Klimamodells WETTREG2010	34
4.3 Die BIAS-Korrektur der Daten der dynamischen Klimamodelle	35
4.3.1 Warum musste korrigiert werden?	36
4.3.2 Das BIAS-Korrekturverfahren	38
4.3.3 BIAS-korrigierte Datensätze	41
4.4 Konfidenzintervalle für die Mittelwerte über verschiedene Klimamodelle	44
4.4.1 Theorie	44
4.4.2 Einfluss der Korrelationen zwischen den 10 WETTREG Realisierungen	50
4.4.3 Berücksichtigung von Korrelationen zwischen den Modellmittelwerten	53

4.4.4	Fazit	55
4.5	Bestimmung der Obstanbaugebiete in Hessen	55
4.6	Verbesserungen der phänologischen Modelle	58
4.6.1	Phänologische Modelle für den Blühbeginn der Obstgehölze	58
4.6.1.1	Reine Forcing-Modelle	58
4.6.1.2	Chilling-Forcing-Modelle	59
4.6.1.2.1	Weinberger-Eggert Model	60
4.6.1.2.2	Positive Utah Model	60
4.6.1.2.3	Dynamic Model	60
4.6.2	Phänologische Modelle für das Blühende der Obstgehölze	62
4.6.3	Phänologische Modelle für den Beginn der Pflückreife für Obstgehölze	63
4.6.4	Unzulänglichkeiten der bisher verwendeten Modelle für den Blüh- beginn	73
4.6.4.1	Reine Forcing-Modelle	73
4.6.4.2	Zusammenfassung von Abschnitt 4.6.4.1	78
4.6.4.3	Chilling-Forcing-Modelle	79
4.6.5	Verbesserung der Blühbegin-Modelle durch die Berücksichtigung der Tageslänge	81
4.6.5.1	Modifikation der Forcingfunktion	81
4.6.5.2	Hierdurch erzielte Verbesserungen	82
4.6.5.3	Phänotypische Plastizität	86
4.6.5.4	Mögliche Konsequenzen des Daylength-Terms auf andere Modelltypen	89
4.6.6	Optimierung für verschiedene Fruchtarten	90
4.6.7	Fazit	97
4.7	Dormanzbrechungswahrscheinlichkeit und Dormanzschaden	97
4.8	Bestimmung von Frostschäden im Obstbau	103
4.8.1	Wahrscheinlichkeiten $\mathbf{P}_{\mathbf{F},\mathbf{x}}$ für das Auftreten von Spätfrost be- stimmter Stärke während des S-Zeitraums	104
4.8.2	Frostschäden $\mathbf{F}_{\mathbf{S}}$ an den Blüten und daraus resultierende Ertrags- schäden $\mathbf{s}_{\mathbf{F}}$ beim Apfel	106
4.8.3	Approximative Berechnung der Bestandstemperatur \mathbf{T}_{veg}	106
4.8.4	Berechnung der Schäden	113
4.8.5	Wahrscheinlichkeit $\mathbf{s}_{\mathbf{F}}^{\mathbf{a}-\mathbf{b}}$ für das Auftreten von Schäden bestimmter Stärke an den Früchten	117
4.8.6	Mittlere Anzahl $\mathbf{n}_{\mathbf{F}}^{\mathbf{x}}$ der Frosttage pro Jahr mit bestimmter Frost- stärke innerhalb des S-Zeitraums	118
4.8.7	Kosten für Maßnahmen gegen Frostschäden	119
4.9	Berechnung des Apfelwicklergenerationsindizes und der Apfelwicklerschäden	120
4.10	Ertragberechnungen mit SIMWASER	123
4.10.1	Kurzer Überblick über das Modell	123
4.10.1.1	Eingangsgrößen	123
4.10.1.2	Ausgabegrößen	124
4.10.1.3	Assimilation	124
4.10.1.4	Der Boden	125
4.10.1.5	Verdunstung	128
4.10.2	Aufgedeckte Fehler	133

4.10.3	Implementierung der verbesserten Phänologie in SIMWASER	133
4.10.3.1	Berechnung des Blühbeginns	135
4.10.3.2	Berechnung des Beginns der Pflückreife	135
4.10.4	Implementierung der verschiedenen Obstarten in das Modell	137
4.10.5	Implementierung einer optionalen Sommerberechnung in das Modell	140
4.10.6	Implementierung eines Bienenflugmodells	143
4.10.7	Implementierung der CO ₂ -Düngung in das Modell	146
4.10.8	Verifikation über Dauerbrache, mit Sommergerste und mit Süßkirsche	151
4.10.9	Bestimmung der Bodenarten für die Obstanbaugitterpunkte	154
4.10.10	Automatisierter Ablauf von SIMWASER bei den Rechnungen mit den Outputdaten der 5 Klimamodelle	157
4.10.11	Trockenmassenzuwachs und Fruchtertrag	158
4.10.12	Berechnung von Ertragsschäden s_Y (Yield-Schäden)	160
4.10.13	Berechnung der Kosten K_{BEW} zur Vermeidung von Ertragsschäden	162
4.11	Berechnung des klimabedingten Gesamtschadens	162
4.11.1	Definition von Einzelschäden	163
4.11.2	Die Damage Function und der Gesamtschaden	163
4.11.3	Zerlegung des Gesamtschadens in geordnete Schäden	166
4.11.4	Weitere mögliche Schäden und Kosten, die in CHARIKO aber nicht berücksichtigt werden	168
4.11.5	Abschätzung des Fehlers bzw. Konfidenzintervalls der Schäden und Kosten	169
4.12	Berechnung der Kosten des Klimawandels für den Obstbau	170
4.12.1	Gesamtkosten für Maßnahmen zur Reduzierung von Schäden	170
4.12.2	Kosten durch Schäden	171
4.12.3	Rentabilität von Maßnahmen	172
4.12.4	Gesamtkosten des Klimawandels und Gewinn durch Anpassungs- maßnahmen	173
4.13	Worst Case Szenarios	180
5	Ergebnisse	183
5.1	Mögliche klimatische Veränderungen in Hessen	183
5.2	Veränderungen in der Phänologie	189
5.2.1	Veränderungen im Blühbeginn, der Blühdauer und im Ende der Winterruhe	189
5.2.2	Veränderungen im Beginn der Pflückreife und Reifeperiodenlänge	193
5.3	Gefahr für unvollständige Brechung der Dormanz und Dormanzschaden	198
5.3.1	Veränderung im Ende der Winterruhe	199
5.3.2	Wahrscheinlichkeit für unvollständige Brechung der Dormanz beim Weinberger-Eggert Modell (Modell 1b) und $C^* = 1600$ CH	202
5.3.3	Beim Weinberger-Eggert Modell (Modell 1b) und $C^* = 1300$ CH und $C^* = 1000$ CH	207
5.3.4	Beim Dynamic Model (Modell 1g) und $C^* = 89$ CP	209
5.3.5	Beim Positive Utah Model (Modell 1f) und $C^* = 1920$ CU	212
5.3.6	Beim Positive Utah Model (Modell 1f) und $C^* = 1632$ CU	214
5.3.7	Chillingsumme $S_c(t_s)$ bis zum Stichtag t_s	216
5.3.8	Relatives Chilling-Defizit d_{rel}	218

5.3.9	NoReleaseProb \mathbf{P}_D , bezogen auf den Stichtag \mathbf{t}_s	219
5.3.10	Dormanzschaden \mathbf{s}_D^o ohne und \mathbf{s}_D^m mit Gegenmaßnahmen	220
5.3.11	Zusammenfassung	221
5.4	Veränderungen in der Gefahr von Spätfrost	222
5.4.1	Spätfrostwahrscheinlichkeiten	223
5.4.2	Frostschäden	224
5.4.3	Wahrscheinlichkeiten für Frostschäden	227
5.4.4	Anzahl von Frosttagen	227
5.4.5	Diskussion der Ergebnisse bezüglich Frost im Anhang H	229
5.4.6	Zusammenfassung	231
5.5	Veränderungen bei den durch den Apfelwickler hervorgerufenen Schäden	232
5.6	Wasserhaushalt, Fruchterträge und Bienenflugintensität	235
5.7	Schäden und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen	244
5.7.1	Geordnete Schäden und Gesamtschäden	244
5.7.2	Rentabilität und Kosten	261
5.7.2.1	Rentabilität der Maßnahmen bzw. Strategien	261
5.7.2.2	Die Kosten des Klimawandels	267
6	Diskussion	281
6.1	Unsicherheiten bei den phänologischen Modellen	283
6.2	Unsicherheiten bei den Klimamodellen	283
6.3	Unsicherheiten bei den Impaktmodellen	284
6.4	Konsequenzen	285
7	Offene Fragen und Ausblick	288
8	Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan	290
	Anhang	291
	Anhang A Modellübersicht	292
	Anhang B Mögliche klimatische Veränderungen in Hessen	293
	Anhang C Ergebnisse für den Blühbeginn	307
	Anhang D Ergebnisse für die Blühdauer	315
	Anhang E Ergebnisse für den Beginn der Pflückreife	319
	Anhang F Ergebnisse für die Länge der Reifeperiode	328
	Anhang G Dormanzergebnisse	334
G.1	Modell 1b, $\mathbf{C}^* = 1600$ CH und $\mathbf{t}_s = \mathbf{90}$ (31. März)	334
G.2	Modell 1b, $\mathbf{C}^* = 1600$ CH und $\mathbf{t}_s = \mathbf{200}$	339
G.3	Modell 1g, $\mathbf{C}^* = 89$ CP und $\mathbf{t}_s = \mathbf{90}$ (31. März)	340
G.4	Modell 1f, $\mathbf{C}^* = 1632$ CU und $\mathbf{t}_s = \mathbf{90}$ (31. März)	341
	Anhang H Frostergebnisse	343

H.1	FROSTPROB0	343
H.2	FROSTPROB1	347
H.3	FROSTPROB2	350
H.4	FROSTPROB3	353
H.5	FROSTSCHADEN	356
H.6	FROSTSCHADENSPROB0	360
H.7	FROSTSCHADENSPROB1	363
H.8	FROSTSCHADENSPROB2	366
H.9	FROSTTAGE0	369
Anhang I Apfelwicklerergebnisse		372
Anhang J Ergebnisse des Modells SIMWASER		376
J.1	Frühreifender Apfel	376
J.2	Spätreifender Apfel	381
J.3	Sauerkirche	385
J.4	Frühreifende Süßkirsche	389
J.5	Spätreifende Süßkirsche	393
J.6	Frühreifende Birne	397
J.7	Spätreifende Birne	401
J.8	Erdbeere	405
J.9	Wein	409
J.10	Pfirsich	413
J.11	Aprikose	417
J.12	Frühreifende Pflaume	421
J.13	Spätreifende Pflaume	425
J.14	Vergleich aller Fruchtarten	429
J.14.1	Feuchtmassenertrag	429
J.14.2	Ertragsschaden ohne Sommerberechnung	432
J.14.3	Ertragsschaden mit Sommerberechnung	435
J.14.4	Bewässerungsmenge	438
J.14.5	Transpirationsmenge	441
J.14.6	Bienenflugintensität	444
Anhang K Schäden und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen		446
K.1	Gesamtschäden	446
K.1.1	Tabellen	446
K.1.2	Bilder	453
K.2	Gesamtkosten des Klimawandels	464
K.2.1	Rentabilität der Maßnahmen bzw. Strategien	464
K.2.2	Kosten <i>KK</i> des Klimawandels (flächenspezifisch)	467
K.2.2.1	Tabellen	467
K.2.2.1.1	30-jährige Mittelwerte und Differenzen	467
K.2.2.1.2	Aufsummierte (akkumulierte) Kosten	474
K.2.2.2	Bilder	478
K.2.2.2.1	30-jährige Mittelwerte bzw. Differenzen	478

K.2.2.2	Jährlicher Verlauf der Kosten	487
K.2.2.3	Aufsummierte (akkumulierte) Kosten	495
K.2.3	Kosten <i>KKA</i> des Klimawandels (für ganz Hessen)	505
K.2.3.1	Tabellen	505
K.2.3.1.1	30-jährige Mittelwerte und Differenzen	505
K.2.3.1.2	Aufsummierte (akkumulierte) Kosten	512
K.2.3.2	Bilder	515
K.2.3.2.1	30-jährige Mittelwerte	515
K.2.3.2.2	Aufsummierte (akkumulierte) Kosten	517
Anhang L Eine alternative Methode zur Frostberechnung		519
L.1	Problemstellung	519
L.2	Alternative neue Methode	521
L.3	Bestimmung der unbekannt Parameter	525
L.4	Ergebnisse für den mittleren Frostschaden	528
L.4.1	Sensitivitätsanalyse	532
L.5	Abschätzung der Änderungen	533
L.6	Die Frostschäden bei konventionellen Phänomodellen	536
L.7	Mögliche Verbesserungen	538
L.8	Fazit	539
Literaturverzeichnis		541
Stichwortverzeichnis		550

Abkürzungsverzeichnis

Hier finden Sie eine Liste der wichtigsten Abkürzungen. Der Seitenverweis bezieht sich auf die erste Stelle im Text, an der die Abkürzung definiert wird. Eine umfangreichere Zusammenstellung von Stichwörtern und Abkürzungen finden Sie im **Stichwortverzeichnis** auf Seite 550, in dem auch ausführlichere “Seitenverweise” zu finden sind.

ΔTM	Jährlicher oberirdischer Trockenmassenzuwachs	160
A1B	SRES Szenario A1B (2001–2100)	4
C*	Chilling-Requirement	59
C20	Kontrolllauf C20 (1960–2000)	4
CLCT	Gesamtbedeckungsgrad	21
DAYLENGTH-Term	Term in der Forcing-Funktion der verbesserten phänologischen Modelle, welcher den Einfluss der Tageslänge berücksichtigt	81
<i>DPREC</i>	Drifted Total Precipitation	21
DOY	Day Of Year	59
d_{rel}	Relatives Chilling-Defizit	99
e	Dampfdruck des Wasserdampfs	14
ECLM	Regionales dynamisches Klimamodell ECHAM5-CLM	12
GCM	Global Climate Model oder General Circulation Model	12
<i>Glob</i>	Globalstrahlung	21
g-Strategie	Gemäßigte Schadensvermeidungsstrategie: Der Apfelwickler wird mit der <i>extensiven</i> Methode bekämpft. Zusätzlich wird bei Bedarf auch Sommerberegnung durchgeführt. Gegen die Nichtbrechung der Dormanz und gegen Frostschäden werden keine Maßnahmen getroffen	173
g-g-Strategie	Schadensvermeidungsstrategie: g-Strategie heute (1971–2000) und in der Zukunft (2001–2100)	175
HCLM	Regionales Klimamodell HadCM3-CLM	12
Hessenrechteck	Rechteckiger Ausschnitt, der Hessen enthält, und für den die meisten Rechnungen durchgeführt wurden (siehe Abb. 4.8)	15
HLUG	Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie	

K_{ges}	Gesamtkosten für Gegenmaßnahmen (ohne die Kosten durch die Schäden) 170
K_j	Kosten der Maßnahmen gegen Schadensursache j ; $j \in \{\text{Dormanz, Frost, Apfelwickler, Yield}\}$ 170
KK	Flächenspezifische Gesamtkosten des Klimawandels für den Obstbau (in € pro Hektar und Jahr; siehe Formel (4.198)) 175
KK_A	Gesamtkosten des Klimawandels für den Obstbau (in € pro Jahr), bezogen auf die gesamte Anbaufläche der betrachteten Obstart in Hessen (entspricht in etwa KK, multipliziert mit der Anbaufläche der betrachteten Obstart) 177
Max Wert	Maximaler Verkaufswert eines Produkts (der Jahresproduktion) (in € pro Hektar und Jahr) 171
m-Strategie	Maximale Schadensvermeidungsstrategie: Es werden optimale Maßnahmen gegen alle in dieser Arbeit betrachteten Schäden (Nichtbrechung der Dormanz, Spätfrost, Apfelwickler und Trockenheit) getroffen. Gegen den Apfelwickler wird die teurere, aber effektivere <i>intensive</i> Methode eingesetzt 174
m-g-Strategie	Schadensvermeidungsstrategie: g-Strategie heute (1971–2000) und m-Strategie in der Zukunft (2001–2100) 175
m-m-Strategie	Schadensvermeidungsstrategie: m-Strategie heute (1971–2000) und in der Zukunft (2001–2100) 175
m-o-Strategie	Schadensvermeidungsstrategie: o-Strategie heute (1971–2000) und m-Strategie in der Zukunft (2001–2100) 175
NoReleaseProbx	Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Dormanz bis zu einem Stichtag x (in DOY) im Jahr noch nicht gebrochen ist 98
o-Strategie	Keine (ohne) Schadensvermeidung: Es wird keinerlei Schadensbekämpfung durchgeführt, weder heute noch in der Zukunft 173
o-o-Strategie	Schadensvermeidungsstrategie: o-Strategie heute (1971–2000) und in der Zukunft (2001–2100) 175
OVA	Obstbauversuchsanstalt der LWK Niedersachsen 114
P_D	Identisch mit NoReleaseProbx 98
PRECIPTOT	Niederschlagssumme eines Tages 14
ps	Luftdruck am Boden 14
R	Niederschlagssumme 14
RCM	Regional Climate Model 12

<i>Rel2</i>	Relative Luftfeuchte	18
RUBA	Regionales Klimamodell REMO-UBA	12
s_A	Schaden durch den Apfelwickler	163
S_c(t_s)	Chilling-Summe bis zum Stichtag t _s	59
Sd	Sonnenscheindauer	14
s_D	Schaden durch Nichtbrechung der Dormanz	163
s_F	Frostschaden	163
s_{ges}	Gesamtschaden durch Nichtbrechung der Dormanz, Frost, Apfelwickler und Trockenheit etc.	166
SRES	S pecial R eport on E missions S cenarios	4
ss_j	“Geordneter” Yieldschaden	166
s_Y	Yieldschaden	160
T	Tagesmitteltemperatur	14
<i>Tdew</i>	Taupunkttemperatur	21
<i>TM</i>	Oberirdische Trockenmasse	137
Tn	Tagesminimumtemperatur	14
Tx	Tagesmaximumtemperatur	14
V₁₀	10 m-Windgeschwindigkeit	186
<i>VMAX</i>	Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit	14
WETTR	Regionales statistisches Klimamodell WETTREG-2010	12
WETTR0	Lauf 0 des Regionalen Klimamodells WETTREG-2010	22
WETTR9	Lauf 9 des Regionalen Klimamodells WETTREG-2010	22

Abbildungsverzeichnis

2.1	Arbeitsschritte und sich daraus ergebende Ergebnisse im Projekt CHARIKO.	10
3.1	Ablauf der in INKLIM-A geplanten Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels im Obst- und Weinbau	12
3.2	Chancen und Risiken des Klimawandels im Obst- und Weinbau	13
4.1	Klimastationen des DWD vor (links) und nach (rechts) den Nachlieferungen im November 2010.	15
4.2	Niederschlagsstationen des DWD nach der Nachlieferung im November 2010. Der rote Rahmen stellt das interessierende Hessenrechteck dar.	16
4.3	Anzahl der DWD-Stationen mit gültigen Werten im Hessenrechteck für einige ausgewählte Größen	16
4.4	Richtung der maximalen Windbö an der “Wind”-Station 2804	17
4.5	Korrekturfaktoren für die Sonnenscheindauer S_d für die WETTREG2010-Läufe 0 und 1.	23
4.6	Jahres- und Gebietsmittelwerte der Lufttemperatur in Hessen (Szenario A1B) (links); Jahresmittelwerte, gemittelt über alle Stationen in Hessen, für die Jahre aller Läufe zwischen 2001 und 2010 für WETTREG-2006 und -2010 (rechts)	24
4.7	Autokorrelationsfunktionen der Tagesmitteltemperatur T für WETTREG2006, WETTREG2010, aus DWD-Messungen und REMO-UBA (links); Auswirkungen der unrealistischen Autokorrelationsfunktion von WETTREG2010 auf Andauerstatistiken (rechts)	25
4.8	Gitterzellen und deren Höhen im “Hessenrechteck” in 0.1°- und 0.2°-Auflösung	33
4.9	Langjährige Monatsmittelwerte der Tagesminimumtemperatur und des Gesamtniederschlags (non drifted) aus den drei Modellen und aus gerasterten DWD-Messungen (Mittel über das Gebiet von Hessen)	36
4.10	Anzahl der Frosttage im Zeitraum 2001-2100, berechnet mit unkorrigierten und korrigierten REMO-UBA Tagesminimum-Temperaturen	37
4.11	Unkorrigierte und korrigierte Aprilmittelwerte von T_n in REMO-UBA im Zeitraum 1960-2100 an einem Gitterpunkt in der Nähe von Frankfurt am Main	38
4.12	Relative Häufigkeitsdichte (normiertes Histogramm) der relativen Feuchte $Rel2$ im Dezember aus DWD-Messungen, ECLM unkorrigiert und ECLM mit Potenzkorrektur (Breite der Histogramm-Klassen: 0.05).	40
4.13	Additive Korrektur am Gitterpunkt (17,12) (ab 0 gezählt) in der Nähe von Frankfurt/Main für die Tagesminimumtemperatur T_n , sowie Minimum und Maximum über alle Gitterpunkte im Hessenrechteck	41
4.14	Additive Korrektur als Funktion des Juliandays für T_n an einem Gitterpunkt in der Nähe von Frankfurt/Main. RUBA hat im Frühjahr signifikant zu große, HCLM zu kleine T_n	43

4.15	Jahresmittelwerte der Tagesminimumtemperatur T_n (Gebietsmittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte) aus REMO-UBA, ECHAM5-CLM und HadCM3-CLM (Szenario A1B)	45
4.16	Jahresmittelwerte der Tagesmitteltemperatur T (über 10 Jahre gleitend gemittelt) in den 10 WETTREG2010-Läufen	51
4.17	Differenz der 30-jährigen Mittelwerte der Aprilmittelwerte und der Jahresmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur für die 3 dynamischen Klimamodelle aus INKLIM-A, 9 weitere aus der Ensemble-Datenbank und die 10 WETTREG-Läufe	53
4.18	Varianz des Mittelwerts über die Mittelwerte der Modelle, wenn K Modellmittelwerte untereinander mit der Korrelation ρ korreliert sind	54
4.19	Obst- und Weinbaugebiete gemäß der CORINE Land Cover-Daten (links) und signifikante Obstanbaupixel (Baumobst und Beerenobstbestände) im Hessenrechteck.	56
4.20	Signifikante Weinbaupixel (links) und Erdbeeranbaupixel (rechts) im Hessenrechteck	57
4.21	Links: Beobachteter Blühbeginn und Blühende sowie berechnetes Blühende beim frühreifen Apfel (Mittelwert über alle 81 Gitterpunkte in Hessen); rechts: Zeitlicher Mittelwert (1962-2009) der Zeitspanne von Blühbeginn bis Blühende, berechnet aus beobachteten Werten.	63
4.22	Beginn der Pflückreife t_3 von spätreifem Apfel am Gitterpunkt 136. Beobachtung, altes Modell 10a und Modell 12a-R mit Angaben zum RMSE bei der Validierung (RMSE-VER) sowie RMSE der beiden möglichen <i>Nullmodelle</i> (=RMSE0).	64
4.23	Blühbeginn t_2 , Beginn der Pflückreife t_3 und Länge der Reifeperiode ($t_3 - t_2$) (zur besseren Vergleichbarkeit wurden 120 Tage abgezogen) bei spätreifem Apfel am Gitterpunkt 136 bei Frankfurt am Main. Regionalisierte Beobachtungswerte.	65
4.24	Verschiedene Ansätze für Forcing-Rate-Funktionen $R_f(T)$ für Modell 12a-R beim spätreifem Apfel, jeweils nach Raster-Optimierung über die 19 Obstanbaugitterpunkte.	72
4.25	Unbestimmtheitsbereich von F^* und T_{BF} . Beide Parameter können alle Werte auf der roten Kurve annehmen, ohne das sich das Modellergebnis verändert, solange nur $t_1 < t_s$ gilt.	76
4.26	Abhängigkeit des Termins des Blühbeginns als Funktion des <i>Temperaturniveaus</i> b für verschiedene Parametersätze (F^* , TBF) bei $t_1 = 1 = \text{const.}$	76
4.27	Abhängigkeit des Termins des Blühbeginns als Funktion des Temperaturniveaus b für verschiedene Parametersätze (F^* , T_{BF}) und verschiedene t_1	78
4.28	Trend $\partial t_2 / \partial b$ von t_2 als Funktion von T_{BF} für verschiedene Werte von t_1	78
4.29	Das Problem der zu großen C^* - bzw. zu späten t_1 -Werte in den Chilling-Forcing-Modellen, die nur die Temperatur als Einflussgröße enthalten	80
4.30	Prognose des Blühbeginns t_2 beim frühreifen Apfel, berechnet mit Modell 11a und REMO-UBA-Temperaturen (Szenario A1B) am Gitterpunkt 136 in der Nähe von Frankfurt/Main mit (blau) und ohne DAYLENGTH-Term	83

4.31	Scatter Plot der Residuen der prognostizierten t_2 -Werte beim frühreifen Apfel am Gitterpunkt 136 in der Nähe von Frankfurt am Main, berechnet mit Modell 12a mit DWD-Temperaturen; oben: ohne DAYLENGTH-Term (DL=0); unten: mit DAYLENGTH-Term (DL=1).	84
4.32	RMSE bei der Verifikation für den frühreifen Apfel bei Nutzung von Modell 29ba (rasteroptimiertes Gebietsmodell; siehe Kap. 4.6.6) ohne und mit DAYLENGTH-Term. (Graue Pixel besitzen Werte kleiner 2 d.)	85
4.33	Blühbeginn t_2 , berechnet mit Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term) für den Apfel am Gitterpunkt 136 mit DWD-Temperaturen und <i>Temperaturzuschlag</i> ΔT zu T , T_n und T_x . Mittelwert über alle Jahre von 1962-2009.	87
4.34	Termin der Dormanzbrechung t_1 , berechnet mit Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term) für den Apfel am Gitterpunkt 136 mit DWD-Temperaturen und <i>Temperaturzuschlag</i> ΔT zu T , T_n und T_x . Mittelwert über alle Jahre von 1962-2009.	88
4.35	Dormanzschaden ohne s_D^o und mit s_D^m Gegenmaßnahmen als Funktion des relativen Chilling-Defizits d_{rel}	100
4.36	Späteste Dormanzbrechungstermine t_1 beim Chilling-Modell 1g und $C^* = 89$ CP bei Nutzung der Temperaturen der 5 Klimamodellläufe im Szenario A1B.	103
4.37	Die relative Feuchte <i>Rel</i> (Tagesmittelwert) und die daraus berechnete relative Feuchte zum Zeitpunkt t_n an einem Gitterpunkt in der Nähe von Frankfurt/Main	110
4.38	Modifizierte Feuchttemperatur T_{mf} und aus der Energiebilanz geschätzte Bestandstemperatur T_{veg} als Funktion der relativen Luftfeuchte <i>Rel</i> für verschiedene Windgeschwindigkeiten V_{10}	112
4.39	Ansätze für die Schäden F_s (bzw. s_F) an den Blüten und an den Früchten als Funktion der Bestandstemperatur T_{veg}	113
4.40	Mittlere Anzahl der Frosttage pro Jahr im S-Zeitraum beim Apfel mit und ohne Sondermodus	119
4.41	“Entwicklungszustandsparameter” <i>DEVSTG</i> bei spätreifem Apfel am Gitterpunkt 136 im Jahr 1974, berechnet mit DWD-Wetterdaten. Vier verschiedene Ansätze.	134
4.42	Verschiedene empirische Funktionen für Pseudobäume	139
4.43	Relative Bienenflugintensität im Jahr 1968 und 1969 am Gitterpunkt 136 bei Frankfurt am Main, berechnet mit DWD-Messungen.	145
4.44	CO ₂ -Konzentration im SRES-Szenario A1B und relative <i>Netto Photosynthese-Rate</i>	147
4.45	Jährlicher Zuwachs ΔTM der Trockenmasse beim frühreifen Apfel mit und ohne CO ₂ -Düngeeffekt am Gitterpunkt 136	149
4.46	Transpirationsmenge <i>SUMTRSV</i> von Blühbeginn bis zur Reife beim frühreifen Apfel mit und ohne CO ₂ -Düngeeffekt am Gitterpunkt 136	150
4.47	Notwendige jährliche Bewässerungsmenge <i>SUMBEW</i> von Blühbeginn bis zur Reife beim frühreifen Apfel mit und ohne CO ₂ -Düngeeffekt am Gitterpunkt 136	150
4.48	Verifikation über Dauerbrache in Berlin-Dahlem	152
4.49	Verifikation von SIMWASER mit Süßkirsche (2010-2011)	154

4.50	Bodendaten (BN_ID) des HLOG für Hessen in den “signifikanten” Obst- und Weinanbaugitterpunkten	155
4.51	Relative Häufigkeit der am häufigsten vorkommenden Feinbodenart im obersten Horizont für jeden der 24 “signifikanten” Obst- und Weinbaugitterpunkte, bezogen nur auf die “signifikante” Obst- und Weinbaufläche.	157
5.1	Langjährige Mittelwerte (1971-2000) der Monatssummen des Gesamtniederschlags <i>PRECIPTOT</i> für verschiedene RCM’s und DWD-Messungen (Gebietsmittelwert über das politische Hessen); links: unkorrigiert; rechts: mit BIAS-Korrektur	184
5.2	Änderung des monatlichen Gesamtniederschlags	185
5.3	Differenz der langjährigen Mittelwerte der Monatsmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur T	185
5.4	Differenz der langjährigen Mittelwerte der saisonalen Mittelwerte der 2 m-Lufttemperatur T	186
5.5	Langjährige Mittelwerte (1971-2000) der Monatsmittelwerte der 10 m-Windgeschwindigkeit V_{10}	187
5.6	Langjährige Mittelwerte (2071-2100) der Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte <i>Rel2</i>	188
5.7	“ Release of Dormancy t_1 ” (links) und Blühbeginn t_2 (rechts) beim frühreifen Apfel, berechnet mit Modell 29ba mit DAYLENGTH-Term.	189
5.8	“Release of Dormancy t_1 ” (links) und Blühbeginn t_2 (rechts) beim frühreifen Apfel, berechnet mit verschiedenen phänologischen Modellen ohne (oben) und mit (unten) DAYLENGTH-Term.	190
5.9	links: Mittelwerte der Termine des Blühbeginns (oben: 1971-2000; unten: 2071-2100); rechts: Differenz der Blühbeginnstermine (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 Klimamodelle und das Mittel über diese 5 Klimamodelle.	191
5.10	links: Mittelwerte der Termine des Blühbeginns (oben: 1971-2000; unten: 2071-2100); rechts: Differenz der Blühbeginnstermine (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 Klimamodelle und das Mittel über diese 5 Klimamodelle.	192
5.11	Beginn der Pflückreife t_3 von frühreifem Apfel, berechnet mit Modell 12a-R.	194
5.12	links: Mittelwerte der Termine des Beginns der Pflückreife (oben: 1971-2000; unten: 2071-2100); rechts: Differenz der Reifeterminen (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 Klimamodelle und das Mittel über diese 5 Klimamodelle.	195
5.13	Differenz der Länge der Reifeperiode (2071-2100)-(1971-2000) beim spätreifen Apfel gemäß Modell-12a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM’s.	196
5.14	Differenz der Länge der Reifeperiode (2071-2100)-(1971-2000) bei der frühreifen Süßkirsche gemäß Modell-10a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM’s.	196
5.15	Differenz der Länge der Reifeperiode (2071-2100)-(1971-2000) beim Wein gemäß Modell-10a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM’s.	197
5.16	Mögliche Verschiebung der phänologischen Phasen für früh- und spätreifen Apfel, 2071-2100 vs. 1971-2000, Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe	198

5.17	Veränderung des Dormanzbrechungstermins t_1 (2071-2100 vs. 1971-2000) als Funktion von C^* beim Chilling- Modell 1b (Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen)	200
5.18	Veränderung des Dormanzbrechungstermins t_1 (2071-2100 vs. 1971-2000) als Funktion von C^* bei Modell 1f (Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen)	201
5.19	Veränderung des Dormanzbrechungstermins t_1 (2071-2100 vs. 1971-2000) als Funktion von C^* bei Modell 1g (Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen)	201
5.20	NoReleaseProb200 und NoReleaseProb90 für den Zeitraum 1971-2000 und 2071-2100 für die 5 RCM's gemäß Modell 1b bei $C^* = 1600$ CH	202
5.21	Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 2002-2100 für alle 81 Gitterpunkte in Hessen bei $C^* = 1600$ CH und Modell 1b	204
5.22	Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 1962-2009 bzw. 1962-2000 für alle 81 Gitterpunkte in Hessen bei $C^* = 1600$ CH und Modell 1b	205
5.23	Räumliche Mittelwerte der "NoReleaseProb90" über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen aus DWD-Temperaturen und aus den 5 RCM's. Modell 1b, $t_s = 90$ und $C^* = 1600$ CH.	206
5.24	Änderung, Trend und Differenz der NoReleaseProb90 für die 5 RCM's für Modell 1b, $C^* = 1600$ CH und $t_s = 90$	207
5.25	Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 2002-2100 bei Verwendung von HCLM-Temperaturen gemäß Modell 1b bei $C^* = 1300$ CH und $C^* = 1000$ CH	208
5.26	Mittelwerte der NoReleaseProb90 sowie Änderung und Trend für die 5 RCM's; Modell 1g, $C^* = 89$ CP und $t_s = 90$	209
5.27	Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 1962-2000 und 2002-2100 (RUBA) gemäß Modell 1g bei $C^* = 89$ CP	211
5.28	NoReleaseProb90 für 1971-2000 und 2071-2100 sowie Änderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) und Trend (2011-2100) für die 5 RCM's und den Mittelwert über diese 5 Modelle; Modell 1f, $C^* = 1920$ CU und $t_s = 90$	212
5.29	Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 1962-2000 (RUBA C20) und 2002-2100 (RUBA A1B) für alle 81 Gitterpunkte in Hessen gemäß Modell 1f bei $C^* = 1920$ CU	213
5.30	NoReleaseProb90 für 1971-2000 und für 2071-2100 sowie Änderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) und Trend (2011-2100) für die 5 RCM's und den Mittelwert über diese 5 Modelle. Modell 1f, $C^* = 1632$ CU und $t_s = 90$	214
5.31	Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 1962-2000 (RUBA C20) und 2002-2100 (RUBA A1B) gemäß Modell 1f bei $C^* = 1632$ CU	215
5.32	Monatsmitteltemperaturen der Monate September bis November und Schwellenwerte des Modell 1f	216
5.33	Wahrscheinlichkeit $P_{F,0}$ (= FROSTPROB0) für das Auftreten von Frost der "Stärke 0"	223
5.34	Differenz der Spätfrostwahrscheinlichkeiten $P_{F,0}$ (= FROSTPROB0) bei t_{Vor} (= IDTV) = 10 d	224
5.35	Wahrscheinlichkeit $P_{F,x}$ (= FROSTPROBx) für das Auftreten von Frost der "Stärke $x = 1$ " (links) und " $x = 2$ " (rechts) (1971-2000)	224

5.36	links: Frostschaden s_F (an den Früchten!) (1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten)) beim Apfel; rechts: Differenz der Frostschäden s_F (2071-2100 vs. 1971-2000) (oben) und Trend (2011-2100) (unten).	225
5.37	Jährlicher Verlauf des Gebietsmittelwerts der Frostschäden in den 5 Modellen für Apfel. Links: Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen. Rechts: Mittelwert nur über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte.	226
5.38	links: Wahrscheinlichkeit s_F^{0-10} (= FROSTSCHADENSROB0) für Frostschäden (an den Früchten!) der “Stärke 0”; rechts: Wahrscheinlichkeit s_F^{10-50} (= FROSTSCHADENSROB1) für Frostschäden der “Stärke 1”	227
5.39	Links: Mittlere Anzahl von Frosttagen n_F^0 (= FROSTTAGE0) (mit “Stärke 0” im Sondermodus) sowie Differenz und Trend	228
5.40	Differenz der Monatsmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur T und der Tagesminimumtemperatur T_n	229
5.41	Apfelwicklergenerationsindex I_A als Funktion der Zeit, gemittelt über die 19 Obstanbaugitterpunkte, berechnet mit den Temperaturen der 5 regionalen Klimamodelle.	232
5.42	Wahrscheinlichkeit $Prob_k$, dass der Apfelwicklergenerationsindex I_A den Wert k annimmt (Mittelwerte über je 30 Jahre, über die 19 Obstanbaugitterpunkte und die 5 Klimamodelle).	233
5.43	Apfelwicklerschaden s_A ohne, mit extensiver Bekämpfungsmethode und ‘mit extensiver im Zeitraum 1971-2000 und danach mit intensiver Bekämpfungsmethode’ (Mittelwerte über je 30 Jahre, über die 19 Obstanbaugitterpunkte und die 5 Klimamodelle).	234
5.44	Relativer Ertragsschaden s_Y (1971-2000) beim frühreifen Apfel ohne Bewässerung	235
5.45	Veränderung (2071-2100)-(1971-2000) des relativen Ertragsschadens s_Y beim frühreifen Apfel ohne Bewässerung	236
5.46	Relativer Ertragsschaden s_Y (1971-2000) beim frühreifen Apfel mit Bewässerung	237
5.47	Veränderung (2071-2100)-(1971-2000) des relativen Ertragsschadens s_Y beim frühreifen Apfel mit Bewässerung	237
5.48	“Notwendige Bewässerungsmenge $SUMBEW$ (1971-2000) vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel	238
5.49	Veränderung (2071-2100)-(1971-2000) der “notwendigen Bewässerungsmenge $SUMBEW$ vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel	239
5.50	“ Transirationsmenge $SUMTRSV$ (1971-2000) vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel	240
5.51	Veränderung (2071-2100)-(1971-2000) der “ Transirationsmenge $SUMTRSV$ vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel	240
5.52	Relative Bienenflugintensität während der Blüte beim frühreifen Apfel, berechnet mit den Klimawerten der 5 RCM’s und mit DWD-Werten. Jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte.	241
5.53	Mittlere relative Bienenflugintensität (1971-2000) während der Blütezeit beim frühreifen Apfel	242
5.54	Veränderung der mittleren relativen Bienenflugintensität (2071-2100)-(1971-2000) während der Blütezeit beim frühreifen Apfel	242

5.55	Geordnete Schäden bei der Strategie g-g	245
5.56	Veränderung der geordneten Schäden bei Strategie g-g	245
5.57	Veränderung der geordneten Schäden bei Strategie g-g und nur 3 Klima- modellläufen	246
5.58	Geordnete Schäden bei der Strategie g-g mit CO ₂ -Düngung	247
5.59	Veränderung der geordneten Schäden bei Strategie g-g mit CO ₂ -Düngung	247
5.60	Geordnete Schäden bei der Strategie g-g, RUBA und Modellmittel	248
5.61	Geordnete Schäden bei der Strategie g-g mit Worst Case 20 %	249
5.62	Veränderung der geordneten Schäden bei Strategie g-g und Worst Case 20 %	249
5.63	Geordnete Schäden bei der Strategie m-g	250
5.64	Veränderung der geordneten Schäden bei Strategie m-g	251
5.65	Gesamtschäden bei der Strategie m-g beim frühreifen Apfel	252
5.66	Verlauf der Gesamtschäden bei der Strategie m-g beim frühreifen Apfel	253
5.67	Unsicherheiten beim Gesamtschaden bei der Strategie m-g beim frühreifen Apfel, 3 Fälle	254
5.68	Unsicherheiten beim Gesamtschaden bei der Strategie m-g beim frühreifen Apfel, 2 Fälle	255
5.69	Verlauf der Gesamtschäden bei der Strategie g-g beim frühreifen Apfel	256
5.70	Unsicherheiten beim Gesamtschaden bei der Strategie g-g beim frühreifen Apfel (3 Fälle)	257
5.71	Unsicherheiten beim Gesamtschaden bei der Strategie g-g beim frühreifen Apfel (2 Fälle)	257
5.72	Mittlerer Nettogewinn 1971-2000 und 2071-2100, Strategie g anstelle von Strategie o	261
5.73	Mittlerer Nettogewinn 1971-2000 und 2071-2100, Strategie m anstelle von Strategie o	262
5.74	Mittlerer Nettogewinn 1971-2000 und 2071-2100, Strategie m anstelle von Strategie g	263
5.75	Anteil der Schäden und Maßnahmen am Nettogewinn, 2071-2100, Strategie m anstelle von Strategie g	263
5.76	Akkumulierter Nettogewinn (ab 2002) beim frühreifen Apfel, Strategie m anstelle von Strategie g	264
5.77	Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an <i>KK</i> bei den verschiedenen Obstarten, Strategie g-g	268
5.78	Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an <i>KK</i> bei den verschiedenen Obstarten, Strategie m-g	269
5.79	Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an <i>KK</i> bei den verschiedenen Obstarten, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	270
5.80	Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an <i>KK</i> bei den verschiedenen Obstarten, Strategie m-g, mit Worst Case 20 %	270
5.81	Kosten <i>KK</i> des Klimawandels beim frühreifen Apfel; Vergleich der 5 Mo- delle, Strategie m-g	271
5.82	Schematische Darstellung zweier unabhängiger Realisierungen von $KK_{g,j}^{B-A}(j)$ mit jeweils Strategiekombination g-g und m-g bei z. B. der Pflau- me.	280
B.1	Tagesmitteltemperatur T (jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe)	304

B.2	Tagesmaximumtemperatur T_x	304
B.3	Tagesminimumtemperatur T_n	305
B.4	Relative Luftfeuchte $Rel2$	305
B.5	Taupunkttemperatur T_{dew}	305
B.6	10 m-Windgeschwindigkeit V_{10}	305
B.7	Gesamtniederschlag $PRECIPTOT$	305
B.8	Gesamtbedeckungsgrad $CLCT$	305
B.9	Globalstrahlung $Glob$	306
B.10	Luftdruck p_s am Boden	306
C.1	Termin des mittleren Blühbeginns t_2 für verschiedene Obstarten	314
C.2	Veränderung des Termins des mittleren Blühbeginns t_2 für verschiedene Obstarten	314
D.1	Mittlere Blühdauer für verschiedene Obstarten	318
D.2	Veränderung der mittleren Blühdauer für verschiedene Obstarten	318
E.1	Termin des mittleren Beginns der Pflückreife t_3 für verschiedene Obstarten (aus Beobachtungen)	326
E.2	Termin des mittleren Beginns der Pflückreife t_3 für verschiedene Obstarten (modelliert)	327
E.3	Veränderungen des Termins des mittleren Beginns der Pflückreife t_3 für verschiedene Obstarten (modelliert)	327
F.1	Mittlere Länge der Reifeperiode ($t_3 - t_2$) für verschiedene Obstarten (modelliert)	333
F.2	Veränderungen der mittleren Länge der Reifeperiode ($\Delta(t_3 - t_2)$) für verschiedene Obstarten (modelliert)	333
G.1	Veränderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) bei Modell 1b und $C^* = 1600$ CH; Mittelwert über alle 81 Gitterpunkte in Hessen.	336
G.2	Veränderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) bei Modell 1b und $C^* = 1600$ CH; Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen.	337
G.3	Veränderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) bei Modell 1b und $C^* = 1600$ CH; Mittelwert über die 8 Weinbaugitterpunkte in Hessen.	337
G.4	Veränderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) bei Modell 1b und $C^* = 1600$ CH; Mittelwert über die 4 Erdbeergitterpunkte in Hessen.	338
H.1	Mittelwert (1971-2000) der FROSTPROB0	345
H.2	Veränderung der FROSTPROB0	346
H.3	Mittelwert (1971-2000) der FROSTPROB1	349
H.4	Veränderung der FROSTPROB1	349
H.5	Mittelwert (1971-2000) der FROSTPROB2	352
H.6	Veränderung der FROSTPROB2	352
H.7	Mittelwert (1971-2000) der FROSTPROB3	355

H.8	Veränderung der FROSTPROB3	355
H.9	Mittelwert (1971-2000) des FROSTSCHADENS s	358
H.10	Veränderung des FROSTSCHADENS s	359
H.11	Mittelwert (1971-2000) der FROSTSCHADENS PROB0	362
H.12	Veränderung der FROSTSCHADENS PROB0	362
H.13	Mittelwert (1971-2000) der FROSTSCHADENS PROB1	365
H.14	Veränderung der FROSTSCHADENS PROB1	365
H.15	Mittelwert (1971-2000) der FROSTSCHADENS PROB2	368
H.16	Veränderung der FROSTSCHADENS PROB2	368
H.17	Mittelwert (1971-2000) der FROSTTAGE0	371
H.18	Veränderung der FROSTTAGE0	371
J.1	Feuchtmassenertrag (1971-2000) mit Bewässerung für alle Fruchtarten . . .	431
J.2	Veränderung des Feuchtmassenertrags (2071-2100)-(1971-2000) mit Bewässerung für alle Fruchtarten	431
J.3	Ertragsschäden s_Y (1971-2000) für alle Fruchtarten ohne Bewässerung . . .	433
J.4	Veränderung Δs_Y der Ertragsschäden s_Y (2071-2100)-(1971-2000) ohne Bewässerung	434
J.5	Ertragsschäden s_Y (1971-2000) für alle Fruchtarten mit Bewässerung . . .	436
J.6	Veränderung Δs_Y der Ertragsschäden s_Y (2071-2100)-(1971-2000) mit Bewässerung	437
J.7	Mittlere jährliche Bewässerungsmenge <i>SUMBEW</i> (1971-2000)	439
J.8	Veränderung $\Delta SUMBEW$ der mittleren jährlichen Bewässerungsmenge (2071-2100)-(1971-2000)	440
J.9	Mittlere jährliche Transpirationsmenge <i>SUMTRSV</i> (1971-2000)	442
J.10	Veränderung $\Delta SUMTRSV$ der mittleren jährlichen Transpirationsmenge (2071-2100)-(1971-2000)	443
J.11	Mittlere Bienenflugintensität <i>MFlyIntBlueh</i> (1971-2000)	445
J.12	Veränderung $\Delta MFlyIntBlueh$ der mittleren Bienenflugintensität (2071-2100)-(1971-2000)	445
K.1	Gesamtschaden 1971-2000, Strategie x-o	453
K.2	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie o-o	454
K.3	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-o	454
K.4	Gesamtschaden 1971-2000, Strategie x-g	455
K.5	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie g-g	455
K.6	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe .	456
K.7	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie g-g, mit CO ₂ -Düngung	456
K.8	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie g-g, Worst Case 20 %	457
K.9	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g	457
K.10	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	458
K.11	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, Worst Case 20 %	458
K.12	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, Worst Case 10 %	459
K.13	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, Worst Case 7 %	459
K.14	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, Worst Case 5 %	460
K.15	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, Worst Case 4 %	460
K.16	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, Worst Case 3 %	461

K.17 Gesamtschaden 1971-2000, Strategie x-m	462
K.18 Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-m	462
K.19 Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-m, mit CO ₂ -Düngung	463
K.20 Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-m, Worst Case 20 %	463
K.21 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie o-o	478
K.22 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-o	479
K.23 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g	479
K.24 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe	480
K.25 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, mit CO ₂ -Düngung	480
K.26 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, Worst Case 20 %	481
K.27 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g	481
K.28 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	482
K.29 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 20 %	482
K.30 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 10 %	483
K.31 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 7 %	483
K.32 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 5 %	484
K.33 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 4 %	484
K.34 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 3 %	485
K.35 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-m	485
K.36 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-m, mit CO ₂ -Düngung	486
K.37 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-m, Worst Case 20 %	486
K.38 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, beim frühreifen Apfel	487
K.39 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, beim frühreifen Apfel	487
K.40 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g mit 3 Modell- Variationen, beim frühreifen Apfel	488
K.41 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g mit 3 Modell- Variationen, beim frühreifen Apfel	488
K.42 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, beim spätreifen Apfel	489
K.43 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, beim spätreifen Apfel	489
K.44 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g mit 3 Modell- Variationen, beim spätreifen Apfel	490
K.45 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g mit 3 Modell- Variationen, beim spätreifen Apfel	490
K.46 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, bei der Sauerkirsche	491
K.47 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, bei der Sauerkirsche	491
K.48 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g mit 3 Modell- Variationen, bei der Sauerkirsche	492
K.49 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g mit 3 Modell- Variationen, bei der Sauerkirsche	492
K.50 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, beim Wein	493
K.51 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, beim Wein	493
K.52 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g mit 3 Modell- Variationen, beim Wein	494
K.53 Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g mit 3 Modell- Variationen, beim Wein	494
K.54 Akkumulierte Gesamtkosten Σ <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, beim frühreifen Apfel	495

K.55	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g, beim frühreifen Apfel	495
K.56	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie g-g mit 3 Modell-Variationen, beim frühreifen Apfel	496
K.57	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g mit 3 Modell-Variationen, beim frühreifen Apfel	496
K.58	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie g-g, beim spätreifen Apfel	497
K.59	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g, beim spätreifen Apfel	497
K.60	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie g-g mit 3 Modell-Variationen, beim spätreifen Apfel	498
K.61	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g mit 3 Modell-Variationen, beim spätreifen Apfel	498
K.62	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie g-g, bei der Sauerkirsche	499
K.63	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g, bei der Sauerkirsche	499
K.64	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie g-g mit 3 Modell-Variationen, bei der Sauerkirsche	500
K.65	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g mit 3 Modell-Variationen, bei der Sauerkirsche	500
K.66	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie g-g, beim Wein	501
K.67	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g, beim Wein	501
K.68	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie g-g mit 3 Modell-Variationen, beim Wein	502
K.69	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g mit 3 Modell-Variationen, beim Wein	502
K.70	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g, alle Obstarten	503
K.71	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung, alle Obstarten	504
K.72	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g, mit Worst Case 20 %, alle Obstarten	504
K.73	Gesamtkosten KKA des Klimawandels für ganz Hessen, Strategie m-g . . .	515
K.74	Gesamtkosten KKA des Klimawandels für ganz Hessen, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	516
K.75	Gesamtkosten KKA des Klimawandels für ganz Hessen, Strategie m-g, Worst Case 20 %	516
K.76	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels für ganz Hessen, Strategie m-g	517
K.77	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels für ganz Hessen, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	518
K.78	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels für ganz Hessen, Strategie m-g, mit Worst Case 20 %	518

L.1	Histogramm für Frostschäden nach der alten Methode	520
L.2	Verteilungsfunktion der T_n der Tage 61. . . 120 DOY für 1971-2000, berechnet aus echten DWD- T_n 's und aus Gleichung (L.2) (abzüglich Trend in t) nach Anpassung der Parameter (siehe Text).	525
L.3	Autokorrelationsfunktion der T_n aus Beobachtungen (DWD), aus Monte-Carlo-Simulation und theoretischer Verlauf [Gleichung (L.9)].	526
L.4	Alle T_n der Tage 60 bis 150 und der Jahre 1961 bis 2000 (regionalisierte DWD-Beobachtungen am Gitterpunkt 136)	527
L.5	Der Frühjahrsverlauf von T_n in den Jahren 1961 und 1962 am Gitterpunkt 136	527
L.6	Mit Monte-Carlo-Methode berechnetes Histogramm (Verteilungsfunktion) ohne Randwerte	529
L.7	Mit Monte-Carlo-Methode berechnete kumulative Verteilungsfunktion ohne Randwerte	530
L.8	Mit Monte-Carlo-Methode berechnete Verteilungsfunktion mit Rand-Peaks	530
L.9	Mit Monte-Carlo-Methode berechnete kumulative Verteilungsfunktion mit Rand-Peaks	531
L.10	T_n in WETTREG2010-Lauf1 im Kontrolllauf C20 und Szenario A1B für die Tage 60-150	536
L.11	T_n im HadCM3-CLM im Kontrolllauf C20 und Szenario A1B für die Tage 60-150.	538

Tabellenverzeichnis

4.1	Vom DWD für INKLIM-A zur Verfügung gestellte Daten. Rote Einträge weisen auf ein uneinheitliches Format, fehlende Daten oder Fehler hin.	20
4.2	Bartel'sche Erhaltungszahlen für die Tagesmitteltemperatur in WETTREG2006 und WETTREG2010	26
4.3	Zur Verfügung stehende gerasterte DWD-Daten, bei denen die nachgelieferten DWD-Stationen berücksichtigt wurden.	28
4.4	Von der HU-Berlin umgerechnete 1 km-Rasterdaten. Alle Größen außer WIND10 und WIND80 liegen als Monatsmittelwerte für 1961-2009 vor. Für WIND10 und WIND80 existiert nur jeweils ein einziger Mittelwert für 1981-2000.	30
4.5	Zur Verfügung stehende gerasterte phänologische Daten	31
4.6	Von der HU-Berlin vereinheitlichte (normalisierte) Modelldaten.	34
4.7	Zur Verfügung stehende gerasterte WETTREG2010-Daten	35
4.8	Korrigierte Modelldaten für RUBA, ECLM und HCLM für das Hessenrechteck. HES01 (0.1°-Auflösung) für RUBA, HES02 (0.2°-Auflösung) für RUBA, CLM und HCLM.	42
4.9	Mittelwerte des RMSE über die 81 Gitterpunkte im politischen Hessen für den frühreifen Apfel	84
4.10	Optimale Modellparameter zur Berechnung des Blühbeginns für Modell 29ba mit DAYLENGTH-Faktor.	92
4.11	Optimale Modellparameter zur Berechnung des Blühbeginns für Modell 29fa mit DAYLENGTH-Faktor.	93
4.12	Optimale Modellparameter zur Berechnung des Blühbeginns für Modell 29ga mit DAYLENGTH-Faktor.	94
4.13	Optimale Modellparameter zur Berechnung des Blühbeginns für Modell 12a ohne und mit DAYLENGTH-Faktor.	94
4.14	Optimale Modellparameter zur Berechnung des Blühendes aus dem Blühbeginn für Modell 10a (ohne DAYLENGTH-Faktor).	95
4.15	Optimale Modellparameter zur Berechnung des Beginns der Pflückreife für Modell 10a-R bzw. Modell 12a-R (im Reifemodus).	96
4.16	Stichtag t_s zur Berechnung des relativen Chilling-Defizits d_{rel} und verwendete Werte des Chilling-Requirements im Standardfall ($C_{Standard}^*$) und Maximalfall (C_{max}^*) für Modell 1g.	101
4.17	Kritische Temperaturen für 10 % und 90 % Schaden an den Blüten für die 3 Zeiträume vor dem BB, zwischen BB und BE und nach BE.	114
4.18	Apfelwicklergenerationsindex I_A , Schäden s_A^o ohne Behandlung und Schäden s_A^{ext} bzw. s_A^{int} und Bekämpfungskosten K_A^{ext} bzw. K_A^{int} bei intensiver und extensiver Behandlung. Die Angaben zu Schäden und Kosten beziehen sich auf den Apfel.	122
4.19	Zuordnung der Grobbodenklasse GROBBREP zum Volumenanteil Relgrob des Grobbodens am Gesamtvolumen des betrachteten Horizonts.	126

4.20	Angepasste Parameter für Gleichung (4.170) für unterschiedliche Temperaturbereiche	144
4.21	Verifikation über Dauerbrache (1953-2003) in Berlin-Dahlem	153
4.22	Verifikation über Sommergerste (bzw. Grassland und Brache im <i>Herbst, Winter und Frühjahr</i>) in Berlin-Dahlem (1953-2003)	153
4.23	c_{Ernte} für die verschiedenen Fruchtarten. Für die früh- und spätreifenden Sorten wurde jeweils derselbe Wert gewählt.	159
4.24	Schäden bei unterschiedlichen Strategien	174
4.25	Kosten bei unterschiedlichen Strategien	175
4.26	Bei den Kostenberechnungen verwendeter Fruchtpreis, Fruchtertrag, <i>Max-Wert</i> und Anbaufläche als Funktion der Fruchtart.	179
5.1	Änderung des monatlichen Gesamtniederschlags	184
5.2	Differenz der langjährigen Mittelwerte der Monatsmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur T	186
5.3	Statistik für die Chillingsumme $S_c(t_s)$ (in CH) bis zum Stichtag t_s beim Apfel (Modell 1b)	217
5.4	Statistik für die Chillingsumme $S_c(t_s)$ (in CH) bis zum Stichtag t_s bei den unterschiedlichen Obstarten (Modell 1b)	217
5.5	Statistik für die Chillingsumme $S_c(t_s)$ (in CP) bis zum Stichtag t_s beim Apfel (Modell 1g)	218
5.6	Statistik für die Chillingsumme $S_c(t_s)$ (in CP) bis zum Stichtag t_s bei den unterschiedlichen Obstarten (Modell 1g)	218
5.7	Statistik für das relative Chillingdefizit d_{rel} (in %) bei maximalen C^* -Werten bei den unterschiedlichen Obstarten (Modell 1b)	219
5.8	Statistik für das relative Chillingdefizit d_{rel} (in %) bei maximalen C^* -Werten bei den unterschiedlichen Obstarten (Modell 1g)	219
5.9	Statistik für die NoReleaseProb P_D (in %), bezogen auf die t_s -Werte aus Tabelle 4.16, bei den unterschiedlichen Obstarten (Modell 1b , bei maximalen C^* -Werten, Worst Case: AUS)	219
5.10	Statistik für den Dormanzschaden s_D^0 ohne Gegenmaßnahmen (in %) bei maximalen C^* -Werten bei den unterschiedlichen Obstarten (Modell 1b, Worst Case: AUS)	220
5.11	Statistik für den Dormanzschaden s_D^0 ohne Gegenmaßnahmen (in %) bei maximalen C^* -Werten bei den unterschiedlichen Obstarten (Modell 1b, Worst Case: 20%)	221
5.12	Statistik für den Dormanzschaden s_D^m mit Gegenmaßnahmen (in %) bei maximalen C^* -Werten bei den unterschiedlichen Obstarten (Modell 1b, Worst Case: 20%)	221
5.13	Statistik für den Gesamtschaden s_{ges} (in %) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim frühreifen Apfel	259
5.14	Statistik für den Gesamtschaden s_{ges} (in %) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim spätreifen Apfel	259
5.15	Statistik für den Gesamtschaden s_{ges} (in %) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim Wein	260

5.16	Statistik für den Nettogewinn (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim frühreifen Apfel	266
5.17	Statistik für den Nettogewinn (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim spätreifen Apfel	266
5.18	Statistik für den Nettogewinn (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen bei der Sauerkirsche	266
5.19	Statistik für den Nettogewinn (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim Wein	267
5.20	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim frühreifen Apfel	272
5.21	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim spätreifen Apfel	273
5.22	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim Wein	273
5.23	Statistik für die Gesamtkosten <i>KKA</i> des Klimawandels (in 1000 €/Saison) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim frühreifen Apfel	274
5.24	Statistik für die Gesamtkosten <i>KKA</i> des Klimawandels (in 1000 €/Saison) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim spätreifen Apfel	275
5.25	Statistik für die Gesamtkosten <i>KKA</i> des Klimawandels (in 10 000 €/Saison !!!) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim Wein	275
A.1	Modellansätze zur Modellierung der phänologischen Phasen, die im Rahmen von INKLIM-A verwendet wurden.	292
B.1	Statistik für die Tagesmitteltemperatur T (Monatsmittelwerte in °C)	294
B.2	Statistik für die Tagesmitteltemperatur T (saisonale Mittelwerte in °C)	294
B.3	Statistik für die Tagesmitteltemperatur T (Jahresmittelwerte in °C)	295
B.4	Statistik für die Tagesmaximumtemperatur Tx (Monatsmittelwerte in °C)	295
B.5	Statistik für die Tagesmaximumtemperatur Tx (saisonale Mittelwerte in °C)	295
B.6	Statistik für die Tagesmaximumtemperatur Tx (Jahresmittelwerte in °C)	296
B.7	Statistik für die Tagesminimumtemperatur Tn (Monatsmittelwerte in °C)	296
B.8	Statistik für die Tagesminimumtemperatur Tn (saisonale Mittelwerte in °C)	296

B.9	Statistik für die Tagesminimumtemperatur Tn (Jahresmittelwerte in °C)	297
B.10	Statistik für die relative Luftfeuchte Rel2 (monatliche Mittelwerte in %)	297
B.11	Statistik für die relative Luftfeuchte Rel2 (saisonale Mittelwerte in %)	297
B.12	Statistik für die relative Luftfeuchte Rel2 (Jahresmittelwerte in %)	298
B.13	Statistik für die Taupunkttemperatur Tdew (Monatsmittelwerte in °C)	298
B.14	Statistik für die Taupunkttemperatur Tdew (saisonale Mittelwerte in °C)	298
B.15	Statistik für die Taupunkttemperatur Tdew (Jahresmittelwerte in °C)	299
B.16	Statistik für die 10 m-Windgeschwindigkeit (monatliche Mittelwerte in m/s)	299
B.17	Statistik für die 10 m-Windgeschwindigkeit V10 (saisonale Mittelwerte in m/s)	300
B.18	Statistik für die 10 m-Windgeschwindigkeit V10 (Jahresmittelwerte in m/s)	300
B.19	Statistik für den Gesamtniederschlag PRECIPTOT (monatliche Summen in mm)	300
B.20	Statistik für den Gesamtniederschlag PRECIPTOT (saisonale Summen in mm)	301
B.21	Statistik für den Gesamtniederschlag PRECIPTOT (Jahressumme mm)	301
B.22	Statistik für den Gesamtbedeckungsgrad CLCT (monatliche Mittelwerte in %)	301
B.23	Statistik für den Gesamtbedeckungsgrad CLCT (saisonale Mittelwerte in %)	302
B.24	Statistik für den Gesamtbedeckungsgrad CLCT (Jahresmittelwerte in %)	302
B.25	Statistik für die Globalstrahlung Glob (Monatsmittelwerte in W/m ²)	302
B.26	Statistik für die Globalstrahlung Glob (saisonale Mittelwerte in W/m ²)	303
B.27	Statistik für die Globalstrahlung Glob (Jahresmittelwerte in W/m ²)	303
B.28	Statistik für den Luftdruck ps am Boden (Monatsmittelwerte in hPa)	303
B.29	Statistik für den Luftdruck ps am Boden (saisonale Mittelwerte in hPa)	304
B.30	Statistik für den Luftdruck ps am Boden (Jahresmittelwerte in hPa)	304
C.1	Blühbeginn beim Apfel , berechnet mit Modell 29ga (DL=1)	309
C.2	Blühbeginn bei der Sauerkirsche , berechnet mit Modell 29ga (DL=1)	309
C.3	Blühbeginn bei der Süßkirsche , berechnet mit Modell 29ga (DL=1)	310
C.4	Blühbeginn bei der Birne , berechnet mit Modell 29ga (DL=1)	310
C.5	Blühbeginn bei der Erdbeere , berechnet mit Modell 29ga (DL=1)	311
C.6	Blühbeginn beim Wein , berechnet mit Modell 29ga (DL=2)	311
C.7	Beginn des Austriebs beim Wein , berechnet mit Modell 29ga (DL=2)	312

C.8	Blühbeginn beim Pfirsich , berechnet mit Modell 29ga (DL=1)	312
C.9	Blühbeginn bei der Aprikose , berechnet mit Modell 29ga (DL=1)	313
C.10	Blühbeginn bei der Pflaume , berechnet mit Modell 29ga (DL=1)	313
D.1	Blühdauer beim Apfel	316
D.2	Blühdauer bei der Sauerkirsche	316
D.3	Blühdauer bei der Süßkirsche	316
D.4	Blühdauer bei der Birne	317
D.5	Blühdauer beim Wein	317
D.6	Blühdauer bei der Pflaume	317
E.1	Termin des mittleren Beginns der Pflückreife t_3 für verschiedene Obstarten	320
E.2	Beginn der Pflückreife beim frühreifen Apfel	320
E.3	Beginn der Pflückreife beim spätreifen Apfel	321
E.4	Beginn der Pflückreife bei der Sauerkirsche	321
E.5	Beginn der Pflückreife bei der frühreifen Süßkirsche	322
E.6	Beginn der Pflückreife bei der spätreifen Süßkirsche	322
E.7	Beginn der Pflückreife bei der frühreifen Birne	323
E.8	Beginn der Pflückreife beim spätreifen Birne	323
E.9	Beginn der Pflückreife bei der Erdbeere	324
E.10	Beginn der Pflückreife beim Wein	324
E.11	Beginn der Lese beim Wein	325
E.12	Beginn der Pflückreife bei der frühreifen Pflaume	325
E.13	Beginn der Pflückreife bei der spätreifen Pflaume	326
F.1	Länge der Reifeperiode beim frühreifen Apfel	328
F.2	Länge der Reifeperiode beim spätreifen Apfel	329
F.3	Länge der Reifeperiode bei der Sauerkirsche	329
F.4	Länge der Reifeperiode bei der frühreifen Süßkirsche	329
F.5	Länge der Reifeperiode bei der spätreifen Süßkirsche	330
F.6	Länge der Reifeperiode bei der frühreifen Birne	330
F.7	Länge der Reifeperiode bei der spätreifen Birne	330
F.8	Länge der Reifeperiode bei der Erdbeere	331
F.9	Länge der Reifeperiode beim Wein	331
F.10	Länge der Zeitspanne vom Blühbeginn bis zur Lese beim Wein	331
F.11	Länge der Reifeperiode bei der frühreifen Pflaume	332
F.12	Länge der Reifeperiode bei der spätreifen Pflaume	332
G.1	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1b bei $C^* =$ 1600 CH (Mittelwerte über alle 81 Gitterpunkte in Hessen).	335
G.2	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1b bei $C^* =$ 1600 CH (Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hes- sen).	335
G.3	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1b bei $C^* =$ 1600 CH (Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte in Hessen).	335

G.4	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1b bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über die 4 Erdbeeraanbaugitterpunkte in Hessen).	336
G.5	Statistik für die NoReleaseProb200 (in %) in Modell 1b bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über alle 81 Gitterpunkte in Hessen).	339
G.6	Statistik für die NoReleaseProb200 (in %) in Modell 1b bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen).	339
G.7	Statistik für die NoReleaseProb200 (in %) in Modell 1b bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte in Hessen).	339
G.8	Statistik für die NoReleaseProb200 (in %) in Modell 1b bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über die 4 Erdbeeraanbaugitterpunkte in Hessen).	340
G.9	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1g bei $C^* = 89$ CP (Mittelwerte über alle 81 Gitterpunkte in Hessen).	340
G.10	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1g bei $C^* = 89$ CP (Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen).	340
G.11	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1g bei $C^* = 89$ CP (Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte in Hessen).	341
G.12	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1f bei $C^* = 1632$ CU (Mittelwerte über alle 81 Gitterpunkte in Hessen).	341
G.13	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1f bei $C^* = 1632$ CU (Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen).	342
G.14	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1f bei $C^* = 1632$ CU (Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte in Hessen).	342
G.15	Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1f bei $C^* = 1632$ CU (Mittelwerte über die 4 Erdbeeraanbaugitterpunkte in Hessen).	342
H.1	Statistik für die FROSTPROB0 beim Apfel	344
H.2	Statistik für die FROSTPROB0 bei der Sauerkirsche	344
H.3	Statistik für die FROSTPROB0 bei der Süßkirsche	344
H.4	Statistik für die FROSTPROB0 bei der Birne	344
H.5	Statistik für die FROSTPROB0 beim Wein	345
H.6	Statistik für die FROSTPROB0 bei der Pflaume	345
H.7	Statistik für die FROSTPROB1 beim Apfel	347
H.8	Statistik für die FROSTPROB1 bei der Sauerkirsche	347
H.9	Statistik für die FROSTPROB1 bei der Süßkirsche	347
H.10	Statistik für die FROSTPROB1 bei der Birne	348
H.11	Statistik für die FROSTPROB1 beim Wein	348
H.12	Statistik für die FROSTPROB1 bei der Pflaume	348
H.13	Statistik für die FROSTPROB2 beim Apfel	350
H.14	Statistik für die FROSTPROB2 bei der Sauerkirsche	350
H.15	Statistik für die FROSTPROB2 bei der Süßkirsche	350
H.16	Statistik für die FROSTPROB2 bei der Birne	351
H.17	Statistik für die FROSTPROB2 beim Wein	351

H.18	Statistik für die FROSTPROB2 bei der Pflaume	351
H.19	Statistik für die FROSTPROB3 beim Apfel	353
H.20	Statistik für die FROSTPROB3 bei der Sauerkirsche	353
H.21	Statistik für die FROSTPROB3 bei der Süßkirsche	353
H.22	Statistik für die FROSTPROB3 bei der Birne	354
H.23	Statistik für die FROSTPROB3 beim Wein	354
H.24	Statistik für die FROSTPROB3 bei der Pflaume	354
H.25	Statistik für den FROSTSCHADEN beim Apfel	356
H.26	Statistik für den FROSTSCHADEN bei der Sauerkirsche	356
H.27	Statistik für den FROSTSCHADEN bei der Süßkirsche	357
H.28	Statistik für den FROSTSCHADEN bei der Birne	357
H.29	Statistik für den FROSTSCHADEN beim Wein	357
H.30	Statistik für den FROSTSCHADEN bei der Pflaume	357
H.31	Statistik für den FROSTSCHADEN bei der Aprikose	358
H.32	Statistik für die FROSTSCHADENSROB0 beim Apfel	360
H.33	Statistik für die FROSTSCHADENSROB0 bei der Sauerkirsche	360
H.34	Statistik für die FROSTSCHADENSROB0 bei der Süßkirsche	361
H.35	Statistik für die FROSTSCHADENSROB0 bei der Birne	361
H.36	Statistik für die FROSTSCHADENSROB0 beim Wein	361
H.37	Statistik für die FROSTSCHADENSROB0 bei der Pflaume	361
H.38	Statistik für die FROSTSCHADENSROB1 beim Apfel	363
H.39	Statistik für die FROSTSCHADENSROB1 bei der Sauerkirsche	363
H.40	Statistik für die FROSTSCHADENSROB1 bei der Süßkirsche	364
H.41	Statistik für die FROSTSCHADENSROB1 bei der Birne	364
H.42	Statistik für die FROSTSCHADENSROB1 beim Wein	364
H.43	Statistik für die FROSTSCHADENSROB1 bei der Pflaume	364
H.44	Statistik für die FROSTSCHADENSROB2 beim Apfel	366
H.45	Statistik für die FROSTSCHADENSROB2 bei der Sauerkirsche	366
H.46	Statistik für die FROSTSCHADENSROB2 bei der Süßkirsche	367
H.47	Statistik für die FROSTSCHADENSROB2 bei der Birne	367
H.48	Statistik für die FROSTSCHADENSROB2 beim Wein	367
H.49	Statistik für die FROSTSCHADENSROB2 bei der Pflaume	367
H.50	Statistik für die FROSTTAGE0 beim Apfel	369
H.51	Statistik für die FROSTTAGE0 bei der Sauerkirsche	369
H.52	Statistik für die FROSTTAGE0 bei der Süßkirsche	370
H.53	Statistik für die FROSTTAGE0 bei der Birne	370
H.54	Statistik für die FROSTTAGE0 beim Wein	370
H.55	Statistik für die FROSTTAGE0 bei der Pflaume	370
I.1	Statistik für den Generationsindex I_A des Apfelwicklers	373
I.2	Statistik für den Schaden durch den Apfelwickler ohne Maßnahmen (in %)	373
I.3	Statistik für den Schaden durch den Apfelwickler bei extensiven Maßnahmen (in %)	373
I.4	Statistik für den Schaden durch den Apfelwickler bei extensiven Maßnahmen im Zeitraum 1971-2000 und intensiven danach (in %)	374

I.5	Statistik für die Kosten der Bekämpfung des Apfelwicklers mit extensiven Maßnahmen (in €/ha/a)	374
I.6	Statistik für die Kosten der Bekämpfung des Apfelwicklers mit extensiven Maßnahmen im Zeitraum 1971-2000 und mit intensiven Maßnahmen danach (in €/ha/a)	374
I.7	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Apfelwicklergenerationsindex $I_A = 2$ (d. h. für zwei vollständige Generationen) (in %) . . .	375
J.1	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) beim frühreifen Apfel (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	376
J.2	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) beim frühreifen Apfel (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	377
J.3	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim frühreifen Apfel (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	377
J.4	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim frühreifen Apfel (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	377
J.5	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim frühreifen Apfel (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	378
J.6	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim frühreifen Apfel (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	378
J.7	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim frühreifen Apfel (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	378
J.8	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim frühreifen Apfel (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	379
J.9	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim frühreifen Apfel (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	379
J.10	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim frühreifen Apfel (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	379
J.11	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) beim frühreifen Apfel	380
J.12	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) beim spätreifen Apfel (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	381
J.13	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) beim spätreifen Apfel (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	381
J.14	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim spätreifen Apfel (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	381
J.15	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim spätreifen Apfel (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	382
J.16	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim spätreifen Apfel (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	382
J.17	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim spätreifen Apfel (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	382

J.18	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim spätreifen Apfel (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	383
J.19	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim spätreifen Apfel (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	383
J.20	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim spätreifen Apfel (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	383
J.21	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim spätreifen Apfel (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	384
J.22	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) beim spätreifen Apfel	384
J.23	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der Sauerkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung), berechnet mit SIMWASSER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe	385
J.24	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der Sauerkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung), berechnet mit SIMWASSER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe	385
J.25	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Sauerkirsche (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	385
J.26	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Sauerkirsche (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	386
J.27	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Sauerkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	386
J.28	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Sauerkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	386
J.29	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Sauerkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	387
J.30	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Sauerkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	387
J.31	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Sauerkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	387
J.32	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Sauerkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	388
J.33	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei der Sauerkirsche	388
J.34	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der frühreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	389

J.35	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der frühreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	389
J.36	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Süßkirsche (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	389
J.37	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Süßkirsche (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	390
J.38	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	390
J.39	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	390
J.40	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	391
J.41	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	391
J.42	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	391
J.43	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	392
J.44	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei der frühreifen Süßkirsche	392
J.45	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der spätreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	393
J.46	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der spätreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	393
J.47	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Süßkirsche (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	393
J.48	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Süßkirsche (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	394
J.49	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	394
J.50	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	394
J.51	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	395
J.52	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	395
J.53	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	395

J.54	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Süßkirsche (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	396
J.55	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei der spätreifen Süßkirsche	396
J.56	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der frühreifen Birne (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	397
J.57	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der frühreifen Birne (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	397
J.58	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Birne (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	397
J.59	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Birne (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	398
J.60	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Birne (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	398
J.61	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Birne (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	398
J.62	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Birne (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	399
J.63	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Birne (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	399
J.64	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Birne (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	399
J.65	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Birne (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	400
J.66	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei der frühreifen Birne	400
J.67	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der spätreifen Birne (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	401
J.68	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der spätreifen Birne (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	401
J.69	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Birne (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	401
J.70	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Birne (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	402
J.71	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Birne (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	402
J.72	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Birne (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	402
J.73	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Birne (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	403

J.74	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Birne (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	403
J.75	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Birne (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	403
J.76	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Birne (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	404
J.77	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei der spätreifen Birne	404
J.78	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der Erdbeere (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	405
J.79	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der Erdbeere (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	405
J.80	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Erdbeere (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	405
J.81	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Erdbeere (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	406
J.82	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Erdbeere (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	406
J.83	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Erdbeere (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	406
J.84	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Erdbeere (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	407
J.85	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Erdbeere (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	407
J.86	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Erdbeere (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	407
J.87	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Erdbeere (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	408
J.88	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei der Erdbeere	408
J.89	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) beim Wein (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	409
J.90	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) beim Wein (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	409
J.91	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim Wein (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	410
J.92	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim Wein (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	410
J.93	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim Wein (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	410

J.94	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim Wein (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	411
J.95	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim Wein (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	411
J.96	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim Wein (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	411
J.97	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim Wein (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	412
J.98	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim Wein (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	412
J.99	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) beim Wein	412
J.100	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) beim Pfirsich (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	413
J.101	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) beim Pfirsich (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	413
J.102	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim Pfirsich (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	413
J.103	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim Pfirsich (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	414
J.104	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim Pfirsich (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	414
J.105	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) beim Pfirsich (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	414
J.106	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim Pfirsich (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	415
J.107	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim Pfirsich (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	415
J.108	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim Pfirsich (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	415
J.109	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) beim Pfirsich (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	416
J.110	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) beim Pfirsich	416
J.111	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der Aprikose (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	417
J.112	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der Aprikose (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	417
J.113	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Aprikose (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	417
J.114	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Aprikose (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	418

J.115	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Aprikose (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	418
J.116	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der Aprikose (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	418
J.117	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Aprikose (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	419
J.118	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Aprikose (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	419
J.119	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Aprikose (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	419
J.120	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der Aprikose (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	420
J.121	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei der Aprikose	420
J.122	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der frühreifen Pflaume (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	421
J.123	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der frühreifen Pflaume (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	421
J.124	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Pflaume (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	421
J.125	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Pflaume (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	422
J.126	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Pflaume (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	422
J.127	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der frühreifen Pflaume (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	422
J.128	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Pflaume (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	423
J.129	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Pflaume (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	423
J.130	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Pflaume (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	423
J.131	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der frühreifen Pflaume (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	424
J.132	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei der frühreifen Pflaume	424
J.133	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der spätreifen Pflaume (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	425

J.134	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei der spätreifen Pflaume (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	425
J.135	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Pflaume (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	425
J.136	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Pflaume (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	426
J.137	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Pflaume (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	426
J.138	Statistik für den Ertragsschaden s_Y (in %) bei der spätreifen Pflaume (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	426
J.139	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Pflaume (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	427
J.140	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Pflaume (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	427
J.141	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Pflaume (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	427
J.142	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei der spätreifen Pflaume (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	428
J.143	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei der spätreifen Pflaume	428
J.144	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	430
J.145	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	430
J.146	Statistik für den relativen Ertragsschaden (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	432
J.147	Statistik für den relativen Ertragsschaden (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	433
J.148	Statistik für den relativen Ertragsschaden (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	435
J.149	Statistik für den relativen Ertragsschaden (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	436
J.150	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	438
J.151	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	439
J.152	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung)	441

J.153	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung)	442
J.154	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten	444
K.1	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie o-o	446
K.2	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-o	447
K.3	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie g-g	447
K.4	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe	447
K.5	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie g-g, mit CO ₂ -Düngung	448
K.6	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie g-g, Worst Case 20 %	448
K.7	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g	448
K.8	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	449
K.9	Statistik für die Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, Worst Case variiert	449
K.10	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g, Worst Case 20 %	449
K.11	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g, Worst Case 10 %	450
K.12	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g, Worst Case 7 %	450
K.13	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g, Worst Case 5 %	450
K.14	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g, Worst Case 4 %	451
K.15	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g, Worst Case 3 %	451
K.16	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-m	451
K.17	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-m, mit CO ₂ -Düngung	452
K.18	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-m, Worst Case 20 %	452
K.19	Statistik für den Nettogewinn bei der Anwendung der Strategie w anstelle der Strategie o	464
K.20	Statistik für den Nettogewinn bei der Anwendung der Strategie g anstelle der Strategie o	464
K.21	Statistik für den Nettogewinn bei der Anwendung der Strategie v anstelle der Strategie o	465
K.22	Statistik für den Nettogewinn bei der Anwendung der Strategie m anstelle der Strategie o	465
K.23	Statistik für den Nettogewinn bei der Anwendung der Strategie m anstelle der Strategie g	465
K.24	Statistik für den Nettogewinn bei der Anwendung der Strategie m anstelle der Strategie g, nur 3 Klimamodellläufe	466
K.25	Statistik für den Nettogewinn bei der Anwendung der Strategie m anstelle der Strategie g, mit CO ₂ -Düngung	466
K.26	Statistik für den Nettogewinn bei der Anwendung der Strategie m anstelle der Strategie g, Worst Case 20 %	466
K.27	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie o-o	467
K.28	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-o	467
K.29	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g	468
K.30	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe	468

K.31	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie g-g, mit CO ₂ -Düngung	468
K.32	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie g-g, Worst Case: 20 %	469
K.33	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g . . .	469
K.34	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	469
K.35	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case variiert	470
K.36	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 20 %	470
K.37	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 10 %	470
K.38	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 7 %	471
K.39	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 5 %	471
K.40	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 4 %	471
K.41	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 3 %	472
K.42	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-m . . .	472
K.43	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-m, mit CO ₂ -Düngung	472
K.44	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-m, Worst Case 20 %	473
K.45	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie g-g	474
K.46	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie g-g, mit CO ₂ -Düngung	474
K.47	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie g-g, mit Worst Case 20 %	475
K.48	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-g	475
K.49	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	475
K.50	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-g, mit Worst Case 20 %	476
K.51	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-m	476
K.52	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-m, mit CO ₂ -Düngung	476
K.53	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-m, mit Worst Case 20 %	477
K.54	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie o-o . . .	505
K.55	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-o . . .	506
K.56	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie g-g . . .	506

K.57	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe	506
K.58	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie g-g, mit CO_2 -Düngung	507
K.59	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie g-g, Worst Case 20 %	507
K.60	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-g	507
K.61	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-g, mit CO_2 -Düngung	508
K.62	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case variiert	508
K.63	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 20 %	508
K.64	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 10 %	509
K.65	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 7 %	509
K.66	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 5 %	509
K.67	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 4 %	510
K.68	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 3 %	510
K.69	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-m	511
K.70	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-m, mit CO_2 -Düngung	511
K.71	Statistik für die Gesamtkosten KKA des Klimawandels, Strategie m-m, Worst Case 20 %	511
K.72	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie g-g	512
K.73	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie g-g, mit CO_2 -Düngung	512
K.74	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie g-g, mit Worst Case 20 %	513
K.75	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-g	513
K.76	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-g, mit CO_2 -Düngung	513
K.77	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-g, mit Worst Case 20 %	514
K.78	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-m	514
K.79	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-m, mit CO_2 -Düngung	514
K.80	Statistik für die akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (ab 2002 bis zum Jahr j), Strategie m-m, mit Worst Case 20 %	515

L.1 Sensitivität der Schäden bzgl. Parameteränderungen 532

1 Vorwort

Das Projekt CHARIKO wurde vom Fachzentrum Klimawandel (FZK) im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) im Rahmen der Projektinitiative INKLIM-A über 4 Jahre gefördert. Das Ziel dieser Forschungsarbeit bestand darin, die Chancen, Risiken und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen zu untersuchen und zu quantifizieren. Für diese zweifelsfrei anspruchsvolle Aufgabe waren eine Vielzahl neuer methodischer Ansätze zu entwickeln, die sowohl die *verbesserte Modellierung phänologischer Stadien*, die *Abschätzung der Dormanzbrechung für Obstgehölze*, die *Analyse von Spätfrostschäden*, die *Ertragsmodellierung verschiedener Baumobstarten* (mit/ohne Berücksichtigung des CO₂-Düungeeffekts), als auch *Verfahren zur Quantifizierung von obstbaulichen Schäden und Anpassungsmaßnahmen zur Abschätzung der Kosten des Klimawandels* beinhalteten. Zudem sollten in allen Berechnungen die Unsicherheiten der regionalen Klimamodelle mit berücksichtigt werden, so dass auch die Statistik zur *Bestimmung der Konfidenzintervalle* an diese Problemstellung anzupassen war. Dies führte zwangsläufig dazu, dass im Rahmen dieses Forschungsprojekts methodische Aspekte einen sehr hohen Stellenwert eingenommen haben und dementsprechend einen großen Teil der Untersuchungen ausmachen. Dies ist auch der größte wissenschaftliche Mehrwert in diesem Forschungsprojekt.

Im hier vorliegenden *Langbericht* werden, im Gegensatz zum Kurzbericht, alle verwendeten Verfahren, inklusive der benutzten Daten und deren Aufbereitung, ausführlich in Kapitel 4 erläutert. In Abschnitt 5 und im Anhang B werden alle damit erzielten Ergebnisse ausführlich dargestellt.

Wir möchten wir uns an dieser Stelle beim Fachzentrum Klimawandel für die Förderung dieses interessanten und anspruchsvollen Forschungsprojektes bedanken. Unser besonderer Dank gilt Herrn Dr. Helmut Wolf (FZK), der dieses Projekt fachlich betreut hat und Frau Dr. Heike Hübener (FZK), welche die Leitung der Projektinitiative INKLIM-A übernommen hat. Zudem möchten wir uns bei Frau Lena Jedmowski (HLUG, Dezernat G3 — Bodenschutz, Bodeninformation) bedanken, die uns detaillierte Bodendaten für die Obstbauregionen Hessens zur Verfügung gestellt hat. Ebenso danken wir Frau Eike Kaim (Hochschule Geisenheim, Zentrum für Ökonomie) und Herrn Marco Hofmann (Hochschule Geisenheim, Institut für Allgemeinen und Ökologischen Weinbau) für die Angaben zu den Anbauflächen und Erlösen im Obstbau, welche für die ökonomischen Berechnungen von grundlegender Bedeutung waren.

1.1 Hinweise zur Nutzung des Berichts

Um die Navigation in diesem recht umfangreichen Bericht zu erleichtern, wurden alle Kapitel, Formeln und Abbildungen sowie die Literaturhinweise und Links ins Web *verlinkt*. Das heißt, dass man in der pdf-Version durch einen Klick auf einen **blauen Verweis** sofort zur entsprechenden Stelle springen kann. Mit dem “Zurück”-Button des pdf-Betrachterprogramms kommt man leicht zur Ausgangsposition zurück. Um unnötiges Suchen und Blättern nach bestimmten Verweisen zu vermeiden, sollte man diesen Bericht möglichst mit Hilfe eines pdf-Readers auf einem Desktop- oder Tablet-Computer lesen. Liegt bereits eine ausgedruckte Fassung vor, so kann man leicht auf die digitale Umsteigen, indem man die QR-Codes auf Seite **ii** mit seinem Handy oder Tablet-Computer *einscann*t (mehr hierzu findet man unter dem Stichwort *QR-Code Reader* im Internet).

Leser, die nicht an den Details der hier verwendeten Methodik interessiert sind, nur eine kurze Übersicht über die benutzten Methoden wünschen und nur ein Extrakt der wesentlichen Ergebnisse dieses Projekts lesen wollen, seien auf die Kurzversion dieses Berichts (siehe ebenfalls Seite **ii**) verwiesen.

ACHTUNG: Leider werden einige Text-Features im ADOBE ACROBAT[®] (und auch im ACROBAT-Reader) falsch dargestellt, wenn man nicht einige Modifikationen am originalen L^AT_EX-Layout vornimmt. Z. B. werden Linien am Rand von farbig gefüllten Tabellenfeldern z. T. nicht angezeigt, Folgen von Großbuchstaben zeigen variierende Größen, das Rendering von Texten, die mit dem modernen T1-Encoding erzeugt wurden, sieht nicht so gut aus wie beim alten OT1-Encoding usw. Im Ausdruck und auf anderen pdf-Readern [z. B. Vorschau[®], **Skim**^①, PDFpenPRO[®] (unter MAC OS) und GoodReader[®] sowie **pdf-Expert**^② (unter iOS) oder den kostenlosen Programmen **PDF-XCHANGE-Viewer**^③, Sumatra PDF^④, Evince[®], Foxit-Reader[®] und Qiqqa[®] (unter WINDOWS)] treten diese Artefakte nicht auf.⁵

Damit aber auch Nutzer von ACROBAT in den Genuß einer einigermaßen fehlerfreien Darstellung kommen, wurden die Linien in den Tabellen dicker als in den Defaulteinstellungen gesetzt. Ab einer Vergrößerungsstufe von 125 % oder mehr (bei einseitiger Darstellung) sind die Linien nun auch unter ACROBAT zu sehen⁶. Eine bessere Bildschirmdarstellung unter ACROBAT erzielt man übrigens mit der Einstellung *Text glätten für Laptops/LCD-Displays* (zu finden, je nach Version und Betriebssystem, unter dem ACROBAT-Menüpunkt *Acrobat, Grundeinstellungen, Seitenanzeige* oder *Bearbeiten, Voreinstellungen, Seitenanzeige*). Trotzdem wird die Nutzung eines (zum ACROBAT) alternativen pdf-Viewers wärmstens empfohlen.

¹<http://skim-app.sourceforge.net> (gratis)

² Erhältlich im Apple[®] App-Store.

³ <http://www.pdf-xchange.ch/download-xchange-viewer.htm> (gratis)

⁴ <http://blog.kowalczyk.info/software/sumatrapdf/free-pdf-reader-de.html>

⁵ Die empfehlenswertesten Reader wurden in fett gesetzt.

⁶ Sie erscheinen jetzt aber unter anderen pdf-Viewern und in großen Vergrößerungsstufen etwas zu dick.

1.2 Veränderungen gegenüber dem letzten Zwischenbericht

Vollkommen neu hinzugekommen sind seit dem letzten Zwischenbericht die Kapitel für Schäden durch den Apfelwickler (Kapitel 4.9, 5.5 und Anhang I), die Wasserhaushalts- und Ertragsrechnungen mit dem Modell SIMWASER (Kapitel 4.10, 5.6 und Anhang J) sowie die Schadens- und Kostenabschätzungen (Kapitel 4.11, 4.12, 5.7 und Anhang K). Ergänzt wurden auch die Kapitel 6, 7 und 8 mit einer Diskussion der Ergebnisse, mit einer Zusammenstellung der offenen Fragen inklusive Ausblick und ein kurzes Stichwortverzeichnis. Neu sind auch die *Worst Case*-Berechnungen bezüglich unvollständiger Brechung der Dormanz (siehe Kapitel 4.13 und alle Ergebnisse, die sich mit den Gesamtkosten und Gesamtschäden des Klimawandels beschäftigen). Alle anderen Kapitel wurden z. T. vollständig überarbeitet und mit kurzen Zusammenfassungen ergänzt. Wo nötig, wurden Ergänzungen in Form von Kommentaren oder Fußnoten angebracht und Fehler korrigiert.

2 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Modellergebnisse (Outputs) von vier verschiedenen Klimamodellen¹ verwendet. Von den drei² rein dynamischen Klimamodellen (siehe Abschnitte 4.1.4) wurde jeweils nur ein fester Modelllauf verwendet. Vom vierten Modell (WETTREG2010) (siehe Abschnitte 4.1.5), das ein rein statistisches Modell ist³, standen insgesamt 10 unterschiedliche Modellläufe (Realisierungen) zur Verfügung, von denen allerdings wegen verschiedener Unzulänglichkeiten (Abschnitt 4.1.5.1) und wegen der starken Korrelation zwischen diesen 10 Modellläufen (Abschnitt 4.4.3) nur zwei Läufe in CHARIKO verwendet wurden. Insgesamt wurden daher fünf unterschiedliche Modellläufe verwendet. Der untersuchte Zeitraum bezieht sich bei allen Modellen auf die Jahre 1961-2000 (“Kontrolllauf” bzw. Referenzlauf mit den Treibhausgaskonzentrationen des 20. Jahrhunderts; C20) und die Jahre 2001-2100 (auch kurz mit “Szenario A1B” bezeichnet), in denen die Treibhausgas- und Aerosol-Emissionen sowie die zukünftigen Landnutzungsänderungen über das SRES⁴-Emissionsszenario A1B festgelegt sind (vgl. Schuchardt & Wittig, 2010, S. 12 ff. und IPCC, 2007, S. 14 und 18).

Der Output dieser Modelle dient als Input für verschiedene Klimawirkungs- und Klimafolgenmodelle (Impaktmodelle), mit denen dann *Vorhersagen* (genauer: *Projektionen*⁵) über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklung, den Ertrag und die möglichen Schäden verschiedener Obstarten gemacht werden. Hierbei ist die Nutzung mehrerer Klimamodelle sinnvoll, denn nur so kann eine einigermaßen verlässliche Abschätzung der Unsicherheiten in den berechneten Ergebnissen durchgeführt werden. Denn die mögliche Spannbreite der Ergebnisse wird zu einem großen Teil durch die unterschiedlichen Resultate, welche die einzelnen Klimamodelle auf Grund ihrer unterschiedlichen Parametrisierungen, räumlichen Auflösungen und Startbedingungen liefern, verursacht.

Die durch die GCM’s und RCM’s entstehenden möglichen Fehlerbandbreiten werden noch erheblich durch die Unsicherheiten in der Physik bzw. Biologie der nachfolgend angewandten Impaktmodelle vergrößert. In diesen Impaktmodellen müssen nämlich meistens noch viel drastischere Vereinfachungen der Wirklichkeit vorgenommen werden als in den Klimamodellen.

Schließlich vergrößert der endliche Mittelungszeitraum (i. Allg. 30 Jahre) zur Bestimmung eines “das Klima des betrachteten Zeitabschnitts charakterisierenden Zustandes”

¹ *Klimamodell* bezeichnet hier die Kombination eines relativ grob aufgelösten *Globalen Atmosphäre-Ozean-Klimamodells* (AO-GCM), welches die Randbedingungen für ein eingebettetes, feiner aufgelöstes *regionales Klimamodell* (RCM) liefert. Das RCM berechnet die Klimavariablen nur für einen kleinen Ausschnitt (z. B. Mitteleuropa), und von diesem Ausschnitt fließen in CHARIKO nur die Daten für das Gebiet von Hessen als Input in die Impaktmodelle ein.

² Genau genommen handelt es sich um nur zwei unterschiedliche, dynamische *Regionale Klimamodelle*, von denen aber die beiden verwendeten Läufe des einen Modells von verschiedenen *Globalen Klimamodellen* angetrieben wurden. Siehe Abb. 3.1.

³ Die Randbedingungen werden aber von einem dynamischen, globalen Klimamodell geliefert!

⁴ SRES = Special Report on Emissions Scenarios (Nakicenovic et al., 2000)

⁵ Im Folgenden wird anstelle des in der Klimaforschung üblichen und wohl definierten Begriffs *Projektion* meistens der nicht ganz korrekte aber anschauliche Begriff *Vorhersage* bzw. *Prognose* verwendet. Gemeint sind aber immer Prognosen im Sinne von Klimaprojektionen!

die mögliche Fehlerspannweite noch zusätzlich (*Varianz des 30-jährigen Mittelwerts einer Größe*). Denn eine andere Realisierung eines Klimamodelllaufs mit nur leicht veränderten Startbedingungen würde auf Grund des chaotischen Verhaltens des Wetters veränderte Outputwerte für die einzelnen Variablen ergeben. Diese Veränderungen pflanzen sich dann über die Impaktmodelle bis zum Endergebnis fort. Man beachte, dass alle diese Unsicherheiten auch dann auftreten, wenn man sich bereits vor allen Rechnungen auf ein ganz bestimmtes Emissions-Szenario (hier A1B) festgelegt hat. Durch Auswahl eines anderen Szenarios erhält man, wenigstens zum Ende des 21. Jahrhunderts hin, stark veränderte Resultate (vgl. Schuchardt & Wittig (2010), Abb. 3).

Zuerst wurde für die Modelldaten der drei dynamischen Klimamodelle eine sogenannte “BIAS”-Korrektur (Kapitel 4.3) durchgeführt, die dazu führte, dass die langjährigen Mittelwerte (1971-2000) aller wichtigen Modelloutputgrößen gut mit den Beobachtungen übereinstimmten. Danach lagen auch alle Modelldaten in einem einheitlichen Format vor. Leider sind durch die BIAS-Korrektur nicht alle Schwierigkeiten beseitigt. Die Probleme, welche bei Nutzung dieser Daten, speziell der WETTREG-Daten, immer noch bestehen und beachtet werden müssen, werden in Kapitel 4.1.5, 4.4.2 und 4.4.3 angesprochen. Da die Outputgrößen der drei dynamischen regionalen Klimamodelle (RCM) auf einem Raster vorlagen, mussten auch die phänologischen Beobachtungen (Kap. 4.1.3 und 4.2.3), die meteorologischen Messwerte des DWD (Kap. 4.1.1 und 4.2.1) und die WETTREG-Modelldaten (Kap. 4.1.5 und 4.2.5), die alle nur an einzelnen Stationen vorlagen, auf das Rechengitter (in einer Auflösung von 0.2°) gerastert werden.

Um auch die möglichen Fehler bzw. die Bandbreiten (Konfidenzintervalle der Erwartungswerte) der in dieser Arbeit berechneten Ergebnisse abschätzen zu können, wurde eine Methode zur Berechnung eines Gesamtfehlers (Kap. 4.4) entwickelt, die nicht nur die statistischen Schwankungen der Größen innerhalb eines RCM, sondern auch die Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Modellen berücksichtigt.

Die “signifikanten” Obst- und Weinbau-Gitterpunkte wurden u. a. mit Hilfe der CORINE-Datenbank bestimmt (Kap. 4.5).

Die möglichen klimatischen Veränderungen aller wichtigen **meteorologischen Größen** wurden sodann als Mittelwerte über diese signifikanten Obstanbaugitterpunkte als langjährige Monats-, Saison- und Jahresmittelwerte für die Zeiträume 1971-2000, 2002-2031⁶, 2031-2060 und 2071-2100 statistisch ausgewertet und tabellarisch sowie graphisch dargestellt (Kap. 5.1 und Anhang B).

Für die Mittelwerte über die Ergebnisse der 5 Klimamodelle⁷ und über die 19 Obstanbaugitterpunkte erhält man, bezogen auf die Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100, folgendes Ergebnis: Die Lufttemperatur nimmt in allen Monaten und Jahreszeiten hoch signifikant zu (Tagesmittelwert T um 3.4 K, Tagesmaximumtemperatur T_x um 3.7 K und Tagesminimumtemperatur T_n um 3.1 K, jeweils im Jahresmittel; Zunahme von T im Winter: 4.0 K, im Frühling: 2.3 K, im Sommer: 3.8 K und 3.5 K im Herbst). Die relative Luftfeuchte nimmt im Sommer und Herbst [besonders im Juli (-6%) und August (-8%)] und im Jahresmittel (-2%) signifikant ab, obwohl die Taupunkttemperatur hoch signi-

⁶ Siehe Fußnote 1 auf Seite 293!

⁷ Korrekter wäre es hier, von “Mittelwerten über die Ergebnisse von 5 Klimamodellläufen” zu sprechen: 3 Läufe mit den dynamischen Modellen und 2 Läufe mit dem statistischen Modell WETTREG. Der Einfachheit halber wird im Folgenden aber häufig von “Mittelwerten über 5 Modelle” oder auch von “Mittelwerten über 5 Klimamodellläufe” gesprochen, sogar dann, wenn die Mittelwerte über die Ergebnisse eines ‘den 5 Klimamodellläufen nachgeschalteten’ Impaktmodells gemeint sind.

fikant zunimmt (+2.8 K im Jahresmittel). Die 10 m-Windgeschwindigkeit nimmt nur im September geringfügig um -0.2 m/s ab. Der Gesamtniederschlag nimmt im Sommer hoch signifikant ab (-47 mm) und im Winter (+31 mm), besonders im Januar (+12 mm), hoch signifikant zu. Der Jahresmittelwert verändert sich aber nicht signifikant. Beim Gesamtbedeckungsgrad tritt im Modellmittel keine signifikante Änderung auf. Das Gleiche gilt für die Globalstrahlung, die nur in WETTREG (im Jahresmittel um über 17%) hoch signifikant zunimmt. Der Luftdruck am Boden steigt hoch signifikant im Herbst und im Jahresmittel an, allerdings nur um ca. 1 hPa. Der Anstieg wird außerdem hauptsächlich durch die Ergebnisse von WETTREG hervorgerufen und die Prognose ist daher nicht sehr zuverlässig.

Theoretische und praktische Untersuchungen zeigten, dass die **phänologischen Modelle**, welche bisher als Eingangsgröße nur die Lufttemperatur verwenden, für Prognosen des Blühbeginns bis zum Jahr 2100 nur sehr beschränkt verwendbar sind, da diese Modelle bereits heutzutage systematische Defizite aufweisen (Kap. 4.6). Durch die Einführung eines Tageslängenterms (DAYLENGTH-Term) konnten diese Defizite behoben werden (Kap. 4.6.5). Nach der Optimierung der phänologischen Modelle (Kap. 4.6.6) konnten zuverlässigere Vorhersagen für den Termin des Blühbeginns, des Blühendes und des “Dormanzbrechungstermins” berechnet werden (Kap. 5.2.1). In Anhang C findet man Ergebnisse für den Blühbeginn bei 9 verschiedenen Fruchtarten und in Anhang D auch für die Blühdauer.

Für die durchzuführenden Ertragsberechnungen ist auch die korrekte Vorhersage des Termins der Pflückreife wichtig. Leider zeigte sich auch bei dieser Größe, dass die bisher verwendeten phänologischen Modelle für Vorhersagen bis 2100 nicht geeignet waren. Nach entsprechender Modifikation der Modelle (Kapitel 4.6.3) konnten dann aber doch relativ verlässliche Reifetermine berechnet werden (Kapitel 5.2.2 und Anhang E). Ergebnisse für die Zeitdauer zwischen Blühbeginn und Pflückreife, die hier als *Reifeperiodenlänge* bezeichnet wird, werden in Kapitel 5.2.2 und Anhang F beschrieben.

Die Ergebnisse für die phänologischen Phasen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die Termine für den Blühbeginn (jeweils Mittelwert über die 5 Klimamodellläufe) (und auch den Austriebsbeginn bei Wein) verfrühen sich bei allen 9 Obstarten hoch signifikant um 15 Tage (Kirschen und Wein) bis 22 Tage (Pfirsich). Bei der Blühdauer (ebenfalls Mittelwert über die 5 Klimamodellläufe) sind die Ergebnisse nicht so eindeutig. Beim Apfel und der Birne verlängert sich die Blühdauer leicht signifikant um knapp einen Tag (das entspricht einer Zunahme von ca. 6%). Beim Wein verkürzt sich die Blühdauer aber um 0.7 Tage. Der Beginn der Pflückreife verfrüht sich bei allen Fruchtarten hoch signifikant zwischen 11.5 d beim spätreifen Apfel und 19.0 d bei der spätreifen Pflaume. Die Weinlese verschiebt sich sogar um 21.1 d zu früheren Terminen hin. Die Länge der Reifeperiode vergrößert sich beim Apfel und bei der Birne signifikant um “3.4 d beim frühreifen” und “6.5 d beim spätreifen Apfel” bis zu “6.8 d bei der frühreifen Birne” (5.3 d bei der spätreifen Birne). Beim Wein verkürzt sich die Reifeperiode um 3 d (gerechnet bis zur *Pflückreife*) und um 6 d (gerechnet bis zur *Weinlese*). Alle anderen Obstarten zeigen keine signifikanten Veränderungen in der Reifeperiodenlänge.

Die Kombination der Ergebnisse aus den optimierten phänologischen Modellen für den Blühbeginn und dem bezüglich Bias korrigierten Output der RCM’s erlaubte sodann Abschätzungen für die Spätfrostwahrscheinlichkeiten und **Frostschäden** (Kap. 4.8 und 5.4), die kurz vor und nach der Blüte auftreten. Umfangreiche Ergebnisse für alle Frostgrößen

und 6 Fruchtarten mit Signifikanzangaben zu deren möglichen Veränderungen werden in Anhang H gezeigt. Im Anhang L wird dann noch exemplarisch eine alternative Methode zur Berechnung von Frostwahrscheinlichkeiten und -schäden vorgestellt, mit der sich höchst wahrscheinlich die großen Unsicherheiten der in den vorherigen Kapiteln verwendeten Methode in Zukunft reduzieren lässt. Hier wird außerdem gezeigt, dass sich unter bestimmten, relativ schwachen Voraussetzungen⁸ die Spätfrostschäden bei Benutzung der klassischen *Growing Degree Day*-Modelle (z. B. *Spring Warming* Modell) nicht verändern werden, bei Nutzung der verbesserten Modelle werden sie aber leicht abnehmen (Anhang L.8).

Trotz der signifikanten Verfrühung des Blühbeginns bei allen Fruchtarten konnten, außer bei den Kirschen, keine signifikanten Veränderungen in den Frostschäden prognostiziert werden.⁹ Nur bei den Sauer- und Süßkirschen berechnet man eine signifikante Abnahme der “Wahrscheinlichkeit für Schäden zwischen 0 % und 10 %” um 18 % bzw. um 23 %, die aber wegen der Geringfügigkeit der meisten Schäden in dieser Kategorie für den Obstbauern kaum von Bedeutung ist.

Weiterhin wurden Untersuchungen in Hinblick auf mögliche Schäden (“**Dormanzschäden**”) durch Nichterfüllung des Kältebedürfnisses der Obstgehölze (*Chilling-Requirement*) mit drei verschiedenen Chilling-Modellen durchgeführt. Die Methodik wird in Kapitel 4.7 erläutert. Es folgen einige exemplarische Ergebnisse in Kapitel 5.3. Umfangreiche Auswertungen inklusive Bewertungen und Signifikanzangaben findet man schließlich im Anhang G.

Die Temperaturänderungen in den 5 betrachteten regionalen Klimamodellen sind nicht groß genug, um statistisch signifikante Aussagen über die Änderung der “Wahrscheinlichkeit für unzureichendes Chilling der Pflanzen” oder die Veränderung der Dormanzschäden in 30-Jahresabschnitten machen zu können. Das gelingt nicht einmal für relativ hohe Werte des Chilling-Requirements C^* . Die Chillingsummen bis zu einem bestimmten Stichtag im Frühjahr nehmen allerdings signifikant ab (Tabelle 5.3).

Klimatische Veränderungen können auch Auswirkungen auf das Auftreten von Nützlingen und Schädlingen im Obstbau haben. Insekten sind wechselwarm, wodurch ihre Entwicklung maßgeblich durch die Temperatur gesteuert wird. Das vermehrte Auftreten von Schadinsekten würde zu Ertragseinbußen führen, wenn keine adäquate Bekämpfung durchgeführt wird, die dem veränderten zeitlichen Auftreten und der Intensität des Schadens angepasst ist.

Einer der größten Schädlinge für die in Deutschland wichtigste Fruchtart, den Apfel, ist der sogenannte Apfelwickler. Dieser befällt neben dem Apfel auch Birne, Aprikose, Pflaume, Pfirsich und Kirsche. Ein Modell, welches es gestattet, die durch den Apfelwickler verursachten Schäden grob abzuschätzen, wird in Kapitel 4.9 vorgestellt. Damit gewonnene Ergebnisse findet man in Kapitel 5.5 und Anhang I. Die **Apfelwicklerschäden** wurden in dieser Arbeit aber nur für den Apfel berücksichtigt, da für die anderen Obstarten keine ausreichenden Schadensparameterwerte vorlagen.

Der Generationsindex des Apfelwicklers steigt hoch signifikant von einer oder einer partiellen 2. Generation im Zeitraum 1971-2000 auf fast zwei vollständige Generationen im

⁸ Der Frühjahrstemperaturanstieg und die Varianz der Tagesminimumtemperatur müssen sich in der Zukunft ungefähr so wie in der Gegenwart verhalten.

⁹ Wie die Abbildungen H.9 und H.10 zeigen, sind die Unsicherheiten aber sehr groß und die mittleren Schäden können sich u. U. auch verdoppeln oder fast vollständig verschwinden.

Zeitraum 2071-2100 an. Der hierdurch verursachte Schaden steigt ebenfalls hoch signifikant (“von null verschieden”) um 6.6 % von 8.0 % auf 14.6 % an, wenn man überhaupt keine Maßnahmen gegen den Apfelwickler ergreifen würde. Bei Durchführung von extensiven Maßnahmen beträgt der Schaden 1971-2000 nur 2.5 % und steigt um nur 0.7 % auf 3.2 % im Zeitraum 2071-2100 an. Werden 1971-2000 extensive Maßnahmen durchgeführt und nach dem Jahr 2000 die um ca. 200 €/ha/a teureren intensiven Maßnahmen, so sinkt der mittlere Apfelwicklerschaden bis zum Zeitraum 2071-2100 um hoch signifikante –1.1 % auf 1.4 % ab.

Als Beispiel für einen Nützling dient die *Biene*. Die mittlere Bienenflugintensität während der Blütezeit nimmt für alle Fruchtarten (außer beim Wein) um 4 % bis 7 % signifikant ab. Beim sehr spät blühenden Wein ist eine nicht signifikante Zunahme um 2.5 % ($\pm 2.9\%$)¹⁰ zu erwarten.

Nach Bestimmung der Bodenarten bzw. Horizonte in den hessischen Obst- und Weinanbaugebieten (Kapitel 4.10.9) wurde das an der HU-Berlin benutzte Wasserhaushalts- und Ertragsmodell SIMWASER an unterschiedliche Fruchtarten angepasst (Kapitel 4.10.4). Zuvor wurden die verbesserten phänologischen Modelle in SIMWASER implementiert (Kapitel 4.10.3). Nach einigen Erweiterungen (z. B. Einbau der CO₂-Düngung; Kapitel 4.10.7) konnten dann **Wasserhaushalts- und Ertragsrechnungen** mit diesem Modell durchgeführt werden. Ergebnisse hierzu findet man in Kapitel 5.6 und Anhang J.

Über die Veränderungen zwischen den beiden 30-Jahreszeiträumen 1971-2000 und 2071-2100 für die Mittelwerte “über die 5 Klimamodellläufe” und 19 Obstanbaugitterpunkte¹¹ kann man Folgendes konstatieren: Die Ertragsschäden ohne künstliche Sommerberechnung nehmen ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung leicht um 4 % bis 8 % zu. Die Zunahme ist aber nur beim spätreifen Apfel, der Birne, beim Pfirsich und der spätreifen Pflaume signifikant. Mit Berücksichtigung der CO₂-Düngung ist eine signifikante Abnahme der Schäden (bzw. ein Ertragszuwachs) von ca. 14 % bis 41 % zu erwarten.

Mit Sommerberechnung sind alle Veränderungen der Ertragsschäden ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung nicht signifikant, und alle Fruchtarten zeigen mit Berücksichtigung der CO₂-Düngung einen erheblichen, signifikanten Rückgang der Schäden bzw. einen Ertragszuwachs von 18 % bis 54 %.

Die benötigte Sommerberechnung ohne CO₂-Effekt nimmt beim spätreifen Apfel um 166 mm (von Blühbeginn bis Reife), bei der frühreifen Birne um 90 mm, bei der spätreifen Birne um 135 mm, beim Wein um 63 mm und bei der spätreifen Pflaume um 105 mm signifikant zu. Mit Berücksichtigung der CO₂-Düngung ist die Zunahme um 20 mm bis 40 mm geringer als ohne. Ein ganz ähnliches Ergebnis ergibt sich auch für die Gesamttranspirationsmenge von Blühbeginn bis zur Reife.

Schließlich konnten die möglichen **Gesamtschäden** und “**Kosten** durch Schäden und Anpassungsmaßnahmen” für den Obst- und Weinbau abgeschätzt werden (zur Methodik siehe Kapitel 4.11 und 4.12). Hierbei müssen bestimmte Annahmen über die Maßnahmen, welche zur Bekämpfung der einzelnen Schäden eingesetzt werden, getroffen werden (Wahl der Bekämpfungs-*Strategie*). Die **Rentabilität** dieser Strategien wird in Abschnitt 5.7.2.1 untersucht. Zusätzlich zu den normalen Rechnungen mit den Standardversionen der Impactmodelle wurden auch noch Simulationen mit Berücksichtigung der *CO₂-Düngung* und

¹⁰ Werte in Klammern sind 95 %-Konfidenzintervalle.

¹¹ bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte beim Wein und bei der Erdbeere.

mit *Worst Case Szenarien* bezüglich der Dormanzbrechung¹² der Pflanzen durchgeführt. Umfassende Ergebnisse zu den Schäden und Kosten findet man schließlich in Kapitel 5.7 und Anhang K.

Bei den sinnvollen Maßnahme-Strategien sind die Veränderungen der Gesamtschäden nur beim spätreifen Apfel leicht-signifikant negativ (-8% bis -18%), wenn man Rechnungen ohne CO₂-Düngung und ohne Worst Case Szenario betrachtet. Mit CO₂-Düngung ergeben sich bei allen Fruchtarten hoch signifikante Gewinne von 18% bis 56% (d. h. negative Schäden von -18% bis -56%). Beim “Worst Case 20 %”-Szenario ergeben sich bei der gemäßigten Bekämpfungs-Strategie (außer beim spätreifen Apfel) signifikant positive Schadenszuwächse (9% bis 23%). Bei einer Strategie, die ab 2001 alle Schäden mit maximalen Mitteln bekämpft und davor nur gemäßigt vorgeht, unterscheiden sich die Schäden in der Zukunft (ohne CO₂-Effekt und ohne Worst Case Szenario) nicht signifikant von denen im Zeitraum 1971-2000.¹³

Die gemäßigte Strategie (g-Strategie; mit extensiver Apfelwicklerbekämpfung und Sommerberegnung, aber ohne Maßnahmen gegen Spätfrost und Nichtbrechung der Dormanz) ist, verglichen mit einer Strategie ohne irgendwelche Maßnahmen (o-Strategie), für alle Obstarten rentabel. Die durch die g-Strategie zu erwirtschaftenden Gewinne sind, gegenüber der o-Strategie, sogar außer für die Kirsche, die frühreife Pflaume und die spätreife Pflaume signifikant größer null. Die maximale Strategie (m-Strategie; zusätzlich mit Frostschutzberegnung, intensiver Apfelwicklerbekämpfung und Maßnahmen gegen Nichtbrechung der Dormanz) zeigt im zeitlichen Mittel für alle Obstarten außer bei der Pflaume und Sauerkirsche gegenüber der g-Strategie weitere Einsparungsmöglichkeiten (Gewinne), allerdings stehen diese außer beim spätreifen Apfel auf sehr unsicheren Beinen und sind nicht signifikant von null verschieden. Bei der Pflaume und der Sauerkirsche treten aber durch die m-Strategie signifikante Verluste gegenüber der g-Strategie auf, so dass man für diese Obstarten besser keine maximale, sondern nur die gemäßigte Strategie anwenden sollte.

Bei den Gesamtkosten des Klimawandels (ohne CO₂-Effekt und ohne Worst Case) zeigt nur der spätreife Apfel eine signifikante, negative Veränderung der Kosten (Gewinn), die aber auch nicht als sehr sicher anzusehen ist.

Wenn man die CO₂-Düngung anschaltet, errechnet man für alle Arten und vernünftigen Strategien hoch signifikante Kostenabnahmen. Ohne CO₂-Düngung, aber mit dem maximalen “Worst Case Szenario 20 %”, nehmen die Kosten bei der gemäßigten Strategie bei allen Obstarten hoch signifikant zu. Wenn man aber beim “Worst Case Szenario 20 %” die m-Strategie anstelle der gemäßigten nach dem Jahr 2000 anwendet (m-g-Strategie), ist eine signifikante Zunahme nur noch bei der Pflaume und Kirsche zu verzeichnen.

Die höchsten Zusatzkosten (2071-2100 vs. 1971-2000) aller hier untersuchter Kombinationen für ganz Hessen liegen bei **7 000 000 €/Jahr** ($\pm 2\,300\,000$ €/Jahr) beim Wein (bezogen auf die hessischen Weinbaugebiete) im “Worst Case Szenario 20 %” bei der gemäßigten Strategie. Die größten Einsparungen gegenüber 1971-2000 erzielt man ebenfalls beim Wein bei der m-g-Strategie mit CO₂-Effekt. Die Einsparungen betragen in diesem Fall für die Hessische Bergstraße und den Rheingau ca. **19 000 000 €/Jahr** ($\pm 4\,300\,000$ €/Jahr).

Summiert man die jährlichen Einsparungen vom Jahr 2002 an bis zum Jahr 2100 auf, so ergeben sich beim Wein und der m-g-Strategie mit CO₂-Düngung Einsparungen im

¹² D. h., dass die Nichtberechnung der Dormanz in z. B. 20 % der Jahre des Zeitraums 2071-2100 absichtlich im Modell herbeigeführt wird.

¹³ Hier: Signifikanzangaben mit Berücksichtigung der Multiplizität (siehe Seite 293).

Wert von **1 200 000 000 €** ($\pm 250 000 000 €$). Bei der gemäßigten Strategie und im “20 % Worst Case Szenario” erleidet man hingegen bis zum Jahr 2100 aufsummierte Mehrkosten beim Wein von **190 000 000 €** ($\pm 170 000 000 €$).

In diesen Schäden und Kosten sind allerdings mögliche Schäden durch Krankheiten und Schädlinge (außer die des Apfelwicklers beim Apfel), die natürlich auch erheblich sein können, noch nicht enthalten. Für die Berücksichtigung dieser Schäden und Kosten stand im Projekt nicht genügend Zeit zur Verfügung (siehe auch Abschnitt 8), da die HU-Berlin ein Jahr lang mit der Datenaufbereitung und der BIAS-Korrektur (Kapitel 4.1 bis 4.3) beschäftigt war.

Abbildung 2.1 skizziert beispielhaft die durchgeführten Arbeitsschritte und die dabei gewonnenen Ergebnisse. Die blau umrahmten Daten werden als Input und zur Eichung (Optimierung) der verschiedenen Impaktmodelle verwendet (schwarze Pfeile im linken Block). Zusätzlich stellen die Messungen des DWD auch noch die Grundlage für die BIAS-Korrektur der Klimadaten dar und dienen als Vergleichsbasis für die Modelldaten. Verschiedene Teilergebnisse werden zur Entwicklung weiterer Ergebnisse verwendet (schwarze Pfeile im rechten Block).

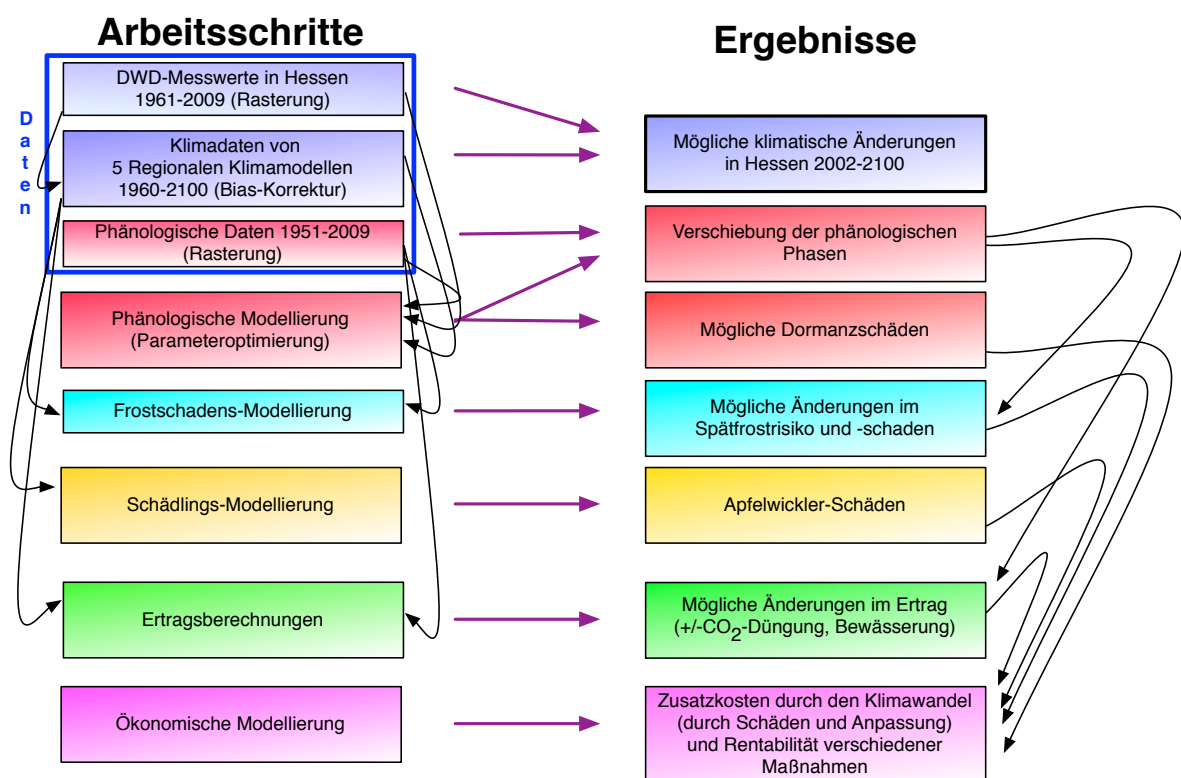


Abbildung 2.1: Arbeitsschritte und sich daraus ergebende Ergebnisse im Projekt CHARIKO.

3 Einleitung und Zielstellung

Eine effiziente und nachhaltige Anpassung an veränderte Klimabedingungen und an zunehmend extreme Witterungsverläufe erfordert genaue Kenntnisse über die zu erwartenden klimatischen Veränderungen und die hiermit verbundenen Folgen für den jeweiligen Wirtschaftssektor. Die Bereiche des Obst- und Weinbaus sind besonders stark mit klimatischen Aspekten verknüpft, da die mittlere Nutzungsdauer der Anlagen mehrere Jahrzehnte umfasst. Somit sind sowohl bei der Neuanlage als auch der Umgestaltung von Obst- und Weinanlagen stets längerfristige klimatische Veränderungen und zu erwartende Trends zu berücksichtigen.

Der Obstbau zählt zu jenen volkswirtschaftlichen Bereichen, für die erst in jüngster Zeit Abschätzungen zu den Auswirkungen des Klimawandels vorgenommen wurden (siehe [Chmielewski & Blümel, 2013](#)). Einer der maßgeblichen Gründe hierfür dürfte sein, dass es bisher kaum verlässliche Modelle für die differenzierte Ertragsbildung bei Obst gibt. Nicht zuletzt ist selbst bei der Modellierung der Obstblüte bzw. der Fruchtreife noch weiterer Forschungsbedarf notwendig, der vor allem den Zeitraum der winterlichen Ruhephase (Endodormanz) betrifft. Die verlässliche Berechnung dieser Entwicklungsstadien unter sich verändernden klimatischen Bedingungen ist für viele weiterführende Untersuchungsschritte, beispielsweise zur Spätfrostgefährdung, Ertragsbildung, Zusatzbewässerung, etc. von grundlegender Bedeutung. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden einige grundlegende Fortschritte bei diesen Fragen erzielt, wobei viele Detailfragen noch offen sind und weiter untersucht werden müssen. Hierzu zählen u. a. die weitere Verbesserung der Ertragsmodellierung für Obstgehölze und vor allem die verlässliche Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffekts in den Modellen. Man kann daher mit Sicherheit davon ausgehen, dass Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaschwankungen und Klimaänderungen auf Obstgehölze in den kommenden Jahrzehnten weiterhin Gegenstand vieler Studien auf nationaler und internationaler Ebene sein werden.

In Deutschland wird auf einer Fläche von ca. 50 000 ha (2009: 47 699 ha) mehr als 1 Mio. t Baumobst geerntet (2009: 1.275 · 10⁶ t). Der Anbau von Erdbeeren erfolgt auf weiteren knapp 13 000 ha (2009: 12 763 ha) mit einer Erntemenge von 150 000 t (2009: 152 800 t). Nahezu 80 000 Winzer produzieren in Deutschland 9.4 Mio. hl Wein (Mittel 2003-2008) auf einer Rebfläche von ca. 102 000 ha.

In Hessen nimmt der Obst- und Weinbau, im Vergleich zu anderen Bundesländern wie Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Niedersachsen einen relativ kleinen Stellenwert ein. Jedoch gibt es regional mehrere Schwerpunkte im Obst- und Weinbau, welche die Existenz vieler kleinerer und mittlerer Unternehmen sichern.

Das geplante Forschungsvorhaben entspricht den Aufgabenschwerpunkten

- *Empfindlichkeiten, Risiken, mögliche Kosten und Schäden durch den Klimawandel sowie Kosten von Vermeidungsmaßnahmen*
- *Entwicklung konkreter Anpassungsmaßnahmen – mögliche Schäden mit und ohne Anpassungsmaßnahmen*

des Fachzentrum Klimawandel Hessen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Abschätzung der Kosten des Klimawandels für den Obst- und Weinbau in Hessen unter besonderer Berücksichtigung der Unsicherheiten (Fehler), die sich aus den regionalen Klimamodellen und z. T. auch aus den Impaktmodellen ergeben.

Abbildung 3.1 zeigt die Vorgehensweise im Projekt CHARIKO. Die zwei globalen Klimamodelle (GCM = Global Climate Model) (HadCM3 und ECHAM5/MPI-OM) treiben drei verschiedene, regionale Klimamodelle (RCM = Regional Climate Model) (REMO-UBA, CLM, WETTREG) an. Die Outputs dieser Modellkombinationen¹ werden (mit Ausnahme von WETTREG, bei dem die auf Stationen bezogenen Daten nicht korrigiert, sondern nur auf das 0.2°-Raster der anderen Modelle gerastert wurden) bezüglich auftretender systematischer Fehler (BIAS) korrigiert und dienen danach als Input für verschiedene Impaktmodelle. Diese sollen die Auswirkungen des Klimawandels auf die Pflanzenentwicklung (Phänologie), den Wasserhaushalt, das Auftreten von Pflanzenkrankheiten und -schädlingen und letztendlich den Obstertrag abschätzen. Möglich sind hierbei sowohl positive Wirkungen, beispielsweise höhere Erträge als auch negative Effekte wie eine erhöhte Spätfrostgefahr während der Baumblüte (**Abbildung 3.2**). Um den negativen Auswirkungen entgegenzuwirken, werden Anpassungsmaßnahmen erforderlich sein, deren Ausmaß es zu quantifizieren gilt. Die hierdurch entstehenden Zusatzkosten werden, neben möglichen verbleibenden Ertragsschäden, in den Kosten des Klimawandels mit bilanziert. Diese Herangehensweise ist in Kapitel 4.12 (siehe auch [Chmielewski et al., 2009b](#)) beschrieben. Die im Projekt INKLIM-A bilanzierten Schäden und Kosten beziehen sich nur auf den Zeitraum 2001-2100. Schäden und Kosten, die danach durch den weiter voranschreitenden Klimawandel entstehen, können noch nicht berücksichtigt werden.

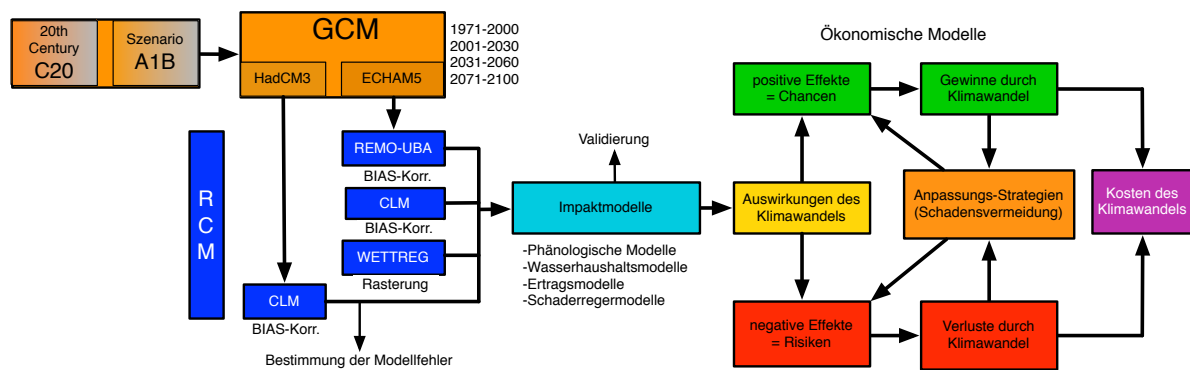


Abbildung 3.1: Ablauf der in INKLIM-A geplanten Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels im Obst- und Weinbau

¹ Diese vier Modellkombinationen werden im Folgenden nur noch als HadCM3-CLM (kurz: HCLM), REMO-UBA (kurz: RUBA), ECHAM5-CLM (kurz: ECLM) und WETTREG (kurz: WETTR) bezeichnet.

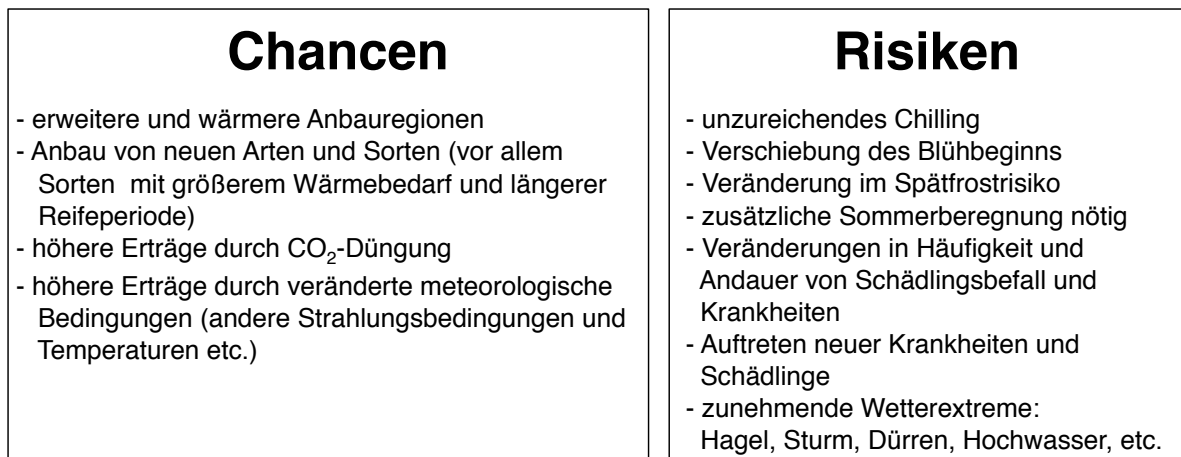


Abbildung 3.2: Chancen und Risiken des Klimawandels im Obst- und Weinbau

4 Daten und Methodik

4.1 Datenbasis

4.1.1 Meteorologische Messwerte an den Stationen

Vom DWD-Server konnten die Messwerte von zunächst nur ca. 36 Klimastationen in Hessen geladen werden. Für den Zeitraum 1.1.1961¹-31.12.2009 standen hierbei folgende Größen als Tageswerte zur Verfügung:

T (Tagesmitteltemperatur)

Tx (Tagesmaximumtemperatur)

Tn (Tagesminimumtemperatur)

e (Dampfdruck)

V_{10} (Windstärke in Bft)

Sd (Tagessumme der Sonnenscheindauer)

R (=PRECIPTOT) (Tagessumme Niederschlag)

Art des Niederschlags

ps (Tagesmittelwert des Luftdrucks am Boden)

Vmax (Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit)

Zusätzlich wurden in einer zweiten Datei Winddaten vom 1.1.1951-31.12.2005 zur Verfügung gestellt:

VmaxRicht (Richtung der maximalen Windboe); [von Nord (0°) über Ost (90°)];

und noch einmal wie bereits bei den Klimastationen:

Vmax (Maximum der Windgeschwindigkeit aus stündlichen Werten)

4.1.1.1 Einschränkungen

Die Vmax-Werte aus der Winddatei entsprechen zum Teil hundertprozentig den “*Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit*”-Werten aus den Klimadaten; manchmal treten aber auch größere Abweichungen zu bestimmten Einzelterminen auf; und es gibt Abschnitte, an denen sich alle Werte über einen längeren Zeitraum leicht von denen der Klimawerte unterscheiden. Warum das so ist, konnte nicht geklärt werden.

Da bei den Vmax-Werten der Klimadaten einige Stationen definierte Vmax-Werte hatten, die bei den Winddaten keine definierten Werte besaßen, und es bei den Klimadaten auch noch zusätzliche Stationen gab, die nicht bei den Winddaten auftraten und die trotzdem definierte Werte für Vmax lieferten, wurde an der HU-Berlin folgendermaßen vorgegangen: Die Vmax-Daten der Klimadaten wurden mit den Vmax-Daten der Winddaten vereinigt bzw. derart “verschnitten”, dass die undefinierten Daten der einen Gruppe mit den definierten Werten der anderen Gruppe aufgefüllt wurden, wenn definierte Werte

¹ Die Startjahre der Klima- und der Windmessungen (weiter unten) wurden hier in rot dargestellt, um zu betonen, dass es sich um unterschiedliche Termine handelt.

in der anderen Gruppe zur Verfügung standen. Erst nach dieser Vervollständigung der V_{max} -Daten wurden die Daten regionalisiert (gerastert).

Alle DWD-Daten müssen vor der Anwendung und vor einem Vergleich mit den regionalen Klimamodellen auf einen rechteckigen Ausschnitt, der das politische Hessen enthält, das sogenannte *Hessenrechteck*, interpoliert werden. Dieses Rechteck ist als roter Rahmen in Abbildung 4.2 eingetragen (siehe auch Abbildung 4.8). Voraussetzung für eine verlässliche Rasterung und Korrektur der Modelldaten auf dem Hessenrechteck war die Bereitstellung der Daten von zusätzlichen Klimastationen innerhalb und außerhalb vom politischen Gebiet Hessens und der Messwerte der noch vollständig fehlenden, zahlreichen Niederschlagsstationen. Nach einigen Nachlieferungen durch den DWD war die Überdeckung des Gebiets mit Stationen im November 2010 endlich ausreichend.

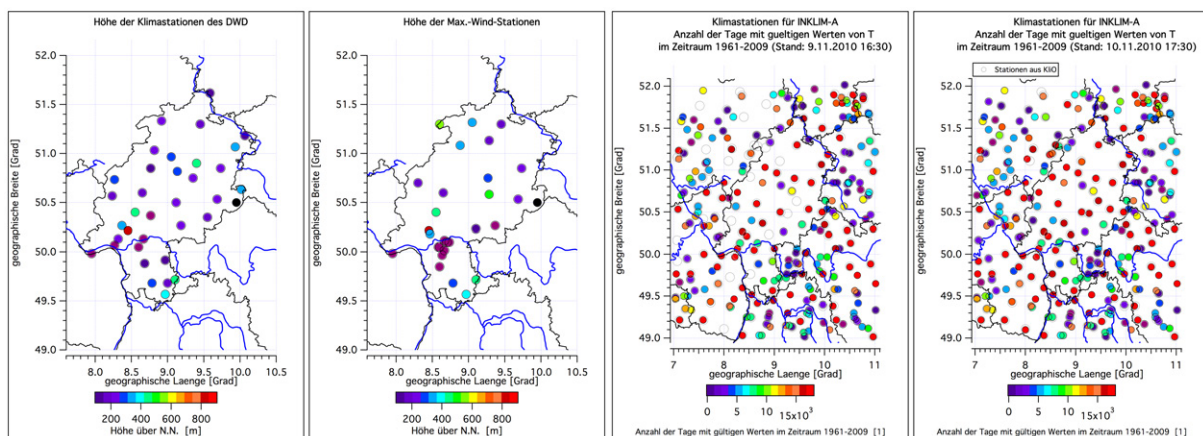


Abbildung 4.1: Klimastationen des DWD vor (links) und nach (rechts) den Nachlieferungen im November 2010.

Das linke Bild in **Abbildung 4.1** zeigt die Lage der im besten Fall zur Verfügung stehenden Klima- und Windstationen, die vom DWD für INKLIM-A vor dem 10.11.2010 geliefert worden waren. Daten von Niederschlagsstationen fehlten vollkommen. Im rechten Bild sind die nun vorliegenden Klimastationen eingezeichnet (Stand am 9.11.2010 und am 10.11.2010). Offene Kreise in den Abbildungen kennzeichnen Stationen, für die aus vorhergehenden Projekten bekannt war, dass Daten existieren, für die der DWD aber keine Daten geliefert hat. **Abbildung 4.2** zeigt die jetzt ebenfalls vorliegenden Niederschlagsstationen. Innerhalb des Hessenrechtecks (mit einem zusätzlichen Rand von 0.5 Grad für die Rasterung) wurden ca. 2900 Niederschlagsstationen für die Rasterung verwendet.

Abbildung 4.3 zeigt die Anzahl der Stationen mit gültigen Werten einiger ausgewählter Größen im Zeitraum 1961-2009 nach dem Durchlaufen der an der HU-Berlin verwendeten Prüfroutinen, die bereits im vorhergehenden Projekt KliO ([Chmielewski et al., 2009a](#), Kap. 3.1.1 und 3.4.1) erstellt wurden. Die Anzahl der Werte ist nun auch für den Luftdruck am Boden p_s und nach 1970 auch für V_{max}^2 ausreichend. Allerdings sollte man die *regionalisierten* V_{max} -Messwerte erst ab dem 2.1.1971 verwenden, da vorher weniger als 10 (Silvester und Neujahr 1971 nur 2 bzw. 3) gültige Werte vorhanden waren.

² V_{max} wird weiter unten (z. B. bei **Tabelle 4.3**) mit $V_{MAXGUST}$ bezeichnet, um zu betonen, dass es sich um das Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit mit Berücksichtigung der Windböen handelt; im Modell HadCM3-CLM gibt es auch noch ein *Maximum ohne Berücksichtigung der Böen* (= Maximum der 10 Minutenmittelwerte).

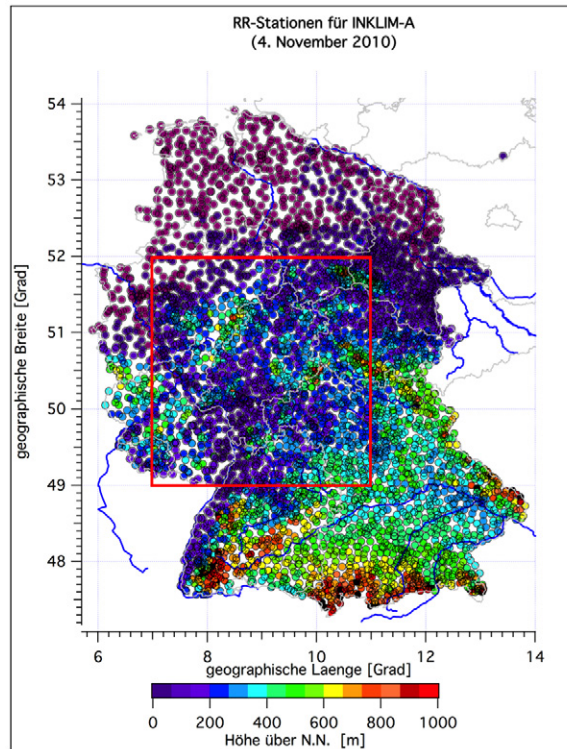


Abbildung 4.2: Niederschlagsstationen des DWD nach der Nachlieferung im November 2010. Der rote Rahmen stellt das interessierende Hessenrechteck dar.

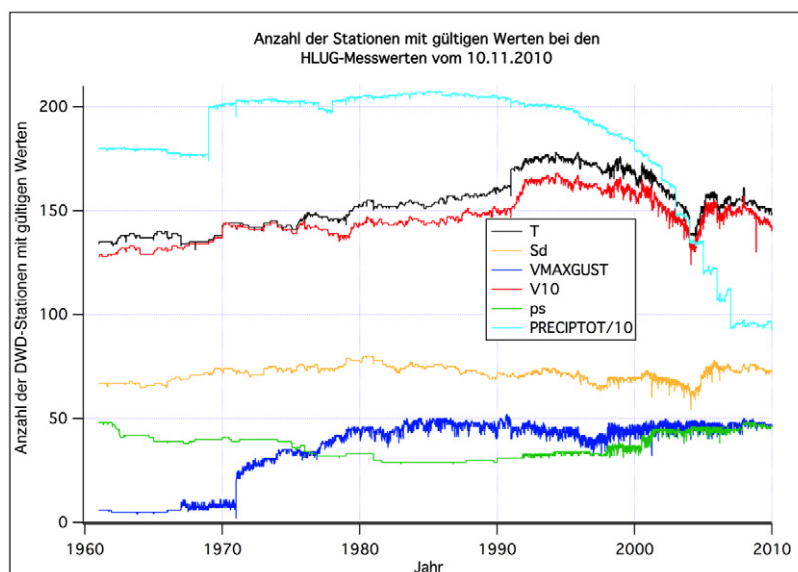


Abbildung 4.3: Anzahl der DWD-Stationen mit gültigen Werten im Hessenrechteck für einige ausgewählte Größen

Bei der “Windrichtung der maximalen Bö” mussten die Werte von Bad Soden (Station 2804) von Juni bis Dezember 1999 auf undefiniert gesetzt werden, da der Wind höchstwahrscheinlich fehlerhafter Weise fast immer aus Norden (360°) wehte (siehe **Abbildung 4.4**).

Auch an der Station Wasserkuppe (2625) wehte der Wind im Juli und August 1998 fast

permanent aus 30° . Daher wurden auch die Windrichtungswerte dieser Station für diese beiden Monate auf undefiniert gesetzt.

Scheinbar wurde die (normale) Windgeschwindigkeit V , die leider als Windstärke in Beaufort angegeben wurde, an einigen Stationen (z. B. Kassel) nur bis zum 31.3.2001 in 1/10 Bft gemessen. Danach liegen die Werte nur in “ganzen Beaufort” vor und sind daher nach Umrechnung in m/s relativ unstetig. Für die Umrechnung nach m/s wurde folgende Formel (<http://de.wikipedia.org/wiki/Beaufortskala>) verwendet:

$$V = 0.8360 \text{ m/s} \cdot B^{1.5} \quad (4.1)$$

(B = Windstärke in Bft; V = Windgeschwindigkeit in m/s).

Die Windrichtung 0° bezeichnet nach Angaben des DWD umlaufende oder sehr schwache Winde, bei denen die Windrichtung nicht bestimmt werden kann. Es treten allerdings Böen mit Windgeschwindigkeiten von über 20 m/s auf, denen 0° zugeordnet ist. Die insgesamt 122 0° -Werte der “Maximal-Böenrichtung” wurden bei der später durchgeführten Regionalisierung (Rasterung) wie 360° behandelt.

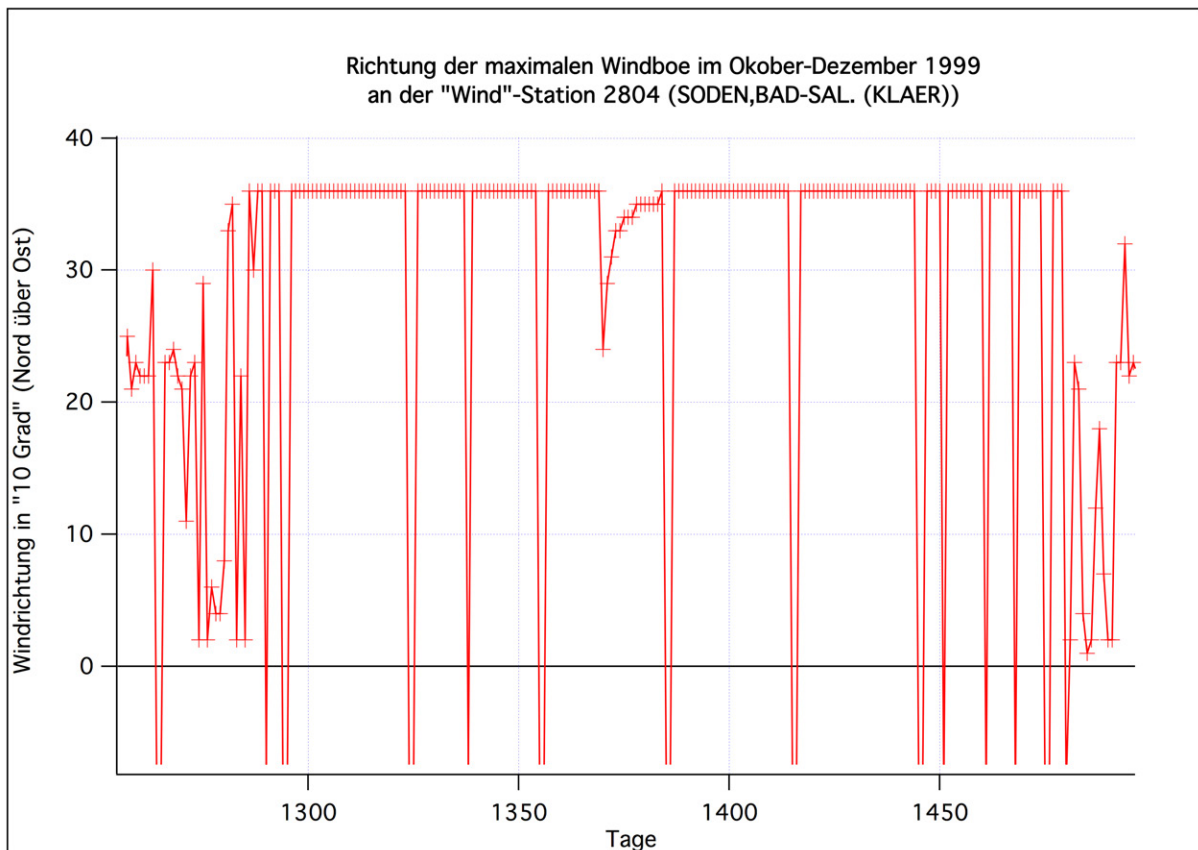


Abbildung 4.4: Richtung der maximalen Windbö an der “Wind”-Station 2804

Der Dampfdruck e an den Stationen wurde zur Kontrolle mit dem Sättigungsdampfdruck $esat(T)$ verglichen. Man beachte aber, dass es, da hier Tagesmittelwerte betrachtet werden, tatsächlich vorkommen kann, dass $e > esat(T)$ ist. Durch Taylorentwicklung von $esat(T)$ und anschließender Mittelung über die Zeit (Balken) zeigt man nämlich leicht, dass systematisch

$$\overline{esat(T)} > esat(\bar{T}) \quad (4.2)$$

gilt. Herrscht den ganzen Tag über nahezu Sättigung, so kann daher $\bar{e} > esat(\bar{T})$ gelten. Aus diesem Grund wurden scheinbar zu große e erst dann auf $esat(T)$ bzw. “1.1 $esat$ ” gesetzt, wenn $e \geq 1.1 esat(\bar{T})$ galt. Aus (4.2) folgt übrigens, dass die aus den Tagesmittelwerten von e und T [d. h. mit \bar{e} und $esat(\bar{T})$] berechnete relative Feuchte

$$\widetilde{Rel} := \bar{e}/esat(\bar{T}) \quad (4.3)$$

größer als 100 % sein kann!

Durch die Testroutinen wurden die folgenden weiteren “Fehler” in den DWD-Stationsmessungen aufgedeckt: Insgesamt 4 Werte der Tagesminimumtemperatur T_n waren größer als die Tagesmitteltemperatur. In einigen Fällen war die aktuelle Sonnenscheindauer größer als die astronomisch maximal mögliche. Die Windgeschwindigkeit hatte an 3 verschiedenen Stationen mehr als 30-mal hintereinander denselben Wert. Da die Windgeschwindigkeit aber an einigen Stationen nur in “ganzen Beaufort” angegeben wurde, können solche Fälle eventuell tatsächlich auftreten. Der Dampfdruck e war in einigen Fällen im Winter extrem gering (0.6...0.9 hPa), sogar an Stationen unterhalb 500 m Höhe.

4.1.2 “1 km-Rasterdaten” des DWD

Es lagen folgende Datensätze für Monatsmittelwerte (beim Wind: nur ein Mittelwert von 1981-2000) im ASCII-Format auf einem Gauß-Krüger 1 km-Raster für den Zeitraum 1961-2009 vor:

T

Tx

Tn

PRECIPTOT (Niederschlag)

Sd Sonnenscheindauer

e (Dampfdruck)

Wind_10m (Windgeschwindigkeit in 10 m-Höhe; nur ein Mittelwert 1981-2000 auf dem 1 km-Raster)

Wind_80m (Windgeschwindigkeit in 80 m-Höhe; nur ein Mittelwert 1981-2000 auf dem 1 km-Raster)

Für jeden Monat jedes Jahres existiert eine Datei mit 654 mal 866 Gitterpunkten (beim Wind 650 x 880). Diese überdecken das Gebiet der BRD.

4.1.2.1 Einschränkungen

Um die Daten mit den Modelldaten vergleichen zu können, müssen die Werte vom Gauß-Krüger-Raster auf ein geographisches Raster umgerechnet werden. Da die Daten nur als Monatswerte vorliegen, kann man mit ihnen nur statistische Auswertungen vornehmen. Der 20-jährige Mittelwert des Windes (nur ein Wert pro Rasterzelle) ist für unsere Belange nicht von großem Wert.

4.1.3 Phänologische Daten für Hessen

Da im Rahmen von INKLIM-A vom DWD nur phänologische Daten aus wenigen Jahren oder nur für sehr kleine Gebiete (Raum Schlüchtern) zur Verfügung gestellt wurden, und

hiermit keine phänologischen Modelle geeicht werden können, wurden diese Daten nicht ausgewertet!

Anstelle dieser Datensätze wurden andere, weit umfangreichere, geprüfte phänologische Daten des DWD aufbereitet. Leider wurden bei Plausibilitätschecks an der HU-Berlin auch in diesen Daten viele Fehler (falsche Stationskoordinaten, falsche Bundeslandzuordnungen, unstimmmige Werte usw.) aufgedeckt. Da keine korrigierten Daten vom DWD zur Verfügung gestellt werden konnten, wurden diese an der HU-Berlin geprüften und zum Teil nachträglich korrigierten Daten zur Rasterung benutzt³ (siehe Kap. 4.2.3).

4.1.4 Daten der dynamischen regionalen Klimamodelle

Drei⁴ der vier in CHARIKO verwendeten Klimamodelle [ECHAM5-(REMO-UBA) (kurz: REMO-UBA), ECHAM5-CLM, HadCM3-CLM] sind rein dynamische Klimamodelle.

Das hydrostatische regionale Modell REMO-UBA⁵ wird vom globalen Modell ECHAM5/MPI-OM angetrieben.⁶ Die globalen Simulationen mit ECHAM5 wurden mit der spektralen Auflösung T63 [grob äquivalent zu $1.9^\circ \times 1.9^\circ$; das entspricht in mittleren Breiten ungefähr einer horizontalen Auflösung von $140 \text{ km} \times 210 \text{ km}$ (Δ Länge \times Δ Breite)] und einer vertikalen Auflösung von 31 Schichten durchgeführt. Informationen zum ECHAM5 und seinem Nachfolger ECHAM6 findet man unter <http://www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/echam.html>. Eine ausführliche Modellbeschreibung von ECHAM5 findet man bei Roeckner et al. (2003) und Roeckner et al. (2004).

Das nicht-hydrostatische regionale Modell CLM⁷ (Klimaversion des Lokalmodells des DWD, welches inzwischen zum COSMO-CLM weiterentwickelt wurde) ist beim ECHAM5-CLM ebenfalls in das ECHAM5/MPI-OM *eingebettet*. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Outputdaten wurde derselbe Modelllauf des ECHAM5 wie beim REMO-UBA verwendet! Eine kurze Beschreibung des CLM findet man unter <http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/CLM/clm.html> und http://mud.dkrz.de/fileadmin/extern/SGA-Files/CLM_WS_2008_Poster/m224002_ECHAM_CLM_Info.pdf.

³ Als fehlerhaft erkannte Werte wurden undefiniert gemacht.

⁴ Genau genommen handelt es sich um nur zwei unterschiedliche, dynamische *Regionale Klimamodelle* (REMO-UBA und CLM), von denen aber die beiden verwendeten Läufe des CLM von verschiedenen *Globalen Klimamodellen* angetrieben wurden.

⁵ Für eine Beschreibung siehe z. B. <http://www.remo-rcm.de/REMO-UBA.1189.0.html>. Das in REMO benutzte *Land Surface Scheme* (LSS) basiert auf der physikalischen Parametrisierung des Klimamodells ECHAM4. Es wurde inzwischen zu einem umfassenderen LSS erweitert, indem ein verbessertes Oberflächen-Runoff-Schema, Inland-Gletscher und eine einfache Vegetations-Phänologie integriert wurden (siehe http://www.remo-rcm.de/fileadmin/user_upload/remo/UBA/pdf/LandSurfaceScheme_REMO_short-summary.pdf).

⁶ D. h., dass die lateralen Randbedingungen (sowie ggf. Sea Surface Temperature and Sea Ice) für REMO-UBA von diesem Modell vorgegeben werden. Mehr zum *Nesting* von regionalen Klimamodellen (RCM's) in Globalen Klimamodellen (GCM's) findet man in <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/380.htm> und zu den sich dabei ergebenden Problemen (z. B. "ill-posed boundary value problem") in http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch11s11-10-1-2.html.

⁷ Das CLM benutzt das Land Surface Scheme *TERRA*, und neuerdings können auch das Land Surface Scheme *VEG3D* oder *CLM* [= Community Land Model (nicht zu verwechseln mit dem hier beschriebenen Klimamodell CLM!); dieses LSS ist eine Kombination aus dem Modell *BATS*, dem Land Surface Modell des NCAR, und dem Schnee Modell aus dem Land Surface Modell des "Institute of Atmospheric Physics" der Chinese Academy of Sciences; siehe <http://www.climatechange.boun.edu.tr/belgeler/BATS-CLM.pdf>] verwendet werden (http://www.imk-tro.kit.edu/download/Diplomarbeit_Fischer.pdf).

Beim HadCM3-CLM werden die Randbedingungen für das CLM aus dem globalen Modell HadCM3 des Hadley Centre geliefert (http://cera-www.dkrz.de/IPCC_DDC/IS92a/HadleyCM3/hadcm3.html). Das HadCM3 ist im Gegensatz zu ECHAM5 kein spektrales Modell, sondern ein “*grid point*”-Modell. Die horizontale Auflösung der atmosphärischen Komponente beträgt $3.75^\circ \times 2.5^\circ$ (Δ Länge \times Δ Breite) (ca. 295 km \times 278 km bei 45° N; das ist vergleichbar mit einer spektralen Auflösung von T42) mit 19 vertikalen Schichten.

Weitere kurze Informationen zu REMO-UBA und zum CLM findet man auch in Schuchardt & Wittig (2010), S. 16 ff.

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Daten dieser Modelle, die vom DWD für das Projekt INKLIM-A zur Verfügung gestellt wurden. Zusätzlich sind in der Tabelle auch die horizontalen Auflösungen der benutzten regionalen Klimamodelle eingetragen. Diese sind mit 0.1° (ca. 11 km) bis 0.25° (ca. 28 km) wesentlich feiner als die der globalen Modelle.

Alle Größen lagen als Tageswerte bzw. –summen im netcdf- und ASCII-Format für ein die Bundesrepublik Deutschland enthaltendes Rechteck vor. Für jede Größe und jedes der drei Modelle wurde jeweils eine Datei für das Szenario A1B (1.1.2001 bis 31.12.2100) und eine für den “Kontrolllauf” C20 (siehe Tabelle 4.1) geliefert. Die Gitterpunkte waren bereits vom rotierten Originalraster der Modelle mit “Remapping” auf ein reguläres latlon-Raster (geographische Koordinaten) umgerechnet worden.

Tabelle 4.1: Vom DWD für INKLIM-A zur Verfügung gestellte Daten. Rote Einträge weisen auf ein uneinheitliches Format, fehlende Daten oder Fehler hin.

	REMO-UBA	ECHAM5-CLM	HadCM3-CLM	Einheit	Bemerkungen
Starttag	1.1.1950	1.1.1960	1.1.1951		
Endtag	31.12.2100	31.12.2100	31.12.2100		
Auflösung	0.1°	0.2°	0.25°		
T	X	X	X	K	
Tx	X	X	X	K	
Tn	X	X	X	K	
ps	X	X	X [+p(sea level)]	Pa	
Tdew	X	X	X	K	
U	X	X	X	m/s	
V	X	X	X	m/s	
PRECIPTOT	X (+DPREC)	X	X	mm/d	mm/s bei HadCM3
CLCT	X	X	X	1	
Glob	X	X	X	Wh/m ²	W/m ² bei HadCM3
Sd	gibt es nicht	X	gibt es nicht	h/d	
TG	C20 fehlt	X	fehlt	K	
Wsnow	X	X	X	m, cm, mm	
Alb	fehlt	X	X	1	
Vmax	X	X	fehlt	m/s	

Die in der Tabelle angegebenen Abkürzungen für die einzelnen Größen wurden folgendermaßen gewählt:

1. T = Lufttemperatur in 2 m Höhe
2. Tx = Tagesmaximum der 2 m-Lufttemperatur

3. Tn	= Tagesminimum der 2 m-Lufttemperatur
4. ps	= Luftdruck am Boden
5. Tdew	= Taupunkt in 2 m Höhe über Grund
6. U	= Tagesmittelwert der Westkomponente der Windgeschwindigkeit
7. V	= Tagesmittelwert der Südkomponente der Windgeschwindigkeit
8. PRECIPTOT	= Gesamtniederschlagssumme an einem Tag
9. CLCT	= Gesamtbedeckungsgrad (1 = 100 %)
10. Glob	= Globalstrahlung
11. Sd	= Sonnenscheindauer an einem Tag
12. TG	= Bodenoberflächentemperatur
13. Wsnow	= Wasseräquivalent des Schnees
14. Alb	= Albedo (1 = 100 %)
15. Vmax	= maximale Windgeschwindigkeit (Bö) am Tag
16. DPREG	= Drifted Total Precipitation (DPREC) pro Tag (nur bei REMO)

Zusätzliche wurden für jedes der drei Modelle Dateien, welche die Geländehöhe der Rasterzellen über NHN ⁸ enthielten, auf dem DWD-Server zur Verfügung gestellt.

4.1.4.1 Einschränkungen

Die HadCM3-Daten lagen leider nur als 10- und z. T. als 30-“Jahresdateien” vor. Die Daten reichen leider auch nur bis zum 30. November 2099 und besitzen einen Kalender, der für jeden Monat im Jahr exakt 30 Tage beinhaltet.

Bedauerlicherweise wurde kein Tagesmittelwert des Betrags der Windgeschwindigkeit zur Verfügung gestellt, sondern nur die Tagesmittelwerte der West- und Südkomponenten. Hieraus gebildete Windbeträge können sich erheblich vom Tagesmittelwert des Betrags unterscheiden! Wie man der Tabelle 4.1 entnimmt, fehlten leider auch einige Größen, die aber in den originalen Datenbanken (von CERA und ENSEMBLE) vorhanden sind (Eintrag “fehlt”). Außerdem unterschieden sich die Starttage und die Auflösungen der Modelle, und in vielen Fällen stimmten die Einheiten der einzelnen Größen nicht überein (rot markierte Einträge).

Erschwerend ist auch, dass die originalen Dateinamen beibehalten wurden, so dass gleiche Größen in jedem Modell anders heißen. Auch die originalen netcdf-Attribute wurden beibehalten, und nach Umrechnungen nicht verändert, was dann zu fehlerhaften Attributen führte (z. B. var142 für *PRECIPTOT*; var142 ist aber bei REMO-UBA die *large scale precipitation* und nicht die *total precipitation*).

4.1.5 Daten des statistischen Klimamodells WETTREG2010

Die Daten des statistischen regionalen Klimamodells WETTREG2010 wurden im Gegensatz zu denen der dynamischen Klimamodelle nicht auf einem Raster, sondern stationsweise zur Verfügung gestellt. Den ursprünglichen DWD-Messungen wurden bei diesem

⁸ NHN = Normalhöhennull; siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/Normalhöhennull>.

Modell durch statistische Verfahren (Berücksichtigung der Häufigkeitsänderungen von Wetterlagen gegenüber dem heutigen Klima mit Hilfe des Outputs des globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OM, Szenario C20 und A1B, Lauf 1) *Klimaänderungssignale (wetterlagenspezifische Änderungen)* aufgeprägt (siehe z. B. die Webseite der CEC-Potsdam: <http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/WettReg/wettreg.html>).

Insgesamt wurden Daten von 10 verschiedenen WETTREG-Läufen [tägliche Daten; transient von 1961-2100; im Folgenden mit Lauf 0 bis 9 (WETTR0 bis WETTR9) bezeichnet] zur Verfügung gestellt.

Um keinen unerwünschten Randeffect am Rand des Hessenrechtecks zu erhalten, wurden auch Stationen außerhalb des Hessenrechtecks verwendet, wenn sie nicht mehr als 0.5° vom Rand des Hessenrechtecks entfernt waren. Von den deutschlandweit in WETTREG2010 verwendeten 387 Klima- und 2943 Niederschlagsstationen wurden daher nur noch 186 Klima- und 1354 Niederschlagsstationen für Hessen verwendet. Vor der Rasterung (siehe Kapitel 4.2.5) wurden Schalttage, die in WETTREG2010 nicht berücksichtigt wurden, an den Stationen durch Doppelung des 28. Februar eingefügt.

4.1.5.1 Einschränkungen

Man muss bei Auswertungen mit WETTREG2010-Daten berücksichtigen, dass die zur Erstellung des WETTREG2010-Datensatzes benutzten DWD-Stationenwerte von den WETTREG-Modellierern nicht auf Fehler oder Ausreißer überprüft wurden. Die an der HU benutzte Testroutine fand zahlreiche Ausreißer. Auch wenn sich diese Ausreißer (hoffentlich) in den meisten Fällen nicht in langjährigen Mittelwerten niederschlagen, ist bei Auswertungen wie z. B. der *Bestimmung des ersten Frosttags im Jahr* mit verfälschten Ergebnissen zu rechnen. Außerdem wird die Konsistenz der Größen untereinander in diesen Ausreißerfällen häufig verletzt.

Da die WETTREG-Entwickler angeblich auf Wunsch der Benutzer keine Ausreißer-Tests vorgenommen haben, wurden auch an der HU-Berlin die bei der Rasterung der WETTREG-Daten verwendeten Ausreißerroutinen weitestgehend ausgeschaltet bzw. auf *extrem unsensibel* geschaltet. Auf diese Weise wurde gewährleistet, dass die WETTREG-Daten nicht *verfälscht* wurden, und dass auch die gerasterten Daten mit den auf die Stationen bezogenen, originalen WETTREG-Daten konsistent sind und die gleichen Schwächen aufweisen.

Da die Koordinaten der WETTREG-Stationen nur mit einer Genauigkeit von 0.01° angegeben sind, gibt es Stationen, die scheinbar am selben Ort liegen und trotzdem stark unterschiedliche Werte bestimmter Parameter messen (Abweichungen von über 100% an einzelnen Tagen beim Niederschlag, sogar bei Werten von 30 mm/d). Solche Dubletten müssen vermieden werden, da sonst die Kriging-Matrix (siehe Abschnitt 4.2.1) bei der Rasterung singular wird.

Die Sonnenscheindauer S_d ist in WETTREG2010 im Zeitraum 1971-2000 im November und Dezember im Flächenmittel über Hessen um ca. 30% - 40% zu groß. Die Korrekturfaktoren, die im Winter angebracht werden müssten⁹, sind mit 0.7 bis 0.8 meistens hoch signifikant von eins verschieden (**Abbildung 4.5**, oben links)!

WETTREG2010 berechnet für den Zeitraum 2071-2100 im Sommer eine Zunahme der Sonnenscheindauer gegenüber dem Zeitraum 1971-2000 von ca. 3 h (**Abbildung 4.5**, unten

⁹ Diese Korrektur wurde aber nicht durchgeführt, da die WETTREG2010-Daten nicht bezüglich BIAS korrigiert wurden!

links). Das entspricht einer Zunahme von 50 %, da die Mittelwerte von S_d im Sommer im Zeitraum 1971-2000 ca. 6 h betragen (Abbildung 4.5, oben rechts). Während die dynamischen Modelle keine signifikante Zunahme der Globalstrahlung prognostizieren (Abbildung 4.5, unten rechts), berechnet¹⁰ WETTREG2010 eine signifikante Zunahme um über 30 %!

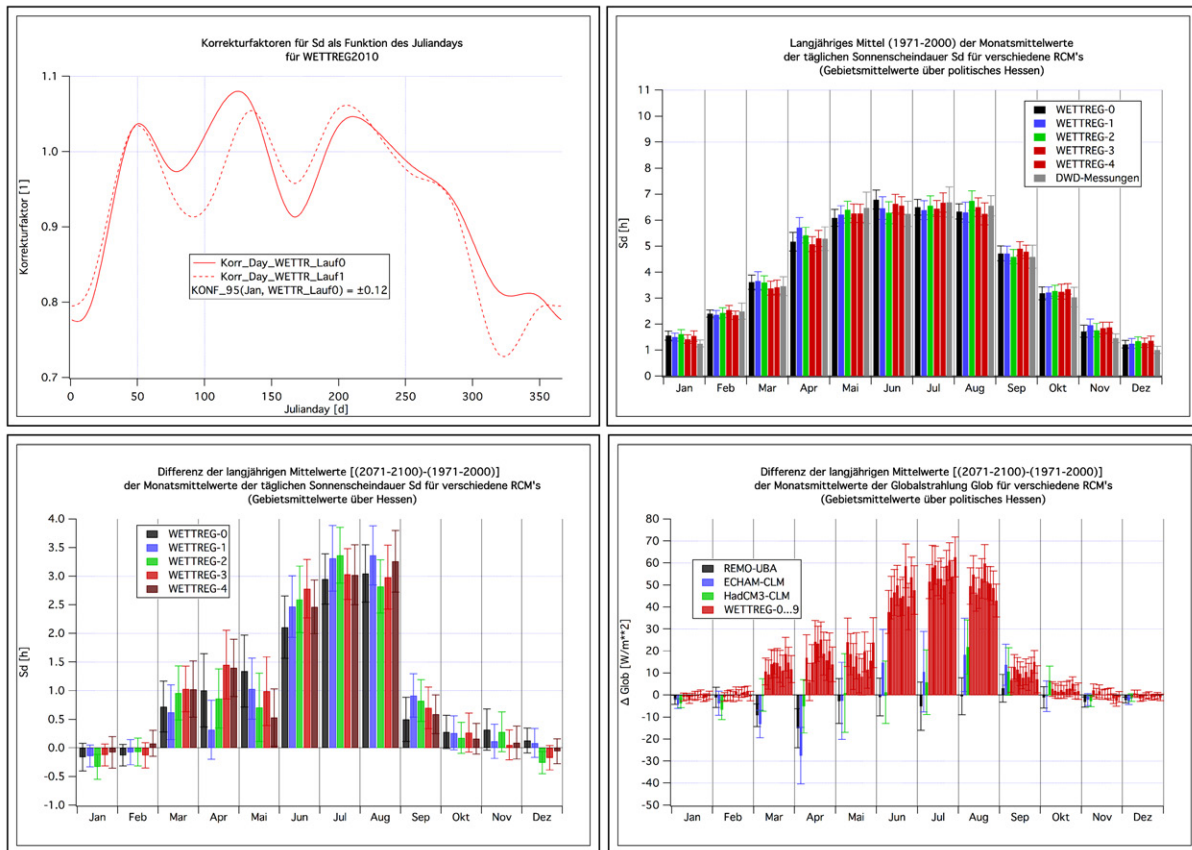


Abbildung 4.5: Korrekturfaktoren für die Sonnenscheindauer S_d für die WETTREG2010-Läufe 0 und 1 an einem Gitterpunkt in der Nähe von Frankfurt/Main (oben links); Sonnenscheindauer im Mittel über 1971-2000 (Gebietsmittelwert über das politische Hessen aus WETTREG-Lauf 0-4 und aus DWD-Messungen) (oben rechts); Zunahme der Sonnenscheindauer (2071-2100 vs. 1971-2000) für WETTREG-Lauf 0-4 (unten links); Zunahme der Globalstrahlung $Glob$ (2071-2100 vs. 1971-2000) in REMO-UBA, ECHAM5-CLM, HadCM3-CLM und den WETTREG-Läufen 0-9 (für WETTREG wurde $Glob$ aus S_d berechnet) (unten rechts)

Abbildung 4.6 (links) zeigt, dass die Jahresmittelwerte (gemittelt über Hessen) der Lufttemperatur T in WETTREG2010 (Szenario A1B) viel kleinere Schwankungen als in den 3 dynamischen Modellen aufweisen. Das rechte Bild der Abbildung 4.6 vergleicht die Jahresmittelwerte der Temperatur von WETTREG2010 (rot) mit denen aus WETTREG2006 für den Zeitraum 2001-2010. Hierbei wurde über alle WETTREG-Stationen, die in Hessen liegen, gemittelt. Dargestellt sind die ersten 100 von WETTREG2006 in dieser Dekade simulierten Jahre bzw. die 100 Jahre der 10 WETTREG2010-Läufe, die in den Zeitraum 2001-2010 fallen. Wie man leicht erkennt, war die Standardabweichung $SDEV$ der Jahresmittelwerte von T in WETTREG2006 ungefähr 2,5 mal größer als

¹⁰ Wenn man die Globalstrahlung aus der Sonnenscheindauer abschätzt [vgl. Gleichung (4.6) weiter unten].

in WETTREG2010. Auch in der Gegenwart bzw. im Szenario C20 sind die Standardabweichungen von WETTREG2010 viel zu klein: Während REMO-UBA (RUBA), das ECHAM5-CLM (ELCM) und die DWD-Werte annähernd gleiche Standardabweichungen $SDEV$ zeigen (zwischen 0.63 K und 0.68 K), weist WETTREG2010 nur $SDEV$'s von 0.27 K bis 0.43 K auf. Die Standardabweichung der Jahresmittelwerte der Temperatur ist in WETTREG2010 daher um 33 % bis 60 % kleiner als in der Realität und in den dynamischen Modellen.

Weitere Untersuchungen ergaben, dass die Standardabweichungen der Monatswerte von T (z. B. aller Junimittelwerte) in WETTREG2010 nur ca. 10 %-20 % zu klein sind und die der Tageswerte (nach Abzug des Jahresgangs) korrekt wiedergegeben werden. Auch die Größenordnung der dekadischen Schwankungen ist realistisch.

Der Grund, warum die dekadischen Schwankungen korrekt simuliert werden, liegt wohl darin, dass diese durch das antreibende GCM vorgegeben sind. Die Tageswerte in WETTREG2010 geben die natürliche Variabilität der DWD-Stationsdaten wieder. Daher ist auch deren Schwankungsbreite korrekt. Dagegen scheint der in WETTREG2010 benutzte Algorithmus ("Umsortierung von Zeitreihenabschnitten nach klassifizierten Wetterlagen u. ä.") bei einem "Frequenzbereich" mit Periode *Monat bis zu einem Jahr oder einigen Jahren* nicht in der Lage zu sein, die natürliche "Jahr zu Jahr"-Schwankungsbreite zu generieren.

Beim Niederschlag sind die Standardabweichungen der Jahresmittelwerte nur um ca. 25 % kleiner als bei den dynamischen Modellen.

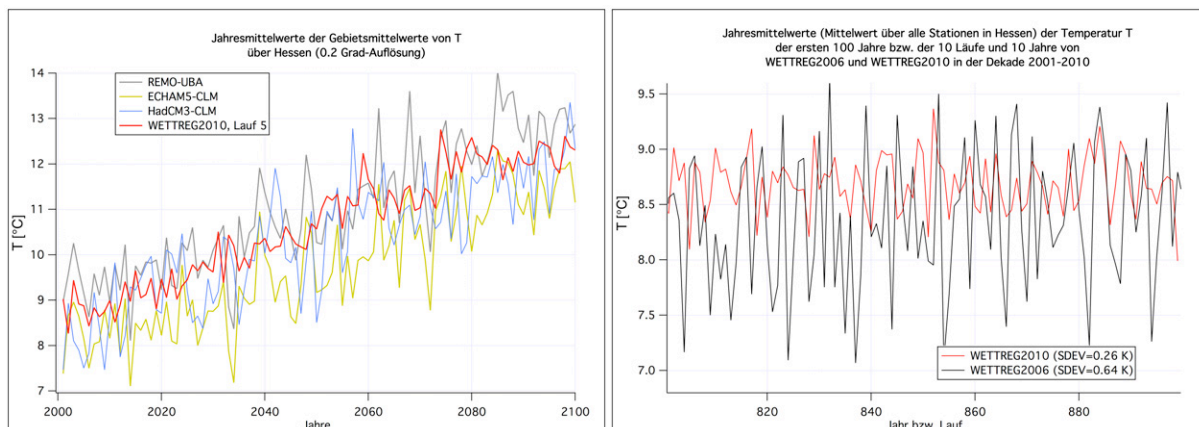


Abbildung 4.6: Jahres- und Gebietsmittelwerte der Lufttemperatur in Hessen (Szenario A1B) (links); Jahresmittelwerte, gemittelt über alle Stationen in Hessen, für die Jahre aller Läufe zwischen 2001 und 2010 für WETTREG-2006 und -2010 (rechts)

Die viel zu kleinen Varianzen der Jahresmitteltemperaturen können vollständig mit zu starken *intra-annualen Schwankungen* erklärt werden. Das kann man zeigen, indem man Untersuchungen zur Bartel'schen Erhaltungszahl [vgl. Formel (4.5)] vornimmt. Einfacher sieht man das aber mit Hilfe der Autokorrelationsfunktion ein: Die (über den zeitlichen Verlauf) berechneten Autokorrelationsfunktionen der vom Jahresgang befreiten T_i für WETTREG2006 (schwarze Kurve), WETTREG2010 (rote Kurve), für verschiedene Messungen und für REMO-UBA sind in **Abbildung 4.7** (links) dargestellt. Man beachte, dass sich dieses Ergebnis nicht etwa auf die ferne Zukunft, sondern auf die Gegenwart bezieht (2001-2010 bzw. 1961-2000)! Die Autokorrelationsfunktion fällt in WETTREG2010 viel schneller zu null hin ab als in WETTREG2006 und als bei den Messungen und nimmt

sogar negative Werte an. Die Autokorrelationsfunktionen von WETTREG2006 und den verschiedenen Messungen stimmen dagegen recht gut überein.

Auch die Autokorrelationsfunktion von REMO-UBA (blaue Kurve) hat große Ähnlichkeit mit den aus Messungen berechneten Kurven. Hier kann allerdings eine leicht größere Autokorrelation für große “Lags” beobachtet werden. Eine Ursache hierfür sind wahrscheinlich die ausgeprägten dekadischen Temperaturschwankungen, die REMO-UBA im Kontrolllauf berechnet (d. h. die relativ großen Amplituden im Spektrum bei langwelligen Schwingungen).

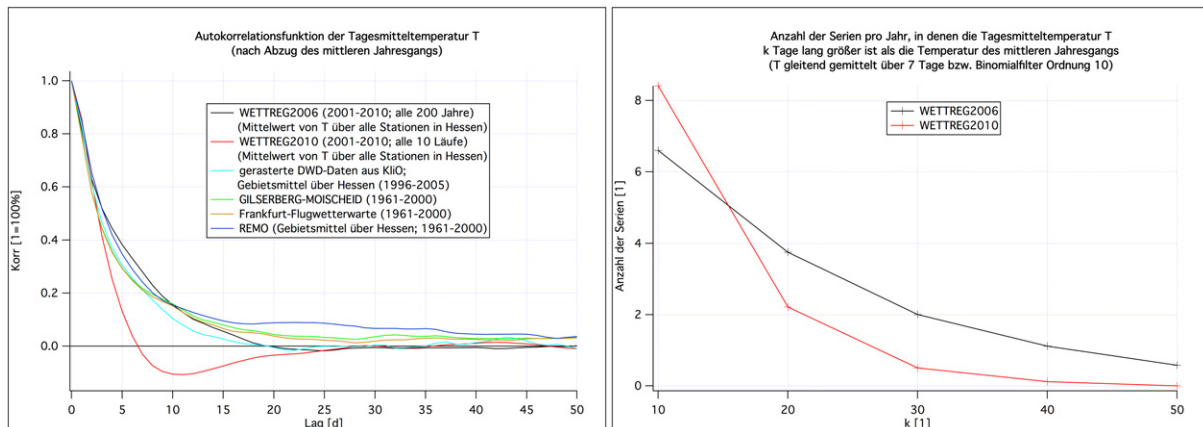


Abbildung 4.7: Autokorrelationsfunktionen der Tagesmitteltemperatur T für WETTREG2006, WETTREG2010, aus DWD-Messungen und REMO-UBA (links); Auswirkungen der unrealistischen Autokorrelationsfunktion von WETTREG2010 auf Andauerstatistiken (rechts)

Die Autokorrelationsfunktionen der Messungen, von REMO-UBA und von WETTREG2006 stimmen gut mit denen eines AR(1)-Prozesses (autoregressiver Prozess 1. Ordnung) mit Parameter $a = 0.83$ überein. Die Autokorrelationsfunktion von WETTREG2010 dagegen kann nur durch AR-Prozesse höherer Ordnung oder durch MA-Prozesse (moving average Prozesse) erzeugt werden. Während AR(1)-Prozesse ein rosa Spektrum (keine Frequenz ist besonders ausgeprägt; stetige Abnahme des Spektrums zu hohen Frequenzen hin) aufweisen, zeigt WETTREG2010 ein farbiges Rauschen (ein bestimmter Frequenzbereich ist hervorgehoben) und hat damit die Tendenz, Quasiperiodizitäten zu erzeugen.

Die Standardabweichung $\sigma(\bar{x}_i^n)$ des Mittelwerts \bar{x}_i^n einer Größe x_i über n Tage ($n = 365$ bei Jahresmittelwerten) kann man, wenn die x_i nicht statistisch unabhängig voneinander sind, im Prinzip wie die von n unabhängigen Werten berechnen, nur muss n durch die *Equivalent Sample Size* n/B_1 ersetzt werden. B_1 wird *Bartel'sche äquivalente Erhaltungszahl*¹¹ genannt (Taubenheim, 1969) und ist im Falle der Unabhängigkeit aller Werte identisch eins. Die Rechenvorschrift lautet dann:

$$\sigma(\bar{x}_i^n) = \frac{\sigma(x_i)}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{B_1}. \quad (4.4)$$

Wenn der betrachtete Prozess schwach stationär¹² ist, so gilt $B_1 = B_2$, und B_2 berechnet

¹¹ Im Grenzfall $n \rightarrow \infty$ heißt diese Größe *Decorrelation Time*.

¹² Damit schwache Stationarität bei Größen, die einen Jahresgang aufweisen, gilt, muss man die Werte vor Anwendung der Theorie vom Jahresgang bereinigen!

sich nach der folgenden Formel:

$$B_2 = 1 + 2 \sum_{r=1}^{n-1} \left(\frac{n-r}{n} \right) \cdot \text{Korr}(r). \quad (4.5)$$

$\text{Korr}(r)$ ist hierbei die Autokorrelation zum “Lag” r . Diese Beziehung ist von der Verteilung der x_i vollkommen unabhängig und setzt nur schwache Stationarität voraus. Verwendet man keine *exakten* statistischen Parameter (definiert als Ensemblemittel über unendlich viele Realisierungen), sondern Schätzwerte, die aus endlich vielen Realisierungen oder aus dem zeitlichen Verlauf geschätzt wurden, so gilt natürlich nicht exakt $B_1 = B_2$, sondern nur approximativ $B_1 \approx B_2$.

Für die Tagesmitteltemperatur (Mittelwert über alle WETTREG-Stationen in Hessen) berechnet man aus den obigen beiden Formeln die in der folgenden **Tabelle 4.2** angegebenen Schätzwerte:

Tabelle 4.2: Bartel’sche Erhaltungszahlen für die Tagesmitteltemperatur in WETTREG2006 und WETTREG2010

	B_1	B_2
WETTREG2006	10.1	8.6
WETTREG2010	2.15	2.16

Die Bartel’sche Erhaltungszahl ist bei WETTREG2010 um ca. den Faktor 4 kleiner als bei WETTREG2006 und den anderen Modellen.

Eine zu schnell absinkende Autokorrelationsfunktion, die sogar negative Werte annimmt, führt folglich bei WETTREG2010 auf zu kleine Standardabweichungen für die Monats- und Jahresmittelwerte bei den Temperaturen. Scheinbar werden viele in der Realität autokorrelierte Wetterabläufe durch den neuen Zufallsgenerator in WETTREG2010 so “zerschnitten”, dass die Tage bzw. Witterungsabschnitte *zufälliger* aufeinander folgen als es in Wirklichkeit der Fall ist. Hinzu kommt wahrscheinlich noch, dass der Wettergenerator dazu neigt, auf besonders warme besonders kalte Perioden folgen zu lassen und daher die Periodizität überbetont.

Die unrealistische Korrelationsfunktion bewirkt z. B. bei Andauerstatistiken große Abweichungen von den wahren Werten: Abbildung 4.7 (rechts) zeigt die mittlere Anzahl von Serien (“Runs”), in denen die Tagesmitteltemperatur T (nach Abzug des Jahresgangs) mindestens k -Tage lang hintereinander größer ist als null (bzw. die unmodifizierte Temperatur größer ist als der mittlere Jahresgang). Es wurden über 7 Tage “gleitend gemittelte” Temperaturen verwendet. Dargestellt sind die Ergebnisse, wie sie mit WETTREG2010 (rot) und WETTREG2006 (schwarz; mit den realistischeren Werten!) berechnet wurden. Besonders lange “Runs” (>40 und >50 Tage) kommen in WETTREG2006 9- bzw. 59-mal häufiger vor als in WETTREG2010! Der längster “Run” beträgt in WETTREG2006 141 Tage und in WETTREG2010 nur 52 Tage.

Im Prinzip sind alle nichtlinearen Impaktmodelle vom unrealistischen Temperaturverlauf betroffen. Zum Beispiel wird das *Dynamic Model* zur Berechnung von Chilling Portions [siehe Kapitel 4.6.1.2.3] fehlerhafte Resultate ergeben, da die Ergebnisse von der Dauer der “Kalt- und Warmperioden” abhängig sind. Auch die Schwankungsbreite der *Dormanzbrechungstermine* (vgl. Abbildung 5.22) wird auf Grund der zu kleinen Autokorrelationen der Temperaturen viel zu klein.

Leider konnte nicht intensiv getestet werden, ob auch alle anderen WETTREG-Größen von diesem Fehlverhalten betroffen sind. Ein Vergleich der Standardabweichungen $SDEV$ der Jahreswerte von WETTREG2010 mit denen von WETTREG2006 oder mit den aus Messwerten berechneten ergab aber, dass man wie bei T auch bei Tx , Tn und e um ca. 50 % zu kleine (gegenüber DWD-Messungen) und bei ps , Sd und $Rel2$ um ca. 30 % zu kleine $SDEV$ s von Monats-¹³ und Jahresmittelwerten berechnet. Erstaunlicherweise war die Größenordnung der $SDEV$ bei V_{10} in Ordnung. Es ist aber gut möglich, dass hier das weiter unten beim Wind angesprochene Problem kompensatorisch wirkte und die $SDEV$ vergrößerte. Beim Niederschlag $PRECIPTOT$ hatte die $SDEV$ realistische Werte.

Hohe Werte der Windgeschwindigkeit sind in WETTREG2010 z. T. viel zu hoch. Es treten Tagesmittelwerte von über 30 m/s im küstenfernen Flachland auf. Es handelt sich vermutlich um keine echten Tagesmittelwerte, sondern nur um Mittelwerte der vom DWD gelieferten Werte zu den Klimaterminen. Daher sind keine Extremwertauswertungen bezüglich der Windgeschwindigkeiten mit WETTREG möglich.

Der Gesamtbedeckungsgrad $CLCT$ ist häufig nicht mit Sd konsistent und T passt nicht zu Tn und Tx .

Viele weitere aufgedeckte Einschränkungen können leider im Rahmen dieses Zwischenberichts, und da sie die weiteren Auswertungen nicht stark beeinträchtigen sollten, hier nicht erwähnt werden.

Auf die sehr wichtige Frage, ob die 10 WETTREG2010-Realisierungen als unabhängige Modellläufe anzusehen sind, und wie diese in statistischen Auswertungen einzubeziehen sind, wird in Kapitel 4.4.2 und 4.4.3 eingegangen.

4.2 Weiterverarbeitung und Ergänzung der Daten

4.2.1 Meteorologische Messwerte an den Stationen

Nach umfangreichen Ausreißertests¹⁴ wurden alle Messwerte mit (Second-Order Stationary) Universal Kriging (mit impliziter Höhenregression und gleitendem Suchradius) auf das 0.1°-Raster des Hessenrechtecks gerastert.¹⁵ Die 0.2°-Auflösung wurde danach aus der 0.1°-Auflösung durch *first order conservative remapping* erstellt. Anschließend wurde noch einmal die Konsistenz einiger Größen überprüft und ggf. korrigiert [z. B. muss gelten: $Tn \leq T \leq Tx$ und $e \leq esat(T)$ ¹⁶].

Tabelle 4.3 listet die jetzt zur Verfügung stehenden, gerasterten DWD-Größen. Diese existieren sowohl in 0.1°- als auch 0.2°-Auflösung (HES01 bzw. HES02).

Einige Größen, z. B. $Rel2$ und $Global$, wurden nachträglich aus anderen Primärgrößen berechnet. Diese und andere Besonderheiten werden unter "Bemerkungen" erwähnt.

Die hellgrau unterlegten Größen $Glob$ und $CLCT$ sind relativ unsicher: Die Globalstrahlung $Glob$ wurde aus Sd , der geographischen Lage und einer festen mitt-

¹³ Die Prozentsätze bei den Monatsmittelwerten sind etwas kleiner als bei den Jahresmittelwerten!

¹⁴ Es wurde z. B. an einer Station unterhalb 500 m Höhe ein Luftdruck von 583 hPa gemessen.

¹⁵ Hierbei wurden die Höhen des Modells RUBA in 0.1°-Auflösung verwendet. - Genaueres über die verwendete Kriging-Methode und die benutzten Kriging-Parameter findet man in Blümel et al., 2002, Kap. 4.3 und in Chmielewski et al., 2009a, Kap. 3.1.2 und 3.4.2. Eine Herleitung der Theorie des Kriging findet sich in Wackernagel, 1998.

¹⁶ Siehe aber die Diskussion bei Gleichung (4.2)!

Tabelle 4.3: Zur Verfügung stehende gerasterte DWD-Daten, bei denen die nachgelieferten DWD-Stationen berücksichtigt wurden.

Name	Größe	Kennung	Einheit	Bemerkungen	Auflösung	Ausschnitt
T	Mitteltemperatur	167	°C		1d	HES01/02
Tx	Maximumtemperatur	201	°C		1d	HES01/02
Th	Minimumtemperatur	202	°C		1d	HES01/02
e	Dampfdruck	-999	hPa		1d	HES01/02
Rel2	Relative Luftfeuchte	-999	1 = 100 %	Aus e und esat(T) berechnet	1d	HES01/02
Tdew	Taupunkt	-999	°C	Aus e berechnet	1d	HES01/02
V = V ₁₀	Windgeschwindigkeit	171	m/s	aus Bft berechnet	1d	HES01/02
PRECIPTOT= R	Gesamtniederschlag	260	mm/d	(Ohne Korrektur)	1d	HES01/02
PRECIPTOT_korr = R_korr	Gesamtniederschlag korrigiert	260	mm/d	(Mit Korrektur) ^{ab}	1d	HES01/02
Sd	Sonnenscheindauer	1900	h/d		1d	HES01/02
Sdmax	Max. mögliche Sonnenscheindauer	1901	h/d	aus Datum und Koord. berechnet	1d	HES01/02
CLCT	Gesamtbedeckungsgrad	-999	1 = 100 %	aus Sd und Sdmax berechnet [siehe unten]	1d	HES01/02 Alte und neue Version!
Global = Glob	Tagesmittelwert der Globalstrahlung	1902	W/m ²	Aus Sd, Sdmax und Sonnenstand berechnet	1d	HES01/02 Alte und neue Version!
ps	Luftdruck am Boden	134	hPa		1d	HES01/02
Vmax (= VMAXGUST) (sehr unsicher vor dem 2.1.1971)	Max. Windgeschwindigkeit des Tages inkl. Böen	-999	m/s		1d	HES01/02

^a Außer dem unkorrigierten *PRECIPTOT* steht auch noch eine bezüglich Verdunstung, Benetzung und Verwehung korrigierte Version zur Verfügung (Zusatz *_korr* im Namen). Die unkorrigierten Werte sind das Ergebnis der Regionalisierung der originalen, unkorrigierten Stationswerte. Um die korrigierten Werte zu berechnen, mussten diese Korrekturen auf dem Raster vorgenommen werden, da für die vielen Niederschlagsstationen keine Messwerte von Wind und Temperatur vorlagen. – Fester Niederschlag wurde angenommen, wenn die Tagesmitteltemperatur kleiner als 0.5 °C war. Der 10 m-Wind wurde logarithmisch auf 1m-Höhe herunter transformiert ($z_{oM} = 0.01$ m; keine Stabilitätskorrektur!).

^b Diese Korrektur beruht auf der Methode nach Rachner für flüssigen Niederschlag ($PRECIPTOT \cdot 1.1$) und der modifizierten SEVRUK-Korrektur (Blümel et al., 2004, Kap. 2.8) für festen Niederschlag.

leren Trübung berechnet:

$$Glob = R_{extraterr} \cdot \left(0.2 + 0.56 \cdot \min \left(1.15 \frac{Sd}{Sdmax}, 1.0 \right) \right) \quad (4.6)$$

$R_{extraterr}$ ist hierbei der Tagessmittelwert der extraterrestrischen kurzwelligen Einstrahlung auf eine horizontale Fläche. Die Minimumfunktion $\min(\dots)$ wurde in (4.6) eingeführt, damit $Sd/Sdmax$ trotz Anhebung um 15 % den Wert “1” nicht überschreitet. Die Anhebung von $Sd/Sdmax$ ist notwendig, da das Juli-Maximum von $Sd/Sdmax$ sogar als Maximum über die Jahre 1971-2000 den Wert 0.9 nur an einigen Gitterpunkten überschreitet, wenn man für Sd die DWD-Sonnenscheindauer verwendet.¹⁷ Da die Angström-Formel zur Berechnung der Globalstrahlung aber davon ausgeht, dass bei wolkenlosem Himmel

¹⁷ Das Problem tritt nicht nur in den gerasterten Daten, sondern auch direkt an den Stationen auf. Auch bei der Sonnenscheindauer in WETTREG2010 ergeben sich ähnlich zu kleine maximale relative Sonnenscheindauern.

und *normaler* Trübung Sd/Sd_{max} den Wert “1” annimmt, werden ohne die Anhebung von Sd/Sd_{max} zu kleine Globalstrahlungswerte berechnet.¹⁸ Auf eine gesonderte Höhen- (bzw. vom Luftdruck p abhängige) Korrektur [vgl. z. B. Gl. (3.1.1) in [Chmielewski et al., 2009a](#)] in Gleichung (4.6) wurde wegen der relativ einheitlichen Höhenlage in Hessen verzichtet.

Der Gesamtbedeckungsgrad $CLCT$ wurde wie folgt aus der täglichen Sonnenscheindauer Sd berechnet:

$$CLCT = 0.892 - 0.473 \cdot \left(\frac{Sd}{Sd_{max}} \right) - 0.278 \cdot \left(\frac{Sd}{Sd_{max}} \right)^2 \quad (4.7)$$

Die quadratische Regression (4.7) liefert im Mittel bessere Ergebnisse als die zuvor benutzte “lineare” Methode: $CLCT = 1 - \frac{Sd}{Sd_{max-0.75h}}$. Der Nachteil ist allerdings, dass, wenn man $CLCT$ mit der Beziehung (4.7) aus Sd/Sd_{max} berechnet, $CLCT$ nur Werte zwischen 0.15 und 0.9 annimmt. Die Werte 0 und 1 kommen gar nicht vor. Trotzdem ist diese Umrechnungsformel im Sinne des kleinsten quadratischen Fehlers besser als die alte Methode. Die so gewonnenen Referenzwerte für $CLCT$ werden hier später ja auch nur als langjährige Monatsmittelwerte für die *BIAS-Korrektur der Modellwerte von CLCT* verwendet.

Eine ausführlichere Diskussion der Berechnung von $Glob$ und $CLCT$ aus den DWD-Messungen findet man in der Datei `READ_ME_Nachtrag_zur_BIAS_Korrektur.pdf`. Diese Datei wurde zusammen mit den korrigierten Daten den INKLIM-A-Partnern zur Verfügung gestellt und kann jederzeit von der HU-Berlin angefordert werden.

Alle oben aufgeführten Datensätze liegen für den Zeitraum 01.01.1961-31.12.2009 vor.

4.2.2 “1 km-Rasterdaten” des DWD

Die 1 km-Rasterdateien des DWD wurden mit bilinearer Interpolation auf ein geographisches Raster mit $\Delta x = \Delta \lambda = 0.0166667^\circ$ und $\Delta y = \Delta \varphi = 0.01^\circ$ umgerechnet. Bei der Bestimmung der zu den einzelnen Gitterpunkten gehörigen Gauß-Krüger-Koordinaten wurde die im Header der Dateien angegebene Koordinatenbeschreibung (xllcorner, yllcorner, cellsize usw.) verwendet. Hierbei wurde angenommen, dass sich xllcorner und yllcorner auf die linke untere Ecke der linken unteren Gitterzelle beziehen. Die widersprüchlichen Aussagen und Beschreibungen des DWD zu diesem Thema wurden ignoriert. Nachfolgende Tests [Vergleich der Monatsmitteltemperaturen mit der Höhe über NHN an speziellen Punkten (Harz, Alpen, Thüringer Wald)] zeigten, dass diese Wahl korrekt war.

Alle Monate aller Jahre einer bestimmten Größe wurden chronologisch in eine netcdf-Datei geschrieben. Es wurde ein Ausschnitt gewählt, der 564 x 800 Gitterpunkte beinhaltet und bei 5.8083333 °E, 47.2050000 °N (Mittelpunkt der Gitterzelle links unten) beginnt (d. h., dass die obere rechte Ecke (Mittelpunkt) bei 15.1916666 °E, 55.1950000 °N liegt).

Aus den so erzeugten 0.01°-Dateien für die gesamte BRD (BRD001) wurden dann noch Dateien, die nur das Hessenrechteck (HES001) enthalten, erstellt.

Diese Dateien wurden anschließend noch mit *bilinearem* und *first order conservative* remapping in die 0.1°- (HES01) und 0.2°-Auflösung (HES02) umgerechnet. Genau 6 x 10 der fein aufgelösten 0.01° -Gitterzellen fallen in eine 0.1°-Rasterzelle (4 von diesen 6 x 10 –“Clustern” fallen in eine 0.2°-Rasterzelle!).

¹⁸ Das war bei der ersten Bereitstellung der BIAS-korrigierten Globalstrahlung leider der Fall.

Die überarbeiteten Größen, die nun im netcdf-Format vorliegen, sind in **Tabelle 4.4** dargestellt.

Tabelle 4.4: Von der HU-Berlin umgerechnete 1 km-Rasterdaten. Alle Größen außer WIND10 und WIND80 liegen als Monatsmittelwerte für 1961-2009 vor. Für WIND10 und WIND80 existiert nur jeweils ein einziger Mittelwert für 1981-2000.

Name	Größe	Kennung	Einheit	Bemerkungen	Auflösung	Ausschnitt
T	Mitteltemperatur	-999	°C	Monatsmittelwert	1mon	HES01/02/001 BRD001
Tx	Maximumtemperatur	-999	°C	Monatsmittelwert	1mon	HES01/02/001 BRD001
Tn	Minimumtemperatur	-999	°C	Monatsmittelwert	1mon	HES01/02/001 BRD001
e	Dampfdruck	-999	hPa	Monatsmittelwert berechnet	1mon	HES01/02/001 BRD001
Tdew	Taupunkttemperatur	-999	°C	aus e berechnet	1mon	HES01/02/001 BRD001
PRECIP_TOT	Gesamtniederschlag	-999	mm	(ohne Korrektur!!) Monatssumme	1mon	HES01/02/001 BRD001
PRECIPTOT _korr	Gesamtniederschlag	-999	mm	(mit Korrektur!! ^a) Monatssumme	1mon	HES01/02/001 BRD001
Sd	Sonnenscheindauer	-999	h	Monatssumme	1mon	HES01/02/001 BRD001
WIND10	Windbetrag in 10 m Höhe	-999	m/s	Mittelwert von 1981-2000	20a	HES01/02/001 BRD001
WIND80	Windbetrag in 80 m Höhe	-999	m/s	Mittelwert von 1981-2000	20a	HES01/02/001 BRD001
Höhen (H)	Höhe über NHN	-999	m	SRTM GIAR-CSI GeoPortal	konst.	HES001/BRD001/ BRD001
Höhen (H)	Höhe über NHN	-999	m	GTOPO30	konst.	HES001/BRD001/ BRD001

^a Für die Niederschlagskorrektur wurden die Werte hier nur mit 1.1 multipliziert. Für genauere Korrekturen (modifizierte SEVRUK-Korrektur u. ä.) müssten Temperaturen und Windgeschwindigkeiten in Stunden- oder mindestens Tagesauflösung vorliegen!

Bei WIND10 und WIND80 existiert nur ein einziger Mittelwert 1981-2000 für jede Rasterzelle des Gebiets.

Da der Wetterdienst, angeblich aus datenschutzrechtlichen Gründen, keine zugehörige Höhendatei herausgeben darf, wurden SRTM-Höhendaten (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) der gesamten Erde (beschränkt auf -60 °S bis 60 °N) geladen und mit *first order conservative* remapping auf die oben beschriebenen Auflösungen umgerechnet.

Zusätzlich wurden auch noch die GTOPO30-1 km-Topographiedaten¹⁹, die in (1/120)° Schritten (in x- und y-Richtung) vorliegen, wie oben beschrieben durch Remapping auf ein Raster mit (1/60)° in x-Richtung und (1/100)° in y-Richtung gebracht. Diese GTOPO30-Topodaten sind scheinbar in Küstennähe (auf Grund von dort angebrachten Korrekturen) besser als die von SRTM. Letztere haben an der Nordseeküste häufig Werte kleiner null (bis ca. -5 m unter NHN). In den neuen Bundesländern gibt es aber Ungenauigkeiten bei den GTOPO30-Höhen und die SRTM-Daten sind dort genauer!

Die Fehlerangaben der Entwickler lauten bei GTOPO30: ±30 m (90 %-Niveau) auf einem 30" x 30" Raster (0.9 km x 0.9 km). Bei SRTM: ±6 m auf einem 90 m x 90 m Raster.

Bei Bedarf werden die SRTM-Daten an der HU-Berlin benutzt.

¹⁹ <http://eros.usgs.gov/elevation-products>

4.2.3 Phänologische Daten für Hessen

Phänologische Daten für Hessen wurden wie folgt erzeugt: Zunächst wurden die umfangreichen, bereits an der HU-Berlin vorliegenden Phänodaten mit den 2011 neu vom DWD bereitgestellten und mit den im Jahr 2010 im Rahmen von INKLIM gelieferten DWD-Phänodaten verschnitten (ergänzt). Diese *vollständigen* Phänodaten wurden sodann mit Universal Kriging (mit Höhenabhängigkeit) auf ein längen-breiten-paralleles Raster in 0.1°-Auflösung überführt. Dieses Raster enthält die gesamte Bundesrepublik Deutschland. Vorher wurden die Stationsdaten umfangreichen Ausreißertests unterworfen. Für Hessen wurden sodann die Gitterpunkte, die in das Hessenrechteck fallen, selektiert. Da diese Dateien aus den unmaskierten 0.1°-Dateien herausgeschnitten wurden, enthalten sie auch außerhalb des Gebiets der politischen BRD (z. B. südlich des Saarlands) definierte Werte! Mit “First Order Conservative Remapping” wurden dann aus diesen 0.1°-Dateien auch noch Dateien in 0.2°-Auflösung berechnet.

Die zeitliche Auflösung beträgt bei allen Dateien 1 Jahr. Alle Dateien liegen in der 0.1° und 0.2°-Auflösung für das Hessenrechteck vor.

Tabelle 4.5 gibt eine Übersicht über die vorhandenen, regionalisierten, neuen Phänodaten. Rot gefärbte Jahreszahlen weisen darauf hin, dass die Daten nicht den Gesamtzeitraum 1951-2009 abdecken.

Tabelle 4.5: Zur Verfügung stehende gerasterte phänologische Daten

Dateiname/Frucht	Größe	Kennung	Einheit	Zeitraum	Bemerkung
062_BBApfelfruehreif	Blühbeginn	50062	DOY	1951-2009	
167_VBApfelfruehreif	Vollblüte	50167	DOY	1951-2009	
063_BEApfelfruehreif	Blühende	50063	DOY	1951-2009	
109_REApfelfruehreif	Beginn der Pflückreife	50109	DOY	1951-2009	
260_BBApfel_spaetreif_1991-2009	Blühbeginn	50260	DOY	1991-2009	vor 1991 zu wenige gültige Werte
261_VBApfel_spaetreif_1991-2009	Vollbüte	50261	DOY	1991-2009	vor 1991 zu wenige gültige Werte
262_BEApfel_spaetreif_1991-2009	Blühende	50262	DOY	1991-2009	vor 1991 zu wenige gültige Werte
111_REApfelspaetreif_1951-2009	Beginn der Pflückreife	50111	DOY	1951-2009	wie oben, nur vollständig vor 1991
049_BBAprikose	Blühbeginn	50049	DOY	1951-1990	Nach 1990 keine Werte; etwas inhomogene Abdeckung; einige Ausreißer
060_BBBirne	Blühbeginn	50060	DOY	1951-2009	
166_VBBirne	Vollblüte	50166	DOY	1951-2009	
061_BEBirne	Blühende	50061	DOY	1951-2009	
107_REfruehBirne	Frühreife	50107	DOY	1951-2009	
108_REspaetBirne	Spät reife	50108	DOY	1951-2009	
050_BBPfirsich	Blühbeginn	50050	DOY	1951-1991	nur 214 Stats in 1991 → 1991 nur Daten in den neuen Bundesländern; inhomogene Abdeckung!
058_BBPflaume	Blühbeginn	50058	DOY	1951-1991	nur 309 Stats in 1991 → 1991 nur Daten in den neuen Bundesländern!
165_VBPflaume	Vollblüte	50165	DOY	1951-1990	
059_BEPflaume	Blühende	50059	DOY	1951-1990	
105_REfruehPflaume	Frühreife	50105	DOY	1951-1991	Nur 190 Stats in 1991
106_REspaetPflaume	Spät reife	50106	DOY	1951-1991	nur 260 Stats in 1991

056_BBSauerkirsche	Blühbeginn	50056	DOY	1951-2009	1982-1991: keine Daten in der DDR
164_VBSauerkirsche	Vollblüte	50164	DOY	1951-2009	
057_BESauerkirsche	Blühende	50057	DOY	1951-2009	
104_RESauerkirschen	Pflückreife	50104	DOY	1951-2009	
054_BBSuesskirsche_fruehreif	Blühbeginn	50054	DOY	1951-2009	
163_VBSuesskirsche_fruehreif		50163	DOY	1951-2009	
055_BESuesskirsche_fruehreif	Blühende	50055	DOY	1951-2009	
102_RESuesskirsche_fruehreif	Frühreife	50102	DOY	1951-2009	
103_RESuesskirsche_spaetreif	Spätreife	50103	DOY	1951-2009	
168_BBErdbeere	Blühbeginn	50168	DOY	1951-1991	nur 318 Stats in 1991 → 1991 nur Werte in den neuen Bundesländern
202_REErdbeere	Beginn der Pflückreife	50202	DOY	1951-1991	nur 241 Stats in 1991
171_BAWein ²⁰	Beginn Austrieb	50171	DOY	1951-2009	nur in Weinbaugebieten ausreichend viele Werte!!!
172_BBWein	Blühbeginn	50172	DOY	1951-2009	nur in Weinbaugebieten ausreichend viele Werte!!!
173_VBWein	Vollblüte	50173	DOY	1951-2009	
174_BEWein	Blühende	50174	DOY	1953-2009 (Achtung: 1951 nur 1 Station; 1952 nur 2 Stationen; beide Jahre wurden daher entfernt)	Müller-Thurgau/Faber;
274REWein	Beginn der Reife	50274	DOY	1991-2009	vorwiegend Müller-Thurgau/Faber; Keine Daten vor 1990!
205_LEWein	Lese	50205	DOY	1951-2009	

4.2.4 Daten der dynamischen regionalen Klimamodelle

Die fehlenden Modelldaten (z. B. die Albedo *Alb* von REMO-UBA, der Betrag V_{10} der 10 m-Windgeschwindigkeit für alle Modelle und die relative Feuchte *Rel2*; vgl. Tabelle 4.1 in Abschnitt 4.1.4) wurden aus der CERA-Datenbank geladen und auf das Format der DWD-Modelldaten (STREAM3; *entrotierte* geographische Koordinaten; Tageswerte) gebracht. Danach wurde der Gebietsausschnitt auf das in **Abbildung 4.8** dargestellt “Hessenrechteck” beschnitten. Mit *bilinearem Remapping* wurde aus der 0.1°-Auflösung von REMO-UBA eine mit den anderen Modellen vergleichbare 0.2°-Auflösung erzeugt. Die HadCM3-Auflösung von 0.25° wurde ebenfalls auf 0.2° umgerechnet. Die Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchte *Rel2* wurden bei REMO-UBA als Mittelwert über die 24 Stundenwerte von *Rel2* berechnet. Letztere wurden vom DKRZ für den *data stream 3* aus

²⁰ Die Weinphasen beziehen sich auf “Weinrebe” bzw. “Müller-Thurgau/Faber”. Für Riesling/Scheurebe existierten zu wenige Daten. Die in den Daten (angeblich) enthaltene Sortenkennung und Hangrichtung/-neigung wurde nicht berücksichtigt, da die Sortenkennungen nur sporadisch und ohne erkennbaren Zusammenhang in den Daten vorhanden war [meistens sogar nur dann, wenn keine Weindaten gemeldet wurden; daher ist anzunehmen, dass es sich um Eingabefehler handelt], und Daten für Hangneigung und Hangrichtung konnten gar nicht identifiziert werden.

den Stundenwerten von T und T_{dew} berechnet. Bei ECHAM5-CLM wurden die REL2-Tagesmittelwerte als Mittelwerte aus Daten in 3 h-Auflösung bestimmt. Beim HadCM3-CLM konnten die Tagesmittelwerte der $Rel2$ -Werte direkt vom ENSEMBLE-Server geladen werden.

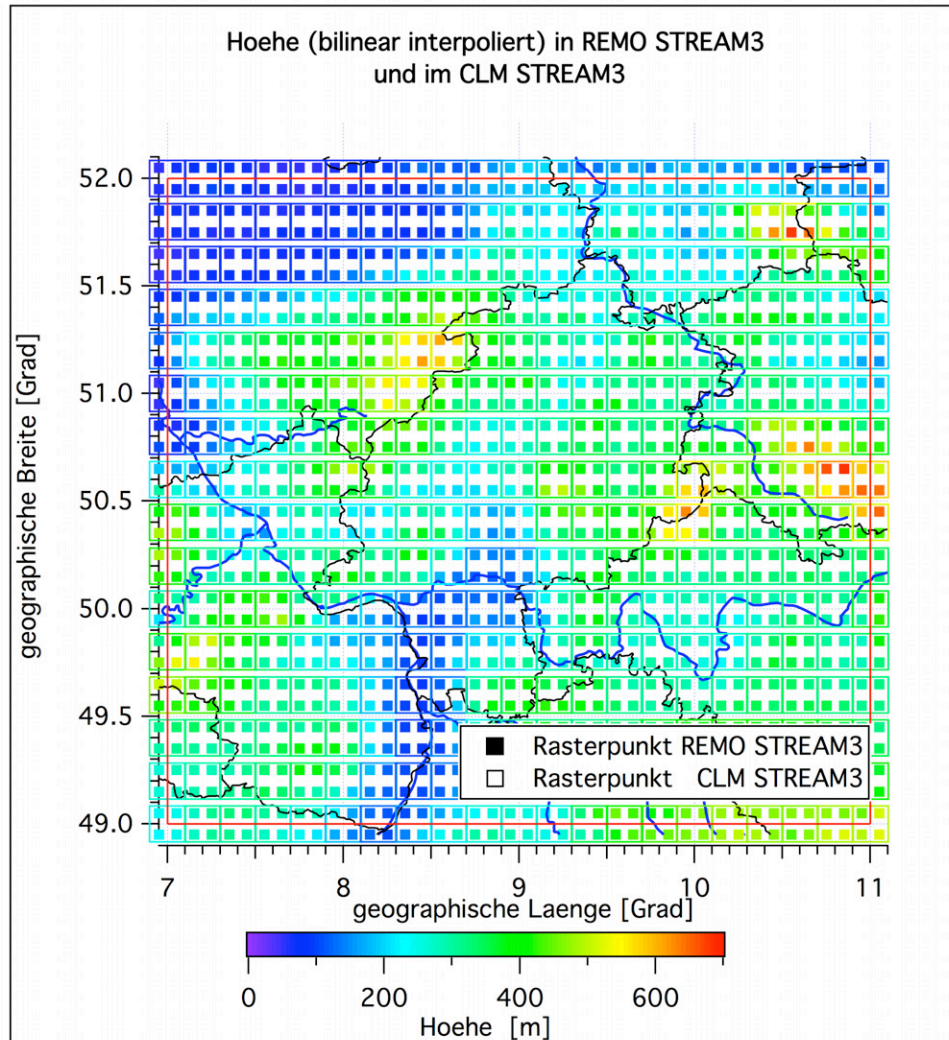


Abbildung 4.8: Gitterzellen und deren Höhen im "Hessenrechteck" in 0.1°- und 0.2°-Auflösung

Bei diesen Umrechnungen und Beschneidungen wurden einheitliche Variablennamen und korrigierte netcdf-Attribute eingeführt. Die Einheiten der unterschiedlichen Größen in den verschiedenen Modellen wurden vereinheitlicht.

Für das HadCM3, dessen Output in der Originalversion nur 30 Tage für jeden Monat enthält, wurde ein gregorianischer Kalender wie folgt erzeugt: Jeder HadCM3-Tag, dessen Nummer (1...360) ohne Rest durch 72 teilbar ist, wurde verdoppelt [d. h., dass insgesamt $(365 - 360 = 5)$ Tage ergänzt wurden]. In einem Schaltjahr wurde außerdem noch der 58. HadCM3-Tag [da $(31 + 28)/365 \cdot 360 = 58.19$ gilt] verdoppelt. Der fehlende Dezember 2099 wurde mit dem Dezember 2097 und das Jahr 2100 mit dem Jahr 2098 aufgefüllt. Untersuchungen ergaben, dass hierdurch die statistischen Kenngrößen nur unmerklich verfälscht werden (in Wirklichkeit werden sie gegenüber undefinierten Werten sogar besser!). Die HadCM3-CLM-Daten liegen nun auch wie die anderen beiden Modelle

als zwei Datensätze vor, welche die C20- und A1B-Szenariendaten enthalten.

Tabelle 4.6 gibt einen Überblick über die so vereinheitlichten (normalisierten) Daten. Die Größen U , V , W_{snow} und TG aus Tabelle 4.1 fehlen hier. Dafür wurden die Größen

Tabelle 4.6: Von der HU-Berlin vereinheitlichte (normalisierte) Modelldaten.

	REMO-UBA	ECHAM5-CLM	HadCM3-CLM	Einheit
Starttag	1.1.1960	1.1.1960	1.1.1960	
Auflösung	0.1° und 0.2°	0.2°	0.2°	
T	X	X	X	°C
Tx	X	X	X	°C
Tn	X	X	X	°C
ps	X	X	X	hPa
Tdew	X	X	X	°C
V_{10}	X	X	X	m/s
PRECIPTOT	X (+DPREC)	X	X	mm/d
Rel2	X	X	X	1
CLCT	X	X	X	1
Glob	X	X	X	W/m ²
Sd	gibt es nicht	X	gibt es nicht	h/d
Alb	X	X	X	1
Vmax (=VMAXGUST)	X	X	X	m/s

V_{10} , $Rel2$, Alb (bei REMO-UBA) und $Vmax$ (beim HadCM3-CLM) neu hinzugefügt. Rote Einträge markieren Änderungen gegenüber der Tabelle 4.1.

Alle diese Größen außer Sd wurden einer “BIAS”-Korrektur (“Scaling”) unterzogen, durch die *Modellfehler* in der Gegenwart mit Hilfe von regionalisierten (gerasterten) Messwerten verkleinert werden sollen. Die dabei verwendete Methode wird im Kapitel 4.3.2 beschrieben.

4.2.5 Daten des statistischen Klimamodells WETTREG2010

Die Rasterung der WETTREG2010-Stationsdaten erfolgte wie bei den DWD-Stationsdaten mit Universal-Kriging auf das Gebiet des Hessenrechtecks in 0.1°-Auflösung. Die 0.2° -Auflösung wurde danach aus der 0.1°-Auflösung mit “First Order Conservative Remapping” erzeugt. **Tabelle 4.7** zeigt die nun zur Verfügung stehenden WETTREG2010-Daten.

Tabelle 4.7: Zur Verfügung stehende gerasterte WETTREG2010-Daten

Name	Größe	Kennung	Einheit	Bemerkungen	Auflösung	Ausschnitt
T	Mitteltemperatur	167	°C		1d	HES01/02
Tx	Maximumtemperatur	201	°C		1d	HES01/02
Tn	Minimumtemperatur	202	°C		1d	HES01/02
e	Dampfdruck	-999	hPa	Aus Rel2 und T berechnet	1d	HES01/02
Rel2	Relative Luftfeuchte	-999	1 = 100 %		1d	HES01/02
Tdew	Taupunkt	-999	°C	Aus e berechnet	1d	HES01/02
V = V ₁₀	Windgeschwindigkeit	171	m/s		1d	HES01/02
PRECIP_TOT = R	Gesamtniederschlag	260	mm/d	(Ohne Korrektur)	1d	HES01/02
PRECIP_TOT_korr = R_korr	Gesamtniederschlag	260	mm/d	(Mit Korrektur) ^a	1d	HES01/02
Sd	Sonnenscheindauer	1900	h/d		1d	HES01/02
(Sdmax)	Max. mögliche Sonnenscheindauer	1901	h/d	Benutze Sdmax aus Tabelle 4.3	1d	HES01/02
Global = Glob	Tagesmittelwert der Globalstrahlung	1902	W/m ²	Aus Sd, Sdmax und Sonnenstand berechnet	1d	HES01/02
ps	Luftdruck am Boden	134	hPa		1d	HES01/02
CLCT	Gesamtbedeckungsgrad	-999	1 = 100 %		1d	HES01/02

^a Außer dem unkorrigierten *PRECIPTOT* steht auch noch eine korrigierte Version zur Verfügung (Zusatz *“korr”* im Namen). Die unkorrigierten Werte sind das Ergebnis der Regionalisierung der originalen, unkorrigierten Stationswerte. Für die korrigierten Werte wurden die gerasterten Werte nach der Regionalisierung mit der Methode nach Rachner für flüssigen Niederschlag ($1.1 \cdot R$) und der modifizierten SEVRUK-Korrektur für festen Niederschlag korrigiert (siehe Blümel et al., 2004, Kap. 2.8). Bei den WETTREG2010-Niederschlägen mussten diese Korrekturen auf dem Raster vorgenommen werden, da für die vielen Niederschlagsstationen keine Messwerte von Wind und Temperatur direkt an den Stationen vorlagen. – *Fester Niederschlag* wurde angenommen, wenn die Tagesmitteltemperatur kleiner als 0.5 °C war. Der 10 m-Wind wurde logarithmisch auf 1m-Höhe herunter transformiert ($z_{oM} = 0.01$ m; keine Stabilitätskorrektur!).

4.3 Die BIAS-Korrektur der Daten der dynamischen Klimamodelle

Die Outputdaten der drei Modelle wurden an der HU-Berlin einer “einfachen” BIAS-Korrektur (bei Anwendung einer *multiplikativen Korrektur* wird diese Methode auch “Scaling” genannt) unterzogen. Die Ergebnisse wurden den anderen INKLIM-A-Teilnehmern zur Verfügung gestellt. Kompliziertere Methoden, wie z. B. “Quantile Mapping”, können erst zu einem späteren Zeitpunkt eingesetzt werden, wenn entsprechende Vorarbeit geleistet wurde.

Die Korrektur sollte dabei so beschaffen sein, dass langjährige Monatsmittelwerte (1971-2000) der Modelldaten wesentlich besser mit den entsprechenden Mittelwerten der gerasterten Messwerte übereinstimmen als die Mittelwerte der unkorrigierten Daten.

Einen guten Überblick über verschiedene BIAS-Korrekturverfahren findet man in Maraun et al. (2010). Hier soll nicht verschwiegen werden, dass eine BIAS-Korrektur auch Nachteile mit sich bringen kann. Z. B. kann durch eine derartige Korrektur die Konsistenz der unterschiedlichen Größen zueinander verloren gehen und es ist auch nicht sicher, ob die Korrektur, die in der Gegenwart vorgenommen wird, auch in ferner Zukunft Gültigkeit hat. Eine ausführliche, sehr kritische Diskussion der Nachteile findet man in Ehret

et al. (2012). Wie aber in Abschnitt 4.3.1 an einigen Beispielen gezeigt wird, sind die Differenzen der hier benutzten, unterschiedlichen Modelle bereits im Zeitraum 1971-2000 so groß, dass ohne BIAS-Korrektur bereits in der Gegenwart große Unsicherheit für viele meteorologische Parameter herrschen würde und die Ergebnisse von hierauf aufsetzenden Impaktmodellen z. T. wenig Sinn machen würden.

4.3.1 Warum musste korrigiert werden?

Die regionalen Klimamodelle berechnen für einige physikalische Größen systematisch zu große oder zu kleine Werte. Die Größe dieser *Fehler*²¹ hängt sowohl von der Jahreszeit (bzw. dem Tag im Jahr) als auch von der geographischen Lage ab.

Abbildung 4.9 (linkes Bild) vergleicht die langjährigen Monatsmittelwerte (1971-2000) der Tagesminimumtemperatur T_n (Gebietsmittelwerte über Hessen) der drei dynamischen Modelle und der gerasterten DWD-Messwerte (graue Balken). Besonders im Frühjahr treten Unterschiede von z. T. mehreren Grad Celsius auf.

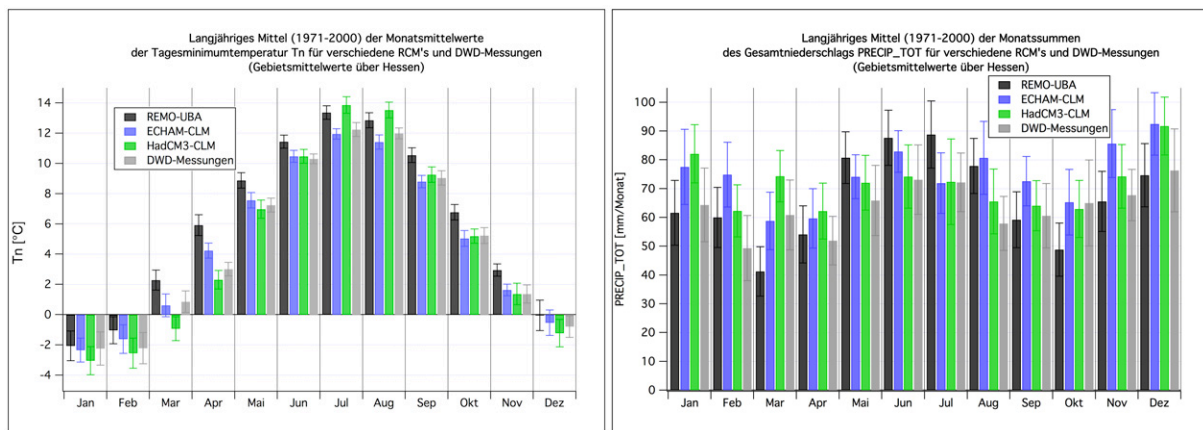


Abbildung 4.9: Langjährige Monatsmittelwerte der Tagesminimumtemperatur und des Gesamtniederschlags (non drifted) aus den drei Modellen und aus gerasterten DWD-Messungen (Mittel über das Gebiet von Hessen)

Im rechten Bild werden die langjährigen mittleren Monatssummen des Gesamtniederschlags (non drifted) gegenüber gestellt. Auch hier findet man große Abweichungen zwischen Modell und “Messung”.

Abbildung 4.10 zeigt die Anzahl der Frosttage (mit $T_n < 0$ °C), die im Szenario A1B von REMO-UBA im Zeitraum 2001-2100 in Hessen auftreten. Das linke Bild wurde mit unkorrigierten Tagesminimumtemperaturen T_n berechnet. Beim rechten Bild wurden die T_n korrigiert (siehe Abschnitt 4.3.2). Man erkennt, dass die Unterschiede drastisch sind und es für einige Anwendungen (z. B. für die hier gezeigte Bestimmung der Anzahl von Frosttagen oder auch für die Spätfrostgefahr) unabdingbar ist, dass man die Modelldaten korrigiert. Auch beim Niederschlag sind, vor allem in stark gegliedertem Gelände und bei der *non-drifted precipitation*, große Korrekturen notwendig.

Nun soll noch ein Beispiel dafür gegeben werden, dass eine BIAS-Korrektur nicht ganz unproblematisch ist. **Abbildung 4.11** zeigt die Aprilmittelwerte der Tagesminimumtemperatur T_n aus dem Kontrolllauf C20 (rot) und dem Szenario A1B (blau) von REMO-

²¹ Beachte aber das auf Seite 285 zu den internen Variationen der Klimamodelle Gesagte.

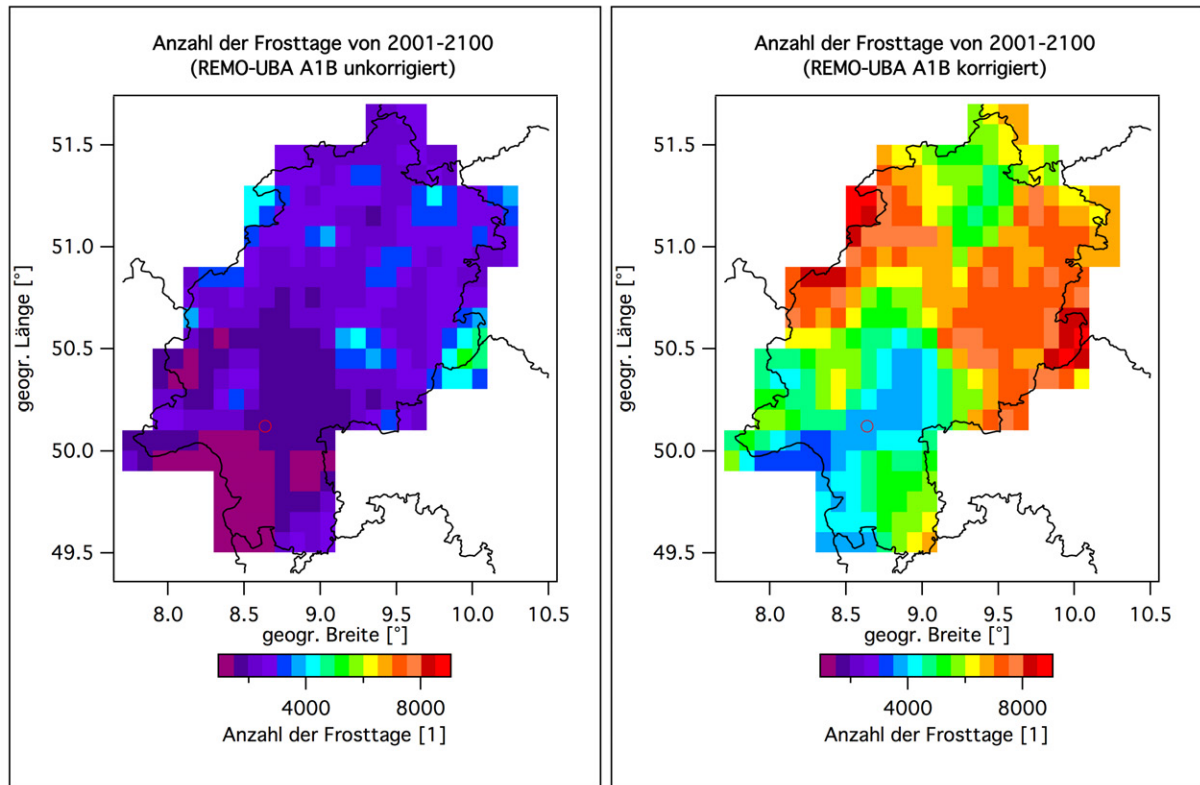


Abbildung 4.10: Anzahl der Frosttage im Zeitraum 2001-2100, berechnet mit unkorrigierten und korrigierten REMO-UBA Tagesminimum-Temperaturen

UBA sowie die Messwerte (schwarz) des DWD für den Gitterpunkt (18,13) (siehe Fußnote 28 auf Seite 43) in der Nähe von Frankfurt am Main. Die relativ glatten Kurven wurden durch gleitende Mittelung mit einem Binomialfilter (10 Durchgänge) erzeugt. Sie sind an der Schnittstelle zwischen Kontrolllauf C20 und Szenario A1B nicht stetig, da beide Zeiträume getrennt gefiltert wurden und am Rand die “bounce”-Methode verwendet wurde, da dort keine echte zentrale Mittelung möglich ist. Nach der BIAS-Korrektur der REMO-UBA-Daten erhält man die *korrigierte* magenta-farbene Kurve. Diese stellt den korrigierten Temperaturverlauf nach Anwendung der BIAS-Korrektur dar. Man erkennt, dass diese korrigierten Temperaturen bis ca. 2080 tiefer liegen als die beobachteten am Ende des 20. Jahrhunderts. Für die Tagesmitteltemperatur T erhält man ein ganz ähnliches Ergebnis, nur liegt das Temperaturniveau um ca. 5 K höher. Auch bei T werden in der korrigierten Version erst ab ca. 2080 die Werte von 1990-2000 wieder erreicht.

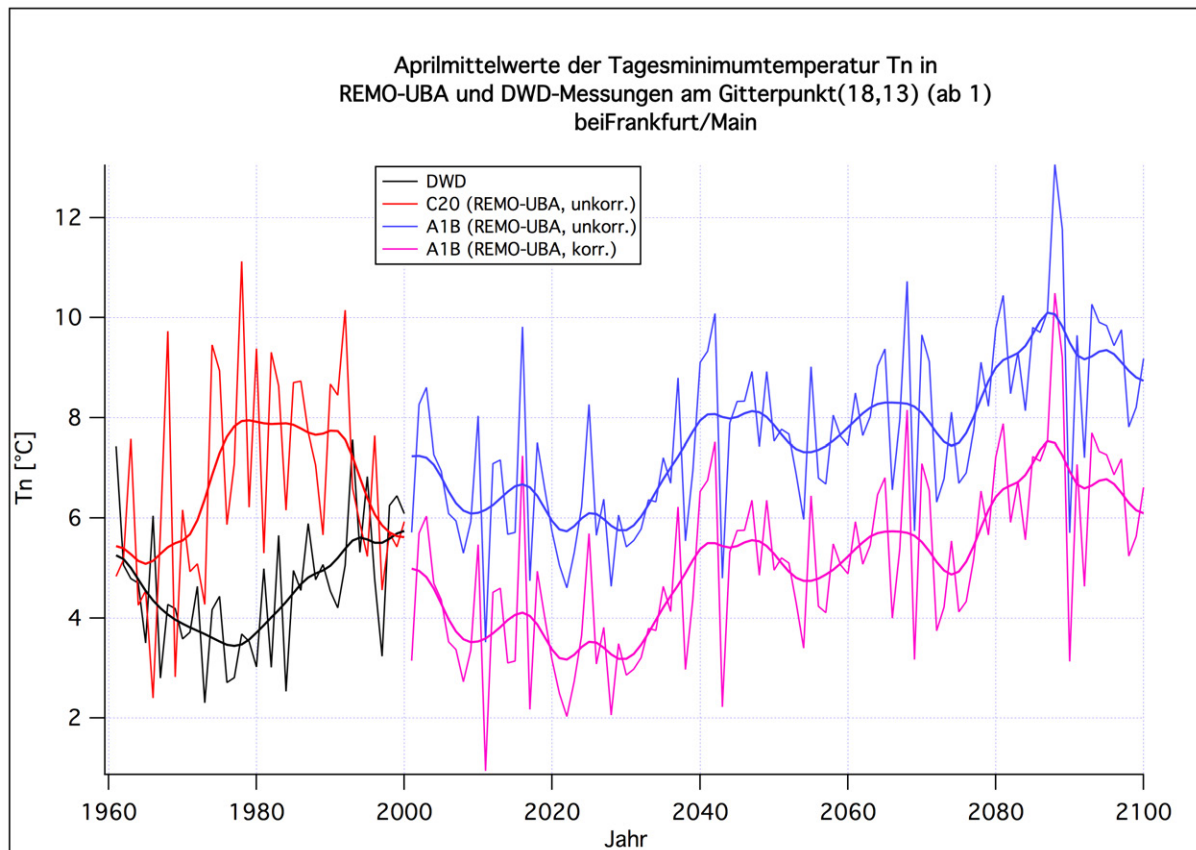


Abbildung 4.11: Unkorrigierte und korrigierte Aprilmittelwerte von T_n in REMO-UBA im Zeitraum 1960-2100 an einem Gitterpunkt in der Nähe von Frankfurt am Main

4.3.2 Das BIAS-Korrekturverfahren

Zunächst müssen die Messwerte geprüft und Ausreißer und Fehler müssen gegebenenfalls korrigiert werden. Danach werden die Stationswerte mit dem schon beschriebenen Verfahren (Universal Kriging) regionalisiert.

Sodann werden für jeden Monat im Jahr (1...12) und jeden Gitterpunkt langjährige Monatsmittelwerte (1971-2000) der betrachteten Größe gebildet. Diese Monatsmittelwerte werden dann noch zur Erhöhung der Stabilität über die “umgebenden” 3×3 -Gitterpunktswerte²² gemittelt. Am Rand des Gebiets werden dabei nur die gültigen Werte verwendet. Diese Prozedur wird sowohl mit den gerasterten Messungen als auch mit den Modelldaten durchgeführt. Man besitzt nun für jeden Gitterpunkt (i, j) und Monat langjährige Monatsmittelwerte $\overline{T}_{Mess,gerastert}^{1971-2000; mon^{3 \times 3}}(i, j, Monat)$ der Messungen und $\overline{T}_{Modell,unkorr}^{1971-2000; mon^{3 \times 3}}(i, j, Monat)$ der Modelle.

Nun bildet man für die *additive Korrektur* die Differenz der so errechneten beiden Werte, und für die *multiplikative Korrektur* bildet man den Quotienten. Diese Größen sind dann die *monatlichen Korrekturwerte*. Um Sprünge zwischen den Monaten zu vermeiden, legt man noch (für jeden Gitterpunkt gesondert) einen zyklischen, kubischen Spline durch diese 12 Korrekturwerte. Der Spline soll dabei immer zur Monatsmitte den Wert des monatlichen Korrekturwerts annehmen. Zur Korrektur des *Jul*-ten Tags im Jahr verwendet

²² Der neunte, zentrale Gitterpunkt ist der betrachtete Gitterpunkt.

man dann den Wert, den der Spline am Tag Jul annimmt.

Die korrigierten Modelldaten erhält man, indem man die Korrektursummanden bzw. Korrekturfaktoren zu den unkorrigierten Modellwerten hinzuaddiert bzw. diese multipliziert [siehe Gleichung (4.8) und (4.9)]. Die Korrekturterme durchlaufen in jedem Jahr erneut die ‘‘Julian’’-days²³ Jul von 1...365 bzw. 366 in Schaltjahren, während für die unkorrigierten Modellwerte $T_{Modell,unkorr}(i, j, t)$ und die korrigierten Modellwerte $T_{Modell,korr}(i, j, t)$ die fortlaufende Zeit t bzw. das fortlaufende Datum t eingesetzt wird.

Korrektur mit Spline durch Korrekturwerte aus langjährigen Monatsmittelwerten:

$$\begin{aligned} T_{Modell,korr}(i, j, t) &= & (4.8) \\ &= T_{Modell,unkorr}(i, j, t) + \underbrace{spline \left(\overline{T_{Mess,gerastert}^{1971-2000; mon^{3x3}}} - \overline{T_{Modell,unkorr}^{1971-2000; mon^{3x3}}} \right)}_{\text{additive Korrektur}}(i, j, Jul) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{Modell,korr}(i, j, t) &= & (4.9) \\ &= R_{Modell,unkorr}(i, j, t) \cdot \underbrace{spline \left(\overline{R_{Mess,gerastert}^{1971-2000; mon^{3x3}}} / \overline{R_{Modell,unkorr}^{1971-2000; mon^{3x3}}} \right)}_{\text{multiplikative Korrektur}}(i, j, Jul) \end{aligned}$$

$spline(x)$ bezeichnet hier die Anwendung der kubischen Spline-Interpolation auf die Größe x .

Die Korrektur (4.8) wird für T , Tx , Tn , Td und ps ²⁴ verwendet. Gleichung (4.9) wird auf alle Größen, die durch null nach unten hin beschränkt sind, angewendet ($PRECIPTOT$ bzw. $DPREC$ ²⁵ bei REMO-UBA, $Glob$, V_{10} und $VMAXGUST$).

Die relative Luftfeuchte $Rel2$ kann im Prinzip aus den BIAS-korrigierten Werten von $Tdew$ und T als $esat(Tdew)/esat(T)$ berechnet werden. Es zeigte sich aber, dass (abhängig vom Modell und der geographischen Lage) bei den nach dieser Berechnungsvorschrift berechneten $Rel2$ -Werten entweder viele Fälle mit $Rel2(Korrigiert) > 1.0$ auftraten, oder Werte von $Rel2$ in der Nähe von $1 = 100\%$ fast nie auftraten. Daher wurde alternativ noch eine dritte Korrekturmethode für Größen, die nach unten hin durch 0 und nach oben hin durch 1 begrenzt sind, entwickelt. Diese im Folgenden *POTENZ-Methode* genannte Rechenvorschrift wurde auch für den Gesamtbedeckungsgrad $CLCT$ verwendet:

$$\begin{aligned} Rel2_{Modell,korr}(i, j, t) &= (Rel2_{Modell,unkorr}(i, j, t))^{x(i,j,Jul)} \\ \text{mit } x(i, j, Jul) &:= spline \left[\frac{\ln \left(\overline{Rel2_{Mess,gerastert}^{1971-2000; mon^{3x3}}} \right)}{\ln \left(\overline{Rel2_{Modell,unkorr}^{1971-2000; mon^{3x3}}} \right)} \right] (i, j, Jul) & (4.10) \\ &\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Potenzkorrektur bzw. Korrektorexponent}} \end{aligned}$$

Diese Methode funktioniert aus folgendem Grund:

²³ Genauer: Days of Year (DOY).

²⁴ Für ps könnte man auch die Korrektur (4.9) verwenden. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur um einige 1/10 hPa. Da die Korrekturwerte bei der additiven Korrektur aber anschaulicher sind, wurde die Korrektur (4.8) für ps verwendet.

²⁵ Bei REMO-UBA stand außer der normalen *PRECIP* auch eine bzgl. der Verdriftung korrigierte Version ($DPREC = \text{Drifted Precip}$) zur Verfügung. Da die Korrekturen für die Größe wesentlich geringer ausfielen als für die unverdriftete *PRECIP*, wurde die *DPREC* korrigiert.

Die Transformation $N = A^x$ ($N = Neu$; $A = Alt$) überführt $A = 1$ nach $N = 1$ und $A = 0$ nach $N = 0$. Werte von A zwischen 0 und 1 werden für $x < 1$ vergrößert und für $x > 1$ verkleinert. Bildet man den natürlichen Logarithmus auf beiden Seiten dieser Gleichung, so erhält man

$$\ln(N) = x \cdot \ln(A) \stackrel{\text{sol}}{=} \ln(\text{DWD}). \quad (4.11)$$

Falls N und A bzw. die DWD-Messungen ‘DWD’ nicht allzu weit um ihre zeitlichen Mittelwerte \overline{A} , \overline{N} und $\overline{\text{DWD}}$ herum streuen, so gilt approximativ $\overline{\ln(y)} \approx \ln(\overline{y})$. Damit folgt aus (4.11) nach Mittelung über die Zeit:

$$x \approx \frac{\ln(\overline{\text{DWD}})}{\ln(\overline{A})}. \quad (4.12)$$

Falls die Werte der betrachteten Größe A nicht zwischen 0 und 1, sondern zwischen a und b liegen, kann man vor Anwendung von (4.10) die Transformation $(A - a)/(b - a)$ durchführen und nach der Potenzierung zurück transformieren, d. h. $N = (b - a) \cdot ((A - a)/(b - a))^x + a$ berechnen.

Abbildung 4.12 zeigt, dass diese Korrektur fast eine Art *Quantile Mapping* darstellt.²⁶

Tests ergaben, dass die Ergebnisse für *Rel2*, die man mit dieser Potenzmethode erzielt, vernünftiger aussehen als die, welche man aus den korrigierten *Tdew*- und *T*-Werten berechnet. Es treten allerdings in einigen Extremfällen sehr (zu) kleine *Rel2*-Werte auf.

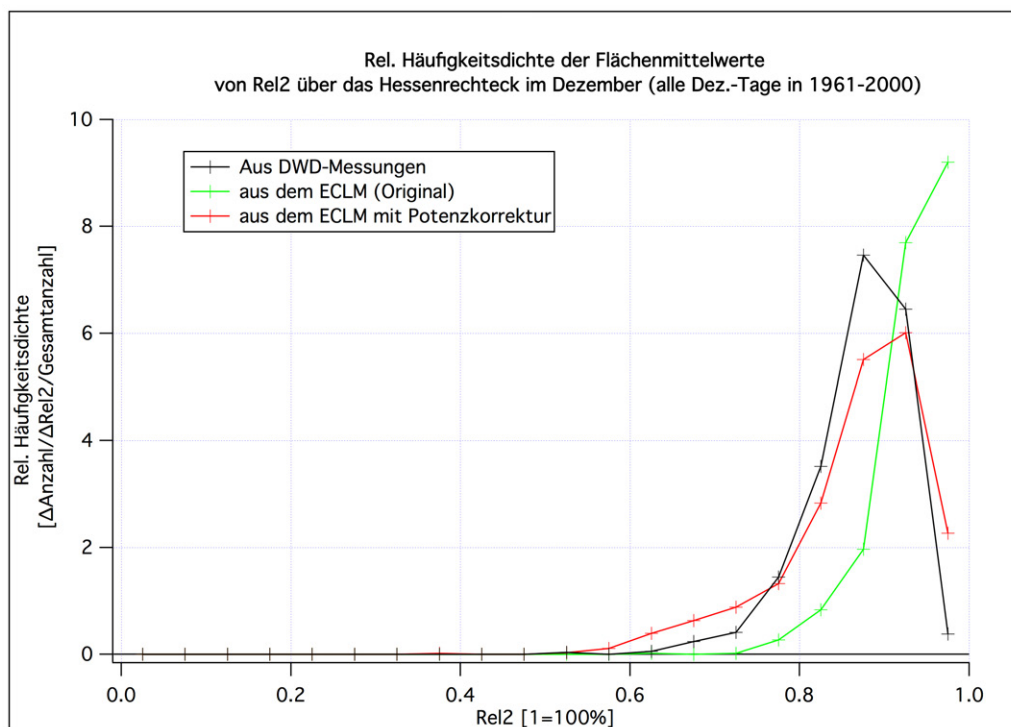


Abbildung 4.12: Relative Häufigkeitsdichte (normiertes Histogramm) der relativen Feuchte *Rel2* im Dezember aus DWD-Messungen, ECLM unkorrigiert und ECLM mit Potenzkorrektur (Breite der Histogramm-Klassen: 0.05).

²⁶ Man erkennt an dieser Abbildung allerdings nicht, dass Werte, die exakt 1 oder 0 sind, unverändert bleiben!

Abbildung 4.13 zeigt ein Beispiel für die additive Korrektur der Größe T_n aus RUBA. Die schwarze Kurve ist der Korrektur-Spline, der durch die langjährigen Monatsmittelwerte der Korrekturwerte (graue Balken) läuft. Im April müssen ca. 2.4 K von den RUBA- T_n -Werten abgezogen werden. Wie die blaue Linie zeigt, welche die Minimalwerte der Korrektur über alle Rasterpunkte im Hessenrechteck darstellt, gibt es innerhalb des Hessenrechtecks aber noch viel extremere Korrekturwerte (von bis zu -4 K im April).

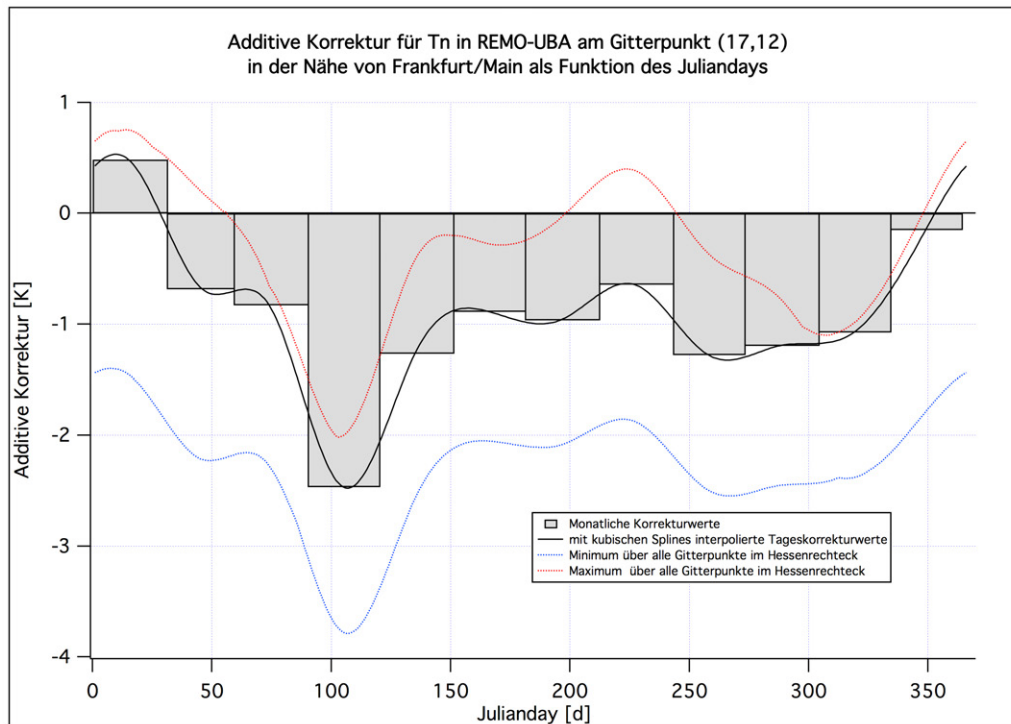


Abbildung 4.13: Additive Korrektur am Gitterpunkt (17,12) (ab 0 gezählt) in der Nähe von Frankfurt/Main für die Tagesminimumtemperatur T_n , sowie Minimum und Maximum über alle Gitterpunkte im Hessenrechteck

Einige andere Versuche zur BIAS-Korrektur, die von der Daten-AG diskutiert, aber letztendlich verworfen wurden, findet man in [Blümel & Chmielewski, 2010](#).

4.3.3 BIAS-korrigierte Datensätze


Tabelle 4.8 listet die korrigierten Modelldaten sowie einige zusätzlich vorhandene Datensätze (Albedo und Höhen über NHN), die nicht korrigiert werden konnten bzw. mussten. Die 0.2° -Auflösung wurde für RUBA wie bei den gerasterten DWD-Daten *mit first order conservative remapping* aus der 0.1° -Auflösung berechnet (mit Hilfe der Climate Data Operators CDO). Alle Datensätze liegen jeweils als eine Datei für den ‘‘Kontrolllauf’’ C20 (01.01.1960-31.12.2000) und für das Szenario A1B (01.01.2001-31.12.2100) vor.

Der Gesamtausschnitt (Hessenrechteck) ist in [Abbildung 4.8](#) dargestellt.

Alle Modelle zeigen im langjährigen Mittel signifikant höhere Tagesmittelwerte der 10 m-Windgeschwindigkeit V_{10} als die gerasterten DWD-Messungen.²⁷ Die korrigierten

²⁷ Bei den Tageswerten der gemessenen Windgeschwindigkeit gibt es bei sehr großen Windgeschwindigkeiten (>20 m/s) hingegen häufig Werte, die unrealistisch groß sind und von den Modellen nie erreicht werden (wahrscheinlicher Grund: Die Messwerte wurden aus nur wenigen Klimaterminen pro Tag berechnet).

Tabelle 4.8: Korrigierte Modelldaten für RUBA, ECLM und HCLM für das Hessenrechteck. HES01 (0.1°-Auflösung) für RUBA, HES02 (0.2°-Auflösung) für RUBA, CLM und HCLM.

Name	Größe	Kenn- ung	Einheit	Bemerkungen	Auf- lösun	Ausschnitt
T	Mitteltemperatur	167	°C		1d	HES01/02
Tx	Maximumtemperatur	201	°C		1d	HES01/02
Tn	Miniumumtemperatur	202	°C		1d	HES01/02
Rel2	Relative Luftfeuchte	-999	1 = 100 %	Aus esat(Tdew) und esat(T) berechnet ODER Mit POTENZ- Korrektur	1d	HES01/02
Tdew	Taupunkt	-999	°C		1d	HES01/02
V = V ₁₀	Windgeschwindigkeit	171	m/s	Referenzwerte aus Bft. in m/s umgerechnet	1d	HES01/02
PRECIPTOT bzw. DPREC	Gesamtniederschlag	260	mm/d	Korrektur mit R-korrigierten DWD-Daten	1d	HES01/02
CLCT	Gesamtbedeckungsgrad	-999	1 = 100 %	Referenzwerte wurden aus Sd und Sdmax; mit Potenzkorrektur	1d	HES01/02 Alte und neue Version!
Global = Glob	Tagesmittelwert der Globalstrahlung	1902	W/m ²	Referenzwerte wurden aus Sd, Sdmax und Sonenstand berechnet	1d	HES01/02 Alte und neue Version!
ps	Luftdruck am Boden	134	hPa		1d	HES01/02
Vmax (= VMAX-GUST)	Max. Windgeschwindigkeit des Tages inkl. Böen	-999	m/s	 ^a	1d	HES01/02
Alb	Albedo	175	1 = 100 %	Ohne Korrektur	1d	HES01/02
HSURF	Höhe über NHN	-999	m	Ohne Korrektur		HES01/02

^a Da zur Korrektur nur die Messungen von 1971-2000 benötigt werden, können die korrigierten Modelldaten von *VMAXGUST* im Gegensatz zu den gerasterten DWD-Messungen ohne Probleme für den gesamten Zeitraum von 1960-2100 verwendet werden.

V₁₀-Werte sind daher mit Vorsicht zu benutzen. Einerseits sind die stark durch regionale Effekte (Vegetation, Bebauung usw.) geprägten Messwerte nicht repräsentativ für eine Gitterfläche von 11 km x 7 km bzw. 22 km x 14 km. Andererseits könnte die Ursache für diese Diskrepanzen aber auch in einer fehlerhaften Interpolation der Modell-Windgeschwindigkeit zwischen unterem Modelllevel und Bodenoberfläche (auf das 10 m-Level) oder einer unangemessen gewählten Rauigkeitslänge liegen.

Hellgrau unterlegte Größen sind auf Grund der Berechnung der zur Korrektur benutzten Referenzwerte relativ unsicher (vgl. Kapitel 4.2.1). Die Korrekturen dieser Größen stellen aber mit großer Wahrscheinlichkeit Verbesserungen dar, da sich in der Literatur Hinweise finden lassen, die darauf hindeuten, dass die Größe der Korrekturen korrekt ist.

Die Ergebnisse von WETTREG2010 wurden nicht korrigiert, da alle Größen bis auf die Sonnenscheindauer (und die daraus berechnete Globalstrahlung), den Gesamtbedeckungsgrad im Winter und die Windgeschwindigkeit keine signifikanten Abweichungen von den 30-jährigen Monatsmittelwerten aufwiesen (siehe die Bilder im Anhang der READ_ME-Datei, die mit den BIAS-korrigierten Daten geliefert wurde, sowie in Kreienkamp et al., 2010, S. 15 und Abbildung 4.14). Die unkorrigierten 10 WETTREG-Läufe wurden von der HU-Berlin auch in gerasterter Form zur Verfügung gestellt. Die Gesamtgröße aller dieser Dateien beträgt ca. 50 GB.

In **Abbildung 4.14** werden noch exemplarisch für einen Gitterpunkt bei Frankfurt/Main²⁸ die täglichen Korrekturwerte der Modelle (inkl. WETTREG2010, Lauf 0; die dargestellten Korrekturen wurden nicht auf den Datensatz angewendet) miteinander verglichen. Wie Abbildung 4.13 zeigt, können an anderen Gitterpunkten noch erheblich stärkere Korrekturen als die hier gezeigten auftreten.

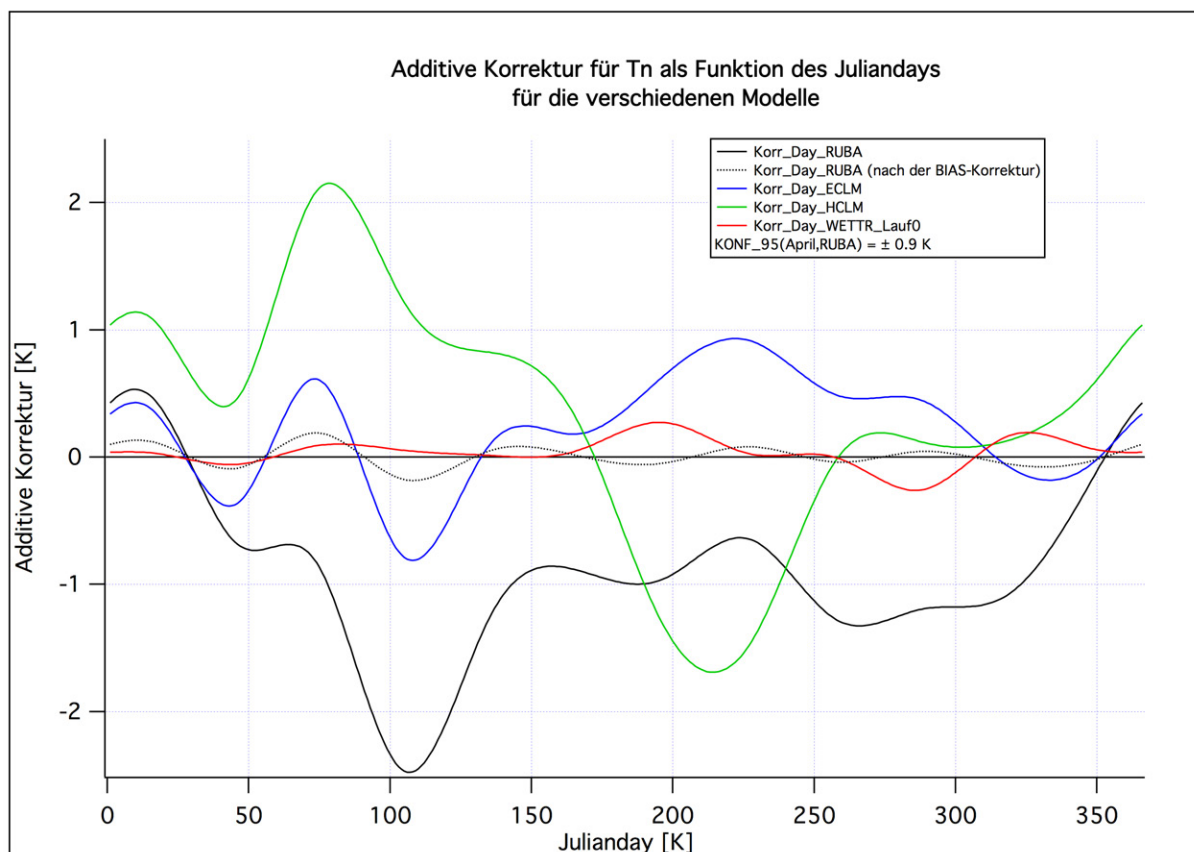


Abbildung 4.14: Additive Korrektur als Funktion des Juliandays für T_n an einem Gitterpunkt in der Nähe von Frankfurt/Main. RUBA hat im Frühjahr signifikant zu große, HCLM zu kleine T_n .

In der Legendenbox von Abbildung 4.14 ist ein approximativ berechnetes 95 %-Konfidenzintervall [KONF_95(Monat,Modell)] für die Korrekturwerte angegeben. Dieses Intervall bezieht sich auf das jeweilige Modell und den jeweiligen Monat, an welchem besonders große Korrekturwerte auftraten (hier: April und RUBA). Dieses Intervall kann aber auch

²⁸ Genauer: Es handelt sich um den Gitterpunkt $i = 18$, $j = 13$ in der 0.1° -Auflösung bei 8.65°E , 50.15°N und 136.5 m über NHN. Dieser liegt in der Rasterfläche $i = 9$, $j = 7$ der 0.2° -Auflösung, deren Mittelpunkt bei 8.60°E , 50.2°N und 228.0 m über NHN liegt (i, j jeweils ab 1 gezählt).

grob als Fehlerabschätzung für die anderen Modelle und anderen Tage (Juliandays) dienen.

4.4 Berechnung von Konfidenzintervallen für die Mittelwerte über verschiedene Klimamodelle

In diesem Kapitel sollen Fehlerbalken bzw. Vertrauensbereiche für den Mittelwert einer bestimmten “physikalischen” Größe über J Jahre (Index j ; $J = 10$ oder 30) und M Modelle (Index m) berechnet werden. Die im Folgenden entwickelte Methode wird dann in den nachfolgenden Kapiteln und im Anhang auf die Klimadaten und auch auf verschiedene Ergebnisse von Impaktmodellen angewendet (Blühbeginn, Frost, etc.). Der in Kapitel 4.4.1 entwickelte Ansatz wird zunächst nur für die 3 dynamischen Modelle hergeleitet. In Kapitel 4.4.2 und 4.4.3 wird dann darauf eingegangen, was bei der Anwendung der Methode auf Modelldaten von WETTREG2010 zusätzlich zu berücksichtigen ist.

4.4.1 Theorie

Abbildung 4.15 zeigt die Tagesminimumtemperatur T_n [Jahresmittelwerte des Gebietsmittelwerts über die 19 Obstanbaugitterpunkte (vgl. Kapitel 4.5) in Hessen] aus REMO-UBA, dem ECHAM5-CLM und dem HadCM3-CLM für den Zeitraum 2001-2100 (Szenario A1B; BIAS-korrigierte Werte). Man erkennt deutlich, dass REMO-UBA und ECHAM5-CLM gut korreliert sind. Der Korrelationskoeffizient $Korr(g_{mj}, g_{nj})$ (geschätzt aus dem Zeitraum 2001-2030) beträgt 0.89. Die hohe Korrelation beider Modelle ist damit zu erklären, dass beide Modelle vom gleichen globalen Klimamodell (ECHAM5, Szenario A1B, Lauf 1) angetrieben werden. Dynamische Klimamodelle mit unterschiedlichem Antrieb (z. B. das HadCM3-CLM und REMO-UBA) sind hingegen fast unkorreliert. Die Mittelwerte innerhalb einer bestimmten Dekade bzw. innerhalb eines 30 Jahresabschnitts können sich dagegen bei verschiedenen Modellen (sogar trotz BIAS-Korrektur) unterscheiden. Dieses Verhalten rechtfertigt den unten gemachten Ansatz (4.14).

Der gesuchte Schätzwert \bar{x} für den wahren Klimamittelwert (d. h. für den Erwartungswert) μ wird wie üblich definiert:

$$\bar{x} := \bar{x}_{mj} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M x_{mj} \right). \quad (4.13)$$

Gesucht wird die Standardabweichung von \bar{x} bzw. das Konfidenzintervall für μ . x_{mj} ist dabei der Jahresmittelwert des Jahrs j im Modell m , der evtl. bereits einen Gebietsmittelwert enthält.

Man kann die x_{mj} als Summe zweier Zufallsvariablen auffassen:

$$x_{mj} = m_m + g_{mj}. \quad (4.14)$$

Dabei ist m_m der Mittelwert (z. B. über einen 30 Jahreszeitraum) des m -ten Modells. g_{mj} sei eine normalverteilte²⁹ Zufallsvariable mit Mittelwert 0, die dem Modell m zugeordnet ist und jedes Jahr j neu “ausgelost” wird. Sie beschreibt die jährlichen Schwankungen des

²⁹ Die Normalverteilungsannahme ist nur wichtig, wenn man, wie weiter unten getan, Fehlerbalken mit Hilfe von t-Quantilen bestimmen möchte.

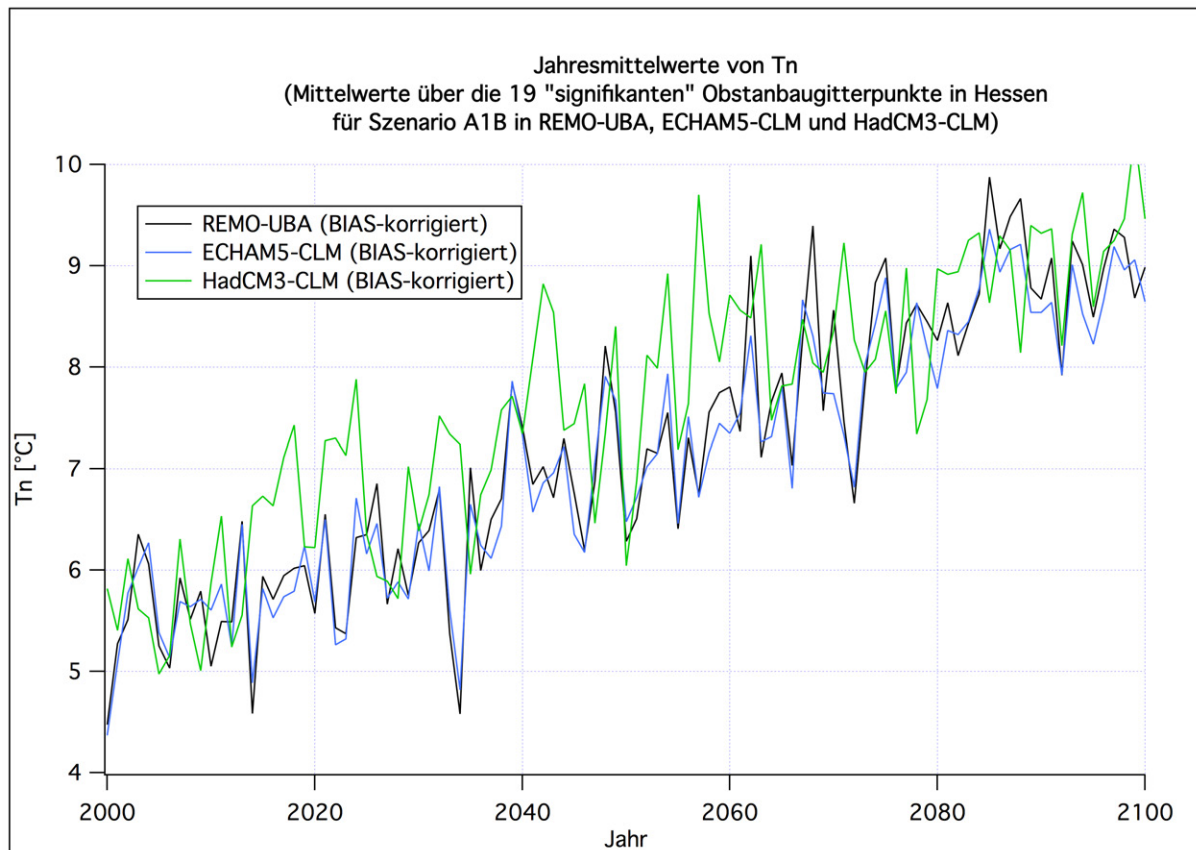


Abbildung 4.15: Jahresmittelwerte der Tagesminimumtemperatur T_n (Gebietsmittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte) aus REMO-UBA, ECHAM5-CLM und HadCM3-CLM (Szenario A1B)

Modells um den Mittelwert. Das Modell, welches dem Index m zugeordnet wird, werde für jede Realisierung neu aus einem großen Pool unterschiedlicher Modelle ausgelost. Es wird dabei angenommen, dass die unabhängigen “Ziehungen” immer aus derselben Grundgesamtheit der Modelle erfolgt. (Es dürfen also nicht systematisch einige Modelle aus einer bestimmten Untergruppe gezogen werden, welche eine andere Verteilung der Mittelwerte aufweist als die der Gesamtheit aller Modelle.) m_m sei normalverteilt und habe unabhängig vom Index m den Erwartungswert μ (das ist der gesuchte wahre Klimawert). Dass alle Erwartungswerte von m_m gleich sein sollen, bedeutet, dass die Modelle in ihrer Gesamtheit nicht alle gleichzeitig *systematisch* falsch sein sollen, sondern dass man einen korrekten Klimawert erhält, wenn man über genügend viele zufällig gewählte Modelle mittelt. Die Varianz von m_m habe unabhängig vom Index m den Wert σ_m^2 (bei σ_m^2 steht das “m” daher nicht für den Modellindex, sondern für “ $m = \text{Mittelwert}$ ”). σ_m^2 ist die Varianz der Mittelwerte der unterschiedlichen Modelle (für einen als quasi-stationär anzunehmenden Zeitbereich, z. B. ≤ 30 Jahre, oder für eine vom Trend bereinigte Zeitreihe).

Die Varianz von g_{mi} sei unabhängig von den Indizes und betrage σ_g^2 . σ_g^2 ist die Varianz der Modelle um ihren jeweiligen Mittelwert.

m_m und m_n seien für $m \neq n$ statistisch unabhängig; ebenso seien g_{mi} und g_{nj} für $i \neq j$ ³⁰ und m_m und g_{nj} für alle m, n und j unabhängig. g_{ni} und g_{mi} (gleiches Jahr,

³⁰ Bei stark ausgeprägten dekadischen Schwankungen der betrachteten Größe und relativ kleinen σ_g^2 können g_{mi} und g_{mj} (gleiches Modell, verschiedene dicht zusammen liegende Jahre) auch miteinander

verschiedene Modelle) können aber miteinander korreliert sein! Wie die obige Diskussion bei Abbildung 4.15 zeigte, können verschiedene Modelle (z. B. das ECHAM5-CLM und REMO-UBA) nämlich stark korreliert sein, wenn sie z. B. vom gleichen globalen Klimamodell angetrieben werden. Aus diesem Grunde werden die Korrelationen zwischen den g_{mi} hier nicht vernachlässigt.

Für die “exakte”³¹ Varianz von (4.13) erhält man³²

$$\sigma_{\bar{x}}^2 := V(\bar{x}) = \frac{\sigma_m^2}{M} + \frac{\sigma_g^2(1 + KO(M))}{M \cdot J}. \quad (4.15)$$

$V(\bar{x})$ bezeichnet hier die “exakte” Varianz von \bar{x} . $\sigma_m^2 \equiv V(m_m)$ ist, wie bereits oben beschrieben, die Varianz der m_m und $\sigma_g^2 \equiv V(g_{mj})$ die Varianz der g_{mj} .

KO(M) berechnet sich nach

$$KO(M) = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^M \sum_{n=1}^M \text{Korr}(g_{mj}, g_{nj}) \frac{1}{M}. \quad (4.16)$$

$\text{Korr}(g_{mj}, g_{nj})$ ist hierbei der Korrelationskoeffizient zwischen Modell m und n . KO(M) nimmt für unabhängige Modelle den Wert 0 an; für abhängige Modelle kann der Wert zwischen -1 und $M-1$ variieren. $\text{Korr}(g_{mj}, g_{nj})$ kann mit der normalen Schätzformel für den Korrelationskoeffizienten (nach Pearson) aus den x_{mj} (nach Trendbereinigung) geschätzt werden.

Die Ausdrücke (4.15) und (4.16) findet man, wenn man (4.14) in (4.13) einsetzt und beachtet, dass $V(ax) = a^2 \cdot V(x)$ und $V(x+y) = V(x) + V(y)$, sofern x und y unabhängig sind und $V(x+y) = V(x) + V(y) + 2 \cdot \text{Korr}(x, y) \cdot \sqrt{V(x) \cdot V(y)}$, wenn x und y korreliert sind. Außerdem muss man noch beachten, dass $V(x)$ als $E[(x - E(x))^2]$ definiert ist.

Um aus den Daten einen Schätzwert für $\sigma_{\bar{x}}^2 := V(\bar{x})$ bestimmen zu können, muss man Schätzwerte für die Größen σ_m^2 und σ_g^2 finden, die in (4.15) verwendet werden.

Hierbei bietet sich für den zweiten Term auf der rechten Seite von (4.15) die wie folgt definierte “Varianz” an:

$$s_1^2 = \frac{1}{(J-1)} \sum_{j=1}^J (\bar{x}_{mj}^m - \bar{\bar{x}}_{mj}^m)^2. \quad (4.17)$$

s_1^2 ist ein Schätzwert der Varianz (= “Varianz”) der jährlichen Modellmittelwerte \bar{x}_{mj}^m (Mittel über m ; über M Modelle) um den Gesamtmittelwert. Für den ersten Term in (4.15) kommt die folgende “Varianz” in Frage:

$$s_{Mo}^2 = \frac{1}{(M-1)} \sum_{m=1}^M (\bar{x}_{mj}^j - \bar{\bar{x}}_{mj}^j)^2. \quad (4.18)$$

s_{Mo}^2 ist die “Varianz” der Zeitmittelwerte \bar{x}_{mj}^j (Mittel über j ; über z. B. $J = 10$ oder 30 Jahre) der verschiedenen Modelle um den Gesamtmittelwert.

korreliert sein (serielle Korrelation über einen Zeitraum von einem Jahr und mehr). Diese Korrelationen werden hier aber vernachlässigt.

³¹ Im Gegensatz zum Schätzwert der Varianz ist hier der Erwartungswert der mittleren quadratischen Abweichungen gemeint.

³² mit den üblichen Voraussetzungen von Quasi-Stationarität im Mittelungszeitraum.

Mit den vor (4.17) erwähnten Rechenvorschriften findet man für den Erwartungswert $E[s_1^2]$ von s_1^2 den Ausdruck

$$E[s_1^2] = \frac{\sigma_g^2 (1 + KO(M))}{M}. \quad (4.19)$$

Ebenso findet man

$$E[s_{Mo}^2] = \sigma_m^2 + \frac{\sigma_g^2}{J} \left(1 - \frac{KO(M)}{M-1} \right). \quad (4.20)$$

Während (4.19) schon recht gut mit dem zweiten Term auf der rechten Seite von (4.15) übereinstimmt, stört in (4.20) der zweite Term auf der rechten Seite, wie ein Vergleich mit dem 1. Term von (4.15) zeigt. $E[s_{Mo}^2]$ ist nämlich leider kein erwartungstreuer Schätzwert für σ_m^2 .³³ Leider kann man diesen störenden Term auch nicht vollständig vernachlässigen, denn beide Terme in (4.20) können die gleiche Größenordnung annehmen³⁴. Man muss diesen Term daher abschätzen, indem man einen Schätzwert s_g^2 für σ_g^2 findet. Dieser kann wie folgt berechnet werden:

$$s_g^2 = \frac{1}{(M \cdot J - M)} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J (x_{mj} - \bar{x}_{mj}^j)^2. \quad (4.21)$$

Da wir hier annehmen, dass alle Modelle ähnliche Varianzen aufweisen, kann man die ‘‘Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert’’ aller Modelle *zusammenwerfen* und wie in (4.21) eine *gepoolte* Varianz berechnen.

Nun setzt man s_g^2 aus (4.21) für σ_g^2 in (4.20) ein, und ersetzt den Erwartungswert $E[s_{Mo}^2]$ in (4.20) durch den erwartungstreuen Schätzwert s_{Mo}^2 , löst (4.20) nach σ_m^2 auf, wobei man nun nicht σ_m^2 , sondern nur den Schätzwert s_m^2 für diese Größe erhält:

$$s_m^2 = s_{Mo}^2 - \frac{s_g^2}{J} \left(1 - \frac{KO(M)}{M-1} \right). \quad (4.22)$$

Da in (4.22) keine exakten Erwartungswerte wie in (4.20) verwendet werden, sondern nur Schätzwerte, die selber Zufallswerte darstellen, kann es vorkommen, dass die rechte Seite negativ wird. Wie Tests ergaben, ist es in diesem Fall sinnvoll, wenn man $s_m^2 = 0$ setzt:

$$\text{Wenn } s_m^2 < 0 \Rightarrow s_m^2 = 0. \quad (4.23)$$

Der hierdurch gemachte Fehler ist vernachlässigbar. (4.22) mit (4.23) kann man auch folgendermaßen formulieren:

$$s_m^2 = \max \left[0, s_{Mo}^2 - \frac{s_g^2}{J} \left(1 - \frac{KO(M)}{M-1} \right) \right]. \quad (4.24)$$

Diesen Ausdruck setzt man nun anstelle von σ_m^2 in (4.15) ein.

³³ Im Fall von $KO(M) = 0$ (d. h. Unkorreliertheit der g_{mj} mit den g_{nj}) ergibt der Erwartungswert (4.20), wenn man noch durch M dividiert, aber bereits den gesuchten Ausdruck (4.15)! Vergleiche aber die Diskussion bei (4.26).

³⁴ Vollständige Vernachlässigung führt aber zu keinen ganz unsinnigen Ergebnissen. Die Abweichungen betragen maximal ca. 30 %.

³⁵ Wenn man keinen separaten Wert für s_m^2 , sondern nur s_x^2 nach (4.25) berechnen möchte, kann man auf diese Absicherung (Nullsetzung negativer Werte) auch verzichten. Allerdings kann s_x^2 nach (4.25) dann unter Umständen zu kleine Werte annehmen, da s_m^2 in (4.24) dann negativ werden kann.

Dann ersetzt man $E[s_1^2]$ in (4.19) durch s_1^2 und multipliziert beide Seiten mit $\frac{1}{J}$. Die rechte Seite entspricht nun genau dem zweiten Term von (4.15). Für diesen Term in (4.15) setzt man nun die linke Seite der eben berechneten Gleichung, nämlich $\frac{s_1^2}{J}$ ein. Damit hat man das Endergebnis gefunden: Ein (fast³⁶) erwartungstreuer Schätzwert s_x^2 für σ_x^2 ist

$$s_x^2 = \frac{s_m^2}{M} + \frac{s_1^2}{J}. \quad (4.25)$$

Setzt man (4.22) und (4.19) (mit Schätzwerten anstelle von “Erwartungswerten”) in (4.25) ein, so erhält man alternativ:

$$s_x^2 = \frac{s_{Mo}^2}{M} + \frac{s_g^2}{J \cdot M} KO(M) \left(\frac{M}{M-1} \right). \quad (4.26)$$

Diese Form ist zwar anschaulicher, aber nicht so gut zur Abschätzung der Freiheitsgrade (siehe nächster Absatz) geeignet. Außerdem besitzt die Varianz nach (4.26) scheinbar weniger effektive Freiheitsgrade, falls der 2. Term auf der rechten Seite wesentlich kleiner als der 1. Term ist [z. B. bei $KO(M) = 0$]. Daher ist diese Abschätzung unsicherer als (4.25). Weiterhin bleibt (4.25) bei $M = 1$ und $\sigma_m^2 = 0$ gültig, wenn man nur $s_m^2 = 0$ setzt. (4.26) liefert in diesem Fall kein sinnvolles Ergebnis (“M-1” im Nenner wird null). (4.25) kann auch wesentlich leichter verallgemeinert werden, wenn die Modellmittelwerte korreliert sind [siehe Kapitel 4.4.3 und Gleichung (4.34)].

Um den Vertrauensbereich (Konfidenzintervall) von μ bestimmen zu können, muss man die Verteilung von $(\bar{x} - \mu)/s_x$ kennen. Wenn \bar{x} der gewöhnliche arithmetische Mittelwert und $s_x^2 = s_x^2/N$ der normale Schätzwert für die Varianz dieses Mittelwerts wären, so wäre $(N-1) \cdot s_x^2/\sigma_x^2$ exakt χ_{FG}^2 -verteilt und $(\bar{x} - \mu)/s_x$ wäre t-verteilt mit $FG = N-1$ Freiheitsgraden. Dabei wurde angenommen, dass \bar{x} über N unabhängige Werte x_i gebildet wurde, die x_i normalverteilt sind und s_x^2 der normale Schätzwert der Varianz des Einzelwerts x_i ist. Leider ist $(FG) \cdot s_x^2/\sigma_x^2$ mit dem s_x^2 aus (4.25) nicht exakt χ_{FG}^2 -verteilt, zumal man hier auch nicht weiß, welchen Wert man für FG verwenden soll. Das Problem hat Ähnlichkeiten mit dem *Behrens-Fisher*-Problem, das bei der Bestimmung der Verteilung der Testgröße beim t-Test mit ungleichen Varianzen auftritt. Zur Berechnung der Freiheitsgrade FG wird dort die Approximation von Welch-Satterthwaite benutzt (vgl. [Sachs & Hedderich, 2006](#); [Welch, 1947](#) und http://en.wikipedia.org/wiki/Welch's_t_test). Wenn man diesen Ansatz für Gleichung (4.25) verallgemeinert, so erhält man³⁷:

$$FG = \frac{\left(\frac{s_m^2}{M} + \frac{s_1^2}{J} \right)^2}{\frac{(s_m^2/M)^2}{(M-1)} + \frac{\left(\frac{s_1^2}{J} \right)^2}{(J-1)}}. \quad (4.27)$$

Hiermit ergibt sich das $(1-p) \cdot 100\%$ -Konfidenzintervall $\text{Konf}(1-p)$ zur statistischen Sicherheit $(1-p)$ als

$$\text{Konf}(1-p) = \pm t_{FG, (1-\frac{p}{2})} \cdot s_x, \quad (4.28)$$

³⁶ “fast” wegen der Nullsetzung (4.23).

³⁷ Die Werte von FG bewegen sich für $M = 5$ und $J = 30$ zwischen 4 und 29, was für die t-Quantile $t_{FG; 0.975}$ eine Variationsbreite von 2...2.78 bedeutet. Das heißt, dass man nur einen maximalen Fehler von 17% macht, wenn man einfach den mittleren Wert 2.4 für das t-Quantil benutzt und die Freiheitsgrade nicht beachtet.

welches symmetrisch um den Mittelwert \bar{x} aus Gleichung (4.13) plaziert ist. Hierbei ist $t_{FG, (1-p/2)}$ das $(1-p/2) \cdot 100\%$ -Quantil der t-Verteilung mit FG Freiheitsgraden. FG wird nach (4.27) und $s_{\bar{x}}$ als Wurzel aus (4.25) berechnet, wobei (4.25) mit Hilfe von (4.24), (4.18), (4.21) und (4.16) berechnet wird.

Monte Carlo Simulationen ergaben, dass die hier hergeleitete Methode für $J > 4$ und $M > 4$ fast exakte Werte ergibt. Für $J > 9$ kann man sogar $KO(M)$ in Gleichung (4.24) auf “0” setzen, ohne die Konfidenzintervalle merklich zu verfälschen. In den an der HU-Berlin vorgenommenen Auswertungen wurden aber trotzdem die vollständigen Gleichungen verwendet.

Um den Vertrauensbereich von Differenzen $\delta := \mu_1 - \mu_2$ aus Erwartungswerten unterschiedlicher 30-Jahresabschnitte zu bestimmen, wurde mit den Differenzen der Mittelwerte ähnlich verfahren wie oben mit den reinen Mittelwerten. Nur wurde nun die Varianz $s_{\bar{d}}$ der Differenz $\bar{d} := \bar{x}_1 - \bar{x}_2$ als Summe der Einzelvarianzen $s_{\bar{x}_i}^2$ der Mittelwerte, aus denen die Differenz gebildet wurde, bestimmt: $s_{\bar{d}}^2 = s_{\bar{x}_1}^2 + s_{\bar{x}_2}^2$. Die Freiheitsgrade FG des zugehörigen t-Werts $(\bar{d} - \delta)/s_{\bar{d}}$ wurden gemäß Gleichung (4.27) berechnet, in der nun aber s_m^2/M durch $s_{\bar{x}_1}^2$ und s_1^2/J durch $s_{\bar{x}_2}^2$ ersetzt wurden. $(M-1)$ wurde hierbei durch den Freiheitsgrad von $t_1 = (\bar{x}_1 - \mu_1)/s_{\bar{x}_1}$ und $(J-1)$ wurde durch den Freiheitsgrad von $t_2 = (\bar{x}_2 - \mu_2)/s_{\bar{x}_2}$ ersetzt.

Man beachte bei der Interpretation der Ergebnisse in den Ergebniskapiteln in Hinblick auf die Konfidenzintervalle **unbedingt Folgendes**:³⁸ \bar{x} aus Gleichung (4.13) ist ein Schätzwert für den Erwartungswert des zeitlich Mittelwerts $\bar{x}_{mj}^j := \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J x_{mj}$ (der z. B. ein 30-jähriger Mittelwert sein kann). Für das 95 %-Konfidenzintervall dieses Erwartungswerts gilt:

$$\text{Prob} \left(\underbrace{\bar{x} - t_{FG, 97.5\%} s_{\bar{x}} \leq \text{E}[\bar{x}_{mj}^j] \leq \bar{x} + t_{FG, 97.5\%} s_{\bar{x}}}_{\text{Konfidenzintervall für E}[\bar{x}_{mj}^j]} \right) = 95 \%. \quad (4.29)$$

Prob steht hierbei als Abkürzung für die “Wahrscheinlichkeit” (Probability) und $\text{E}[\bar{x}_{mj}^j]$ bezeichnet den Erwartungswert von \bar{x}_{mj}^j . Die Gleichung (4.29) besagt, dass die Grenzen $\bar{x} - t_{FG, 97.5\%} s_{\bar{x}}$ und $\bar{x} + t_{FG, 97.5\%} s_{\bar{x}}$, die beide Zufallsvariablen sind, den unbekanntem, aber gesuchten Erwartungswert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % überdecken.

Würde man sehr viele unabhängige Modelle ($M \rightarrow \infty$) in die Rechnungen einbeziehen, so würde wegen Gleichung (4.15) ($s_{\bar{x}} \rightarrow 0$) auch die Breite des Konfidenzintervalls gegen null gehen.³⁹ Man hätte dann den exakten 30-jährigen *Mittelwert* aller im betrachteten Szenario möglichen Klimarealisierungen bestimmt. Das bedeutet aber leider **nicht**, dass eine bestimmte einzelne Realisierung eines Klimaverlaufs, so wie wir bzw. unsere Enkel ihn erleben werden, mit 95 prozentiger-Wahrscheinlichkeit in diesen Bereich fällt. Für den Zufallsbereich⁴⁰, in den ein einzelner 30-jähriger Mittelwert \bar{x}_{mj}^j mit einer Wahrscheinlichkeit

³⁸ Vergleiche auch die Diskussion in Abschnitt L.1.

³⁹ Man beachte, dass $s_{\bar{x}}$ nur dann gegen null geht, wenn die Modelle unabhängig voneinander sind. Sind alle Modelle vollständig miteinander korreliert, so hat $KO(M)$ in Gleichung (4.15) den Wert $M+1$ und es gilt $\sigma_{\bar{x}} \rightarrow \sigma_g/\sqrt{J}$.

⁴⁰ Dieser Bereich wird auch Mutungsbereich oder Erwartungsbereich genannt.

von 95 % fällt, gilt nämlich

$$\text{PROB} \left(\underbrace{\text{E}[\bar{x}_{mj}^j] - u_{97.5\%} \sqrt{\sigma_m^2 + \frac{\sigma_g^2}{J}} \leq \bar{x}_{mj}^j \leq \text{E}[\bar{x}_{mj}^j] + u_{97.5\%} \sqrt{\sigma_m^2 + \frac{\sigma_g^2}{J}}}_{\text{Zufallsbereich für } \bar{x}_{mj}^j} \right) = 95 \%. \quad (4.30)$$

Hierbei ist $u_{97.5\%}$ das 97.5 %-Quantil der Standardnormalverteilung und $\sqrt{\sigma_m^2 + \frac{\sigma_g^2}{J}}$ ist die Standardabweichung von \bar{x}_{mj}^j , was leicht aus (4.15) folgt bzw. ähnlich wie diese Gleichung hergeleitet werden kann.⁴¹ Der Vergleich von Gleichung (4.29) mit (4.30) ergibt, wenn man noch die Formel (4.15) zu Hilfe nimmt, dass der Zufallsbereich von \bar{x}_{mj}^j bei $FG \approx 10$ und $M = 5$ unabhängigen Modellen (mit $KO(M) \approx 0$) um ca. den Faktor A größer ist als der Vertrauensbereich von $\text{E}[\bar{x}_{mj}^j]$, wobei für A folgende Beziehung gilt:

$$A := \frac{u_{97.5\%}}{t_{FG, 97.5\%}} \sqrt{M} \approx 2 \quad (\text{bei } FG \approx 10 \text{ und } M \approx 5). \quad (4.31)$$

Hierbei wurde zusätzlich angenommen, dass $s_{\bar{x}}$ eine ausreichend gute Näherung für $\sigma_{\bar{x}}$ darstellt.

Gleichung (4.31) besagt, dass die mögliche Schwankungsbreite einer einzelnen Realisierung (im hier betrachteten Fall von 5 Modellen) ungefähr doppelt so groß ist wie die in den Ergebnistabellen angegebenen 95 %-Konfidenzintervalle für den Erwartungswert!

Die in dieser Arbeit angegebenen Konfidenzintervalle bzw. die diesen zugeordneten Zufallsbereiche enthalten nur die natürlichen Variationen der Klimagrößen und die Unsicherheiten in den Parametrisierungen der Klimamodelle (u. ä.). Die Fehlerbandbreite der Impaktmodelle und der für die Kostenrechnungen benötigten Obstpreise, Obstanbauflächen, Maßnahmekosten usw. (vgl. Kapitel 4.12.2) müssten im Prinzip noch zusätzlich berücksichtigt werden und würden die Fehlerbereiche weiter vergrößern. Da leider keine Schätzwerte für die Fehler der Impaktmodelle und Kosten-Parameter vorliegen, konnten diese Unsicherheiten aber *nicht* hinzugerechnet werden.

4.4.2 Einfluss der Korrelationen zwischen den 10 WETTREG Realisierungen

Abbildung 4.16 zeigt Jahresmittelwerte der Tagesmitteltemperatur T (über 10 Jahre gleitend gemittelt; Mittelwert über Hessen) in den 10 WETTREG2010-Läufen. Fasst man die m_m aus dem vorherigen Kapitel hier als gleitende Mittelwerte bzw. als dekadische Variationen des Modells m auf, so erkennt man, dass bei WETTREG im Gegensatz zu den dynamischen Modellen nicht die g_{mj} , sondern die m_m korreliert sind!⁴² Die g_{mj} hingegen sind bei WETTREG auf Grund des eingesetzten Wettergenerators, der eine Art Zufallsgenerator darstellt, und über mehrere Jahre hinweg Wetterlagen zufällig anordnet, weitestgehend unabhängig.

Da die Temperaturen der einzelnen WETTREG-Läufe stark miteinander korreliert sind, darf man die Varianz des ‘‘Mittelwerts aus Gleichung (4.13)’’ über die 10 Modellläufe und

⁴¹ Man beachte, dass die Breite des Zufallsbereichs in Gleichung (4.30) auch für $J \rightarrow \infty$ nicht gegen null geht, sondern größer null bleibt, sofern die Varianz σ_m^2 der Modellmittelwerte größer als null ist.

⁴² Auf die Konsequenzen dieser Korrelationen bezüglich der Theorie aus Kapitel 4.4.1 (dort wurden diese Korrelationen vernachlässigt) wird in Kapitel 4.4.3 eingegangen.

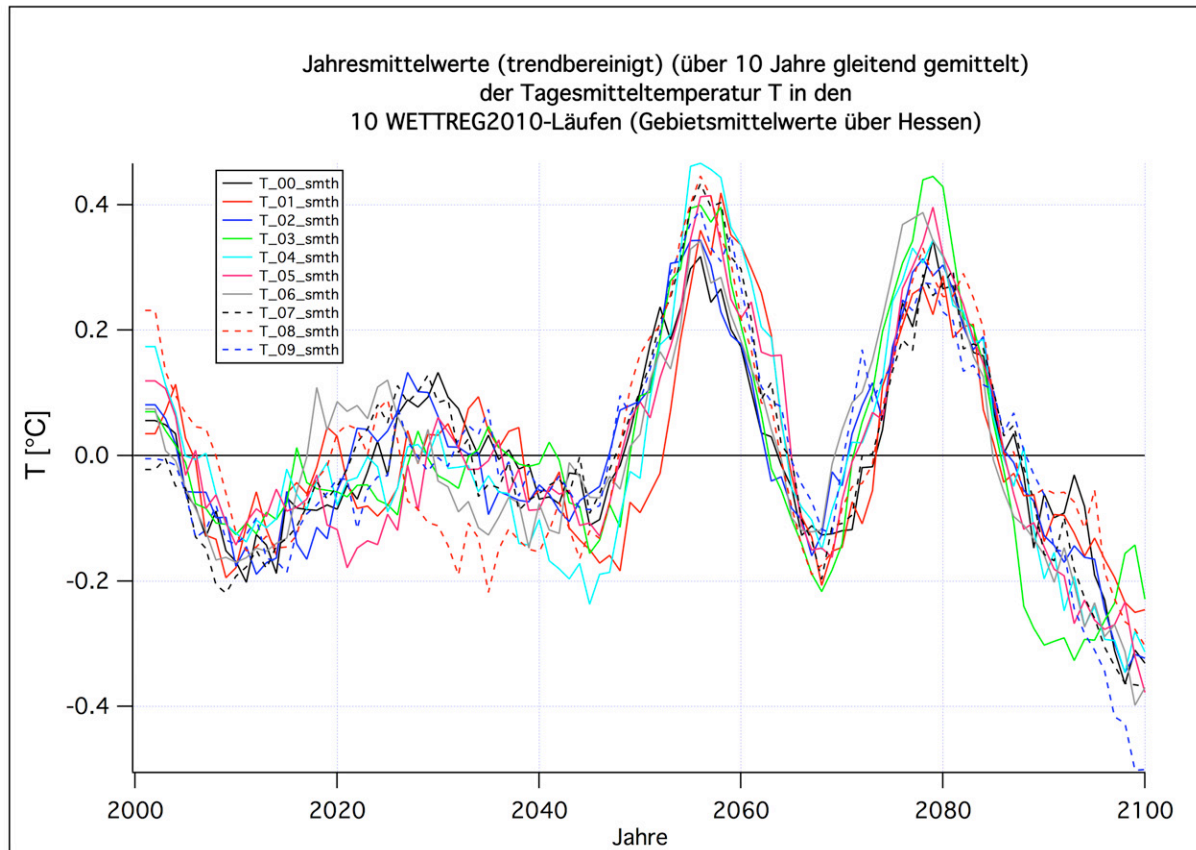


Abbildung 4.16: Jahresmittelwerte der Tagesmitteltemperatur T (über 10 Jahre gleitend gemittelt) in den 10 WETTREG2010-Läufen

z. B. über 10 fest vorgegebene Jahre⁴³ nicht als $s^2(x_{mj})/(10 \cdot 10)$ berechnen. Das hierbei verwendete $s^2(x_{mj})$ könnte man z. B. folgendermaßen abschätzen:

$$s^2(x_{mj}) = \frac{1}{(10 \cdot 10 - 1)} \sum_{m=0}^9 \sum_{j=1}^{10} \left(x_{mj} - \overline{\overline{x_{mj}^m}} \right)^2. \quad (4.32)$$

$s^2(x_{mj})/(10 \cdot 10)$ wäre um ca. den Faktor 0.036 kleiner als die wahre Varianz des Mittelwerts über 10 Modellläufe und 10 Jahre⁴⁴.

Die Korrelation zwischen den Modellläufen vergrößert die Varianz gegenüber dem unabhängigen Fall also erheblich. Da der Mittelungszeitraum für den 'm-j'-Mittelwert in (4.13) kleiner ist als die Periodenlänge der dekadischen Schwankungen, fällt die wahre Varianz $s^2(\overline{\overline{x_{mj}^m}})$ dieses Mittelwerts sogar fast um den Faktor 3 größer aus als $s^2(x_{mj})/10$ (dieses Ergebnis erhielte man, wenn die 10 Jahre statistisch unabhängig wären und die 10 Läufe vollständig miteinander korreliert wären). Bedingt durch die dekadischen Schwankungen existiert also auch eine erhebliche zeitliche Autokorrelation.

Auch wenn man versucht, die Varianz des 10-jährigen Mittelwerts (diesmal ohne die zusätzliche Mittelung über die 10 Modelle) zu berechnen, indem man zuerst die 10-jährigen

⁴³ Tendenziell ähnliche Ergebnisse erhält man, wenn man 30 Jahreszeiträume betrachtet.

⁴⁴ Anders ausgedrückt: Die wahre Varianz, die man aus vom Trend bereinigten Dekaden-Mittelwerten über mehrere Dekaden hinweg abschätzen kann (siehe Seite 52), wäre um den Faktor 28 größer als der obige Schätzwert. [Die Zahlenangaben für die Faktoren (0.036 bzw. 28) sind Mittelwerte über die 10 Dekaden.]

Mittelwerte einzeln über alle 10 Modellläufe bildet, und aus diesen 10 Werten dann die Varianz schätzt, ist diese Schätzung viel zu klein, da die Modellläufe untereinander nicht statistisch unabhängig sind. Der Wert ist um ca. den Faktor 0.33 kleiner als der bereits erwähnte Wert, den man aus der Varianz der Jahreswerte schätzen würde, wenn die “Jahre” unabhängig wären ($= s^2(x_{mj})/10$).⁴⁵ Bei Dekadenmittelwerten spielt die (zeitliche) Varianz des antreibenden GCM’s also eine wesentlich größere Rolle als die der WETTREG-Läufe untereinander. Diese GCM-Varianz wird aber bei der eben erwähnten Methode vollständig vernachlässigt.

Das bedeutet, dass man durch die Bildung von Mittelwerten über die 10 WETTREG-Läufe in den meisten Fällen keine Genauigkeit gewinnt, da die korrekt berechneten⁴⁶ Fehler nicht wesentlich kleiner sind als wenn man nur einen Lauf betrachten würde und dabei die Fehler des “Dekadenmittelwertes und des Mittelwerts über die 10 Modellläufe” aus den 10 Jahreswerten dieses einen Modelllaufs einfach als $s(x_{mj})/\sqrt{10}$ abschätzen würde.

Eine alternative Möglichkeit, vernünftige Schätzwerte für die Mittelwerte über M WETTREG-Läufe und einen J ($J = 10$ oder 30) -Jahresabschnitt zu erhalten, besteht in der Anwendung von effektiven Freiheitsgraden bzw. einer effektiven Anzahl von Jahren n_{eff} .

$$\underbrace{s^2(\overline{x_{mj}^j})}_{\text{Gesamtvarianz}} =: \frac{s^2(x_{mj})}{n_{eff}} = \underbrace{\frac{s^2(x_{mj})}{A}}_{\text{dekadische Varianz}} + \underbrace{\frac{s^2(x_{mj})}{J \cdot M}}_{\text{WETTREG-Varianz}} \quad (4.33)$$

Die Anzahl n_{eff} der effektiven Freiheitsgrade, die durch Gleichung (4.33) definiert wird, kann man leicht grob abschätzen, indem man Schätzwerte für $s^2(\overline{x_{mj}^j})$ (z. B. durch Bildung der Standardabweichung aus den Dekaden- und Modellmittelwerten mehrerer Dekaden nach vorherigem Abzug des Trends) und für $s^2(x_{mj})$ [Gleichung (4.32)] bildet und Gleichung (4.33) nach n_{eff} auflöst. Diese Methode ist ausführlicher in [Chmielewski et al., 2009a](#), Abschnitt 3.3.4 beschrieben. Wenn x_{mj} Jahresmittelwerte von Tn bzw. T sind und $J = 10$ sowie $M = 10$ gilt, so erhält man $n_{eff} = 3.6$ bzw. 2.8 . Für Monatsmittelwerte von Tn erhält man je nach Monat Werte von n_{eff} zwischen 11 im April und 66 im Januar.

In der hier vorliegenden Arbeit wurden die Standardabweichungen bzw. Varianzen und Konfidenzintervalle des Mittelwerts über die 10 WETTREG-Realisierungen aber mit der vor Gleichung (4.33) beschriebenen Methode (d. h. mit Hilfe der Ergodizitäts-Annahme aus dem zeitlichen Verlauf eines “fest gewählten” Laufs) approximativ berechnet.⁴⁷ Diese Methode führt auf verlässlichere Fehlerschätzungen als andere Methoden, die versuchen, aus den 10 WETTREG-Realisierungen die Fehler herzuleiten. Die Ergebnisse unterscheiden sich auch nicht wesentlich von der “ n_{eff} -Methode”, da sich $\sqrt{n_{eff}}$ [der Nenner bei der Berechnung der Standardabweichung gemäß (4.33)] für die meisten Größen um weniger als

⁴⁵ Wenn auch die Jahre nicht unabhängig sind (was hier der Fall ist), sondern eine Autokorrelation besteht bzw. eine langjährige Variation des Temperaturverlaufs vorliegt, so ist die wahre Varianz ja sogar noch größer als dieser Wert, wie bereits in der Diskussion nach Gleichung (4.32) festgestellt wurde.

⁴⁶ Wie gerade erläutert wurde, ergeben die meisten Methoden, die sich intuitiv anbieten, völlig falsche und viel zu kleine Werte!

⁴⁷ In den meisten Fällen wurden aber Mittelwerte über WETTREG-Läufe und die drei dynamischen Modelle betrachtet. In diesem Fall wurde wie in Kapitel 4.4.3 beschrieben vorgegangen, d. h. es wurden nur zwei WETTREG-Läufe verwendet, und zur Berechnung der Gesamtvarianz wurde die Methode aus Kapitel 4.4.1 eingesetzt.

30 % von \sqrt{J} [der Nenner bei Bildung der gewöhnlichen Standardabweichung $s(x_{mj})/\sqrt{J}$ des Mittelwerts über J Jahre] unterscheidet.

4.4.3 Berücksichtigung von Korrelationen zwischen den Modellmittelwerten

In Kapitel 4.4.2 wurde festgestellt, dass die Modellmittelwerte m_m der 10 WETTREG2010-Läufe nicht so, wie es in Kapitel 4.4.1 angenommen wurde, statistisch unabhängige Realisierungen dieser Mittelwerte darstellen, sondern hohe Korrelationen untereinander aufweisen.

Abbildung 4.17 zeigt die Differenz der 30-jährigen Mittelwerte (2071-2100 vs. 1971-2000) der Aprilmittelwerte (links) und der Jahresmittelwerte (rechts) der 2m-Lufttemperatur für die 3 dynamischen Klimamodelle, die in INKLIM-A verwendet werden, für 9 weitere zufällig ausgewählte Modelle aus der *Ensemble*-Datenbank und für die 10 WETTREG-Läufe 0...9. Die Differenzen beziehen sich auf Gebietsmittelwerte über das politische Hessen.

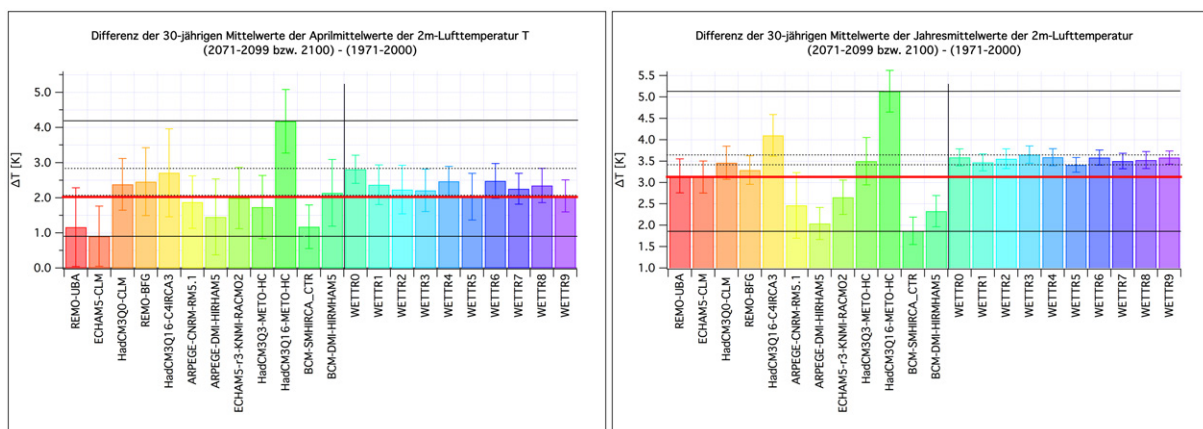


Abbildung 4.17: Differenz der 30-jährigen Mittelwerte der Aprilmittelwerte und der Jahresmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur für die 3 dynamischen Klimamodelle aus INKLIM-A, 9 weitere aus der Ensemble-Datenbank und die 10 WETTREG-Läufe

Man erkennt sofort, dass die Streuung der WETTREG-Mittelwerte (der Differenzen) wesentlich kleiner ist als die der unabhängigen Modelle. WETTREG2010 schwankt bei den Aprilmittelwerten um ca. 0.9 K, die Gesamtheit aller Modelle aber um ca. 3.5 K. Noch drastischer sind die Unterschiede bei der Differenz der Jahresmittelwerte der Temperatur: WETTREG2010 schwankt um ca. 0.2 K, die Gesamtheit der Modelle aber um ca. 3.5 K.

Dieses Verhalten bestätigt erneut die bereits im vorherigen Kapitel gemachte Feststellung, dass die 10 WETTREG-Läufe keine statistisch unabhängigen Realisierungen von Mittelwerten hervorbringen, sondern Korrelationen zwischen diesen Mittelwerten bestehen. Nimmt man der Einfachheit halber an, dass alle paarweisen Korrelationskoeffizienten zwischen den Mittelwerten m_i und m_j , die größer als null sind, gleich groß sind und den Wert ρ haben⁴⁸, und nimmt man weiter an, dass von den betrachteten M Modellen nur

⁴⁸ Leider ist es bei der geringen Anzahl von vorliegenden Modellen nicht möglich, konkrete Werte für ρ zu schätzen (jedenfalls nicht bezüglich 30-jähriger Mittelwerte). Man benötigte hierzu mehrere, unabhängige Modellauslosungen mit jeweils K korrelierten Modellen oder müsste Resampling Methoden, z. B. Bootstrapping, anwenden.

K korrelierte WETTREG-Läufe verwendet werden (die restlichen $M - K$ Modelle seien *unkorreliert*), so errechnet man für die Varianz des Mittelwerts über die M Modellmittelwerte leicht [vgl. Gleichung (4.4) und (4.5)] folgenden Ausdruck:

$$\text{Var} \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M m_i \right) = \frac{\sigma_m^2}{M} \cdot \left(1 + \frac{K^2 - K}{M} \rho \right). \quad (4.34)$$

Dieser Ausdruck bzw. ein entsprechender Schätzwert müsste nun in (4.25) anstelle von s_m^2/M verwendet werden. Für $\rho = 0$ ergibt sich wieder der alte Ausdruck für unabhängige Mittelwerte. Im Extremfall $\rho = 1$ und $K = M$ (alle Modelle sind 100%-ig korreliert) erhält man als Ergebnis aus (4.34), dass die Varianz des Mittelwerts der m_i gerade σ_m^2 ist.

Abbildung 4.18 wurde für den Fall $M - K = 3$ [d. h. für 3 dynamische Modelle mit unabhängigen Mittelwerten und für $K = (M - 3)$ korrelierte WETTREG-Läufe] erstellt. Dabei wurde $\sigma_m = 1$ gesetzt. Die farbigen Kurven beschreiben die Varianz des Mittelwerts

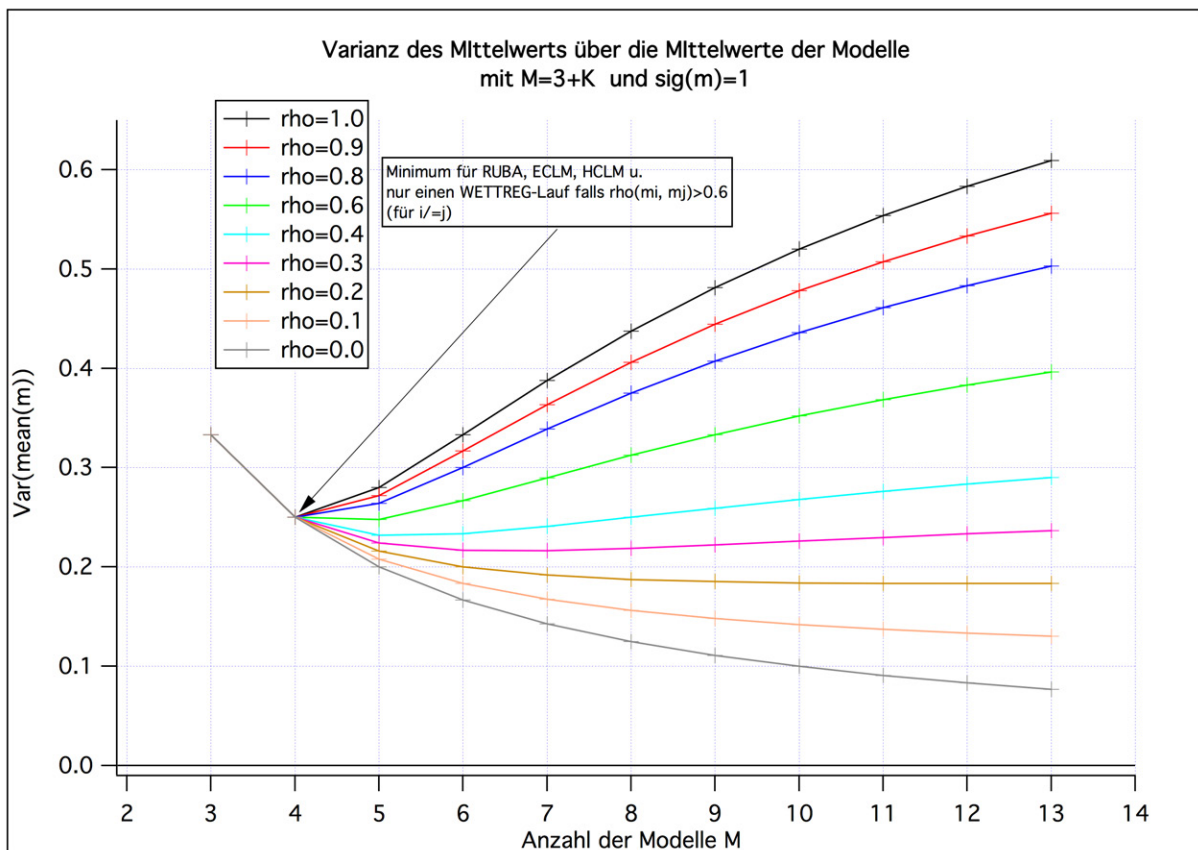


Abbildung 4.18: Varianz des Mittelwerts über die Mittelwerte der Modelle, wenn K Modellmittelwerte untereinander mit der Korrelation ρ korreliert sind

über die Modellmittelwerte als Funktion der Anzahl der beim Mittelwert berücksichtigten Modelle für jeweils festen Korrelationskoeffizienten ρ . Bei unabhängigen Mittelwerten nimmt die Varianz proportional zu $1/M$ ab (graue Kurve). Für $\rho \geq 0.6$ nimmt die Varianz ein Minimum bei $M = 4$ oder 5 an. Das bedeutet, dass man, sofern $\rho \geq 0.6$ gilt, den kleinsten Fehler gemäß (4.25) bzw. (4.28) [nach Modifikation mit (4.34)] berechnet, wenn man nur einen oder zwei ($K = M - 3$) WETTREG-Läufe in den Modellmittelwert

einfließen lässt. Das ist auch anschaulich klar: Je mehr hoch korrelierte WETTREG-Läufe in den Modellmittelwert eingehen, desto stärker wird sich der Modellmittelwert dem (fast konstanten) WETTREG-Mittelwert nähern (vgl. Abbildung 4.17 rechts). Der Mittelwert besteht bei sehr hoher Korrelation und großem M letztendlich im Prinzip nur aus einem einzigen unabhängigen WETTREG-Wert. Daher verringert sich die Varianz des Mittelwerts nicht proportional zu $1/M$, sondern nähert sich mit steigendem M asymptotisch der Varianz $\sigma_m^2 \cdot \rho$ an [das folgt aus Gleichung (4.34) mit $K = M - 3$ und $M \rightarrow \infty$]. Bei $\rho = 1$ entspricht das dem Wert, der für eine einzelne *Auslosung* eines Modells korrekt ist.

Aus den oben beschriebenen Gründen wurden in den folgenden Kapiteln bei den “statistischen Auswertungen”, außer für exemplarische Zwecke, immer nur zwei WETTREG-Läufe, zusätzlich zu den drei dynamischen Modellen, berücksichtigt.

4.4.4 Fazit

Um Konfidenzintervalle für die “Mittelwerte über die Ergebnisse verschiedener Modelle” berechnen zu können, wurden die verschiedenen Modelle als *unabhängige Ziehungen aus einem Pool mit unendlich vielen unterschiedlichen Modellen* aufgefasst. Leider zeigte sich, dass z. B. die Jahreswerte von REMO-UBA und ECHAM5-CLM stark korreliert sind. Die Berücksichtigung derartiger Korrelationen machte die Berechnung der Konfidenzintervalle komplizierter.

Im Gegensatz zu REMO-UBA und ECHAM5-CLM waren zwischen den 10 WETTREG2010-Läufen nicht die einzelnen Jahreswerte, sondern die Mittelwerte über längere Zeiträume miteinander korreliert. Es ist daher nicht sinnvoll, alle 10 WETTREG-Läufe mit in die Mittelung einzubeziehen. Man sollte besser nur ein oder zwei dieser Läufe für die Mittelwertbildung verwenden.

4.5 Bestimmung der Obstanbaugebiete in Hessen

Um diejenigen Rasterflächen in Hessen zu identifizieren, in denen relevanter Obst- und Weinanbau betrieben wird, wurden die “CORINE Land Cover 2000 und 2006”-Daten (CLC2000 und CLC2006; [CORINE Land Cover, 2000](#) und [CORINE Land Cover, 2006](#)) vom entsprechenden Server geladen (für nicht-kommerzielle Nutzung).

Diese Daten enthalten im nationalen Erhebungsmaßstab (1:100000) insgesamt 44 Bodenbedeckungsklassen (nur 36 hiervon kommen in Deutschland vor). Die Erfassungsgrenze für flächenhafte Elemente wurde auf 25 ha festgelegt. Flächen mit linienförmiger Ausprägung wurden ab einer Breite von 100 m erfasst.

Zunächst wurden die CLC2000- und CLC2006-Daten mit Hilfe der GIS-Software ArcView[®] (der Firma ESRI) und eigenen Programmen ins netcdf-Format mit geographischen Koordinaten in 0.001° -Auflösung gebracht. Bezüglich der beiden im Projekt CHARIKO interessierenden CLC-Klassen 221 (Weinbauflächen) und 222 (Obst- und Beerenobstbestände) konnte zwischen den Daten von 2000 und 2006 kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden (auch nicht in feiner Auflösung). Die in hoher Auflösung sichtbaren sehr kleinen Unterschiede sind wohl eher auf die unterschiedlichen Bearbeitungsschritte zurückzuführen. Die folgenden Auswertungen basieren alle auf den CLC2000-Daten.

Frühere Untersuchungen mit den *internationalen* CORINE-Daten führten auf recht unbefriedigende Ergebnisse (der gesamte Schwarzwald bestand nur aus Laubwald usw.). Um zu testen, ob die neuen Daten zuverlässiger sind, wurde zunächst der Schwarzwald

für die drei Waldklassen 311, 312 und 313 geplottet. Erfreulicherweise besteht dieser nun zu großen Teilen aus Nadelwald. Laut Google-Recherche wachsen in den letzten Jahren auch verstärkt wieder Laubbäume, so dass der Mischwaldbestand im westlichen Teil des Schwarzwaldes nicht unrealistisch erscheint. Ein Vergleich der CLC-Obstklassen mit den im Projekt KliO (Chmielewski et al., 2009a) verwendeten Obstanbaugebieten zeigte, dass CORINE die meisten Obstanbaugebiete relativ gut detektiert.

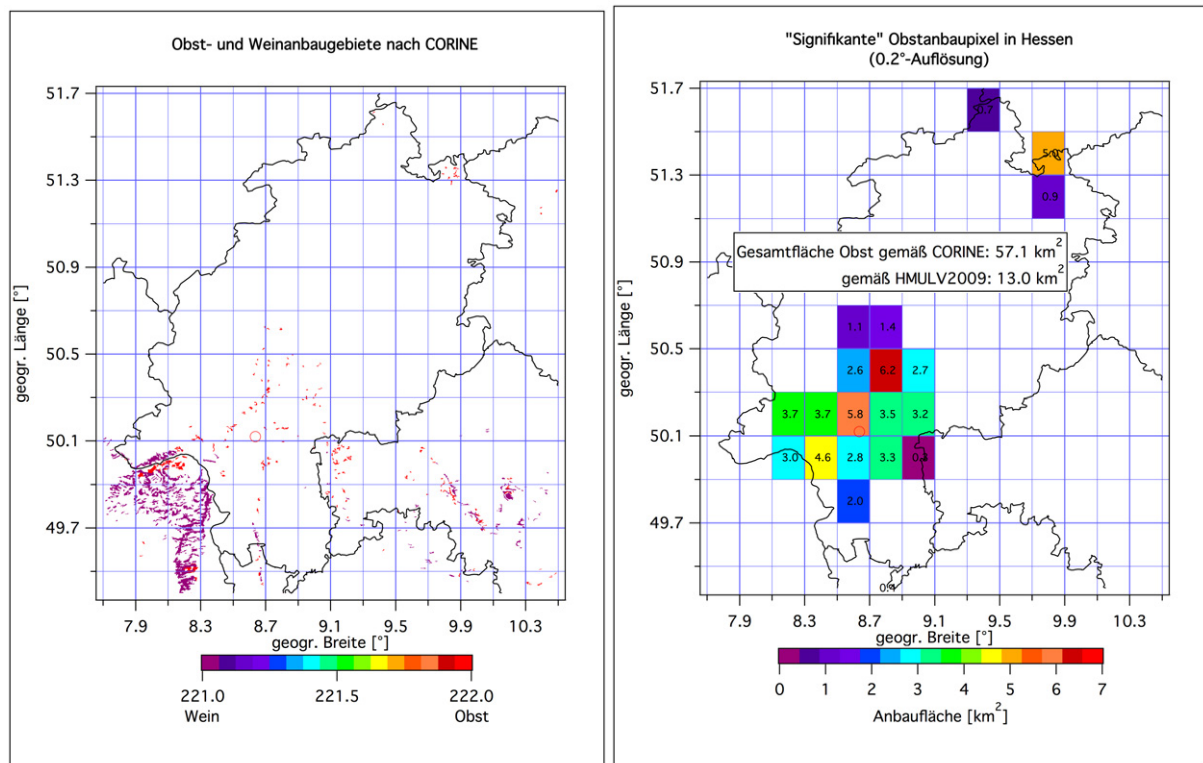


Abbildung 4.19: Obst- und Weinbaugebiete gemäß der CORINE Land Cover-Daten (links) und signifikante Obstanbaupixel (Baumobst und Beerenobstbestände) im Hessenrechteck.

Abbildung 4.19 (linkes Bild) zeigt die Obst- (rot) und Weinbaugebiete (magenta) in und um Hessen herum. Im rechten Bild sind alle INKLIM-0.2°-Rasterzellen farbig gekennzeichnet, in die mindestens ein 0.001°-Obstpixel aus CORINE fällt (Baumobst und Beeren!). Die Zahlen innerhalb der Rasterzellen und die Legende bzw. die Farbe der Rasterzellen zeigen die Summe der Flächen der 0.001°-Obstpixel, die in die jeweilige Rasterzelle fallen. Dabei wurde jedem 0.001°-Obstpixel eine Fläche von $0.111 \text{ km} \cdot 0.111 \text{ km} \cdot \cos(\varphi)$ (φ = geographische Breite) zugeordnet.

Die Gesamtanbaufläche für Obst innerhalb Hessens (politische Grenze) beträgt gemäß CORINE 57.1 km^2 . Weitere Recherchen ergaben allerdings meist kleinere Flächen, z. B. nur 13.0 km^2 [Quelle: [Jahresagrarberichte des HMUELV \(2009 - 2011\)](#)⁴⁹ und Angaben über Baumobstanbauende Betriebe ([Hessisches Statistisches Landesamt, 2011](#)): ca. 6 km^2 Baumobst und ca. 7 km^2 Beerenobst]. Worauf dieser gravierende Unterschied basiert, ist unklar. Wahrscheinlich wurden vom HMUELV nicht alle Beerenobst- und Streuobstbestände berücksichtigt, und CORINE klassifizierte viele Flächen von Betrieben als Obst, die mit anderen Kulturen bestückt waren usw. Sollten sich keine anderen, verlässlichen

⁴⁹ HMUELV = Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Quellen finden lassen, so erscheint es sinnvoll, die Obstanbauflächen, die aus CORINE bestimmt wurden, nach Abzug der Beerenobstflächen, um den Faktor 4 zu verringern.⁵⁰

Die Lage der relevanten Obstanbauggebiete wird allerdings von CORINE recht gut wiedergegeben, wie ein Vergleich mit verschiedenen anderen Angaben, z. B. der Baumobstanbauerhebung ([Hessisches Statistisches Landesamt, 2012](#)), zeigt.

Abbildung 4.20 (links) gibt die Weinbauflächen in Hessen, bezogen auf das 0.2°-INKLIM-Raster, an. Die aus CORINE berechnete Gesamtfläche stimmt recht gut mit den Angaben des HMUELV 2009-2011 überein (siehe Textbox in der Abbildung). Die Hauptweinanbauggebiete liegen im Rheingau und in der Bergstraße.

Das rechte Bild zeigt die signifikanten Erdbeer-Gitterpunkte, die unter Zuhilfenahme zusätzlicher Quellen (z. B. [Hessischer Bauernverband, 2010](#) und [Jahresagrарberichte des HMUELV, 2009 - 2011](#)) aus den CORINE-“Obst und Beeren“-Gitterpunkten ausgewählt wurden. Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen den aus den CORINE-Daten berechneten Anbauflächen und den Angaben der HMUELV gut. Die Hauptanbauggebiete liegen im Wetteraukreis, im Main-Kinzig-Kreis, im Hessischen Ried und um Kassel herum.

Die besonders wegen ihrer Direktvermarktung bekannten, allerdings relativ kleinen (ca. 0.2 km²) Erdbeeranbauggebiete bei Kriftel (50.083 °N, 8.483 °E) und im benachbarten Main-Taunus-Kreis (ca. 0.6 km²) westlich von Frankfurt am Main (in den schraffierten Gitterpunkten des rechten Bildes der **Abbildung 4.20** enthalten) wurden hier nicht gesondert berücksichtigt.

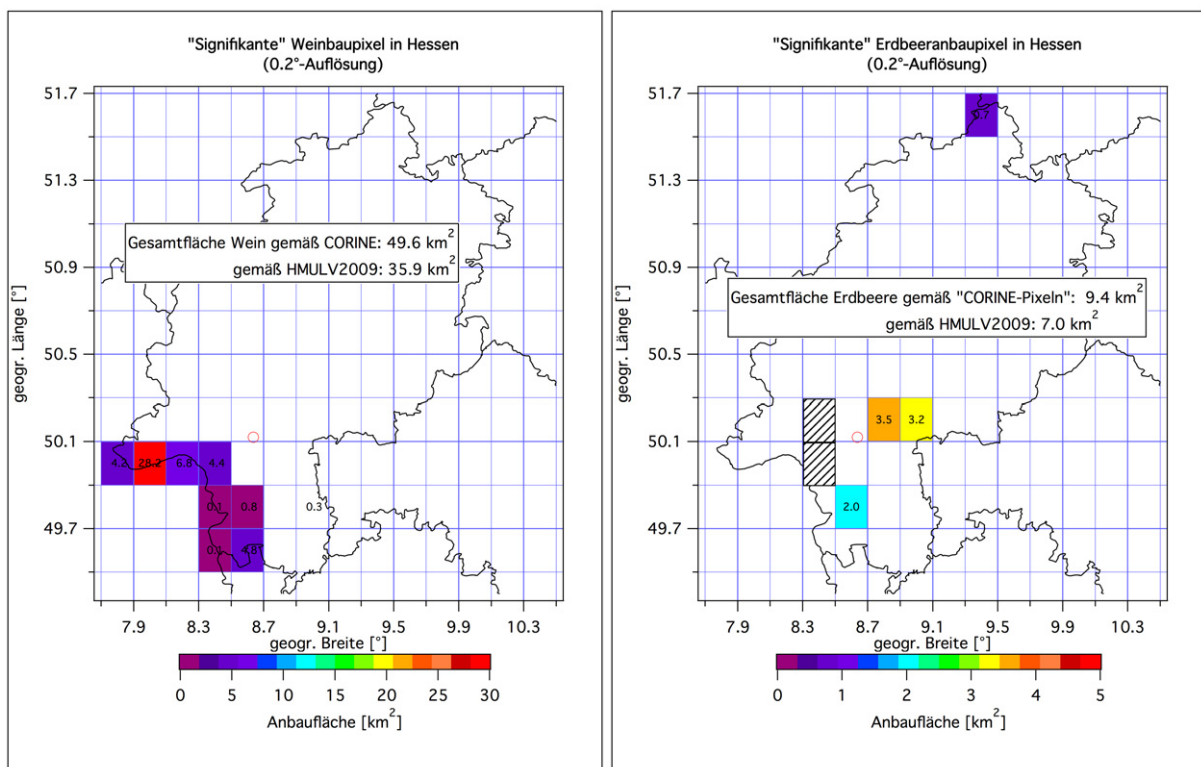


Abbildung 4.20: Signifikante Weinbaupixel (links) und Erdbeeranbaupixel (rechts) im Hessenrechteck

⁵⁰ Für die später durchgeführten Kostenrechnungen wurden aber andere, nach Obstarten differenzierte Flächenangaben verwendet (siehe Tabelle 4.26).

4.6 Verbesserungen der phänologischen Modelle

In diesem Kapitel werden zunächst einige “klassische” phänologische Modelle zur Berechnung des Blühbeginns und des Blühendes vorgestellt (Kapitel 4.6.1 und 4.6.2; ; siehe auch die Modellübersicht im Anhang A). Der Blühbeginn und das Blühende sind zur Berechnung der in Kapitel 5.4 eingeführten Frostschäden und für die Ertragsberechnungen (Kapitel 4.10) von Bedeutung.⁵¹ Danach wird an einem einfachen phänologischen Modell gezeigt, dass die herkömmlichen, in der Literatur weit verbreiteten und bisher verwendeten phänologischen Modelle systematische Defizite aufweisen, die eine verlässliche Prognose bis zum Jahr 2100 nicht zulassen (Kapitel 4.6.4). Da der Beweis hierfür vollständig neu an der HU-Berlin entwickelt wurde, muss die Herleitung etwas ausführlicher beschrieben werden, da sie sonst nicht nachvollziehbar wäre.

Danach wird in Kapitel 4.6.5 eine zusätzliche Größe (die Tageslänge) in die Modelle eingeführt. Mit ihrer Hilfe konnten die Modelle erheblich verbessert werden. Diese verbesserten Modelle werden sodann in Kapitel 4.6.6 für 9 verschiedene Fruchtarten und das Gebiet von Hessen geeicht (optimiert). Im Ergebniskapitel 5.2.1 werden schließlich Beispiele für die mit diesen Modellen berechneten Blühbeginn- und “Release of Dormancy”-Termine (“Ende der Winterruhe”) gezeigt.

4.6.1 Phänologische Modelle für den Blühbeginn der Obstgehölze

4.6.1.1 Reine Forcing-Modelle

Forcing beschreibt, sehr unscharf ausgedrückt, die Akkumulation von Wärmereizen nach der Ruhephase (Dormanz) der Pflanze. Im Gegensatz dazu stellt das sogenannte *Chilling* die Aufsummation von Kältereizen während der Dormanz dar. Sind genügend Kältestunden aufsummiert, wird die Dormanz gebrochen. Werden danach ausreichend viele Wärmereize angesammelt, blüht die Pflanze. Genauer hierzu findet man in der Diskussion bei Abbildung 4.29.

Das Spring-Warming Modell (**Modell 11a**) (Cannell & Smith, 1983) ist ein reines Forcing-Modell und ist in der originalen Version wie folgt definiert:

$$F^* = \sum_{i=t_1}^{t_2} \max(T_i - T_{BF}, 0) \Delta t \quad (4.35)$$

F^* ist die kritische Forcingsumme. Δt ist der Zeitschritt (1 d). Die Einheit von F^* ist daher K·d.⁵² Der kleinste Summationsindex t_2 , für den die Summe auf der rechten Seite den vorgegebenen, pflanzenspezifischen Wert F^* ergibt oder überschreitet, ist der Tag im Jahr, an dem der Blühbeginn eintritt. Die Summe wird über die Differenz zwischen Tagesmitteltemperatur T_i am Tag i und einer pflanzenspezifischen Basistemperatur T_{BF} ausgeführt (sofern diese Differenz Werte größer null ergibt). Der Starttag der Summation t_1 wird fest vorgegeben (z. B. der 1. Januar) oder durch Optimierung bestimmt.

Man beachte, dass die obige Form des Modells für die finalen Rechnungen nicht verwendet wurde, sondern eine verbesserte Version [Gleichung (4.45) mit (4.93) bzw. (4.94) für Wein] benutzt wurde.

⁵¹ Ein weiteres sehr wichtiges Einsatzgebiet für phänologische Modelle sind Biosphärenmodelle, die in Klimamodellen Verwendung finden. Siehe die Diskussion auf Seite 283.

⁵² Von Phänologen wird diese Einheit als GDD (growing degree days) bezeichnet. Daher wird dieser Typ von Modell auch als *GDD-Modell* bezeichnet.

4.6.1.2 Chilling-Forcing-Modelle

Wie bereits oben erwähnt wurde, ist das Spring-Warming Modell ein reines Forcing-Modell. Auch wenn man heutzutage noch davon ausgehen kann, dass das zum Brechen der Dormanz notwendige Chilling-Requirement C^* rechtzeitig bis spätestens ca. Ende Januar erreicht wird, ist das bei Prognosen bis zum 2100 nicht mehr selbstverständlich. Man sollte daher gekoppelte Chilling-Forcing-Modelle verwenden. Die Erfahrung zeigt, dass der Chilling-Anteil der Modelle realistischere Ergebnisse liefert, wenn man nicht mit Tagesmittelwerten der Temperatur (*Chilling Days*), sondern mit stündlichen Werten (*Chilling Hours*) arbeitet. Da die Temperatur im Laufe des Tages stark schwanken kann, würde man bei Nutzung einer Tagesmitteltemperatur viele Stunden mit Temperaturen, die in den für das Chilling optimalen Bereich fallen, vernachlässigen. Daher wird folgender Ansatz für die Chilling-Summe (*State of Chilling*) gemacht:

$$S_c(t) = \sum_{i=t_0}^t \sum_{h=1}^{24} R_c(T_{ih}) \quad (4.36)$$

$$S_c(t_1) \geq C^*. \quad (4.37)$$

t_1 ist die kleinste ganze Zahl, für die $S_c(t_1) \geq C^*$ gilt. Zum Zeitpunkt t_1 wird die Dormanz gebrochen bzw. ist das Chilling-Requirement erfüllt. T_{ih} ist die 2 m-Lufttemperatur am Tag i zur Stunde h . Da keine BIAS-korrigierten Stundenwerte von T aus den dynamischen Modellen und keine Stundenwerte aus WETTREG vorliegen, wurden die stündlichen Temperaturen mit der Methode von [Linsley-Noakes et al. \(1995\)](#) (siehe auch [Linville, 1990](#)⁵³) als Funktion des Sonnenauf- und Sonnenuntergangs über einen Sinus-Log-Ansatz aus der Tagesminimum- und Tagesmaximumtemperatur berechnet:

$$T_{ih} = (Tx_i - Tn_i) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t_a}{DL_i + 4}\right) + Tn_i. \quad (4.38)$$

Tx_i und Tn_i sind hier die Maximum- und Minimumtemperatur am Tag i , DL_i ist die Tageslänge in Stunden (von Sonnenaufgang bis -untergang) und t_a ist die Zeit in Stunden (≥ 0), gezählt ab dem Sonnenaufgang. Die Formel wird für alle Zeiten zwischen Sonnenaufgang und -untergang verwendet. Für Zeiten zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang verwendet man

$$T_{ih} = T_{ss} - \frac{T_{ss} - Tn_{i+1}}{\ln(24 - DL_i)} \cdot \ln(t_b). \quad (4.39)$$

T_{ss} ist die Temperatur zum Sonnenuntergang, sowie sie aus Gleichung (4.38) bestimmt wurde, und Tn_{i+1} ist die Minimumtemperatur des Folgetages $i + 1$. Die Zeit t_b gibt die Zeit in Stunden nach dem Sonnenuntergang plus 1 h (eine Stunde) an ($t_b \geq 1$).

C^* ist wie F^* eine pflanzenspezifische Konstante (das Kältebedürfnis bzw. Chilling-Requirement) und $R_c(T)$ ist eine feste, vorzugebende Funktion (siehe unten). Für t_0 , den Starttag der Chillingakkumulation, wird der feste Wert 244 (DOY⁵⁴; 1. September) verwendet.

⁵³ In seiner Gleichung (2) ist "in" durch "ln" zu ersetzen! Die Methode wurde an der HU-Berlin noch verbessert, indem in seiner Gleichung (2) wie in Formel (4.39) für T_{min} die Minimumtemperatur des Folgetages anstelle die des aktuellen Tages verwendet wurde. Die Auswirkungen auf die Chilling-Modelle sind allerdings im Mittel gering.

⁵⁴ Day Of Year = fortlaufend nummerierter Tag im Jahr (1...365).

An der HU-Berlin wurden drei verschiedene Ansätze (siehe unten) für die Chillingfunktion $R_c(T)$ verwendet. Der zweite und dritte Ansatz liefert im Gegensatz zu vielen anderen, meist älteren Ansätzen (wie z. B. dem ersten Ansatz) auch in wärmeren Klimazonen gute Resultate (vgl. z. B. [Luedeling et al., 2009](#)):

4.6.1.2.1 Das “32-45 °F Model” oder “Chilling Hours Model” (Weinberger-Eggert Methode; siehe [Weinberger, 1950](#) und [Eggert, 1951](#)) (Modell 1b):

$$R_c(T_{ih}) = \begin{cases} 1 \text{ CH für } 0^\circ\text{C} < T_{ih} < 7.2^\circ\text{C} \\ 0 \text{ CH für } T_{ih} \leq 0^\circ\text{C} \text{ oder } T_{ih} \geq 7.2^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.40)$$

CH ist die Abkürzung für *Chilling Hours*. Im folgenden wird auch die Abkürzung CD (*Chilling Days*) verwendet. Es gilt: 24 CH = 1 CD.

4.6.1.2.2 Das Positive Utah Model ([Linsley-Noakes et al., 1995](#)) (Modell 1f):

$$R_c(T_{ih}) = \begin{cases} 0.0 \text{ CU für } T_{ih} < 1.5^\circ\text{C} \\ 0.5 \text{ CU für } 1.5^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 2.5^\circ\text{C} \\ 1.0 \text{ CU für } 2.5^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 9.2^\circ\text{C} \\ 0.5 \text{ CU für } 9.2^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 12.5^\circ\text{C} \\ 0.0 \text{ CU für } T_{ih} \geq 12.5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.41)$$

CU ist die Abkürzung für *Chilling Units*, in denen die Chilling Einheiten dieses Modells gemessen werden.

4.6.1.2.3 Das Dynamic Model ([Fishman et al., 1987](#)) (Modell 1g):

Dem dynamischen Modell liegt eine andere Berechnungsmethode als Gleichung (4.36) zugrunde:

$$\text{Falls } (x(t) \geq 1), \text{ dann } \begin{cases} \text{delt} = x(t) \cdot P_t \\ CP \stackrel{\leftarrow}{=} CP + \text{delt} \\ x(t) \stackrel{\leftarrow}{=} x(t) - \text{delt} \end{cases} \quad (4.42)$$

wobei

$$x(t) = x_s - (x_s - x(t-1)) \cdot \exp(-k_1) . \quad (4.43)$$

k_1 , x_s und P_t sind feste Funktionen der Lufttemperatur T_{ih} und hängen darüber hinaus noch von den 6 folgenden Konstanten ab:

$$\begin{aligned} A_0 &= 139500 \text{ h}^{-1} \text{ (rate coefficients)} \\ A_1 &= 2.567 \cdot 10^{18} \text{ h}^{-1} \\ E_0 &= 4153.5 \text{ K (energies of activation)} \\ E_1 &= 12888.8 \text{ K} \\ c &= 1.6 \text{ K}^{-1} \\ d &= 277 \text{ K} \end{aligned} \quad (4.44)$$

Gestartet wird das Modell mit $x(t = 1) = 0$ und $CP = 0$. Die Zeit t wird jede Stunde um eins erhöht. Wenn CP größer als C^* wird, wird die Dormanz gebrochen.

Die Chilling-Menge wird bei diesem Modell in CP (*Chilling Portions*) gemessen. Dieses Modell unterscheidet sich von den beiden anderen Modellen dadurch, dass akkumulierte Chillingmengen durch warme Temperaturen auch wieder vernichtet werden können. Hierbei wird aber auch die Andauer warmer Witterungsabschnitte berücksichtigt. Z. B. kann die Chilling-Akkumulation durch warme Temperaturen nicht nur verringert, sondern durch kurz andauernde Warmphasen sogar beschleunigt werden. — Erst nach längerem Einwirken von kühlen Temperaturen wird eine bestimmte, neu akkumulierte Chillingmenge als Chilling-Portion irreversibel festgeschrieben. Eine ganz grobe Umrechnungsformel zwischen CH und CP , die nur im Mittel und nur für Hessen (bzw. Deutschland) gilt, lautet: $1 CP \approx 18 CH$.

Jeweils eines der Chilling Modelle 1b, 1f und 1g kann mit einem Forcing Modell gekoppelt werden. Im Folgenden wird die Koppelung mit dem bereits in Kapitel 4.6.1 erwähnten Spring-Warming Modell [Modell 11a, Gleichung (4.35)] verwendet. Das **Modell 11a** sei hier noch einmal in anderer Form aufgeschrieben:

$$S_f(t) = \sum_{i=t_1}^t R_f(T_i) \Delta t, \quad \text{wobei } S_f(t_2) := F^* \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} R_f(T_i) &= 0, & \text{wenn } T_i \leq T_{BF} \\ R_f(T_i) &= T_i - T_{BF}, & \text{wenn } T_i > T_{BF} \end{aligned} \quad (4.46)$$

T_i ist im Gegensatz zu T_{ih} nun die Tagesmitteltemperatur. Beim Forcing werden also Tagesmitteltemperaturen verwendet, beim Chilling aber stündliche Werte der Temperatur! Das resultierende Chilling-Forcing-Modell, welches über die Gleichungen (4.36), (4.37), (4.45) und (4.46) definiert wird, wird im Folgenden als **Modell 29xa** bezeichnet [$x \in \{b, f, g\}$]. Wird (4.40) (Weinberger-Eggert-Ansatz) als Chilling-Funktion benutzt, so heißt das Modell **Modell 29ba**. Bei Verwendung von (4.41) (Positive Utah Model) wird es als **Modell 29fa** bezeichnet, und wenn (4.42)-(4.44) (Dynamic Model) verwendet wird, wird es **Modell 29ga** genannt. Eine Zusammenstellung der Modelle und ihrer Parameter findet man in **Tabelle A.1** im **Anhang A**.

Die zu bestimmenden Modellparameter [C^* , F^* und T_{BF} ; später auch noch EXPO und ggf. EXPO2 (siehe Kap. 4.6.5)] werden so bestimmt, dass der RMSE zwischen modellierten und beobachteten Werten des Blühbeginns t_2 minimal wird: t_1 folgt aus (4.36) und (4.37). Diesen Wert von t_1 setzt man nun in (4.45) ein. Dann kann man aus (4.45) und (4.46) t_2 berechnen. Die Parameterwerte werden solange variiert, bis der kleinste Wert des RMSE gefunden wurde. Hierbei wird die Methode “*Simulated Annealing*” verwendet [siehe Kap. 4.8.2 in [Chmielewski et al. \(2009a\)](#)].⁵⁵ Zur Parameteroptimierung werden nur die geraden Jahre bzw. nur jeder zweite Winter/Frühling verwendet (odd-even-Methode). Mit den nicht benutzten Jahren kann dann eine unabhängige Validierung (Verifikation⁵⁶) durchgeführt werden. Der minimale RMSE, der sich bei der Optimierung ergibt, wird im Folgenden als RMSE-OPT bezeichnet, der in der Verifikation berechnete als RMSE-VER.

⁵⁵ Genaueres hierzu findet man auch in dieser Arbeit in Kapitel 4.6.6.

⁵⁶ Der Begriff *Verifikation* wird in dieser Arbeit immer gleichbedeutend mit *Validierung* verwendet! Gemeint ist immer die Überprüfung eines Modells mit von der Optimierung (Eichung) des Modells unabhängigen Inputdaten.

In Luedeling et al. (2012) wird eine alternative Methode (*Partial Least Square Regression* des Blühbeginns mit den 365 Tagesmitteltemperaturen eines Jahres) beschrieben, mit deren Hilfe man angeblich den unbekannt Parameter C^* (bzw. ein mittleres t_1) quasi direkt aus dem sogenannten VIP (**v**ariable-**i**mportance-in-the-**p**rojection) bestimmen kann. Leider zeigten Rechnungen mit *Monte Carlo*-Methoden (*Bootstrapping*), dass diese Methode in Hessen für die hier betrachteten Obstarten keine sinnvollen Ergebnisse liefert, da das gesuchte Signal *im Rauschen untergeht*.

Verwendet man (4.45) und (4.46) als reines Forcing-Modell ohne gekoppeltes Chilling-Modell, indem man den Startzeitpunkt des Forcing t_1 nicht mit dem Chilling-Modell berechnet und auch nicht wie bei Modell 11a fest vorgibt, sondern als Parameter auffasst, der optimiert werden muss, so wird dieses Modell an der HU-Berlin als **Modell 12a** bezeichnet.

4.6.2 Phänologische Modelle für das Blühende der Obstgehölze

Der genaue Termin des Blühendes ist z. B. für die Berechnung von Frostschäden (siehe Kapitel 4.8) von Bedeutung. Dieser Termin kann ebenfalls mit dem Spring Warming Modell nach Gleichung (4.45) und (4.46) berechnet werden. Nur bezeichnet nun t_1 nicht den Beginn der Forcing-Phase bzw. das Ende der Dormanz, sondern den Blühbeginn, und t_2 steht nun für den gesuchten Termin des Blühendes.⁵⁷ Auf Grund dieser Umdefinitionen erhielt dieses Modell innerhalb der Phänomodell-Hierarchie an der HU-Berlin eine eigene Modellnummer (**Modell 10a**). t_1 wird aus zuvor durchgeführten Modellrechnungen für den Blühbeginn oder aus Beobachtungen vorgegeben. Eine “Rasteroptimierung” über die 81 Gitterpunkte in 0.2°-Auflösung für Hessen (für andere Fruchtarten siehe auch **Tabelle 4.14** in Kapitel 4.6.6) ergab folgende optimale Parameterwerte für das Blühende des Apfels: $F^* = 232$ GDD; $T_{BF} = -5.9$ °C. Der sehr kleine und physiologisch unrealistische Temperaturschwellenwert T_{BF} deutet darauf hin, dass das Modell versucht, relativ konstante Werte für die Länge der Blühphase $t_2 - t_1$ zu erzeugen. So zeigte sich auch, dass der RMSE des “Null-Modells” ($t_2 - t_1 = \text{const.}$) bei der Verifikation nur um ca. 0.3 d größer (im Süden um ca. 1 d größer) als der von Modell 10a war. Man könnte denken, dass der negative Wert von T_{BF} sinnlos ist, da Temperaturen kleiner als der oben angegebene Wert nach dem Blühbeginn nur ganz selten auftreten. Wie aber in Kapitel 4.6.3 und 4.6.4 gezeigt wird, führen kleine Werte von T_{BF} dazu, dass die Verfrühung des Blühendes⁵⁸, bezogen auf den Blühbeginn-Termin, mit ansteigenden Temperaturen weniger stark ausfällt [vgl. Formel (4.71) und (4.69) sowie (4.90) und Abbildung 4.28] als für große T_{BF} . T_{BF} dient hier in erster Linie als Eichkonstante und hat keine besondere physiologische Bedeutung.

Abbildung 4.21 (linkes Bild) zeigt die beobachteten Termine des Blühbeginns (rot) und des Blühendes (blau) sowie das mit Modell 10a berechnete Blühende (schwarz) beim frühreifen Apfel (Mittelwert über alle 81 Gitterpunkte in Hessen). Das rechte Bild zeigt die zeitlichen Mittelwerte (1962-2009) der Zeitspanne von Blühbeginn bis Blühende beim Apfel, die aus beobachteten Werten des Blühbeginns und Blühendes berechnet wurden. Die Blühphase innerhalb Hessens dauert im Mittel zwischen 11 und 16 Tagen. Die in

⁵⁷ Zunächst wurde ohne DAYLENGTH-Term (DL=0) (siehe Kap. 4.6.5) gerechnet. Andere Forcing-Funktionen $R_f(T)$ als (4.46) (Typ b = logistische Funktion) ergaben etwas schlechtere Vorhersagen.

⁵⁸ Achtung: In Kap. 4.6.4 wird mit dem Spring Warming Modell der Termin des Blühbeginns berechnet, hier aber der Termin des Blühendes!

diesem Bild gezeigte, relativ große räumliche Variabilität der zeitlichen Mittelwerte der Blühdauer wird von Modell 10a nicht ausreichend simuliert. Die räumlichen Schwankungen der Blühdauer sind merklich geringer (nur zwischen 13 und 14 Tagen), wenn man das Blühende mit Modell 10a berechnet und den Blühbeginn aus Beobachtungen verwendet. Entweder spielen für die Blühdauer neben der Temperatur noch weitere Faktoren eine Rolle. Oder die beobachteten Blühende-Termine passen auf Grund fehlerhafter bzw. inkonsistenter Beobachtungen (und z. T. auch wegen der erfolgten Rasterung) nicht zu den Blühbeginn-Terminen. Tatsächlich streuen die beobachteten Werte innerhalb kurzer Distanzen sehr stark. Bei den Ausreißertests wurden auch viele widersprüchliche Beobachtungen entdeckt. Klar erkennbare Fehler wurden zwar entfernt, jedoch konnten sicherlich nicht alle "Fehlmessungen" vollständig beseitigt werden. Glücklicherweise stimmt die Blühdauer aus Beobachtungen und Modellierung im zeitlichen und räumlichen Mittelwert sehr gut überein.

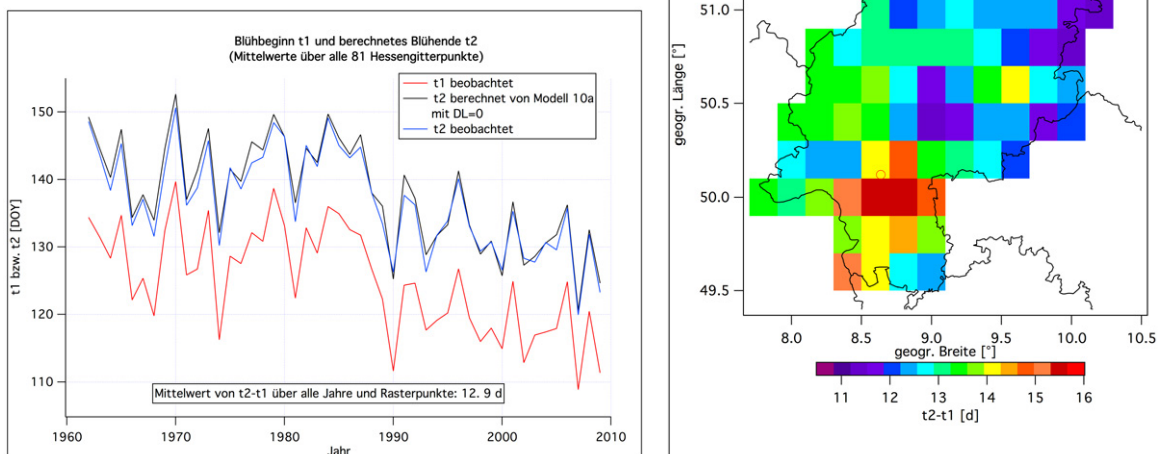


Abbildung 4.21: Links: Beobachteter Blühbeginn und Blühende sowie berechnetes Blühende beim frühreifen Apfel (Mittelwert über alle 81 Gitterpunkte in Hessen); rechts: Zeitlicher Mittelwert (1962-2009) der Zeitspanne von Blühbeginn bis Blühende, berechnet aus beobachteten Werten.

4.6.3 Phänologische Modelle für den Beginn der Pflückreife für Obstgehölze

Die Modellierung des Termins der Pflückreife ist einerseits wichtig, um die Länge der Reifeperiode (hier definiert als Zeitspanne zwischen Beginn der Blüte und Beginn der Pflückreife) berechnen zu können. Diese Reifeperiodenlänge ist für den Obstertrag wichtig. Andererseits muss die im Bodenwasser- und Ertragsmodell *SIMWASER* enthaltene Phänologie für Obstbäume, die bisher nur sehr unvollkommen implementiert war, durch realistische Modelle für Blühbeginn und Reifetermin ersetzt werden.

Um den Beginn der Pflückreife zu berechnen, wird häufig ein Temperatursummenmodell

folgender Form [vgl. Gleichung (4.35)] verwendet:

$$F^* = \sum_{i=t_2(j)}^{t_3} \max(T_i - T_{BF}, 0) \Delta t. \quad (4.47)$$

Dieses Modell entspricht dem Modell 10a zur Berechnung des Blühendes (Kapitel 4.6.2), nur wird hier ein entsprechend angepasstes F^* und T_{BF} verwendet, so dass t_3 dem Termin des Beginns der Pflückreife entspricht. $t_2(j)$ ist der beobachtete oder berechnete Blühbeginn im Jahr j , der von Jahr zu Jahr variieren kann.

Versuche zeigten, dass dieses Modell für die spätreifenden Sorten sehr schlechte Ergebnisse liefert, vor allem dann, wenn man fordert, dass der Temperaturschwellenwert T_{BF} positive Werte annehmen soll. Das erkennt man z. B. in **Abbildung 4.22** an der grünen Kurve. Diese stellt die Modellwerte des am Gitterpunkt 136 optimierten Modells

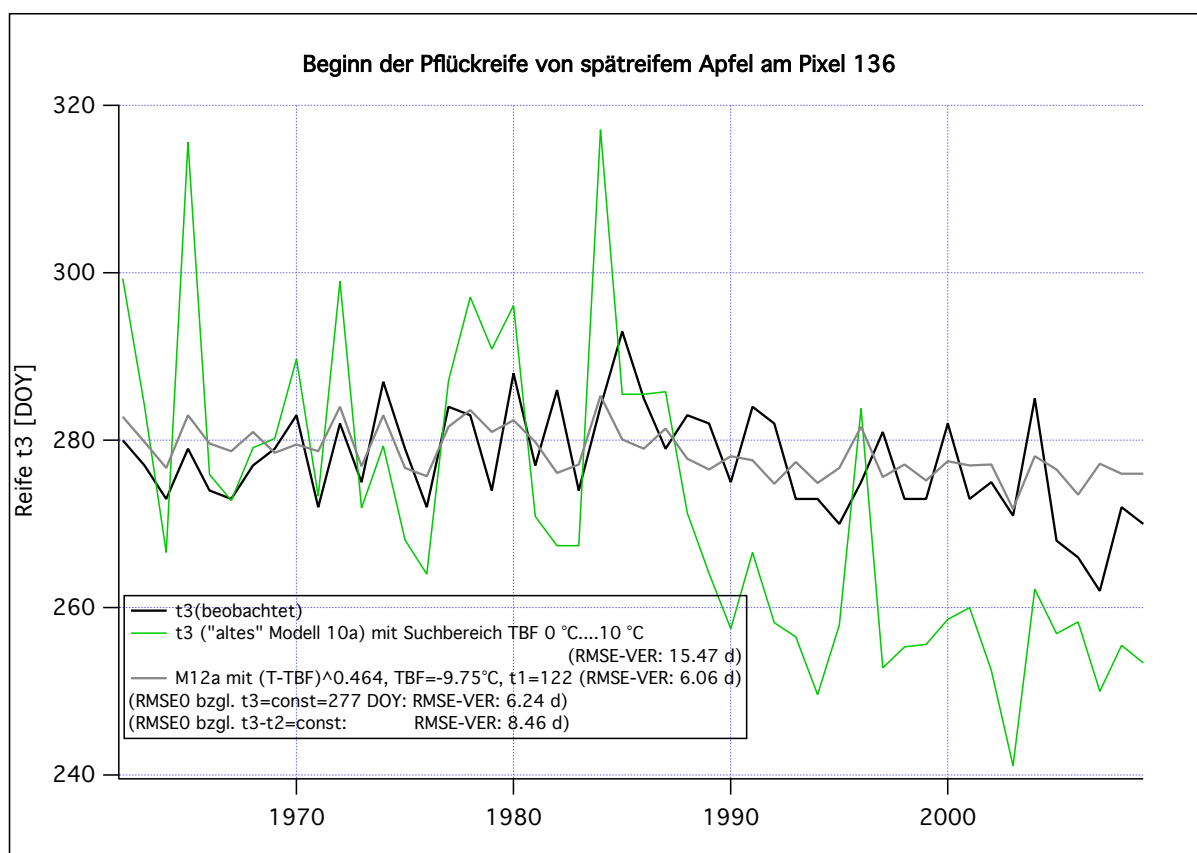


Abbildung 4.22: Beginn der Pflückreife t_3 von spätreifem Apfel am Gitterpunkt 136. Beobachtung, altes Modell 10a und Modell 12a-R mit Angaben zum RMSE bei der Validierung (RMSE-VER) sowie RMSE der beiden möglichen *Nullmodelle* (=RMSE0).

gemäß Gleichung (4.47) dar, wobei der Suchbereich von T_{BF} bei der Optimierung auf 0 °C bis 10 °C eingegrenzt wurde. Der Trend des Verlaufs ist viel zu steil und die Amplituden sind, verglichen mit den regionalisierten beobachteten Werten (schwarze Kurve), viel zu groß. Erst wenn man in die Modellgleichung einen Exponenten $EXPO3$ einführt [Gleichung (4.48)], der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann und der bei der Modellgleichung mit optimiert werden muss, und man negative T_{BF} zulässt⁵⁹, erhält man einen

⁵⁹ Das Problem mit den negativen T_{BF} wurde bereits in Abschnitt 4.6.2 angesprochen und betrifft auch

realistischeren Verlauf:

$$F^* = \sum_{i=t_2(j)}^{t_3} \max(T_i - T_{BF}, 0.001)^{EXPO3} \Delta t. \quad (4.48)$$

Das Modell gemäß Formel (4.48) wird im Folgenden **Modell 10a-R** genannt (Zusatz “-R” für **R**eifemodus). Der Jahresindex j wurde hier bei T_i und t_3 zur Vereinfachung der Schreibweise weggelassen. Δt ist der Zeitschritt (1 Tag=1 d).

Leider ist der Verlauf für die spätreifenden Sorten immer noch nicht befriedigend. Wie **Abbildung 4.23** zeigt, sind der Blühbeginn t_2 (blaue Kurve) und die Länge der Reifeperiode ($t_3 - t_2$) (rote Kurve) beim spätreifen Apfel negativ korreliert. Der Reifetermin selbst (grün gepunktete Kurve) ist fast nicht mit dem Blühbeginn korreliert. Modellrechnungen

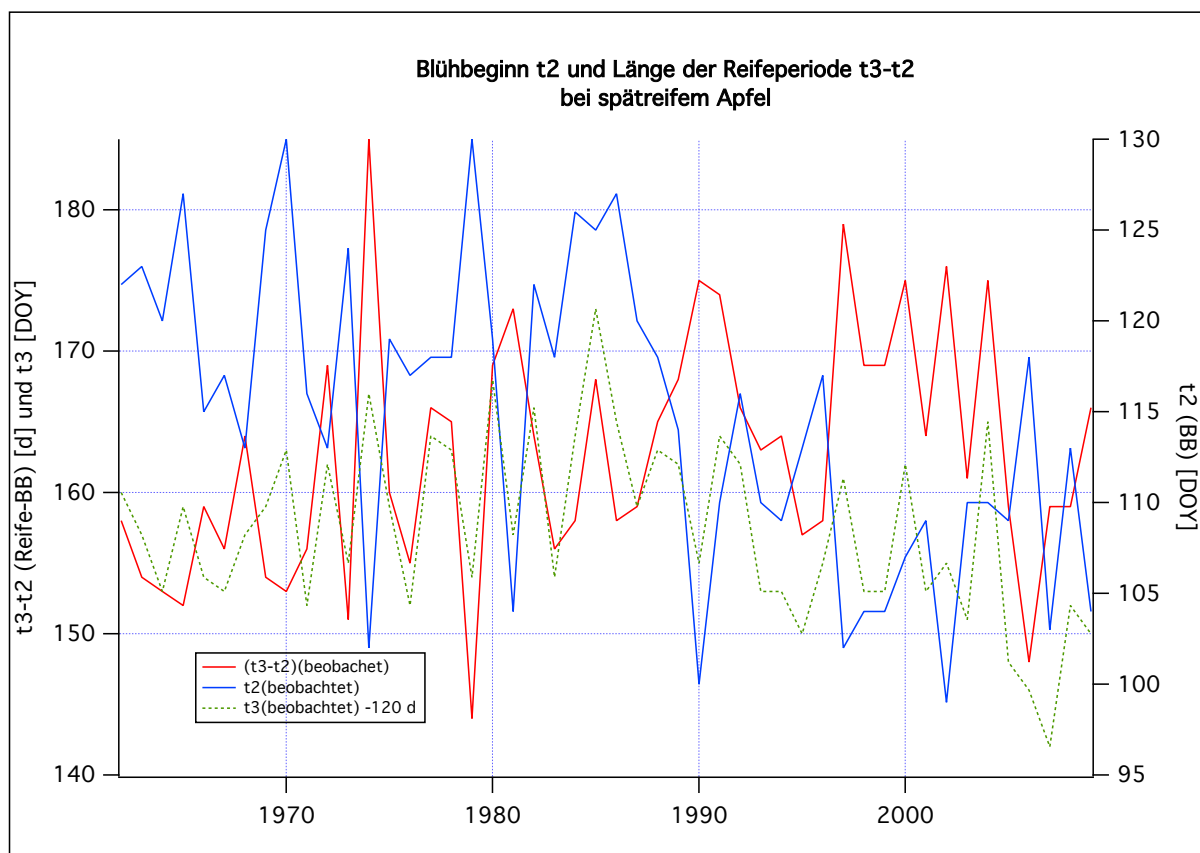


Abbildung 4.23: Blühbeginn t_2 , Beginn der Pflückreife t_3 und Länge der Reifeperiode ($t_3 - t_2$) (zur besseren Vergleichbarkeit wurden 120 Tage abgezogen) bei spätreifem Apfel am Gitterpunkt 136 bei Frankfurt am Main. Regionalisierte Beobachtungswerte.

zeigten, dass für die spätreifenden Sorten das **Modell 12a-R** wesentlich kleinere Fehler und damit bessere Ergebnisse liefert:

$$F^* = \sum_{i=t_1}^{t_3} \max(T_i - T_{BF}, 0.001)^{EXPO3} \Delta t. \quad (4.49)$$

Der Unterschied zu Modell 10a-R liegt darin, dass hier die Summation nicht zum jährlich variierenden Blühbeginn startet, sondern zu einem festen Starttermin t_1 , der konstant

die herkömmlichen Modelle für den Blühbeginn (siehe Kapitel 4.6.4).

ist und der bei der Modelleichung mit optimiert werden muss. Mit diesem Modell erhält man die graue Kurve in Abbildung 4.22, die relativ gut mit den “beobachteten” Werten übereinstimmt.

Um die Eigenschaften des Modells 10a-R (und auch des Modells 12a-R; siehe unten) genauer untersuchen zu können, wird ähnlich wie später auch in Kapitel 4.6.4 [Gleichung (4.75)] ein “glatter” Temperaturverlauf $T(t_i, j)$ ($t_i =$ Tag i im Jahr, $j =$ Jahr) angenommen:

$$T_i := T(t_i, j) = a \cdot t_i + (b_j - \bar{b}) + \bar{b} \quad (4.50)$$

Der Anstieg a der Temperatur mit den Tagen t_i soll hier gegenüber dem zweiten Term vernachlässigt werden. b_j ist die Mitteltemperatur während der Reifeperiode (hier definiert als Zeitraum von Blühbeginn bis Beginn der Pflückreife), und \bar{b} ist z. B. der 30-jährige Mittelwert dieser Mitteltemperatur (oder der Erwartungswert dieser Temperatur). Wenn man $a = 0$ setzt, erhält man anstelle von (4.50):

$$T_i := T(t_i, j) = \Delta b + \bar{b} \text{ mit } \Delta b := b_j - \bar{b}. \quad (4.51)$$

Wenn man annimmt, dass T_i in Gleichung (4.48) wesentlich größer als T_{BF} ist, was auch Optimierungen dieser Gleichung bestätigen⁶¹, kann man die max-Funktion in dieser Gleichung weglassen. Wenn man noch (4.51) in (4.48) einsetzt, erhält man:

$$F^* = \sum_{i=t_2}^{t_3} (\Delta b_j + (\bar{b} - T_{BF}))^{EXPO3} = (\bar{b} - T_{BF})^{EXPO3} \sum_{i=t_2}^{t_3} \left(1 + \frac{\Delta b_j}{\bar{b} - T_{BF}}\right)^{EXPO3}. \quad (4.52)$$

Der Zeitschritt Δt wurde hier und in den folgenden Gleichungen weggelassen, um die Schreibweise zu vereinfachen. Die Summationsgrenzen t_2 und t_3 (und auch t_1 bei Modell 12a-R; siehe z. B. Seite 71) müssen natürlich weiterhin in Tagen angegeben werden! Da der Term hinter der Summe nicht von i abhängt, kann man für (4.52) auch schreiben:

$$F^* = (\bar{b} - T_{BF})^{EXPO3} \left(1 + \frac{\Delta b_j}{\bar{b} - T_{BF}}\right)^{EXPO3} (t_3 - t_2 + 1). \quad (4.53)$$

Vernachlässigt man die “+1” in der letzten Klammer und löst die Gleichung nach $(t_3 - t_2)$ auf, ergibt sich für die Länge der Reifeperiode $(t_3 - t_2)$:

$$(t_3 - t_2) \approx \frac{F^*}{(\bar{b} - T_{BF})^{EXPO3} \left(1 + \frac{\Delta b_j}{\bar{b} - T_{BF}}\right)^{EXPO3}}. \quad (4.54)$$

Falls die jährlichen Schwankungen Δb_j der Sommermitteltemperatur b_j um ihren langjährigen Mittelwert \bar{b} klein gegenüber $\bar{b} - T_{BF}$ sind bzw. T_{BF} wesentlich kleiner als \bar{b} ist, wenn also

$$\frac{\Delta b_j}{\bar{b} - T_{BF}} \ll 1 \quad (4.55)$$

⁶⁰ “:=” bedeutet, dass die linke Seite durch die rechte Seite definiert wird; “=” bedeutet, dass die rechte Seite durch die linke Seite definiert wird!

⁶¹ Vor allem bei Modell 12a-R!

gilt, dann kann man den rechten Klammerausdruck in (4.54) gut durch eine Taylor-Entwicklung bis zum Term 1. Ordnung approximieren und erhält

$$(t_3 - t_2) \approx \frac{F^*}{(\bar{b} - T_{BF})^{EXPO3}} \left(1 - EXPO3 \cdot \frac{\Delta b_j}{\bar{b} - T_{BF}} \right). \quad (4.56)$$

Durch Mittelwertbildung auf beiden Seiten (über z. B. 30 Jahre) von Gleichung 4.56 bzw. Bildung des Erwartungswerts $E[\dots]$ erhält man wegen $\overline{\Delta b_j} = 0$ bzw. $E[\Delta b_j] = 0$

$$E[(t_3 - t_2)] \approx \overline{(t_3 - t_2)} \approx \frac{F^*}{(\bar{b} - T_{BF})^{EXPO3}}. \quad (4.57)$$

Bildet man nun die Differenz von (4.56) und (4.57), quadriert diesen Ausdruck, bildet den Erwartungswert und zieht dann wieder die zweite Wurzel, so erhält man die (exakte) Standardabweichung (=Wurzel aus der Varianz) $\sigma(t_3 - t_2)$ von $(t_3 - t_2)$:

$$\sigma(t_3 - t_2) \approx \frac{EXPO3 \cdot F^*}{(\bar{b} - T_{BF})^{EXPO3+1}} \sigma(b_j) \approx \overline{(t_3 - t_2)} \frac{EXPO3}{(\bar{b} - T_{BF})} \sigma(b_j). \quad (4.58)$$

$\sigma(b_j)$ ist dabei die Standardabweichung von b_j : $\sigma(b_j) = \sqrt{E[(\Delta b_j)^2]}$. Das zweite Ungefährzeichen ergibt sich, wenn man (4.57) beachtet. Bildet man in (4.56) noch die Ableitung von $(t_3 - t_2)$ nach b_j , so erhält man für den “Trend der Länge der Reifeperiode” mit der Sommermitteltemperatur b_j folgenden Ausdruck:

$$\frac{\partial(t_3 - t_2)}{\partial b_j} \approx - \frac{EXPO3 \cdot F^*}{(\bar{b} - T_{BF})^{EXPO3+1}}. \quad (4.59)$$

Ein Vergleich von (4.58) und (4.59) zeigt, dass sich die Standardabweichung und der Trend von $(t_3 - t_2)$ nur um den Faktor $\sigma(\Delta b_j)$ unterscheiden. Das ist aber bei linearisierten Gleichungen immer der Fall.

Ein kleines Zahlenbeispiel zeigt, dass das *alte* Modell 10a (mit $EXPO3 = 1$) für die Berechnung des Beginns der Pflückreife beim spätreifenden Apfel völlig ungeeignet ist, wenn man z. B. $T_{BF} = 0$ °C wählte (oder den Suchbereich auf scheinbar physiologisch sinnvolle $T_{BF} > 0$ °C beschränkt): Nimmt man für die mittlere Reifeperiodenlänge $(t_3 - t_2)$ einen Wert von 160 Tagen an (siehe Tabelle F.2), wählt für $\bar{b} - T_{BF} = 15$ K (das entspricht bei $T_{BF} = 0$ °C einer langjährig gemittelten Sommermitteltemperatur \bar{b} von 15 °C) und setzt für die Standardabweichung der Sommermitteltemperatur $\sigma(b_j) = 3$ K an, so erhält man aus (4.57) für F^* den Wert 2400 K d. Aus Formel (4.58) folgt dann $\sigma(t_3 - t_2) = 32$ d, und aus (4.59) ergibt sich ein Trend von -11 d/K. Bei einem mittleren Temperaturanstieg in den nächsten 100 Jahren von ca. 4 K bedeutet das eine Verkürzung der Reifeperiode um -44 Tage. Die tatsächlich beobachteten Werte für die Varianz und den Trend sind aber (betragsmäßig) wesentlich kleiner [siehe die Bemerkungen am Anfang von Anhang E und die Tabellen im Anhang F. Achtung: Man muss das Konfidenzintervall der 30-jährigen Mittelwerte, welches dort angegeben ist, von der Standardabweichung der jährlichen Werte unterscheiden! Die Standardabweichung der Jahreswerte ist um ca. den Faktor 2.7 größer als die in der Tabelle F.2 angegebenen Konfidenzintervalle!]. Die beobachteten Standardabweichungen der Reifeperiodenlänge betragen nur ca. 5 bis 6 Tage (gegenüber den 32

Tagen, die das alte Modell 10a berechnet). Die Länge der Reifeperiode verkürzt sich im verbesserten Modell nur um einige Tage oder nimmt sogar zu (Anhang F).

Erst die Einführung von $EXPO3$ erlaubt es, den viel zu negativen Trend abzuschwächen [siehe Gleichung (4.59)].⁶² Im Extremfall, bei $EXPO3 = 0$, wird die Reifeperiodenlänge in Modell 10a-R konstant und für den Beginn t_3 der Pflückreife gilt dann $t_3 = t_2(j) + const.$ In Modell 12a-R ergibt sich in diesem Fall ein konstanter Wert für den Beginn t_3 der Pflückreife, d. h. $t_3 = const.$

Eine genaue Inspektion der Formeln (4.57) für den Erwartungswert, (4.58) für die Standardabweichung und (4.59) für den Trend der Reifeperiodenlänge zeigt, dass die 3 Modellparameter F^* , T_{BF} und $EXPO3$ eigentlich nur 2 unabhängige Parameter darstellen. Denn die Gleichungen lassen sich auch als

$$E[(t_3 - t_2)] \approx A, \quad (4.60)$$

$$\sigma(t_3 - t_2) \approx A \cdot B \cdot \sigma(b_j), \quad (4.61)$$

und

$$\frac{\partial(t_3 - t_2)}{\partial b_j} \approx -A \cdot B \quad (4.62)$$

schreiben. Dabei sind A und B als

$$A := \frac{F^*}{(\bar{b} - T_{BF})^{EXPO3}} \quad (4.63)$$

und

$$B := \frac{EXPO3}{(\bar{b} - T_{BF})}. \quad (4.64)$$

definiert. Gleichung (4.56) lässt sich mit diesen Abkürzungen als

$$(t_3 - t_2) \approx A - A \cdot B \cdot \Delta b_j \quad (4.65)$$

schreiben. Diese linearisierte Form entspricht im Prinzip einer einfachen linearen Regression für die Reifeperiodenlänge als Funktion der Sommermitteltemperatur b_j , nur dass hier der Offset $A + A \cdot B \cdot \bar{b}$ [siehe die Definition von Δb in Gleichung (4.51)] und die Regressionssteigung $A \cdot B$ aus den Modellparametern F^* , $EXPO3$ und T_{BF} berechnet werden.

Im *alten* Modell 10a war $EXPO3 = 1$. Legt man nun noch zusätzlich den Wert von T_{BF} fest, so ist B bereits festgelegt und A kann nur noch durch Variation von F^* verändert werden. In diesem Fall legt der Erwartungswert von $(t_3 - t_2)$ bereits auch die Varianz und den Trend fest. (\bar{b} und $\sigma(b_j)$ sind durch das Klima vorgegeben und keine Modellparameter!) Um den Trend unabhängig vom Erwartungswert anpassen zu können, muss man daher $EXPO3 \neq 1$ und/oder $T_{BF} \neq const.$ zulassen. Dabei gibt es im linearisierten Fall [Gleichungen (4.56) und folgende] kein eindeutiges Tupel $(T_{BF}, EXPO3)$, sondern man kann für jedes festgewählte $EXPO3 \neq 0$ und vorgegebene Werte von A und B ein T_{BF} finden, welches die Gleichungen (4.63) und (4.64) erfüllt. D. h., dass man im linearisierten

⁶² Zu einem ähnlichen Ergebnis führen auch sehr kleine (negative) T_{BF} -Werte (vgl. Formel (4.69) und (4.70) weiter unten).

Fall beliebige T_{BF} vorgeben kann und durch entsprechende Wahl von $EXPO3$ trotzdem dasselbe Modell erhält, wie für einen anderen Wert von T_{BF} .

Im nicht-linearisierten Fall ist diese gegenseitige Abhängigkeit allerdings nur noch in abgeschwächter Form vorhanden.

Auch für das nicht-linearisierte Modell 10a-R kann man eine alternative Form angeben. Führt man eine beliebige Temperatur T_0 ein, die nur größer als T_{BF} sein soll, schreibt

$$T_i - T_{BF} = (T_i - T_0) + (T_0 - T_{BF}) := \Delta T_i + (T_0 - T_{BF}) \quad (4.66)$$

und setzt die rechte Seite dieser Gleichung in Gleichung (4.48) ein, wobei man wieder die max-Funktion weglässt, so erhält man nach Ausklammern von $(T_0 - T_{BF})$

$$F^* = (T_0 - T_{BF})^{EXPO3} \sum_{i=t_2}^{t_3} \left(1 + \frac{\Delta T_i}{T_0 - T_{BF}} \right)^{EXPO3}. \quad (4.67)$$

Definiert man nun

$$F^{**} = \frac{F^*}{(T_0 - T_{BF})^{EXPO3}} \quad (4.68)$$

und

$$C = \frac{1}{(T_0 - T_{BF})}, \quad (4.69)$$

so kann man das Modell 10a-R als

$$F^{**} = \sum_{i=t_2}^{t_3} (1 + C (T_i - T_0))^{EXPO3} \quad (4.70)$$

schreiben. Das Modell hängt nun scheinbar von den 4 Parametern F^{**} , C , T_0 und $EXPO3$ ab. Wie die Herleitung zeigte, ist aber der Wert von T_0 völlig beliebig und man erhält exakt dasselbe Modell, wenn man nach Veränderung von T_0 die Parameter F^{**} und C gemäß Formel (4.68) und (4.69) anpasst. Das Auftreten von scheinbar bedeutungslosen Temperaturoffsets in diesem Modell (wie z. B. T_0 oder T_{BF}) lässt sich damit erklären, dass die “Temperatur in °C” nur auf dem Skalenniveau *Intervallskala* definiert ist, so dass nur Temperaturdifferenzen sinnvolle Größen darstellen. An dieser letzten Gleichung erkennt man auch sehr gut, dass ein Exponent $EXPO3 \approx 0$ oder ein $C \approx 0$ dazu führt, dass der Reifebeginn t_3 nicht mehr vom Temperaturverlauf abhängt, sondern in Gleichung (4.70) nur noch die Tage gezählt werden⁶³. Ein kleines C lässt sich durch eine Wahl von sehr kleinen (negativen) T_{BF} erreichen [siehe Formel (4.69)].

Wenn man für T_0 den langjährigen Mittelwert \bar{b} der über die Reifeperiode (hier wieder definiert als Zeitraum von Blühbeginn t_2 bis Reife t_3) gemittelten Lufttemperatur einsetzt und $EXPO3 = 1$ setzt, erkennt man besonders gut, dass T_{BF} in diesem Modell in keinerlei Weise eine physiologische Schwellenwerttemperatur darstellt: In diesem Fall entspricht F^{**} dem langjährigen Mittelwert der Reifeperiodenlänge, denn der langjährige Mittelwert über die “Summe über den zweiten Term in Gleichung (4.70)” ist null, und die Summe über den ersten Term, die “1”, ergibt gerade die Länge der Reifeperiode $t_3 - t_2 + 1$. Der Wert von T_{BF} bestimmt nun nur noch die Größe von C . Sehr kleine (bzw. negative) T_{BF} ergeben kleine C 's. Der Wert von C bestimmt aber, wie stark die Abweichungen

⁶³ Die Reifeperiodenlänge ist dann nicht mehr z. T. thermisch, sondern nur noch rein genetisch festgelegt.

von der mittleren *Sommertemperatur* den Reifetermin beeinflussen. Überwiegend positive Abweichungen führen zu einer Verfrühung der Reife, da die Summe schneller den Wert F^{**} erreicht, hauptsächlich negative Abweichungen bewirken das Gegenteil. T_{BF} kann nun also nicht mehr als Schwellenwert interpretiert werden, unterhalb dem keine Entwicklung stattfindet, sondern dieser Parameter simuliert im Reifemodell nur noch die Sensitivität, mit dem die Pflanze auf die Temperaturabweichungen vom *Sommermittelwert* reagiert. Daher ist es anschaulicher, das Reifemodell in der Form (4.70) und nicht in der Form (4.48) zu schreiben.⁶⁴ Setzt man in (4.70) für T_i die rechte Seite von Gleichung (4.51) ein und ersetzt T_0 durch \bar{b} , so kann man leicht wie bei Formel (4.59) den Trend der Reifeperiodenlänge mit der mittleren Sommertemperatur b_j berechnen (hier wieder für beliebige Werte von $EXPO3$):

$$\frac{\partial(t_3 - t_2)}{\partial b_j} \approx - \frac{EXPO3 \cdot F^{**} \cdot C}{(1 + C(b_j - \bar{b}))^{EXPO3+1}}. \quad (4.71)$$

Da F^{**} bereits dadurch festgelegt ist, dass es (wenigstens im Fall $EXPO3 = 1$) die mittlere Länge der Reifeperiode darstellt, wird der Trend im Fall $EXPO3 = 1$ ausschließlich durch C bzw. T_{BF} festgelegt.

Wenn nun tatsächlich eine Schwellenwerttemperatur $T_{Schwell}$ existiert, unterhalb derer keine Entwicklung mehr stattfindet, dann ist es sehr unwahrscheinlich, dass diese exakt mit der Temperatur T_{BF} übereinstimmt, welche ja hier über (4.69) und (4.70) nur die Sensitivität der Reifeperiodenlänge bezüglich Abweichungen von der Sommermitteltemperatur bestimmt. Stimmen beide nicht überein, so ist es sinnvoll, zusätzlich zu C bzw. T_{BF} noch die gerade erwähnte *echte* Schwellenwerttemperatur $T_{Schwell}$ einzuführen und den Summanden in (4.70) immer dann null zu setzen, wenn $T_i < T_{Schwell}$ gilt.⁶⁵ Die Forcing-Rate-Funktion ist dann aber u. U. nicht mehr stetig. Wenn man auf Stetigkeit Wert legt, dann kann man den Summanden $(1 + C(T_i - T_0))^{EXPO3}$ mit einer Gewichtsfunktion $g(T_i)$ multiplizieren, die für Werte $T_i > T_{Schwell}$ schnell gegen eins und für $T_i < T_{Schwell}$ schnell gegen null strebt. Für $g(T_i)$ kommt z. B. eine *logistische Funktion* in Frage.⁶⁶ Beim Reifemodell ist das allerdings wohl meistens nicht nötig, da innerhalb der Entwicklungszeit (nach dem Blühbeginn) fast immer Temperaturen herrschen, die eine "Nullsetzung der Entwicklung" nicht nötig machen.

Beim Modell für den Blühbeginn in Kapitel 4.6.4 treten ähnliche Probleme auf, wie sie eben geschildert wurden. Dort muss man auch eine *echte* Schwellenwerttemperatur berücksichtigen. Jedoch wird sich zeigen, dass T_{BF} bei der Eichung des Modells auf Grund der Einführung einer weiteren Einflussgröße (der *Tageslänge*) gerade solche Werte annimmt, dass T_{BF} auch als *echte* Schwellenwerttemperatur benutzt werden kann und man nicht zwei getrennte Parameter einführen muss, um Trend und Schwellenwert korrekt einzustellen.

⁶⁴ Die Form von Gleichung (4.48) hat allerdings den Vorteil, dass sie Fälle, in denen T_i auch kleiner werden kann als T_{BF} (z. B. bei den Modellen für den Blühbeginn), in denen man nicht auf die max-Funktion verzichten kann, mit abdeckt.

⁶⁵ In dem seltenen Fall, dass $T_{Schwell} < T_{BF}$ ist, kann $(1 + C(T_i - T_0))$ kleiner null werden, ohne dass $T_i < T_{Schwell}$ gilt. In diesem Fall muss man $(1 + C(T_i - T_0))$ in (4.70) null setzen. Das ist auch immer dann nötig, wenn $EXPO3 \neq 1$ gilt und $T_i < T_{BF}$ wird.

⁶⁶ Alternativ kann man auch anstelle des gesamten Ausdrucks $\{(1 + C(T_i - T_0))^{EXPO3} \cdot g(T_i)\}$ eine andere Funktion mit ähnlichem Verlauf verwenden (z. B. eine verallgemeinerte logistische Funktion [siehe Gleichung (4.72)]).

Übrigens zeigt Gleichung (4.71), dass man den Trend auch dadurch eichen kann, indem man $EXPO3 \neq 1$ wählt oder entsprechend eine andere, nicht lineare Forcing-Rate-Funktion wählt.

Die oben durchgeführten Abschätzungen lassen sich auch auf das Modell 12a-R übertragen, wenn man anstelle von $(t_3 - t_2(j))$ den Ausdruck $(t_3 - t_1)$ mit fest vorgegebenem t_1 betrachtet. Bei diesem Modell ergibt die Optimierung fast immer stark negative T_{BF} (wenn diese in °C angegeben werden). Nach dem oben Gesagten sind diese negative Temperaturen daher nicht als physiologische Schwellenwerttemperaturen, sondern als reine Eichgrößen zu betrachten.

Es wurden auch Versuche mit einer verallgemeinerten logistischen Funktion, die häufig für phänologische Modelle favorisiert wird (siehe z. B. Caffarra et al., 2011), als Forcing-Rate-Funktion $R_f(T_i)$ durchgeführt. Das derart modifizierte Modell lautet

$$F^* = \sum_{i=t_2}^{t_3} R_f(T_i) = \sum_{i=t_2}^{t_3} \frac{1}{(1 + \exp(-a(T_i - T_{BF})))^{EXPO3}}. \quad (4.72)$$

$a \geq 0$ ist hierbei ein neuer Parameter, welcher die Steilheit des Anstiegs der Funktion bei $T_i = T_{BF}$ beschreibt. Auch dieser Ansatz lässt sich durch Linearisierung auf die Form der Gleichung (4.70) oder der Formel (4.65) bringen. Nur für relativ große a hat T_{BF} eine anschauliche Bedeutung: In diesem Fall beschreibt T_{BF} die Temperatur, ab der die Sigmoid-Funktion von “0 auf 1” springt. Für kleine Werte von a hat T_{BF} keine direkte physiologische Bedeutung (siehe Abbildung 4.24). Leider ergaben sich mit dem Ansatz (4.72) (z. B. für frühreife Süßkirsche) keine besseren Ergebnisse als mit dem normalen Modell 10a-R [Gleichung (4.48)], und auch der Einsatz der logistischen Funktion in Modell 12a-R [wie Gleichung (4.72), nur mit optimiertem, konstantem Startzeitpunkt t_1 anstelle von $t_2(j)$] ergab für z. B. frühreife Birne und spätreifen Apfel keine Verbesserung. Es wurden auch Experimente mit einer glockenförmigen Forcing-Rate-Funktion (Gauß-Kurve) durchgeführt. Diese ergaben aber eindeutig schlechtere Ergebnisse.

In **Abbildung 4.24** sind vier verschiedenen Forcing-Rate-Funktionen⁶⁷ für Modell 12a-R eingetragen. Deren Parameter wurden jeweils mit der Rasteroptimierung⁶⁸ über die 19 Obstanbaugitterpunkte bestimmt. Die schwarze Kurve entspricht der Forcing-Rate-Funktion $R_f(T)$ des normalen Modell M12a-R [Formel (4.49)]. Die blaue Kurve wurde für den Ansatz (4.72) bestimmt, wobei der Suchbereich für das optimale t_1 von 1 DOY bis 240 DOY reichte. Bei der roten Kurve wurde der Suchbereich für t_1 auf den Bereich 1 DOY bis 60 DOY begrenzt. Die grün-gepunktete Kurve wurde für das “alte” Modell 12a ($EXPO3 = 1$ und mit Vorgabe von $T_{BF} = 0$ °C) optimiert. Zum besseren Vergleich wurden die Kurven mit den in der Legende der Graphik angegebenen Faktoren multipliziert. Das ist möglich, da sich das Modell nicht verändert, wenn man F^* mit demselben Faktor multipliziert. Die grün-gepunktete Kurve hat einen viel zu steilen Verlauf und führt daher auf viel zu große Varianzen und auf viel zu starke Verfrühungen des Reifebeginns, wenn die Temperatur in Zukunft durch den Klimawandel ansteigt. Der fehlerhafte Verlauf wird auch durch die extrem großen mittleren RMSE-VER bestätigt. Der RMSE-VER nimmt Werte größer als 30 Tage an, wenn man den Suchbereich für t_1 wie hier auf 1 DOY ... 60 DOY festlegt, da bei der Rasteroptimierung ab einem bestimmten F^* an einigen Rasterpunkten überhaupt kein Reifetermin mehr erreicht wird

⁶⁷ Zur Definition von $R_f(T)$ siehe Gleichung (4.45) auf Seite 61.

⁶⁸ Siehe Abschnitt 4.6.6.

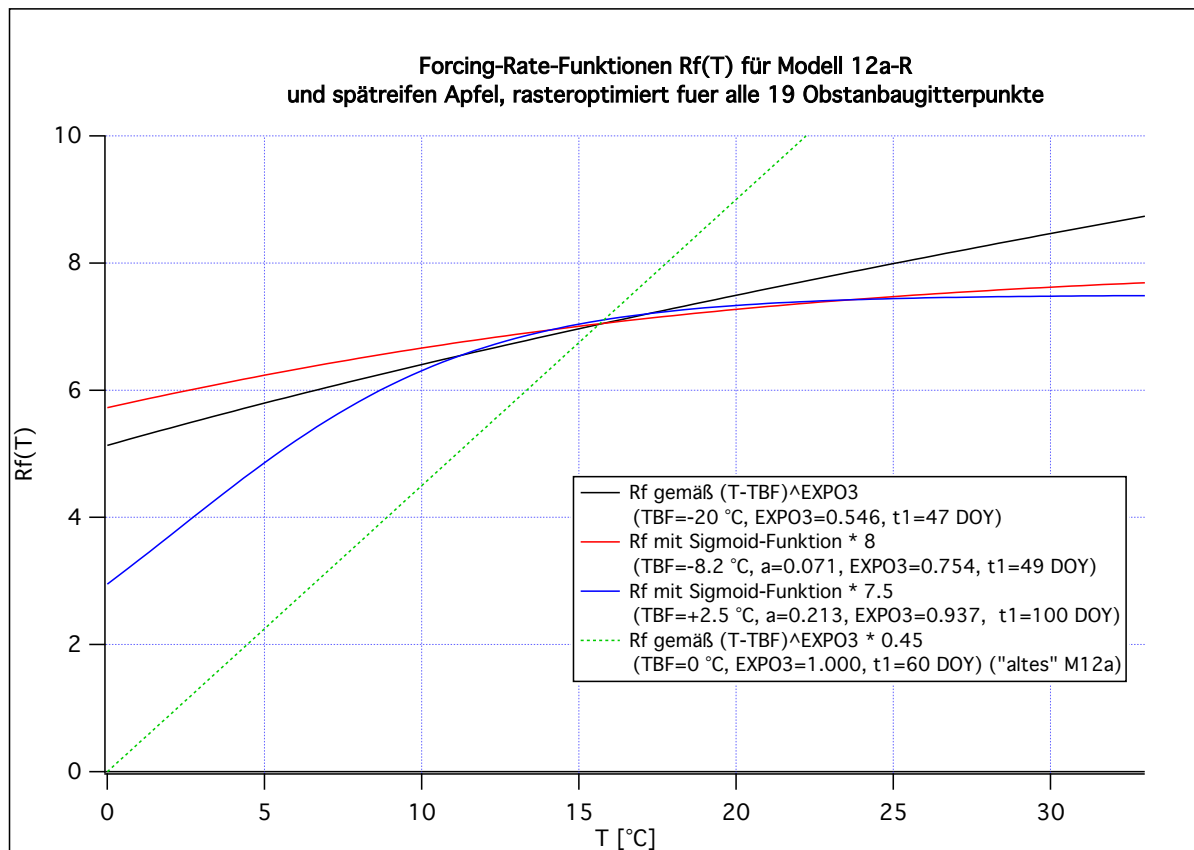


Abbildung 4.24: Verschiedene Ansätze für Forcing-Rate-Funktionen $R_f(T)$ für Modell 12a-R beim spätreifen Apfel, jeweils nach Raster-Optimierung über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

und der für andere Rasterpunkte günstige Parametersatz mit diesem relativ großen F^* dann verworfen wird. Derjenige Parametersatz aber, welcher für alle betrachteten Gitterpunkte definierte Reifetermine liefert und letztendlich als optimaler akzeptiert wird, zeigt im Gebietsmittel die sehr großen RMSE-VER-Werte. Diese RMSE-VER-Werte sind dann weit größer als der RMSE des Nullmodells ($t_3=\text{const.}=\text{Mittelwert des Reifetermins}$). Die anderen drei Funktionen, die dank der zusätzlichen freien Parameter die Möglichkeit haben, ihren "Trend mit der Temperatur" anzupassen, zeigen im Bereich von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ einen sehr ähnlichen Verlauf. Dieser Temperaturbereich ist genau der Bereich, der im Frühjahr und Sommer von der Tagesmitteltemperatur in Hessen bevorzugt wird. Weiterhin erkennt man an diesen Kurven, dass es im optimierten Modell 12a-R gar keinen *scharfen* Schwellenwert T_{BF} für die Temperatur gibt, ab der die Wärmeakkumulation für die Reife einsetzt, sondern T_{BF} bestimmt im Zusammenspiel mit den anderen Parametern nur die Steigung der leicht gekrümmten Kurve in dem Temperaturbereich, der in Hessen im Frühjahr und Sommer für die Tagesmitteltemperatur relevant ist.

Auch wenn das Modell 10a-R [Gleichung (4.48)] bzw. Modell 12a-R [Gleichung (4.49)] den Trend viel besser modelliert und wesentlich kleinere RMSE-VER liefert als das "alte" Modell 10a, so sind die modellierten Jahr-zu-Jahr-Schwankungen (Varianzen) (vor allem bei der Birne) wesentlich kleiner als in der Realität. Dieses Phänomen ist bereits beim spätreifen Apfel in Abbildung 4.22 zu erkennen (die graue Modellkurve ist glatter als die schwarze beobachtete). Scheinbar ist die vom Modell 12a-R modellierte Mischung aus fester Reifeperiodenlänge [bei $EXPO3 = 0$ oder $C = 0$; C wurde in Gleichung (4.69) definiert]

und Einfluß der Temperatur (bei $EXPO3 > 0$ und $C > 0$) noch nicht ausreichend, um die gesamte Varianz zu erklären. Das bedeutet, dass noch irgendwelche Einflüsse im Modell nicht berücksichtigt sind. Tests mit additiven und multiplikativen Einflußgrößen, die von der täglichen Globalstrahlungssumme, der Sonnenscheindauer, der relativen Feuchte und der Niederschlagsmenge abhängen, ergaben keine Verbesserung.

Interessanter Weise kann der Beginn der Pflückreife von z. B. spätreifem Apfel anstelle von Modell 12a-R [mit Startzeitpunkt der Summation zum festen Zeitpunkt t_1 ; siehe Formel (4.49)] auch gut mit dem alten Modell 10a [mit Startzeitpunkt der Summation zum Blühbeginn $t_2(j)$] modelliert werden, wenn man als Forcing-Rate-Funktion die Gleichung (4.93) [mit dem *Daylength*-Faktor anstelle des Exponenten $EXPO3$ in (4.49); *Daylength*=Tageslänge in Stunden (h)] verwendet⁶⁹. Man muss dann allerdings negative Exponenten $EXPO$ zulassen. Dieser Ansatz funktioniert deshalb fast so gut wie Modell 12a-R, weil bei negativem $EXPO$ kurze Tageslängen im September und Oktober den Temperaturterm stärker wichten als die langen Tageslängen im Mai und Juni. Der Einfluss des Blühbeginns $t_2(j)$ wird daher erheblich abgeschwächt, so dass sich letztendlich wieder ein Modell ergibt, in dem eine Mischung aus konstantem Reifetermin mit leichter Modulation durch die mittlere Sommertemperatur entsteht. Ob die Neigung zu relativ konstanten Reifeterminen bei den spätreifenden Sorten genetisch bedingt und damit breitenunabhängig ist oder ob sie durch die kürzer werdenden Tage im Herbst gesteuert wird und somit eventuell von der geographischen Breite abhängt, können nur umfangreiche Experimente mit Tageslichtsimulation oder in verschiedenen geographischen Breiten verraten.

Vor allem die Reife von frühreifer Süßkirsche, der früh- und spätreifen Birne, die Reife von Wein und von frühreifer Pflaume werden noch relativ schlecht modelliert (siehe RMSE-VER-Spalte in Tabelle 4.15). Bei diesen Fruchtarten schneidet das simple Regressionsmodell, bei dem der Reifetermin als lineare Funktion z. B. der Mai-Juni-Mitteltemperatur berechnet wird, fast gleich gut ab wie Modell 10a-R bzw. Modell 12a-R. Eine Mitschuld an den nicht so perfekten Modellergebnissen kann aber auch in der nicht so guten Abdeckung mit Beobachtungen bei diesen Fruchtarten liegen, und daran, dass der Beginn der Pflückreife nicht ganz einfach zu bestimmen ist und dadurch große Beobachterfehler/-streuungen auftreten oder die Früchte an sich eine große Varianz in diesem Termin zeigen.

4.6.4 Unzulänglichkeiten der bisher verwendeten Modelle für den Blühbeginn

4.6.4.1 Reine Forcing-Modelle

In einem Forcing-Modell, welches kein reines Fitting-Modell darstellen soll, sondern Ansprüche erhebt, ein *semi-mechanistisches* Modell zu sein, sollte t_1 vor dem Beginn des "Forcing" und nach dem "Release of Dormancy" (Dormanzbrechungstermin) liegen (z. B. $t_1 = 1.$ Januar).

Das Spring-Warming Modell [Kapitel 4.6.1, Gleichung (4.35)] kann gut durch ein Integral approximiert werden:

$$F^* = \int_{t=t_1}^{t_2} \max(T - T_{BF}, 0) dt. \quad (4.73)$$

⁶⁹ Die über die 19 Obstanbaugitterpunkte rasteroptimierten Parameter sind in diesem Fall: $EXPO = -2.350$, $F^* = 564.2$ Kd, $T_{BF} = -7.9$ °C.

Die Temperatur T ist hierbei als Funktion der Zeit t aufzufassen.

Allgemeiner kann man auch für eine fast beliebige Forcingfunktion $f(x)$ schreiben:

$$F^* = \int_{t=t_1}^{t_2} \max(f(T - T_{BF}), 0) dt. \quad (4.74)$$

$f(x)$ soll eine monoton steigende Funktion von x sein und es soll gelten, dass $f(x) \leq 0$ für $T \leq T_{BF}$ bzw. $T - T_{BF} \leq 0$ ist. In diesem Fall ist der Integrand nur dann ungleich null (oder null), wenn $T - T_{BF} > 0$ gilt.

Nimmt man einen linearen Anstieg der Temperatur mit der Zeit t ($t = \text{Tag im Jahr}$) im Frühjahr an

$$T(t) = a \cdot t + b, \quad (4.75)$$

so ist der Integrand nur dann ungleich null (oder null), wenn

$$a \cdot t + b - T_{BF} > 0 \quad \text{bzw.} \quad t > \frac{T_{BF} - b}{a} =: t_s \quad (4.76)$$

ist. Die hier definierte neue Größe t_s ist der Tag im Jahr, an dem das Forcing beginnt (wenn man den linearen, glatten Temperaturverlauf voraussetzt). a und b sind Konstanten, die man so wählen sollte, dass der Temperaturanstieg im Frühjahr möglichst gut wiedergegeben wird. Solange $t_1 < t_s$ gilt, kann man t_s als untere Integralgrenze in (4.74) einsetzen. Dann kann man die max-Funktion weglassen, da in diesem Fall f im Integrationsbereich immer größer oder gleich 0 ist. Für (4.74) kann man also auch schreiben:

$$F^* = \int_{t=(T_{BF}-b)/a=t_s}^{t_2} f(T - T_{BF}) dt. \quad (4.77)$$

Mit der Variablentransformation

$$z := T - T_{BF} = a \cdot t + b - T_{BF} \quad (4.78)$$

erhält man als untere und obere Integrationsgrenze

$$z_1 = a \cdot t_s + b - T_{BF} = a \cdot \frac{T_{BF} - b}{a} + b - T_{BF} = 0 \quad (4.79)$$

und

$$z_2 = a \cdot t_2 + b - T_{BF} \quad (4.80)$$

und für dt erhält man aus (4.78)

$$dt = \frac{dz}{a}. \quad (4.81)$$

Somit wird aus (4.77)

$$F^* = \int_{z=0}^{a \cdot t_2 + b - T_{BF}} \frac{f(z)}{a} dz = \frac{1}{a} \cdot [F(a \cdot t_2 + b - T_{BF}) - F(0)] = \frac{1}{a} \cdot g(a \cdot t_2 + b - T_{BF}). \quad (4.82)$$

$F(x)$ ist hierbei die Stammfunktion (das Integral über) von $f(z)$ und braucht hier gar nicht näher spezifiziert zu werden. $g(x)$ wurde als Abkürzung für die eckige Klammer eingeführt.

Diese Funktion hängt natürlich genauso wie die eckige Klammer nur von $a \cdot t_2 + b - T_{BF}$ ab. Entscheidend ist, dass $a \cdot t_2 + b - T_{BF}$ im Argument auftritt. Falls $g(x)$ invertierbar ist⁷⁰, erhält man

$$a \cdot t_2 + b - T_{BF} = g^{-1}(a F^*) \quad (4.83)$$

bzw.

$$t_2 = \left[\frac{g^{-1}(a F^*)}{a} + \frac{T_{BF}}{a} \right] - \left(\frac{1}{a} \right) \cdot b. \quad (4.84)$$

Diese Gleichung ist nur korrekt, solange $t_1 < t_s = \frac{T_{BF}-b}{a}$ gilt! Man beachte, dass die Lösung (4.84) nicht mehr von t_1 abhängt!

Hat der Anstieg a der Temperatur im Frühjahr in jedem Jahr denselben Wert, und verändert sich nur das Level b der jährlichen Temperaturkurve von Jahr zu Jahr, so erkennt man an (4.84), dass der “Trend $\partial t_2 / \partial b$ des Blühbeginns mit dem Temperaturlevel b ” nicht von den beiden Eichparametern F^* und T_{BF} abhängt. Diese bestimmen beide zusammen nur den ersten Term, den Offset. Da viele verschiedene Tupel (F^*, T_{BF}) dieselbe Offsetkonstante erzeugen können, sind T_{BF} und F^* nicht eindeutig bestimmt.

Wendet man (4.84) auf das Modell 11a [Gleichung (4.73)] an, so gilt mit $f(z) = z$ nach (4.82):

$$F^* = \frac{1}{a} \cdot \frac{z_2^2}{2} = \frac{(a \cdot t_2 + b - T_{BF})^2}{2 \cdot a} = \frac{a \left(t_2 + \frac{b}{a} - \frac{T_{BF}}{a} \right)^2}{2} \quad (4.85)$$

bzw. nach t_2 aufgelöst^{71,72}:

$$t_2 = \left[\left(\frac{2 \cdot F^*}{a} \right)^{1/2} + \frac{T_{BF}}{a} \right] - \left(\frac{1}{a} \right) \cdot b. \quad (4.86)$$

Solange $t_1 < t_s = \frac{T_{BF}-b}{a}$ bleibt, kann man die eckige Klammer auf einem konstanten Wert c halten, indem man T_{BF} und F^* so variiert, dass c konstant bleibt:

$$T_{BF} = a \cdot c - (2 F^* a)^{1/2}. \quad (4.87)$$

Der von (4.87) beschriebene Verlauf im “unbestimmten Bereich” ist in **Abbildung 4.25** dargestellt. [Um c für (4.87) zu bestimmen, wurde F^* mit $T_{BF} = 4^\circ\text{C}$, $b = 0^\circ\text{C}$, $a = 1/6 \text{ K/d}$ und $t_2 = 70 \text{ DOY}$ aus (4.85) bestimmt. Mit diesem Wert wurde dann die eckige Klammer (= c) aus (4.86) berechnet. Dann wurde c festgehalten und F^* in (4.87) variiert.]

Der von (4.86) beschriebene Verlauf $t_2 = f(b)$ und der Trend $\partial t_2 / \partial b$ bleibt für alle Werte-Tupel (F^*, T_{BF}) der Abbildung 4.25 konstant, solange b und T_{BF} die Bedingung $t_1 < t_s = \frac{T_{BF}-b}{a}$ erfüllen.

Würde man eine lineare Regression für t_2 und b durchführen⁷³, so erhielte man die Koeffizienten aus (4.86) direkt [den Offset β anstelle der eckigen Klammer und die Steigung

⁷⁰ Das ist der Fall, wenn $f(z)$ im betrachteten z -Bereich nur positive bzw. nur negative Werte annimmt. Dann ist $F(z)$ streng monoton steigend bzw. fallend und damit eindeutig invertierbar.

⁷¹ Formal gibt es 2 Lösungen [auch ein Minuszeichen vor $(2 \cdot F^* / a)^{1/2}$ in (4.86) würde eine Lösung von (4.85) darstellen]. Da hier aber $t_2 > t_s$ gelten soll, muss man das Pluszeichen wählen.

⁷² Diese Lösung kann man auch ohne Koordinatentransformation direkt aus (4.77) [mit $f(x) = x$] berechnen, wenn man in diese Gleichung (4.78) für $T - T_{BF}$ einsetzt, ganz normal integriert und danach nach t_2 auflöst. Hierbei muss man die 1. Binomischen Formel $a^2 + 2 \cdot a \cdot b + b^2 = (a + b)^2$ zu Hilfe nehmen.

⁷³ Wenn man für mehrere Jahre Tupel dieser Werte vorliegen hätte.

α anstelle von $-(1/a)$]. Der große Unterschied zu (4.86) ist aber, dass sich bei der linearen Regression die Steigung α an den wahren phänologischen Trend anpassen kann und nicht wie im Modell 11 nicht aneichbar ist, da $-(1/a)$ nicht von den Eichparametern F^* und T_{BF} abhängt.

Eine Optimierung mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate bzw. mit der Suche nach dem kleinsten RMSE ergibt hingegen Schätzungen für die Parameter F^* und T_{BF} direkt. Die Steigung $\partial t_2/\partial b$ ergibt sich automatisch aus dem Anstieg der Temperatur im Frühjahr [Parameter a in Gleichung (4.75)] und ist sogar vollkommen unabhängig von der speziell gewählten Forcing-Funktion $f(x)$.

Zu diesem unerwünschten Phänomen addiert sich noch die Tatsache, dass die Optimierung dadurch erschwert wird, dass, falls $t_1 < t_s$ gilt, kein eindeutig optimaler Wert für F^* und T_{BF} existiert.

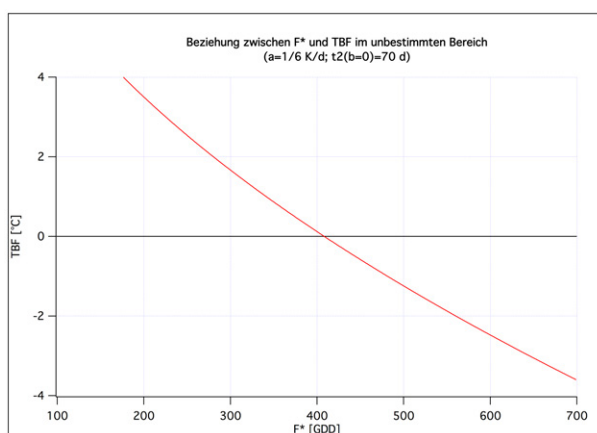


Abbildung 4.25: Unbestimmtheitsbereich von F^* und T_{BF} . Beide Parameter können alle Werte auf der roten Kurve annehmen, ohne dass sich das Modellergebnis verändert, solange nur $t_1 < t_s$ gilt.

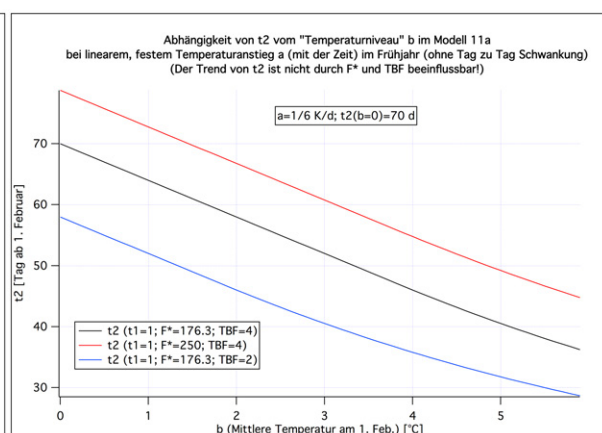


Abbildung 4.26: Abhängigkeit des Termins des Blühbeginns als Funktion des *Temperaturniveaus* b für verschiedene Parametersätze (F^* , T_{BF}) bei $t_1 = 1 = \text{const.}$

Dass der Trend $\partial t_2/\partial b$ überhaupt nicht von F^* und T_{BF} abhängt, solange die obige Bedingung erfüllt ist, zeigt **Abbildung 4.26**. Dort ist der ' $t_2 = f(b)$ '-Verlauf für verschiedene Parametersätze (F^* , T_{BF}) geplottet. Die Steigung ist immer dieselbe. Erst wenn die Bedingung verletzt wird (bei großen b Werten), verändert sich der Trend (wird flacher).

Auch für den Fall, dass die Bedingung verletzt wird, kann man eine analytische Lösung für Modell 11a angeben. Gilt $t_1 > t_s$, so muss man

$$F^* = \int_{t=t_1}^{t_2} (a \cdot t + b - T_{BF}) dt \quad (4.88)$$

anstelle von (4.77) rechnen, da nun der Integrand bereits bei t_1 positiv ist. Das Integral

führt auf eine quadratische Gleichung und die Lösung lautet:

$$\begin{aligned}
 t_2 &= t_s + \left[(t_1 - t_s)^2 + \frac{2F^*}{a} \right]^{1/2} && \text{für } t_1 > t_s \\
 t_2 &= t_s + \left[\frac{2F^*}{a} \right]^{1/2} && \text{für } t_1 \leq t_s \\
 \text{mit } t_s &:= \frac{T_{BF} - b}{a} && \text{und } T(t) = a \cdot t + b
 \end{aligned} \tag{4.89}$$

Man beachte, dass $t_s = f(b, T_{BF})$ gilt. t_s ist also keine Konstante, wenn man T_{BF} oder b variiert. Die zweite Zeile dieser Gleichung entspricht (4.86) und wurde der Vollständigkeit halber hier noch einmal aufgeführt. Im Fall $t_1 > t_s$ ist der Trend $\partial t_2 / \partial b$ nicht mehr unabhängig von den Eichparametern T_{BF} und F^* . Das erkennt man, wenn man den Ausdruck für t_s in die erste Zeile der Gleichung (4.89) einsetzt und die Ableitung nach b bildet [siehe (4.90) weiter unten].

Abbildung 4.27 zeigt den Verlauf von t_2 als Funktion von b für verschiedene Parametersätze bzw. Tupel (F^*, T_{BF}) , wobei auch t_1 variiert wurde. Um mit dem wahren Modell 11a vergleichbare Werte zu erzielen, wurde wieder $a = \frac{1}{6}$ K/d als Frühlingstemperaturanstieg gewählt. Das ergibt einen "Trend von t_2 " von -6 d/K, solange $t_1 < t_s$ gilt. F^* wurde so gewählt, dass alle Kurven bei $b = 0$ °C denselben t_2 -Wert errechnen.⁷⁴

Da in der Realität tägliche Schwankungen auftreten und der Verlauf der mittleren Temperatur auch nicht linear ist, sondern eher einer Sinusschwingung entspricht, ergeben sich natürlich quantitative Abweichungen gegenüber dem Modell 11a, welches mit Messwerten optimiert wird. Trotzdem erklärt das hier beschriebene analytische Modell viele der unangenehmen Eigenschaften des wahren Modell 11a (sowie auch der anderen Forcing-Modelle): Je kleiner T_{BF} und je größer t_1 gewählt wird, desto weniger stark wird die Verfrühung von t_2 für große Werte von b . Große t_1 -Werte führen auch dazu, dass die Abmilderung der starken Verfrühung bereits bei relativ kleinen b -Werten auftritt.

Partielles Ableiten (Differenzieren) der ersten Zeile von (4.89) nach b ergibt mit Hilfe der Definition von t_s [3. Zeile von (4.89)]

$$\frac{\partial t_2}{\partial b} = -\frac{1}{a} + \frac{1}{a} \frac{(t_1 - t_s)}{\left[(t_1 - t_s)^2 + \frac{2F^*}{a} \right]^{1/2}} \quad (\text{für } t_1 > t_s) \tag{4.90}$$

Für $t_1 \leq t_s$ ist der zweite Term in (4.90) wegzulassen und man erhält den konstanten Trend $-1/a$.

Aus (4.88) folgt durch direkte Integration

$$F^* = \frac{1}{2} a (t_2^2 - t_1^2) + (b - T_{BF}) \cdot (t_2 - t_1) \quad (\text{für } t_1 > t_s) \tag{4.91}$$

und aus der 2. Zeile von (4.89) durch Auflösen nach F^* :

$$F^* = \frac{a}{2} \cdot (t_2 - t_s)^2 \quad (\text{für } t_1 \leq t_s). \tag{4.92}$$

⁷⁴ Der Wert b kann hier als der langjährige Mittelwert der Temperatur am 1. Februar interpretiert werden. Denn erst nach diesem Termin steigt die Temperatur in der Realität einigermaßen linear an. In diesem Fall müssten t_1 und t_2 ebenfalls ab dem 1. Februar gezählt werden.

Setzt man $t_2 = 70$ (DOY) und $b = 0^\circ\text{C}$ [d. h., in der Gegenwart (beim heutigen Temperaturniveau $b = 0^\circ\text{C}$) soll der mittlere Blühbeginn immer bei 70 DOY liegen] und wählt wieder $a = 1/6 \text{ K d}^{-1}$, so erhält man aus (4.90) bis (4.92) den in **Abbildung 4.28** gezeigten Verlauf des Trends $\partial t_2/\partial b$ als Funktion von T_{BF} .

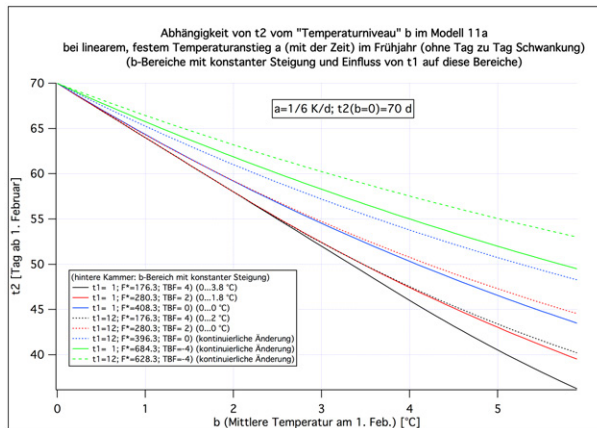


Abbildung 4.27: Abhängigkeit des Termins des Blühbeginns als Funktion des Temperaturniveaus b für verschiedene Parametersätze (F^* , T_{BF}) und verschiedene t_1

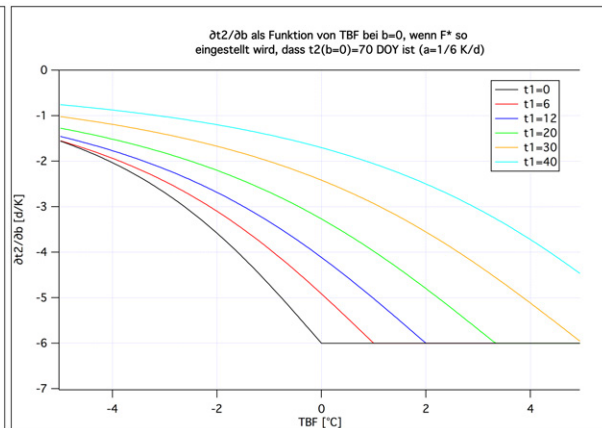


Abbildung 4.28: Trend $\partial t_2/\partial b$ von t_2 als Funktion von T_{BF} für verschiedene Werte von t_1

Man entnimmt der **Abbildung 4.28** folgende Informationen: Je größer t_1 und je kleiner T_{BF} , desto weniger negativ ist der Trend von t_2 mit b . Bei $t_1 = 0$ beträgt der Trend für alle $T_{BF} > 0^\circ\text{C}$ konstant -6 d/K (schwarze Kurve), bei $t_1 = 12$ (blaue Kurve) sind die T_{BF} -Werte für $T_{BF} > 2^\circ\text{C}$ egal usw. Das bedeutet, dass sich das Modell nur dann an den beobachteten t_2 -Trend der Daten anpassen kann [vorausgesetzt dieser Trend ist größer (betragsmäßig kleiner!) als -6 K/d], wenn man T_{BF} unrealistisch klein wählt oder t_1 wesentlich größer als t_s wählt (d. h. Startzeitpunkt des Forcing-Modells größer als Beginn der Forcing-Akkumulation).

Aus Gleichung (4.90) folgt noch folgende interessante Aussage über die Verfrühung des Blühbeginns t_2 mit ansteigendem Temperaturniveau b : In kontinentalen Klimaten mit großer Jahresamplitude der Temperatur ist der Anstieg der Frühjahrstemperatur a größer als in maritim geprägten Regionen. Vernachlässigt man den zweiten Term in Gleichung (4.90) (bzw. bei $t_1 \leq t_s$), erkennt man, dass große a eine (betragsmäßig) geringere Verfrühung $\partial t_2/\partial b$ bewirken. Das bedeutet, dass der Trend zur Verfrühung des Blühbeginns im kontinentalen Klima geringer ausfallen wird als in Regionen mit kleiner jährlicher Temperaturamplitude. Im verbesserten Modell (siehe Kapitel 4.6.5) sind die Trends zwar geringer als die von Gleichung (4.90) vorhergesagten, tendenziell bleibt dieses Verhalten aber bestehen.

4.6.4.2 Zusammenfassung von Abschnitt 4.6.4.1

Der Trend $\partial t_2/\partial b$ im Modell 11a [und in allen Forcing-Modellen, deren Forcing-Funktion den Voraussetzungen des Kapitel 4.6.4 entspricht] hängt nicht von den Eichparametern T_{BF} und F^* ab, sondern nur vom Anstieg a der in dieser Arbeit als konstant angenommenen Temperatur im Frühling, sofern der Modellstart t_1 vor dem Einsetzen des wahren

Forcing (bei t_s) liegt und der geglättete Verlauf der Tagesmitteltemperaturen halbwegs linear ist.

Für $t_1 > t_s$ beeinflussen die Eichparameter aber den Trend, und zwar umso mehr, je größer t_1 gewählt wird und je kleiner T_{BF} gesetzt wird.

Mit ansteigendem b (Klimawandel) verkleinert sich t_s , so dass sich der Trend, der in der Gegenwart (bei klein gewähltem t_1 und großem T_{BF}) allein durch a bestimmt wird, in der Zukunft verändern wird. Denn ab einem bestimmten Temperaturlevel b wird $t_1 > t_s$ gelten [t_s hängt gemäß (4.76) von b ab]. Wie stark diese Veränderung ist, wird durch T_{BF} und F^* bestimmt [vgl. (4.90)]. Diese Parameter lassen sich aber in der Gegenwart nicht (oder nur mit großer Unsicherheit) eichen, da ein Bereich existiert, in dem einer der Parameter F^* und T_{BF} frei gewählt werden kann (Abbildung 4.25⁷⁵), ohne die Ergebnisse des Modells (innerhalb eines gewissen b -Bereichs) zu verändern, so dass auch der zur Eichung der Modelle verwendete Root Mean Square Error RMSE (siehe weiter unten) innerhalb dieses Bereichs optimal und konstant ist. Wählt man t_1 so klein, dass auch in der Zukunft $t_1 < t_s$ gilt und die konkrete Wahl von F^* und T_{BF} keine Rolle spielt, so wird die Modellperformance i. Allg. sehr schlecht (großer RMSE), und der Trend wird viel zu negativ, was eine zu starke Verfrühung des Blühbeginns nach sich zieht.

Wählt man t_1 sehr groß, lässt sich das Modell genauer und mit einem kleineren systematischen Fehler eichen. Dann verpasst man aber unter Umständen wichtige Forcing-Anteile und in der Zukunft könnte das Forcing-Requirement F^* unter Umständen bereits vorm Forcingstart t_1 des Modells erfüllt werden.

4.6.4.3 Chilling-Forcing-Modelle

Experimente mit Modell 29xa und anderen Chilling-Forcing-Modellen ergaben, dass die bei der Optimierung bestimmten C^* -Werte fast immer merklich größer waren als die Angaben in der Literatur, die speziell für Obstkulturen verfügbar sind.

Der Theorie nach wird die Endodormanz zum Termin t_{1a} (siehe **Abbildung 4.29**) beendet, wenn eine entsprechende Anzahl C_a^* von Chilling-Hours bzw. -Units bzw. -Portions (die pflanzenspezifisch ist) erfüllt ist. Würden nach diesem Zeitpunkt "gute" Bedingungen herrschen (ausreichend hohe Temperaturen, ausreichende Licht-, Feuchte- und Nährstoffbedingungen etc.), so würden sich die Knospen der Pflanze bis zur Blüte weiterentwickeln.

Diese Weiterentwicklung sollte durch die Forcing-Modelle (bzw. die Forcing-Teilmodelle der kombinierten Chilling-Forcing-Modelle) beschrieben werden. Sind die Bedingungen nicht "gut", so verharrt die Pflanze in der sogenannten Ökodormanz (ecodormancy) und entwickelt sich erst dann weiter, wenn sich die Bedingungen zum Guten wenden (Zeitpunkt t_{1b} in der **Abbildung 4.29**). Wäre die Entscheidung, ob die Bedingungen "gut" oder "schlecht" sind, ausschließlich von der Temperatur abhängig, so sollten die Forcing-Modelle in der Lage sein, die Entwicklung der Pflanze ab dem Zeitpunkt der Dormanzbrechung t_{1a} einigermaßen befriedigend zu beschreiben. In diesem Fall müsste man den Startzeitpunkt der Forcingmodelle auf t_{1a} setzen bzw. die Optimierung müsste ein C_a^* errechnen, welches einem t_1 entspricht, das im Mittel dem Zeitpunkt t_{1a} nahe kommt. Das ist leider nicht der Fall. Man muss die Forcing-Modelle zu wesentlich späteren Zeitpunkten t_1 nahe t_{1b} starten. Ansonsten erhält man eine sehr schlechte Modellperformance. Späte t_1 -Startwerte für die Forcing-Modelle können bei der Optimierung der Chilling-Forcing-

⁷⁵ Das gemeinsame Konfidenzintervall von F^* und T_{BF} ist sogar im nicht idealisierten Fall extrem groß und sogar größer als der in der **Abbildung** dargestellte Bereich.

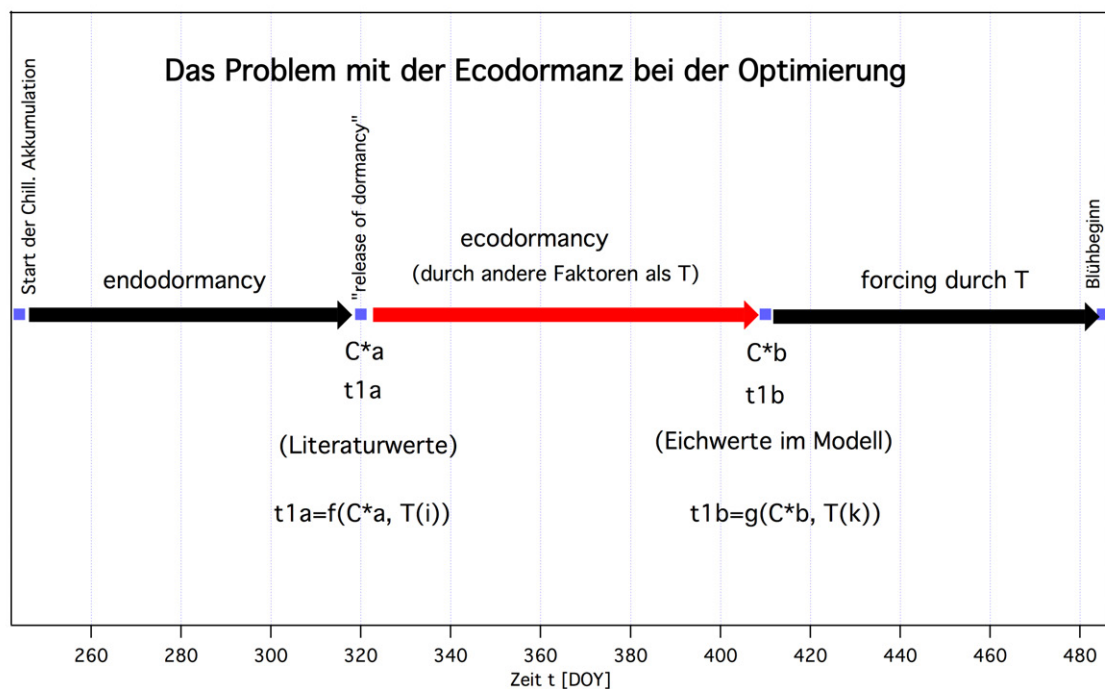


Abbildung 4.29: Das Problem der zu großen C^* - bzw. zu späten t_1 -Werte in den Chilling-Forcing-Modellen, die nur die Temperatur als Einflussgröße enthalten

Modelle dadurch erreicht werden, dass entsprechend große, unrealistische C^* -Werte berechnet werden (nahe C_b^*). Das deutet wiederum darauf hin, dass die Forcing-Modelle einige wichtige Faktoren, welche für die Ecodormanz von Wichtigkeit sind, nicht enthalten.

Die Optimierung bestimmt für die herkömmlichen Chilling-Forcing-Modelle zu hohe C^* -Werte (und/oder zu niedrige T_{BF} -Werte), damit der zu negative Trend des Forcing-Modells, der, wie oben gezeigt wurde, nur für große t_1 -Werte eichbar ist, optimiert werden kann. Das Forcing-Modell arbeitet nun bei nur leicht von Jahr zu Jahr variierenden (aber zu großen) t_1 -Werten im Optimierungszeitraum ganz zufriedenstellend, auch wenn die Parameter C^* und T_{BF} unphysiologische Werte angenommen haben. Verheerend wird die Situation nun aber, wenn eine Prognose für die Zukunft erstellt werden soll: t_1 verändert sich stark (wächst z. B. stark an). Da t_1 nun noch weiter in den Forcing-Bereich vordringt ($t_1 \gg t_s$), hängt t_2 stark von den vom Chilling-Modell berechneten t_1 -Werten ab. In Wirklichkeit, wenn das Forcing-Modell korrekt wäre, und man eine Pflanze mit relativ niedrigem Chilling-Requirement C^* betrachten würde, wäre aber C^* wesentlich kleiner als das bei der Optimierung bestimmte, und t_1 wäre auch in der Zukunft noch kleiner oder nur leicht größer als t_s . Dann würden die Veränderungen von t_1 keine oder nur leichte Änderungen von t_2 bewirken.

Selbst bei Pflanzen mit sehr großem C^* würde man falsche Ergebnisse erhalten: Bei diesen Pflanzen würde im Gegensatz zu den Pflanzen mit niedrigem C^* , bei denen erst in der Zukunft $t_1 > t_s$ gilt, bereits im Optimierungszeitraum $t_1 > t_s$ gelten. t_s nimmt mit steigendem b ab, so dass sich t_1 zum Ende des 21. Jahrhunderts relativ zu t_s immer weiter in den Forcing-Bereich verschiebt, auch wenn man den eigentlichen Wert von t_1 festhält. Das Chilling-Modell verschiebt dann aber auch noch den Wert von t_1 weiter in den Forcing-Bereich, da sich der Wert von t_1 auf Grund der wärmer werdenden Winter

vergrößert. Da die Steigung der Beziehung $t_2 = f(t_1)$ vom Wert der Differenz $t_1 - t_s$ abhängt [vgl. (4.90)] und letzterer Wert zu groß wird, berechnet man zu große (zu späte) t_2 -Werte. Sogar wenn $t_1 - t_s$ korrekt wäre, da das optimierte C^* tatsächlich so groß ist, wie es durch die Optimierung bestimmt wurde, ist der Verlauf von t_2 mit t_1 falsch, wenn das Forcing-Modell nicht alle Faktoren berücksichtigt, die beim Forcing eine Rolle spielen. Das Modell arbeitet ja bereits fehlerhaft, wenn es als reines Forcing-Modell verwendet wird. Auch in diesem Fall wäre der $t_2 - t_1$ -Verlauf eher zufällig und könnte vollkommen falsche Werte hervorbringen.

Die in diesem Kapitel aufgeführten Ergebnisse gelten nur für relativ tief gelegene, warme Gitterpunkte und Stationen. Die Optimierung von Chilling-Forcing-Modellen an hoch gelegenen Gitterpunkten (ca. >300 m über N. N.) führt zu fast vollständig unbestimmten C^* -Werten. Das bedeutet, dass eine erneute Optimierung mit einer anderen Wetterrealisierung (aber beim gleichen Klima) stark veränderte C^* -Werte ergeben kann. Diese C^* -Werte spielen, wenn sie klein genug sind, im heutigen Klima zwar keine Rolle, bei Prognosen werden sie aber ab ca. 2040 wichtig. Man sollte daher das Chilling-Teilmodell nicht ausschließlich mit Hilfe von hoch gelegenen Gitterpunkten "eichen".⁷⁶

4.6.5 Verbesserung der Blühbeginn-Modelle durch die Berücksichtigung der Tageslänge

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die Ökodormanz von den Forcingmodellen nur unzureichend beschrieben wird, was zu unrealistischen C^* - und/oder T_{BF} -Werten bei der Optimierung führt.

4.6.5.1 Modifikation der Forcingfunktion R_f

Um dieses Manko zu beheben, wurde die Forcing-Funktion $R_f(T)$ [siehe (4.45) und (4.46)] mit zusätzlichen Größen (Sonnenscheindauer, Tagesmittelwert der Globalstrahlung, Globalstrahlungsmittelwert über die Tageslänge, Tageslänge u.v.a.m.) modifiziert. Die so modifizierten Modelle wurden mit Hilfe des RMSE-VER und des AIC_c (*corrected Akaike Information Criterion*; siehe z. B. Held, 2008 und Storch & Zwiers, 2008) untereinander und mit den ursprünglichen Modellen verglichen. Hierbei wurde auch darauf geachtet, ob sich physiologisch sinnvolle Werte für C^* (falls es sich um ein Chilling-Forcing-Modell handelte) und T_{BF} ergaben.

Für alle betrachteten Fruchtarten (siehe Kap. 4.6.6) außer für Wein ergaben sich die besten Ergebnisse mit folgendem Ansatz anstelle von (4.46):

$$R_f(T) = \max(0., T - T_{BF}) \cdot \left(\frac{\text{Daylength}}{10 \text{ h}} \right)^{EXPO}. \quad (4.93)$$

Daylength ist dabei die Zeit (in Stunden) von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang und hängt vom Tag im Jahr (Julianday) ab. Die "10 h" im Nenner wurden nur zur Normierung eingeführt, damit sich für alle Modellversionen ähnliche optimale F^* -Werte ergeben. **EXPO** ist ein neuer Modellparameter. Der Wert von *EXPO* hängt von der Fruchtart und dem betrachteten Gebiet ab und kann zusammen mit den anderen Parametern optimiert werden.

⁷⁶ An relativ warmen Gitterpunkten sind die Chilling-Parameter C^* und T_{BF} zwar relativ gut festgelegt, aber, wie oben gezeigt wurde, falsch (C^* zu groß und/oder T_{BF} hat physiologisch unsinnige Werten).

Bei Wein wurde in $R_f(T)$ zusätzlich zum DAYLENGTH-Term noch ein Globalstrahlungsterm eingefügt:

$$R_f(T) = \max(0., T - T_{BF}) \cdot \left(\frac{\text{Daylength}}{10 \text{ h}}\right)^{EXPO} \cdot \left(\frac{\text{Glob}}{120 \text{ W/m}^2}\right)^{EXPO2} \quad (4.94)$$

Glob ist der Tagesmittelwert der Globalstrahlung (in W/m^2), “120 W/m^2 ” ein zu “10 h” analoger Normierungsfaktor, und *EXPO2* ein weiterer Modellparameter, der nur beim Wein wichtig ist und bei allen anderen Fruchtarten auf 0 gesetzt wird. Experimente ergaben, dass dieser Term bei den anderen Fruchtarten jedoch an einzelnen Gitterpunkten Verbesserungen bringen kann. Im Mittel über alle Rasterpunkte eines größeren Gebiets ergeben sich aber nur für Wein Verbesserungen. Diese sind allerdings, wie auch die durch den DAYLENGTH-Term, nicht allzu groß, da bei Wein die Schwellentemperatur T_{BF} sehr hohe Werte (ca. 7.5 °C) hat und der Einfluss (wenigstens der Tageslänge) bei Tagesmitteltemperaturen oberhalb dieses Werts nur noch gering ist.

Nicht nur in (4.46) wurde eine derartige Modifikation vorgenommen, sondern auch in allen entsprechenden Termen der anderen, an der HU-Berlin benutzten phänologischen Modelle, für die das sinnvoll war.

Da die Version (4.94) die Globalstrahlung *Glob* benötigt, muss beim Wein zusätzlich zu den Temperaturen auch noch die Globalstrahlung an allen Gitterpunkten vorliegen.

4.6.5.2 Hierdurch erzielte Verbesserungen

Abbildung 4.30 zeigt die Modellergebnisse für die Prognose von t_2 (Blühbeginn des frühreifen Apfels) mit REMO-UBA-Temperaturen aus Szenario A1B bis 2100 an einem Gitterpunkt nahe Frankfurt/Main, nach dem die Modelle mit Hilfe von gerasterten DWD-Temperaturen und Blühbeginnsterminen des DWD über die Jahre 1961-2009 optimiert worden waren (siehe Kapitel 4.6.6). Die blaue Kurve zeigt die Vorhersagen von Modell 11a (mit festem $t_1 = 1$) mit dem neuen Ansatz (4.93). Die Optimierung der Parameter ergab den physiologisch sinnvollen Wert $T_{BF} = 1.8^\circ\text{C}$ ⁷⁷. Die grüne Kurve, die ohne den Daylength-Term berechnet wurde, zeigt ebenfalls einen sinnvollen Verlauf (Verschiebung des Blühtermins um ca. 25 d mit relativ kleinen Jahr zu Jahr Schwankungen), welcher der blauen Kurve sehr ähnlich ist. Jedoch ergibt die Optimierung die physiologisch unsinnige Schwellentemperatur $T_{BF} = -8.9^\circ\text{C}$. Für die gestrichelte rote Kurve (die fast identisch mit der durchgezogenen ist), die ohne den neuen Ansatz berechnet wurde, wurde der Suchbereich für T_{BF} bei der Optimierung nicht wie bei der grünen und blauen Kurve auf den Bereich -10°C bis 10°C gesetzt, sondern auf den Bereich 0°C bis 10°C eingeschränkt. Zwar ergibt sich nun die sinnvolle Schwellentemperatur $T_{BF} = 3.6^\circ\text{C}$, der t_2 -Verlauf zeigt aber eine zu starke Verfrühung von ca. 40 Tagen und weist große Schwankungen auf.

Hält man t_1 in Modell 11a nicht auf einem festen Wert fest, sondern optimiert diesen Parameter (Modell 12a), so ergibt sich ohne DAYLENGTH-Term $t_1 = 56$ DOY, mit DAYLENGTH-Term errechnet die Optimierung den Wert $t_1 = 6$ DOY.

Die zu hohen C^* -Werte, die bei der Optimierung an einzelnen Gitterpunkten bei den kombinierten Chilling-Forcing-Modellen, vor allem an Gitterpunkten, in denen besonders

⁷⁷ EXPO wurde hier auf den konstanten Wert 2 gesetzt. Optimiert man auch den Wert von EXPO, so erhält man $EXPO = 1.58$ und $T_{BF} = 1.49^\circ\text{C}$ bei fast unverändertem Verlauf.

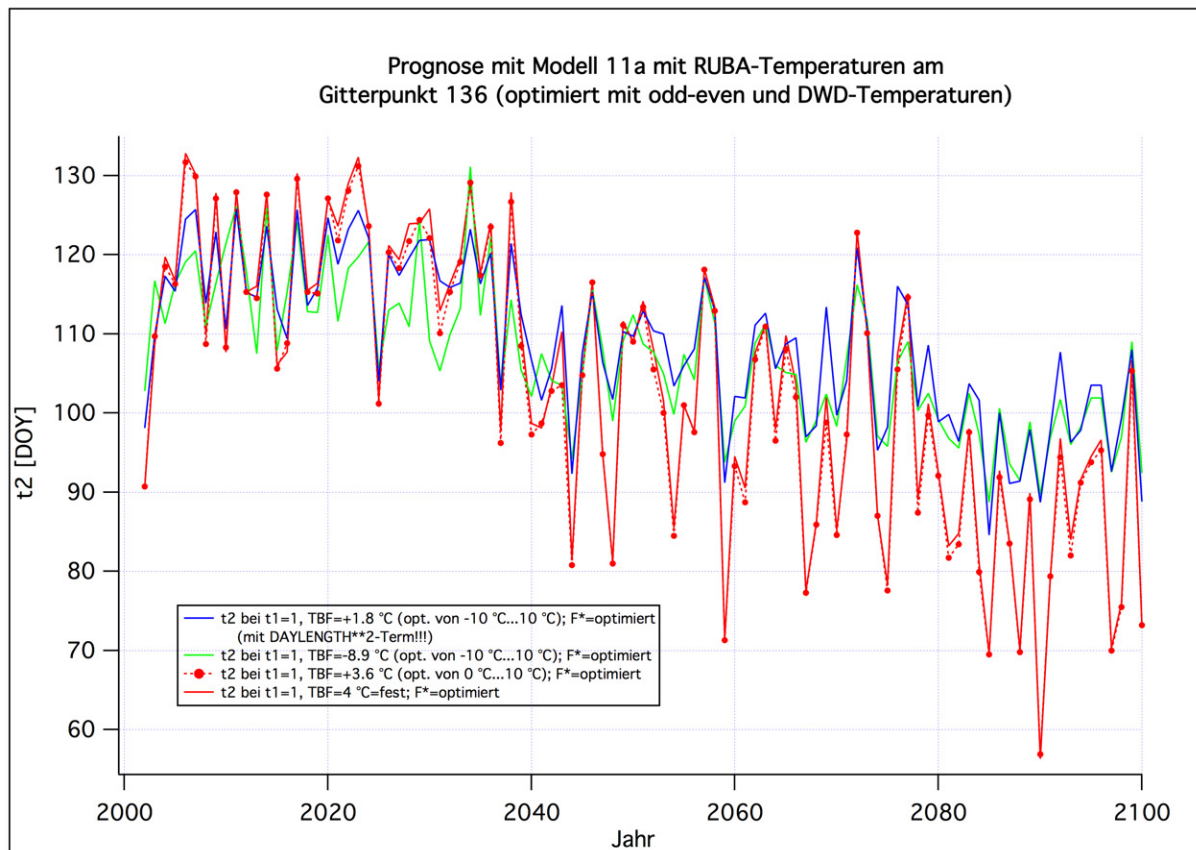


Abbildung 4.30: Prognose des Blühbeginns t_2 beim frühreifen Apfel, berechnet mit Modell 11a und REMO-UBA-Temperaturen (Szenario A1B) am Gitterpunkt 136 in der Nähe von Frankfurt/Main mit (blau) und ohne DAYLENGTH-Term

intensiv Obstbau betrieben wird, ohne (4.93) aufzutreten, werden mit (4.93) auf vernünftige Werte reduziert.

Die *Residualanalyse*⁷⁸ für Modell 12a ergibt für den frühreifen Apfel am *Gitterpunkt 136* in der Nähe von Frankfurt am Main [8.8°N, 50.2°E, 148.8 m über NHN, Gitterpunkt $i = 10$, $j = 7$ (jeweils ab 1 gezählt in Ost- bzw. Nordrichtung; 136 bei fortlaufender Zählung) im Rasterfile für die 0.2°-Auflösung (**Abbildung 4.8**)] folgende Ergebnisse: Rechnet man das Modell ohne Daylength-Term, setzt t_1 auf den 'optimalen t_1 -Wert des Modells mit DAYLENGTH-Term' (=6 DOY) und optimiert bezüglich F^* und T_{BF} (die Suche des optimalen T_{BF} wurde dabei auf den Suchbereich 0°C...10°C beschränkt), so erhält man das obere Bild der **Abbildung 4.31**. Dort beträgt der *systematische Fehler*, der hier als Steigung der Regressionsgrade von ' $t_2(\text{predicted})-t_2(\text{observed})$ ' über $t_2(\text{predicted})$ definiert ist, ca. 33%! Das bedeutet, dass in diesem Modell besonders große $t_2(\text{predicted})$ im Mittel einen besonders großen Fehler ' $t_2(\text{predicted})-t_2(\text{observed})$ ' bewirken und der vorhergesagte Wert dann viel größer ist als der tatsächliche Wert. Umgekehrt rufen besonders kleine $t_2(\text{predicted})$ besonders negative Fehler hervor, und der vorhergesagte Wert ist dann viel kleiner als der beobachtete Wert. Mit dem DAYLENGTH-Term [d. h. mit Gleichung (4.93)] und bei Optimierung aller 4 Parameter (mit den bereits z. T. oben erwähnten sinnvollen Ergebnissen: $t_1 = 6$ DOY, $T_{BF} = 1.49$ °C, $EXPO = 1.58$, $F^* = 541$ PTU) ver-

⁷⁸ d.h. Auftragen des Fehlers [$t_2(\text{predicted})-t_2(\text{observed})$] von t_2 über dem vorhergesagten Wert $t_2(\text{predicted})$ des Blühbeginns. $t_2(\text{observed})$ ist dabei der beobachtete Blühbeginnstermin.

ringert sich dieser Fehler auf einen nicht signifikanten Fehler von nur noch -0.2% (unteres Bild).

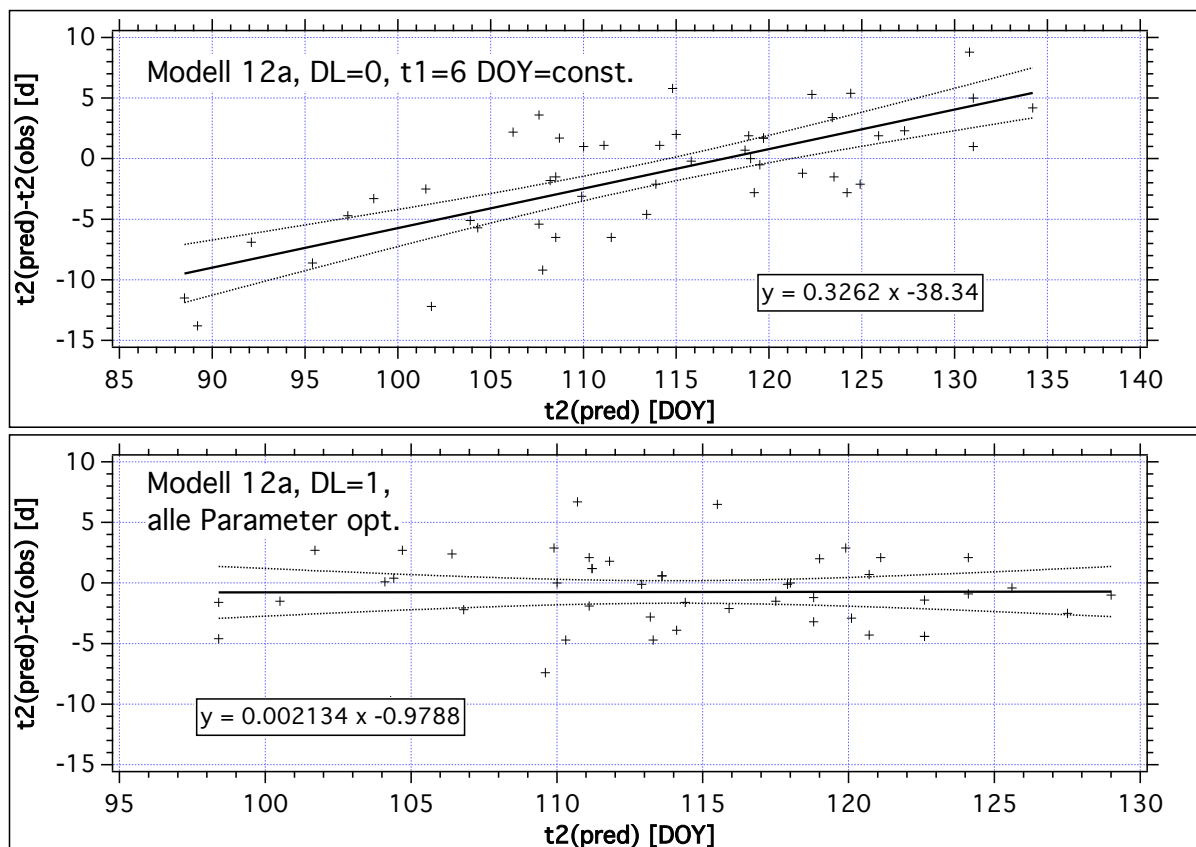


Abbildung 4.31: Scatter Plot der Residuen der prognostizierten t_2 -Werte beim frühreifen Apfel am Gitterpunkt 136 in der Nähe von Frankfurt am Main, berechnet mit Modell 12a mit DWD-Temperaturen; oben: ohne DAYLENGTH-Term ($DL=0$); unten: mit DAYLENGTH-Term ($DL=1$).

Abbildung 4.32 zeigt den RMSE bei der Verifikation für den frühreifen Apfel bei Modell 29ba (rasteroptimiertes⁷⁹ Gebietsmodell), links ohne und rechts bei Verwendung des DAYLENGTH-Terms. Der RMSE bei Nutzung des DAYLENGTH-Terms ist im Mittel um 0.85 d geringer (siehe **Tabelle 4.9**), an einzelnen Gitterpunkten sogar um mehrere Tage.

Tabelle 4.9: Mittelwerte des RMSE über die 81 Gitterpunkte im politischen Hessen für den frühreifen Apfel [OPT = bei der Optimierung (Eichung der Parameter mit geraden Jahren); VER = bei der Verifizierung mit ungeraden Jahre]

	RMSE-OPT [d]	RMSE-VER [d]
Modell 29ba OHNE DL	5.09	4.65
Modell 29ba mit (4.93)	3.46	3.80
Modell 29ba mit (4.94)	3.06	3.87

Der Einfluss der Tageslänge wird zur Zeit von den Phänologen zunehmend akzeptiert (siehe z. B. Häkkinen et al., 1998; Schaber & Badeck, 2002; Körner, 2006; Linkosalo et

⁷⁹ Siehe Abschnitt 4.6.6

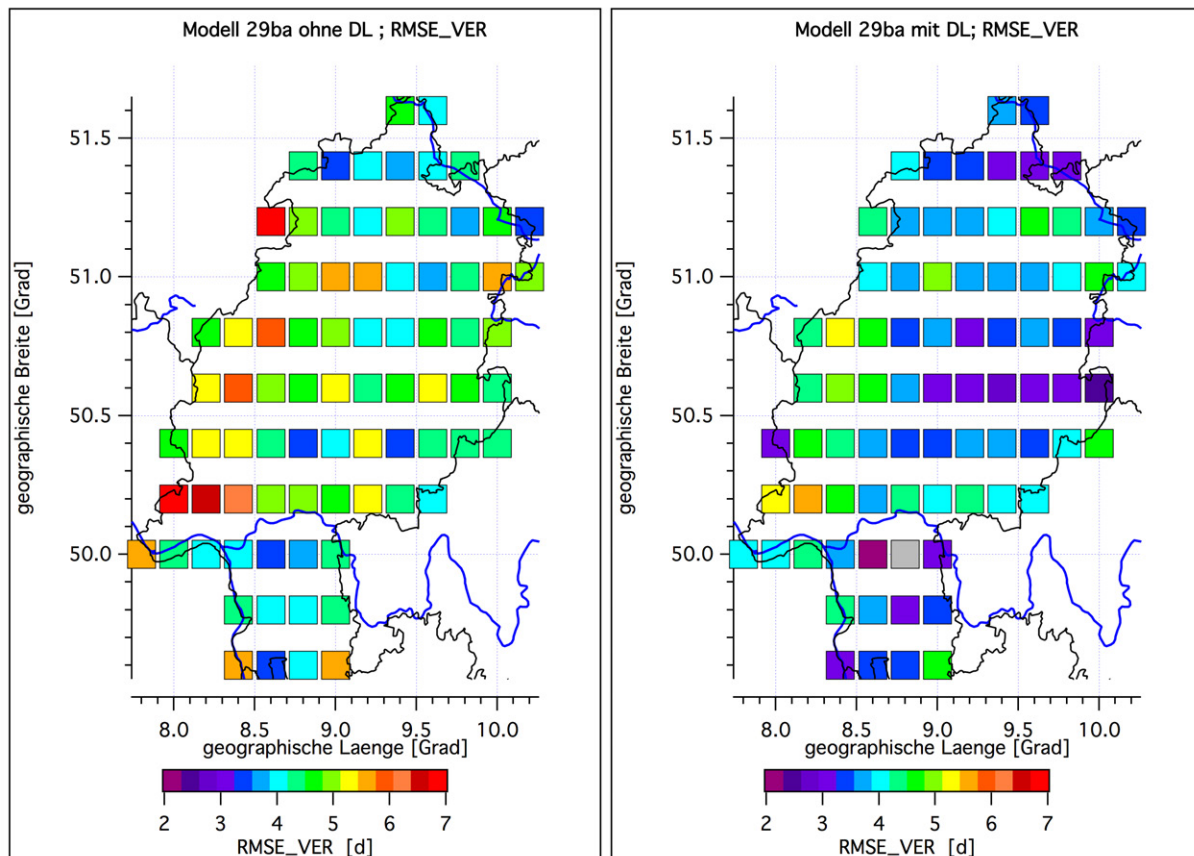


Abbildung 4.32: RMSE bei der Verifikation für den frühreifen Apfel bei Nutzung von Modell 29ba (rasteroptimiertes Gebietsmodell; siehe Kap. 4.6.6) ohne und mit DAYLENGTH-Term. (Graue Pixel besitzen Werte kleiner 2 d.)

al., 2006; Körner & Basler, 2010). Für früh blühende (Aprikosen, Pfirsich) Arten ist er angeblich nicht so wichtig (Hunter & Lechowicz, 1992). Jüngste Experimente an der Universität München (Laube et al., 2012) bestätigten, dass die Photoperiode das Aufbrechen der Knospen (*budburst*) vieler Spezies (36 wurden getestet) beeinflusst und dass dieser Effekt nicht nur auf ganz spezielle Spezies oder auf Spezies ozeanischer Herkunft zutrifft, wie früher angenommen wurde. Studien von Caffarra et al. (2012) zeigten ebenfalls, dass die Photoperiode einen starken Einfluss auf phänologische Phasen im Frühjahr bei vielen der untersuchten Spezies hat.

In Caffarra et al. (2011) wird ein Modell (das sogenannte DORMPHOT-Modell) für den Knospenaufbruch (*Budburst*) von Birke vorgestellt, welches ebenfalls den Einfluss der Tageslänge berücksichtigt⁸⁰ und damit bessere Ergebnisse erzielt als ohne diesen Einfluss. Zusätzlich zum Forcing beschreibt dieses Modell auch noch den Einfluss des Chillings und sogar die *Induktion der Dormanz*. Allerdings besitzt dieses Modell 11 zu optimierende Parameter, von denen aber zwei Parameter feste, aus Experimenten gewonnene Werte zugewiesen bekommen. Eigene Experimente mit diesem Modell, bei denen die Modellparameter am Gitterpunkt 136 in der Nähe von Frankfurt am Main für den Blühbeginn von Apfel mit Hilfe von *Simulated Annealing* (vgl. Seite 61) optimiert wurden, ergaben Folgendes: Da fast alle Parameter, welche die Induktion der Dormanz und das Chilling

⁸⁰ Allerdings auf etwas andere Weise als in dieser Arbeit.

beschreiben, vom Forcing weitestgehend entkoppelt sind (bzw. veränderte Werte dieser Parameter auf andere Parameter abgewälzt werden können), sind deren Werte ziemlich egal. Andernfalls wäre das Modell sicherlich auch “overfitted” und würde bei der Validierung sehr schlechte Ergebnisse liefern. Versuche ergaben, dass dieses Modell bessere Ergebnisse für den Blühbeginn in Hessen liefert, wenn man nur noch die Formel für das reine Forcing und zusätzlich den Startzeitpunkt t_d des Forcings optimiert und die Induktion der Dormanz, das Chilling und sogar den Tageslängeneinfluss vernachlässigt.⁸¹ Dieses 4-Parameter-Modell entspricht dann dem Modell 12a (ohne Daylength-Term; siehe Seite 62). Allerdings wird bei Caffarra et al. eine logistische Forcing-Rate-Funktion anstelle des linearen Ansatzes verwendet⁸². Dieses abgespeckte Modell hat ein *corrected Akaike Information Criterion AICc* (vgl. Kapitel 4.6.5.1) von 125, wohingegen das originale Modell einen *AICc* von 161 aufweist. Daher ist das vereinfachte Modell um den Faktor $\exp((161-125)/2) = 6.6 \cdot 10^7$ wahrscheinlicher korrekt als das vollständige Modell⁸³. Dieses vereinfachte Modell schneidet allerdings immer noch schlechter ab als das hier favorisierte Modell 12a mit Daylength-Term (*AICc* = 119) bzw. das Modell 29ga mit Daylength-Term (*AICc* = 117), besonders wenn man t_d auf relativ frühe Werte (ca. 1. Januar) setzt, und realistische, positive Forcing-Temperaturen (positiv bzgl. °C) fordert. In diesem Fall muss man in Caffarra’s Modell auch noch die Tageslänge berücksichtigen und daher die Parameter DL_{50} und gT in Caffarra’s Gleichung (8) mit optimieren [T_{50} berechnet sich dann nach Caffarra’s Gleichung (8), daher hat das Modell dann 5 zu optimierende Parameter], um Ergebnisse zu erhalten, die mit dem Modell 12a (mit Daylength-Term) vergleichbar sind. Wie aber bereits oben erwähnt wurde, wird die Performance des Modells dadurch verschlechtert.

Ob der Tageslängenterm nun tatsächlich die *wahre* Größe ist, mit der man die positiven Effekte auch physiologisch erklären kann, muss Gegenstand weiterer Forschungen sein. Auf jeden Fall werden die Modelle merklich verbessert, und die Parameter nehmen automatisch vernünftige Werte an. Die Modelle lassen sich nun so eichen, dass der wahre Trend besser mit dem Modelltrend übereinstimmt, auch wenn man die Forcing-Akkumulation mit einem physiologisch sinnvollen, kleinen t_1 startet. Und auch die echten Chilling-Forcing-Modelle liefern nun gute Vorhersagen. Vorher war das bei Vorhersagen bis 2100 nur bei den reinen Forcing-Modellen (und bei diesen auch nur mit viel zu großen t_1) der Fall. Da die Erfüllung des Chilling-Requirements aber in Zukunft nicht mehr selbstverständlich ist, sollte man für phänologische Vorhersagen mit Hilfe von Temperaturen aus Klima-Szenarien besser echte Chilling-Forcing-Modelle einsetzen!

4.6.5.3 Phänotypische Plastizität

Dass die kombinierten Chilling-Forcing-Modelle mit DAYLENGTH-Term auch noch unter extremen Bedingungen realistische Vorhersagen liefern, zeigt die **Abbildung 4.33**.

⁸¹ Die Modellteile, welche diese Effekte beschreiben, verstärken nur das Rauschen und liefern keine Verbesserung für die Prognose des Blühbeginn-Termins.

⁸² Daher hat dieses Modell 4 und nicht 3 Parameter.

⁸³ Kleinere Werte des *AICc* sind besser. Beträgt die Differenz im *AICc* z.B. 6, und entscheidet man sich bei einem Modellvergleich für das Modell mit dem kleineren *AICc*, so beträgt die Wahrscheinlichkeit (im Sinne der “*AICc*”-Theorie), dass man das “korrekte” (bessere) Modell gewählt hat, $\exp(6/2)/(1 + \exp(6/2)) = 95.257\%$. Das Modell mit dem kleineren *AICc* ist dann um den Faktor 20 [$= 0.95257/(1 - 0.95257) = \exp(6/2)$; Evidence Ratio bzw. Relative Likelihood] wahrscheinlicher “korrekt” als das andere Modell.

Für diese Abbildung wurde der Blühbeginn t_2 mit Hilfe des Modells 29ga (mit für *Apfel* optimierten Parametern; vgl. Tabelle 4.12) am Gitterpunkt 136 in der Nähe von Frankfurt am Main mit Hilfe der vom DWD beobachteten Temperaturen berechnet. Diese Temperaturen (sowohl T als auch T_n und T_x) wurden aber vor der Berechnung jeweils um einen festen Zuschlag ΔT verringert bzw. vergrößert. Modell 29ga wurde verwendet, da in diesem Modell der Chillinganteil mit Hilfe des Dynamic Model berechnet wird. Dieses berechnet nach dem auf Seite 199 Gesagten besonders in wärmeren Klimaten die zuverlässigsten Dormanzbrechungstermine. Dargestellt sind Mittelwerte von t_2 über alle Jahre von 1962-2009. Berücksichtigt man nur Blühbeginnstermine, die vor dem 30. Juni auftreten, so erhält man die durchgezogene rote Kurve. Der Verlauf der t_2 - ΔT -Beziehung ist nur im Bereich $-8 \text{ K} < \Delta T < 4 \text{ K}$ approximativ linear. Darunter und darüber nimmt t_2 annähernd ein konstantes Niveau an, wobei allerdings die Anzahl der Jahre, in denen kein Blühtermin bis zum Hochsommer (ca. 180 DOY) berechnet werden kann (durchgezogene graue Kurve), stark zunimmt. Die Form der roten Kurve stimmt gut mit der von [Donnelly et al. \(2012\)](#) in ihrer *Figure 2* gezeigten Kurve, welche die **Phänotypische Plastizität** (Phenotypic Plasticity) verdeutlicht, überein.

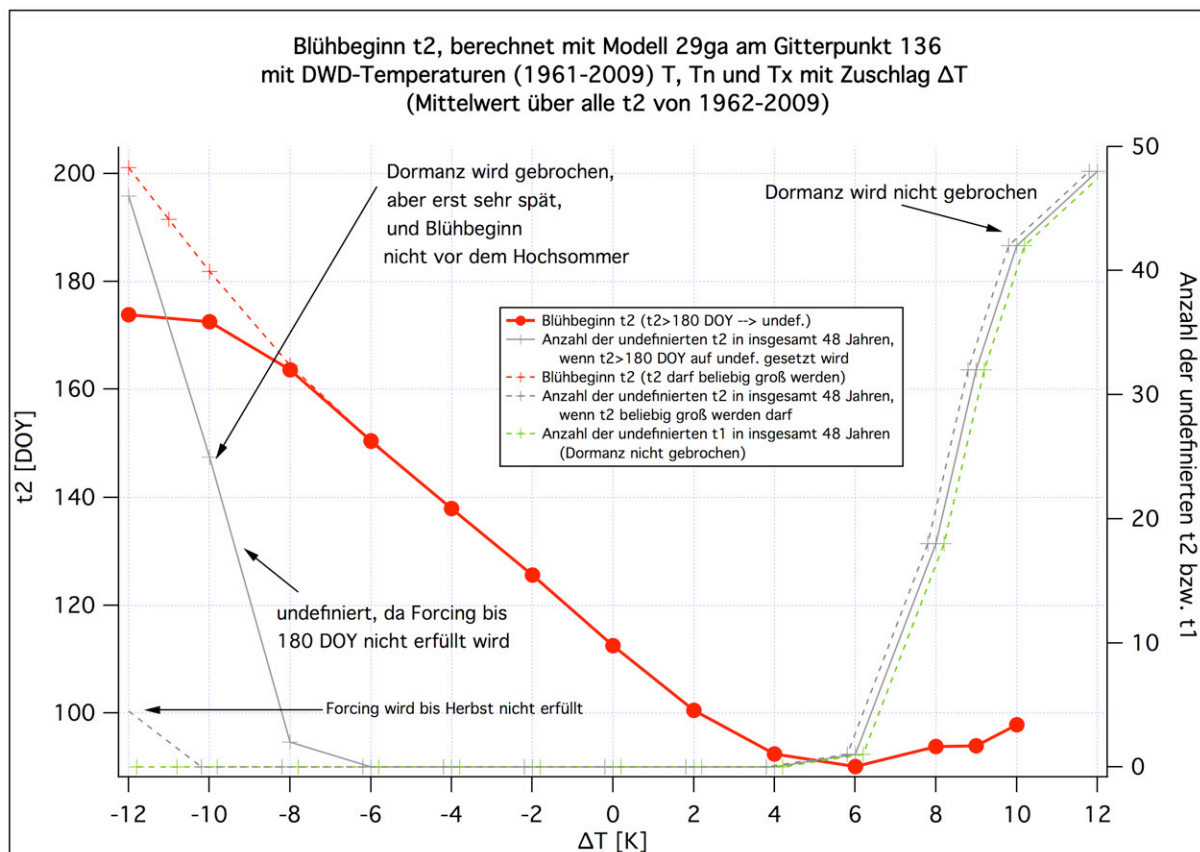


Abbildung 4.33: Blühbeginn t_2 , berechnet mit Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term) für den Apfel am Gitterpunkt 136 mit DWD-Temperaturen und *Temperaturzuschlag* ΔT zu T , T_n und T_x . Mittelwert über alle Jahre von 1962-2009.

Berücksichtigt man auch Blühbeginnstermine nach dem 30. Juni, so erhält man die gestrichelte rote Kurve. Im kalten Bereich verspätet sich der Blühbeginn nun immer weiter. Ab $\Delta T \leq -12 \text{ K}$ treten aber bereits einige Jahre auf, in denen wegen der extrem kalten Witterung bis zum Herbst des *Folgejahres* keine Blühbeginn berechnet wird, da

die Forcingsumme das geforderte Forcing Requirement F^* nicht erfüllt (grau gestrichelte Kurve). Im hier dargestellten negativen ΔT -Bereich wird die Dormanz immer gebrochen (t_1 existiert), für $\Delta T > 6$ K sind aber alle undefinierten t_2 -Werte auf die Nichtbrechung der Dormanz zurückzuführen (die grau gestrichelte Kurve ist mit der grün gestrichelten identisch).

Die zu Abbildung 4.33 gehörigen Dormanzbrechungstermine t_1 sind in **Abbildung 4.34** dargestellt. In der Gegenwart ($\Delta T \approx 0$ K) liegen diese Termine am Jahresbeginn auf minimalem Niveau. Die t_1 -Werte steigen an (d. h. die Release of Dormancy verspätet sich) sowohl bei ansteigendem als auch bei sinkendem Temperaturniveau. Obwohl kleinere Temperaturen zwar zu erheblich späteren t_1 -Werten führen, wird die Dormanz für alle $\Delta T \geq -12$ K in allen Jahren gebrochen. Erhöhte Temperaturen erzeugen zwar eine weniger starke Verspätung. Dann treten aber auf Grund der hohen Temperaturen bereits für $\Delta T \geq 6$ K viele Jahre ganz ohne Dormanzbrechung auf (grün gestrichelte Kurve).

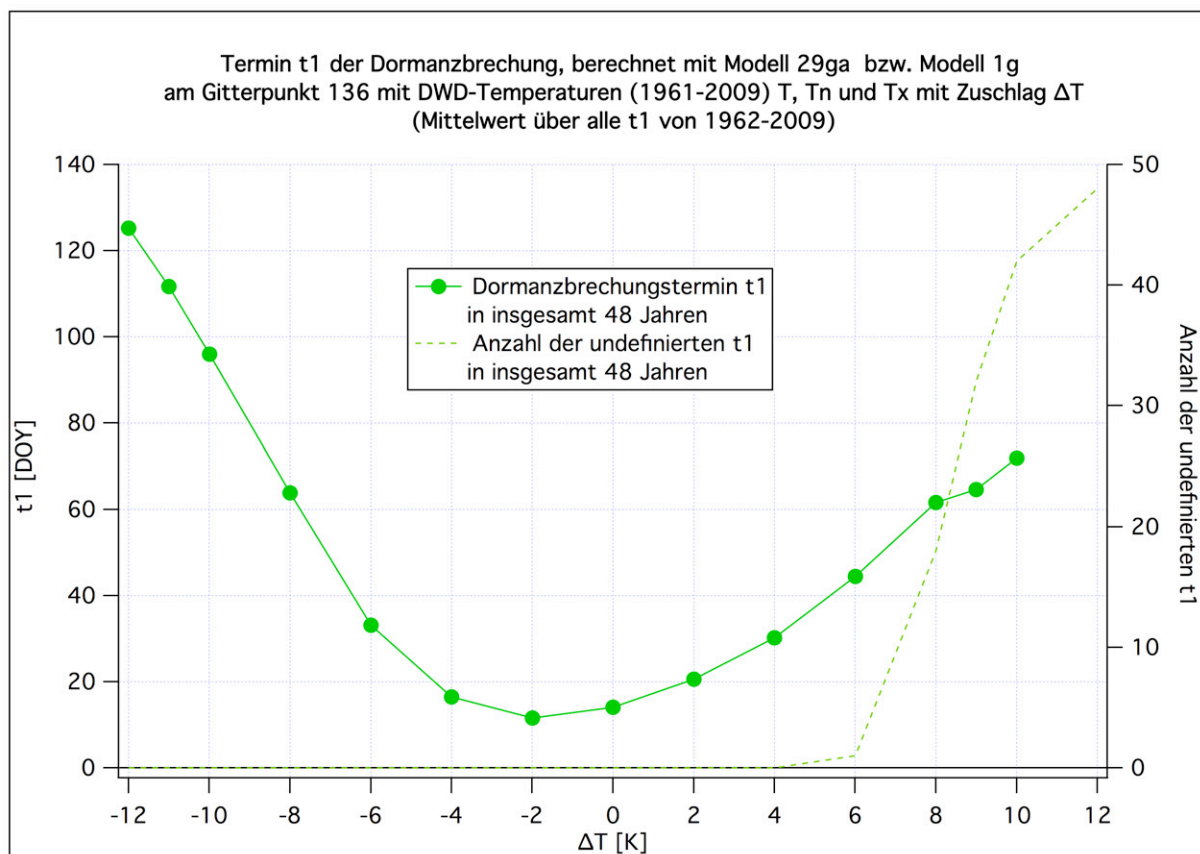


Abbildung 4.34: Termin der Dormanzbrechung t_1 , berechnet mit Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term) für den Apfel am Gitterpunkt 136 mit DWD-Temperaturen und *Temperaturzuschlag* ΔT zu T , T_n und T_x . Mittelwert über alle Jahre von 1962-2009.

4.6.5.4 Mögliche Konsequenzen des Daylength-Terms auf andere Modelltypen (Alternating und Parallel Modell)

Häufig findet man in phänologischen Modellen Ansätze der Form

$$F^* = a \exp(b S_c(t_2)) \quad (4.95)$$

oder auch

$$F^* = a \exp(b C^*), \quad (4.96)$$

z. B. im Alternating Modell und verschiedenen Parallel Modellen (siehe z. B. [Chuine et al., 1998](#), [Chmielewski et al., 2009a](#), Kap. 3.7 und [Harrington et al., 2010](#), Fig. 5).⁸⁴ Diese bewirken bei z. B. negativem b , dass kleine F^* verwendet werden, wenn große Chilling-Summen $S_c(t_2)$ [vgl. Gleichung (4.36)] im Lauf des Winters/Frühlings akkumuliert wurden. Umgekehrt kann ein unzureichender Kältereiz durch ein größeres Forcing kompensiert werden. Dies wurde inzwischen auch experimentell bestätigt ([Murray et al., 1989](#)). Letzterer Fall kann leicht im Falle des Klimawandels zum Tragen kommen. Im Prinzip stellt dieses Vorgehen aber nur eine nachträgliche Bias-Korrektur der t_2 -Vorhersagen bei den *alten*, reinen Forcing-Modellen (ohne DAYLENGTH-Korrektur) dar. Das erkennt man leicht wie folgt:

Verwendet man eines der heutzutage als verlässlich angesehenen Chilling-Modelle wie z. B. das *Positive Utah Model* (Modell 1f) [Gleichung (4.41)], das *Dynamic Model* (Modell 1g) [Gleichung (4.42) ff.] oder auch die (noch nicht renommierte) Methode von [Harrington et al.](#), so wird in relativ kühlen Regionen und auch in temperierten Klimaten der Erde wie z. B. in Hessen die Chilling-Summe $S_c(t_2)$ ⁸⁵ in besonders warmen Wintern/Frühjahren besonders groß. Denn z. B. in Modell 1f werden nur dann Chilling-Beiträge akkumuliert, wenn $1.5 \text{ °C} \leq T_{ih} < 12.5 \text{ °C}$ gilt. In solchen warmen Jahren liegt aber im Allgemeinen t_2 sehr früh. Wie die Diskussion der Residualanalyse auf Seite 83 gezeigt hat, werden besonders frühe Termine aber vom Modell ohne DAYLENGTH-Term als *zu früh* vorhergesagt. Optimiert man nun ein *Alternating Model*, welches als Chilling-Anteil das Modell 1f oder 1g verwendet, so erhält man ein positives b ⁸⁶. Da a immer positiv ist, bedeutet das, dass großen $S_c(t_2)$ große F^* zugeordnet werden. Da F^* nun gegenüber dem reinen Forcing-Modell vergrößert wird, verschiebt sich der zu früh vorhergesagte Blühbeginn nach hinten zu korrekteren Werten hin.

In wesentlich wärmeren Regionen als in Hessen wird $S_c(t_2)$ in besonders kalten Wintern besonders groß. Dort ist das von den reinen Forcing-Modellen ohne DAYLENGTH-Term vorhergesagte t_2 zu spät, denn besonders späte Termine werden als *zu spät* vorhergesagt. Die Optimierung der Modellparameter ergibt dort aber ein negatives b , was über Gleichung (4.95) nun zu verkleinerten F^* führt. Diese bewirken im *Alternating Model* aber eine Verfrühung des vorher zu spät vorhergesagten Termins.

Die Einführung des DAYLENGTH-Terms macht das eben beschriebene Vorgehen zumindest zum großen Teil überflüssig, da kaum noch systematische Fehler bei der Vorher-

⁸⁴ a und b sind hier neue Modellparameter. Diese Werte haben nichts mit den Parametern in Gleichung (4.78) zu tun!

⁸⁵ Im Alternating Model wird die Chilling-Summe nicht nur bis zur Release of Dormancy t_1 , sondern bis zum Blühbeginn t_2 aufsummiert! Bei [Harrington et al. \(2010\)](#) wird vom 1. November bis zum 21. März aufsummiert.

⁸⁶ Bei den einfacheren Chilling-Modellen, die nicht mit Stundenschritten, sondern Tagesschritten arbeiten, ist das allerdings nicht zwingend der Fall. Diese Modelle sind aber inzwischen obsolet.

sage auftreten und frühe Termine nicht systematisch zu früh und späte nicht systematisch zu spät vorhergesagt werden.

Inzwischen wurden die Verbesserungen durch den DAYLENGTH-Term in einem anderen Projekt [CLIMARK (Climate Change Impact Assessments for International Market Systems); siehe z. B. Matzneller et al., 2011 und Matzneller et al., 2013] bei der Sauerkirsche auch anhand von externen Validierungen bestätigt. Die Absenkung des RMSE-VER fiel dort z. T. noch wesentlich größer aus als in Tabelle 4.9 (30 %–50 %).⁸⁷ Zudem waren die für einen Standort in Deutschland optimierten Modelle an vielen weiteren Standorten in Europa und einem Standort in den USA (Michigan) einsetzbar.

Das verbesserte phänologische Modell konnte sogar erfolgreich auf den Legebeginn der Kohlmeise angewendet werden und verbesserte die Prognosen dieses Termins erheblich (Chmielewski et al., 2013).

Die Ergebnisse dieses Kapitels und des vorhergehenden Kapitels 4.6.4 sowie einige zusätzliche Ergebnisse (z. B. über das gemeinsame Konfidenzintervall von T_{BF} und F^* , welches sich durch den DAYLENGTH-Term drastisch verkleinert) wurden inzwischen publiziert (Blümel & Chmielewski, 2012).

4.6.6 Optimierung für verschiedene Fruchtarten

Bei den ersten Versuchen, und für einige Fallbeispiele (wie z. B. für Abbildung 4.30), wurden die Modellparameter (C^* , T_{BF} , F^* ; [EXPO; [EXPO2]]) „schrittweise“ optimiert: Das bedeutet, dass zuerst „alle“ Parameter gleichzeitig für jeden Gitterpunkt einzeln optimiert wurden. Man erhält dann für jeden Gitterpunkt ein leicht unterschiedliches, optimales Modell. Um ein Gebietsmodell zu finden, wurde dann ein Parameter, z. B. EXPO über alle Gitterpunkte gemittelt. Bei der folgenden Optimierung wurde EXPO auf diesen konstanten Mittelwert gesetzt und es wurden nur die restlichen Parameter optimiert. Nun wird der nächste Parameter über alle Gitterpunkte gemittelt und bei der folgenden, erneuten Optimierung konstant gehalten. So fährt man fort, bis man optimale Mittelwerte aller Parameter gefunden hat. Der Nachteil ist, dass man bei einem 4 Parametermodell (EXPO, C^* , F^* , T_{BF}) vier Optimierungsläufe auf dem gesamten Raster durchführen muss, sowie einen weiteren Verifikationslauf mit dem gesamten, optimierten Parametersatz. Bei Nutzung von (4.94) sind sogar fünf Optimierung-Läufe (ein zusätzlicher für EXPO2) notwendig.

Um die Rechenzeit zu beschleunigen (und um den tatsächlich optimalen Parametersatz zu finden⁸⁸), wurde schließlich die Rasteroptimierung (globales Modell) eingeführt, mit deren Hilfe alle unten angegebenen optimalen Parameter berechnet wurden: Bei dieser Methode wird die quadratische Fehlersumme nicht separat für jeden Gitterpunkt nur über die Jahre gebildet, sondern der quadratische Fehler wird sowohl über die Jahre (am festen Gitterpunkt) als auch über alle Gitterpunkte gebildet. Erst danach wird durch die Anzahl der (Jahre x Gitterpunkte) dividiert und die Wurzel gezogen, so dass man den $RMSE_{ges} = f(EXPO, C^*, F^*, T_{BF}, \dots)$ erhält. Derjenige Parametersatz ist optimal, welcher den kleinsten $RMSE_{ges}$ ergibt. Bei dieser Methode ist es nicht notwendig, die

⁸⁷ Optimiert man die Modelle nicht für das gesamte Gebiet, sondern jeweils für einzelne Gitterpunkte oder sehr kleine Gebiete, so wird der RMSE-VER gegenüber der Version ohne DAYLENGTH-Term noch wesentlich stärker verkleinert.

⁸⁸ Bei der „schrittweisen“ Methode ist leider nicht sichergestellt, ob die schrittweise gemittelten Parameter tatsächlich den minimalen, mittleren RMSE über alle Rasterpunkte ergeben.

Parameter nacheinander zu optimieren. Hat man den kleinsten RMSE_{ges} mit zugehörigem Parametertupel gefunden, so entspricht dieses Tupel dem optimalen Parametersatz, da der RMSE_{ges} bereits (*ungefähr*) dem über das Raster gemittelten RMSE entspricht und dieser Wert dann den absoluten Minimalwert darstellt.

Die Optimierung und Verifizierung der Modelle konnte nur über den Zeitraum 1962-2009 vorgenommen werden, da vor 1961 keine Beobachtungsdaten des DWD für die Temperatur zur Verfügung standen. Für die Fruchtarten Erdbeere, Pfirsich, Aprikose und Pflaume konnten nur die Jahre 1962-1990 verwendet werden, da nach 1990 zu wenige oder gar keine phänologische Beobachtungen vorlagen.

Die folgenden **Tabellen 4.10** bis **4.12** zeigen die mit Rasteroptimierung und mit Hilfe der odd-even-Methode (vgl. Seite 61 in Kapitel 4.6.1.2) gewonnenen, optimalen Parametersätze für die 9 betrachteten Fruchtarten (vgl. auch **Tabelle 4.5**; beim “Apfel” wurde nur der *frühreife Apfel* verwendet) und die drei Modelle 29ba, 29fa und 29ga. Die Spalte “ C^* [CH]” enthält dieselbe Größe wie die Spalte “ C^* [CD, CU, CP]”, nur wurden zur besseren Vergleichbarkeit die Werte von Modell 29ba mit 24, die von Modell 29fa mit $20/24 = 0.8333$ und die von Modell 29ga mit 18 multipliziert, um aus den CD (Chilling Days) bzw. CU bzw. CP (Chilling Portions) Chilling-Hours CH zu erhalten⁸⁹. Für letztere findet man häufig Angaben in der Literatur, die allerdings weit streuen, da sie von der speziellen Sorte abhängig sind.

⁸⁹ Die Umrechnung CU bzw. CP in CH ist nur grob approximativ und gilt auch nur im Mittel über viele Jahre in Hessen!

Tabelle 4.10: Optimale Modellparameter zur Berechnung des **Blühbeginns** für **Modell 29ba** mit DAYLENGTH-Faktor (4.93) [und (4.94) bei Wein], berechnet mit Rasteroptimierung (odd-even-Methode). Bei den ersten 5 Fruchtarten wurde über alle 81 Gitterpunkte im politischen Hessen (bei 0.2°-Auflösung) optimiert. Wein, Pfirsich, Aprikose und Pflaume wurden jeweils über eine Teilmenge der 81 Gitterpunkte optimiert (siehe Fußnoten).^a

Fruchtart	EXPO [1]	EXPO2 [1]	C^* [CD]	C^* [CH]	F^* [PTU ^b]	T_{BF} [°C]	RMSE- OPT [d]	RMSE- VER [d]
Apfel	1.460	0.000	41.30	991	429.20	2.70	3.46	3.80
Sauerkirsche	2.270	0.000	43.21	1037	477.00	2.20	3.14	3.62
Süßkirsche	2.500	0.000	43.08	1034	453.30	1.80	3.17	3.38
Birne	1.440	0.000	24.80	595	370.50	2.80	3.74	4.69
Erdbeere	1.900	0.000	28.71	689	559.80	3.00	3.82	4.61
Wein	1.369	0.129	25.26	606	795.98	7.50	3.01 ^c	4.09 ^c
Pfirsich	1.839	0.000	24.73	594	428.66	1.55	4.39 (4.05) ^d	6.45 (5.74) ^d
Aprikose	1.407	0.000	43.15	1036	274.89	1.47	6.88 (3.65) ^e	10.23 (5.20) ^e
Pflaume	1.160	0.000	43.85	1052	316.74	2.55	3.67 (3.30) ^f	4.79 (4.20) ^f

^a Bei der Optimierung dieses Modells wurde die Tageslänge *Daylength* nur jeden 10. Tag neu berechnet, um Rechenzeit zu sparen. Zur Erzielung optimaler Ergebnisse sollte man bei der Verwendung der in der Tabelle angegebenen Parameter die Tageslänge ebenfalls nur jeden 10. Tag Neuberechnen. Andernfalls erhält man leicht abweichende Ergebnisse. Z. B. wird der mittlere Blühbeginn bei täglicher Neuberechnung der Tageslänge beim Apfel um ca. einen Tag zu früh bestimmt.

^b Da sich die optimalen Werte von F^* durch den DAYLENGTH-Term in (4.93) verändern, wird die Einheit von F^* hier nicht wie bei Formel (4.35) mit GDD, sondern mit PTU (Photo-Thermische Units) bezeichnet.

^c Die angegebenen RMSE sind Mittelwerte nur über die 8 Weinbau-Gitterpunkte. Die Gebietsoptimierung wurde beim Wein ebenfalls nur über die 8 Weinbau-Gitterpunkte durchgeführt. - Der optimierte Wert von C^* ist beim Wein wegen der hohen T_{BF} -Werte (d. h., dass die Wärmesummenakkumulation erst sehr spät einsetzt und t_1 bzw. C^* daher bei der Optimierung nicht ausreichend genau festgelegt sind) sehr unsicher (± 12 CD). Die Vorhersage des Blühbeginntermins hängt von diesem Wert aber glücklicherweise auch nicht sensibel ab, da der Start t_1 des Forcing nur rechtzeitig vor dem Einsetzen hoher Temperaturen erfolgen muss.

^d Die Werte in Klammern sind die RMSE, die sich ergeben, wenn man den Mittelwert des RMSE nur über die 57 Gitterpunkte bildet, die gut mit phänologischen Beobachtungen abgedeckt sind und über die der Pfirsich optimiert wurde. Werte ohne Klammern sind Mittelwerte des RMSE über alle 81 Gitterpunkte für die geraden Jahre (OPT) und ungeraden Jahre (VER).

^e Die Werte in Klammern sind die RMSE, die sich ergeben, wenn man den Mittelwert des RMSE nur über die 15 Gitterpunkte bildet, die gut mit phänologischen Beobachtungen abgedeckt sind und über die die Aprikose optimiert wurde. Werte ohne Klammern sind Mittelwerte des RMSE über alle 81 Gitterpunkte für die geraden Jahre (OPT) und ungeraden Jahre (VER).

^f Die Werte in Klammern sind die RMSE, die sich ergeben, wenn man den Mittelwert des RMSE nur über die 44 Gitterpunkte bildet, die gut mit phänologischen Beobachtungen abgedeckt sind und über die die Pflaume optimiert wurde. Werte ohne Klammern sind Mittelwerte des RMSE über alle 81 Gitterpunkte für die geraden Jahre (OPT) und ungeraden Jahre (VER).

Tabelle 4.11: Optimale Modellparameter zur Berechnung des **Blühbeginns** für **Modell 29fa** mit DAYLENGTH-Faktor (4.93) [und (4.94) bei Wein], berechnet mit Rasteroptimierung (odd-even-Methode). Bei den ersten 6 Fruchtarten wurde über alle 81 Gitterpunkte im politischen Hessen (bei 0.2°-Auflösung) optimiert. Wein, Pfirsich, Aprikose und Pflaume wurden jeweils über eine Teilmenge der 81 Gitterpunkte optimiert (siehe Fußnoten).^a

Fruchtart	EXPO [1]	EXPO2 [1]	C^* [CU]	C^* [“CH”]	F^* [PTU ^b]	T_{BF} [°C]	RMSE- OPT [d]	RMSE- VER [d]
Apfel	1.440	0.000	1219	1016	405.70	2.90	3.49	4.35
Sauerkirsche	2.310	0.000	1214	1011	464.50	2.40	3.16	3.84
Süßkirsche	2.530	0.000	1234	1028	435.50	2.00	3.16	3.62
Birne	1.190	0.000	1279	1066	341.20	2.50	3.77	4.92
Erdbeere	1.850	0.000	1560	1300	527.90	2.90	3.87	4.42
Wein	1.385	0.122	869	724	788.63	7.58	3.01 ^c	4.21 ^c
Pfirsich	1.688	0.000	952	794	413.85	1.64	4.59 (4.25) ^d	6.44 (5.77) ^d
Aprikose	1.563	0.000	1396	1163	201.67	2.55	6.95 (4.03) ^e	9.96 (6.30) ^e
Pflaume	0.808	0.000	1473	1228	249.34	3.04	3.61 (3.26) ^f	5.25 (4.76) ^f

In **Tabelle 4.12** sind bei Wein zusätzlich noch die optimalen Parameter zur Berechnung des Termins des *Austriebsbeginns* (BA) aufgeführt. Diese werden später zur Berechnung der Frostschäden bei Wein in Kapitel 4.8 benötigt. Die RMSE sind hierbei relativ groß, da die gerasterten BA-Termine aus vielen, z. T. widersprüchlichen Stationsmeldungen bestehen, die auf engstem Raum stark streuen, und daher sehr unsicher sind. Die Stationsdichte nahm außerdem ab 1990 stark ab. Eine Optimierung über alle Gitterpunkte im Hessenrechteck (auch über die außerhalb vom politischen Hessen), an denen intensiv Weinbau betrieben wird (vgl. Abbildung 4.19), ergab ähnliche Modellparameter und ebenso “schlechte” RMSE.

Ein Vergleich der RMSE-VER-Spalten der Tabellen 4.10 bis 4.12 zeigt, dass das Modell 29ga tendenziell bessere Ergebnisse liefert als die beiden anderen Modelle.

Zu einigen der oben angegebenen Parametern wurden auch mit der Methode aus Kapitel 18 von [Motulsky & Christopoulos \(2003\)](#) mit Hilfe der 300 000 Parametertupel und den zugehörigen RMSE-OPT, die beim Simulated Annealing getestet wurden, Konfidenzintervalle berechnet. Die Konfidenzintervalle sind leider auf Grund der Kollinearität⁹⁰ der Parameter sehr breit. Diese Ergebnisse können im Rahmen dieses Berichts leider nicht ausführlich dargestellt werden. Einige dieser Ergebnisse findet man in [Blümel & Chmielewski \(2012\)](#).

Tabelle 4.13 zeigt die rasteroptimierten Parameter für Modell 12a beim frühreifen Apfel. Die Werte in der oberen Zeile ergeben sich ohne den DAYLENGTH-Faktor (4.93), die unteren mit diesem Faktor. Mit DL-Faktor ist der RMSE-VER um 1.35 d kleiner. Der Startzeitpunkt t_1 der Forcing-Akkumulation fällt auf den 4. Januar (4 DOY) und

⁹⁰ Große F^* können durch kleine T_{BF} kompensiert werden usw.

Tabelle 4.12: Optimale Modellparameter zur Berechnung des **Blühbeginns** für **Modell 29ga** mit DAYLENGTH-Faktor (4.93) [und (4.94) bei Wein], berechnet mit Rasteroptimierung (odd-even-Methode). Bei den ersten 5 Fruchtarten wurde über alle 81 Gitterpunkte im politischen Hessen (bei 0.2°-Auflösung) optimiert. Wein, Pfirsich, Aprikose und Pflaume wurden jeweils über eine Teilmenge der 81 Gitterpunkte optimiert (siehe Fußnoten).^a

Fruchtart	EXPO [1]	EXPO2 [1]	C^* [CP]	C^* [“CH”]	F^* [PTU ^b]	T_{BF} [°C]	RMSE-OPT [d]	RMSE-VER [d]
Apfel	1.280	0.000	70.00	1260	425.40	2.40	3.25	3.76
Sauerkirsche	2.020	0.000	74.00	1332	455.10	2.00	2.99	3.56
Süßkirsche	2.220	0.000	74.00	1332	420.50	1.70	2.88	3.26
Birne	1.040	0.000	69.20	1246	371.80	1.90	3.38	4.22
Erdbeere	1.900	0.000	45.00	810	573.20	2.90	3.85	4.45
Wein	1.353	0.130	64.79	1166	788.07	7.49	3.01 ^c	4.09 ^c
Wein (Beginn Austrieb)	1.059	0.394	71.83	1293	382.04	3.22	4.49 ^c	6.27 ^c
Pfirsich	1.749	0.000	43.98	792	445.29	1.30	4.91 (4.06) ^d	5.92 (5.31) ^d
Aprikose	1.358	0.000	69.22	1246	240.90	1.74	7.02 (3.76) ^e	9.20 (5.29) ^e
Pflaume	1.125	0.000	68.78	1238	345.95	2.04	3.41 (3.05) ^f	4.58 (4.09) ^f

liegt damit wesentlich früher als der 23. Februar (54 DOY), der sich ohne DL-Faktor als optimales t_1 ergibt.

Tabelle 4.13: Optimale Modellparameter zur Berechnung des **Blühbeginns** für **Modell 12a** ohne und mit DAYLENGTH-Faktor (4.93) für Apfel (frühreif), berechnet mit Rasteroptimierung (odd-even-Methode) über alle 81 Gitterpunkte im politischen Hessen (bei 0.2°-Auflösung).^a

Fruchtart	EXPO [1]	F^* [GDD bzw. PTU]	T_{BF} [°C]	t_1 [DOY]	RMSE-OPT [d]	RMSE-VER [d]
Apfel ohne DL-Term	0.000	272.77	2.47	54	3.64	4.98
Apfel mit DL-Term	1.355	449.60	2.29	4	3.24	3.63

In **Tabelle 4.14** sind die optimalen Modellparameter für Modell 10a angegeben, um den Termin des Blühendes aus dem Termin des Blühbeginns berechnen zu können.

Für Erdbeere, Aprikose und Pfirsich existieren keine phänologischen Beobachtungen für den Termin des Blühendes, so dass das Modell 10a nicht geeicht werden konnte und keine

Tabelle 4.14: Optimale Modellparameter zur Berechnung des **Blühendes** aus dem Blühbeginn für **Modell 10a** (ohne DAYLENGTH-Faktor), berechnet mit Rasteroptimierung (odd-even-Methode) über alle 81 Gitterpunkte im politischen Hessen (bei 0.2°-Auflösung).

Fruchtart	F^* [GDD]	T_{BF} [°C]	RMSE-OPT [d]	RMSE-VER [d]
Apfel	232	-5.9	2.28	2.25
Sauerkirsche	214	-5.6	2.18	2.20
Süßkirsche	208	-5.2	2.32	2.37
Birne	208	-5.2	2.56	2.29
Wein	289	-9.3	2.85 ^a	2.44 ^a
Pflaume	184	-4.7	2.21 (2.17) ^b	2.23 (2.31) ^b

^a Die angegebenen RMSE sind Mittelwerte nur über die 8 Weinbau-Gitterpunkte. Die Gebietsoptimierung wurde beim Wein ebenfalls nur über die 8 Weinbau-Gitterpunkte durchgeführt.

^b Die Werte in Klammern sind die RMSE, die sich ergeben, wenn man den Mittelwert des RMSE nur über die 44 Gitterpunkte bildet, die gut mit phänologischen Beobachtungen abgedeckt sind und über die die Pflaume optimiert wurde. Werte ohne Klammern sind Mittelwerte des RMSE über alle 81 Gitterpunkte für die geraden Jahre (OPT) und ungeraden Jahre (VER).

Prognosen für das Blühende vorgenommen werden konnten.

Tabelle 4.15 listet die optimalen Parameter für die Modelle 10a-R bzw. 12a-R, die jeweils im Reifemodus ausgeführt werden müssen [Zusatz “-R” im Modellnamen; vgl. Gleichungen (4.48) und (4.49)], für die Bestimmung des *Beginns der Pflückreife*. Die Modelle wurden im Gegensatz zu den Modellen für den Blühbeginn nicht über die 81 Gitterpunkte in Hessen, sondern nur über die 19 signifikanten Obstanbaugitterpunkte optimiert. Der Grund hierfür ist, dass die Beobachtungen für den Beginn der Pflückreife räumlich nicht so gut abgedeckt sind wie die für den Blühbeginn und die Reifeberechnung wesentlich sensibler auf z. B. stark in der Höhenlage abweichende Gitterpunkte reagiert.

Der Suchbereich für t_1 in Modell 12a-R wurde auf den Bereich 1 DOY ... 60 DOY begrenzt, da die Implementierung der hier benutzten phänologischen Modelle für den Blühbeginn und den Beginn der Pflückreife in das Bodenwasser- und Ertragsmodell SIM-WASER nur möglich ist, wenn t_1 vor dem Blühbeginn liegt. In den meisten Fällen ergab die Optimierung mit einem Suchbereich für t_1 “bis zum Reifetermin” auch Werte kleiner als 60 DOY. In allen anderen Fällen hing die Modellperformance fast nicht von der exakten Wahl von t_1 ab, oder das Modell arbeitete durch leichte Veränderungen der anderen Parameter genauso gut wie mit größeren t_1 -Werten.

Bei der Birne (früh- und spätreif) sind die Prognosen des optimierten Modell 12a-R so schlecht, dass an einzelnen Gitterpunkten das einfache *Nullmodell*⁹¹ besser abschneidet als das optimierte Modell 12a-R. Erst wenn man mehrere Gitterpunkte unterschiedlicher Höhenlagen betrachtet, und für diese ein einziges gemeinsames Modell erstellen möchte, schneidet Modell 12a-R besser ab. Für zukünftige Prognosen wäre die Nutzung des Nullmodells auch nicht möglich, da der Mittelwert \bar{t}_3 für z. B. 2071-2100 nicht bekannt ist.

Die 2. Spalte in Tabelle 4.15 gibt an, welches der beiden in Frage kommenden Mo-

⁹¹ Reifetermin $t_3(j)$ im Jahr $j = \bar{t}_3$, wobei \bar{t}_3 der zeitliche Mittelwert über den Optimierungszeitraum ist.

Tabelle 4.15: Optimale Modellparameter zur Berechnung des Beginns der **Pfückreife** für **Modell 10a-R** bzw. **Modell 12a-R** (im Reifemodus) [Gleichungen (4.48) und (4.49)] für verschieden Fruchtarten, berechnet mit Rasteroptimierung (odd-even-Methode) über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bei Wein: 8 Weinbaugitterpunkte) in Hessen (bei 0.2°-Auflösung). Für den Pfirsich wurden zur Berechnung des Reifetermins in SIMWASER (Kapitel 4.10.3.2) die Parameter der frühreifen Pflaume und für die Aprikose die des frühreifen Apfels verwendet, da keine ausreichende Beobachtungsdichte für die Reifetermine dieser Obstarten vorlag.

Fruchtart	Modell	EXPO3 [1]	F^* [K ^{EXPO3} d]	T_{BF} [°C]	t1 [DOY]	RMSE- OPT [d]	RMSE- VER [d]
Apfel frühreif	M12a-R	0.996	4427.8	-13.86	31.9	5.76	5.63
Apfel spätreif	M12a-R	0.546	1551.7	-20.00	47.3	5.78	5.47
Sauerkirsche	M10a-R	0.232	115.8	8.67		4.48	4.88
Süßkirsche frühreif	M10a-R	0.547	180.7	6.39		6.21	6.13
Süßkirsche spätreif	M10a-R	0.486	188.2	7.12		4.08	4.22
Birne frühreif	M12a-R	0.875	3377.1	-15.40	59.9	7.92	8.96
Birne spätreif	M12a-R	0.774	3248.8	-20.00	55.0	6.93	7.48
Erdbeere ^a	M10a-R	0.588	131.0	5.24		3.43	3.10
Wein (Reife) ^b	M10a-R	0.388	284.9	-12.43		7.09	7.52
Wein (Lese)^c	M12a-R	0.974	5551.5	-14.21	59.0	5.87	6.06
Pflaume frühreif ^d	M12a-R	0.890	2170.0	-4.72	40.0	5.67	6.47
Pflaume spätreif ^e	M12a-R	1.000	5411.2	-13.61	48.0	4.61	4.49

^aOptimierung über alle 19 Obstanbaugitterpunkte, aber nur über die Jahre 1962-1990.

^bOptimierung über die 8 Weinbaugitterpunkte und über die Jahre 1991-2009. Die nachfolgenden Auswertungen erfolgen aber über alle Jahre von 1962-2009 bzw. 1971-2000, da der *Blühbeginn* für alle diese Jahre vorliegt. - Ein fast äquivalentes Modell erhält man übrigens auch mit $EXPO3 = 0.114$, $F^* = 95.0 \text{ K}^{0.114}d$, $T_{BF} = 10.0 \text{ °C}$ (Begründung: Siehe Kapitel 4.6.3).

^cOptimierung über die 8 Weinbaugitterpunkte und über alle Jahre von 1962-2009.

^dOptimierung nur über die Jahre 1962-1990.

^eOptimierung nur über die Jahre 1962-1990.

delle bei der Reifeberechnung besser abschneidet und daher benutzt werden sollte. Um das zu entscheiden, wurden Rechnungen mit beiden Modellen durchgeführt und dann das Modell gewählt, welches den kleineren RMSE-VER (bzw. den kleineren AIC_c ; vgl. Abschnitt 4.6.5.1) erzielte. In fast allen Fällen war die Entscheidung sehr leicht: Bei allen Fruchtarten mit einer mittleren Reifeperiode von über 90 Tagen im Zeitraum 1971-2000 (siehe *DWD-Zeile* in den Tabellen des Anhang F) schnitt das Modell 12a-R, in dem der Starttermin der Wärmesummenakkumulation nicht vom Blühbeginnstermin abhängt, wesentlich besser ab als das Modell 10a-R. Fruchtarten mit einer Reifeperiode von unter 90 Tagen hängen dagegen stärker vom Termin des Blühbeginns ab und ihr Reifetermin wird besser durch Modell 10a-R beschrieben.

Die stark negativen T_{BF} -Werte für Modell 12a-R haben natürlich keine physiologische Bedeutung, sondern stellen reine Eichkonstanten dar. Eine genauere Analyse der Wirkung von negativen bzw. sehr kleinen T_{BF} findet man in Kapitel 4.6.3. Bei Bedarf kann man

die T_{BF} mit Gleichung (4.69) (nach Vorgabe eines beliebigen $T_0 > T_{BF}$) und die F^* mit Gleichung (4.68) auf die alternativen Parameter C und F^{**} umrechnen und dann die alternative Formel (4.70) (mit t_1 anstelle von t_2 als unteren Summationsindex) anstelle von (4.49) verwenden.

4.6.7 Fazit

Die originalen phänologischen Modelle *für den Blühbeginn* weisen mehrere systematische Defizite auf: Wenn man physiologisch sinnvolle Parameterwerte für t_1 und T_{BF} verwendet, so folgen diese Modelle bei steigendem Temperaturniveau einem eingebauten Trend für den Blühbeginn t_2 , der praktisch nicht durch die Parameterwerte zu beeinflussen ist und der vom Absolutbetrag her zu groß ist. Daher ergeben sich große Root Mean Square Errors (RMSE). Die Optimierung von Chilling-Forcing-Modellen führte in vielen Fällen auf viel zu hohe Werte für das Chilling-Requirement C^* . Die Einführung eines Terms, der von der Tageslänge abhängt, in die Forcing-Funktion beseitigte alle diese Probleme fast vollständig und führte zu erheblich kleineren RMSE bei der Verifikation. Mit diesem Term können nun auch für die Prognosen bis 2100 echte Chilling-Forcing-Modelle eingesetzt werden, die gegenüber den reinen Forcing-Modellen den Vorteil haben, dass sie den Einfluss des *Chilling* auf den zukünftigen Blühtermin berücksichtigen. Die in Zukunft wärmer werdenden Wintertemperaturen können nämlich dazu führen, dass es, besonders im Modell 29ba, zu einer starken Verspätung des Dormanzbrechungstermins und damit einhergehend auch zu einer Verschiebung des Blühbeginns kommt. Im Extremfall wird das Chilling-Requirement gar nicht mehr erfüllt.

Problematisch bleibt die Optimierung der Parameter C^* und T_{BC} , besonders an kalten Gitterpunkten. Solange die Winter relativ kalt sind, spielt C^* und T_{BC} für t_2 keine große Rolle. Da bisher keine Beobachtungen für t_1 , sondern nur für t_2 existieren, können C^* und T_{BC} daher nur sehr unsicher bestimmt werden. In einem wärmeren Klima bzw. bei Prognosen bis 2100 können die Werte beider Parameter aber merkliche Auswirkungen auf den Blühtermin t_2 haben.

Leider zeigte sich, dass auch die herkömmlichen Modelle *zur Berechnung des Beginns der Pflückreife* vor allem für die Obstarten mit relativ langer Reifeperiode (≥ 90 Tage) sehr schlechte Vorhersagen liefern und die vorhergesagte Verfrühung des Reife-termis viel zu groß ist. Erst wenn man extrem negative Schwellenwerttemperaturen T_{BF} zulässt und/oder noch einen Exponenten $EXPO3$ einführt und ggf. den Reife-termis vom Blühbeginn entkoppelt (d. h. wenn man Modell 12a-R [Gleichung (4.49)] anstelle von Modell 10a-R [Gleichung (4.48)] verwendet), erhält man realistische Trends für den Reife-termis. Die Schwellenwerttemperatur T_{BF} ist in diesem Fall nicht mehr als physiologische Größe zu verstehen, sondern stellt nun nur noch eine Eichkonstante dar, wie die Formeln (4.68) bis Formeln (4.70) zeigen. Die “neuen” Modelle erklären aber, vor allem bei der Birne, nur einen geringen Anteil der Varianz, so dass hier noch Forschungsbedarf für Verbesserungen besteht und die Ergebnisse für die Reife-termine ziemlich unsicher sind.

4.7 Die Wahrscheinlichkeit P_D für unvollständige Brechung der Winterruhe (Dormanz) und der Dormanzschaden s_D

Zur Bestimmung der “Wahrscheinlichkeit für die unvollständige Brechung der Dormanz” werden alle Jahre gezählt, in denen der Termin t_1 der Dormanzbrechung (*Release of Dor-*

mancy) später als ein vorzugebender Stichtag im Jahr (t_s) liegt. Die Anzahl der Jahre, in denen das der Fall ist, geteilt durch die Anzahl der insgesamt betrachteten Jahre, ist dann ein Schätzwert für diese Wahrscheinlichkeit. Sie wird im Folgenden als NoReleaseProbx (mit $x = t_s$) oder auch kürzer als P_D abgekürzt.

Zur Berechnung von t_1 wurden die drei in Kapitel 4.6.1.2 beschriebenen Modelle 1b (Weinberger-Eggert model), 1f (Positive Utah Model) und 1g (Dynamic Model) verwendet. Die für diese Modelle benötigten Stundenwerte der Temperatur wurden wieder mit der Methode von Linsley-Noakes et al. (1995) bzw. Linvill (1990) aus T_x und T_n berechnet. Für das Chilling-Requirement C^* wurden verschiedene, feste Werte vorgegeben, die bestimmten Fruchtarten/-sorten zugeordnet werden können.⁹²

Wählt man $t_s = 200$, so werden nur die Jahre gezählt, in denen überhaupt keine Dormanzbrechung stattfindet bzw. in denen die Dormanzbrechungstermine undefiniert sind. In den Ergebnis-Abbildungen wird der Stichtag auch häufig als $t_s + 365$ d angegeben, um zu betonen, dass sich dieser Termin auf das Folgejahr nach dem Starttermin der Chilling-Akkumulation bezieht. Für den Starttermin wurde immer der 1. September (244 DOY) verwendet.

Die Berechnung der Konfidenzintervalle erfolgte genauso wie beim Frost (siehe Kapitel 4.8.1 und auch Kapitel 4.4).

Um den **Schaden** zu bestimmen, der in einem Jahr, in dem die Dormanz nicht oder nur unzureichend gebrochen wird, am Ertrag entsteht, wurde zunächst angenommen, dass dieser 25% beträgt. Man erhält daraus einen mittleren Dormanzschaden s_D^o ⁹³ für das betrachtete Gebiet und den entsprechenden Zeitraum, wenn man die obige Dormanz-Nichtbrechungs-Wahrscheinlichkeit P_D mit 0.25 multipliziert⁹⁴:

$$s_D := s_D^o = P_D \cdot 0.25. \quad (4.97)$$

Die Nichtbrechung der Dormanz kann durch Sortenwechsel umgangen oder auch mit chemischen Mitteln, wie z. B. *Dormex*[®], bekämpft werden. Die Bekämpfungskosten (Material und Personal pro ha) in einem Jahr, in dem die Dormanz nicht gebrochen wird, werden grob mit 232 €/ha/a geschätzt. Die über längere Zeiträume (mehrere Jahre) anfallenden mittleren Kosten K_D pro ha und Jahr erhält man, indem man die 232 €/ha/a mit P_D multipliziert:

$$K_D = P_D \cdot 232 \text{ €/ha/a}. \quad (4.98)$$

Weiterhin wurde bei dieser zuerst verwendeten Methode angenommen, dass bei einer Dormex-Behandlung alle Ertragsschäden vollkommen verhindert werden können, dass also $s_D^m = 0$ gilt ("m" = mit Behandlung). Bei den Rechnungen mit den Gleichungen (4.97) und (4.98) wurde P_D immer bezüglich des Stichtages $t_s = 90$ DOY berechnet.

Die eben erläuterte Methode zur Berechnung des Dormanzschadens hat den Nachteil, dass immer dann, wenn die Dormanz nicht gebrochen wird, der gleiche Schaden auftritt. Es wird nicht unterschieden, ob das Chilling-Requirement C^* nur knapp nicht erreicht wurde, oder ob die Chillingsumme $S_c(t_s)$ [vgl. Gleichung (4.36)] bis zu einem bestimmten Stichtag

⁹² Bei dieser Berechnungsmethode von P_D werden keine Maßnahmen gegen die Nichtbrechung der Dormanz berücksichtigt. D. h., dass P_D die Wahrscheinlichkeit für die Nichtbrechung der Dormanz ist, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

⁹³ Das Superskript "o" soll ausdrücken, dass es sich um den Schaden handelt, der auftritt, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden ("o"=ohne Behandlung).

⁹⁴ s_D hat dann die Einheit $1 = 100\%$.

t_s im Frühjahr noch wesentlich kleiner als C^* war. Verschiedenen Quellen, die sich mit künstlicher Dormanzbrechung mit z. B. Dormex beschäftigen, z. B. die Webseite <http://www.aces.edu/dept/peaches/peachdormex.html> der Auburn University (hier speziell für Pfirsiche), kann man aber entnehmen, dass der Schaden stark davon abhängt, wie groß das Chilling-Defizit $C^* - S_c(t_s)$ ist. Sogar bei Anwendung von Dormex hängt der verbleibende Restschaden s_D^m noch vom Chilling-Defizit zum Zeitpunkt t_s ab! Die auf der Webseite der Auburn University für Pfirsiche mit einem Chilling-Requirement von $C^* = 850$ CH angegebenen Schadenswerte als Funktion des absoluten Chillingdefizits wurden an der HU-Berlin auf das relative Chilling-Defizit d_{rel} bezogen, um die Beziehungen auch auf andere Obstarten mit anderem C^* anwenden zu können. d_{rel} wurde wie folgt definiert:

$$d_{rel} = \frac{C^* - S_c(t_s)}{C^*}. \quad (4.99)$$

Mit dieser Definition ergeben sich folgende Beziehungen für den Schaden s_D^o ohne Maßnahmen

$$s_D^o \approx \begin{cases} 0 \% & \text{für } d_{rel} < 5.88 \% \\ 100 \% \cdot \frac{d_{rel} - 5.88 \%}{29.41 \%} & \text{für } 5.88 \% \leq d_{rel} \leq 35.29 \% \\ 100 \% & \text{für } d_{rel} > 35.29 \% \end{cases} \quad (4.100)$$

und für den Schaden s_D^m mit Einsatz von Dormex (oder ähnlichen Mitteln)

$$s_D^m \approx \begin{cases} 0 \% & \text{für } d_{rel} < 35.29 \% \\ 100 \% \cdot \frac{d_{rel} - 35.29 \%}{23.53 \%} & \text{für } 35.29 \% \leq d_{rel} \leq 58.82 \% \\ 100 \% & \text{für } d_{rel} > 58.82 \%. \end{cases} \quad (4.101)$$

Abbildung 4.35 zeigt den Verlauf beider Funktionen. Der nicht ganz geradlinige originale Verlauf, welcher von der Auburn University angegeben wurde, wurde hier durch die gestrichelte rote Gerade approximiert. Bis zu einem relativen Chilling-Defizit d_{rel} von ca. 6% tritt auch ohne Ergreifung von Gegenmaßnahmen praktisch kein Dormanzschaden auf. Darüber steigt der Dormanzschaden s_D^o linear an, bis er bei $d_{rel} \approx 35\%$ hundert Prozent erreicht. Bei Einsatz von Dormex können Schäden bis $d_{rel} \approx 35\%$ vollständig vermieden werden. Darüber treten trotz Gegenmaßnahmen aber Schäden auf. Ab $d_{rel} \gtrsim 59\%$ tritt trotz Gegenmaßnahmen ein Totalschaden auf.

Der von der Obstart abhängige Stichtag wurde nach

$$t_s = \overline{t_2(\text{DWD})}^{1971-2000} + 2 \cdot s(\text{DWD}) - x \quad (4.102)$$

berechnet. $t_2(\text{DWD})$ ist hierbei der mittlere Blühbeginn⁹⁵ im Zeitraum 1971-2000, der aus DWD-Beobachtungen bestimmt wurde. Die Werte können den Tabellen C.1, C.2 (Spalte DWD, 1971-2000) usw. entnommen werden. Die Standardabweichung $s(\text{DWD})$ des Blühbeginns kann aus dem in den Tabellen in runden Klammern angegebenen 95%-Konfidenzintervallen $Konf95$ bestimmt werden:

$$s(\text{DWD}) \approx \frac{\sqrt{30} \cdot Konf95}{2}. \quad (4.103)$$

⁹⁵ Bei Wein wird für t_2 der mittlere Austriebstermin eingesetzt!

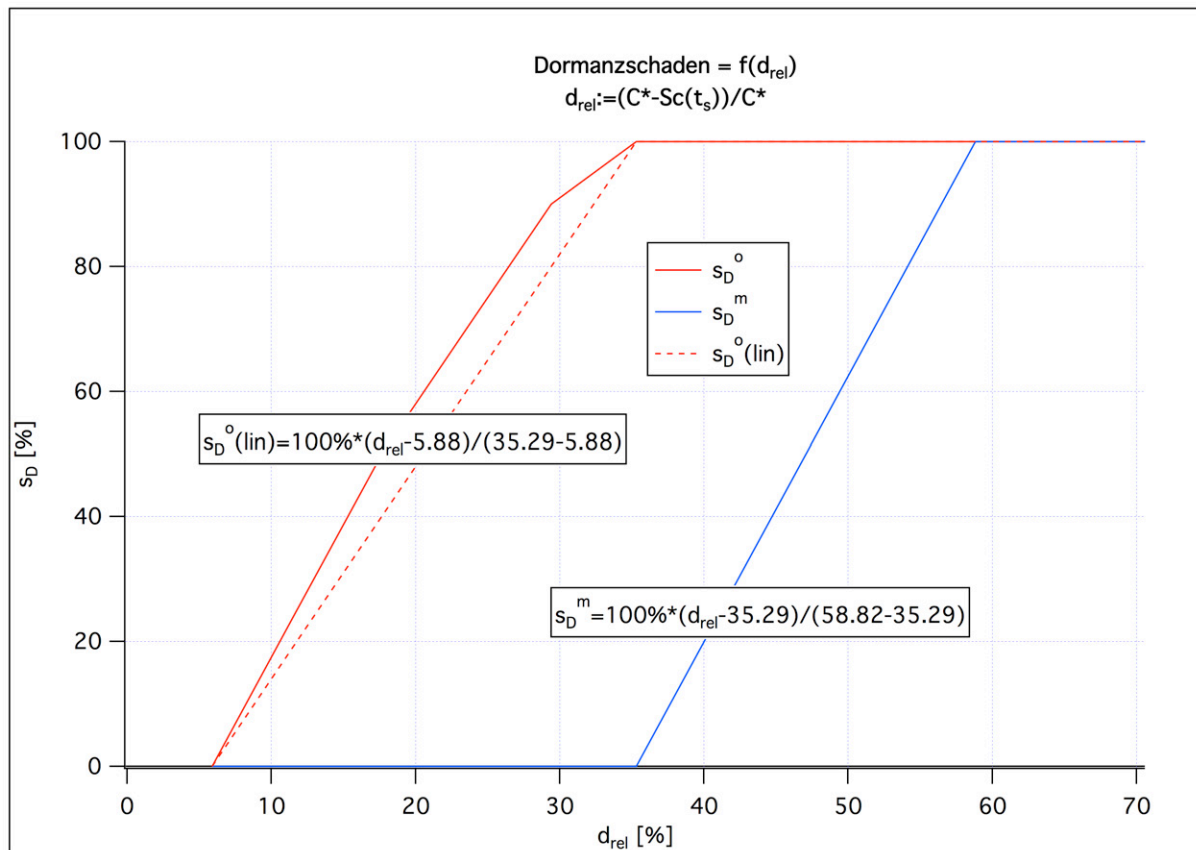


Abbildung 4.35: Dormanzschaden ohne s_D^o und mit s_D^m Gegenmaßnahmen als Funktion des relativen Chilling-Defizits d_{rel}

$\overline{t_2(DWD)}^{1971-2000} + 2 \cdot s(DWD)$ ist dann ungefähr der Tag im Jahr, vor dem bereits im Mittel im Zeitraum 1971-2000 in ca. 97.5% der Fälle der Blühbeginn bei der betrachteten Fruchtart stattfand. Man kann diesen Termin daher als spätesten Blühtermin, der vom Obstbauern toleriert wird und bei dem kein nennenswerter Ertragsschaden auftritt, auffassen. Zieht man nun noch die kürzest mögliche ontogenetische Entwicklungszeit x ab, welche die Knospen nach Brechung der Endodormanz bis zum Blühbeginn benötigen, so erhält man den letztmöglichen Stichtag t_s , an dem die Dormanz gebrochen werden muss, um einen *einigermaßen normalen* Blühverlauf zu gewährleisten. Bei allen Fruchtarten außer der Kirsche wurde $x = 28$ d gesetzt. Bei der Kirsche wurde $x = 21$ d gewählt. Die so geschätzten Werte für t_s sind in der zweiten Spalte der **Tabelle 4.16** gelistet.

Man beachte: Die Wahl des Stichtags t_s nach Gleichung (4.102) ist relativ unsicher. Im Gegensatz zu den hier gemachten Annahmen berechnen die rein sequentiellen Modelle aus Kapitel 4.6.1.2 nur dann einen Blühbeginn, wenn die Dormanz zu irgendeinem Zeitpunkt t_1 vor dem Hochsommer gebrochen wird (d. h., dass $S_c(t_1) \geq C^*$ gelten muss). Andernfalls tritt in den Modellen überhaupt keine Blüte auf. t_1 kann dabei⁹⁶ aber in manchen Jahren sogar im Zeitraum “Mitte April bis Ende Juni” liegen. Trotz dieser extrem späten Termine des *Release of Dormancy* wird dann trotzdem ein regulärer Blühtermin ca. 3.5 Wochen (bei $t_1 = 121$ DOY = 1. Mai) bzw. 2.5 Wochen (bei $t_1 = 152$ DOY = 1. Juni) später

⁹⁶ Wenn man einen noch viel extremeren Temperaturanstieg annimmt als ihn die hier benutzten Klimamodelle prognostizieren und man mit z. B. Modell 1b rechnet.

Tabelle 4.16: Stichtag t_s zur Berechnung des relativen Chilling-Defizits d_{rel} und verwendete Werte des Chilling-Requirements im Standardfall ($C_{Standard}^*$) und Maximalfall (C_{max}^*) für Modell 1g. — Für Modell 1b wurden die C^* -Werte mit 18 multipliziert, um das Chilling-Requirement approximativ in Chilling Hours (CH) zu erhalten (vgl. Fußnote 5 auf Seite 199).

Fruchtart	t_s [DOY]	$C_{Standard}^*$ [CP]	C_{max}^* [CP]
Apfel	106	70.0	89.0
Sauerkirsche	107	74.0	89.0
Süßkirsche	102	74.0	89.0
Birne	101	69.2	89.0
Wein	103 ^a	71.8	89.0
Pflaume	103	68.8	89.0

^a Bezogen auf den Austrieb.

berechnet. So späte t_1 -Werte sind möglich, da von Mitte April bis Ende Juni immer noch Beiträge zur Chillingsumme anfallen. Typischer Weise können noch zusätzliche 200 CH bzw. 11 CP in diesem Zeitraum in Hessen anfallen. Derartig späte Blühtermine sind aber sicherlich unrealistisch und würden den Obstbauer zu drastischen Gegenmaßnahmen zwingen.

Die Festlegung auf einen Stichtag, der sich auf die in der Gegenwart (bzw. 1971-2000) beobachteten, spätesten Blühtermine bezieht, ist leider auch nicht eindeutig begründbar. Der Obstbauer in 100 Jahren könnte genauso gut behaupten, dass die dann insgesamt über 2 Wochen früher auftretenden Blühbeginnstermine der korrekte Bezugstermin seien. Solange keine physiologisch einsichtige Begründung⁹⁷ zur Festlegung des Stichtages t_s bekannt ist, besteht hier noch weiterer Forschungsbedarf.⁹⁸

Glücklicher zeigten Proberechnungen, dass das Klima in Hessen so beschaffen ist, dass trotz des Temperaturanstiegs durch den Klimawandel in allen Klimamodellen fast keine Dormanzschäden auftreten, sogar wenn man t_s um 14 Tage verkleinern würde. Nur bei Nutzung von Modell 1b (oder wenn man Modell 1g für noch kleinere t_s -Werte bzw. bei einem noch stärkeren Temperaturanstieg als dem heutzutage prognostizierten verwendet) und für extreme C^* im Bereich von 1600 CH (bzw. 89 CP) werden die Dormanzschäden wichtig und hängen dann sehr sensibel von t_s ab.⁹⁹ Wenn in diesem Extremfall auch noch die Unterschiede, welche durch Nutzung der Temperaturen aus den unterschiedlichen Klimamodellen auftreten, kleiner wären, so würden sich die Unsicherheiten in t_s auch in den “über die Modelle gemittelten” Ergebnissen bemerkbar machen. In diesem Fall müssten auch die Unsicherheiten in den “Impaktmodellen zur Berechnung des Dormanzschadens” bei der Fehlerberechnung berücksichtigt werden oder man müsste alternativ sogar Ensem-

⁹⁷ Z. B., dass ab einer bestimmten Tageslänge für eine bestimmte Obstart keine ordnungsgemäße Blüte mehr auftreten kann o. ä.

⁹⁸ In Experimenten, in denen das Chilling-Requirement bestimmt werden soll, ist die Festlegung von t_s kein Problem, da man das Experiment so gestalten kann, dass nach dem Zeitpunkt t_s , zu dem die Pflanze oder Teile der Pflanze unter kontrollierte Klimakammerbedingungen gebracht werden, keine weiteren Chillingbeiträge mehr auftreten. Das ist im Freiland aber nicht gewährleistet.

⁹⁹ Z. B. berechnet man mit Modell 1b als Mittel über die 19 Obstanbaugitterpunkte und 5 Klimamodelle für den Zeitraum 2071-2100 und den Apfel ($t_s = 106$ DOY) bei $C^* = 1600$ CH nach der neuen Methode [Formel (4.99) ff.] einen Dormanzschaden von $s_D^o = 0.35\%$. Für $t_s = 90$ DOY erhält man $s_D^o = 0.9\%$ und für $t_s = 74$ DOY ergibt sich $s_D^o = 2.8\%$.

bles von Impaktmodellen [mit z. B. verschiedenen t_s -Werten und verschiedenen Chillingmodellen zur Berechnung von $S_c(t_s)$] rechnen.

Zur konkreten Berechnung von s_D muss nach Wahl eines Chilling-Modells (in der Regel Modell 1g) in jedem Jahr für jeden Gitterpunkt die Chillingsumme mit den Temperaturen der verschiedenen Klimamodelle bis zum Stichtag t_s aufsummiert werden. t_s ist hierbei von der betrachteten Obstart abhängig. Nach Vorgabe eines wiederum von der Obstart abhängigen Chilling-Requirements C^* kann dann der aktuelle Wert von d_{rel} bestimmt werden. Daraus berechnet man dann mit Hilfe der Formeln (4.100) und (4.101) die Dormanzschäden im betrachteten Jahr am gewählten Gitterpunkt für das verwendete Klimamodell und gewählte Chilling-Modell.

Die für die unterschiedlichen Obstarten gewählten C^* sind in Tabelle 4.16 gelistet. Es wurden Rechnungen für den Standardfall (optimierte Werte für Modell 1g aus Tabelle 4.12) und den Maximalfall¹⁰⁰ (89 CP \approx 1600 CH = sehr hohes Chilling-Requirement) durchgeführt.

Die Kosten der Maßnahmen werden bei der gerade beschriebenen neuen Methode [Gleichung (4.99) ff.] auf folgende Weise berechnet: In jedem Jahr, in dem $d_{rel} > 0$ ist, werden Kosten in Höhe von 232 €/ha berechnet. Für $d_{rel} \leq 0$ fallen keine Kosten an. Im Gegensatz zu Gleichung (4.98), bei denen die Maßnahmekosten in allen Jahren erhoben wurden, in denen die Dormanz bis zum 90 DOY nicht gebrochen wurde, werden die Maßnahmekosten nun immer dann fällig, wenn bis zum (von der Obstart abhängigen) Stichtag t_s die Dormanz noch nicht gebrochen wurde.

Abbildung 4.36 zeigt die Maxima, gebildet über alle 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen, des Dormanzbrechungstermins t_1 , wobei jeweils die Temperaturen eines der 5 Klimamodelle im Szenario A1B verwendet wurden. Dabei wurde $C^* = 89$ CP und Modell 1g verwendet. Die Dormanz wird immer bereits 20 Tage vor dem kritischen Stichtag t_s (hier für Apfel bei 106 DOY als lila-farbene Linie eingetragen) gebrochen, so dass keinerlei Dormanzschäden auftreten.

Die neue Methode berechnet im Allgemeinen noch kleinere Dormanzschäden und NoReleaseProb's als die alte Methode [Gleichung (4.97)]: Z. B. liefert die alte Methode bei Nutzung von Modell 1b für $C^* = 1600$ CH bei $t_s = 90$ DOY im Mittel über die 19 Obstanbaupunkte und die 5 Klimamodelle für 2071-2100 einen Dormanzschaden von $s_D^0 = 2.4\%$ bei einer NoReleaseProb $P_D = 9.5\%$. Die neue Methode ergibt aber bei $t_s = 106$ DOY ein $s_D^0 = 0.35\%$ bei einer NoReleaseProb $P_D = 5.4\%$ ¹⁰¹.

Man beachte, dass große P_D -Werte zu einem bestimmten Stichtag bei der neuen Methode nicht zwingend große Dormanzschäden s_D^0 bedingen. Denn wenn alle Chilling-Defizite d_{rel} klein sind, sind gemäß Abbildung 4.35 auch die Schäden klein. In die NoReleaseProb P_D geht aber jedes Jahr, für das nur $d_{rel} > 0$ zu gelten braucht, mit gleichem Gewicht ein. Weiterhin können Jahre, in denen die sequentiellen Modelle keinen Blühbeginn t_2 berechnen, da in diesen Modellen die Dormanz nicht gebrochen wird (d. h. es gilt dann $S_c(180 \text{ DOY}) < C^*$), manchmal nur kleine Dormanzschäden aufweisen. Denn aus $S_c(180 \text{ DOY}) < C^*$ folgt nicht zwingend, dass $S_c(106 \text{ DOY}) \ll C^*$ ist. Das ist z. B.

¹⁰⁰ Diese Werte sind für einige Obstarten unrealistisch hoch. Sie werden nur als obere Schranke verwendet, um zu zeigen, dass auch im Extremfall sehr hoher Chilling-Requirements fast keine Dormanzschäden auftreten.

¹⁰¹ Die NoReleaseProb P_D bezieht sich bei der neuen Methode auf den Stichtag t_s . Gilt in einem Jahr zum Termin t_s , dass $d_{rel} > 0$ ist, so wurde in diesem Jahr die Dormanz nicht gebrochen und die NoReleaseProb erhöht sich entsprechend.

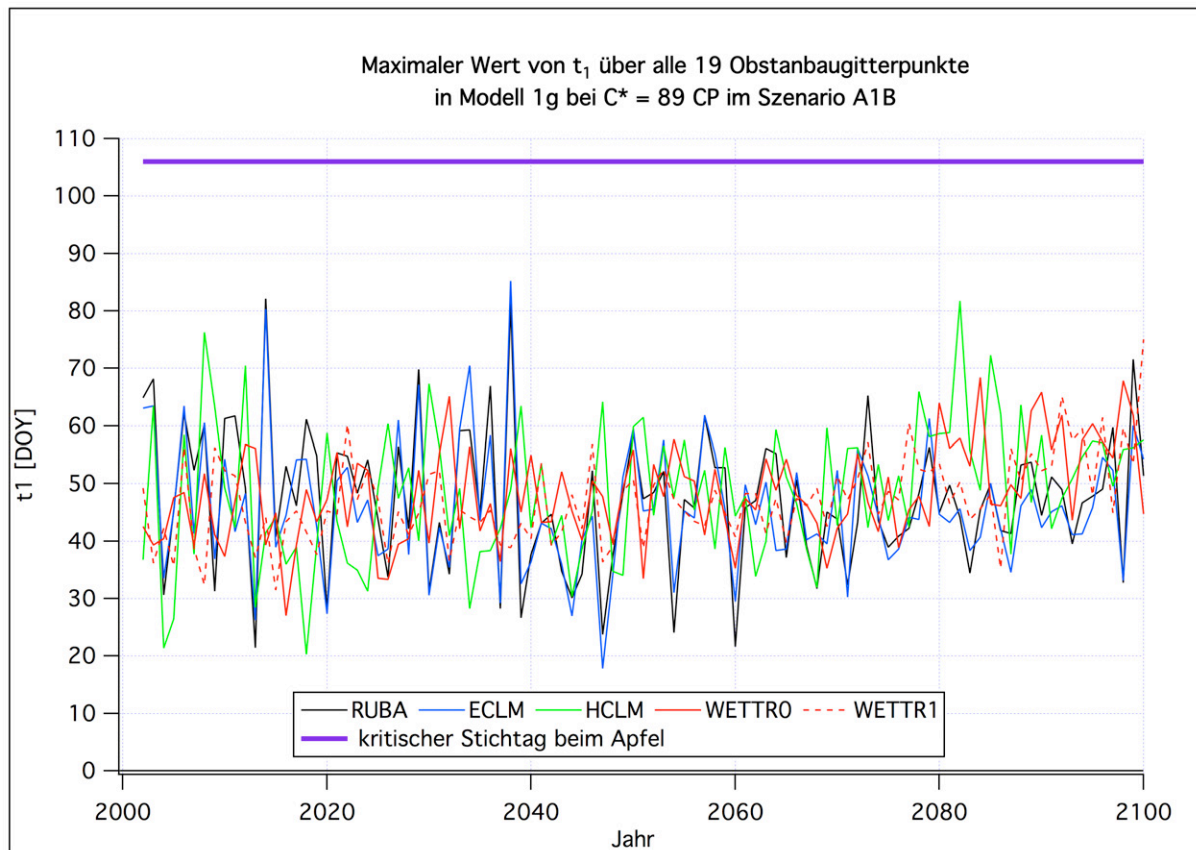


Abbildung 4.36: Späteste Dormanzbrechungstermine t_1 beim Chilling-Modell 1g und $C^* = 89$ CP bei Nutzung der Temperaturen der 5 Klimamodellläufe im Szenario A1B.

dann nicht der Fall, wenn vom Tag 106 DOY bis zum Tag 180 DOY nur noch sehr wenig Chilling anfällt und sich die Chillingsumme $S_c(t)$ nur noch wenig verändert.

4.8 Bestimmung von Frostschäden im Obstbau

Um das Risiko von Spätfrost¹⁰² während der Blüte und die dadurch verursachten Schäden für den Obstbau abschätzen zu können, wurden mit Hilfe der Klimadaten verschiedene Frostwahrscheinlichkeiten und Frostschäden berechnet. Die hier definierten Größen beziehen sich alle auf den Zeitraum von t_{Vor} (= 6 bis 10 Tage) Tage vor dem Blühbeginn bis zur Reife bzw. maximal bis zum 31. Juli¹⁰³. Dieser Zeitraum deckt ungefähr den Bereich ab, in dem die Pflanzen besonders sensibel auf Frostereignisse reagieren. Der Zeitraum konnte leider nicht weiter zu früheren Terminen ausgedehnt werden, da die dort auftretenden phänologischen Phasen auf Grund fehlender Beobachtungen der Entwicklungsstadien der Blütenknospen nicht berechnet werden können.¹⁰⁴ Dieser Zeitbereich wird im Folgenden “S-Zeitraum” (Sensibler Zeitraum) genannt. Zur Berechnung des Termins des Blühbeginns wurde Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term (DL=1) verwendet. Der Termin des Blühendes, der zur Berechnung der Schäden benötigt wird, wurde mit Modell 10a (ohne

¹⁰² Frühfrost- und Winterfrostschäden spielen in Hessen eine untergeordnete Rolle.

¹⁰³ Nach diesem Termin ist bzgl. des vorhergehenden Winters kein Frost mehr zu erwarten.

¹⁰⁴ Die Modelle können ohne diese Beobachtungsdaten nicht geeicht werden.

DAYLENGTH-Term) bestimmt.

4.8.1 Wahrscheinlichkeiten $P_{F,x}$ für das Auftreten von Spätfrost bestimmter Stärke während des S-Zeitraums

Zunächst wurden Wahrscheinlichkeiten $P_{F,x}$ für das Auftreten von Spätfrost bestimmter Stärke x im S-Zeitraum berechnet. Insgesamt wurden 4 verschiedene Froststärken x unterschieden. Bei $x = 0$ wurden alle Jahre gezählt, in denen die Tagesminimumtemperatur Tn wenigstens an einem Tag im S-Zeitraum kleiner als 0 °C wurde. Treten innerhalb eines Jahres mehrere solche Tage auf, so wird das Jahr trotzdem nur einmal gezählt. Bildet man für einen Mittelwertszeitraum (z. B. 30 Jahre) die relative Häufigkeit der Jahre mit derartigen Frostereignissen (Anzahl der Frostjahre geteilt durch 30), erhält man einen Schätzwert für $P_{F,x}$ für den betrachteten Zeitraum.

Bei $x > 0$ wird analog verfahren, nur werden dann nur Jahre gezählt, in denen Tn an mindestens einem Tag innerhalb des S-Zeitraums zwischen bestimmten Temperaturgrenzwerten liegt. Zusammenfassend wurden die Frostklassen wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} x = 0 : & \quad Tn < 0\text{ °C} \\ x = 1 : & \quad -2\text{ °C} \leq Tn < 0\text{ °C} \\ x = 2 : & \quad -4\text{ °C} \leq Tn < -2\text{ °C} \\ x = 3 : & \quad Tn < -4\text{ °C} \end{aligned} \tag{4.104}$$

Man beachte, dass verschiedene Froststärken innerhalb des S-Zeitraums *gemeinsam* auftreten können. Denn “Froststärke x tritt auf” bedeutet ja nur, dass wenigstens an einem Tag des S-Zeitraums einmal ein Tn zwischen den zugehörigen Schwellenwerten liegen muss.¹⁰⁵

Da, wie in Kapitel 4.8.2 erläutert wird, für die Berechnung von Frostschäden die Bestandstemperatur T_{veg} und nicht die Tagesminimumtemperatur Tn entscheidend ist, kann die Spätfrostwahrscheinlichkeit $P_{F,x}$ auch mit Hilfe von T_{veg} anstelle von Tn berechnet werden. In diesem Fall kann die Spätfrostwahrscheinlichkeit $P_{F,x}$ leichter mit den zu erwartenden Frostschäden in Bezug gesetzt werden. Bei den entsprechenden Ergebnissen wird darauf hingewiesen, welche Temperatur verwendet wurde.

Zur Berechnung der Frostschäden und -ereignisse ist die Kenntnis des Blühbeginns erforderlich. Dieser wird mit den in Kapitel 4.6.1 beschriebenen phänologischen Modellen berechnet. Da die meisten dieser Modelle mit den Rechnungen am 1. September des Vorjahres beginnen, existiert für das Jahr 1961 kein Blühbeginn. Aus diesem Grund konnten keine Frostgrößen für dieses Jahr berechnet werden. Die Rechnungen wurden für die Obstar-

¹⁰⁵ Wenn z. B. in jedem der ersten 10 Jahre von insgesamt 30 betrachteten Jahren im S-Zeitraum sowohl $Tn = -1\text{ °C}$ als auch (an anderen Tagen) $Tn = -3\text{ °C}$ und $Tn = -5\text{ °C}$ beobachtet wird und in den auf diese 10 Jahre folgenden 20 Jahren im S-Zeitraum immer $Tn > 0\text{ °C}$ ist, so gilt $P_{F,x} = 33.3\%$ für alle $x \in \{0, 1, 2, 3\}$! Es gilt hier also normalerweise $P_{F,0} \neq \sum_{x=1}^3 P_{F,x}$! — Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit $P(A_1 \cup A_2)$ dafür, dass mindestens eines der beiden Ereignisse $\{A_1, A_2\}$ auftritt, darf man die Einzelwahrscheinlichkeiten $P(A_i)$ der Ereignisse A_i nur dann “einfach” addieren, wenn die Ereignisse disjunkt sind, d. h. wenn $P(A_1 \cap A_2) = \emptyset$ gilt. Andernfalls gilt der Additionssatz für die Wahrscheinlichkeit zweier nicht disjunkter Ereignisse: $P(A_1 \cup A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 \cap A_2)$. Für mehr als zwei Ereignisse muss man eine entsprechende Verallgemeinerung dieses Satzes anwenden.

ten Apfel, Süßkirsche, Sauerkirsche, Birne und Pflaume¹⁰⁶ an den Obstanbaugebiets-Gitterpunkten durchgeführt (vgl. Kapitel 4.5). Die Rechnungen für Wein wurden nur für die Weinbau-Pixel durchgeführt, da die phänologischen Daten für die anderen Regionen zu unsicher sind. Die Ergebnisse an den einzelnen Gitterpunkten wurden sodann gemittelt. Für Pflirsich, Aprikose und Erdbeere wurden keine Frostrechnungen durchgeführt, da keine ausreichend genaue Datenbasis mit zuverlässigen phänologischen Beobachtungen für diese Fruchtarten vorlag (vgl. Tabelle 4.5 und die Fußnoten zu Tabelle 4.10 bis 4.12). Insbesondere fehlten für diese drei Fruchtarten phänologische Beobachtungen für die Termine des Blühendes. Diese werden aber zusätzlich zu den Terminen des Blühbeginns für die Berechnung der Frostschäden benötigt (Kapitel 4.8.4). Die verschiedenen in Hessen angebaute Erdbeersorten, die leider in den phänologischen Beobachtungen nicht unterschieden werden, haben außerdem stark unterschiedliche Eigenschaften (starke Abhängigkeit von der Tageslänge oder fast keine Abhängigkeit; unterschiedliche Erntetermine, die sich außerdem über einen langen Zeitraum erstrecken usw.). Daher stellen die gerasterten phänologischen Daten eine sehr starke Glättung der ursprünglichen räumlichen Variabilität dar, so dass Frostausschätzungen mit diesen Daten starke systematische Fehler ergeben würden. Bei der Erdbeere müssten auch gegenüber den anderen hier behandelten Fruchtarten veränderte Umrechnungen von Blüten- in Fruchtschäden vorgenommen werden: Ein bestimmter relativer Frostschaden an den frühen Blüten, welche normalerweise die größten Erdbeeren produzieren, kann zu einem doppelt so großen relativen Schaden an den Früchten führen. Bei den anderen Fruchtarten ist der durch einen bestimmten Blütenschaden hervorgerufene Fruchtschaden meistens geringer als der Blütenschaden [siehe z. B. http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/frosprot_straw.pdf und den Text zu Formel (4.119)].

Hier soll noch kurz erwähnt werden, wie Konfidenzintervalle und signifikante Unterschiede für die Frostgrößen berechnet wurden. Betrachtet man nur einen einzelnen Gitterpunkt, an dem die Zufallsvariable SPAETFROST in einem Jahr den Wert 1 annimmt, wenn ein Frostereignis eintrat, und null, wenn keins auftrat, so findet man einen Schätzwert für die Standardabweichung von $P_{F,x}$ mit folgendem Ausdruck: $\sqrt{P_{F,x} \cdot (1 - P_{F,x})/J}$ (J = Anzahl der betrachteten Jahre), wobei $P_{F,x}$ so berechnet wird, wie es am Anfang dieses Abschnitts (4.8.1) beschrieben wurde. Die daraus mit Normalverteilungs-Approximation für die $P_{F,x}$ berechneten Konfidenzintervalle sind für Werte in der Nähe von 0 und 1 aber sehr fehlerhaft (zu klein) und können sich unter Umständen auch etwas in den negativen Bereich erstrecken. Es ist daher exakter, die eben erwähnte Approximation durch das unsymmetrische SCORE-Konfidenzintervall (Wilks, 2006, S. 327; siehe auch Agresti & Coull, 1998 und Held, 2008) zu ersetzen. Beide Methoden sind aber nicht mehr korrekt, wenn man die Einsen und Nullen aus jedem Jahr zuvor über mehrere Gitterpunkte mittelt, was bei der Betrachtung von Gebietsmittelwerten sinnvoll ist, und dann daraus die $P_{F,x}$ berechnet.¹⁰⁷ Z. B. ist die aus $\sqrt{P_{F,x} \cdot (1 - P_{F,x})/J}$ berechnete Standardabweichung dann viel zu groß.¹⁰⁸ Daher wurden die Konfidenzintervalle bzw. Standardabweichungen

¹⁰⁶ Die phänologische Datenbasis für die Pflaume ist leider *schwächer* als für die anderen fünf hier genannten Fruchtarten. Sie sollte aber für die Berechnung von Gebietsmittelwerten ausreichend sein.

¹⁰⁷ Die Werte an benachbarten Gitterpunkten sind leider stark korreliert und können nicht als unabhängige Realisierungen betrachtet werden. Daher kann man auch nicht zuerst die $P_{F,x}$ an jedem Gitterpunkt berechnen und dann mit den üblichen Methoden aus diesen Werten das Konfidenzintervall abschätzen.

¹⁰⁸ Vorausgesetzt, dass die Werte von SPAETFROST zwischen den einzelnen Gitterpunkten nicht nahezu 100 %-tig korreliert sind, was nicht der Fall ist, und dass $P_{F,x}$ nicht zu dicht an 0 oder 1 liegt.

doch nach der in Kapitel 4.4 entwickelten Methode berechnet (mit Bildung der gewöhnlichen, zeitlichen Standardabweichung über die “über die Gitterpunkte gemittelten Werte” und nachfolgender Division durch \sqrt{J}). Die Konfidenzintervalle sind dann nur noch für $J \cdot P_{F,x} \cdot (1 - P_{F,x}) < 4$ (etwas¹⁰⁹) zu klein [nach Mittelung der Einsen und Nullen über alle Gitterpunkte in Hessen und nachfolgender Berechnung der $P_{F,x}$ kann man die “4” noch durch einen kleineren Wert (z. B. “1”) ersetzen, da die Gitterpunkte nicht vollständig räumlich korreliert sind und die Anzahl der “Freiheitsgrade” dadurch größer wird als die Anzahl der Mittelungsjahre J].

Zum Test auf signifikante Unterschiede dieser (und auch der anderen) Größen in unterschiedlichen Zeiträumen wurde der t-Test von Welch (Wilks, 2006) verwendet, der nicht voraussetzt, dass die Standardabweichungen in beiden Zeitabschnitten gleich sind.¹¹⁰ Für die Abschätzung der Freiheitsgrade bei diesem Test wurde die Approximation von Welch-Satterthwaite benutzt [vgl. Gleichung (4.27)]. Dieser Test wurde auch für über Gebiete gemittelte Wahrscheinlichkeiten verwendet. Wenn über die Ergebnisse, die mit den Temperaturen verschiedener Klimamodelle berechnet wurden, gemittelt wurde, wurden Standardabweichungen, die nach der Methode aus Kapitel 4.4 berechnet wurden, verwendet.

4.8.2 Frostschäden F_S an den Blüten und daraus resultierende Ertragsschäden s_F beim Apfel

Die Frostschäden F_S , die an den Blüten vorm Blühende auftreten, hängen genauso wie die Schäden s_F , die durch Frost an den kleinen Früchten entstehen, vor allem von der Temperatur (vor allem vom Tagesminimum der effektiven Temperatur direkt an den Knospen und Blüten bzw. von der effektiven Bestandstemperatur T_{veg}), von der phänologischen Phase und von der Pflanzenart ab. Mehrere Wochen vor dem Blühbeginn können die Knospen noch sehr kalte Temperaturen ohne Schaden überstehen, danach reagieren sie stufenweise immer sensibler und mit größeren Schäden auf negative *Celsius*-Temperaturen.

4.8.3 Approximative Berechnung der Bestandstemperatur T_{veg}

Das Tagesminimum der Bestandstemperatur T_{veg} kann leider nicht einfach mit dem Tagesminimum der Lufttemperatur T_n gleichgesetzt werden, da T_{veg} , besonders in Nächten mit klarem Himmel und wenig Wind, wesentlich kleiner sein kann als die Lufttemperatur. Die Obstbauern verwenden häufig die Feuchttemperatur T_f als Kriterium für den Startzeitpunkt der Frostschutzberechnung, da nasse, ausreichend “ventilierte” Oberflächen, an denen die Strahlungsbilanz gegenüber den sensiblen und latenten Wärmeflüssen vernachlässigbar ist, diese Temperatur annehmen. Hier sollen aber zunächst die Schäden abgeschätzt werden, die an unberegneter, d. h. trockener Vegetation (sofern keine Taubildung

¹⁰⁹ Bei $P_{F,x} = 0$ würde das 95 %-Score Konfidenzintervall für einen Gitterpunkt im Gegensatz zum Wert gemäß der Normalverteilungsapproximation noch eine Breite von $3.84/(J+3.84)$ aufweisen (ca. 0.11 bei $J = 30$; nach Mittelung über alle Hessen-Gitterpunkte noch ca. 0.03). Der Wert bei Normalverteilungsapproximation wäre null.

¹¹⁰ Da die Bias-korrigierten Modellprognosen in der Zukunft größere Unterschiede zwischen den Modellen als in der Gegenwart zeigen, hat der erste Varianzterm in (4.25), der die Varianz zwischen den Modellen beschreibt, in der Zukunft größere Werte als heutzutage. Daher darf man nicht mehr annehmen, dass die Gesamtvarianz zeitlich konstant ist. Das hat zur Folge, dass man, falls man einen t-Tests als Test auf signifikante Unterschiede zwischen unterschiedlichen Zeitabschnitten verwendet, nur noch t-Tests (wie z. B. den oben erwähnten Welch-Test) verwenden darf, die unterschiedliche Varianzen für die beiden Datenreihen zulassen.

auftritt) auftreten. Dabei müssen sowohl Fälle berücksichtigt werden, in denen der Wind sehr schwach bläst und die langwellige Strahlungsbilanz nicht vernachlässigbar ist (Strahlungsfrost), als auch Nächte mit starkem Wind, in denen sich die Bestandstemperatur nicht stark von der Lufttemperatur unterscheiden wird (advektiver Frost)¹¹¹. Im Prinzip kann man T_{veg} nur mit aufwendigen SVAT-Modellen (Soil-Vegetation-Atmosphere-Models) berechnen, in denen u. a. die vertikalen Temperaturprofile im Boden und innerhalb des Bestandes sowie in den unteren ca. 100 m der atmosphärischen Grenzschicht mit großem Rechenaufwand bestimmt werden.

Da keine Informationen über lokale Bodentemperaturprofile u. ä. für die regionalen Klimamodelle vorliegen und derartige Berechnungen mit Temperaturen, Windgeschwindigkeiten etc., die nur für große Gebiete (0.2°-Raster) repräsentativ sind, sowieso nur eingeschränkt möglich sind, wird zunächst eine modifizierte Feuchttemperatur T_{mf} berechnet, die den Einfluss des Windes auf die "Feuchttemperatur" berücksichtigt und die nicht voraussetzt, dass die betrachtete Oberfläche nass ist und somit potentiell verdunstet. Diese neu eingeführte Temperatur wird sodann mit den Bestandstemperaturen T_{veg} , die mit einem aufwendigeren Energiebilanzmodell berechnet wurden, verglichen, um zu testen, wie gut die Bestandstemperatur T_{veg} durch die modifizierte Feuchttemperatur T_{mf} approximiert werden kann. Eine weitere Modifikation, die von der Windgeschwindigkeit und dem Bedeckungsgrad abhängig ist, führt dann auf eine Temperatur T_{mmf} , mit der hinreichend genaue Ergebnisse erzielt werden. Die nachfolgenden Frostschadensberechnungen werden dann mit dieser Temperatur durchgeführt.

Man erhält eine Formel für T_{mf} , wenn man folgende Annahmen macht: Die Strahlungsbilanz (hier interessiert nur der Nachtwert, d. h. die langwellige Strahlungsbilanz) ist gegenüber dem sensiblen und latenten Wärmefluss vernachlässigbar, entweder weil die Windgeschwindigkeit relativ groß ist, oder weil die betrachteten Objekte bezüglich der langwelligen Strahlung abgeschirmt sind. Im Gleichgewicht muss dann die Summe aus sensiblem Wärmefluss H und latentem Wärmefluss LE null ergeben, d. h. $LE = -H$. Für H und LE werden die folgenden, hinlänglich bekannten Ansätze¹¹² gemacht:

$$H = \rho c_p \frac{T_{mf} - T}{r_H} \quad (4.105)$$

und

$$LE = \frac{\rho c_p}{\gamma} \cdot \frac{esat(T_{mf}) - e}{r_H + r_s}. \quad (4.106)$$

ρ ist die Dichte der Luft, c_p ist die spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck, γ ist die Psychrometerkonstante, r_H ist der aerodynamische Widerstand für Wärmeleitung, r_s der Bulk-Stomatawiderstand (in der Nacht), T ist die Lufttemperatur, e der Dampfdruck des Wasserdampfes zum betrachteten Zeitpunkt in der Höhe z über dem Bestand bzw. bei Messung an einer Wetterstation in der Höhe z über dem Boden und $esat(T)$ der Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur T .

¹¹¹ In solchen Nächten können die Pflanzen auf Grund der hohen Windgeschwindigkeit, die zu großen Wärmeübergangszahlen führt (d. h. kleine aerodynamische Widerstände für Wärmeleitung r_H), sehr rasch auskühlen. Die Zeitdauer, welche die Pflanzen benötigen, um auf die Gleichgewichtstemperatur (d. h. den quasi-stationären Minimalwert) zu kommen, wurde hier allerdings nur ganz grob berücksichtigt bzw. vernachlässigt [siehe die Diskussion des *Heat Storage Flux* nach Gleichung (4.115)].

¹¹² Vgl. z. B. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e06.htm>

Setzt man nun $LE = -H$, erhält man durch Auflösen nach T_{mf} :

$$\begin{aligned} T_{mf} &= T - \frac{1}{\gamma} \cdot (esat(T_{mf}) - e) \cdot Fak(V_z) \quad \text{mit} & (4.107) \\ Fak(V_z) &:= \frac{r_H(V_z)}{r_H(V_z) + r_s}. \end{aligned}$$

Der Faktor Fak hängt von der Windgeschwindigkeit V_z in der Höhe z ab, da der Widerstand r_H von V_z abhängt:

$$r_H(V_z) = \frac{\ln\left(\frac{z-d}{z_{0m}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z-d}{z_{0H}}\right)}{\kappa^2 \cdot V_z}. \quad (4.108)$$

d ist die Verdrängungshöhe, z_{0m} die Rauigkeitslänge für Impuls, z_{0H} die Rauigkeitslänge für sensible Wärme und κ die van Kármán-Konstante.

Die Gleichung (4.107) muss iterativ für T_{mf} gelöst werden, da T_{mf} auf beiden Seiten der Gleichung auftritt. Setzt man $Fak = 1$, so ist T_{mf} die "gewöhnliche" Feuchttemperatur T_f , die man erhält, wenn potentielle Verdunstung stattfindet ($r_s = 0$) und die Strahlungsbilanz vernachlässigt werden kann.

Die Windgeschwindigkeit in der Höhe z erhält man durch logarithmische Interpolation des in 10 m Höhe gemessenen Windes V_{10} mit folgender Formel:

$$V_z = V_{10} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z-d}{z_{0m}}\right)}{\ln\left(\frac{10 \text{ m} - d}{z_{0m}}\right)}. \quad (4.109)$$

Hier und in (4.108) wurde die statische Stabilität (Schichtung) der Atmosphäre (der Grenzschicht) vernachlässigt! Da e und T normalerweise an Wetterstationen über Rasen gemessen werden, wurden folgende Werte gewählt:¹¹³

$$\begin{aligned} z &= 2 \text{ m}; \quad z_{0m} = 0.3 \text{ m}; \quad d = 0 \text{ m}; \quad z_{0H} = 0.1 \cdot z_{0m} \\ \kappa &= 0.41; \quad r_s = 150 \text{ s/m}. \end{aligned} \quad (4.110)$$

Hier interessiert der Wert von T_{mf} zum Zeitpunkt t_n , wenn die Temperatur T ihren Minimalwert T_n annimmt. Für den Dampfdruck e in (4.107) muss der entsprechende Dampfdruck

$$e = e(t_n) = Rel(t_n) \cdot esat(T_n) \equiv RelT_n \cdot esat(T_n) = f(T_n, RelT_n), \quad (4.111)$$

der aus der zu diesem Zeitpunkt herrschenden relativen Luftfeuchte $Rel(t_n) =: RelT_n$ berechnet werden kann, verwendet werden. Aus (4.111) und (4.107) folgt, dass die Bestandstemperatur T_{mf} zur Zeit t_n eine Funktion von T_n und $RelT_n$ ist:

$$T_{mf}(t_n) = f(T_n, RelT_n). \quad (4.112)$$

¹¹³ Es wird angenommen, dass die an der Station gemessenen Werte T und e auch 2 m über der Verdrängungshöhe d des Bestandes gültig sind.

Die relative Feuchte $RelTn$ zum Zeitpunkt t_n kann mit folgender Formel abgeschätzt werden:

$$RelTn \approx \frac{Rel \cdot esat(T)}{1.1 \cdot esat(Tn)} \approx \frac{esat(T_d)}{1.1 \cdot esat(Tn)} = \frac{\bar{e}}{1.1 \cdot esat(Tn)} \quad (4.113)$$

Hierbei ist Rel der Tagesmittelwert der relativen Luftfeuchte¹¹⁴, T der Tagesmittelwert der 2m-Lufttemperatur, Tn der minimale Tageswert der Lufttemperatur und \bar{e} der Tagesmittelwert des Dampfdrucks des Wasserdampfs. Das zweite Ungefährzeichen kann durch ein Gleichheitszeichen ersetzt werden, wenn der Tagesmittelwert Rel der relativen Feuchte wie von der HU-Berlin als $esat(T_d)/esat(T)$ berechnet wurde. $RelTn$ aus Gleichung (4.113) wurde auf den Wert 1 gesetzt, wenn (4.113) Werte größer 1 ergab, und auf Rel , falls $RelTn$ aus (4.113) kleiner als Rel wurde. Gleichung (4.113) (ohne den Faktor 1.1 im Nenner) folgt, wenn man annimmt, dass der Dampfdruck $e(t)$ den ganzen Tag über mit dem Wert des Tagesmittelwerts $\bar{e} = esat(T_d)$ ¹¹⁵ des Dampfdrucks übereinstimmt. Der Faktor 1.1 im Nenner von (4.113) berücksichtigt, dass der Dampfdruck e bzw. der Taupunkt T_d zum Zeitpunkt, wenn die Temperatur T ihr Minimum Tn annimmt, auf Grund von Taubildung und/oder Diffusion von Luftfeuchte etwas geringer ist als der Tagesmittelwert \bar{e} bzw. \bar{T}_d . Die Verringerung von Rel um diesen Faktor entspricht im Bereich von $T = 0$ °C in etwa einer Reduzierung des Taupunkts T_d von 1.5 K in der Nacht gegenüber den Tageswerten, was im Frühjahr häufig beobachtet wird.

In **Abbildung 4.37** ist der Tagesmittelwert der relativen Feuchte Rel (schwarze Kurve) zusammen mit der nach (4.113) berechneten relativen Feuchte $RelTn$ (rote Kurve) aufgetragen. Die blaue Kurve wurde nach (4.113), aber ohne den Faktor 1.1 bestimmt. Die Tagesminimumtemperatur Tn unterschreitet den Taupunkt T_d häufig sehr stark, was zu relativen Luftfeuchten wesentlich größer 100 % führt. Erst die Reduzierung mit dem Faktor 1.1 ergibt realistischere Werte.

Um zu prüfen, ob die nach (4.107) berechnete, modifizierte Feuchttemperatur T_{mf} als Approximation für die Bestandstemperatur T_{veg} verwendet werden kann, wurde, wie bereits oben erwähnt, T_{veg} aus einem einfachen Energiebilanzmodell geschätzt. Dabei wurde Horizontalhomogenität angenommen. Das bedeutet, dass z. B. Kaltluftansammlungen in Tallagen u. ä. vernachlässigt werden. Die Netto-Energiebilanz der Vegetationsschicht in der Nacht setzt sich dann aus folgenden, vertikalen Energieflüssen zusammen: Aus der langwelligen Strahlungsbilanz RLW_{net} , dem sensiblen Wärmefluss H [Gleichung (4.105) mit T_{veg} anstelle von T_{mf}], dem latenten Wärmefluss LE [Gleichung (4.106) mit T_{veg} anstelle von T_{mf} ; r_s wird null gesetzt, wenn $esat(T_{mf}) - e < 0$ wird (Taubildung)] und dem Bodenwärmefluss $Gflux = 5.9 \text{ J/m}^2/\text{K} \cdot (T_{veg} - T_g)$ (nach dem Ansatz aus [Steenefeld et al., 2006](#)). H , LE und $Gflux$ werden positiv gezählt, wenn sie von der Bestandsschicht weggerichtet sind (Energieentzug). RLW_{net} ist positiv, wenn die Vegetation Strahlungsenergie zugeführt bekommt und setzt sich aus der absorbierten atmosphärischen Gegenstrahlung, der absorbierten Ausstrahlung des Bodens mit der Oberflächentemperatur T_g (direkt unter der Vegetationsschicht!) und mit Emissionsgrad ε_g und der Ausstrahlung der Vegetationsschicht (mit Emissionsgrad ε_f) nach oben und unten zusammen.

Der zur Berechnung der atmosphärischen Gegenstrahlung erforderliche Emissionsgrad

¹¹⁴ Leider stehen für Rel , T und V_{10} nur Tagesmittelwerte aus den RCM's zur Verfügung.

¹¹⁵ Hier wird angenommen, dass der Mittelwert von $esat(T_d)$ (mit $T_d =$ momentaner Wert des Taupunkts) über einen Tag in guter Näherung mit $esat(T_d)$ (mit $T_d =$ Tagesmittelwert des Taupunkts) übereinstimmt.

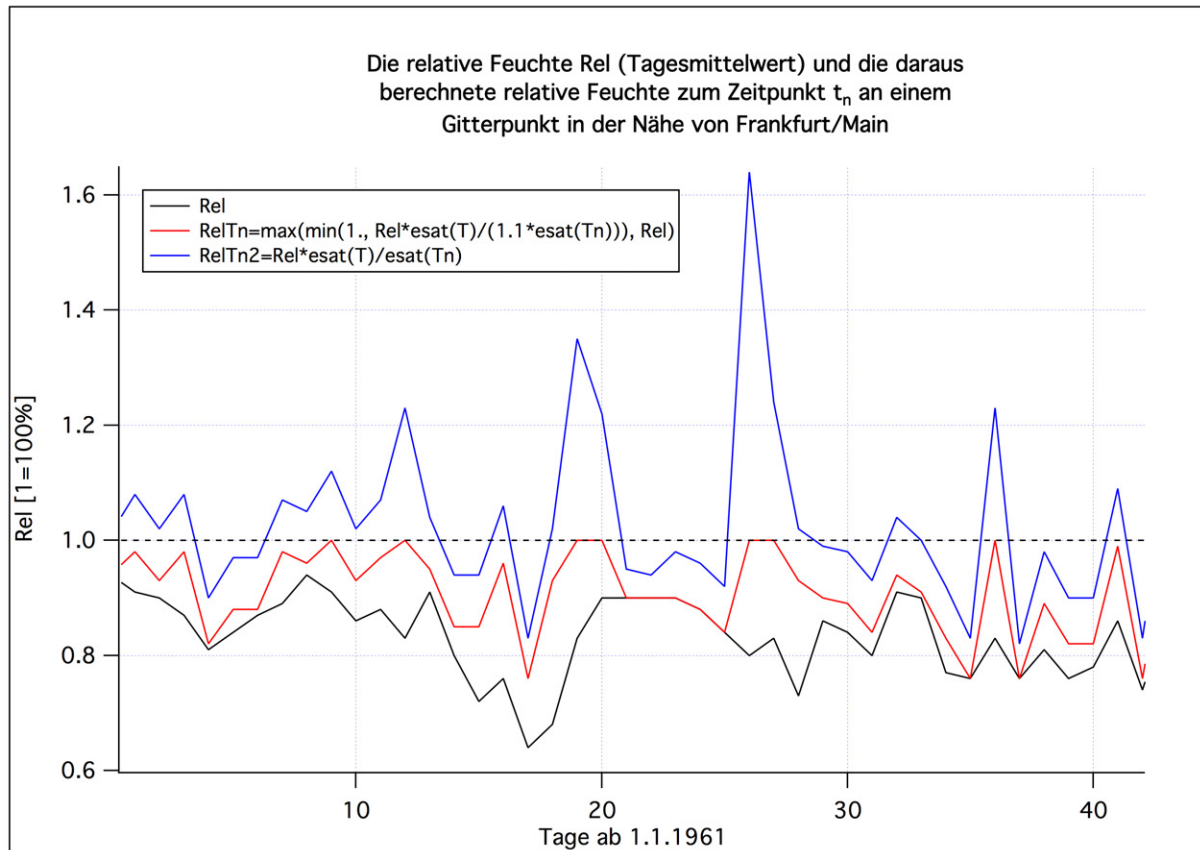


Abbildung 4.37: Die relative Feuchte Rel (Tagesmittelwert) und die daraus berechnete relative Feuchte zum Zeitpunkt t_n an einem Gitterpunkt in der Nähe von Frankfurt/Main

der unbewölkten Atmosphäre wurde nach [Brunt \(1939\)](#) berechnet:

$$\varepsilon_{atm,clear} = 0.61 + 0.0436 \cdot \sqrt{e} \quad (e \text{ in hPa}). \quad (4.114)$$

Bei bedecktem Himmel muss der Wert aus (4.114) noch mit dem Faktor 1.22 multipliziert werden. ε_g und ε_f wurden 0.98 gesetzt.

Der Dampfdruck e (in hPa) in (4.114) kann nach (4.111) aus Rel und T (bzw. $RelTn$ und Tn) berechnet werden.

Wenn man die Energie aus biochemischen Prozessen u. ä. vernachlässigt, so muss gelten:

$$f(T_{veg}) := RLW_{net} - H - LE - G_{flux} - \left[C_{veg} \frac{\partial T_{veg}}{\partial t} \right] = 0 \quad (4.115)$$

Der Term in eckigen Klammern ist der “Heat Storage Flux” und hängt von der Wärmekapazität C_{veg} der Vegetationsschicht ab. Letztere hängt vom Entwicklungsstadium der Vegetation, z. B. vom *Leaf Area Index LAI*, ab. Dieser Term wurde zunächst vernachlässigt. Die restlichen 4 Terme der Gleichung (4.115) hängen alle von der gesuchten Vegetationstemperatur T_{veg} ab. Die Gleichung wurde für vorgegebene Werte von T , V_{10} und Rel mit dem Intervallschachtelungsverfahren gelöst. V_{10} wurde auf den Wert 0.2 m/s gesetzt, wenn V_{10} kleiner als dieser Wert war. Auf diese Weise können Restturbulenz, freie Konvektion u. ä. wenigstens grob approximativ berücksichtigt werden.

Die Bodenoberflächentemperatur T_g wurde dabei approximativ als $T_g = T_{veg} + \Delta T$ geschätzt¹¹⁶. Für ΔT wurde gemäß Steeneveld et al. (2006) bei klarem Himmel ein mittlerer Wert von +8 K und bei bedecktem Himmel von +4 K veranschlagt. (Wenn man den *Heat Storage Flux* nicht vernachlässigt, und in der Nacht auf einen konstanten Wert von z. B. -50 W/m² setzt, so erhält man ähnliche Ergebnisse für $\Delta T = +3$ K bei klarem Himmel und für $\Delta T = -1.5$ K bei vollständig bedecktem Himmel.) Wie die Unsicherheit in der Wahl von ΔT zeigt, kann die hier vorgenommene Abschätzung nur eine grobe Abschätzung der Größenordnungen darstellen, da das Problem in der Realität von vielen weiteren Einflussfaktoren, z. B. der vertikalen Bestandsstruktur, der Abschattung des Bodens durch Zweige und Blätter, dem Bodenwassergehalt, dem Tagesgang der Einstrahlung usw. abhängt.

Abbildung 4.38 zeigt den Verlauf von T_{veg} und T_{mf} als Funktion der relativen Luftfeuchte *Rel* für eine Lufttemperatur von 0 °C und verschiedene, fest vorgegebene Windgeschwindigkeiten V_{10} für die Verhältnisse bei klarem Himmel.¹¹⁷ Die nach (4.115) berechnete Bestandstemperatur T_{veg} (grüne Kurven) ist immer etwas kleiner als die modifizierte Feuchttemperatur T_{mf} gemäß (4.107). Besonders bei kleinen Windgeschwindigkeiten ist T_{mf} um ca. 1 K zu groß. Ansonsten wird die Windabhängigkeit der Bestandstemperatur T_{veg} relativ gut von T_{mf} wiedergegeben. (Die unmodifizierte Feuchttemperatur T_f hätte unabhängig von der Windgeschwindigkeit immer den Verlauf der durchgezogenen blauen Kurve!) Man beachte, dass die Voraussetzungen bei der Herleitung der Formel für T_{mf} für kleine Windgeschwindigkeiten nicht erfüllt sind, sich aber dennoch einigermaßen vernünftige Werte ergeben. Das ist wahrscheinlich der Grund dafür, dass einige Autoren (z. B. <http://www.bauer-berechnung.com/mediapool/37/378050/data/Sonstiges/Frostschutzbergnung.pdf>) behaupten, dass auch unberechnete Pflanzen in Strahlungsnächten mit wenig Wind approximativ die unmodifizierte Feuchttemperatur T_f annehmen. Bei großen Windgeschwindigkeiten führt diese Annahme hingegen zu großen Fehlern.

Um den Fehler, den man bei Verwendung von T_{mf} bei kleinen Windgeschwindigkeiten macht, zu reduzieren, wurde noch folgende Modifikation vorgenommen:

$$T_{mmf} = T_{mf} - \frac{1 \text{ K} \cdot \text{m/s}}{V_{10} + 1 \text{ m/s}} \cdot (1 - CLCT) \quad (4.116)$$

Bei unbewölktem Himmel (Gesamtbedeckungsgrad $CLCT = 0$) wird ein von V_{10} abhängiger Betrag von T_{mf} abgezogen, und zwar bei $V_{10} = 0$ m/s wird 1 K abgezogen, bei $V_{10} = 1$ m/s wird 0.5 K abgezogen usw.

Berechnungen des Frostschadens (siehe weiter unten) bei Nutzung von T_{mmf} anstelle von T_n ergaben im Mittel über 30 Jahre, über alle Gitterpunkte in Hessen und im Mittel über die Ergebnisse bei Nutzung der Ausgabegrößen der 5 RCM's (RUBA, ECLM, HCLM, WETTR1 und WETTR0) ca. 80% mehr Schäden. Bei Verwendung von T_{mf} hingegen waren die Schäden nur ca. 30%-40% größer als bei Nutzung von T_n , da die Vegetationstemperatur dann bei kleinen Windgeschwindigkeiten und kleinen Bedeckungsgraden zu groß angenommen wurde [vgl. (4.116)]. Verwendet man hingegen die normale

¹¹⁶ Diese Schätzung bezieht sich auf den Zeitpunkt, an dem die Lufttemperatur ihren tiefsten Wert annimmt und auf den Boden direkt unter der Vegetationsschicht. Man beachte, dass T_g und T_{veg} Oberflächentemperaturen sind und sich stark von der Lufttemperatur zwischen den Vegetationselementen unterscheiden können.

¹¹⁷ Ähnliche Ergebnisse erhält man übrigens auch für die "Bodenoberflächentemperatur in den Bereichen zwischen den Pflanzen", wenn diese weit genug auseinander stehen, so dass der Boden ausreichend stark abstrahlen kann.

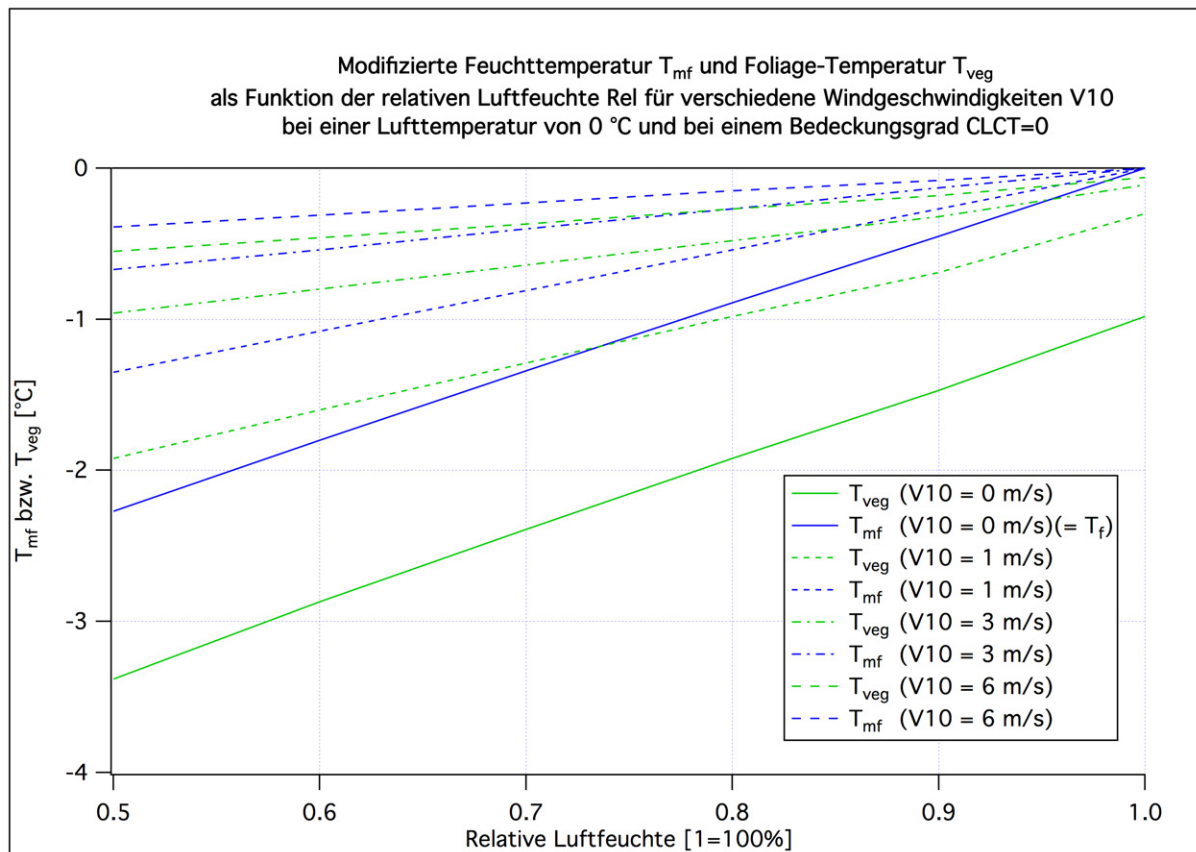


Abbildung 4.38: Modifizierte Feuchttemperatur T_{mf} und aus der Energiebilanz geschätzte Bestandstemperatur T_{veg} als Funktion der relativen Luftfeuchte Rel für verschiedene Windgeschwindigkeiten V_{10}

Feuchttemperatur T_f [$Fak = 1$ in (4.107)] anstelle der windabhängigen, modifizierten Feuchttemperatur T_{mf} [$Fak = f(V_{10})$ in (4.107)], so sind die Schäden ca. 40 % größer als bei Nutzung von T_{mf} , da man bei großen Windgeschwindigkeiten zu kleine Bestandstemperaturen verwendet.

Die Verwendung des Tagesmittelwerts Rel anstelle von $RelTn$ ergab um 300 % bis 500 % zu große Schäden, da Rel merklich kleiner als $RelTn$ ist, daher nachts zu kleine Feuchten verwendet werden und die Feuchttemperaturen (auch die modifizierten) zu klein werden.

Da bei Rechnungen mit Modelldaten in 0.2° Auflösung der Tagesmittelwert V_{10} der 10m-Windgeschwindigkeit nur selten kleiner als 1 m/s wird, und besonders in den hier interessierenden Strahlungsnächten die Windgeschwindigkeit aus den Modellen etwas zu groß ist und fast nie Windstille erreicht wird, wurden die V_{10} -Werte aus den Modellen noch wie folgt modifiziert:

$$V_{10} = \max(0.2 \text{ m/s}, V_{10} - 1 \text{ m/s}). \quad (4.117)$$

Im Folgenden wird bei konkreten Berechnungen immer die approximative Bestandstemperatur T_{mmf} nach (4.116) als Approximation für die “wahre” Bestandstemperatur T_{veg} verwendet, da letztere leider unbekannt ist.

4.8.4 Berechnung der Schäden

Bei den Schäden muss man zwischen Schäden F_S an den Blüten (hier in Prozent abgestorbener Blüten gemessen) und Schäden s_F an den späteren Früchten (hier in Prozent unbrauchbarer Früchte bzw. in Massenprozent gemessen) unterscheiden.

Insgesamt wurden drei verschiedene Ansätze für die Funktion $F_S(T_{veg})$ getestet. **Abbildung 4.39** (links) zeigt diese Ansätze. Alle drei Kurven haben gemeinsam, dass bei $T_{veg} = -2^\circ\text{C}$ 10 % und bei $T_{veg} = -4^\circ\text{C}$ 90 % der Blüten zerstört werden. Diese beiden kritischen “Temperaturen” $T_{veg,10\%}$ und $T_{veg,90\%}$, deren Wert von Fruchtart zu Fruchtart variiert und noch von der phänologischen Phase abhängt, und für die der Schaden an den Blüten 10 % bzw. 90 % beträgt¹¹⁸, können aus der Literatur bzw. Informationsblättern für den Obstbau entnommen werden und sind in **Tabelle 4.17** für 9 Obstarten aufgeführt.

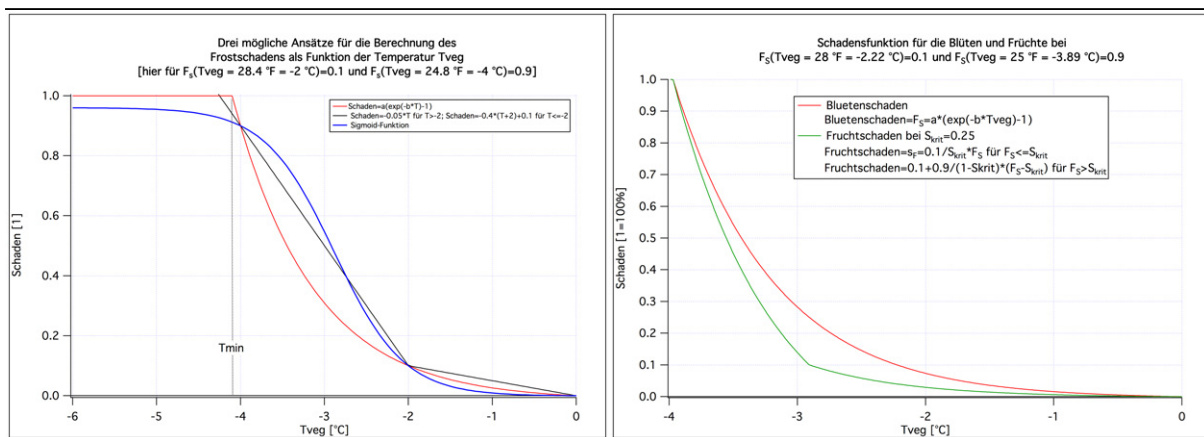


Abbildung 4.39: Ansätze für die Schäden F_S (bzw. s_F) an den Blüten und an den Früchten als Funktion der Bestandstemperatur T_{veg}

Der Ansatz, der zur blauen Kurve führt (Sigmoid bzw. logistische Funktion), wurde nicht implementiert, da er bedeuten würde, dass einige Blüten auch bei extremen Frostereignissen überleben würden. Das ist aber höchst unwahrscheinlich.

Der stückweise lineare Ansatz (schwarz) hat den Nachteil, dass die *Absterbedichte* (% Blüten, die pro Temperaturintervall absterben) sprunghaft von 10 % / (2 K) auf 80 % / (2 K) zunimmt, wenn $T_{veg} = -2^\circ\text{C}$ unterschritten wird. Auch für kältere Temperaturen wird dieser konstante Wert von 80 % / (2 K) beibehalten. Das hieße, dass zwischen -2.0°C und -2.1°C genauso viele Blüten absterben wie zwischen -4.0°C und -4.1°C (wenn man sich das Absterben als kontinuierlichen Prozess vorstellt, der bei in der Nacht stetig absinkender Temperatur stattfindet).

Die rote Kurve [exponentieller Ansatz (4.118)] geht davon aus, dass die *Absterbedichte* mit kälteren Temperaturen stetig zunimmt [T_{veg} in $^\circ\text{C}$!] :

$$F_S(T_{veg}) = a \cdot (\exp(-b \cdot T_{veg}) - 1) \quad (4.118)$$

¹¹⁸ Im Normalfall ist das der Schaden, der nach 30 Minuten bei dieser Temperatur eintritt. Leider sind die tatsächlich auftretenden Schäden nicht nur von der Temperatur an sich und deren Einwirkungs-dauer, sondern in der Realität auch noch von der Temperaturänderungsrate u. ä. abhängig. Daher sind alle hier vorgenommenen Schadensabschätzungen nur grobe Approximationen und mit großen Unsicherheiten behaftet.

Tabelle 4.17: Kritische Temperaturen für 10 % und 90 % Schaden an den Blüten für die 3 Zeiträume vor dem BB, zwischen BB und BE und nach BE. Alle Temperaturangaben in °C, t_{Vor} in Tagen; die Einheit von S_{krit} ist “1 = 100 %”. Bei Wein beziehen sich die Angaben auf die Zeiträume “ t_{vor} Tage vor Beginn des Austriebs (BA) bis BA”, “BA bis BB” und “nach BB” (siehe Text).

	Apfel	Sauerkirsche	Süßkirsche	Birne	Erdbeere	Wein	Pfirsich	Aprikose	Pflaume
$T_{veg,10\%}^{(1)}$	-2.2	-2.8	-2.8	-3.9	-3.2	-2.8	-3.9	-4.4	-3.9
$T_{veg,90\%}^{(1)}$	-4.4	-6.1	-6.1	-6.1	-5.2	-4.4	-10.6	-10.0	-7.2
$T_{veg,10\%}^{(2)}$	-2.2	-2.2	-2.2	-2.8	-2.2	-1.5	-3.3	-3.3	-2.8
$T_{veg,90\%}^{(2)}$	-3.9	-3.9	-3.9	-5.0	-3.9	-3.0	-6.1	-6.1	-5.0
$T_{veg,10\%}^{(3)}$	-1.9	-2.1	-2.1	-2.7	-2.0	-1.3	-2.5	-2.3	-2.6
$T_{veg,90\%}^{(3)}$	-3.0	-3.6	-3.6	-4.0	-3.7	-2.8	-3.9	-3.3	-4.3
t_{Vor}	10	9	9	9	9	9	7	6	9
S_{krit}	0.25	0.50	0.50	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50	0.25

In allen für INKLIM-A durchgeführten Auswertungen wurde dieser exponentielle Ansatz für den Frostschaden F_s verwendet. Die Koeffizienten a und b werden mit Hilfe einer Iteration so bestimmt, dass der Frostschaden $F_s(T_{veg,10\%})$ bei der kritischen Temperatur $T_{veg,10\%}$ gerade 0.1 (= 10 %) beträgt und $F_s(T_{veg,90\%}) = 0.9$ (= 90 %) gilt.

Die bisher berechneten Schäden F_s sind Schäden an den Blüten. Diese sind aber nicht identisch mit den Schäden s_F am gesuchten Obstertrag. Gemäß Angaben der Obstbauversuchsanstalt der LWK Niedersachsen in Jork (OVA Jork) entspricht ein Blütenschaden von 25 % einem Apfelertragsschaden von ca. 10 %, da sich ein Blütenschaden von 25 % relativ zum ungeschädigten Fall (bei dem vermehrt Ausdünnung, Fruchtfall etc. auftreten) im Laufe der Saison reduziert. Ein Blütenschaden von 75 % Blütenschaden entspricht laut OVA einem Apfelertragsschaden von ca. 75 %.¹¹⁹ Man muss daher die kleinen Werte der Blütenschäden noch mit einer Transformation absenken, um korrekte Obstschäden zu erhalten. Die Transformation wurde folgendermaßen angesetzt:

$$s_F = \frac{0.10}{S_{krit}} \cdot F_s(\text{Blüte}) \quad [\text{für } F_s \leq S_{krit}] \quad (4.119)$$

und

$$s_F = 0.1 + \frac{0.9}{(1 - S_{krit})} \cdot (F_s - S_{krit}) \quad [\text{für } F_s > S_{krit}].$$

Wählt man $S_{krit} = 0.25$, so beträgt der Wert von s_F bei $F_s = 0.25$ genau 0.10 und bei $F_s = 0.75$ beträgt $s_F = 0.70$ (und entspricht damit in etwa den Angaben aus Jork). F_s sind die Blüten-Schadenswerte, die man aus den T_{veg} - bzw. T_{mmf} -Werten¹²⁰, den Blühterminen¹²¹

¹¹⁹ Die verstärkende Wirkung von mehreren, aufeinander folgenden Schadeinwirkungen wird erst weiter unten [siehe Gleichung (4.120)] berücksichtigt. Hier stelle man sich unter *Schaden* zunächst der Einfachheit halber den *größten* auftretenden *Einzelschaden* im S-Zeitraum vor.

¹²⁰ T_{mmf} wird aus den Lufttemperaturen, Luftfeuchten, Bedeckungsgraden und Windgeschwindigkeiten der regionalen Klimamodelle nach (4.107) und (4.116) berechnet.

¹²¹ Der Blühtermin ist deshalb für die Schadensberechnung wichtig, da die Temperaturen innerhalb des S-Zeitraums, der vom Blühtermin abhängig ist, zur Berechnung herangezogen werden (siehe die Beschreibung im Text weiter unten).

der Phänomodelle und der Formel (4.118) [vgl. die rote Kurve in Abbildung 4.39 (rechtes Bild)] berechnen würde. Die s_F sind die eigentlichen Schäden an den Früchten, die man benötigt, um den Gesamtertragsschaden berechnen zu können [vgl. die grüne Kurve in Abbildung 4.39 (rechtes Bild)]. Die Gleichung (4.119) ist wegen der Fallunterscheidung trotz der stückweisen Linearität nur auf jährliche Schäden (und nicht auf gemittelte Schäden!) anwendbar. Die Gleichung muss daher zuerst auf jährliche Schäden angewendet werden, und die Ergebnisse dürfen erst danach gemittelt werden, um den mittleren Schaden eines Gebiets, einer Dekade und den Mittelwert über die unterschiedlichen Phänomodelle zu erhalten. Dieser Mittelwert ist dann der z. B. in Abbildung 5.36 gezeigte mittlere Frostertragsschaden s_F .

Insgesamt werden 3 verschiedene Zeiträume unterschieden, für die jeweils unterschiedliche Werte von $T_{veg,10\%}$ und $T_{veg,90\%}$ gewählt werden können. Der erste Zeitraum erstreckt sich von t_{Vor} Tage vor Blühbeginn (BB) bis einen Tag vor Blühbeginn. Der zweite Zeitraum vom Blühbeginn bis Blühende (BE), und der dritte Zeitraum bezieht sich auf die Zeit nach dem Blühende (bis maximal 31. Juli). t_{Vor} wird für jede Fruchtart fest gewählt. Da die Länge dieses ersten Zeitraums auf einen konstanten Wert festgelegt werden muss und nicht wie das Blühende aus Modellen als Funktion des Temperaturverlaufs berechnet werden kann, sollte t_{Vor} nicht größer als ca. 12 Tage sein. Denn die beiden kritischen Temperaturen sollten sich innerhalb dieses Zeitraums nicht allzu stark von denen nach dem Blühbeginn unterscheiden und möglichst innerhalb dieses ersten Zeitraums konstante Werte aufweisen. Der Wert von S_{krit} soll nur von der Fruchtart abhängen und in jeder der drei Zeiträume denselben Wert aufweisen. In der dritten Periode, in der bereits kleine Früchte an den Pflanzen hängen, wird der Schaden an der Frucht nicht schrittweise aus (4.118) und (4.119), sondern direkt aus (4.118) berechnet¹²².

Aus Angaben der Utah State University Extension and Utah Plant Pest Diagnostic Laboratory (http://extension.usu.edu/files/publications/factsheet/pub___5191779.pdf) und der Washington State University (<http://treefruit.yakima.wsu.edu/weatherbuds/weatherinfomain-3.htm>) wurden folgende Werte für die 6 Temperaturen und für t_{Vor} extrahiert (Tabelle 4.17):

Für den dritten Zeitraum (nach dem Blühende) findet man in der Literatur häufig um bis zu ca. 1 K höhere Werte für die kritischen Temperaturen $T_{veg,x}^{(3)}$ als die originalen Angaben der oben genannten beiden Quellen [siehe z. B. in Ballard & Proebsting, 1972 bzw. Davis, 1978 (Tab. 2) oder in v. Eimern & Häckel, 1979]. Die Werte streuen allerdings stark und widersprechen sich zum Teil. Als Kompromiss wurden die zum Teil etwas höheren Werte nach Proebsting Jr. & Mills (1978) benutzt (blaue Zahlen in der Tabelle 4.17). Proberechnungen ergaben, dass diese Modifikationen auf die Ergebnisse nur einen vernachlässigbaren Einfluss haben, da nach dem Blühende nur in sehr wenigen Jahren "Bestandstemperaturen" auftreten, die in den kritischen Temperaturbereich fallen.

Die kritischen Temperaturen für Erdbeeren (grüne Zahlenwerte in Tabelle 4.17) wurden grob aus Angaben von Poling et al. (2005) geschätzt. Poling et al. geben allerdings nur kritische Temperaturen für 50 % Schaden an den Blüten an. Weiterhin muss man beachten, dass die meisten Angaben in der Literatur für die Entwicklungsphase "Popcorn", die man in °C findet, um ca. 1 K zu hoch sind (da scheinbar eine falsche Umrechnung von °F

¹²² Es wird dann also angenommen, dass die Blütenschadensfunktion für die Früchte gilt. Das erscheint sinnvoll, da die Informationsblätter für den Obstbau auch für diese Phase kritische Temperaturen für 10 % und 90 % Schaden angeben.

verwendet wurde und die Autoren kritiklos voneinander abgeschrieben haben). Außerdem weist Poling in einem Progress Report von 2007 darauf hin, dass bereits Perry & Poling (1986) eine um 2 K kleinere kritische Temperatur für “Popcorn” und “Open Blossom” identifiziert hätten. Es wurde versucht, alle diese Informationen in die grünen Zahlenwerte einfließen zu lassen, um realistische kritische Temperaturen für Erdbeeren zu erhalten. Die Zahlenwerte werden aber im Folgenden nicht verwendet, da für die Erdbeere aus den bereits am Anfang des Kapitel 4.8.1 genannten Gründen keine Frostschadensberechnungen durchgeführt wurden. (Eine Umrechnung der Temperaturen vom Thermometerniveau (2 m) auf das Niveau der Erdbeeren (Bodennähe) wäre bei der Schadensberechnung für Erdbeeren übrigens nicht notwendig, da zur Schadensberechnung bzw. zum Vergleich mit den kritischen Temperaturen die Temperatur T_{mmf} verwendet wird, die eine Art effektive Oberflächentemperatur darstellt und sich daher bereits auf die Oberflächentemperatur der Erdbeerpflanzen bezieht.)

Die Angaben für Wein in Tabelle 4.17 (grau-gefärbte Einträge) konnten leider nur grob aus den Angaben von Galletta & Himelrick (1990) und aus dem “North Carolina Winegrape Grower’s Guide (Fig. 4.1)” (<http://www.ces.ncsu.edu/resources/winegrape/ag535-1.pdf>) abgeschätzt werden. Da sich beim Wein die Blätter vor den Blüten entwickeln, und die Weinblüte in Hessen erst sehr spät stattfindet (Ende Mai bis Mitte Juni), sind die Blätter und Triebe viel häufiger Frostschäden ausgesetzt als die Blüten. Daher findet man in der Literatur nur Angaben zu den Entwicklungsstadien vor der Blüte (siehe auch <http://www.fao.org/docrep/008/y7223e/y7223e0a.htm>, Tab. 4.8). Die kritischen Temperaturen für die Blattknospen hängen leider auch noch etwas vom Feuchtigkeitsstatus der Knospen ab (trockene Knospen vertragen stärkeren Frost) (Galletta & Himelrick, 1990). Diese Schäden an den Knospen und Trieben sind häufig reversibel, da die geschädigten Triebe z. T. durch neue Triebe ersetzt werden. Diese Nachfolgetriebe bringen aber meistens kleinere Erträge als unbeschädigte Primärtriebe. Letztendlich variiert die Frosttoleranz je nach Rebsorte und mitunter wird sie auch durch die Holzdicke und das Alter der jeweiligen Rebsorten bestimmt. Zusätzlich beeinflusst auch noch die Hang- bzw. Tallage die Frostgefahr.

Die Frostschadensberechnungen müssen daher beim Wein im Gegensatz zu den anderen Obstarten auf einen “nach vorne” verschobenen S-Zeitraum bezogen werden. Bei diesem liegt die erste, für Frostschäden wichtigste Periode, vor dem “Beginn des Austriebs”, die zweite erstreckt sich vom “Beginn des Austriebs” bis zum Blühbeginn, und die dritte bezieht sich auf die Zeit nach dem Blühbeginn. Andere frühe phänologische Stadien als “Beginn des Austriebs” und “Blühbeginn” sind in den vorliegenden phänologischen Daten des DWD leider nicht vorhanden. Eine ausreichende Datendichte ist auch nur für die Weinbaugebiete im Südwesten von Hessen gegeben.

Die kritischen Temperaturen in Tabelle 4.17 beziehen sich eigentlich auf die Lufttemperatur, die bei der Bestimmung der Schäden herrschte. Da die Schäden aber unter Laborbedingungen (Klimakammer u. ä.) und konstanter Temperatur bestimmt wurden, wird hier angenommen, dass die Bestandstemperatur in etwa der Lufttemperatur entsprach, da Abkühlung durch langwellige Ausstrahlung in die Atmosphäre in der Klimakammer keine Rolle spielt.

Der Fruchtschaden wurde zunächst unter Beachtung der drei Zeiträume für jeden Tag des betrachteten Jahres von t_{Vor} Tage vor BB bis zum 31.7. berechnet. Der maximale Wert aller dieser Schäden wurde dann als der gesamte Fruchtschaden $s_{F,ges}$ angesetzt, der im betrachteten Jahr auftrat.

Diese Berechnungsmethode berücksichtigt allerdings nicht, dass mehrere, aufeinander folgende Schäden an verschiedenen Tagen innerhalb eines Winters auftreten können. Die so approximierten Schäden sind daher zu klein. Berücksichtigt man auch Folgeschäden, so wird ein entsprechender Anteil der noch unbeschädigten Blüten bzw. Früchte bei später auftretenden Frösten zusätzlich geschädigt und dadurch der Gesamtschaden vergrößert. Bei den in dieser Studie durchgeführten Berechnungen werden auch diese Folgeschäden berücksichtigt. Hierbei wird für jeden Tag n im Winter zunächst der Blütenschaden F_s^n nach (4.118) berechnet und hieraus wird dann der Gesamtschaden gemäß (4.120) bestimmt. Das Verfahren wird für den nächsten Tag ($n \rightarrow n+1$) wiederholt usw. Zum Termin des Blühendes wird der gesamte, bisher aufgetretene Blütenschaden $F_{s,ges}^n$ auf den Fruchtschaden $s_{F,ges}^n$ [siehe (4.119)] umgerechnet, da danach angenommen wird, dass sich die Schäden auf die kleinen Früchte direkt auswirken. In die Formel (4.120) sind daher nach dem Blühende die Fruchtschäden s_F^n anstelle der Blütenschäden F_s^n und die Gesamtschäden an den Früchten $s_{F,ges}^n$ anstelle der Gesamtschäden an den Blüten $F_{s,ges}^n$ einzusetzen.

$$\begin{aligned} F_{s,ges}^n &= 1 - \left(1 - F_{s,ges}^{n-1}\right) \cdot \left(1 - F_s^n\right); \quad n \in \{1, 2, 3, \dots\} \\ F_{s,ges}^0 &= 0 \end{aligned} \quad (4.120)$$

Der sich zum Ende des Winters aus dieser Vorgehensweise ergebende Wert $s_{F,ges}^n$ ist der gesuchte Gesamtschaden am Ertrag im betrachteten Jahr bzw. Winter.

Bei Wein wird die Umrechnung des Blütenschadens auf den Fruchtschaden erst am Ende des Winters vorgenommen, weil, wie bereits oben erläutert, der S-Zeitraum “nach vorne” verschoben werden muss.

[Erläuterung zu Gleichung (4.120): Der Ausdruck in der ersten runden Klammer von (4.120) ist der Anteil der bis zum Tag n noch unbeschädigten Blüten. Dieser Anteil, multipliziert mit dem zweiten Klammersausdruck, ist der Anteil, der nach der Schadeinwirkung am Tag n noch unbeschädigt ist. Zieht man diesen unbeschädigten Anteil von “1 = 100%” ab, so erhält man den beschädigten Anteil nach der Schadeinwirkung am Tag n .]

Man beachte: Der hier berechnete Fruchtschaden durch Frosteinwirkung ist ein potentieller Schaden, der eintreten kann, wenn die Witterung im nachfolgenden Frühling und Sommer einen durchschnittlichen Verlauf hat und kein Trockenstress oder sonstige Schäden, wie z. B. Hagelschlag, auftreten. In der Realität können auch Jahre auftreten, in denen trotz Blüten- und Fruchtschadens durch Frost, die gemäß der obigen Methode berechnet wurden, überdurchschnittliche Erträge auftreten. Das liegt daran, dass eine Ausdünnung der Blüten häufig zu größeren Früchten führt und der Wetterverlauf (Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Strahlung) im Zeitraum nach der Blüte bis zur Reife etwaige Frostschäden kompensieren oder gar überkompensieren kann.

4.8.5 Wahrscheinlichkeit s_F^{a-b} für das Auftreten von Schäden bestimmter Stärke an den Früchten

Bisher wurde als “den Schaden charakterisierende Größe” nur der *Frostschaden* s_F (sinnvoller Weise als Mittelwert über eine Dekade bzw. über einen 30 Jahreszeitraum) betrachtet. Ein bestimmter mittlerer Frostschaden kann aber z. B. durch viele geringe Schäden oder durch wenige große Schäden verursacht werden. Informativer wäre daher die Angabe der relativen Häufigkeit bzw. “Wahrscheinlichkeit”, mit der Schäden bestimmter Stärke (z. B. zwischen 20 % und 30 %, 30 % und 40 % usw.) auftreten.

Untersuchungen ergaben, dass eine Unterteilung der Schadensklassen in mehr als 3 Klassen (z. B. in 10 Klassen mit Breite 10 %) keinen Sinn macht, da nur die erste Klasse (0 %...10 %) für statistische Auswertungen ausreichende Belegungszahlen aufweist. Für die anderen Klassen können signifikante Abweichungen der Dekadenwerte vom Nullwert nur in Einzelfällen nachgewiesen werden.

Daher werden nur die Klassen $>0\%...10\%$, $>10\%...50\%$ und $>50\%...100\%$ betrachtet (auch mit FROSTSCHADENSPROB0...2 bezeichnet). s_F^{10-50} ist die relative Häufigkeit der Jahre, in denen s_F (Frucht-)Schadenswerte größer 10 % und kleiner oder gleich 50 % annimmt. Man kann s_F^{10-50} auch als die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden zwischen 10 % und 50 % bezeichnen. Analog ist s_F^{50-100} dann die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden zwischen 50 % und 100 %. Die Wahrscheinlichkeit s_F^{0-10} für die erste Klasse kann aus denen der letzten beiden Klassen und der Wahrscheinlichkeit $P_{F,0}$ für die Froststärke 0 [die identisch mit der Wahrscheinlichkeit für einen Frostschaden größer 0 % ist; ACHTUNG: $P_{F,0}$ muss dann aber genauso wie die Schadenswahrscheinlichkeiten s_F^{a-b} mit T_{mmf} bestimmt werden, damit (4.121) gültig ist!¹²³] berechnet werden:

$$s_F^{0-10} = P_{F,0} - s_F^{10-50} - s_F^{50-100}. \quad (4.121)$$

Die s_F^{a-b} - Werte werden ähnlich wie die $P_{F,x}$ berechnet. Nur wird vor der Entscheidung, ob das betrachtete Jahr *gezählt* wird, geprüft, ob der für dieses Jahr berechnete Schaden s_F in die entsprechende Klasse fällt.

Man beachte, dass die s_F^{a-b} genauso wie die $P_{F,x}$ relative Häufigkeiten bzw. "Wahrscheinlichkeiten" sind, die s_F (und F_S) dagegen aber *echte* Schäden.¹²⁴ Für s_F^{a-b} und $P_{F,x}$ kann man für jedes Jahr nur angeben, ob ein Frostereignis der entsprechenden Stärke eingetreten ist (Wert = 1) oder nicht (Wert = 0). Der Mittelwert über diese 0- und 1-Werte über alle betrachteten Jahre ergibt den Schätzwert für die Wahrscheinlichkeit. Bei s_F (und F_S) besitzt dagegen jedes Jahr einen reellen Schadenswert, der beliebige reelle Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann.

Trends wurden für diese Wahrscheinlichkeiten genauso wie für die restlichen Größen mit normaler, linearer Regression berechnet. Das kann u. U. dazu führen, dass die Regressionsgrade den für Wahrscheinlichkeiten (und relative Schäden) zulässigen Bereich von 0 bis 1 unter- bzw. überschreitet. Es wäre daher korrekter, aber leider auch aufwendiger, keine lineare Regression, sondern eine *Logistische Regression* oder eine *Probit Regression* anzuwenden (bevorzugt auf die binären Jahreswerte angewendet) [vgl. z. B. Kapitel 6.3.1 in Wilks, 2006].

4.8.6 Mittlere Anzahl n_F^x der Frosttage pro Jahr mit bestimmter Froststärke innerhalb des S-Zeitraums

Um später die Kosten für Maßnahmen gegen Frostschäden (z. B. Frostschutzberegnung) berechnen zu können, muss die mittlere Anzahl n_F^x der Frostnächte pro Jahr innerhalb des S-Zeitraums bekannt sein. Die Berechnung erfolgt wieder ähnlich wie bei den Wahrscheinlichkeiten $P_{F,x}$ für das Auftreten von Spätfrost bestimmter Stärke, nur wird nun nicht nur das erste Auftreten eines Frosttages bestimmter Stärke x in einem Winter registriert und

¹²³ Die in Kapitel 5.4 dargestellten $P_{F,x}$ beziehen sich aber als *klimatologische* Größen auf die Tagesminimumtemperaturen T_n !

¹²⁴ Die Bezeichnung s_F^{a-b} für die Wahrscheinlichkeiten und s_F für die Schäden an den Früchten ist daher etwas irreführend.

als "1" gespeichert, sondern die Anzahl der Tage mit Frostereignissen bestimmter Stärke werden über den gesamten S-Zeitraum eines Jahres aufsummiert. Die Einteilung der Froststärke x wird dabei genauso gewählt wie es am Anfang des Kapitels 4.8.1 [Gleichung (4.104)] angegeben wurde.

In Hinblick auf die später durchzuführende Berechnung der Kosten von Frostschutzmaßnahmen (Frostschutzberechnung) muss man Folgendes beachten: Die Frostschutzberechnung wird von den Obstbauern im Allgemeinen nur dann durchgeführt, wenn der nächtliche Minimalwert der Feuchttemperatur T_f (hier ist die normale Feuchttemperatur ohne Windfaktor gemeint) im Zeitraum vor dem Blühbeginn den Wert -2 °C unterschreitet oder nach dem Blühbeginn kleiner als 0 °C wird. Aus diesem Grund kann die Berechnung der Frosttage nicht nur mit der Tagesminimumtemperatur T_n durchgeführt werden, sondern ein *Sondermodus* des Auswerteprogramms erlaubt auch die Berechnung der Anzahl der Tage, auf die das eben angegebene Berechnungskriterium zutrifft und der Obstbauer theoretisch die Berechnung durchführen müsste.

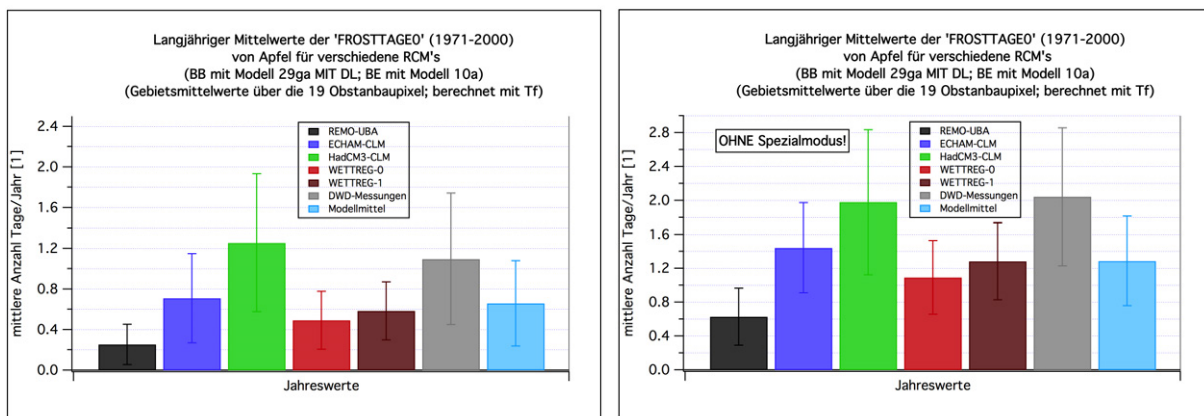


Abbildung 4.40: Mittlere Anzahl der Frosttage pro Jahr im S-Zeitraum beim Apfel (1971-2000): links: mit Sondermodus und bei Verwendung von T_f ; rechts: ohne Sondermodus und bei Verwendung von T_f .

Abbildung 4.40 zeigt am Beispiel der Frosttage beim Apfel, dass der Sondermodus (linkes Bild) merklich weniger Frosttage pro Jahr ergibt, da in diesem Modus in der Zeit von '10 Tage vor Blühbeginn' bis zum Blühbeginn nur Tage mit $T_f < -2\text{ °C}$ gezählt werden. Im rechten Bild werden hingegen in diesem Zeitraum alle Tage mit $T_f < 0\text{ °C}$ berücksichtigt.¹²⁵ Würde man für die Berechnung des rechten Bildes die Tagesminimumtemperatur T_n anstelle der Feuchttemperatur T_f ¹²⁶ verwenden, so ergäben sich wegen $T_n > T_f$ wieder kleinere Werte für die Anzahl der Frosttage, die denen des linken Bildes ähneln.

4.8.7 Kosten für Maßnahmen gegen Frostschäden

Möchte man die mittleren Kosten abschätzen, die für Frostschutzberechnung pro Jahr und Hektar in einer Dekade anfallen, so benötigt man die im vorherigen Kapitel 4.8.6 bestimmte mittlere Anzahl der Nächte pro Jahr, in denen *Frost* auftritt. Für jede Nacht, in der Frostschutz betrieben werden muss, fallen nämlich Wasser, Personal und Maschinenkosten an. Folgende Angaben stammen von der OVA Jork:

¹²⁵ Nach dem Blühbeginn wird bei beiden Methoden gleich verfahren.

¹²⁶ zum Zeitpunkt der Tagesminimumtemperatur!

Kosten für Frostschutzberegnung pro Nacht und Hektar [Personalkosten + (Maschinen + Wasserkosten)]:

- bei guter Wasserverfügbarkeit (Grundwasser nah, Gräben etc.): 32 €/Nacht/ha + 140 €/Nacht/ha = **172 €/Nacht/ha**
- in Gebieten ohne Gräben/Rückhaltemöglichkeiten, d. h. Pumpen des Wassers aus Brunnen u. ä. nötig: 32 €/Nacht/ha + 180 €/Nacht/ha = **212 €/Nacht/ha** (wird für alle Obstanbau-Gitterpunkte in Hessen verwendet)

Für die mittleren Kosten durch Frostschutzberegnungsmaßnahmen (in €/ha/a) in Hessen ergibt sich daher folgende Formel:

$$K_F = n_F^0(\text{Sondermodus}) \cdot 212 \text{ €/Nacht/ha.} \quad (4.122)$$

Es wird angenommen, dass bei Frostschutzberegnung alle Ertragsschäden durch Frost vollkommen verhindert werden können, so dass dann $s_F = 0$ gilt.

4.9 Berechnung des Apfelwicklergenerationsindizes I_A und der Apfelwicklerschäden s_A

In diesem Abschnitt sollen nur die Aspekte beschrieben werden, welche die methodische Vorgehensweise bei der in diesem Projekt benutzten Apfelwicklermodellierung betreffen. Für biologische Feinheiten sei auf [Görgens & Weber \(2009\)](#) verwiesen. Eine gute Übersicht über die Entwicklungsstufen des Apfelwicklers (*Cydia pomonella*) findet man auch in [Utah Pests fact sheet \(2010\)](#)¹²⁷.

Um die vom Apfelwickler verursachten Schäden abschätzen zu können, muss zunächst eine Prognose erstellt werden, wie viele Generationen des Apfelwicklers voraussichtlich innerhalb eines Jahres auftreten werden. Hierzu wird ein einfaches Modell verwendet, das von der OVA Jork bereits in einem vorhergehenden Projekt ([Chmielewski et al., 2009a](#)) empfohlen wurde. Dieses Modell wurde noch durch Einführung einer oberen Grenztemperatur verbessert (siehe unten), da diese in der Zukunft bei wärmeren Temperaturen wichtig werden kann. Komplizierte Modelle, wie z. B. RIMPRO (siehe <http://www.biofruitadvies.nl>) oder SOPRA (siehe <http://www.sopra.info>) wurden nicht eingesetzt, da hier nur die Anzahl der Generationen berechnet werden muss. RIMPRO benötigt auch Eingabegrößen wie die "Niederschlagsmenge und Blattfeuchte in stündlicher Auflösung", die in den BIAS-korrigierten Modellen nicht zur Verfügung stehen.

In dem hier benutzten, einfachen Modell wird zunächst die Summe $GTSUM8$ über die effektiven Gradtage GT^{eff} nach (4.123) berechnet:

$$GTSUM8 = \sum_{i=1. \text{ Jan}}^{1. \text{ Aug}} GT_i^{eff}. \quad (4.123)$$

Die Summation läuft über alle Tage vom 1. Januar bis zum 1. August. Die Summe wird nur bis zum 1. August ausgeführt, weil sich alle danach heranwachsenden Raupen aufgrund

¹²⁷ Beachte: Die dort angegebenen Schwellenwerte in der Einheit *Degree-Days* beziehen sich auf °F. Um diese Werte mit den hier angegebenen (in K·d) vergleichen zu können, muss man sie mit 5/9 multiplizieren.

der dann kürzer werdenden Tageslichtlänge nicht mehr verpuppen können. Die effektiven Gradtage (oberhalb von 10 °C) bestimmt man nach (4.124):

$$GT_i^{eff} = \frac{1}{24} \cdot \sum_{j=1}^{24} \max(T_{i,j} - 10 \text{ °C}, 0), \quad (4.124)$$

(falls $T_{i,j} > 31 \text{ °C}$, dann setze $T_{i,j}$ auf 31 °C).

$T_{i,j}$ ist die Lufttemperatur am Tag i zur Stunde j . Alle “Beiträge oberhalb von 10 °C” werden über alle Stunden des Tages aufsummiert und danach durch 24 dividiert. Da die Entwicklung des Apfelwicklers bei Temperaturen oberhalb von 31 °C nicht weiter mit steigenden Temperaturen anwächst, wird für noch höhere Temperaturen der Wert 31 °C in Gleichung (4.124) eingesetzt. Je nach dem Wert von $GTSUM8$ wird nun entschieden, wie viele Generationen des Apfelwicklers im betrachteten Jahr auftreten. Dabei können auch partielle, d. h. unvollständige Generationen, auftreten. Der so genannte Apfelwickler-Generationsindex I_A beschreibt diese Generationsanzahl:

- $I_A = 1.0$ bedeutet eine Apfelwickler-Generation
- $I_A = 1.5$ eine partielle 2. Generation
- $I_A = 2.0$ eine vollständige 2. Generation
- $I_A = 2.5$ eine partielle 3. Generation
- $I_A = 3.0$ bedeutet eine vollständige 3. Generation

Da die Datenbasis zu gering war, konnte nicht eindeutig entschieden werden, ob das eben beschriebene Apfelwicklermodell ähnliche Defizite (*betragsmäßig zu großer Trend*¹²⁸) wie das ursprüngliche Modell für den Blühbeginn (Abschnitt 4.6.4) und das für den Beginn der Pflückreife (Abschnitt 4.6.3) aufweist.

Tabelle 4.18 zeigt, welche I_A -Werte welchen *kritischen* $GTSUM8$ -Werten zugeordnet wurden (siehe z. B. Harzer, 2006 und Palm & Hauschildt, 2006). Zusätzlich sind für jeden möglichen I_A die Schäden s_A eingetragen, die durch diese Generationsanzahl voraussichtlich bedingt werden. Diese Schäden wurden von der OVA Jork grob geschätzt. s_A^o sind die Schäden [Einheit 1=100%], die auftreten würden, wenn mehrere Jahre hintereinander keine Gegenmaßnahmen ergriffen würden. Bei allen in der Tabelle 4.18 angegebenen Schäden handelt es sich um “Schäden am Ertrag”. Diese Ertragsschäden sind um 1/3 geringer als der “Fruchtbefall” (Anteil der befallenen Äpfel), da die wurmstichigen Äpfel noch zu einem Drittel¹²⁹ des Preises als Mostobst verkauft werden können.

Weiterhin werden Schäden s_A^{ext} und s_A^{int} angegeben, die auftreten, wenn man den Apfelwickler mit einer extensiven¹³⁰ bzw. einer intensiven Methode bekämpft. Die Kosten K_A^{ext} und K_A^{int} , die für diese extensiven bzw. intensiven Maßnahmen anfallen, hängen genauso wie die Schäden s_A^x (mit $x \in \{o, ext, int\}$) vom Generationsindex I_A ab und sind ebenfalls in der Tabelle 4.18 eingetragen.

¹²⁸ Im Fall des Apfelwicklermodells würde das einen zu großen Apfelwicklergenerationsindex bedeuten.

¹²⁹ Dieser Anteil schwankt stark. Der hier gewählte Werte ist ein von der OVA Jork grob geschätzter mittlerer Wert.

¹³⁰ Diese extensive Methode ist billiger in der Anwendung als die extensive Methode, jedoch nicht so wirkungsvoll.

Tabelle 4.18: Apfelwicklergenerationsindex I_A , Schäden s_A^o ohne Behandlung und Schäden s_A^{ext} bzw. s_A^{int} und Bekämpfungskosten K_A^{ext} bzw. K_A^{int} bei intensiver und extensiver Behandlung. Die Angaben zu Schäden und Kosten beziehen sich auf den Apfel.

GTSUM8	I_A	s_A^o	s_A^{ext}	s_A^{int}	K_A^{ext} [€/ha/a]	K_A^{int} [€/ha/a]
<630	1.0	0.0667	0.0200	0.0033	120	320
<900	1.5	0.0800	0.0267	0.0067	180	380
<1250	2.0	0.1667	0.0333	0.0167	230	390
<1500	2.5	0.2000	0.0400	0.0167	290	450
≥ 1500	3.0	0.3333	0.0500	0.0333	350	510

Der Apfelwickler befällt, vor allem unter klimatisch günstigen Bedingungen (warme Jahre), nicht nur den Apfel, sondern (von den hier betrachteten Fruchtarten) auch Birne, Aprikose, Pflaume, Pfirsich und Kirsche. Während die Schätzung der Anzahl der Apfelwicklergenerationen weitestgehend unabhängig von der Fruchtart ist, können die Schäden und Bekämpfungskosten noch von der Fruchtart abhängen. Die Angaben der Schäden und Kosten in Tabelle 4.18 beziehen sich auf den Apfel. Da nur für den Apfel konkrete Schätzungen für die Schäden und Kosten vorlagen, konnten die Auswertungen “bezüglich Schäden und Kosten durch den Apfelwickler” nur für diese Fruchtart durchgeführt werden.

Später (Kapitel 4.12) wird angenommen, dass die Obstbauern in der Gegenwart, in der meistens nur eine oder eine beginnende zweite Apfelwicklergeneration auftritt, die extensive Bekämpfungsmethode anwenden. In der Zukunft wird aber davon ausgegangen, dass die Obstbauern die intensive Methode anwenden, da sich I_A und damit auch die Schäden erhöhen werden und die Obstbauern Apfelschäden durch den Apfelwickler, die größer als ca. 3% sind, unbedingt vermeiden wollen. Eine genauere Aufschlüsselung der Kosten für die intensive und extensive Methode, so wie sie von der OVA Jork geschätzt wurden, sowie der eingesetzten Methoden¹³¹ findet man in Chmielewski et al. (2009a), Kapitel 3.9.6.¹³²

Multipliziert man die s_A -Werte aus der Tabelle 4.18 mit dem *Ertrag ohne Schaden*, der hier z. B. für spätreife Äpfel auf ca. 11,000...17 000 €/ha geschätzt wird (siehe Seite 171 und Tabelle 4.26), so erhält man den *Ertragsausfall* (in €) pro Hektar (der allein durch den Apfelwickler hervorgerufen wird).

Beide oben beschriebenen Behandlungsmethoden sind rentabel (gegenüber einer Nichtbehandlung; vgl. hierzu auch die Definition von *rentabel* auf Seite 172). Vergleicht man die extensive mit der intensiven Methode, so sind beide im Fall von $I_A = 1$ gleich rentabel. Für $I_A > 1$ erwirtschaftet man mit der intensiven Methode aber höhere Gewinne als mit der extensiven.

Für die Berechnung des Apfelwicklergenerationsindex I_A mussten die Tageswerte der BIAS-korrigierten Tagesmaximum- und Tagesminimum-Temperaturen der regionalen Klimamodelle approximativ in Stundenwerte umgerechnet werden. Hierzu wurde wieder die modifizierte Methode von Linvill (1990) verwendet [Gleichung (4.38) und (4.39)].

Für alle für den Apfel relevanten 19 Gitterpunkte wurden I_A und die sich daraus erge-

¹³¹ Einsatz verschiedener Insektizide und der Pheromon-Verwirrungsmethode.

¹³² Der Einsatz neuartiger, biologischer Pflanzenschutzmethoden wie der von *Nematoden* und *Schlupfwespen* sowie von *Granuloviren* wurde hier nicht berücksichtigt.

benden Schäden und Kosten für die intensive und extensive Behandlung für alle Jahre der Szenarien C20 (1961-2000) und A1B (2001-2100) mit den Temperaturen aller "5 Klimamodelle" berechnet. Danach konnten Mittelwerte über Gebiete und 30-jährige Zeitabschnitte und entsprechende statistische Kenngrößen berechnet werden.

4.10 Ertragberechnungen mit dem Bodenwasser- und Ertragsmodell SIMWASER

Im Folgenden soll das für die Wasserhaushalts- und Ertragsrechnungen benutzte Modell SIMWASER (Stenitzer, 1988) kurz vorgestellt werden. SIMWASER simuliert die Entwicklung einer vorzugebenden Pflanzenart von der Aussaat bis zur Ernte. Dabei wird Horizontalhomogenität angenommen. Vom Modell werden sowohl Veränderungen des Bodenwasserhaushalts durch Verdunstung und Wurzelwasseraufnahme als auch die Transpiration des Bestandes und das Wurzelwachstum sowie das Wachstum der über dem Boden befindlichen Pflanzenbestandteile (oberirdische Biomasse) berechnet. Das Originalmodell war auf die Simulation verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen zugeschnitten. Um auch Obstbäume wenigstens approximativ simulieren zu können, mussten viele Anpassungen, die unten weiter erläutert werden, vorgenommen werden. Ferner wurden auch allgemeine Verbesserungen und viele Erweiterungen implementiert.

4.10.1 Kurzer Überblick über das Modell

4.10.1.1 Eingangsgrößen

SIMWASER benötigt folgende Vorgaben: Die Fruchtfolge (jeweils Termin der Aussaat und des Umpflügens) und die geographische Lage und Höhe des zu simulierenden Standortes. Ferner kann man vorgeben, ob Grundwasser nahe oder ferne Rechnungen durchgeführt werden sollen. Im ersten Fall muss die Grundwassertiefe als Funktion der Zeit für jeden Tag vorgegeben werden. Für jede Bodenschicht müssen die Bodenart, das Gesamtfinporenvolumen, der Volumenanteil des Grobbodens (siehe Abschnitt 4.10.1.4) und der Anfangswassergehalt vorgegeben werden. Für die Schichtdicke der einzelnen Bodenschichten zur Berechnung des Wasserhaushalts wurde 0.05 m gewählt. Die Gesamttiefe des Bodens wurde so gewählt, dass sie mit dem tiefsten Horizont, für den das *Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie* (HLUG) (Kapitel 4.10.9) noch Daten lieferte, übereinstimmte. Alle Rechnungen wurden Grundwasser fern durchgeführt. Der Wassergehalt im ersten Simulationsjahr zu Jahresbeginn wurde so gewählt, dass die relative nutzbare Feldkapazität [vgl. Formel (4.165)] 95 % betrug.

Als treibende Größen (Forcing) müssen für jeden Tag, der simuliert werden soll, folgende meteorologische Größen vorliegen: Maximal mögliche Sonnenscheindauer S_{dmax} (kann aus der geographischen Lage berechnet werden), aktuelle Sonnenscheindauer S_d , Tagesmittel der 2 m-Lufttemperatur T , relative Luftfeuchte Rel , Windgeschwindigkeit V_{10} in 10 m Höhe (oder in 2 m Höhe; der Wert wird dann entsprechend auf 10 m Höhe extrapoliert), tägliche Niederschlagsmenge $PRECIPTOT$ und Globalstrahlungssumme $SumGlob$, Sättigungsdefizit $Deltaq$ (kann aus T und Rel berechnet werden). Für das Bienenmodell BIENE (siehe Abschnitt 4.10.6) werden auch noch die Tagesminimum- T_n und Tagesmaximumtemperatur T_x benötigt.

4.10.1.2 Ausgabegrößen

Da SIMWASER sehr viele Ausgabegrößen besitzt, seien hier nur die wichtigsten und für das Projekt CHARIKO relevantesten Größen genannt: Außer der gesamten oberirdischen Trockenmasse TM wird der jährliche Trockenmassenzuwachs ΔTM , die Transpiration TRS , Evaporation $EVAP$, der Termin BB des Blühbeginns und der Reife RF , der Bodenwassergehalt für alle Bodenschichten bzw. die relative nutzbare Feldkapazität $WREL$ und die mittlere Bienenflugintensität während der Blütezeit (von Blühbeginn bis ca. 10 Tage danach¹³³) ausgegeben. Zusätzlich werden verschiedene Statistiken der bereits oben erwähnten meteorologischen Eingangsgrößen berechnet.

Die Rechnungen können ohne Zusatzbewässerung oder mit Sommerberegnung (siehe Abschnitt 4.10.5) durchgeführt werden. Im letzteren Fall wird auch die benötigte Beregnungsmenge ausgegeben.

4.10.1.3 Assimilation

Grundlage des Modells ist der pflanzenphysiologische Zusammenhang zwischen der Assimilation und der kurzwelligen Einstrahlung auf den Bestand und der Transpiration der Blätter. Die aktuelle Assimilationsrate $ASSIM$ (z. B. in kg Trockenmasse/ha/d) berechnet sich nach folgender Formel:

$$ASSIM = PFLUX \cdot DAYLGT \cdot TFASS \cdot R \cdot 0.344. \quad (4.125)$$

$PFLUX$ ist die potentielle Assimilationsrate, die vom Wert der maximalen Netto-Photosynthese-Rate $PHOTSR$ abhängig ist:

$$PFLUX = \int_{x=0}^{LAI} \min(PHOTSR, \alpha \cdot PAR(x)) dx. \quad (4.126)$$

α steigt linear mit $PHOTSR$ an. Dabei berechnet sich die pro Blattfläche “absorbierte und gestreute” photosynthetisch aktive Strahlung (Radiation) PAR in der Höhe (Ebene), die von einem Leaf Area Index der Größe LAI überdeckt wird, zu

$$PAR(LAI) = k \cdot PAR_0 \exp(-k \cdot LAI). \quad (4.127)$$

PAR_0 ist die PAR -Einstrahlung oberhalb des Bestandes.¹³⁴ k ist der Extinktionskoeffizient für die PAR . LAI bezeichnet hier und weiter unten immer den Anteil des grünen LAI . Aus (4.126) und (4.127) kann man leicht eine analytische Lösung berechnen, die im Programm verwendet wird. Die im originalen SIMWASER durchgeführte numerische Integration ergab für große LAI völlig falsche Ergebnisse (Chmielewski et al., 2009a, Abb. 3.8.2).

Die weiteren Größen in Gleichung (4.125) haben folgende Bedeutung: $DAYLGT$ (= $Sdmax$) ist die Tageslichtlänge, $TFASS$ ist ein vom Pflanzentyp und der Temperatur abhängiger Faktor, der die Abhängigkeit der Assimilationsrate von der Lufttemperatur

¹³³ Die Blütezeit ist als der Zeitraum definiert, in dem der Entwicklungsparameter $DEVSTG$ (vgl. Kapitel 4.10.3) Werte zwischen 4.5 und 5.2 besitzt.

¹³⁴ PAR_0 wird in SIMWASER approximativ als die Hälfte der “über die Tageslichtlänge gemittelten Globalstrahlung” $GLOBR$ angesetzt. Letztere wird aus der täglichen Globalstrahlungssumme $GLOBAL$ berechnet.

beschreibt, R ist die relative Transpiration [siehe Abschnitt 4.10.1.5, Formel (4.150)], und der Faktor 0.344 berücksichtigt die Growth Respiration (Veratmungsverlust der neu gebildeten Pflanzenmasse) und enthält zusätzlich einen Eichfaktor.

Die neu assimilierte Masse wird (evtl. nach Abzug der *Maintenance Respiration*) mit Hilfe von empirischen, vom Entwicklungsstadium *DEVSTG* [siehe Gleichung (4.155), (4.156) und (4.162) in Kapitel 4.10.3] der Pflanzen abhängigen Funktionen (siehe z. B. Abbildung 4.42) auf die Wurzeln, Blätter (Zunahme des *LAI*) und die restlichen Pflanzenteile verteilt. Die gesamte Pflanzenmasse (ohne Wasseranteil) ohne die Wurzelmasse ist die für CHARIKO wichtige Trockenmasse TM , aus deren jährlichem Zuwachs ΔTM der Obstertrag abgeschätzt wird (Abschnitt 4.10.11).

Da die relative Transpiration von der Verteilung des Bodenwassers abhängig ist, muss auch der zeitliche Verlauf des Bodenwassers für eine genügend mächtige Bodenschicht berechnet werden (siehe Abschnitt 4.10.1.4).

Leider entsprach die Modellbeschreibung (Stenitzer, 1988) in vielen Teilen schon zu Beginn des Projekts CHARIKO nicht mehr der aktuellen Modellversion. Es würde leider zu weit führen, alle Änderungen und Verbesserungen, die damals bereits implementiert waren, zu beschreiben. Die wichtigsten Korrekturen und Verbesserungen, die innerhalb des Projekts KliO (Chmielewski et al., 2009a) und dem hier beschriebenen Projekt CHARIKO eingeführt wurden, werden aber in diesem und den folgenden Abschnitten beschrieben.

4.10.1.4 Der Boden

Die Methode, mit der die vom HLUG zur Verfügung gestellten Bodendaten auf die einzelnen, hier benutzten Modell-Gitterpunkte interpoliert wurden, wird in Kapitel 4.10.9 beschrieben. Hier soll zunächst nur beschrieben werden, wie die Bodenparameter umgerechnet werden mussten, wenn bereits die Feinbodenart für einen Gitterpunkt bestimmt worden war.

Für einige Bodenarten nahm das relative Gesamtporenvolumen GPV_1 sehr kleine Werte an, vor allem dann, wenn der Grobbodenanteil hoch war. Eine Interpolation auf so kleine Werte ist mit den Bodendateien¹³⁵ von SIMWASER nicht möglich, da dort nur Werte für Wasserbindung und Wasserleitung für $GPV \geq 30\%$ angegeben werden.

Die kleinen Werte kommen dadurch zu Stande, dass das HLUG das Porenvolumen des Feinbodens immer auf das Gesamtvolumen des betrachteten Bodenelements bezieht. Sind in diesem große Anteile von Grobboden (Steine, Grus, Kies, Schotter etc.) vorhanden, so verringern sich die GPV_1 -Werte entsprechend. Möchte man hingegen das Feinbodenporenvolumen nur auf das Volumen des Feinbodens beziehen, so kann man sich der Gleichungen (4.128) ff. bedienen:

$$GPV_2 = \frac{GPV_1 \cdot V_{ges}}{V_{fein}} = \frac{GPV_1}{1 - Relgrob} = \frac{GPV_1}{FAK} \quad (4.128)$$

$$Relgrob := \frac{V_{grob}}{V_{ges}} = 1 - \frac{V_{fein}}{V_{ges}} \quad (4.129)$$

$$Fak := 1 - Relgrob = \frac{V_{fein}}{V_{ges}} = \frac{GPV_1}{GPV_2} \quad (4.130)$$

¹³⁵ Die Kurven der hydraulischen Leitfähigkeit, des Wasserpotentials und des Penetrometerwiderstands als Funktion vom Bodenwassergehalt werden für jeden Bodentyp und mehrere Klassen des Gesamtporenvolumens von SIMWASER in gesonderten Dateien bereitgestellt.

GPV_2 ist dann das größere, nur auf den Feinbodenanteil bezogene relative Porenvolumen. V_{fein}, V_{grob} und V_{ges} sind die Volumina des Feinbodens, des Grobbodens und das Gesamtvolumen des betrachteten Bodenelements. $Relgrob$ ist der Volumenanteil des Grobbodens am Gesamtvolumen des betrachteten Horizonts. Werte für diese Größe kann man aus dem in den HLUg-Daten enthaltenen Parameter $GROBBREP$ (Grobbodenklasse) gemäß **Tabelle 4.19** bestimmen. $GROBBREP = 4$ bedeutet z. B., dass im Mittel 37.5 % des Bodens aus Grobboden besteht.

Tabelle 4.19: Zuordnung der Grobbodenklasse $GROBBREP$ zum Volumenanteil $Relgrob$ des Grobbodens am Gesamtvolumen des betrachteten Horizonts.

GROBBREP [1]	Relgrob [1]
1	0.010
2	0.060
3	0.175
4	0.375
5	0.625
6	0.750

Zur Berechnung der Bodenkennwerte bzgl. der Wasserleitung [hydraulische Konduktivität K (bzw. Ku-Kurve), Wasserpotential ψ (bzw. pF-Kurve) und Penetrometerwiderstand¹³⁶ PE als Funktion des (relativen) Wassergehalts W und des Gesamtporenvolumens] muss man unbedingt das auf den Feinbodenanteil bezogene GPV_2 verwenden, da alle Abhängigkeiten im Boden hochgradig nichtlinear sind. Nur im Feinboden existieren Poren, und man muss die Wasserleitung getrennt für den Feinbodenanteil berechnen und kann dann hinterher den Wassergehalt wieder auf das Gesamtvolumen beziehen. Man berechnet also zunächst den Wasserfluss im Feinbodenanteil. Bei der Aufstellung der Gesamtbilanz muss man dann allerdings beachten, dass ein Boden mit hohem Anteil an Steinen eine geringere Leitfähigkeit besitzt und der Gesamtwassergehalt pro Gesamtvolumen um den Faktor Fak kleiner ist als der auf den Feinboden bezogene Wassergehalt W . Die Wasserleitungsgleichung bei Vorhandensein eines Grobbodenanteils lautet daher

$$\frac{\partial (Fak \cdot W)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(Fak \cdot K \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) - ROOTEX \quad (4.131)$$

mit $K = K(W(z), GPV_2)$ und $\psi = \psi(W(z), GPV_2)$, wobei ψ in der Einheit der Vertikalcoordinate z (z. B. *Meter Wassersäule*) angegeben werden muss. ψ ist dabei so definiert, dass trockener Boden hohe, positive ψ -Werte aufweist. Die z -Coordinate wurde nach unten hin zunehmend definiert! $ROOTEX$ ist die Wasseraufnahme der Wurzeln in z. B. $m^3/(m^3 h)$. Ohne $ROOTEX$ und bei zeitlich und vertikal konstantem Fak geht (4.131) in die gewöhnliche Wasserleitungsgleichung (Dary's Law) für den Feinbodenwassergehalt W über.

Treten Unstetigkeiten im Grobbodenanteil (oder bei den anderen Wasserbindungsgrößen) auf, so muss an diesen Diskontinuitäten (d. h. Sprüngen von z. B. Fak bzw. $Relgrob$)

¹³⁶ Das ist der Widerstand, welchen der Boden dem Eindringen z. B. von Pflanzenwurzeln entgegensetzt.

folgende Zusatzbedingung gelten (die Wasserflüsse müssen auf beiden Seiten der Diskontinuität gleich sein):

$$Fak_1 \cdot K_1 \cdot \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial z} + 1 \right) = Fak_2 \cdot K_2 \cdot \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial z} + 1 \right). \quad (4.132)$$

Leider wurde die Wasserleitung in SIMWASER so implementiert, dass Diskontinuitäten nicht exakt nach (4.132) behandelt werden (nicht einmal bei $Fak_1 = Fak_2 = 1$). Daher macht es auch wenig Sinn, eine Modifikation der Implementierung von Gleichung (4.131) (diese wurde ohne Fak bzw. mit Fak=1 implementiert) vorzunehmen. Bei einer korrekten Implementierung mit Hilfe von (4.132) an den Diskontinuitätsflächen müsste man die Vertikalschrittweite der diskretisierten Gleichung (4.131) auch wesentlich kleiner als den Abstand der unterschiedlichen Horizonte machen. Wenn der Horizontabstand nur einige Zentimeter bis Dezimeter beträgt, was häufig der Fall ist, so müsste man die jetzt benutzte vertikale Schrittweite von 0.05 m wesentlich verkleinern, um eine ausreichend genaue numerische Lösung der Gleichung (4.131) zu gewährleisten. Würde man aber z. B. pro Horizont nur eine Schicht wählen, so würde die Anwendung von (4.132) auf jede dieser Schichten die Konstanz des Wasserflusses nach sich ziehen. Damit wäre der Wassergehalt (falls die Wurzelwasseraufnahme vernachlässigbar wäre) stationär, was natürlich im allgemeinen Fall nicht korrekt ist.

Eine approximative Methode (harmonisches Mittel der K 's), die allerdings nur bei Quasi-Stationarität korrekt ist, die aber Diskontinuitäten mit kleinerem Fehler behandelt, wurde in SIMWASER neu implementiert und kann wahlweise eingesetzt werden.

Eine Anpassung an Böden mit hohem Grobbodenanteil würde ein vollständig neues Schema für die Berechnung der Wassergehalte bzw. eine Neuprogrammierung des Bodenmodells bedeuten.

Die einzige Möglichkeit, mit wenig Aufwand vertretbare Ergebnisse auch bei großem Grobbodenanteil zu erhalten, ist die Umrechnung von GPV_1 nach GPV_2 und mit diesen vergrößerten Porenvolumina die normale SIMWASER-Bodenphysik (Fak=1) zu rechnen. Das bedeutet allerdings, dass die Steine des Grobbodens in SIMWASER durch Feinboden ersetzt werden. Glücklicherweise treten hohe Grobbodenanteile nur in den untersten Horizonten und nur an relativ wenigen Gitterpunkten auf. Leider sind die Tiefen dieser untersten Horizonte aber nicht immer so tief, dass sie für das Wachstum und die Wurzelwasseraufnahme keine Rolle mehr spielen sollten. So existieren Gitterpunkte, bei denen bereits unterhalb von 40 cm bzw. 50 cm merkliche Grobbodenanteile existieren. Eine Begrenzung des Bodens nur auf Horizonte oberhalb dieser Tiefe ist auch nicht sinnvoll, da die Lösung der Wasserhaushaltsgleichung dann noch extrem stark von der unteren Randbedingung abhängen würde.

Die Gleichung (4.131) wird in SIMWASER mit entsprechenden Randbedingungen numerisch mit einer Vertikalschrittweite von $\Delta z = 5$ cm integriert. Bei *Grundwasser ferner Rechnung*¹³⁷ wird am untersten Rand¹³⁸ der betrachteten Bodenschicht angenommen, dass der Wasserfluss nur durch die Schwerkraft hervorgerufen wird [$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0$ bzw. Wasserfluss = K ; vgl. Gleichung (4.131)].

¹³⁷ Alle Obstgitterpunkte in Hessen wurden *Grundwasser fern* berechnet!

¹³⁸ Für die Tiefe dieser Fläche wurde immer die untere Begrenzung des tiefsten Horizonts verwendet, für den das HLUG (vgl. Kapitel 4.10.9) am betrachteten Gitterpunkt noch Daten lieferte (i. Allg. 1.5 m bis 2.0 m Tiefe)

Während alle anderen Größen normalerweise in Zeitschritten von Tagen berechnet werden, muss die Berechnung des Bodenwasserhaushalts abhängig vom Wassergehalt der einzelnen Bodenschichten in wesentlich kleineren Zeitschritten (bis hinab zu Sekunden) vorgenommen werden, da die Wassergehaltsänderung in einer Schicht pro Zeitschritt nicht 0.1 Vol% überschreiten soll, um numerische Stabilität zu gewährleisten.

4.10.1.5 Verdunstung

Die ursprüngliche Version von SIMWASER enthielt Gleichungen für die potentielle Evapotranspiration, die potentielle Transpiration und die potentielle Soil-Evaporation, die sowohl für Brache als auch für voll ausgebildete Vegetation mit hohem Leaf Area Index *TOTLAI* und alle Zwischenstadien einsetzbar sein sollten. Leider waren diese Ansätze für kleine Leaf Area Indizes *TOTLAI* und für unbewachsenen Boden vollkommen falsch. Die Gleichung lieferte dann viel zu kleine potentielle Evapotranspirationswerte *ETPOT*. Diese waren z. T. kleiner als die sogenannte *Equilibrium Verdunstung*, die eine untere Grenze der Evaporation über feuchten Oberflächen darstellt. Die Übergänge von Brache zu sich entwickelnder Vegetation zeigten grobe Unstetigkeiten und die Parametrisierung der Austauschkoefizienten bzw. aerodynamischen Widerstände entsprach nicht der allgemein akzeptierten Monin-Obukhov-Theorie. Diese alten Ansätze und deren Fehler sind in [Chmielewski et al. \(2009a\)](#) ausführlich dargestellt. Die fehlerhaften Parametrisierungen wurden durch eine verbesserte Theorie ersetzt, die sowohl Brache als auch den Übergang zu voll entwickelter Vegetation korrekt und stetig beschreibt. Die folgenden Gleichungen zeigen die neue, verbesserte Physik.

Die potentielle Evapotranspiration *ETPOT* wird nach der Penman-Monteith-Formel berechnet:

$$ETPOT = \frac{f_t Q + 0.864 \frac{H_0}{r_H}}{f_t + \frac{r_E}{r_H}}. \quad (4.133)$$

H_0 = Sättigungsdefizit; f_t = Temperaturfaktor (eine nur von der Lufttemperatur abhängige Funktion); Q = Nettostrahlungsbilanz – Bodenwärmestrom.

Für den Widerstand r_H bzgl. des Transports sensibler Wärme gilt (Parallelschaltung von *Boden und Vegetation*)

$$\frac{1}{r_H} = \frac{ETOTAL}{r_{a,B}} + \frac{1 - ETOTAL}{r_{a,V}}. \quad (4.134)$$

Dabei wird der “Anteil des *kahlen* Bodens *ETOTAL*” folgendermaßen berechnet:

$$ETOTAL = EXP(-EXCOEFF \cdot TOTLAI \cdot EXFAK). \quad (4.135)$$

[EXCOEFF \approx 0.5; *TOTLAI* = **totaler LAI** = Summe aus grünem *LAI* und *Dead-LAI* (bereits abgestorbene Blätter, die aber noch am Baum hängen); *EXFAK* wurde erst im Projekt KliO ([Chmielewski et al., 2009a](#)) für Obstbäume eingeführt und für diese auf 0.5 gesetzt; in allen anderen Fällen wurde EXFAK=1 verwendet. $r_{a,B}$ und $r_{a,V}$ werden weiter unten beschrieben.]

Für den Widerstand r_E bezüglich des Wasserdampftransports gilt (Parallelschaltung von *Boden und Vegetation*; bei Vegetation wird noch der Bulk-Stomata-Widerstand

mit dem “aerodynamischen Widerstand über Vegetation” und beim Boden der Bodenwiderstand mit dem “aerodynamischen Widerstand über kahlem Boden” in Reihe geschaltet)

$$\frac{1}{r_E} = \frac{ETOTAL}{r_{a,B} + r_B} + \frac{1 - ETOTAL}{r_{a,V} + r_{s,bulk}}. \quad (4.136)$$

$r_{s,bulk}$ ist der sogenannte “Bulk Stomata Widerstand” (hier inklusive Kutikularwiderstand), welcher die Transpiration durch die Stomata-Öffnungen der Blätter beschreibt. Ein großer Widerstand bedeutet kleine Stomata-Öffnungen (oder auch wenige Stomata pro Blattfläche) und führt zu kleiner Transpiration. Dieser Widerstand wird ähnlich wie die potentielle Assimilationsrate $PFLUX$ [vgl. Gleichung (4.126)] als Integral über alle Blattschichten als Funktion der einfallenden kurzwelligeren Strahlung und des minimalen Stomatawiderstandes $r_{s,min}$ berechnet. Andere Abhängigkeiten, wie die von der Temperatur, vom Sättigungsdefizit, Blattwasserpotential und der inneren und äußeren CO_2 -Konzentration¹³⁹ werden vernachlässigt. $r_{s,bulk}$ wird bei Brache auf unendlich gesetzt.¹⁴⁰

r_B ist ein im Projekt CHARIKO neu eingeführter Bodenwiderstand, der berücksichtigt, dass der Wasserdampftransport bei der Evaporation nicht direkt “durch mit Wasserdampf gesättigter Luft von der Bodenoberfläche her” erfolgt, sondern vom sogenannten *Interface Level* (der “Oberfläche” des “freien” Kapillar-Wassers im Boden), welches im Allgemeinen etwas unterhalb der Bodenoberfläche liegt. Nach Deardorff (1977) (siehe auch Deardorff, 1978 und Mahfouf & Noilhan, 1991) gilt in der sogenannten β -Formulierung der Bodenverdunstung

$$\beta = \frac{r_{a,B}}{r_{a,B} + r_B} \text{ mit } \beta = \min\left(1, \frac{W_1}{0.75 \cdot W_{sat}}\right), \quad (4.137)$$

wobei die relative Luftfeuchte h im Interface Level gleich 1 (100%) gesetzt wird. W_{sat} ist der relative Wassergehalt (in Vol%) bei Sättigung [bzw. das Porenvolumen GPV_2 ; vgl. Gleichung (4.128)] und W_1 der aktuelle relative volumetrische Wassergehalt (in Vol%) in der obersten Bodenschicht. Aus Gleichung (4.137) folgt für r_B :

$$r_B = r_{a,B} \left(\frac{1 - \beta}{\beta} \right). \quad (4.138)$$

Für die beiden aerodynamischen Widerstände über dem Anteil “kahler Boden” ($r_{a,B}$) und über dem Vegetationsanteil ($r_{a,V}$) gilt

$$r_{a,B} = \frac{\ln(10 \text{ m}/0.01 \text{ m}) \cdot (\ln(2 \text{ m}/0.01 \text{ m}) + kB_B^{-1})}{\kappa^2 V_{10}} \quad (4.139)$$

$$r_{a,V} = \frac{\ln(10 \text{ m}/z_0) \cdot (\ln(2 \text{ m}/z_0) + kB_V^{-1})}{\kappa^2 V_{10}}. \quad (4.140)$$

Das ist korrekt, wenn die Windgeschwindigkeit V_{10} in 10 m und die Temperatur T und die Feuchte in 2 m Höhe gemessen wurden. Weiterhin wurde die statische Stabilität (thermische Schichtung) der planetarischen Grenzschicht vernachlässigt. Versuche ergaben, dass

¹³⁹ Wenn die CO_2 -Düngung (siehe Kapitel 4.10.7) berücksichtigt wird, spielt die CO_2 -Konzentration aber eine Rolle!

¹⁴⁰ Im originalen SIMWASER wurde $r_{s,bulk}$ nach der Reife ($DEVSTG = 10$) auf unendlich gesetzt. Obstbäume transpirieren im Gegensatz zu Getreide etc. aber auch noch nach der Reife.

das in guter Approximation möglich ist, da die hier dargestellten Gleichungen für Tageswerte verwendet werden.¹⁴¹ Die Rauigkeitslänge z_0 für Impulstransfer über Vegetation wird aus der Vegetationshöhe H_{Veg} geschätzt:

$$z_0 = 0.1 H_{Veg}. \quad (4.141)$$

Die Rauigkeitslänge über dem Anteil des kahlen Bodens wurde hier zu 0.01 m angenommen. κ ist die *von Karman* Konstante (=0.4).

$kB_V^{-1} := \ln(z_0/z_H)$ (dabei ist z_H die Rauigkeitslänge für sensible Wärme) wurde über Vegetation auf den festen Wert 2 gesetzt, hängt aber eigentlich (bei dichter Vegetation) noch von der Blattgröße, Windgeschwindigkeit, dem *TOTLAI* und weiteren Größen ab (siehe Blümel, 1999). Das " kB_B^{-1} beim Bodenwiderstand" kann auch wesentlich größere Werte annehmen (bis ca. 10) und hängt strenggenommen von der *Roughness Reynolds* Zahl Re_* ab:

$$Re_* = \frac{u_* \cdot 0.01 \text{ m}}{\nu} \quad (\nu = \text{kinematische Viskosität} = 1.51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}). \quad (4.142)$$

u_* ist die Schubspannungsgeschwindigkeit, hier berechnet ohne Berücksichtigung der statischen Stabilität der atmosphärischen Grenzschicht:

$$u_* = k \cdot V_{10} \left[\frac{ETOTAL}{\ln\left(\frac{10 \text{ m}}{0.01 \text{ m}}\right)} + \frac{1 - ETOTAL}{\ln\left(\frac{10 \text{ m}}{z_0}\right)} \right]. \quad (4.143)$$

Zuerst wurde kB_B^{-1} auf einen konstanten Wert gesetzt. Wie aber Versuche bei der Verifikation über Brache (Kapitel 4.10.8) ergaben, erhält man wesentlich realistischere Ergebnisse, wenn man die Abhängigkeit von Re_* berücksichtigt. In dieser Arbeit wurde die Formulierung nach Brutsaert (1982) (seine Tabelle 4.2 für "bluff rough surfaces" mit Pr anstelle von Sc) gewählt:

$$\begin{aligned} kB_B^{-1} &= 2.46 \cdot Re_*^{0.25} - \ln(7.4) && \text{(für } Re_* > 2) \\ kB_B^{-1} &= -\ln(0.397) && \text{(für } Re_* \leq 2). \end{aligned} \quad (4.144)$$

Verhoef et al. (1997) ermittelten für Savanne und Wein wesentlich größere kB^{-1} -Werte als der hier für Vegetation gewählte Wert "2". Der Wert "2" über Vegetation wurde bis dahin in den meisten Veröffentlichungen als optimaler Wert angenommen (Garratt & Hicks, 1973). Die von Verhoef et al. ermittelten Streuungen für kB^{-1} sind allerdings sehr groß, und die Werte besitzen auch einen Tagesgang. Außerdem muss man berücksichtigen, dass in der hier vorliegenden Arbeit die Widerstände für die Anteile des Bodens mit und ohne Vegetation¹⁴² zunächst getrennt berechnet werden [Gleichung (4.139) und (4.140)] und erst danach der effektive Widerstand für die betrachtete Oberfläche berechnet wird [Gleichung (4.136)]. Bei diesem Vorgehen ist das effektive kB^{-1} für die gesamte Oberfläche natürlich ebenfalls größer als der Wert "2" über dem reinen Vegetationsanteil.

¹⁴¹ D. h., dass man Tagesmittelwerte der Temperatur und Windgeschwindigkeit in die Gleichungen einsetzt und als Ergebnis Tagesmittelwerte der Evapotranspiration erwartet. Das ist auf Grund der Nichtlinearität der Gleichungen natürlich nur grob approximativ möglich.

¹⁴² Gemeint ist hiermit der horizontale Anteil der Oberfläche, die senkrecht von oben betrachtet mit Obstbäumen bedeckt ist bzw. der dazwischen liegende Anteil.

Über kahlem Boden ermittelten Verhoef et al. (1997) kleine oder sogar negative kB^{-1} -Werte. Das liegt aber daran, dass sie im Gegensatz zum hier betrachteten aerodynamisch rauhen einen aerodynamisch glatten Boden betrachteten. Die Autoren schlagen vor, die Brutsaert-Formeln auch über Vegetation zu benutzen und folgern, dass das Konzept von kB^{-1} insgesamt fraglich sei und überdacht werden müsse. Yang et al. (2008) vergleichen Ansätze verschiedener Autoren für kB^{-1} . Der Ansatz von Brutsaert liefert in der Arbeit von Yang et al. etwas zu hohe Werte, die Ansätze der anderen Autoren zeigen aber in Fällen mit nach oben gerichtetem sensiblen Wärmefluss zu niedrige Werte. — Auch wenn das Konzept und die konkreten Werte von kB^{-1} bis heute umstritten sind, ergaben die hier benutzen kB^{-1} -Werte bei der Verifikation (Kapitel 4.10.8) gute Ergebnisse.

Die potentielle Transpiration $PTRANS$ und die potentielle Soil-Evaporation $PSEVAP$ kann man approximativ aus $ETPOT$ bestimmen, wenn man berücksichtigt, dass man bei der Nutzung der Penman-Monteith-Formel annehmen muss, dass der Boden die gleiche Temperatur T_f wie die Blätter hat, so dass man die gleiche spezifische Sättigungsfeuchte $q_{sat}(T_f)$ am Boden und in den Blättern annehmen muss. Zunächst kann man dann $ETPOT$ mit Hilfe des Widerstands (4.136) in folgender Form schreiben:

$$ETPOT = L \cdot \rho (q_{sat}(T_f) - q_a) / r_E. \quad (4.145)$$

Ähnlich erhält man für $PSEVAP$:

$$PSEVAP = L \cdot \rho (q_{sat}(T_f) - q_a) \cdot ETOTAL / (r_{a,B} + r_B). \quad (4.146)$$

L ist hierbei die spezifische Verdampfungswärme von Wasser und q_a ist die spezifische Feuchte im Referenzniveau (2 m). ρ ist die Dichte von feuchter Luft. Aus diesen beiden Gleichungen folgt sofort

$$PSEVAP = ETOTAL \frac{r_E}{r_{a,B} + r_B} ETPOT \quad (4.147)$$

und für $PTRANS$ gilt, falls die Interzeptionsmenge¹⁴³ $EI = 0$ ist, da in diesem Fall die gesamte Evapotranspiration gleich der Summe aus der Transpiration und der Bodenevaporation sein muss:

$$PTRANS = ETPOT - PSEVAP. \quad (4.148)$$

Wenn die Interzeptionsmenge EI ungleich null ist, werden die Gleichungen etwas komplizierter.

Die aktuelle Soil-Evaporation $ASEVAP$ wird als Minimum von $PSEVAP$ und dem maximal möglichen Wasserfluss $SEVAP$ zur Bodenoberfläche, den der Boden aufrechterhalten kann, bestimmt. $SEVAP$ wird als Funktion der Diffusivität des Bodens, die wiederum vom Bodenwassergehalt abhängt, angesetzt. Wegen der gleichzeitigen Nutzung dieser *Threshold*-Formulierung (auch als γ -Methode bezeichnet) und der Gleichung (4.137) (β -Formulierung) stellt die Berechnungsmethode eine Mischung aus γ - und β -Formulierung dar. Man beachte, dass $PSEVAP$ in (4.146) und (4.147) wegen der Einführung von r_B nun nicht mehr die potentielle Bodenevaporation darstellt, sondern bereits der aktuellen Bodenevaporation entspricht, wenn $SEVAP$ groß genug ist und $PSEVAP$ nicht durch die *Threshold*-Formulierung weiter begrenzt wird. Auch $PTRANS$ in (4.148) und $ETPOT$

¹⁴³ Die Interzeption wird im Modell berücksichtigt, hier aber nicht weiter erläutert.

in (4.145) sind nun keine echten potentiellen Transpirationen bzw. Evapotranspirationen mehr. Die echten potentiellen Werte (mit $r_B = 0$ berechnet) werden jetzt (nur zu Informationszwecken) in SIMWASER separat berechnet und ausgegeben.

Die aktuelle Transpiration *ATRANS* berechnet sich aus der potentiellen Transpiration *PTRANS* und der relativen Transpiration *R* zu

$$ATRANS = PTRANS \cdot R. \quad (4.149)$$

Für die relative Transpiration *R* gilt:

$$R = \min(1, SPREX/PTRANS). \quad (4.150)$$

SPREX ist die über alle Bodenschichten integrierte, maximale Wurzelwasserentnahme pro horizontaler Einheitsfläche und hängt vom Bodenwassergehalt *W* bzw. vom Bodenwasserpotential $\psi(W)$, vom Bodenwiderstand für Wasserleitung und vom Vernässungsfaktor *FWLOG* (Näheres dazu in Abschnitt 4.10.5 auf Seite 143), dem Entwicklungszustand der Pflanze (*DEVSTG*) und der Wurzellängendichte in den einzelnen Bodenschichten ab.

Die Wurzelverteilung wird durch die von der Tiefe bzw. Bodenschicht abhängige Wurzellängendichteverteilung beschrieben. Das Wurzellängen- und Tiefenwachstum wird abhängig vom Entwicklungsstadium (*DEVSTG*) der Pflanzen als Funktion der aktuellen Assimilationsrate *ASSIM*, des vom Wassergehalt abhängigen Penetrometerwiderstands und des Vernässungsfaktors *FWLOG* für jede Bodenschicht gesondert berechnet.

Bei den obigen Formeln muss man nicht mehr die Regimes “kahler Boden” und “Vegetation” unterscheiden. Mit Hilfe von *ETOTAL* verändern sich die Widerstände nun stetig, wenn kahler Boden langsam mit Vegetation zuwächst und umgekehrt.¹⁴⁴ Im Grenzfall werden aber die bekannten Formeln für kahlen Boden oder dichte Vegetation angenommen (hier aber korrigiert gegenüber der alten Version!). Die aerodynamischen Widerstände sind nun auch umgekehrt proportional zur Windgeschwindigkeit, wie es sein muss.

Etwas unbefriedigend ist, dass die obigen Gleichungen (genauso wie die originalen Gleichungen) im Grunde nur eine *verschmierte* Vegetation beschreiben. Der *LAI* ist hierbei gleichmäßig über die gesamte Grundfläche verteilt. Gerade bei Obstbäumen tritt aber der Fall auf, dass die Vegetation *geclustert* ist, und nur einen bestimmten Anteil σ_f der Gesamtgrundfläche einnimmt. In diesem Fall wäre es besser, den *LAI* nur auf die eigentliche Standfläche der Vegetation zu beziehen und den Anteil σ_f (Vegetation) und den Anteil $(1-\sigma_f)$ (kahler Boden oder Grassland) getrennt zu beschreiben.¹⁴⁵ Man müsste dann, ähnlich wie bereits in Gleichung (4.136) geschehen, getrennte Widerstände für den Vegetationsanteil (inkl. für den Boden unterhalb des Vegetationsanteils) und den Bodenanteil, der nicht von Vegetation bedeckt ist, einführen und für beide Bodentypen getrennte Flüsse berechnen.¹⁴⁶ Weiterhin könnte man einen Widerstand r_{la} einführen, der kB_V^{-1} in (4.140) ersetzt und den Übergang von der Blattoberfläche in die Vegetationsluft beschreibt. Dieser Übergang hängt nämlich, wie bereits erwähnt, noch von der Blattgröße und weiteren Parametern ab.¹⁴⁷

¹⁴⁴ Wenn der Gesamt-Leaf-Area-Index *TOTLAI* anwächst, dann nimmt der Anteil *ETOTAL* des kahlen Bodens gemäß Gleichung (4.135) automatisch ab.

¹⁴⁵ *ETOTAL* aus Gleichung (4.135) ist eine Approximation von $(1-\sigma_f)$ im Fall von *verschmierter* Vegetation.

¹⁴⁶ Im Gegensatz zu Formel (4.145), in der mit einem über beide Bodenarten gemittelten Widerstand ein einziger, effektiver Wasserdampffluss berechnet wird.

¹⁴⁷ Ebenso gut könnte man diese Abhängigkeiten in kB_V^{-1} einbauen, denn der kB_V^{-1} -Term in (4.140) entspricht im Prinzip r_{la} .

Die oben beschriebenen Korrekturen haben gravierende Folgen für die Ergebnisse (siehe z. B. Abbildung 3.8.1 in [Chmielewski et al., 2009a](#); hier allerdings noch ohne den Widerstand r_B). Die Evaporation des Bodens ist nun wesentlich größer als vorher. Auch beim Bodenwassergehalt ergeben sich merkbare Unterschiede. In der neuen Version ist der Boden auf Grund der höheren Evaporation trockener. Auch Simulationen mit Vegetation (Winterweizen, Apfelbäume etc.) zeigten erhebliche Unterschiede zwischen der alten und neuen Version, wobei die Ergebnisse der korrigierten Version realistischer erscheinen.

4.10.2 Aufgedeckte Fehler

Für die Wasserhaushaltsrechnungen in CHARIKO mussten extrem viele Rechnungen mit unterschiedlichen Bodenarten, verschiedenen Verteilungen des Bodenwassers und variierenden Wettervorgaben mit dem Modell SIMWASER durchgeführt werden. So mussten z. B. SIMWASER-Rechnungen für je 140 Jahre (1961-2100) mit je 365 Tagen an insgesamt mindestens 19 für den Obstbau relevanten Gitterpunkten für die Klimadaten von 5 regionalen Klimamodellen durchgeführt werden. Die Rechnungen mussten mit und ohne CO₂-Düngung und bei eingeschalteter und ausgeschalteter optionaler Sommerberechnung für 13 Obstarten durchgeführt werden (siehe Kapitel 4.10.10). Das ergab insgesamt 252 Millionen Tage, die simuliert werden mussten. An diesen fast 252 Millionen Tagen traten natürlich fast alle denkbaren Konstellationen auf. Glücklicherweise waren bereits im Projekt KliO, in dem sogar ca. 300 Millionen Tage simuliert werden mussten, umfangreiche Verbesserungen, Absicherungen und Korrekturen angebracht worden, so dass SIMWASER ohne Absturz diese Herausforderung überstehen konnte.

Eine kurze Auflistung der bereits in KliO an SIMWASER durchgeführten Korrekturen findet man in [Chmielewski et al. \(2009a\)](#), Abschnitt 3.8.4.

Die im Projekt CHARIKO neu eingeführten Erweiterungen und Verbesserungen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

4.10.3 Implementierung der verbesserten Phänologie in SIMWASER

Die verbesserten phänologischen Modelle aus Kapitel 4.6.3 für den Beginn der Pflückreife und aus Kapitel 4.6.5 für den Blühbeginn wurden neu in das Modell SIMWASER implementiert, da dort bisher nur die sogenannten *Photothermischen Units* (PTU) für die Forcing-Rate-Funktion R_f verwendet wurden, die folgendermaßen definiert sind:

$$R_f(T_i, Glob_i) = \alpha \frac{Glob_i}{Daylength_i} \max(T_i - T_{BF}, 0). \quad (4.151)$$

$Glob_i$ und T_i sind hier die mittlere Globalstrahlung und die mittlere Lufttemperatur am Tag i , $Daylength_i$ ist die Tageslänge am Tag i und T_{BF} eine von der Fruchtart abhängige Basistemperatur. α ist eine von der Fruchtart abhängige Konstante. Der Entwicklungszustand der Pflanzen am Tag t wird durch den *developmental stage*-Parameter $DEVSTG(t)$ beschrieben:

$$DEVSTG(t) = \beta \sum_{i=1}^t R_f(T_i, Glob_i). \quad (4.152)$$

Der Parameter β ¹⁴⁸ muss so gewählt werden, dass der Entwicklungszustandsparameter $DEVSTG(t)$ zum Blühbeginn t_2 den Wert 4.5 und zum Beginn der Pflückreife t_3 den

¹⁴⁸ β kann auch mit dem Parameter α zu einem gemeinsamen Parameter zusammengefasst werden.

Wert 10 annimmt. Leider ist dieser einfache Ansatz, der z. B. für verschiedene Getreidearten ganz gut funktioniert, für Obstbäume nicht anwendbar. Man kann zwar durch geeignete Wahl von T_{BF} und (α, β) den Termin des Beginns der Pflückreife einigermaßen modellieren. Der Blühbeginn fällt dann aber auf einen viel zu späten Termin (**Abbildung 4.41**; cyan-farbene Kurve).¹⁴⁹ Um dieses Problem in den Griff zu bekommen,

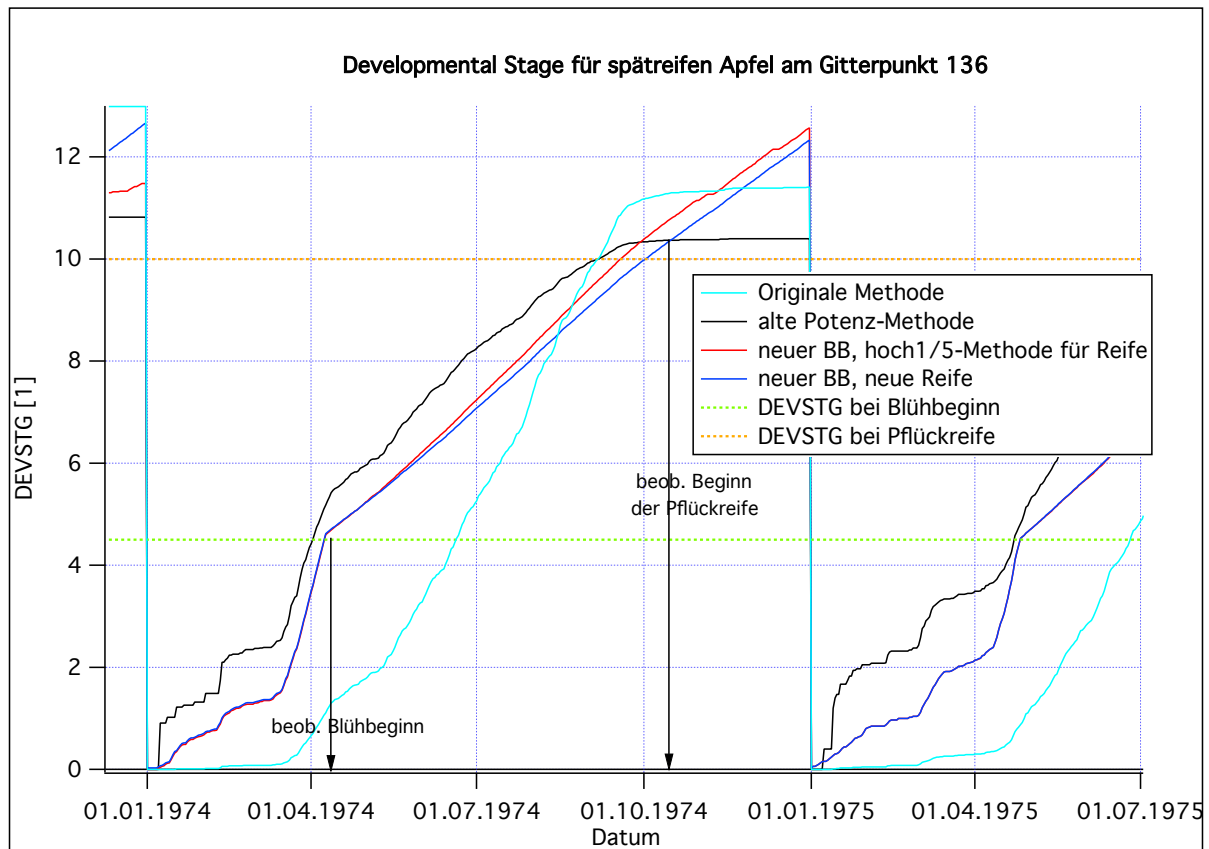


Abbildung 4.41: “Entwicklungszustandsparameter” $DEVSTG$ bei spätreifem Apfel am Gitterpunkt 136 im Jahr 1974, berechnet mit DWD-Wetterdaten. Vier verschiedene Ansätze.

men, wurde $DEVSTG$ zunächst mit Hilfe einer Potenzfunktion transformiert (schwarze Kurve in **Abbildung 4.41**):

$$DEVSTG_{neu}(t) = 10 \cdot (0.1 \cdot DEVSTG(t))^{0.41}. \quad (4.153)$$

Da diese Methode aber nicht so genaue Ergebnisse liefert wie die verbesserte Methode aus Kapitel 4.6.5, und der Exponent für jede Fruchtart gesondert angepasst werden muss, wurde schließlich die Berechnung des Blühbeginns so wie im nächsten Abschnitt beschrieben implementiert. Für die Zeit nach dem Blühbeginn (BB) wurde dann zunächst für βR_f aus Gleichung (4.152) folgender Ansatz verwendet:

$$\beta R_f(T_i) = \max(T_i - T_{BF}, 0.001)^{1/5}. \quad (4.154)$$

¹⁴⁹ Oder umgekehrt: Wenn der Blühbeginn einigermaßen korrekt modelliert wird, fällt der Reifebeginn auf einen viel zu frühen Termin. Bei der cyan-farbenen Kurve in **Abb. 4.41** wurde ein Kompromiss zwischen diesen Alternativen geschlossen.

Dieser Ansatz ergab die rote Kurve in Abbildung 4.41. Da auch hier der Exponent von der Fruchtart abhängt, und dieser Ansatz, der dem Modell 10a-R entspricht, für die spätreifen Sorten nicht geeignet ist (wie in Kapitel 4.6.3 gezeigt wurde), wurden schließlich auch für die Reife die optimierten Modelle 10a-R [Gleichung (4.48)] und 12a-R [Gleichung (4.49)] in SIMWASER eingebaut (siehe Abschnitt “Berechnung des Beginns der Pflückreife” weiter unten).

4.10.3.1 Berechnung des Blühbeginns

Der Termin des Blühbeginns bzw. der “Entwicklungszustandsparameter bis zur Blüte” wird für die verschiedenen Fruchtarten in SIMWASER mit dem verbesserten Ansatz (4.93) [bzw. (4.94) für Wein] für $R_f(T_i)$ berechnet. Dabei gilt:

$$DEVSTG(t) = \sum_{i=1}^t \frac{R_f(T_i)}{F^*} \cdot 4.5. \quad (4.155)$$

Für die Parameter F^* , T_{BF} und $EXPO$ (und bei Wein auch noch $EXPO2$) werden die optimierten Parameter des Modells 29ga (mit Daylength-Faktor) aus Tabelle 4.12 verwendet¹⁵⁰. Der Chilling-Anteil des Modells wird hierbei vernachlässigt und die Forcing-Akkumulation startet am 1. Januar (1 DOY). Experimente ergaben, dass dieses “vereinfachte Modell 29ga” den Blühbeginn in Hessen im jetzigen und in einem wärmeren Klima ausreichend gut beschreibt, da das Chilling-Requirement bei den Arten mit niedrigem und mittlerem Chilling-Requirement auch in der Zukunft rechtzeitig bis spätestens Ende Januar erfüllt wird (siehe Kapitel 4.7 und Anhang G). Summiert man in der Gleichung (4.155) bis zum Termin des Blühbeginns $t = t_2$, so erhält man, da $\sum_{i=1}^{t_2} R_f(T_i) = F^*$ gilt, den geforderten Wert $DEVSTG(t_2) = 4.5$.

4.10.3.2 Berechnung des Beginns der Pflückreife

Nach dem Blühbeginn setzt man für die Pflanzenarten, für die Tabelle 4.15 die Benutzung von **Modell 10a-R** empfiehlt, die Summation mit folgender Formel fort¹⁵¹:

$$DEVSTG(t) = 4.5 + \sum_{i=t_2+1}^t \frac{R_f^{(10a-R)}(T_i)}{F^{*(10a-R)}} \cdot 5.5. \quad (4.156)$$

$F^{*(10a-R)}$ und $R_f^{(10a-R)}$ sind hierbei das Forcing-Requirement für Modell 10-R aus Tabelle 4.15 und die Forcing-Rate-Funktion (4.48) des Modell 10a-R.

Für **Modell 12a-R** ist die Vorgehensweise etwas komplizierter. Da die Aufsummation der Forcing-Rate-Funktion (4.49) ab dem festgewählten t_1 bereits vor dem Blühbeginn t_2 beginnt, muss man parallel zur Berechnung von Formel (4.155) bereits mit der Summation

¹⁵⁰ Für die spätreifenden Sorten werden die Parameter der frühreifenden Sorten verwendet, weil sich deren Blühtermine nur wenig von den spätreifenden unterscheiden und da auch keine gesonderten Beobachtungen für diese vorliegen.

¹⁵¹ Für den Pfirsich wurden in SIMWASER die Parameter der frühreifen Pflaume und für die Aprikose die des frühreifen Apfels aus Tabelle 4.15 verwendet, da keine ausreichende Beobachtungsdichte für die Reifetermine dieser Obstarten vorlag.

für die Reifeberechnung beginnen:

$$\widetilde{DEVSTG}(t_2) := \sum_{i=t_1^{(12a-R)}}^{t_2} \frac{R_f^{(12a-R)}(T_i)}{F^{*(12a-R)}} \cdot 10. \quad (4.157)$$

Hierbei sind natürlich die dem Modell 12a-R zugeordnete Forcing-Rate-Funktion $R_f^{(12a-R)}$ [Gleichung (4.49)] und das entsprechende Forcing-Requirement $F^{*(12a-R)}$ sowie der entsprechende Starttermin $t_1^{(12a-R)}$ aus Tabelle 4.15 zu verwenden. Die Summation erfolgt hier zunächst nur bis zum Termin t_2 des Blühbeginns.

$$\begin{aligned} \text{Da nun wegen } F^{*(12a-R)} &= \sum_{i=t_1^{(12a-R)}}^{t_3} R_f^{(12a-R)}(T_i) \\ 10 &= \sum_{i=t_1^{(12a-R)}}^{t_3} \frac{R_f^{(12a-R)}(T_i)}{F^{*(12a-R)}} \cdot 10 \end{aligned} \quad (4.158)$$

gilt, erhält man durch Subtraktion von Formel (4.157) von (4.158) folgenden Ausdruck:

$$10 - \widetilde{DEVSTG}(t_2) = \sum_{i=t_2+1}^{t_3} \frac{R_f^{(12a-R)}(T_i)}{F^{*(12a-R)}} \cdot 10. \quad (4.159)$$

Dividiert man beide Seiten dieser Gleichung durch $\left(10 - \widetilde{DEVSTG}(t_2)\right) / 5.5$, so erhält man mit der Definition von

$$F^{**} := \frac{\left(10 - \widetilde{DEVSTG}(t_2)\right)}{5.5} \cdot F^{*(12a-R)} \quad (4.160)$$

$$5.5 = \sum_{i=t_2+1}^{t_3} \frac{R_f^{(12a-R)}(T_i)}{F^{**}} \cdot 10. \quad (4.161)$$

Daraus folgt, dass man beim Modell 12a-R nach dem Blühbeginn den Entwicklungsstandsparameter $DEVSTG(t)$ mit folgender Formel berechnen kann:

$$DEVSTG(t) = 4.5 + \sum_{i=t_2+1}^t \frac{R_f^{(12a-R)}(T_i)}{F^{**}} \cdot 10. \quad (4.162)$$

Denn zum Beginn der Reife ($t = t_3$) erhält man aus Formel (4.162) wegen (4.161) den geforderten Wert $DEVSTG(t_3) = 10$ und zum Blühbeginn $t = t_2$ gilt $DEVSTG(t_2) = 4.5$.

Die Gleichungen (4.155) für $1 \text{ DOY} \leq t \leq t_2$, (4.156) für $t > t_2$ bei Modell 10a-R bzw. (4.162) mit (4.160) und (4.157) für $t > t_2$ bei Modell 12a-R liefern einen stetigen Entwicklungszustandsparameter $DEVSTG(t)$, der jedes Jahr am 1. Januar mit null beginnt, der zum Beginn der Blüte t_2 den Wert 4.5 und zum Pflückreifebeginn den Wert 10 annimmt.

Man beachte, dass in SIMWASER die Lufttemperatur T_i in bestimmten Fällen um einen bestimmten Betrag erhöht wird. Dies ist immer dann der Fall, wenn die aktuelle Transpiration kleiner als die potentielle Transpiration wird (Trockenstress). In diesen Fällen erhöht sich nämlich die Bestandstemperatur gegenüber dem Fall ohne Trockenstress,

was zu einer Beschleunigung der Pflanzenentwicklung führt (Stenitzer, 1988, S. 57-59). Dieser Effekt hat nur wenig Auswirkungen auf den Blühbeginn, er kann aber für den Termin der Reife eine Verfrühung von mehreren Tagen (in extremen Fällen auch mehr) bewirken. Die Ergebnisse der Reifeberechnungen in SIMWASER können sich daher etwas von denen der *reinen*¹⁵² Phänomodelle unterscheiden.

4.10.4 Implementierung der verschiedenen Obstarten in das Modell

Die originale Fassung von SIMWASER gestattete nur die Simulation annueller Nutzpflanzen und von Dauergrünland (z.B. verschiedene Getreidesorten, Kartoffeln, Erbsen, Zuckerrüben, Senf, Wiese mit Schnitt usw.).

Um das Wachstum von Bäumen simulieren zu können, wurde zunächst ein spezieller Optionsparameter *DEVSTGNULLEN* eingeführt. Falls dieser Parameter 1 ist, werden Pflanzen ohne Rodung simuliert. Diese Pflanzen werden einmal initialisiert und können dann über mehrere Jahre kontinuierlich wachsen, wobei jedoch der jährliche Abwurf des Laubes berücksichtigt wird.

Jeweils am 1. Januar werden in diesem neuen Modus die Leaf Area Indizes (*LAI*) [*SUMLAI* = Summe aller Blattflächenzuwächse inklusive der bereits abgefallenen toten Blätter; *GRNLAI* = aktueller, grüner *LAI*; *TOTLAI* = Summe aus aktuellem grünen *LAI* und *Dead-LAI* (tote Blätter, die noch am Baum hängen)] auf

$$LAI(t = 0) = \max(0.05, \text{“}ROOTMASS \text{ in kg/ha”}/1000) \quad (4.163)$$

gesetzt. In der originalen Version wurde der *LAI* jedes Jahr mit 0.05 initialisiert. Das bedeutete, dass das Pflanzenwachstum jedes Jahr vollkommen neu auf einer *Minipflanze* (Setzling) basierte, da die Entwicklung vom Samenkorn zur Minipflanze vom Modell nicht beschrieben wird. Der sich im Laufe des Jahres entwickelnde, maximale *LAI* und damit auch die Assimilationsrate und der gesamte Massenzuwachs hatte daher in jedem Jahr ungefähr die gleiche Größenordnung. Bei Bäumen hängt der maximale *LAI* und der Massenzuwachs aber von der aktuellen Größe bzw. aktuellen Masse ab. Daher wurde der *LAI* zu Jahresbeginn proportional zur gesamten Wurzelmasse *ROOTMASS* (pro Anbaufläche) angesetzt.

Die gesamte oberirdische Trockenmasse *DRYMAT* (pro Anbaufläche) wird nur dann null gesetzt, wenn die Pflanze (der Baum) vollkommen neu angepflanzt wird. Im Gegensatz zu den normalen Wachstumszyklen (z. B. bei Getreide) wird die Trockenmasse *DRYMAT* (und auch die Wurzelmasse *ROOTMASS*) in den Folgejahren am Jahresanfang nicht auf null zurückgesetzt, da die Apfelbäume nicht jedes Jahr im Herbst abgeholzt (gerodet) werden.

Am Jahresende wird der im vergangenen Jahr neu gewachsene *LAI* (*SUMLAI*) von der Assimilationsmenge und der Trockenmasse abgezogen (Berücksichtigung des Blattabwurfs bei der Trockenmassenakkumulation). Der jährliche Zuwachs ΔTM der Trockenmasse *TM* ist der Zuwachs nach Abwurf der Blätter (ab 1. Januar) bis zum 31. Dezember (vor dem Abzug des *SUMLAI*) im aktuellen Jahr. Der für Strahlungsberechnungen benutzte *TOTLAI* wird aber bereits am 1. November auf 10 % seines zu diesem Zeitpunkt angenommenen Wertes herabgesetzt, damit nur noch die Zweige und Stämme (der *SAI* = Stem Area

¹⁵² In diesen ist die potentielle und aktuelle Transpiration nicht bekannt. Daher können derartige Effekte nicht berücksichtigt werden.

Index) berücksichtigt werden. Der für die Transpiration wichtige $GRNLAI$ wird am 1. November auf null gesetzt, da angenommen wird, dass zu diesem Zeitpunkt alle Blätter abgestorben oder abgefallen sind.

Die phänologischen “Zähler” $DEVSTG$ und die Summe über die PTU bzw. die R_f (vgl. Abschnitt 4.10.3) werden jeweils am 1. Januar auf null gesetzt (neue Wachstumsperiode).

Weiterhin wird bei $DEVSTGNULLEN=1$ die Parametrisierung der Maintenance-Respiration verändert. Diese ist im originalen SIMWASER proportional¹⁵³ zu $DRYMAT$ und nimmt daher bei Bäumen z. T. unrealistisch hohe Werte an.¹⁵⁴ Bei $DEVSTGNULLEN=1$ wird angenommen, dass diese als konstanter Bruchteil der Assimilationsrate betrachtet werden kann. Das ist approximativ möglich, wenn sich die Gesamtbiomasse nicht stark ändert (siehe die Vorgehensweise mit der Simulation eines 5 Jahren alten Baums auf Seite 140). Der “Veratmungsverlust bei der Umwandlung des assimilierten Kohlendioxids in Pflanzenmasse” (Growth Respiration) bei der Berechnung der Assimilationsmenge wird aber nach der alten Methode berücksichtigt. Die Unterschiede in den Ergebnissen bei Rechnungen mit der “alten Parametrisierung des Maintenance-Respirationsterms” und nach der neuen Methode sind gering.

Die originale Parametrisierung der Pflanzenhöhe führte bei den oben beschriebenen Modifikationen für *Pflanzen ohne Rodung* ($DEVSTGNULLEN=1$) zu unrealistischen Ergebnissen. Die “Bäume” wuchsen quasi linear mit der Zeit in die Höhe. Nach 100 Jahren hatten die Bäume bzw. das Grassland eine Höhe von über 90 m. Um das zu verhindern, wurde bei $DEVSTGNULLEN=1$ folgende Parametrisierung für die Pflanzenhöhe $PLTHGT$ eingebaut:

$$PLTHGT = H_{Veg} = POTHGT \cdot 0.13 \cdot \sqrt{DRYMAT \cdot 0.001} \quad (4.164)$$

$POTHGT$ ist hierbei eine vorzugebende potentielle Pflanzenhöhe (für Obstbäume z. B. 3 m), und $DRYMAT$ ist die gesamte oberirdische Trockenmasse in kg/ha. $PLTHGT$ wird zur Berechnung der für die Parametrisierung der Verdunstung verwendeten Rauigkeitshöhe z_0 benutzt [vgl. Formel (4.141)]. Höhere Vegetation ergibt höhere Rauigkeitslängen, welche dann meistens eine größere Evapotranspiration verursachen.

Speziell für die Simulation von Bäumen wurden zu den bereits in SIMWASER anwählbaren 16 Pflanzenarten ein 17. Typ (*Pseudobaum*¹⁵⁵) eingeführt (Optionsparameter $ICROP = 17$). Wenn $ICROP = 17$ gewählt wird, kann man noch eine von 13 verschiedenen Fruchtarten (wobei die früh- und spätreifenden Sorten hierbei extra gezählt wurden; siehe z. B. die im Anhang J angegebenen Fruchtarten) auswählen ($IFRUCHTART$).

Für jede Wahl von $IFRUCHTART$ werden 11 pflanzenspezifische Parameter für die betrachtete Obstart gesetzt: Unter anderen sind dies die maximale Netto-Photosyntheserate $PHOTSR$ [vgl. Gleichung (4.126) und (4.171)], die potentielle Pflanzenhöhe $POTHGT$ [Gleichung (4.164)], der minimale Stomatawiderstand $r_{s,min}$ [siehe Text nach Gleichung (4.136) und Gleichung (4.172)], die potentielle Durchwurzelungstiefe $ROOTLG$, die zur Berechnung der Durchwurzelungstiefe $CROOTL$ benötigt wird, und die Wurzelklassenstärke. Außerdem wurde die phänologische Entwicklung mit Hilfe der neuen, verbesserten Phänologie aus Kapitel 4.6 an die entsprechende Fruchtart angepasst (Kapitel 4.10.3). Auch die CO_2 -Düngung (Kapitel 4.10.7) wurde an die Wahl der Fruchtart angepasst.

¹⁵³ Der Proportionalitätsfaktor hängt noch von der Lufttemperatur ab.

¹⁵⁴ In der originalen SIMWASER-Version war die Maintenance-Respiration auf Grund eines Programmierfehlers immer null.

¹⁵⁵ Es muss nicht unbedingt ein Baum sein, sondern auch Erdbeere und Wein fallen unter diese Kategorie!

Weiterhin werden Anpassungen der Parametrierungen für die Aufteilung der Assimilationsmasse und für die Entwicklung der Blätter (grüner *LAI* und *Dead-LAI*) vorgenommen. Die gepunkteten Kurven in **Abbildung 4.42** zeigen die für die Pseudobäume modifizierten, empirischen Parameter als Funktion des Entwicklungsparameters *DEVSTG*. Die durchgezogenen Kurven sind die im originalen SIMWASER verwendeten Funktionsverläufe.

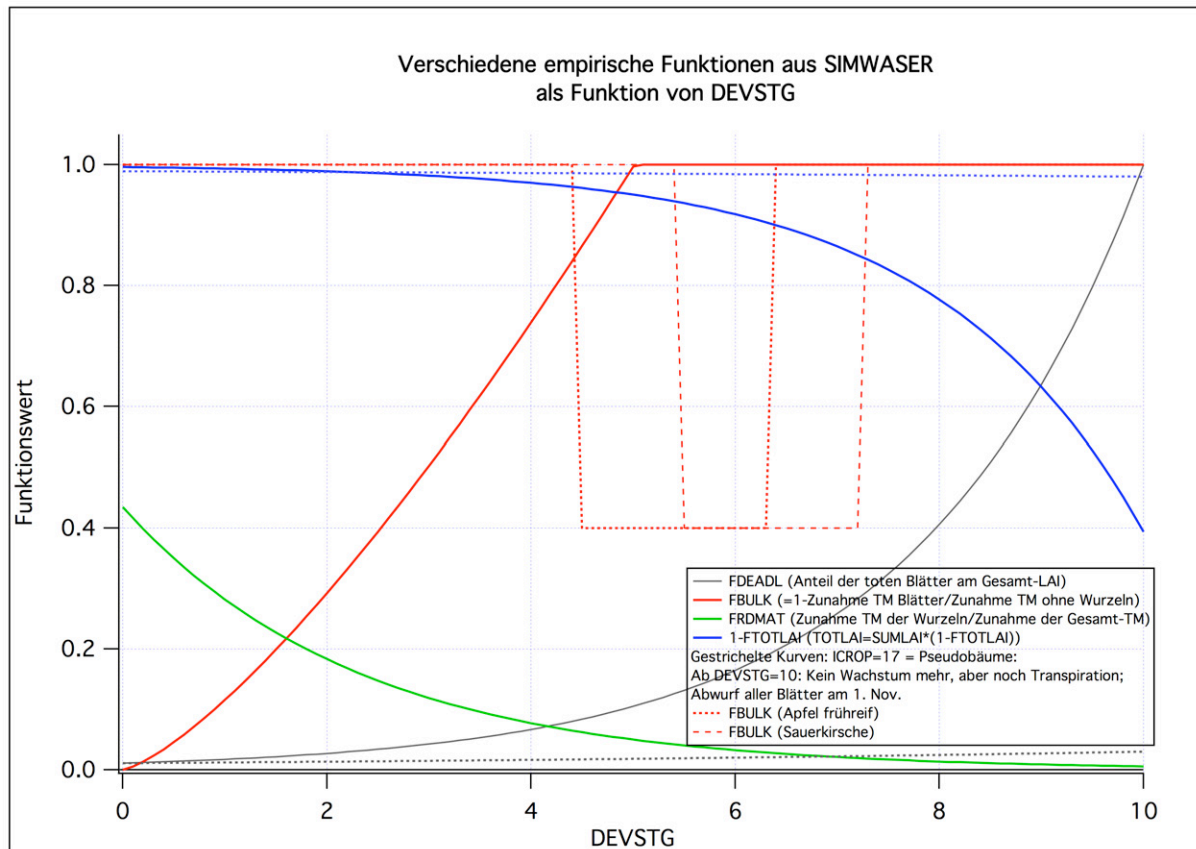


Abbildung 4.42: Verschiedene empirische Funktionen für Pseudobäume (gestrichelt) und andere Kulturen (durchgezogen), die zur Aufteilung der Gesamtassimilationsmenge auf Blätter und Wurzeln und zur Bestimmung des Anteils der abgestorbenen und abgefallenen Blätter dienen.

FBULK (0 = das gesamte Wachstum geht in die Blätter, 1 = kein Blattwachstum; rote Kurven) wurde so modifiziert, dass das Blattwachstum beim Kernobst ab dem Zeitpunkt des Blühbeginns ($DEVSTG = 4.5$) einsetzt (kurz gestrichelte Kurve). Beim Steinobst beginnt das Blattwachstum erst nach dem Blühende ($DEVSTG = 5.5$; lang gestrichelte rote Kurve), um beim Wein und der Erdbeere bereits ab ca. $DEVSTG = 4.0$. Die Länge der Blattwachstumsphase wurde wieder von der Fruchtart abhängig gewählt.

(1-*FTOTLAI*) (=Anteil der Blätter, die noch am Baum hängen und nicht abgefallen sind; blaue Kurven) wurde so modifiziert, dass zur Reife ($DEVSTG = 10$) nur 2% der Blätter abgefallen sind (vorher: 60%). Ab 1. November wird (1-*FTOTLAI*) jedes Jahr auf 0.1=10% gesetzt (nur noch Stämme und Zweige vorhanden).

FDEADL (= Anteil der toten Blätter am Gesamt-LAI; graue Kurven) wurde so modifiziert, dass zur Reife nur ca. 3% der Blätter abgestorben sind (vorher 100%). Am 1. November wird aber *FDEADL* auf 1 = 100% gesetzt.

Die Kurven für *FRDMAT* (relativer Anteil der Zunahme der Wurzelmasse bzgl. der

Gesamt-trockenmassenzunahme; grüne Kurve) und für *FRROTG* (relativer Wurzellängenwachstumsfaktor als Funktion des Entwicklungsstadiums *DEVSTG*) wurden nicht verändert. Der Parameter *EFFICIENCY* (eine vom Entwicklungsparameter *DEVSTG* abhängige Funktion, die eine Art saisonale *Alterungsfunktion* für Stomatawiderstände, Wurzelwiderstand, Photosyntheseleistung usw. darstellt) wurde für Obst auf den konstanten Wert "1" gesetzt.

Nach der Reife findet in SIMWASER kein Wachstum mehr statt. Die *Pseudobäume* transpirieren aber im Gegensatz zu den originalen SIMWASER-Pflanzen auch noch nach diesem Zeitpunkt.

Ein weiteres Problem ist Folgendes: Es ergeben sich Unterschiede im Ertrag, wenn man die Pflanzen jedes Jahr neu anpflanzt, oder wenn man die Bäume 10, 20, 50 oder 100 Jahre wachsen lässt bzw. periodische Beschneidungen ausführt oder nicht.

Die Erträge sollten sicherlich einigermaßen proportional zur Größe (Gesamtmasse) der Bäume sein. Die Größe der Bäume unterscheidet sich aber, wenn die Bäume jedes Jahr neu gepflanzt werden, oder alle 20 Jahre erneuert werden oder gar 100 Jahre stehen bleiben. Bei sehr großen, alten Pflanzen kann das Wachstum natürlich auch durch das endliche Angebot von Bodenwasser begrenzt werden. Außerdem werden sicherlich auch noch andere, im Modell nicht erfasste Einflussgrößen, wie z. B. Nährstoffangebote und Alterserscheinungen eine Rolle spielen.

Als realistischen Kompromiss wurde für die Untersuchungen in KliO jedes Jahr wieder neu ein ca. 5 Jahre alter Obstbaum initialisiert. Um realistische Startwerte für einen 5 Jahre alten Baum zu finden, wurde eine Minipflanze (Startwert der *LAI's* gleich 0.5; *DRYMAT* = 0 t/ha; *ROOTMASS* = 0.050 t/ha) 5 Jahre lang ohne Neuinitialisierung simuliert. Die so ermittelten Kennwerte *DRYMAT*, Wurzellängendichte *RD* in den verschiedenen Bodenschichten bis zur Tiefe *CROOTL*, *CROOTL* (= Durchwurzelungstiefe; deren zeitliche Entwicklung wird ebenfalls simuliert) u.v.a.m. dieser 5 Jahre alten Pflanze wurden dann für die jährliche Initialisierung eines 5 Jahre alten Apfelbaums verwendet. Die gesamte Wurzelmasse (pro Hektar) *ROOTMASS* [daraus berechnen sich die Startwerte der *LAI's* nach (4.163)] wird dann durch vertikale Integration über die Wurzellängendichte *RD* von der Tiefe *CROOTL* bis zur Bodenoberfläche bestimmt, wobei eine bestimmte spezifische Wurzellänge (Länge pro Masse) vorgegeben wird. Für die anderen Obstarten wurden entsprechende Anpassungen vorgenommen: Für Kernobst (Apfel und Birne) wurde eine Durchwurzelungstiefe von 1 m für den 7 jährigen Baum angenommen. Für Wein und Steinobst wurde *CROOTL* = 0.6 m und für Erdbeere *CROOTL* = 0.3 m gewählt. *RD* wurde im Mittel auf $100 \text{ dm} \cdot \text{dm}^{-3}$ gesetzt. *DRYMAT* wurde für Stein- und Kernobst auf 48 t/ha, für Wein auf 20 t/ha und für Erdbeere auf 5 t/ha gesetzt.

Beim Wein wurden die *Hangneigung* und die *Exposition* vernachlässigt, obwohl beide Größen sowohl für den Strahlungshaushalt als auch für den Bodenwassergehalt von großer Bedeutung sind. So sind z. B. sonnenexponierte Lagen bezüglich der Temperatur begünstigt, aber in Bezug auf die Wasserspeicherung benachteiligt.

4.10.5 Implementierung einer optionalen Sommerberechnung in das Modell

Um die Schäden und Kosten durch den Klimawandel abschätzen zu können, müssen die Schäden mit und ohne Ergreifung von Gegenmaßnahmen berechnet werden. Eine wichtige Maßnahme, um Schäden durch Trockenheit zu vermeiden oder wenigstens klein zu halten, ist die künstliche Bewässerung. Diese *Option* war im originalen SIMWASER nicht ent-

halten und musste neu implementiert werden. Zusätzlich mussten sinnvolle Kriterien für das Ein- und Ausschalten der Berechnung gefunden werden. Die entsprechenden Verfahren werden in diesem Kapitel erläutert. Die wichtigste Rolle spielt in diesem Zusammenhang die relative nutzbare Feldkapazität.

Die relative nutzbare Feldkapazität $WREL_i$ (auch als $\%nFK$ bezeichnet) ist definiert als

$$WREL_i = \frac{W_i - WP_i}{FC_i - WP_i} \quad (4.165)$$

Dabei ist W_i der Wassergehalt in Vol% in der Schicht i , WP_i der Wassergehalt am Welkepunkt (pF-Wert=4.18 bzw. 150 m Wassersäule) und FC_i der Wassergehalt bei Feldkapazität (pF-Wert=2 bzw. 1 m Wassersäule).

Eine konsistente Definition des Mittelwerts von $WREL_i$ über alle Bodenschichten von der Oberfläche bis zur maximal berücksichtigten Tiefe gibt folgende Formel:

$$WREL(0 \dots 60 \text{ cm}) := \frac{\sum_i WREL_i \cdot (FC_i - WP_i) \cdot \Delta z_i}{\sum_i (FC_i - WP_i) \cdot \Delta z_i} \equiv \frac{\sum_i (W_i - WP_i) \cdot \Delta z_i}{\sum_i (FC_i - WP_i) \cdot \Delta z_i} \quad (4.166)$$

Δz_i ist hierbei die Schichtdicke der Bodenschicht i . Die Summe in (4.166) erstreckt sich über alle Bodenschichten i bis in eine Tiefe von 60 cm.¹⁵⁶ In Gleichung (4.166) wird das $WREL_i$ der einzelnen Bodenschichten nicht nur mit der zugehörigen Bodenschichtdicke Δz_i , sondern auch noch mit dem Faktor $(FC_i - WP_i)$ gewichtet. Ist dieser Wert groß (i. Allg. bei Böden mit großer Wasseraufnahmekapazität), so wird das $WREL_i$ dieser Schicht stärker gewichtet.

Wenn $WREL(0 \dots 60 \text{ cm}) < 0.5$ wird, so wird die Berechnung am Folgetag gestartet. Die Bewässerungsmenge BEW , die (theoretisch) notwendig wäre, das aktuelle $WREL_i$ auf ein $WREL_i = 0.8$ in allen Bodenschichten bis 60 cm Tiefe anzuheben, folgt leicht aus (4.166) und berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$BEW = \sum_{i=1}^N [0.8 - WREL_i] \cdot (FC_i - WP_i) \cdot \Delta z_i \quad (4.167)$$

if ($BEW < 0$) $BEW = 0$

Wenn man FC und WP in Vol% und Δz_i in dm angibt, so erhält man BEW in mm.

Dabei gehen Schichten, die höhere Werte $WREL_i$ als 0.8 aufweisen, als negativer Beitrag ein, da der Wassergehalt in diesen Schichten höher als $WREL_i = 0.8$ ist und theoretisch durch Umverteilung trockeneren Schichten zu Gute kommen könnte. Sollte (4.167) negative Werte liefern, so wird die Bewässerung BEW auf null gesetzt

$WREL(0 \dots 60 \text{ cm})$ ist genau dann 0.8, wenn BEW nach (4.167) null ist, unabhängig von der Verteilung des Wassers in den betrachteten Bodenschichten. Auch wenn sich die einzelnen Horizonte im Bodentyp unterscheiden, ist diese Aussage korrekt. Würde man in (4.166) bei der Summation nicht mit $(FC_i - WP_i)$ wichten, so wäre diese Aussage nur korrekt, wenn entweder $WREL_i$ für alle i konstant wäre, oder wenn $(FC_i - WP_i)$ für alle i konstant wäre.

Insgesamt wurden 7 verschiedene Berechnungsmethoden ($IBEWMETH=1 \dots 7$) in SIMWASER implementiert (siehe unten). Die Berechnung kann entweder oberhalb (Berücksichtigung der Interzeption bei der Bewässerung) oder unterhalb (in CHARIKO verwendet)

¹⁵⁶ Bei der Erdbeere beziehen sich alle Berechnungsberechnungen nur auf die Bodenschicht von der Oberfläche bis zu einer Tiefe von 30 cm!

der Vegetation ausgeführt werden. Wie bereits oben erwähnt, wird die Berechnung gestartet, wenn der Mittelwert von $WREL$ nach (4.166) über die obersten 60 cm (30 cm bei der Erdbeere) des Bodens kleiner als 0.5 wird.

Bei allen Methoden wird der RUNOFF während der Bewässerung ausgeschaltet (verhindert), damit *Pfützen* einsickern können und nicht “lateral abfließen”! Das bedeutet, dass der berechnete RUNOFF am nächsten Tag wieder als Berechnung aufgebracht wird, solange, bis das gesamte Wasser eingesickert ist.

Folgende Methoden wurden definiert:

- Methode 1: Es wird die Menge BEW nach (4.167), aber maximal 24 mm/d *versprüht*; eine erneute Berechnung findet erst wieder¹⁵⁷ statt, wenn der Mittelwert $WREL(0 \dots 60 \text{ cm}) < 0.5$ [berechnet nach (4.166) über die Schicht 0...60 cm Tiefe] ist.
- Methode 2: Die gesamte theoretische Menge BEW nach (4.167), die benötigt wird, um $WREL_i$ in allen Schichten von 0...60 cm Tiefe vom aktuellen Wert auf 0.8 anzuheben, wird an einem Tag versprüht.
- Methode 3: Die theoretische Menge BEW wird nicht auf einmal (d. h. an einem Tag), sondern nur in Dosen von maximal 24 mm/d aufgebracht. An jedem aufeinander folgenden Tag werden 24 mm/d aufgebracht, und danach noch die Restmenge, bis die theoretische Menge BEW , die nur am Anfang dieser Bewässerungssequenz einmal berechnet wird, aufgebraucht ist.
- Methode 4: Es wird solange mit maximal 24 mm/d beregnet, bis der Mittelwert $WREL(0 \dots 60 \text{ cm}) \geq 0.8$ ist. Falls die theoretische Menge BEW , die jeden Tag neu berechnet wird, kleiner als 24 mm ist, wird mit dieser kleineren Menge pro Tag beregnet. Ist diese Menge aber kleiner als 5 mm/d, so wird mit 5 mm/d beregnet, da sonst manchmal die Bewässerung sehr viele Tage hintereinander durchgeführt werden muss. Falls das Berechnungswasser im Laufe des Tages nicht vollständig eingesickert ist¹⁵⁸, so wird die Berechnung solange ausgesetzt, bis das gesamte Wasser eingesickert ist. Dann wird, falls immer noch $WREL(0 \dots 60 \text{ cm}) < 0.8$ gilt, weiter beregnet.
- Methode 5: Wie Methode 4, nur wird die Bewässerung erst abgeschaltet, wenn alle Schichten i bis 60 cm Tiefe ein $WREL_i \geq 0.8$ aufweisen.
- Methode 6: Wie Methode 4, nur wird immer mit genau 24 mm/d beregnet (auch wenn $BEW < 24$ mm wird; bei *Pfützenbildung* wird die Berechnung aber ausgesetzt), bis das Endkriterium erreicht ist.
- Methode 7: Wie Methode 5, nur wird immer mit genau 24 mm/d beregnet (auch wenn $BEW < 24$ mm wird; bei *Pfützenbildung* wird die Berechnung aber ausgesetzt), bis das Endkriterium erreicht ist.

Versuchsrechnungen ergaben, dass zwischen den Methoden 5 bzw. 7 und den Methoden 1 bis 4 Abweichungen von bis zu ca. 100 mm/a auftreten können (30%). Die Methoden 5

¹⁵⁷ Evtl. aber schon am nächsten Tag, wenn nötig.

¹⁵⁸ In diesem Fall würde RUNOFF auftreten, wenn dieser nicht ausgeschaltet wäre.

und 7 und z. T. auch 6 benötigen das meiste Wasser. Die anderen Methoden sind relativ sparsam.

Die unterschiedlichen Berechnungsstrategien wirken sich fast nicht auf den Trockenmassenertrag aus, obwohl sie merklich die resultierende Bodenfeuchte (bzw. $WREL_i$) verändern. Die sparsamen Methoden 2 bis 4 schneiden bzgl. des Ertrages nicht schlechter ab als die wasserintensiven Methoden 5 bis 7. Eine Erklärung dafür findet man in [Chmielewski et al. \(2009a\)](#), Kapitel 3.8.6. Dort wurde auch untersucht, was passiert, wenn man vom Blühbeginn an bis zur Reife mit konstant 2 mm pro Tag und mit 10 mm pro Tag berechnen würde. Das Ergebnis zeigt, dass der jährliche Trockenmassenzuwachs bei einer Berechnung von 2 mm pro Tag leicht, bei 10 mm pro Tag sogar merklich (mehr als 10%) abnimmt, obwohl die Bodenwassergehalte bei beiden Extremberechnungsmethoden signifikant höher sind als z. B. bei Methode 3.

Dass die Ertragsmenge bei extrem starker Berechnung sogar abnimmt, liegt am in SIMWASER verwendeten Vernässungsfaktor $FWLOG$. Dieser berücksichtigt, dass das Wurzelwachstum (Längen- und Tiefenwachstum) und auch die Wurzelwasseraufnahme verringert werden, wenn der Luftgehalt im Boden unter einen bestimmten, vom Pflanzentyp abhängigen Wert $AIRMIN$ sinkt bzw. der Bodenwassergehalt über einen bestimmten Wert ansteigt. Wenn das von Wasser freie, relative Porenvolumen unter $AIRMIN = 5\%$ fällt, sinkt $FWLOG$ linear von 1 (beim Wassergehalt $W = 95\%$) auf 0 (bei $W = 100\%$) ab.¹⁵⁹ $FWLOG$ ist aber nicht nur für das Wurzelwachstum wichtig, sondern auch für die Wurzelwasseraufnahme. Da mit zunehmendem Wassergehalt W (ab 95%) der Vernässungsfaktor kleiner wird, können die Wurzeln dann weniger Wasser aufnehmen. Die relative Transpiration R wird dann öfters kleiner (<1) als im Fall mit weniger Bodenwasser. Dies führt dann zu einer verringerten Assimilationsleistung.

Eine ausführlichere Darstellung und Diskussion mit Abbildungen zur durchschnittlichen Berechnungsandauer und zu den Auswirkungen der verschiedenen Methoden auf den Trockenmassenertrag findet man im Kapitel 3.8.6 in [Chmielewski et al. \(2009a\)](#).

Alle diese Versuche zeigten, dass die Methode 3 am besten abschneidet. Daher wurden alle Rechnungen, die mit Sommerberechnung durchgeführt wurden, mit der relativ sparsamen und realitätsnahen Methode 3 durchgeführt.

4.10.6 Implementierung eines Bienenflugmodells

Um Prognosen aufstellen zu können, ob sich das Flugverhalten der zur Befruchtung der Obstbäume notwendigen Bienen¹⁶⁰ durch den Klimawandel verändert, wurde das Bienenmodell des DWD in SIMWASER integriert. Der DWD stellte freundlicherweise sein Bienenflugmodell BIENE.EXE ([Friesland, 1998](#)) zur Verfügung. Dabei handelte es sich leider um ein bereits kompiliertes Programm. Da dieses Modell Inputgrößen in einer speziellen Form für jedes einzelne Jahr benötigt, wären die Rechnungen mit den “je 140 Jahren” für jedes der betrachteten 5 Klimamodelle sehr umständlich gewesen.

Daher wurden bereits im vorherigen Projekt aus zahlreichen Versuchsläufen per Trial and Error folgende Modellgleichungen hergeleitet, die dann als Zusatzmodul für SIMWASER programmiert wurden. In allen getesteten Fällen stimmten die Ergebnisse dieses

¹⁵⁹ Im Gegensatz dazu sinkt der sogenannte *Penetrometerwiderstand* bei steigendem Wassergehalt und begünstigt dadurch das Wurzelwachstum.

¹⁶⁰ Beim Apfel werden ca. 90% der Blüten von Bienen bestäubt. Bei der Kirsche sind es ca. 80% und bei der Pflaume 65%.

Moduls fast hundertprozentig mit denen des originalen BIENE.EXE überein.

Die mittlere Flugintensität [Werte zwischen 0 (kein Flug) und 1 (optimale Flugbedingungen)] an einem Tag berechnet sich aus

$$MittFlugInt = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} GesGew_i. \quad (4.168)$$

Der Index i bezieht sich auf die i -te Stunde des Tages ($i = 1$ entspricht dem Zeitraum 0:00 bis 1:00 MOZ usw.). Die stündlichen Gesamt-Gewichte $GesGew_i$ setzen sich multiplikativ aus den Gewichtsfunktionen F_K der Temperatur T (in °C), der Windgeschwindigkeit V (in m/s), der Niederschlagsintensität R (in mm/h) und der Globalstrahlung G (W/m²) zusammen [Gleichung (4.169)]. Der Faktor Fak_i berücksichtigt den Einfluss der Jahreszeit.

$$GesGew_i = F_T(T_i) \cdot F_V(V_i) \cdot F_R(R_i) \cdot F_G(G_i) \cdot Fak_i \cdot 0.98 \quad (4.169)$$

Die einzelnen Gewichtsfunktionen $F_k(x_i)$ wurden mit Hilfe folgender Sigmoid-Funktion angepasst:

$$F_k(x_i) = base_k + \frac{max_k}{1 + \exp\left(\frac{xhalf_k - x_i}{rate_k}\right)} \quad (4.170)$$

Die zugehörigen Parameter sind in **Tabelle 4.20** angegeben.

Tabelle 4.20: Angepasste Parameter für Gleichung (4.170) für unterschiedliche Temperaturbereiche

Parameter	base _k	max _k	xhalf _k	rate _k
F_T (bis $T = 35.0$ °C)	0.0082812	0.99223	15.04	3.1515
F_T (von 35... 46 °C)	1.0	-5.4526	47.878	1.2235
F_V	1.0008	-1.0065	14.018	1.6757
F_R (bis $R = 3.9$ mm/h)	1.0702	-0.72256	2.9283	1.3243
F_R (ab $R = 4.0$ mm/h)	-0.65581	-0.55819	2.6512	1.9345
F_G	-0.0015696	1.0005	171.36	55.892

Der Verlauf der Funktion $F_T(T)$ wurde im originalen DWD-Modell nur durch die erste Zeile der Tabelle definiert, d. h., dass auch bei Temperaturen oberhalb 35 °C Gewichte von ungefähr *eins* angenommen wurden. Da Bienen aber ab 46 °C nicht mehr fliegen, und derart hohe Temperaturen im Verlauf der nächsten 100 Jahre nicht ausgeschlossen werden können, wurden die Gewichte mit Hilfe der Sigmoid-Funktion der 2. Zeile ab 35 °C so verringert, dass bei 46 °C und darüber der Wert Null angenommen wird. Für Temperaturen kleiner 5.4 °C hat $F_T(T)$ den Wert null.

Die zur Berechnung der Gewichte benötigten Stundenwerte von T , G , V und V wurden aus den Tageswerten wie folgt grob geschätzt: Stündliche Temperaturen wurden nach der Methode von Linsley-Noakes et al. (1995) bzw. Linvill (1990) als Funktion des Sonnenauf- und Sonnenuntergangs aus der Tagesminimum- und Tagesmaximumtemperatur berechnet. Die stündliche Globalstrahlung wurde aus der aktuellen und maximalen Sonnenscheindauer mit Annahme einer mittleren Trübung *astronomisch* aus den Stationskoordinaten berechnet [vgl. Gleichung (4.6)] und so normiert, dass deren Tagessumme mit der SIMWASER-Inputgröße *SumGlob* (=Tagessumme der Globalstrahlung) übereinstimmte.

Der Wind wurde über alle 24 Stunden des Tages konstant gehalten, und für die stündliche Niederschlagsmenge wurde ein Vierundzwanzigstel des Tageswertes benutzt.¹⁶¹

Zu den weiteren Feinheiten und teilweise noch zusätzlich notwendigen Modifikationen der Gewichte siehe [Chmielewski et al. \(2009a\)](#), Kapitel 3.8.7.

Abbildung 4.43 zeigt ein Beispiel für die relative Bienenflugintensität in zwei aufeinander folgenden Jahren. Für die Wetterdaten wurden regionalisierte DWD-Messungen am Gitterpunkt 136 verwendet. Man erkennt, dass die Flugintensität je nach Wetter stark schwankt. Für die weiteren Auswertungen (Kapitel 5.6 und Anhang J) wird jeweils nur der Zeitraum von Blühbeginn bis Blühende, welcher natürlich von der betrachteten Fruchtart abhängt, verwendet. Denn nur dieser Zeitraum ist für die Befruchtung der Obstbäume entscheidend.

Das hier vorgestellte Bienenmodell berücksichtigt allerdings nicht, dass im Laufe eines durchschnittlichen Winters bis zu 3000 Bienen pro Volk sterben, in besonders kalten Wintern auch mehr. Das bedeutet, dass sich die Völker unter Umständen zum Ende des Winters erst wieder erholen (anwachsen) müssen. Je früher die Völker im Herbst mit dem Brüten aufgehört haben und je später sie am Ende des Winters damit anfangen, desto besser starten die Völker ins Frühjahr (siehe z. B. <http://www.imkerverein-tempelhof.de/js/winterruhe.html>).

Aus diesem Grund, und auch deshalb, weil keine Umrechnungsformel zwischen Bienenflugintensität und Blütenschaden bekannt vorlag, wurde die berechnete Bienenflugintensität zwar in den Ergebnissen (Seite 241 in Kapitel 5.6) dargestellt, aber nicht weiter in den Schadens- und Kostenrechnungen berücksichtigt.

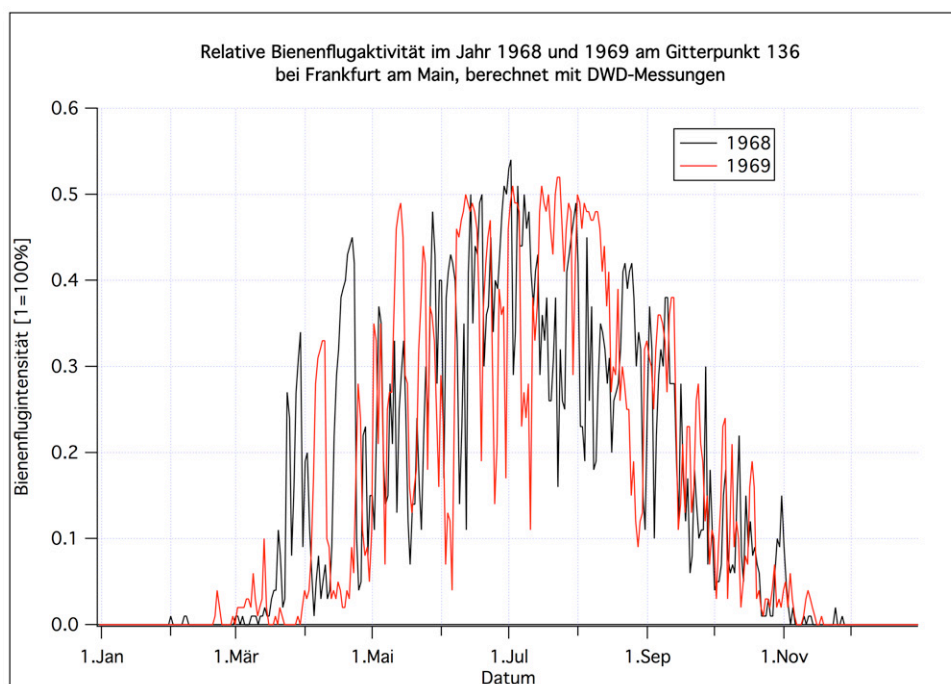


Abbildung 4.43: Relative Bienenflugintensität im Jahr 1968 und 1969 am Gitterpunkt 136 bei Frankfurt am Main, berechnet mit DWD-Messungen.

¹⁶¹ Die hier beschriebene Erzeugung von stündlichen Werten kann besonders beim Niederschlag zu größeren Fehlern führen. Z. B. kann ein kurzer Schauer dazu führen, dass es bei der hier benutzten Methode den ganzen Tag über regnet.

4.10.7 Implementierung der CO₂-Düngung in das Modell

Mit SIMWASER sollen auch Abschätzungen vorgenommen werden, wie stark der mit der Zeit anwachsende CO₂-Gehalt der Atmosphäre die von vielen Autoren prognostizierte zukünftige Ertragsabnahme kompensieren oder gar überkompensieren kann (CO₂-Düngeeffekt).

Um die Auswirkung des ansteigenden CO₂-Gehalts der Atmosphäre auf das Wachstum von Obstbeständen bis zum Jahr 2100 abschätzen zu können, muss zunächst eine Annahme über die zukünftige Entwicklung des CO₂-Gehalts getroffen werden, und der CO₂-Gehalt muss dann als Funktion der Zeit vorgegeben werden. Da in der gesamten Arbeit immer das SRES Szenario A1B betrachtet wurde, wird es auch hier verwendet.¹⁶² Graphiken und konkrete Daten für die CO₂-Konzentration im SRES Szenario A1B findet man z. B. im KNMI Climate Explorer: <http://climexp.knmi.nl>. Der Verlauf der Konzentration ist in **Abbildung 4.44** (schwarze Kurve) wiedergegeben. Dieser CO₂-Konzentrationsverlauf konnte gut durch eine *Hill Equation* (Textbox in der Abbildung und blaue Kurve) approximiert werden. Durch Nutzung dieser Approximation konnte auf die Verwendung eines *Feldes* (Lookup Table) für die CO₂-Konzentrationen im Programm verzichtet werden.

Der CO₂-Gehalt bezieht sich auf die Luft außerhalb des Bestandes (in der Heterosphäre). Tages- und Jahresschwankungen werden hier vernachlässigt, da die Veränderung der CO₂-Konzentration zwischen 2000 und 2100 wesentlich größer ist als diese Schwankungen (siehe z. B. <http://de.wikipedia.org/wiki/Keeling-Kurve>, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, 2008, Deutscher Wetterdienst, 2003). Auch die Schwankungen innerhalb eines Bestandes sind wesentlich kleiner als diese Veränderung (Lüers et al., 2006). Daher wird der Einfluss der CO₂-Konzentration auf die Pflanze auch direkt mit der CO₂-Konzentration aus dem A1B-Szenario berechnet, ohne ein aufwendiges CO₂-Transfer-Modell zu implementieren.

Die folgenden Effekte wurden in SIMWASER implementiert, um die CO₂-Düngung (wahlweise) berücksichtigen zu können:

Die **Maximale Netto Photosynthese-Rate** $PHOTSR(t)$ (*Net Primary Production NPP*) im Jahr t ist abhängig vom CO₂-Gehalt $[CO_2]_t$ der Luft und nimmt mit steigendem CO₂-Gehalt zu:

$$PHOTSR(t) = PHOTSR(0) \cdot \left(1 + \beta \cdot \ln \left(\frac{[CO_2]_t}{[CO_2]_0} \right) \right) \quad (4.171)$$

mit $[CO_2]_0 = 350$ ppm

Die Formel wurde aus der Beschreibung des Pflanzen-Boden-Nährstoff-Modells CENTURY (CENTURY, 1993, Kapitel 3.14) entnommen. Dort findet man auch eine Auflistung der anderen Effekte, die eine erhöhte CO₂-Konzentration bei Pflanzen hervorruft. Der Index "0" kennzeichnet hier die mittleren Werte im Zeitraum 1971-2000, die in etwa denen von 1986 entsprechen.

Da man in der Literatur im Fall einer CO₂-Verdoppelung für C3-Pflanzen¹⁶³, zu denen die hier betrachteten Obstarten zählen, Zuwachsraten der *Net Primary Production* von ca. 35% findet (siehe z. B. Kimball, 1983), wurde für β für alle Fruchtarten außer für

¹⁶² Eine gute Beschreibung der SRES-Szenarien und der damit zusammenhängenden IPCC-Storylines findet man in Schuchardt & Wittig (2010), S. 12 ff.

¹⁶³ C4-Pflanzen zeigen kleinere Effekte.

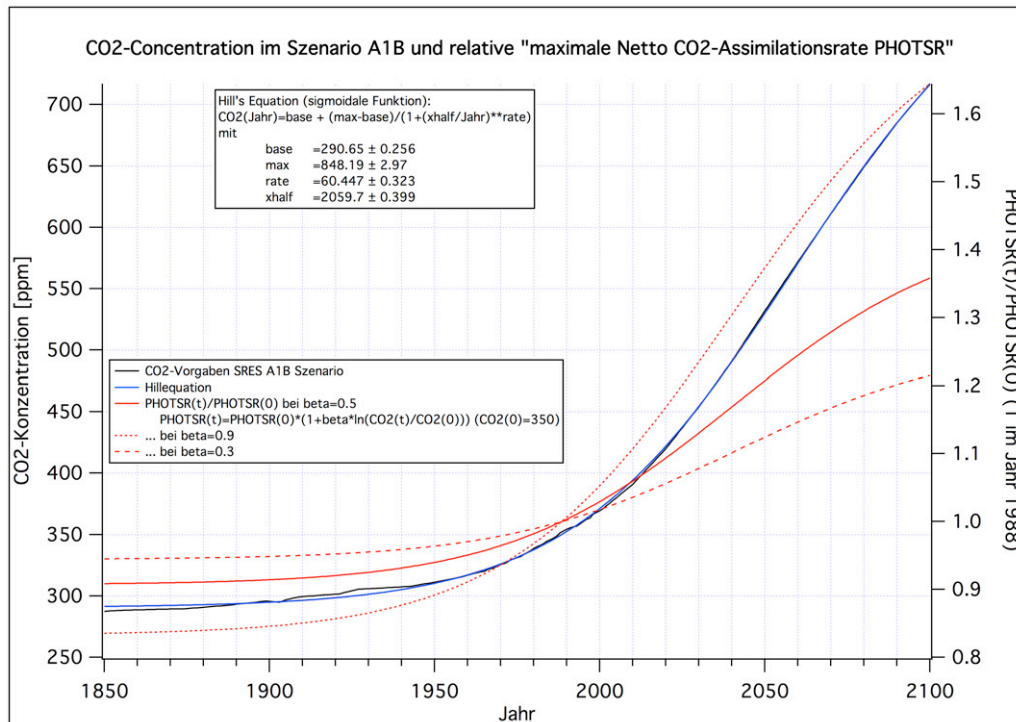


Abbildung 4.44: CO₂-Konzentration im SRES-Szenario A1B und relative *Netto Photosynthese-Rate*.

Wein folgender Wert gewählt: $\beta = 0.5$. Beim Wein wurde $\beta = 0.9$ verwendet, da dort Zuwachsraten um 60% beobachtet wurden (siehe z. B. [Moutinho-Pereira et al., 2009¹⁶⁴](#)).

Der minimale Stomatawiderstand $r_{s,min}$ [genauer: minimale Blattwiderstand für Wasserdampfleitung (inkl. Kutikularwiderstand)] hängt ebenfalls vom CO₂-Gehalt ab und nimmt mit steigendem CO₂-Gehalt zu (d. h., dass die Leitfähigkeit abnimmt):

$$r_{s,min}(t) = r_{s,min}(0) \cdot \left(1 + \gamma \cdot \ln \left(\frac{[CO_2]}{[CO_2]_0} \right) \right) \quad (4.172)$$

Für den Prozentsatz, um den die *stomatal conductance* bei CO₂-Verdoppelung abnimmt, findet man in der Literatur (siehe z. B. [Anda & Kocsis, 2008](#) und [Kirkham, M. B.](#)) am häufigsten einen Wert von ca. 38% [d. h. eine Abnahme um den Faktor (1-0.38)]. Das bedeutet ein Zunahme des minimalen Stomatawiderstandes $r_{s,min}$ um ca. 62% (Faktor 1.62), was durch $\gamma = 0.9$ in Formel (4.172) erreicht wird.

Die *Photorespiration*, die in SIMWASER nur indirekt berücksichtigt wird und daher nicht weiter angepasst werden muss, nimmt hingegen ab.

In Bezug auf diese sogenannte CO₂-Düngung besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf: Im Allgemeinen wird, in Übereinstimmung mit den obigen Formeln, erwartet, dass höhere CO₂-Konzentrationen den Stomatawiderstand erhöhen und/oder zu einer Verringerung der Stomatadichte führen, was eine geringere Transpiration zur Folge hat, wodurch sich die Blatt- und Bestandstemperaturen erhöhen könnten. Diese höheren Temperaturen könnten sogar Auswirkungen auf die Phänologie haben.¹⁶⁵ Gleichzeitig

¹⁶⁴ In dieser Arbeit wurde der CO₂-Gehalt allerdings nur moderat um 135 ppm angehoben. Die Ergebnisse wurden hier entsprechend hochgerechnet.

¹⁶⁵ Dieser Effekt wird hier aber nicht betrachtet.

steigt durch eine erhöhte CO_2 -Konzentration die Effektivität bei der Assimilation von Pflanzenmasse, was Ertragssteigerungen hervorbringen kann. In [Streitfert \(2005\)](#) zeigte nur eine (*Glechoma hederacea*) von sechs untersuchten Arten eindeutig diese erwartete Reaktion. [Ainsworth & Long \(2005\)](#) beschreiben, dass Bäume mit 28 % mehr Trockensubstanz im Vergleich zu Ackerkulturen und Gräsern die stärkste Wachstumsstimulation in FACE¹⁶⁶-Experimenten zeigten. Jedoch konnte in [Adam et al. \(2004\)](#) eine Akklimatisation der Photosynthese ab dem 6. Versuchsjahr nachgewiesen werden, die mit einer Reduktion der oberirdischen Biomasse verbunden war. [Wechsung et al. \(2008\)](#) betonen, dass der CO_2 -Düngungseffekt nicht zwangsläufig zu einer Minderung von Ertragsverlusten bzw. größeren Ertragsgewinnen führen wird. Seine Wirksamkeit sei an eine optimale Stickstoffdüngung gebunden. Es seien durchaus Umstände denkbar, die eine suboptimale Düngung begünstigen. Dass die negativen Seiten des Klimawandels (wetterbedingte Ernteeinbußen) die kurzfristigen CO_2 -Düngeeffekte mehr als wett machen, wird von [Klimafakten.de \(2012\)](#) behauptet. Dort wird auch beschrieben, dass die Wirkungen des CO_2 unter Freilandbedingungen viel geringer sind als ursprünglich von Topfversuchen her angenommen wurde. Ferner könne sich ein steigender CO_2 -Gehalt negativ auf die Qualität der Nahrungsmittel auswirken (z. B. ein geringerer Protein-Gehalt beim Getreide). Ein weiterer, möglicher negativer Effekt der CO_2 -Zunahme ist, dass Nicht-Nutzpflanzen stärker vom CO_2 profitieren könnten als Nutzpflanzen. Das *Unkraut* müsste dann entsprechend stärker bekämpft werden, um Nachteile bei den in Konkurrenz stehenden Nutzpflanzen zu vermeiden. — Aus dem eben Gesagten folgt, dass die oben angenommenen Werte für β und γ nur grobe Schätzungen sind und die durchgeführten Rechnungen keinen Anspruch auf exakte Prognosen erheben. Sie sollen vielmehr nur einen Eindruck geben, wie stark der CO_2 -Effekt die Ergebnisse verändern kann.

Abbildung 4.45 zeigt, wie stark sich der CO_2 -Effekt auf den jährlichen Trockenmassenzuwachs beim frühreifen Apfel an einem Gitterpunkt in der Nähe von Frankfurt am Main auswirkt. Die Rechnungen wurden mit Klimawerten aus REMO-UBA durchgeführt, und es wurde, wenn nötig, bewässert (vgl. Kapitel 4.10.5). Die schwarze Kurve ergibt den Trockenmassenzuwachs ohne Berücksichtigung der CO_2 -Düngung. Mit CO_2 -Düngung erhält man zum Ende des 21. Jahrhunderts um ca. 25 % höhere Erträge (rote Kurve).

¹⁶⁶ Free Air CO_2 -Enrichment

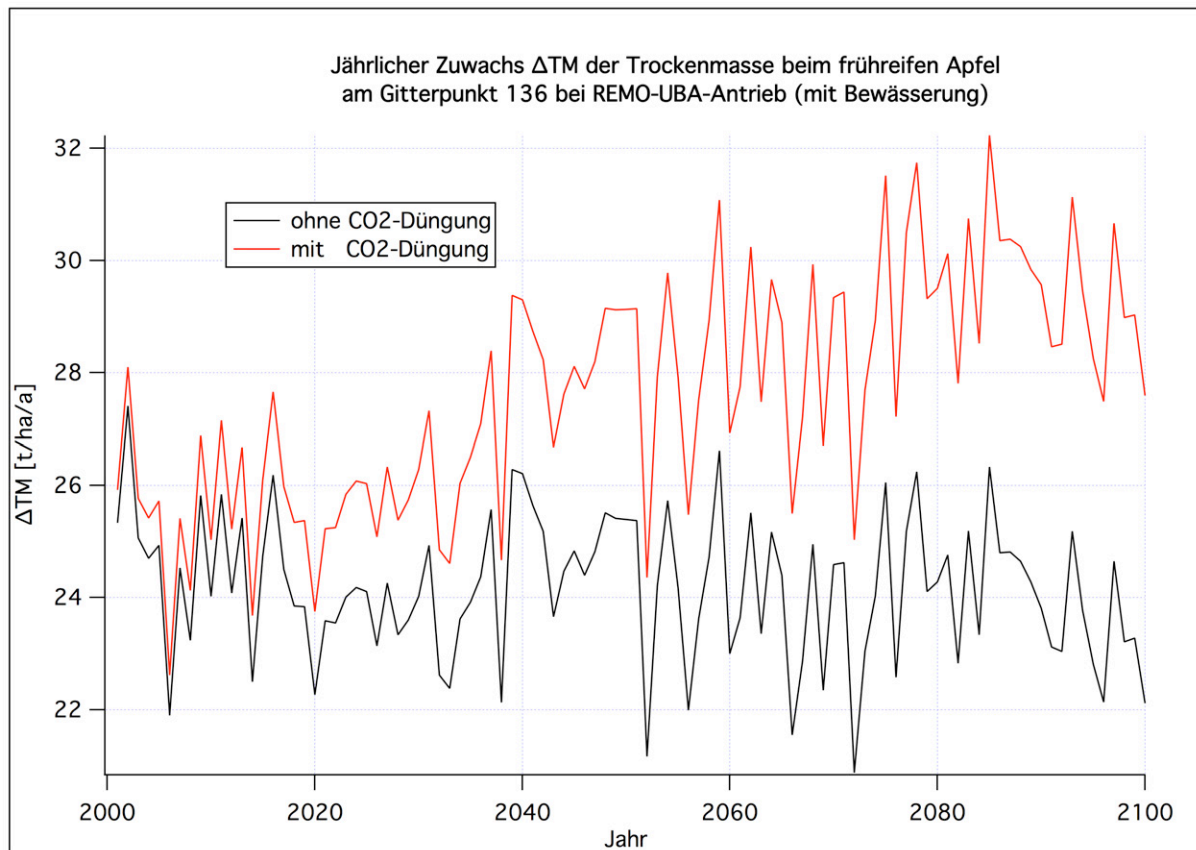


Abbildung 4.45: Jährlicher Zuwachs ΔTM der Trockenmasse beim frühreifen Apfel mit und ohne CO₂-Düngeeffekt am Gitterpunkt 136 in der Nähe von Frankfurt am Main bei Antrieb von SIMWASER mit REMO-UBA-Klimadaten (Szenario A1B) und mit Bewässerung.

Wie sich die CO₂-Düngung auf die Transpirationsmenge, aufsummiert vom Blühbeginn bis zum Beginn der Pflückreife, am selben Gitterpunkt auswirkt, zeigt **Abbildung 4.46**. Die Gesamttranspiration ist mit Berücksichtigung der CO₂-Düngung im Zeitraum 2071-2100 um ca. 10% geringer als ohne. Die scheinbar geringe Abnahme der Transpiration um nur ca. 10% trotz Zunahme des minimalen Stomatawiderstandes um ca. 60% erklärt sich daraus, dass die Transpiration nicht umgekehrt proportional zum Stomatawiderstand ist. Das liegt daran, dass die aktuelle Transpiration nicht direkt vom minimalen Stomatawiderstand, sondern vom aktuellen Bulk-Stomata-Widerstand und zusätzlich vom aerodynamischen Grenzschichtwiderstand abhängt (vgl. Kapitel 4.10.1.5).

Abbildung 4.47 zeigt die ohne und mit Berücksichtigung der CO₂-Düngung notwendige Bewässerungsmenge. Mit CO₂-Düngung kann man ca. 20% Wasser im Zeitraum 2071-2100 einsparen.

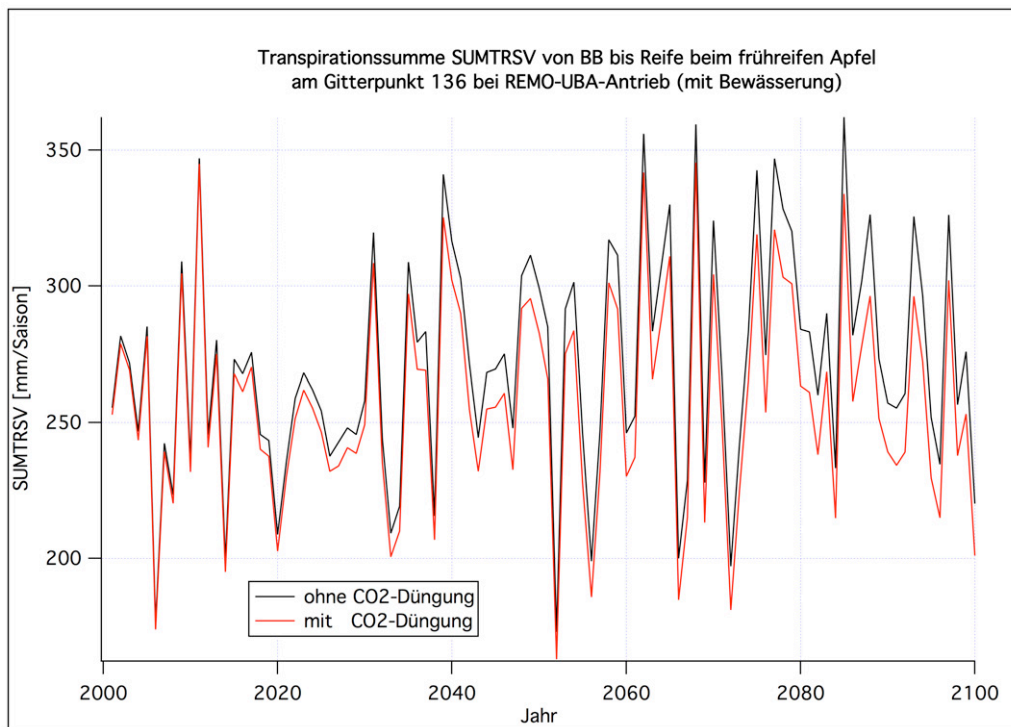


Abbildung 4.46: Transpirationsmenge *SUMTRSV* von Blühbeginn bis zur Reife beim frühreifen Apfel mit und ohne CO₂-Düungeffekt am Gitterpunkt 136 in der Nähe von Frankfurt am Main bei Antrieb von SIMWASER mit REMO-UBA-Klimadaten (Szenario A1B) und mit Bewässerung.

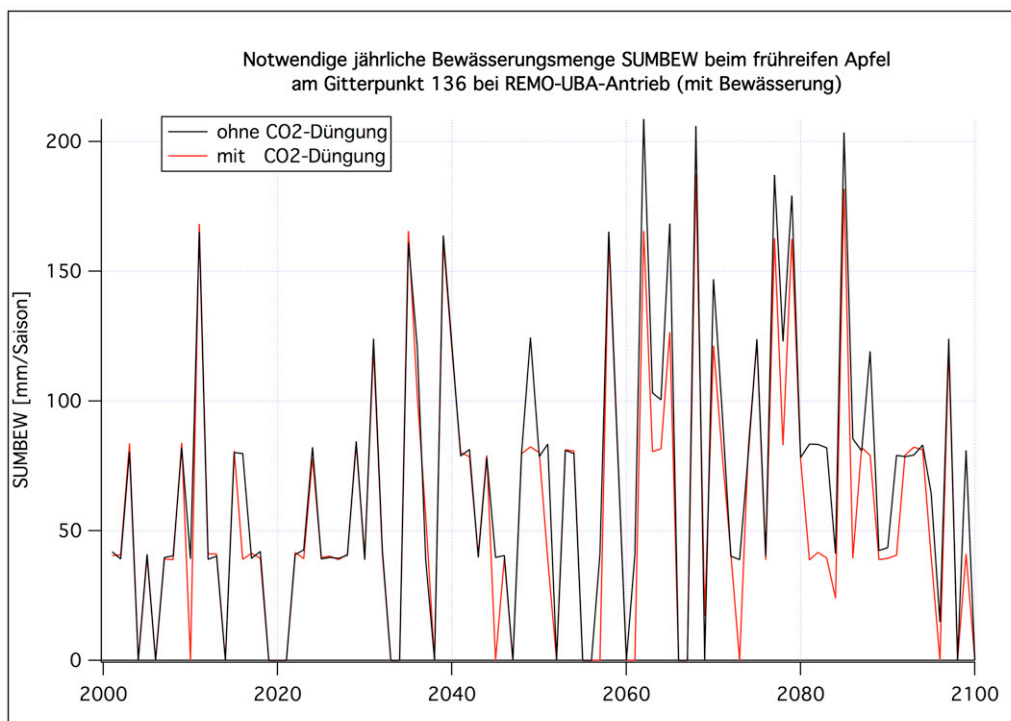


Abbildung 4.47: Notwendige jährliche Bewässerungsmenge *SUMBEW* von Blühbeginn bis zur Reife beim frühreifen Apfel mit und ohne CO₂-Düungeffekt am Gitterpunkt 136 in der Nähe von Frankfurt am Main bei Antrieb von SIMWASER mit REMO-UBA-Klimadaten (Szenario A1B) und mit Bewässerung.

Tabellen und Abbildungen mit Mittelwerten für die vier verschiedenen, 30-jährigen Zeitabschnitte für die Größen *Feuchtmassenertrag*, *Ertragsschaden*, *Bewässerungsmenge* und *Transpirationsmenge* von Blühbeginn bis Reife (jeweils mit und ohne Bewässerung und CO₂-Düngung) und für die mittlere *Bienenflugintensität* während der Blütezeit findet man für alle 9 hier betrachteten Fruchtarten im **Anhang J** und mit einer kurzen Diskussion auch im **Ergebniskapitel 5.6**. Hierbei werden auch früh- und spätreifende Sorten unterschieden. Die Ergebnisse zeigen auch die Unterschiede, die sich ergeben, wenn man die Klimadaten der unterschiedlichen Klimamodelle als Antrieb verwendet. Damit man die Unsicherheiten, welche durch die natürlichen Schwankungen und die unterschiedlichen Klimamodelle hervorgerufen werden, abschätzen kann, sind dort auch 95 % Konfidenzintervalle für die Mittelwerte angegeben.

4.10.8 Verifikation über Dauerbrache, mit Sommergerste und mit Süßkirsche

In diesem Abschnitt werden einige SIMWASER-Simulationen mit Beobachtungen verglichen, um zu zeigen, dass SIMWASER realistische Ergebnisse liefert. Leider konnten nicht alle Größen, die SIMWASER berechnet, verifiziert werden, da keine Messungen aller Größen vorlagen. Für den Bodenwassergehalt in verschiedenen Schichten lagen aber für den Standort Berlin-Dahlem (Breite: 52° 28'N; Länge: 13° 18'E; Höhe: 51 m ü. NN) (weitere umfangreiche Informationen und Messungen findet man hier: <http://www.agrar.hu-berlin.de/fakultaet/departments/dntw/agrarnet/service/wb>) durchgehende Beobachtungen für Dauerbrache und für Sommergerste¹⁶⁷ für die Jahre 1953–2003 vor.¹⁶⁸ Für die Validierung über bzw. unter Süßkirsche konnten Messungen des Bodenwassergehalts von August 2010 bis Ende 2011 verwendet werden. Die Bodenwassergehaltsmessungen erfolgten mit Hilfe von Stechzylindern bzw. in späteren Jahren mit Hilfe von TDR-Sonden. Die unten aufgeführten Messwerte sind immer Mittelwerte über drei gleichzeitige Messungen an unterschiedlichen (horizontalen) Positionen.

Die mittlere Jahressumme des Niederschlags für den Zeitraum 1981–2010 in Berlin-Dahlem beträgt 562 mm, wobei die Standardabweichung der Jahreswerte 107 mm beträgt (das entspricht einem 95 %-Konfidenzintervall des 30-jährigen Mittelwerts von ±39 mm). Im Zeitraum März bis Oktober fallen 70 % dieses Niederschlags. Die bodenhydrologischen Kennwerte des Bodens für die Schicht 0.0–0.5 m sind: Feldkapazität $FC = 118$ mm (23.6 Vol%), nutzbare Feldkapazität ($FC - WP \equiv nFK = 95$ mm (19.0 Vol%) und Welkepunkt $WP = 23$ mm (4.6 Vol%).

Der Boden besteht im oberen Teil (bis 50 cm Tiefe) aus periglaziärem Lehmsand (Bodenart SI2; Horizont Ap und Bv - Ael), darunter aus starksandigem Lehm (Bodenart Ls4, Horizont Ael + Bt und Bt) und ab 1 m Tiefe herrscht die Bodenart SI4 vor.

Die Bodenparameter [die Ku- und pF-Kurve (siehe Seite 126) usw.] wurden in SIMWASER entsprechend der Bodenarten (es lagen auch quantitative Messungen für diese Parameter vor) gesetzt. Die erforderlichen Wetterdaten, die als Input für SIMWASER gebraucht werden, wurden ebenfalls aus Messungen vorgegeben.

¹⁶⁷ Zwischen den Zeiträumen, in denen Sommergerste wuchs, herrschten die Landnutzungsformen *Grassland* und *Brache*. Die Zeiträume für Sommergerste, Grassland und Brache wurden vorgegeben, und alle diese drei Landnutzungsformen wurden in SIMWASER simuliert. Die Zeiträume für Grassland und Brache sind daher in den Jahresmittelwerten für Sommergerste mit enthalten.

¹⁶⁸ Jedes Jahr wurde ein anderes von insgesamt 8 zur Verfügung stehenden Feldern für die Sommergerste (und Grassland und Brache) benutzt (Fruchtwechsel).

Abbildung 4.48 vergleicht den Bodenwassergehalt der Schicht von 10–30 cm Tiefe aus Messung (schwarze Punkte) und aus SIMWASER (rote Kurve) für einen kurzen Zeitabschnitt des Gesamtzeitraums über **Dauerbrache**. Im Winter konnten nur dann Messungen durchgeführt werden, wenn der Boden nicht gefroren war. Daher liegen in diesem Zeitraum nur sehr wenige Messungen vor. Die blaue Kurve zeigt die Ergebnisse, die mit der alten SIMWASER-Version berechnet wurden, in der noch nicht die β -Methode [vgl. Formel (4.137)] und das variable kB_B^{-1} [Formel (4.144)] implementiert waren. Die Übereinstimmung der Messungen mit den Ergebnissen der neuen Version ist recht gut. Nur im Sommer 1972 treten größere Abweichungen zwischen Messung und Modell auf.

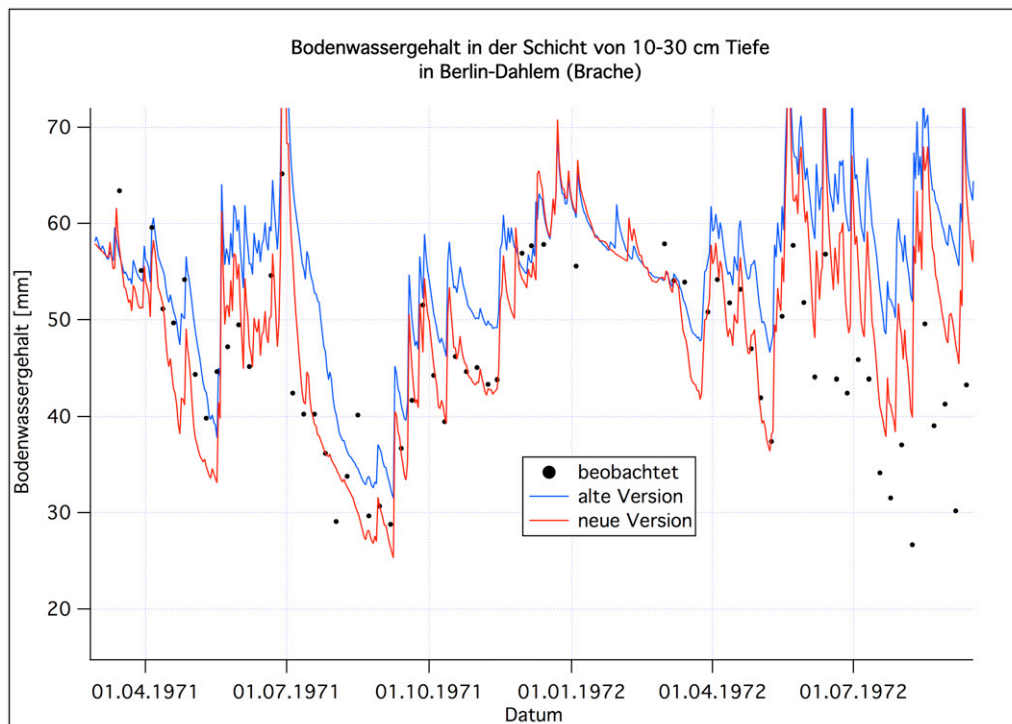


Abbildung 4.48: Verifikation über Dauerbrache in Berlin-Dahlem

Tabelle 4.21 vergleicht die langjährigen Mittelwerte (1963–2003) des Wassergehalts W verschiedener Bodenschichten. Die ersten beiden Datenzeilen sind Mittelwerte über den “Winter” (November bis März) bzw. den Sommer (Juni bis August), die anderen Werte sind Mittelwerte über das ganze Jahr (mm bei W und MAE , mm/a bei $ASEVAP$). Beachtenswert ist, dass die mit der neuen SIMWASER-Version simulierte aktuelle Soilevaporation ($ASEVAP$) mit 378 mm pro Jahr wesentlich höhere (und auch realistischere) Werte aufweist als die mit der originalen Version berechneten Werte (235 mm) (zur Begründung siehe Anfang von Kapitel 4.10.1.5). Zum Ausgleich ist der Netto-Grundwasserabfluss (Net-Drainage) mit 171 mm in der neuen Version wesentlich geringer als in der alten Version (313 mm).

Die Spalten mit MAE geben den mittleren absoluten Fehler im Wassergehalt W für die einzelnen Schichten an.

Tabelle 4.21: Verifikation über Dauerbrache (1953-2003) in Berlin-Dahlem

	Gemessen [mm]	SIMWASER [mm]
W(0... 80 cm; Nov-März)	168	158
W(0... 80 cm; Juni-Aug)	135	122
W(0... 30 cm)	48	52
W(30... 50 cm)	36	30
W(50... 80 cm)	64	58
W(0... 80 cm)	147	140
ASEVAP	-	378
MAE(0... 30 cm)	-	6
MAE(30... 50 cm)	-	8
MAE(50... 80 cm)	-	9
MAE(0... 80 cm)	-	17

Bei den Vergleichsrechnungen für die **Sommergerste** (**Tabelle 4.22**) wird zusätzlich zur *ASEVAP* auch noch der Mittelwert der (aktuellen) Transpiration (*ATRANS*) angegeben. Da sich dieser Mittelwert auf das gesamte Jahr bezieht, die Wachstumszeit der Sommergerste aber relativ kurz ist (ca. April bis Juli), und danach nur noch das Grassland¹⁶⁹ bis ca. Ende Oktober transpiriert, ergibt sich der kleine Mittelwert für die Transpiration.

Tabelle 4.22: Verifikation über Sommergerste (bzw. Grassland und Brache im *Herbst, Winter und Frühjahr*) in Berlin-Dahlem (1953-2003)

	Gemessen [mm]	SIMWASER [mm]
W(0... 80 cm; Nov-März)	168	158
W(0... 80 cm; Juni-Aug)	100	114
W(0... 30 cm)	46	51
W(30... 50 cm)	31	29
W(50... 80 cm)	54	57
W(0... 80 cm)	131	137
ASEVAP	-	269
ATRANS	-	92
MAE(0... 30 cm)	-	8
MAE(30... 50 cm)	-	6
MAE(50... 80 cm)	-	7
MAE(0... 80 cm)	-	17

Für die Rechnungen mit **Süßkirsche** wurden die in Kapitel 4.10.4 vorgestellten Anpassungen von SIMWASER an die Fruchtart *Süßkirsche* verwendet. Der gemessene und simulierte Wassergehalt in 4 Bodenschichten verschiedener Stärke ist in **Abbildung 4.49**

¹⁶⁹ In vielen Jahren folgt auf die Sommergerste eine Periode von wenigen Wochen mit Brache und erst danach das Grassland und dann wieder Brache.

für den Zeitraum August 2010 bis Ende 2011 dargestellt. Die Übereinstimmung ist gut. Nur im Sommer 2011 sind die berechneten Wassergehalte in der Schicht 30–50 cm zu klein. Die Abweichungen können verschiedene Ursachen haben: Der Boden in Berlin-Dahlem ist

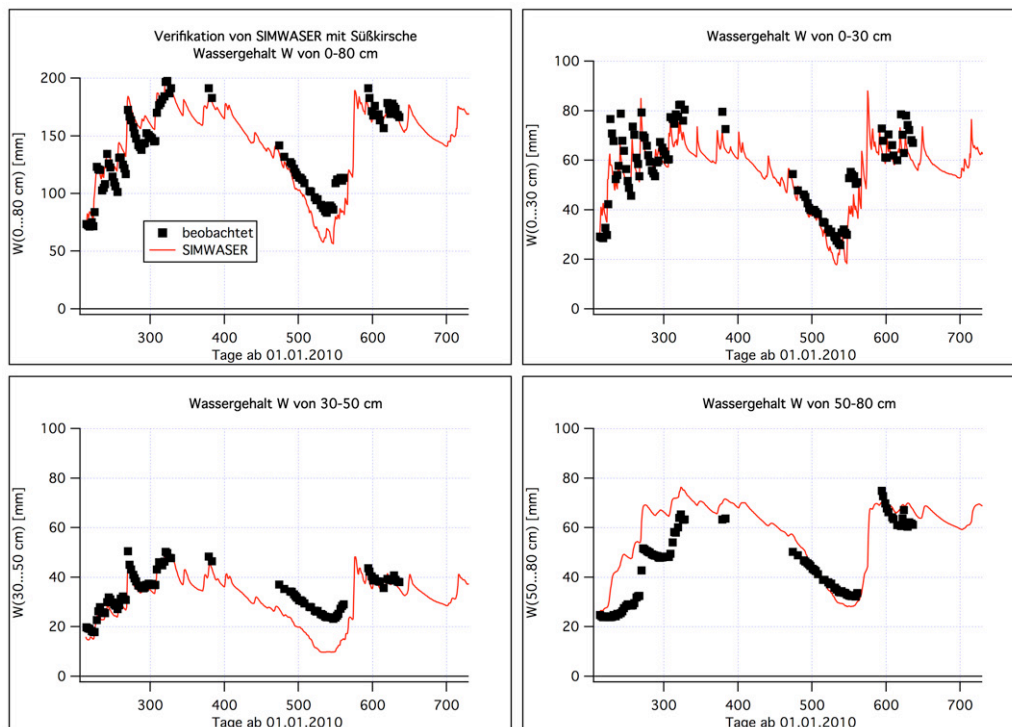


Abbildung 4.49: Verifikation von SIMWASER mit Süßkirsche (2010-2011)

recht heterogen. Die 3 Messsonden lieferten auch häufig unterschiedliche Werte [teilweise Abweichungen um bis zu 100 %; im fraglichen Bereich (Sommer 2011 und 30–50 cm Tiefe) betrug die Differenz allerdings nur ca. 10 mm]. Weiterhin könnten die gewählten Bodenparameter nicht ganz korrekt sein. Und auch Verletzungen der Horizontalhomogenität (z. B. seitlicher Wasserzufluss) könnten eine Ursache für die Abweichungen sein.¹⁷⁰

4.10.9 Bestimmung der Bodenarten für die Obstanbaugitterpunkte

Für die Wasserhaushaltsrechnungen mit dem Modell SIMWASER werden detaillierte Angaben über die Feinbodenarten bis zu einer Tiefe von ca. 1.5 m benötigt. Leider existieren innerhalb eines 0.2°-RCM-Gitterpunktes aber sehr viele verschiedene Feinbodenarten bzw. Horizonte. Damit man nicht für alle diese Horizontabfolgen getrennte Rechnungen durchführen muss, könnte man z. B. approximativ für jeden Gitterpunkt nur die Bodenart benutzen, die im betrachteten Gitterpunkt am häufigsten (bezogen auf den Flächenanteil) vorkommt. Tests ergaben aber, dass die häufigste Bodenart im Pixel keineswegs mit der Bodenart identisch sein muss, die innerhalb der eigentlichen Obst- und Weinanbaugebiete

¹⁷⁰ Es wurden Versuche mit einstündigen Zeitschritten anstelle von Tageswerten gemacht, und auch die statische Stabilität der atmosphärischen Grenzschicht wurde zu Testzwecken berücksichtigt. Es ergaben sich aber keine nennenswerten Veränderungen im Wasserhaushalt. Auch eine Veränderung der in SIMWASER implementierten, relativ einfachen Strahlungsbilanz zu aufwendigeren Parametrisierungen hin ergab kaum Änderungen.

(rote und cyan-farbene Flecken in Abbildung 4.19) am häufigsten vorkommt. Beispiele hierfür findet man in [Chmielewski et al., 2009a](#), Kapitel 3.6.1.

Unterschiedliche Landnutzung bedeutet nämlich im Allgemeinen auch unterschiedliche Bodenarten bzw. Horizontabfolgen.¹⁷¹ Daher sollte man nicht die häufigste Bodenart über den gesamten betrachteten Gitterpunkt bestimmen, sondern besser innerhalb des Gitterpunkts nur die Gebiete, in denen Obst- bzw. Weinbau betrieben wird, betrachten und nur innerhalb dieser Gebiete die häufigste Bodenart ermitteln.

Landnutzungs- und Bodendaten für die 24 Obst- und Weinbaugitterpunkte¹⁷² wurden vom HLUG zur Verfügung gestellt. Leider werden einige dieser Gitterzellen nicht vollständig von den Bodendaten überdeckt, da das HLUG außerhalb der politischen Landesgrenzen keine Daten besitzt (**Abbildung 4.50**; die 24 Obst- und Weinbaugitterpunkte wurden in der Abbildung mit einem schwarzen Punkt markiert).

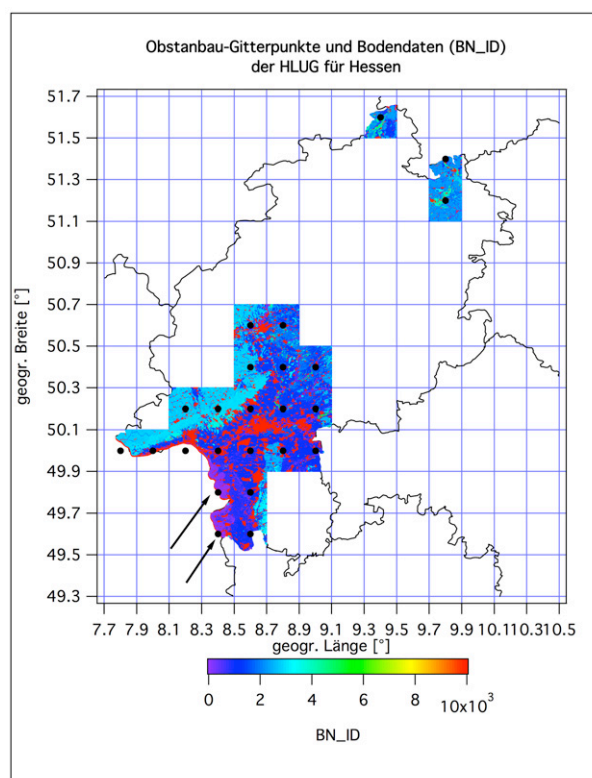


Abbildung 4.50: Bodendaten (BN_ID) des HLUG für Hessen in den “signifikanten” Obst- und Weinbaugitterpunkten

Konkret wurde zur Ermittlung der Bodenarten wie folgt vorgegangen: Das Indexfeld BN_ID der HLUG-Bodendaten, welches Zeiger auf die Datenbank mit den eigentlichen Bodendaten darstellt und im ArcView-Shape-Format vorliegt, wird zunächst auf ein rechteckiges (geographisches) Raster mit einer Zellenbreite von 0.0005° transformiert. Diese Zellenbreite ist wesentlich kleiner als die eines RCM-Rasterpunkts (0.2°). Diese neuen Rasterwerte werden im Folgenden *HLUG-Rasterpunkte* genannt. Das Indexfeld liegt nun als Matrix mit einigen tausend Spalten und Zeilen im ASCII-Format vor.

Man gibt nun jeweils eines der für den Obstbau relevanten Pixel vor und prüft, welche

¹⁷¹ Natürlich können aber für eine bestimmte Bodennutzung auch unterschiedliche Horizonte existieren.

¹⁷² Drei der 8 Weinbaugitterpunkte fallen in die 19 Obstanbaugitterpunkte (vgl. Kapitel 4.5).

HLUG-Rasterpunkte in dieses Pixel fallen. Fällt ein HLUG-Pixel in den vorgegebenen Rasterpunkt, so prüft man weiter, ob das HLUG-Pixel auch in eines der “signifikanten” 0.001°-CORINE-Rasterpunkte [vgl. Kapitel 4.5; “signifikant” = CLC-Klasse 221 (Weinbau) oder 222 (Obst- und Beerenobst)] fällt. Zusätzlich muss noch die Bedingung erfüllt sein, dass die zugehörige Landnutzung (BEDECK) in die Klassen *Bodennutzung mit meist 1-jährigen Nutzpflanzen und Bodenumbruch* (BEDECK=1), *Bodennutzung mit mehrjährigen Nutzpflanzen mit Schnitt* (BEDECK=2) oder *Bodennutzung mit Holzvegetation* (BEDECK=3) fällt.¹⁷³ Versuche ergaben, dass man nicht nur BEDECK=2, sondern auch die beiden anderen Klassen berücksichtigen muss, da Obstbäume scheinbar häufig auch in die Klassen BEDECK=1 und BEDECK=3 einsortiert wurden.

Falls diese Bedingungen erfüllt sind, so wird das entsprechende HLUG-Pixel für die nachfolgende Statistik der Bodenartenhäufigkeit verwendet. Alle anderen Pixel werden nicht weiter beachtet. Auf diese Weise erhält man für jedes für den Obstanbau relevante RCM-Pixel einen Satz von signifikanten HLUG-Pixeln. [Für zwei der Weinbaugitterpunkte (siehe Pfeile in Abbildung 4.50) existierten keine “signifikanten” HLUG-Pixel. Daher wurden diesen Gitterpunkten die Ergebnisse der östlich benachbarten Gitterpunkte zugeordnet.]

Mit Hilfe der jedem HLUG-Pixel zugeordneten Indexnummer (BN_ID) findet man in der HLUG-Datenbank die zugehörigen Einträge, denen man die unterschiedlichen Horizonte, deren obere und untere Tiefe sowie die zugehörigen Feinbodenarten und den Grobbodenanteil (vgl. Tabelle 4.19) entnehmen kann. Man bildet nun über alle diese signifikanten BN_ID-Werte des betrachteten Pixels eine Häufigkeitsstatistik. Der RCM-Rasterpunkt bekommt schließlich diejenige BN_ID und deren Horizontabfolge zu geordnet, die am häufigsten auftritt. Die eben beschriebene Zuteilung der Horizonte zu den “signifikanten” RCM-Rasterpunkten erfolgt vollautomatisch mit Hilfe eines Programms.

Auf die oben beschriebene Weise findet man für jeden der 24 in Abbildung 4.50 aufgeführten Rasterpunkte die typischen Horizontabfolgen mit zugehörigen Tiefen und Feinbodenarten. Diese Informationen werden für die spätere Verwendung in Wasserhaushaltsrechnungen in einer Datei abgespeichert. Zusätzlich werden für jeden Rasterpunkt noch geographische Koordinaten, Höhe über N.N. und einige weitere statistische Kenngrößen (relative Häufigkeit der gewählten BN_ID bezogen auf die eigentliche Obstanbaufläche des Rasterpunkts u. ä.) gespeichert.

Da später im Wasserhaushaltsmodell SIMWASER jeder Feinbodenart bestimmte Bodenkenngrößen und Parameter (z. B. hydraulische Leitfähigkeit als Funktion des Wassergehalts usw.) zugeordnet werden müssen, wird zu jeder Feinbodenart auch noch der Name der Datei, welche geeignete Daten enthält, mit abgespeichert.

Die **Abbildung 4.51** zeigt für die 24 Wein- und Obstanbaugitterpunkte jeweils die relative Häufigkeit der Feinbodenart, die bezogen auf die “signifikanten” HLUG-Pixel (von diesen Pixeln wurde hier angenommen, dass es sich um die eigentliche Anbaufläche handelt) am häufigsten vorkommt bzw. den größten Flächenanteil ausmacht. Hierbei wurde nur die Feinbodenart des obersten Bodenhorizonts auf der Ordinate gelistet. Leider liegt die relative Häufigkeit der flächenmäßig ausgedehntesten Feinbodenart bei vielen Gitterpunkten unter 20%. D. h., dass noch viele andere Feinbodenarten innerhalb der Obstanbaugebiete in einem einzigen Gitterpunkt auftreten, so dass man eigentlich getrennte SIMWASER-Rechnungen für alle diese Bodenarten durchführen müsste und die

¹⁷³ Alle anderen Nutzungsarten (Siedlungsgebiete, Deponien, Wasserflächen etc.) kommen für den Obstanbau nicht in Frage.

Ergebnisse dann flächenanteilig mitteln sollte. In CHARIKO wurde aber nur die eine, häufigste Bodenart für jedes Pixel berücksichtigt, da der Rechenaufwand ohnehin schon erheblich ist (siehe Kapitel 4.10.2).

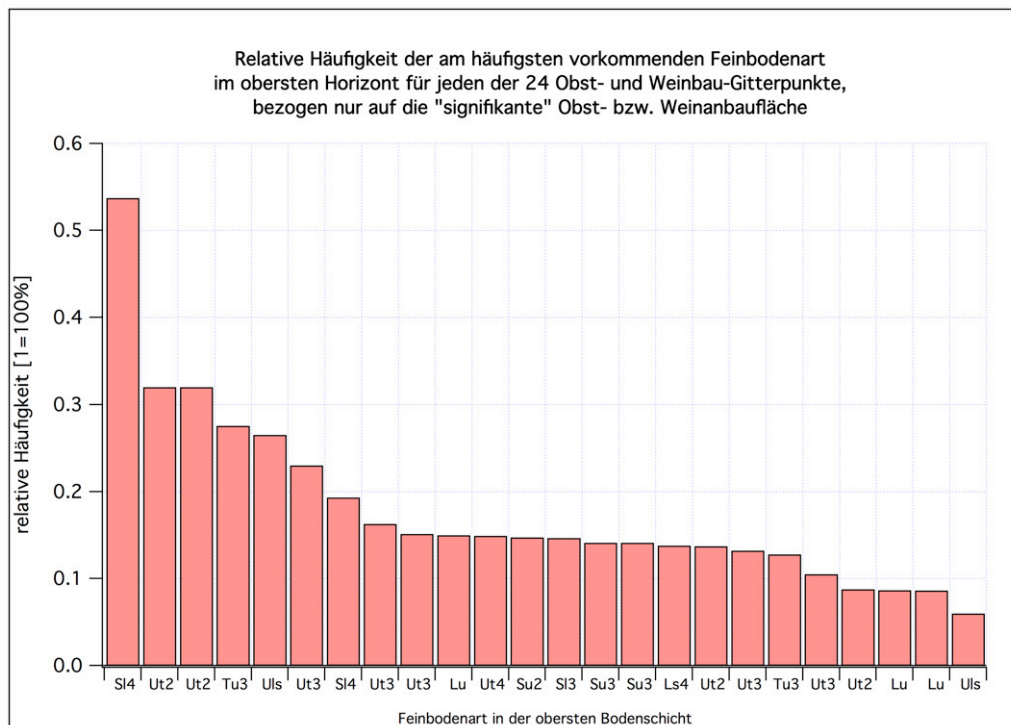


Abbildung 4.51: Relative Häufigkeit der am häufigsten vorkommenden Feinbodenart im obersten Horizont für jeden der 24 "signifikanten" Obst- und Weinbau-Gitterpunkte, bezogen nur auf die "signifikante" Obst- und Weinbaufläche.

4.10.10 Automatisierter Ablauf von SIMWASER bei den Rechnungen mit den Outputdaten der 5 Klimamodelle

Für Bodenwasserhaushaltsrechnungen mit Klimadaten aus den 3 dynamischen Klimamodellen und den zwei WETTREG2010-Läufen (Kapitel 4.1.4 und 4.1.5) für die für den Obst- und Weinbau relevanten Gitterpunkte werden die zum betrachteten Gitterpunkt gehörenden HLUK-Bodendaten (siehe Kapitel 4.10.9) als Horizonte für SIMWASER vorgegeben. Dabei wird für jeden Gitterpunkt eine eigene Horizontabfolge gewählt. Aus den zugeordneten Feinbodenarten und Feinporenvolumina [GPV_2 ; vgl. Gleichung (4.128)] (als Funktion der Tiefe bzw. Bodenschicht) werden dann später bei der numerischen Lösung der Wasserleitungsgleichung (Darcy-Gleichung bzw. Wasserbilanzbeziehung) die hydraulische Konduktivität K (Ku-Kurve) und das Wasserpotential ψ (pF-Kurve) als Funktion des aktuellen Bodenwassergehalts in den verschiedenen Bodenschichten berechnet. Als Antrieb (Forcing) verwendet man die zum gleichen Gitterpunkt gehörenden Wetterdaten¹⁷⁴ des gewählten Klimamodells. Man berechnet nun mit SIMWASER die entsprechenden Tage und Jahre des gewählten Szenarios (1961-2000 für den Kontrolllauf C20;

¹⁷⁴ Gemeint sind die Outputdaten des Klimamodells. Da diese aber in der zeitlichen Auflösung von einem Tag verwendet werden, wird hier der Ausdruck *Wetterdaten* verwendet. Unter *Klima* versteht man normalerweise über lange Zeiträume gemittelte Wetterdaten.

2001-2100 für das Szenario A1B) für alle 19 Obstanbaupixel bzw. die 8 Weinbau bzw. 4 Erdbeeranbaupixel. Der Wassergehalt wird immer nur am Anfang des entsprechenden Szenarienzeitraums so initialisiert, dass die relative nutzbare Feldkapazität 95 % beträgt [vgl. Formel (4.165)]. Die Bäume werden aber jedes Jahr wieder auf den Zustand eines 7-jährigen Apfelbaums zurückgesetzt (Kapitel 4.10.4). Für jedes Jahr werden die interessierenden Output-Größen (Trockenmassenzuwachs; Ertragsschaden; Bewässerungsmenge, Transpirationsmenge und Bienenflugintensität von Blühbeginn bis Reife u.v.a.m) in eine Datei geschrieben. Diese Rechnungen werden mit den Wetterdaten aller 5 betrachteten Klimamodellläufe durchgeführt. Der gesamte Ablauf (Bereitstellung der Steuerdateien, Programmaufrufe, Dateiumbenennungen, sichern der Ergebnisse usw.) wird durch ein Unix-Shell-Skript gesteuert.

Nach Beendigung der Rechnungen können Mittelwerte über 30-jährige Zeitabschnitte sowie über die Obstanbaugitterpunkte und die Ergebnisse, die mit den Wetterdaten der 5 Modellläufe errechnet wurden (“Modellmittel”), gebildet werden. Weitere statistische Kenngrößen (z. B. Konfidenzintervalle und p-Werte) werden dann mit der Methode aus Abschnitt 4.4.1 berechnet. Auch hierzu kommen selbstprogrammierte Fortran95-Programme zum Einsatz, die von einem weiteren Unix-Shell-Skript gesteuert werden.

Der gesamte Ablauf wird sowohl ohne Sommerberechnung als auch mit Sommerberechnung (Kapitel 4.10.5) durchgeführt, denn zur Berechnung des Ertragsschadens (ohne Berechnung) (vgl. Kapitel 4.10.12) müssen die Trockenmassenzuwächse ohne und mit Sommerberechnung bekannt sein. Schließlich werden alle diese Rechnungen auch noch mit eingeschalteter CO₂-Düngung (Kapitel 4.10.7) wiederholt.

4.10.11 Trockenmassenzuwachs und Fruchtertrag

Hier soll noch erläutert werden, wie man den von SIMWASER berechneten, gesamten jährlichen oberirdischen Trockenmassenzuwachs ΔTM in den *wahren* Fruchtertrag (Feuchtmasse der Früchte) umrechnen kann. Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Fruchtertrag (in t/ha/a)} &= \Delta TM \cdot c_{\text{Ernte}} & (4.173) \\ \text{mit der Definition: } c_{\text{Ernte}} &= \frac{\rho}{\rho_{\text{SIM}}} \cdot \frac{\text{Ernteindex}}{(1 - 0.84)} \end{aligned}$$

Der *Ernteindex* ist hier so definiert, dass er sich auf die Trockenmassen bezieht. Er beschreibt, welcher Anteil des oberirdischen Gesamttrockenmassenzuwachses auf den Trockenanteil der Frucht entfällt. Der Quotient (1-0.84) rechnet den Trockenmassenzuwachs bezüglich der Frucht in Feuchtmassenzuwachs um (z. B. enthält ein Apfel ca. 84 % Wasser). In dieser Arbeit wurde der *Ernteindex* für den Apfel auf 0.2 gesetzt. ρ beschreibt die mittlere “Standdichte” (Anzahl der Bäume pro Hektar) der Obstbäume (wobei auch die Baumgröße mit bewertet werden sollte) im betrachteten Obstanbaugebiet. ρ_{SIM} ist schließlich die implizit in SIMWASER vorgegebene “Standdichte”. Diese ist deshalb implizit vorgegeben, weil in den die *Assimilationsrate pro Grundfläche* [siehe Formel (4.125)] bestimmenden Parametern *PFLUX* (bzw. in *PHOTSR* und α) [vgl. Gleichung (4.126)] die Standdichte implizit enthalten ist!¹⁷⁵ Daher ist eine explizite Angabe von ρ_{SIM} nicht nötig

¹⁷⁵ Die Multiplikation dieser Parameter mit einem Faktor vervielfacht den Ertrag um denselben Faktor. SIMWASER berechnet nicht zuerst die Assimilationsrate pro Baum und daraus den Ertrag pro Fläche, sondern direkt die Trockenmassenzunahme pro Fläche.

und nicht möglich.

Die Parameter, welche die Trockenmassenerträge ΔTM pro Grundfläche bestimmen (z. B. *PHOTSR*), wurden so gewählt, dass sie denen einer intensiv genutzten Anbaufläche entsprachen. Der Faktor c_{Ernte} aus Gleichung (4.173) wurde hingegen so gewählt, dass die mittleren Feuchtmassen-Fruchterträge im Zeitraum 1971-2000 für Hessen typische Werte ergeben (siehe **Tabelle 4.23**). Diese Wahl entspricht im Prinzip einer Anpassung der mittleren Bestandsdichte ρ der betrachteten Obstart für Hessen.

Tabelle 4.23: c_{Ernte} für die verschiedenen Fruchtarten. Für die früh- und spätreifenden Sorten wurde jeweils derselbe Wert gewählt.

Apfel	Sauerkirsche	Süßkirsche	Birne	Erdbeere	Wein	Pfirsich	Aprikose	Pfaume
1.250	0.479	0.409	0.875	1.250	1.029	0.625	0.438 ^a	0.750

^a Diese Schätzung ist sehr unsicher!

Für die Ermittlung der hierzu notwendigen mittleren Erträge wurden unter anderem folgende Quellen verwendet: [Hessisches Statistisches Landesamt \(2013\)](#), [BMELV \(2011\)](#), [Statistisches Bundesamt \(2012\)](#) und [Statistisches Landesamt Freistaat Sachsen \(2011\)](#). Die Angaben für die mittleren Jahreserträge aus unterschiedlichen Quellen variieren leider stark. Das liegt vermutlich unter anderem daran, dass die Definition der Flächen, auf welche sich diese Angaben (in dt/ha) beziehen, nicht eindeutig ist (d. h. es ist unsicher, ob diese Flächen mit oder ohne dazwischen liegendes Grassland bestimmt wurden usw.). Außerdem muss man berücksichtigen, dass die Bestandsdichte auf verschiedenen Plantagen unterschiedlich sein kann (hohe Dichte bei intensiver Bewirtschaftung und niedrige auf Streuobstwiesen). Leider findet man meistens auch nur Angaben für die letzten maximal 10 Jahre und nicht für den Zeitraum 1971-2000. Und Angaben zum Pfirsich und der Aprikose mussten aus Quellen außerhalb von Hessen beschafft werden.

Bei den Werten aus [Tabelle 4.23](#) ist noch Folgendes zu beachten: Einige Werte für c_{Ernte} , z. B. die von Kirsche, sind ziemlich klein. Das liegt daran, dass die mittlere Standdichte im betrachteten Gebiet stark variiert und im Mittel geringer ist als in einer intensiv bewirtschafteten Plantage. Wenn die mittlere Standdichte ρ der Bäume geringer als der Wert ρ_{SIM} in SIMWASER ist, z. B. weil Anteile des Obstes nicht intensiv, sondern auf Streuobstwiesen angebaut werden, so ist c_{Ernte} entsprechend kleiner und damit dann auch der Feuchtmassen-Fruchtertrag pro Hektar gemäß Gleichung (4.173).¹⁷⁶ Bei der Kirsche ist dieser Effekt besonders ausgeprägt.

Glücklicherweise hat der Wert von c_{Ernte} nur Auswirkungen auf die Tabellen im [Anhang J](#), in denen der Feuchtmassenertrag dargestellt ist. Verändert man den Wert um einen Faktor x , so verändern sich alle Werte in diesen Tabellen ebenfalls um diesen Faktor. Der p-Wert und das Signifikanzniveau bleiben aber unverändert erhalten.

Man beachte noch Folgendes: Da der Ernteindex hier so gewählt wurde, dass im Mittel ungefähr die tatsächlich beobachteten (erzielten) Erträge berechnet werden, beinhaltet der Ernteindex auch die mittleren Schäden durch Nichtbrechung der Dormanz, Frost, Apfelwickler und weitere hier nicht betrachtete Schädlinge, Krankheiten und Schäden durch z. B. Extremereignisse (Hagel etc.). Benötigt man aber wie z. B. in [Kapitel 4.12.2](#) "Fruch-

¹⁷⁶ Eine Veränderung der Standdichte verändert leider auch die Evapotranspiration. Die Änderung ist im Allgemeinen aber nicht sehr stark, da auch der Boden bzw. das Grassland zwischen den Bäumen ähnlich stark evapotranspiriert wie dichter stehende Bäume.

terträge vollkommen ohne Schäden”, so muss man den Ernteindex in Tabelle 4.23 [bzw. die Fruchtmassenerträge (mit Bewässerung) in den Tabellen im Anhang J] entsprechend etwas (um ca. 10...20%) vergrößern.

4.10.12 Berechnung von Ertragsschäden s_Y (Yield-Schäden)

Nun soll der als Yield-Schaden s_Y bezeichnete (relative) Schaden, der allein durch veränderte meteorologische Bedingungen und ggf. durch Wasserstress entsteht, für ein bestimmtes Gebiet g definiert werden.

s_Y soll bei optimaler Bewässerung und bei den klimatischen Bedingungen des Zeitraums 1971-2000 den Wert 0 haben. Falls überhaupt kein Ertrag erzielt wird, soll s_Y den Wert 1 haben (d. h., dass der Schaden dann 100% beträgt). Diese Bedingungen werden z. B. durch folgenden Ansatz erfüllt:

$$s_Y(j, i) = 1 - \frac{\Delta TM_{j,i}}{\Delta TM_{(\text{opt. Bewässerung})}^{1971-2000;g}}. \quad (4.174)$$

$\Delta TM_{j,i}$ ist hierbei die gesamte Trockenmassenproduktion¹⁷⁷ (in t/ha/a) im Jahr j am Gitterpunkt i und der Ausdruck $\overline{\Delta TM}_{(\text{opt. Bewässerung})}^{1971-2000;g}$ ¹⁷⁸ ist der Mittelwert über die Trockenmassenproduktion bei optimaler Bewässerung über die Jahre 1971-2000 und über die Gitterpunkte des Gebiets g .¹⁷⁹ Beide Terme werden mit Hilfe der Wetter-Klima-Daten desselben, gerade betrachteten Klimamodells bestimmt. Für den mittleren Schaden $\overline{s_Y(j, i)}^{x:g}$ im Zeitraum x und Gebiet g (weiter unten auch ohne Mittelungsbalken verwendet) erhält man

$$\overline{s_Y(j, i)}^{x:g} = 1 - \frac{\overline{\Delta TM_{j,i}}^{x:g}}{\overline{\Delta TM}_{(\text{opt. Bewässerung})}^{1971-2000;g}}. \quad (4.175)$$

Dabei ist die Mittelung bei $\overline{\Delta TM_{j,i}}^{x:g}$ über den interessierenden Zeitabschnitt x und alle Gitterpunkte des Gebiets g durchzuführen. Wird z. B. über 1971-2000 gemittelt, so ergibt sich $\overline{s_Y(j, i)}^{1971-2000;g} = 0$, wenn optimal bewässert wurde. $\overline{s_Y(j, i)}^{x:g}$ ist aber größer als null, wenn im Mittelungszeitraum (bei der Berechnung von $\overline{\Delta TM_{j,i}}^{x:g}$) häufige Trockenphasen auftraten und keine Gegenmaßnahmen (Sommerberegnung) durchgeführt wurden. Mittelt man über z. B. 2071-2100, so ist $\overline{s_Y(j, i)}^{2071-2100;g}$ der mittlere Schaden dieses Zeitraums im betrachteten Gebiet g . Wird in diesem Zeitraum optimal bewässert, so enthält $\overline{s_Y(j, i)}^{2071-2100;g}$ nur die Anteile, die durch veränderte klimatische Bedingungen unter Ausschaltung der Effekte, die sich durch Wassermangel ergeben, hervorgerufen werden.

¹⁷⁷ D. h. der Zuwachs an Trockenmasse pro Jahr und Hektar.

¹⁷⁸ Wenn mit CO_2 -Düngung gerechnet wird [vgl. Kapitel 4.10.7], dann erhält man für diesen Ausdruck fast genau denselben Wert wie ohne CO_2 -Düngung, da der mittlere CO_2 -Gehalt im Zeitraum 1971-2000 gerade keinen zusätzlichen Düngeneffekt bewirkt [vgl. Gleichung (4.171)]. Die Varianz des Schadens in Gleichung (4.174) ist mit CO_2 -Düngung allerdings meistens geringfügig größer, da der CO_2 -Gehalt innerhalb des Zeitraums 1971-2000 ebenfalls variiert (siehe Abbildung 4.44).

¹⁷⁹ Bei dieser Definition ist der Schaden $s_Y(j, i)$ an einem Gitterpunkt i im Jahr j größer als null, wenn der Ertrag $\Delta TM_{j,i}$ kleiner als der langjährige Mittelwert im gesamten betrachteten Gebiet ist. Man könnte die Mittelung über das Gebiet g im Nenner von (4.174) auch weglassen. In diesem Fall würde sich der Schaden direkt auf den Gitterpunktmittelwert beziehen. Würde man aber die so definierten Schäden über ein Gebiet mitteln, so würden Gitterpunkte mit geringen mittleren Erträgen übermäßig stark in den Mittelwert eingehen, obwohl sie für den Ertrag des Gesamtgebiets praktisch keine Rolle spielen. Bei den hier betrachteten Obstanbaugitterpunkten sind die Unterschiede beider Methoden aber gering!

Bei der Definition des Yield-Schadens nach Gleichung (4.175) muss man Folgendes beachten: Fasst man den Nenner $\overline{\Delta TM}_{(\text{opt. Bewässerung})}^{1971-2000;g}$ als Zufallsvariable auf, so ist $\overline{s_Y(j, i)}^{1971-2000;g}$ identisch null und die Varianz dieses mittleren Schadens ist ebenfalls null, da bei jeder erneuten Realisierung des Wetter- und Wachstumsablaufs der Nenner und Zähler in (4.175) identische Werte annehmen. Betrachtet man hingegen den Nenner $\overline{\Delta TM}_{(\text{opt. Bewässerung})}^{1971-2000;g}$ als feste Normierungskonstante, die nur einmal aus dem aktuellen Wetterablauf des betrachteten Modells berechnet wird, und danach bei allen hypothetischen weiteren Realisierungen konstant bleibt, so ist die Varianz und damit auch das Konfidenzintervall von $\overline{s_Y(j, i)}^{1971-2000;g}$ größer als null, da der Nenner nun als konstanter Wert aufgefasst werden muss, der vom zufällig variierenden Zähler unabhängig ist. Bei der Berechnung der Varianz von Differenzen wie z. B. $\overline{s_Y(j, i)}^{2071-2100;g} - \overline{s_Y(j, i)}^{1971-2000;g}$ muss man im ersten Fall (der Nenner wird als Zufallsvariable betrachtet) die Varianzen von Zähler und Nenner in $\overline{s_Y(j, i)}^{2071-2100;g}$ betrachten¹⁸⁰. Im zweiten Fall (der Nenner wird als Konstante aufgefasst) muss man die Varianz der Differenz der beiden Quotienten in $\overline{s_Y(j, i)}^{2071-2100;g}$ und $\overline{s_Y(j, i)}^{1971-2000;g}$ berechnen, wobei der Nenner jeweils als Konstante betrachtet wird und der Zähler eine Zufallsvariable ist. Man kann leicht zeigen, dass das resultierende Ergebnis wegen der Unabhängigkeit der beiden Zeitperioden ungefähr gleich ist. Damit der Yieldschaden ähnlich wie die übrigen Größen behandelt und dargestellt werden kann, wurde in diesem Bericht der Nenner als Konstante aufgefasst, so dass $\overline{s_Y(j, i)}^{1971-2000;g} > 0$ möglich ist [vgl. z B. Tabelle J.5; in dieser Tabelle erkennt man auch, dass das Konfidenzintervall (welches dort in runden Klammern angegeben ist) der “Differenz der Mittelwerte von 2071-2100 und 1971-2000” größer ist als das des “Mittelwerts von 2071-2100”, obwohl die Werte von Mittelwert (D) und Differenz (D-A) identisch sind. Das ist eine Konsequenz daraus, dass der Nenner als Konstante aufgefasst wird].

s_Y kann als einzige der bisher beschriebenen Schadensgrößen auch kleiner als null werden, nämlich dann, wenn sich der Klimawandel positiv auf den Ertrag auswirkt.

Man beachte bei der Definition von (4.175), dass zur Bestimmung des Schadens an den Früchten kein Ernteindex und keine Bestandsdichte (vgl. Abschnitt 4.10.11) bekannt sein müssen. Würde man (4.175) mit dem Apfelfeuchtmassenzuwachs anstelle von ΔTM formulieren, so würde sich nämlich der Ernteindex und der Bestandsdichtefaktor heraus kürzen, wenn beide zeitlich konstante Werte besäßen.

Die in (4.175) benötigte Trockenmassenproduktion $\overline{\Delta TM}_{j,i}^{x,g}$ (mit oder ohne optimale Sommerberechnung) wird für alle Gebiete und Zeiträume direkt von SIMWASER (vgl. Kapitel 4.10) bzw. der entsprechend nachgeschalteten Auswerteroutine berechnet.

Man beachte: Der hier berechnete Yield-Schaden s_Y ist nur eine grobe Approximation. In der Realität kann z. B. eine extreme Trockenperiode zu einem Totalschaden am Obst führen. Da im Modell aber der Obstertrag über den Trockenmassenzuwachs berechnet wird, kann ein bis zum Einsetzen der Auswirkungen einer Trockenperiode erzielter Zuwachs ΔTM nicht wieder vernichtet werden. Wenn bereits (neue) Trockenmasse gebildet wurde, kann kein Totalverlust mehr auftreten. Die Trockenheit kann in SIMWASER allerdings den weiteren Zuwachs verringern bzw. ganz verhindern [durch eine relative Transpiration $R < 1$ in Gleichung (4.125)]. Der hier betrachtete Yield-Schaden enthält auch keine Schäden durch Hagelschlag, Schädlinge oder Krankheiten.

¹⁸⁰ Der 2. Summand ist in diesem Fall identisch null und spielt keine Rolle.

4.10.13 Berechnung der Kosten K_{BEW} zur Vermeidung von Ertragsschäden

Bei “Yield” kann man die Kosten der Gegenmaßnahmen nicht direkt aus den Yieldschäden oder der Häufigkeit ihres Auftretens u. ä. berechnen, da viele Teilschäden, die zum Yieldschaden beitragen, z. B. Schäden durch weniger Einstrahlung, zu viele Niederschläge oder zu hohe Lufttemperaturen¹⁸¹ nicht (oder nur wenig) zu bekämpfen sind. Außerdem kann s_Y auch negative Werte annehmen. Die Maßnahmen, welche bei solchen Schäden zur Minimierung von s_Y durchgeführt werden können, sind z. B. die *Kühlung* und die *Entwässerung*. Sie werden in Abschnitt 4.11.4 diskutiert.

Der Schadensanteil durch Dürreperioden lässt sich allerdings durch Sommerberechnung bekämpfen. Für die hierbei anfallenden Bewässerungskosten $\overline{K_{Bew}}^x$ ¹⁸² im Zeitraum x kann man folgenden Ansatz machen:

$$\overline{K_{Bew}}^x = \overline{BEW}^x \cdot BEWKosten \quad (4.176)$$

\overline{BEW}^x ist der Mittelwert der im Zeitraum x benötigten, zusätzlichen jährlichen Bewässerungsmenge in mm/a (bzw. in 10 000 l/ha/a). \overline{BEW}^x wird vom Wasserhaushaltsmodell SIMWASER direkt berechnet, sofern in diesem die Sommerberechnung eingeschaltet ist.

Die in (4.176) benötigten Bewässerungskosten $BEWKosten$ [in €/ha/mm bzw. €/(10 000 l)] für die Berechnung betragen nach Angaben der OVA Jork

- bei guter Wasserverfügbarkeit, z. B. aus Gräben: 1.72 €/ha/mm
- in Gebieten ohne offene Gräben u. sonstige Rückhaltungsmöglichkeiten (d. h. mit Brunnenbewässerung): 2.12 €/ha/mm.

Für alle Kostenabschätzungen für die Obstanbaugitterpunkte in Hessen wurde der Wert 2.12 €/ha/mm verwendet.

Man beachte, dass es dadurch, dass der $(1 - s_Y)$ -Term in der *Damage Function* [vgl. die Definition der *Damage Function* in Gleichung (4.178) und (4.179) (dort allerdings für den Gesamtschaden)] auch größer als eins werden kann und dieser Term noch andere Schadensursachen als die Trockenheit beinhaltet, vorkommen kann, dass die Erträge ansteigen (oder fallen), ohne dass sich das auf die Maßnahmekosten auswirkt. Das liegt daran, dass in den Kosten (4.176) nur die Schäden durch Bewässerung berücksichtigt werden. Andere Ursachen für Ertragsänderungen, wie z. B. Veränderungen der Phänologie, der Photosyntheseleistung oder der “Transpiration” usw. sind in den Kosten nicht enthalten.

4.11 Berechnung des klimabedingten Gesamtschadens

Um die Kosten des Klimawandels auf den Obstbau abschätzen zu können, müssen zuerst, wie bereits in den vorangehenden Kapiteln geschehen, die unterschiedlichen Schadensursachen identifiziert und die Größe der möglichen Schäden jeder Ursache in Abhängigkeit vom Wetter- bzw. Klimaverlauf untersucht werden. In diesem Kapitel wird zunächst der

¹⁸¹ Der *Dormanzschaden* und der *Dürreschaden* nehmen eine Sonderrolle ein. Der Dormanzschaden wird hier aber nicht zum *Yieldschaden* gezählt, da sowohl der Dormanzschaden als auch seine Bekämpfungskosten einen gesonderten Term bei der Berechnung des Gesamtschadens bzw. der Gesamtkosten besitzen. Der Dürreschaden bzw. seine Bekämpfungskosten werden weiter unten behandelt.

¹⁸² K_{BEW} wird in dieser Arbeit auch als K_Y bezeichnet. Beide Abkürzungen meinen dieselbe Größe!

Schadensbegriff noch etwas genauer definiert als das bis hierher der Fall war. Insbesondere wird diskutiert, wie man aus den bereits zuvor beschriebenen Einzelschäden (bzgl. Dormanz, Forst, Apfelwickler, Ertrag) einen *Gesamtschaden* bestimmen kann.

4.11.1 Definition von Einzelschäden

Die Variable s_i bezeichnet im Folgenden den durch die Ursache i in einem festen Jahr hervorgerufenen relativen Schaden (z. B. in %), wenn alle Schäden durch Ursachen $k \neq i$ durch geeignete Gegenmaßnahmen vollkommen verhindert werden und die Schadensursache i überhaupt **nicht** bekämpft wird. Der Schaden s_i ist also der Schaden, der durch die Ursache i allein hervorgerufen wird. Die Ursachen i können dabei folgende Werte annehmen¹⁸³:

$$i \in \{D, F, A, Y\} = \{\text{Dormanz, Frost, Apfelwickler, Yield}\} \quad (4.177)$$

- **Dormanz bzw. s_D** bezeichnet den Schaden, der durch die Nichtbrechung der Dormanz (Nichterfüllung des Chilling-Requirements) hervorgerufen wird. Dieser Schaden wurde bereits in Abschnitt 4.7 näher erläutert.
- **Frost bzw. s_F** ist der durch Spätfrost während der Blüte hervorgerufene Schaden. Auf diesen Schaden und die Wahrscheinlichkeit seines Auftretens wurde in Abschnitt 4.8.4 genauer eingegangen.
- **Apfelwickler bzw. s_A** kennzeichnet Schäden, die durch den Apfelwickler am Apfelertrag hervorgerufen werden (siehe Abschnitt 4.9).
- **Yield bzw. s_Y** steht für alle Schäden durch Änderungen der klimatischen Größen wie z. B. Strahlung, Niederschlag, Luftfeuchte, Wind, Temperatur etc. und durch hiervon hervorgerufene sekundäre Änderungen in z. B. Bodenwasserhaushalt, der Photosyntheseleistung usw. (Kapitel 4.10.12).

Schäden durch Extremereignisse, die durch die regionalen Klimamodelle nicht aufgelöst bzw. nicht berechnet werden (z. B. Hagel H) und welche im Wasserhaushaltsmodell SIMWASER nicht berücksichtigt werden (z. B. Frostschäden), sind in s_Y nicht enthalten, und müssen durch gesonderte Schäden (s_H, s_F usw.) berücksichtigt werden.

Man beachte bitte auch die Bemerkungen zu den Fruchtschäden durch Frost auf Seite 117 und zu den Yieldschäden auf Seite 161.

4.11.2 Die Damage Function und der Gesamtschaden

Der Damage Faktor DF bzw. die Damage Funktion f_1 soll eine Funktion der eben eingeführten Teilschäden sein und den Wert $1 - s_{ges}$ haben. s_{ges} ist der noch unbekanntes Gesamtschaden, der kollektiv durch die Teilschäden angerichtet wird:

$$DF = f_1(s_D, s_F, s_A, s_Y) = 1 - s_{ges}. \quad (4.178)$$

¹⁸³ In CHARIKO werden nur diese 4 Schadensformen berücksichtigt. Andere Schäden, wie z. B. Hagelschäden s_H , werden in Abschnitt 4.11.4 angesprochen.

$DF = 0$ bedeutet Totalschaden ($s_{ges} = 1$) und $DF = 1$ heißt, dass kein Schaden auftritt ($s_{ges} = 0$). Der Mittelwert von DF bzw. s_{ges} über viele Jahre ist der “mittlere Nicht-Schaden” bzw. “mittlere Schaden”, der in diesen Jahren auftritt. Für den (absoluten) mittleren Ertrag¹⁸⁴ in z. B. t/ha/a gilt dann:

$$\overline{\text{Ertrag mit Schaden}} = \overline{DF} \cdot \overline{\text{Ertrag ohne Schaden}}. \quad (4.179)$$

Die Mittelung auf der rechten Seite zerfällt nur dann in zwei einzeln zu mitteln Termen, wenn der “Ertrag ohne Schaden” über den Mittelungszeitraum annähernd konstant ist oder keine Korrelation mit dem Schadensfaktor DF besteht.

DF kann u. U. auch Werte größer 1 annehmen. Das bedeutet dann, dass der Ertrag gegenüber dem Durchschnittsertrag ohne Schäden zugenommen hat. Dieses Phänomen wird allein durch den Yield-Schaden s_Y hervorgerufen, und zwar dann, wenn der Ertrag durch den Klimawandel größer wird als in der Gegenwart (siehe Abschnitt 4.10.12).

Mögliche Ansätze für DF bzw. f_1

Bei Begrenzung auf nur zwei Ursachen (F=Frost und H=Hagel) sollen nun exemplarisch einige mögliche Ansätze für f_1 diskutiert werden:

1. Der Frost schädigt genau die gleichen Blüten wie der Hagel; beide Schadensparameter sollen 0.5 betragen, d. h. $s_H = s_F = 0.5$. In diesem Fall gilt

$$DF = (1 - s_F) = (1 - 0.5) = 0.5 \text{ (50 \% kaputt)}$$

In obiger Gleichung wird nur ein Schadensparameter benutzt, weil der zweite Schaden ja keinen weiteren Schaden mehr anrichtet, da er nur die bereits toten Blüten schädigt.

2. Nun soll der Hagel genau die Blüten zerstören, die der Frost noch nicht geschädigt hat. Dann gilt:

$$DF = 1 - s_H - s_F \stackrel{\text{(falls wieder } s_i=0.5 \text{ gilt)}}{=} 0 \text{ (100 \% = alles kaputt)}$$

Da $DF \geq 0$ gelten muss, wenn man nur s_H und s_F ohne s_Y betrachtet, können in diesem Fall s_H und s_F nicht beliebige Werte zwischen 0 und 1 annehmen, sondern es muss gelten: $s_H \leq 1 - s_F$. Die s_i sind in diesem Fall also nicht (statistisch) unabhängig!

Beide Ansätze sind nicht realistisch, da die verschiedenen Ursachen weder “genau die bereits beschädigten” noch “nur die noch unbeschädigten Blüten” betreffen werden.

3. Bei folgendem Ansatz können die s_i unabhängig voneinander beliebige Werte zwischen 0 und 1 annehmen:

$$DF = (1 - s_F) \cdot (1 - s_H) \stackrel{\text{(falls wieder } s_i=0.5 \text{ gilt)}}{=} 0.5 \cdot 0.5 = 0.25 \text{ (75 \% kaputt)} \quad (4.180)$$

Man kann bei diesem Ansatz nicht entscheiden, ob der Frost 50 % und der Hagel 25 % Schaden hervorgerufen haben oder ob der Hagel 50 % und der Frost 25 % oder beide gleich viel Schaden usw. verursacht haben (vgl. aber Abschnitt 4.11.3).

¹⁸⁴ *Ertrag* bezeichnet hier, wenn nichts anderes erwähnt wird, immer den Ertrag an Gesamt-Trockenmasse. Die Umrechnung auf Feuchtmasse bzw. auf Masse an Obst kann mit Gleichung (4.173), Abschnitt 4.10.11 vorgenommen werden.

Der dritte Ansatz hat aber viele andere Eigenschaften, die erstrebenswert oder sogar zwingend erforderlich sind:

- Der Wert von DF im 3. Beispiel ist ein Kompromiss zwischen dem 1. und 2. Ansatz.
- Hat einer der Schadensparameter den Wert 1, so ist $DF = 0$, egal welchen Wert der andere Parameter hat. Und nur wenn beide s -Parameter 0 sind, ergibt sich $DF = 1$.
- Die herausragende Eigenschaft ist aber, dass man bei diesem Ansatz für die Schäden statistische Unabhängigkeit annehmen kann, wenn diese Annahme von der Natur der Schäden her zu rechtfertigen ist. Beim 2. Ansatz wäre das gar nicht möglich, da immer die Zwangsbedingung $s_H \leq 1 - s_F$ gelten muss.

Statistische Unabhängigkeit bedeutet, dass sich die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_{ges}(s_F, s_H)$ der beiden Schadensparameter als Produkt zweier Funktionen schreiben lässt:

$$f_{ges}(s_F, s_H) = f_F(s_F) \cdot f_H(s_H). \quad (4.181)$$

Bildet man nun den Erwartungswert von Gleichung (4.180), so erhält man mit Hilfe von (4.181):

$$\begin{aligned} E[DF] &=: \overline{DF} = \iint (1 - s_F) \cdot (1 - s_H) \cdot f_{ges}(s_F, s_H) ds_F ds_H = \\ &= \int (1 - s_F) \cdot f_F(s_F) ds_F \cdot \int (1 - s_H) \cdot f_H(s_H) ds_H = (1 - E[s_H]) \cdot (1 - E[s_F]) \\ &=: (1 - \overline{s_H}) \cdot (1 - \overline{s_F}). \end{aligned} \quad (4.182)$$

Die Mittelungsstriche über den Größen werden hier alternativ zum Erwartungswertoperator $E[\dots]$ verwendet. Wenn man Stationarität und Ergodizität voraussetzt, so gilt diese Beziehung auch approximativ für zeitliche Mittelwerte z. B. über die Jahre einer Dekade oder einen 30 Jahresabschnitt.

Gleichung (4.182) bedeutet, dass man den ‘‘Mittelwert’’ von DF (über z. B. 30 Jahre und die Gitterpunkte eines Obstanbaugebiets) aus den gemittelten Schadensparametern bilden darf. Ohne diese Zerlegung müsste man die gesamte rechte Seite von (4.180) über jährliche Werte der Schadensparameter mitteln.

Man muss sich allerdings noch überlegen, ob die Annahme der stochastischen Unabhängigkeit der einzelnen Schadensursachen gerechtfertigt ist bzw. wie sehr sich kleine Abhängigkeiten auf das Ergebnis (4.182) auswirken: Von allen Zweierkombinationen der 5 bisher erwähnten Schadenstypen (*Hagel* werde hier exemplarisch mit betrachtet, auch wenn er weiter unten nicht mehr berücksichtigt wird) können eigentlich nur leichte Abhängigkeiten zwischen *Hagel* und *Frost* und zwischen *Apfelwickler* und *Yield* (Wetter und Trockenheit) bestehen. Die Korrelationen sind aber nicht groß, da z. B. Hagel auch fallen kann, wenn kein Frost-Event auftritt usw. Genauere Abschätzungen zeigten auch, dass man die Korrelationen in fast allen Fällen vernachlässigen kann.

Da für viele Größen aber leider doch nicht mit bereits gebildeten Mittelwerten dieser Größe gerechnet werden kann (siehe Abschnitt 4.11.5), wurde in CHARIKO in fast allen Fällen nicht die bei statistischer Unabhängigkeit geltende Beziehung (4.182) verwendet, sondern zunächst die gesuchte Größe (hier DF) für jedes Jahr, jeden Gitterpunkt und jedes Modell getrennt berechnet. Erst danach wurde dann über die Gitterpunkte und die Zeit gemittelt. Im Fall, dass eine Wahrscheinlichkeit in die Berechnung mit eingeht (z. B. die Wahrscheinlichkeit für Nichtbrechung der Dormanz), wurde der Wert in einem Jahr, in dem das ‘‘Ereignis’’ (die Nichtbrechung) eintritt, auf 1 gesetzt, andernfalls auf 0.

Wenn die Mittelwerte von s_H und s_F klein sind, kann man nach dem Ausmultiplizieren von (4.182) den quadratischen Term vernachlässigen. Man hat dann eine lineare Damage Funktion [wie im 2. Ansatz]. Das Problem, dass $s_H \leq 1 - s_F$ sein muss, spielt bei sehr kleinen s -Werten keine Rolle.

Der 3. Ansatz besitzt sehr viele Vorteile. Dieser Ansatz ist zwar nicht zwingend, er erfüllt aber alle Anforderungen, die man von einem derartigen Ansatz erwartet. Daher wird im Folgenden dieser Ansatz bzw. seine Verallgemeinerung (4.183) benutzt.

Die Verallgemeinerung des 3. Ansatzes auf mehr als 2 Parameter lautet¹⁸⁵:

$$DF = \tilde{f}_1(s_1, s_2, \dots) = \prod_i (1 - s_i) = 1 - s_{ges}. \quad (4.183)$$

Mit der oben diskutierten und mit gutem Gewissen anzunehmenden stochastischen Unabhängigkeit gilt diese Gleichung approximativ auch für Mittelwerte, die im Folgenden wie der Erwartungswertoperator in (4.182) mit einem Mittelungsstrich gekennzeichnet werden.

Den mittleren Schaden durch die Ursache i kann man entweder als gewöhnlichen Mittelwert über die jährlichen (Index $j = \text{Jahr}$) Realisierungen s_{ij} aus

$$\bar{s}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_{ij} \quad (4.184)$$

oder, falls eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung $\text{Prob}(s_k)$ (für Schadensklassen der Stärke s_k) gegeben ist und diese Verteilung im Mittelungszeitraum einigermaßen konstant bleibt bzw. für diesen Zeitraum bestimmt wurde, aus

$$\bar{s}_i = \sum_k \text{Prob}(s_k) \cdot s_k \quad \left(\text{dabei muss } \sum_k \text{Prob}(s_k) = 1 \text{ gelten} \right), \quad (4.185)$$

oder für gegebene stetige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(s)$ mit

$$\bar{s}_i = \int s \cdot f(s) ds \quad (4.186)$$

berechnen.

4.11.3 Zerlegung des Gesamtschadens in geordnete Schäden

Die in Abschnitt 4.11.1 definierten Schäden s_i sind nicht additiv. Es gilt daher nicht, dass die Summe über alle unterschiedlichen Schäden den Gesamtschaden s_{ges} ergibt.

Man kann aber aus den s_i sogenannte *geordnete Schäden* ss_i konstruieren, für die dann tatsächlich

$$\sum_i ss_i = s_{ges} = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - s_j) \quad \left(\neq \sum_i s_i \right) \quad (4.187)$$

¹⁸⁵ Man kann (4.183) auch über Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen erhalten: Wenn man $(1 - s_i)$ als die Wahrscheinlichkeit, dass kein Schaden auftritt, interpretiert, dann ist das Produkt DF in (4.183) bei unabhängigen Ereignissen gerade die Wahrscheinlichkeit, dass der Gesamtschaden null ist. $DF = 1$ bedeutet dann, dass der Schaden mit Sicherheit null ist (kein Schaden). $DF = 0$ bedeutet, dass mit Sicherheit ein Schaden auftritt. Überträgt man die Schadenswahrscheinlichkeit auf die Schadensmenge, so ergibt sich (4.183).

gilt. Damit die linke Gleichung in Formel (4.187) gültig ist, muss man allerdings annehmen, dass sich die Schäden in eine "Reihenfolge" bringen lassen. Zum Beispiel, dass der Schaden durch Nichtbrechung der Dormanz s_D eintritt, bevor der Frostschaden s_F auftritt, und erst danach der Apfelwicklerschaden s_A eintritt. Zum Schluss entsteht dann noch ein Schaden durch Wassermangel oder dadurch, dass sich die Ernte verfrüht (s_Y). Die Anordnung von s_Y ist etwas problematisch, da sich dieser Schaden über die gesamte Reifeperiode *erstrecken* kann. Allerdings ist s_Y in den Szenarien mit Sommerberechnung und ohne CO₂-Düngung verglichen mit den anderen Schäden häufig betragsmäßig ziemlich klein. Und in diesem Fall kann man s_Y ohne großen Fehler beliebig anordnen, ohne die anderen Schäden ss_i signifikant zu verändern. Der kleine Schaden s_Y selbst kann sich durch Umordnung allerdings merklich ändern (siehe unten).

Man kann sich die Zerlegung der Schäden an folgendem Beispiel klar machen: Zu Beginn (vor den Schäden) beträgt der Ertrag 100 % = 1. Nun erfolgt der s_D -Schaden. Noch gilt ganz einfach $ss_D = s_D$. Der Ertrag (Anteil der fiktiven gesunden Äpfel, die erst noch wachsen müssen) sinkt auf $(1 - ss_D) = (1 - s_D)$. Nun folgt der s_F -Schaden. Dieser beträgt $ss_F = (1 - s_D) \cdot s_F$, da vor dem Frostschaden nur noch der Anteil $(1 - s_D)$ an (fiktiven) Äpfeln existierte. Übrig bleibt der gesunde Anteil $(1 - s_D) - (1 - s_D) \cdot s_F = (1 - s_D) \cdot (1 - s_F)$. Nun kommt der s_A -Schaden hinzu: $ss_A = (1 - s_D) \cdot (1 - s_F) \cdot s_A$. Übrig bleibt der gesunde Anteil $(1 - s_D) \cdot (1 - s_F) - (1 - s_D) \cdot (1 - s_F) \cdot s_A = (1 - s_D) \cdot (1 - s_F) \cdot (1 - s_A)$. Und zum Schluss tritt der Yield-Schaden ein: $ss_Y = (1 - s_D) \cdot (1 - s_F) \cdot (1 - s_A) \cdot s_Y$.

Wir haben daher:

$$\begin{aligned} ss_D &= s_D \\ ss_F &= (1 - s_D) \cdot s_F \\ ss_A &= (1 - s_D) \cdot (1 - s_F) \cdot s_A \\ ss_Y &= (1 - s_D) \cdot (1 - s_F) \cdot (1 - s_A) \cdot s_Y. \end{aligned}$$

Die Summe dieser 4 Größen ergibt tatsächlich $1 - (1 - s_D) \cdot (1 - s_F) \cdot (1 - s_A) \cdot (1 - s_Y) = s_{ges}$.

Die geordneten Schäden ss_i unter Berücksichtigung der Vorschäden berechnen sich daher aus den normalen Schäden s_i nach folgender Gleichung:

$$ss_i = s_i \cdot \prod_{j=1}^{i-1} (1 - s_j) . \quad (4.188)$$

Bei $i = 1$ ist das Produkt von $j = 1$ bis 0 auf den Wert eins zu setzen. Die s_i sind die in Abschnitt 4.11.1 definierten normalen Schäden, die auftreten, wenn immer nur die Schadensursache i alleine eintritt und kein anderer Schaden auftritt. Die Gleichung (4.187) wird mit den ss_i aus (4.188) für alle ganzzahligen $N \geq 1$ ($N =$ Anzahl der unterschiedlichen Schadensursachen) erfüllt. Der Beweis ist leicht durch vollständige Induktion zu führen.

Man erkennt an den Formeln, dass sehr kleine s_i , die ein $(1 - s_i)$ von ungefähr 1 ergeben, "an beliebiger Stelle" (d. h. nach Umordnung der Indizes) stehen können, ohne die anderen ss_j merklich zu beeinflussen. Nur der kleine Schaden ss_i der Größe i selbst kann sich merklich verändern, da ja, je nach Anordnung, mal mehr oder mal weniger $(1 - s_j)$ -Faktoren zu seiner Berechnung verwendet werden.

Der Gesamtschaden ist allerdings völlig unabhängig von der Reihenfolge des Eintretens der verschiedenen Schäden, wie man aus der Darstellung (4.183) erkennt, da alle Faktoren vertauschbar sind!

Man beachte, dass sich die Teilschäden ss_i ändern, wenn man eine Schadensursache j null setzt oder verkleinert, und wenn dieser Schaden j vor dem Schaden i auftritt! ss_i wird dann größer! Umgekehrt wird ss_i kleiner, wenn einer der Vorschäden größer wird. Denn dann wird durch den Vorschaden mehr zerstört, und der Schaden s_i wirkt nur noch auf den kleineren, intakt gebliebenen Anteil. Das kann z. B. beim *geordneten Yieldschaden* ss_Y zu drastischen Änderungen im Laufe des Klimawandels führen, auch wenn sich der normale Yieldschaden s_Y gar nicht verändert, nämlich z. B. dann, wenn sich der Dormanzschaden s_D , der heutzutage noch null ist, in Zukunft stark vergrößern sollte¹⁸⁶.

Ein Beispiel, in dem nur der Dormanz- und der Yieldschaden Werte ungleich null annehmen können, möge das verdeutlichen: Im ersten Zeitabschnitt (1971-2000) gelte $s_D = 0$ und $s_Y = ss_Y = 0.40 = 40\%$. Wenn dann aber im Zeitabschnitt 2071-2100 $s_D = 0.25 = 25\%$ beträgt, da die Dormanz nicht mehr gebrochen wird, so beträgt der *geordnete Yieldschaden* ss_Y nur noch 30.0%, obwohl der *normale Yieldschaden* s_Y weiterhin zu 40% angenommen wurde. Denn es gilt gemäß (4.188): $ss_Y = (1 - 0.25) \cdot 0.40 = 0.30$.

ss_Y nimmt daher in diesem Beispiel mit der Zeit ab, auch wenn sich die Bodenfeuchteverhältnisse, Wetterbedingungen und die Reifelängendauer¹⁸⁷ nicht weiter verschlechtern haben.

4.11.4 Weitere mögliche Schäden und Kosten, die in CHARIKO aber nicht berücksichtigt werden

Zu den gefürchtetsten Wetterereignissen zählt neben dem Spätfrost der **Hagel**. Bezüglich aller Schäden durch Veränderungen konvektiver Extremwetterereignisse (zu denen der Hagel gehört) wird auf die Ergebnisse im *klimazwei*-Projekt "RegioExAKT"¹⁸⁸ verwiesen. Hagelschäden und Maßnahmen gegen Hagel wurden in CHARIKO nicht berücksichtigt. Einen wirksamen Schutz vor Hagel bieten nur Hagelschutznetze, für die aber pro Hektar rund 10 000 € investiert werden müssen.

Kosten für Entwässerungsmaßnahmen, die bei zu starker Vernässung des Bodens (zu hohem Grundwasserspiegel) erforderlich werden, wurden ebenfalls in CHARIKO nicht betrachtet. Dieses Thema könnte aber in Zukunft auf Grund des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs, der bei methodisch unterschiedlichen Ansätzen verschiedener Autoren bis zum Ende des 21. Jahrhunderts 0.5 m bis 1.9 m¹⁸⁹ betragen kann, vor allem in Küstennähe wichtig werden. Auch Schäden durch **Starkregen**¹⁹⁰, **Hochwasser** u. ä. wurden nicht explizit in Betracht gezogen.

Da gegen Ende des 21. Jahrhunderts häufig Tagesmaximum-Temperaturen T_x mit weit über 25 °C erreicht werden, müssen evtl. auch die **Kosten für Kühlung der Bäume** (Beregnung von oben) berücksichtigt werden. Die Anzahl der Tage, die innerhalb des Zeitraums Blühbeginn bis Reife einen kritischen T_x -Wert (z. B. 30 °C) überschreiten, und an denen nicht sowieso schon bewässert wird, wird zwar in der für CHARIKO verbesserten Version des Wasserhaushaltsmodells SIMWASER berechnet, wurde aber noch nicht in die Schadens-Kosten-Rechnungen mit einbezogen. Für konkrete Aussagen müssten nämlich auch Rechnungen mit Kühlberegnung durchgeführt werden. Dabei müsste dann auch der

¹⁸⁶ Was glücklicherweise wahrscheinlich nicht der Fall sein wird; vgl. Anhang G.3.

¹⁸⁷ Die Konstanz dieser drei Bedingungen spiegelt sich im hypothetischen Wert $s_Y = 0.4 = \text{const.}$ wieder.

¹⁸⁸ www.regioexakt.de

¹⁸⁹ Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Meeresspiegelanstieg>

¹⁹⁰ Soweit dieser nicht durch den Vernässungsfaktor u. ä. im Modell SIMWASER berücksichtigt wird.

Einfluss der Kühlberechnung auf den Bodenwasserhaushalt und seine Konsequenzen auf das Pflanzenwachstum in SIMWASER berücksichtigt werden.

Auch Schäden durch **Sonnenbrand** und andere Strahlungsschäden wurden in CHARIKO nicht berücksichtigt.

4.11.5 Abschätzung des Fehlers bzw. Konfidenzintervalls der Schäden und Kosten

In den meisten Fällen wurde die betrachtete Größe x_{mjg} (z. B. $x = s_{ges}$) zunächst für alle Modelle m , alle Jahre j und alle Gitterpunkte g getrennt berechnet (siehe auch die Erläuterungen auf Seite 165). Sodann wurde für jedes Jahr und Modell der Mittelwert über die betrachteten Obstanbaugitterpunkte berechnet. Mit den so gewonnenen $x_{mj} := \overline{x_{mjg}}^g$ wird dann so verfahren, wie es in Kapitel 4.4 beschrieben wurde, um Mittelwerte dieser Größe über 30-jährige Zeitabschnitte und die 5 Modelle sowie die zugehörigen Konfidenzintervalle zu erhalten¹⁹¹.

Alternativ könnte man auch die Mittelwerte für die Gesamtschäden s_{ges} [Gleichung (4.187)] mit der Methode gemäß Gleichung (4.182) (unter Annahme der statistischen Unabhängigkeit der Einzelschäden) aus den bereits (zeitlich) gemittelten 4 Einzelschäden (siehe die Tabellen im Anhang, z. B. Tabelle H.25) approximativ berechnen. Die Konfidenzintervalle müsste man dann allerdings mit den Formeln der “Fehlerfortpflanzung bei der Multiplikation” für mehrere fehlerbehaftete unabhängige Größen¹⁹² relativ umständlich und ebenfalls nur approximativ aus den 4 Mittelwerten und den ebenfalls in den Tabellen angegebenen 4 Konfidenzintervallen berechnen. Für die im nächsten Kapitel beschriebenen Gesamt-Maßnahme-Kosten K_{ges} [Gleichung (4.189)] wäre die Rechnung mit dieser Methode wegen der Additivität der K_i sogar wesentlich einfacher als die am Anfang dieses Abschnitts beschriebene Methode.

Diese Methode darf allerdings nur für die zeitlichen Mittelwerte einzelner Modelle angewendet werden und nicht für den “Mittelwert über die 5 Klimamodellläufe”. Die Schadenswerte der verschiedenen Modelle können nämlich, im Gegensatz zu Werten aus unterschiedlichen Jahren, miteinander korreliert sein. Daher hängt das Ergebnis nichtlinearer Funktionen dieser Schäden davon ab, ob man zuerst die Schäden aus beiden Modellen mittelt und dann daraus die Funktion berechnet, oder ob man zuerst die Funktion für jedes Modell getrennt berechnet und danach über die beiden Funktionswerte mittelt (korrekter). Ein Beispiel mit nur 2 möglichen Schäden und 2 verschiedenen Modellen möge das verdeutlichen: Für Modell Nr. 1 sei $s_F = 1$ und $s_A = 0$, und für Modell Nr. 2 sei $s_F = 0$ und $s_A = 1$. Der Gesamtschaden $1 - (1 - s_F) \cdot (1 - s_A)$ ist dann in beiden Modellen $s_{ges} = 1$, so dass auch für den mittleren Gesamtschaden $\overline{s_{ges}}^m = 1$ gilt (korrekter). Würde man aber die Einzelschäden vor der Berechnung von $\overline{s_{ges}}^m$ über die beiden Modelle mitteln, so erhielte man $\overline{s_F}^m = 0.5$ und $\overline{s_A}^m = 0.5$, voraus $\overline{s_{ges}}^m = 1 - (1 - 0.5) \cdot (1 - 0.5) = 0.75$ folgt.

Auch der Fehler für die *Gesamtkosten des Klimawandels* KK [Gleichung (4.198) bzw. (4.201)] und seine Veränderung darf nicht mit der *einfachen* Gauß’schen Fehlerrechnung bestimmt werden. Die Voraussetzung der Unabhängigkeit ist nämlich dort nicht mehr

¹⁹¹ Man beachte auch die Bemerkungen zu den Konfidenzintervallen von Größen, die Wahrscheinlichkeiten darstellen, auf Seite 106.

¹⁹² Siehe z. B. http://de.wikipedia.org/wiki/Fehlerfortpflanzung#Voneinander_unabh.C3.A4ngige_fehlerbehaftete_Gr.C3.B6.C3.9Fen.

gegeben, da die Schäden und “Kosten für Gegenmaßnahmen” nicht unabhängig sind. Die Gauß’sche Fehlerrechnung würde daher auf fehlerhafte Werte führen. Für diese Größen muss daher zwingend die oben zuerst angegebene Methode (**zuerst die Werte getrennt berechnen, dann mitteln**) verwendet werden.

4.12 Berechnung der Kosten des Klimawandels für den Obstbau

In den Abschnitten 4.7, 4.8.7, 4.9 und 4.10.13 wurden bereits die Kosten K_D (zur Bekämpfung der Schäden s_D durch Nichtbrechung der Dormanz), K_F (Kosten der Frostschutzberechnung zur Verhinderung von Frostschäden s_F), K_A (Kosten für die Bekämpfung der Schäden s_A durch den Apfelwickler) und K_{Bew} (Kosten für Sommerberechnung zur Reduzierung der Yield-Schäden s_Y) beschrieben. In den folgenden Abschnitten soll nun gezeigt werden, wie man die Gesamtkosten, die für die Bekämpfung aller Schäden anfallen, und die Kosten, die direkt durch die verbleibenden Restschäden anfallen, berechnen kann. Mit Hilfe dieser beiden Kostenanteile kann man dann die *Gesamtkosten des Klimawandels im Obstbau* abschätzen. Konkrete Ergebnisse für die in CHARIKO berücksichtigten Obstbaugebiete findet man in Kapitel 5.7 und Anhang K.

4.12.1 Gesamtkosten für Maßnahmen zur Reduzierung von Schäden

Auch wenn man bei der Berechnung des Gesamtschadens $1 - DF$ nach (4.183) nicht genau sagen kann, welchen Anteil die Einzelschäden s_i am Gesamtschaden haben, wird man bestrebt sein, die Gegenmaßnahmen so durchzuführen, dass jeder Einzelschaden minimiert wird. Man wird daher die verschiedenen Maßnahmen, sofern diese überhaupt nötig sind, gemeinsam (ggf. zeitlich versetzt) durchführen.

Die Gesamtkosten K_{ges} berechnen sich daher additiv als Summe über alle Schadensursachen i :

$$K_{ges} := \sum_i K_i \equiv \overline{K_{ges}}^x = \sum_i \overline{K_i}^x \quad (4.189)$$

Der Mittelungsstrich mit x in (4.189) bezeichnet z. B. das Mittel über eine bestimmte 30 Jahresperiode (0=1971-2000, 1=2002-2031, 2=2031-2060, 3=2071-2100).

Man beachte, dass bei dem einfachen Ansatz (4.189) die K_i nicht bezüglich des Gewinns optimiert¹⁹³ wurden. In der Regel wird man teure Maßnahmen, die wenig Nutzen bringen, auf ein Minimum beschränken usw.

Die Bekämpfungskosten K_i hängen nicht nur von der Schadensursache i , vom Gitterpunkt g und vom betrachteten Zeitraum x , sondern auch noch von der betrachteten Fruchtart/-sorte ab. Z. B. hängt K_F [Gleichung (4.122)] von der Anzahl der Frosttage n_F^0 (Sondermodus) ab, und diese Größe hängt von der Fruchtart ab (Tabellen im Anhang H.9). Die Kosten für Frostschutzberechnung pro Nacht und Hektar von 212 €/Nacht/ha wurden jedoch für alle Fruchtarten identisch angesetzt. Auch für die Kosten einer bestimmten Menge der Sommerberechnung [Gleichung (4.176)] wurde der feste Satz $BEWKosten=2.12 €/ha/mm$ kalkuliert. Die eigentliche Bewässerungsmenge \overline{BEW}^x hängt aber natürlich wieder von der Fruchtart ab (z. B. Tabelle J.7 bzw. J.8). Auch für

¹⁹³ In vielen, nicht allzu pathologischen Fällen wird die Vermeidung aller Schäden aber bereits den optimalen Gewinn bringen.

die Dormanzbrechungskosten von 232 €/ha/a in Gleichung (4.98) wurde keine Artenunterscheidung vorgenommen. Die dort benötigte Dormanznichtbrechungswahrscheinlichkeit (NoReleaseProb) P_D (Tabellen im Anhang G) hängt aber wiederum über C^* und die für verschiedene Obstarten unterschiedlich zu wählenden Obstanbaugitterpunkte von der Fruchtart ab. Die Apfelwicklerschäden und -bekämpfungskosten wurden in diesem Projekt nur für den Apfel berücksichtigt.

Weiterhin enthalten die hier diskutierten Maßnahmekosten, genauso wie die Kosten durch Schäden im nächsten Kapitel, keine durch Inflation bedingte Teuerungsrate, und auch Veränderungen der Kosten und Schäden durch technischen Fortschritt (verbesserte chemische und gentechnische Mittel, optimierte Anbautechniken etc.) werden hier vernachlässigt.

4.12.2 Kosten durch Schäden

Die Kosten K_i zur Vermeidung von Schäden sind etwas ganz anderes als der *finanzielle Schaden am Produkt*. Mit der Definitionen der Apfelfeuchtmassenproduktion aus Kapitel 4.10.11 kann man den **maximalen Verkaufswert *MaxWert*** des Produkts (der Jahresproduktion) (in € pro ha und a) als

$$\text{MaxWert} = \text{Fruchtpreis [in €/t]} \cdot \text{Fruchtertrag [in t/ha/a]} \quad (4.190)$$

ansetzen. *Fruchtertrag* ist hierbei die “Feuchtmassenproduktion ohne irgendwelche Schäden” (siehe Gleichung (4.173), beachte aber das am Ende von Abschnitt 4.10.11 auf Seite 159 Gesagte!).¹⁹⁴ Der *Fruchtpreis* ist der vom Erzeuger (vom Obstbauern) erzielte Nettopreis. Dieser beträgt häufig nur zwischen 25 % und 40 % des Endverbraucherpreises im Einzelhandel. Sowohl der *Fruchtpreis* als auch der *Fruchtertrag* hängen noch von der betrachteten Fruchtart/-sorte ab. Außerdem hängt der Fruchtprice (neben den starken marktwirtschaftlichen Schwankungen) auch noch stark von der Qualität (Klasse) des Obstes ab und davon, ob es sich um Tafelobst oder sogenanntes Verwertungsobst (Wirtschaftsobst) handelt, welches zur Safterzeugung, für die Fruchtzuckerproduktion oder z. B. für Bratäpfel verwendet wird. Verwertungsobst liefert nur ca. 30 % der Erträge von Tafelobst, allerdings sind die Produktionskosten auch geringer, da die Ernte rein maschinell erfolgen kann und weniger aufwendige Spritzungen notwendig sind. Bei den hier getätigten Kosten-Abschätzungen muss für den Fruchtprice daher ein vernünftig gewichteter Mittelwert benutzt werden, bei dem es sich aber trotzdem leider nur um eine grobe Schätzung handeln kann.

Werte für den *Fruchtertrag* kann man den Tabellen im Anhang J entnehmen [siehe die Tabellen für *Feuchtmassenertrag* mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung für 1971-2000; diese Werte müssen aber noch um den Faktor 1.1... 1.2 vergrößert werden, um Werte ohne jegliche Schäden zu erhalten (siehe Bemerkung auf Seite 159)].

Für den maximalen Verkaufswert *MaxWert*, den man pro Hektar und Jahr erzielen kann, wenn überhaupt keine Schäden auftreten, findet man z. B. für den spätreifen Apfel Werte zwischen 11 000 und 17 000 €/ha/a. Dabei wurde von folgenden Schätzungen ausgegangen: Apfelprice = 300... 450 €/t¹⁹⁵ und mittlere Apfelfeuchtmassenproduktion =

¹⁹⁴ Beim Yieldschaden s_Y bedeutet “kein Schaden”, dass gerade der mittlere Ertrag des Zeitraums 1971-2000 bei optimaler Bewässerung erwirtschaftet wird [Gleichung (4.174)].

¹⁹⁵ Mit starken zeitlichen Schwankungen und Variationen zwischen verschiedenen Güteklassen und Sorten; siehe z. B. <http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/pb/MLR.LEL,Lde/Startseite/Markt+und+Ernaehrung+mit+Landesstelle/Aepfel>.

38 t/ha/a [= gerundeter Wert aus Tabelle J.12 für die Modellmittelwerte (1971-2000) mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung, multipliziert mit dem Faktor 1.15 (um den Wert ohne jegliche Schäden zu erhalten; siehe oben)]. Damit folgt aus Gleichung (4.190), dass für den spätreifen Apfel $MaxWert = 11\ 400 \dots 17\ 100$ €/ha/a beträgt. Den konkret bei den Kostenrechnungen verwendeten Wert und Zahlenangaben für die anderen Fruchtarten und -sorten findet man in Tabelle 4.26.

Der **finanzielle Schaden Ertragsausfall am Produkt** berechnet sich aus $MaxWert$ als

$$Ertragsausfall = MaxWert \cdot s_{ges}. \quad (4.191)$$

Ist der Gesamtschaden $s_{ges} = 1$, so hat man einen Schaden von $MaxWert$ (das gesamte Produkt ist dann zerstört).

Normalerweise hängt der Fruchtpreis auch vom *Angebot* (bzw. der Erntemenge und Fruchtqualität) ab und steigt, wenn große Schäden die Ernte reduzieren. Trotzdem wird $MaxWert$ hier als zeitlich konstante Größe betrachtet. Siehe hierzu die Begründungen auf Seite 176.

4.12.3 Rentabilität von Maßnahmen

Die Rentabilität von Maßnahmen sei hier am Beispiel der Bekämpfung des Apfelwicklers demonstriert. Die Ergebnisse können aber direkt auf andere Schäden und Maßnahmen übertragen werden.

In Tabelle 4.18 sind verschiedene Ertragsschäden, die der Apfelwickler verursachen kann, wenn keine Maßnahmen gegen ihn getroffen werden (s_A^o), und wenn man ihn mit Maßnahmen bekämpft (s_A^m) sowie für die Kosten der Maßnahmen (K_A^m) aufgelistet. Der Index m kann hier die Werte "int" für die intensive Methode oder "ext" für die extensive Methode annehmen. Die Kosten für keine Maßnahmen (K_A^o) sind null. Die Größe dieser Schäden und Kosten hängt davon ab, welchen Wert der Generationsindex I_A im betrachteten Jahr annimmt.

Der Ertragsausfall $Ertragsausfall^m$ durch Restschäden (Superskript "m" = mit bzw. trotz Maßnahmen) berechnet sich gemäß (4.192), hier angewendet auf den Teilschaden s_A und nicht auf den Gesamtschaden s_{ges} , zu

$$Ertragsausfall^m = s_A^m \cdot MaxWert. \quad (4.192)$$

Der Gewinn, den man durch Ergreifen von Maßnahmen gegenüber dem Fall ohne Maßnahmen erzielt (bzw. der Verlust LOST gegenüber dem Fall mit Maßnahmen, wenn man keine Apfelwicklerbekämpfung betreibt), berechnet sich nach

$$LOST = (s_A^o - s_A^m) \cdot MaxWert. \quad (4.193)$$

Falls die Kosten K_A^m der Maßnahme (wenigstens im zeitlichen Mittel) geringer sind als der (Ertrags-)Gewinn $LOST$ durch die Maßnahme ($K_A^m < LOST$), so ist die Maßnahme rentabel:

$$K_A^m < [LOST = (s_A^o - s_A^m) \cdot MaxWert] \Rightarrow \text{rentabel}. \quad (4.194)$$

Der Nettogewinn durch die Maßnahme errechnet sich zu $LOST - K_A^m$.

Vergleicht man zwei verschiedene Methoden (A und B) miteinander, so muss man anstelle von K_i^m die Differenz ($K_i^B - K_i^A$) der Kosten beider Methoden verwenden, wenn

man Rentabilitätsrechnungen anstellen möchte. Folglich gilt dann

$$K_i^B - K_i^A < [LOST = (s_i^A - s_i^B) \cdot MaxWert] \Rightarrow \text{rentabel} \quad (4.195)$$

und

$$Nettogewinn(\text{durch B gegenüber A}) = (s_i^A - s_i^B) \cdot MaxWert - (K_i^B - K_i^A). \quad (4.196)$$

Der Index i bezeichnet wieder die Schadensform (D, F, A, Y oder **gesamt**). Beide Werte von s bzw. K beziehen sich hier jeweils auf den gleichen Zeitraum (z. B. denselben 30-Jahreszeitraum).

Man rechnet mit Hilfe der Gleichung (4.196) leicht nach, dass die in Tabelle 4.18 angegebenen Apfelwicklerschäden und -Bekämpfungskosten rentabel sind (gegenüber einer Nichtbehandlung), und dass die intensive Methode im Fall $I_A > 1$ einen größeren Nettogewinn erwirtschaftet als die extensive Methode.

Man muss bei diesen Abschätzungen aber beachten, dass diese Rentabilitätsrechnung (für z. B. den Apfelwickler) nur korrekt ist, wenn keine anderen Schäden am Apfel "vor" den Apfelwicklerschäden auftreten. Wurden die Äpfel aber z. B. durch Frost bereits fast vollständig vernichtet, so ist auch bei einer perfekten Apfelwicklerbekämpfung der Gewinn nur noch minimal, und die Kosten für die Maßnahme, die ja gleich bleiben, werden größer sein als der sehr kleine Gewinn. Das bedeutet, dass der *Nettogewinn* durch Maßnahmen "bei *geordneten* Schäden"¹⁹⁶ (ss_i) (vgl. Abschnitt 4.11.3) immer gleich oder kleiner als bei *alleinigen* Schäden (s_i) (vgl. Abschnitt 4.11.1) ist!

4.12.4 Gesamtkosten des Klimawandels und Gewinn durch Anpassungsmaßnahmen

Die durch den Klimawandel verursachten Gesamtkosten im Obstbau hängen stark davon ab, welche Maßnahmen bzw. Methoden man zur Schadensminimierung einsetzt. Die benutzte Strategie kann sich im Laufe der Zeit ändern, wenn die Schäden einer bestimmten Art zunehmen. So wird man z. B. heutzutage den Apfelwickler nicht so intensiv bekämpfen wie in der fernen Zukunft, in welcher der Befallsdruck wegen der ansteigenden Generationsanzahl zunehmen wird. Die Nichtbrechung der Dormanz, die in der Gegenwart noch keine Problem darstellt, wird natürlich auch erst in der Zukunft bekämpft werden, sofern das überhaupt nötig ist.

In CHARIKO wurden insgesamt vier Schadensvermeidungsstrategien untersucht:

1. Bei der "**o**"-Strategie (o = ohne) wird keinerlei Schadensvermeidung durchgeführt. Diese Strategie führt zu den höchsten Schadens- und Kostenwerten.
2. Bei der "**w**"-Strategie (w = mit **w**enigen Maßnahmen) wird hingegen davon ausgegangen, dass der Obstbauer zumindest den Apfelwickler mit einer relativ preiswerten Methode (der hier *extensiv* genannten Methode) bekämpft. Weiterhin wird angenommen, dass der Bauer keine Möglichkeit für Sommer- und Frostschutzberegnung besitzt und er auch keine Bekämpfung der Dormanz durchgeföhrt.
3. Bei der "**g**"-Strategie (g = mit **g**emäßigten Maßnahmen) wird der Apfelwickler wie bei der "w"-Strategie extensiv bekämpft. Zusätzlich wird aber bei Bedarf auch

¹⁹⁶ Bei denen Vorschäden auftreten können.

Sommerberechnung durchgeführt. Gegen die Nichtbrechung der Dormanz und gegen Frostschäden werden keine Maßnahmen getroffen.

4. Bei der **“v”-Strategie** (v = mit vielen Maßnahmen) wird der Apfelwickler wie bei der **“g”-Strategie** extensiv bekämpft. Auch die Sommerberechnung wird bei Bedarf angewendet. Zusätzlich wird aber, wenn nötig, auch Frostschutzberechnung durchgeführt. Gegen die Nichtbrechung der Dormanz werden keine Maßnahmen getroffen.
5. Bei der **“m”-Strategie** (m = mit allen Maßnahmen) werden optimale Maßnahmen gegen alle hier betrachteten Schäden (Nichtbrechung der Dormanz, Spätfrost, Apfelwickler und Trockenheit) getroffen. Gegen den Apfelwickler wird die teurere, aber effektivere *intensive* Methode eingesetzt.

Man beachte aber, dass der Apfelwicklerschaden und seine Bekämpfung bei den in dieser Arbeit vorgenommenen Kosten- und Schadensrechnungen nur beim Apfel berücksichtigt wird.

In **Tabelle 4.24** sind die Schäden unterschiedlicher Ursache, die in den verschiedenen Strategien auftreten können, gelistet. s_x^y bezeichnet den Schaden, der durch die Schadensursache x eintritt, wenn man die Maßnahme y durchführt. Ist kein Wert für y angegeben, so ist der Schaden gemeint, der ohne entsprechende Gegenmaßnahme auftritt. “0” bedeutet, dass der Schaden bei der entsprechenden Strategie durch die durchgeführten Maßnahmen vollständig verhindert wird. s_Y^o und s_D^o bezeichnen den Yieldschaden und den Dormanzschaden, der ohne Sommerberechnung bzw. ohne Einsatz von Dormanz brechenden Mitteln auftritt. s_Y^m und s_D^m kennzeichnen die kleineren Restschäden (oder sogar Gewinne), die mit Sommerberechnung bzw. mit Einsatz von Dormanz brechenden Mitteln auftreten. Zusätzlich muss man bei *Yield* noch unterscheiden, ob mit oder ohne CO₂-Düngung gerechnet wurde.

Tabelle 4.24: Schäden verschiedener Ursache, die in den unterschiedlichen Bekämpfungs-Strategien auftreten, bzw. deren Bezeichnungen.

Schadensursache	Strategie				
	o	w	g	v	m
Dormanz	s_D^o	s_D^o	s_D^o	s_D^o	s_D^m
Frost	s_F	s_F	s_F	0	0
Apfelwickler	s_A^o	s_A^{ext}	s_A^{ext}	s_A^{ext}	s_A^{int}
Yield	s_Y^o	s_Y^o	s_Y^m	s_Y^m	s_Y^m

Die Kosten zur Minimierung der Schäden in den unterschiedlichen Strategien sind in **Tabelle 4.25** gelistet.

Bei den Kostenberechnungen unterscheiden sich die Ergebnisse der v- und m-Strategie im Allgemeinen nur wenig, da die Dormanzschäden fast immer vernachlässigbar sind und die *Differenz* zwischen extensiver und intensiver Apfelwicklerbekämpfung nicht so entscheidend in die Gesamtkosten eingeht. Allerdings werden die Unterschiede zwischen der v- und m-Strategie bei Rechnungen mit dem *Worst Case Szenario* (siehe Abschnitt 4.13) wieder spürbar, da sich dann die Dormanzschäden und -Kosten in beiden Strategien stark¹⁹⁷

¹⁹⁷ Zumindest dann, wenn die Nichtbrechungswahrscheinlichkeit *NoReleaseProb* größere Werte (z. B. 20%) annimmt.

Tabelle 4.25: Kosten für die Minimierung von Schäden verschiedener Ursache, die in den unterschiedlichen Bekämpfungs-Strategien auftreten, bzw. deren Bezeichnungen.

Schadensursache	Strategie				
	o	w	g	v	m
Dormanz	0	0	0	0	K_D
Frost	0	0	0	K_F	K_F
Apfelwickler	0	K_A^{ext}	K_A^{ext}	K_A^{ext}	K_A^{int}
Yield	0	0	K_{BEW}	K_{BEW}	K_{BEW}

unterscheiden¹⁹⁸.

Im Folgenden wird immer eine Kombination “B-A” von zwei Strategien betrachtet: Die Strategie B wird nach dem Jahr 2000 eingesetzt, die Strategie A wird in allen Jahren vor dem Jahr 2001 angewandt. Strategie “m-g” bedeutet z. B., dass vor 2001 die “g”-Strategie und ab 2001 die “m”-Strategie angewendet wird. “o-o” bedeutet, dass in allen Jahren (vor und nach 2001 sowie im Jahr 2001) die “o”-Strategie *gefahren* wird. Und in der g-g-Strategie wird vor und nach sowie im Jahr 2001 die “g”-Strategie angewendet.

Bei der “B-A”-Strategie muss man für den Zeitraum 1971-2000 die Schäden und Kosten der “A”-Strategie und danach die der “B”-Strategie verwenden. Den Gesamtschaden s_{ges} für eine bestimmte Strategie findet man mit Hilfe von Gleichung (4.187) und die Gesamtkosten K_{ges} mit Hilfe von Gleichung (4.189), indem man die in den Tabellen 4.24 und 4.25 gelisteten Werte für s_j bzw. K_i dort einsetzt.¹⁹⁹

Ähnlich wie in Formel (4.196) kann man die flächenspezifischen **Gesamtkosten** KK_g^{B-A} (in €/ha/a) des Klimawandels für einen Gitterpunkt g berechnen. Für die Gesamtkosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen, die man in einem einzelnen Jahr j gegenüber dem Mittelwert im Zeitraum 1971-2000 mehr aufbringen muss,²⁰⁰ gilt

$$KK_{g;j}^{B-A}(j) := \left(s_{ges,g}^B(j) - \overline{s_{ges,g}^A}^0 \right) \cdot MaxWert + \left(K_{ges,g}^B(j) - \overline{K_{ges,g}^A}^0 \right) \quad 201, \quad (4.197)$$

und im Mittel über die Zeitspanne x muss man diesen Betrag

$$KK_g^{B-A}(x) := \overline{KK_g^{B-A}(j)}^x = \underbrace{\left(\overline{s_{ges,g}^B}^x - \overline{s_{ges,g}^A}^0 \right) \cdot MaxWert}_{\text{Schadensanteil}} + \underbrace{\left(\overline{K_{ges,g}^B}^x - \overline{K_{ges,g}^A}^0 \right)}_{\text{Maßnahmeanteil}}. \quad (4.198)$$

pro Jahr und Hektar mehr aufbringen. Im Gegensatz zu (4.196) beziehen sich die beiden Gesamtschäden s_{ges} und Gesamtbekämpfungskosten K_{ges} hier nicht auf den gleichen Zeitraum, sondern auf die unterschiedlichen Zeiträume x (z. B. 2071-2100) und 0 (1971-2000).²⁰² Das wird durch die entsprechenden Mittelungsbalken ausgedrückt. Der Hochindex “B” bzw. “A” bezeichnet die bei der Schadensbekämpfung verwendete Strategie

¹⁹⁸ Bei der m-Strategie werden die Dormanzschäden bekämpft, bei der v-Strategie nicht.

¹⁹⁹ In beiden Gleichungen ist für s_j bzw. K_i null einzusetzen, wenn die entsprechende Strategie für die Schadensursache diesen Wert in den Tabellen vorschreibt. K_Y ist mit K_{BEW} identisch!

²⁰⁰ Die folgende Gleichung für jährliche Kosten wird z. B. zur Berechnung der Standardabweichung von KK und zur Berechnung der über die Jahre 2002 bis 2100 auflaufenden akkumulativen Kosten verwendet.

²⁰¹ “:=” bedeutet, dass die linke Seite durch die rechte Seite definiert wird; “=” bedeutet, dass die rechte Seite durch die linke Seite definiert wird!

²⁰² Das Vorzeichen vor dem Maßnahmekostenterm in (4.198) wurde auf “+” gesetzt, da die Reihenfolge der K 's im Gegensatz zu (4.196) vertauscht wurde.

ab 2001 bzw. im Zeitraum 1971-2000 (siehe oben). Für $j < 2001$ bzw. $x = 0$ muss man die Strategie B in den obigen Gleichungen durch die Strategie A ersetzen, so dass dann $KK_g^{B-A}(0) = 0$ gilt.

$\overline{s_{ges,g}^B}^x$ in (4.198) ist der mittlere Gesamtschaden durch Nichtbrechung der Dormanz D , durch Frost F , durch Apfelwickler A und "Yield" Y im Gitterpunkt g in der "Tripel"-Dekade x bei Anwendung der Schadensvermeidungsstrategie "B". $\overline{s_{ges,g}^A}^0$ ist genauso definiert, nur erstreckt sich der zeitliche Mittelwert nicht über den 30-jährigen Zeitraum x , sondern über die "Tripel"-Dekade 1971-2000.

Der erste Term ist die Änderung des Ertragsverlustes in €/ha/a zwischen Zukunft ("Tripel"-Dekade x) und Gegenwart ($0 = 1971-2000$). Der zweite Term ist die Differenz der Kosten für Bekämpfungsmaßnahmen zwischen Zeitraum x und 0. $KK_g^{B-A}(x)$ sind folglich die zusätzlichen Verluste und Kosten, die in der "Tripel"-Dekade x verglichen mit der Gegenwart auf Grund des Klimawandels anfallen, wenn man in der Gegenwart die Strategie A und in der Zukunft die "B"-Strategie anwendet.

Normalerweise steigt der Fruchtprice in €/t, wenn in einem Jahr große Schäden an den Früchten auftreten und die Früchte knapp werden. Dadurch steigt dann auch der maximale Verkaufswert $MaxWert$ in €/ha/a [siehe Gleichung (4.190)] an, und das bedeutet, dass eine positive Korrelation zwischen s_{ges} und $MaxWert$ besteht. In diesem Fall müsste man Gleichung (4.197) wie folgt verallgemeinern:

$$KK_{g;j}^{B-A}(j) := \left[\left(s_{ges,g}^B(j) - 1 \right) \cdot MaxWert^B(j) - \left(\overline{s_{ges,g}^A}^0 - 1 \right) \cdot MaxWert^A \right] + \left(K_{ges,g}^B(j) - \overline{K_{ges,g}^A}^0 \right) \quad (\text{falls } MaxWert \text{ von } s_{ges} \text{ abhängt}). \quad (4.199)$$

Bei einer Mittelung über die Jahre j einer 30-Jahresperiode darf man, wenn man die resultierende Gleichung wieder wie Formel (4.198) mit Hilfe von gemittelten Gesamtschäden und mittleren Werten von $Maxwert$ formulieren möchte, den dabei auftretenden Kovarianzterm zwischen $s_{ges}(j)$ und $Maxwert(j)$ nicht vernachlässigen.²⁰³ In dieser Arbeit wurde aber für $MaxWert$ ein konstanter, von s_{ges} unabhängiger Wert angenommen. Das ist z. B. korrekt, wenn Ausfälle in einem bestimmten Gebiet durch Importe aus anderen in- oder ausländischen Gebieten wettgemacht werden können. Speziell bei Anwendung der m-Strategie sind die Schäden auch nicht so groß, dass dadurch die Marktpreise erheblich beeinflusst werden sollten (siehe z. B. Abbildung 5.66).

Bei der Verwendung von Gleichung (4.197) zur Berechnung von Varianzen bzw. Konfidenzintervallen von KK_g^{B-A} ²⁰⁴ wurden $\overline{s_{ges,g}^A}^0$ und $\overline{K_{ges,g}^A}^0$ ähnlich wie beim Yieldschaden (vgl. die Diskussion auf Seite 160) als feste Normierungskonstanten aufgefasst. Das hat wie beim Yieldschaden zur Konsequenz, dass $\overline{KK_{g;j}^{B-A}}^0 =: \overline{KK_g^{B-A}}^0 = KK_g^{B-A}(0) \equiv 0$ Varianzen größer null hat und die Konfidenzintervalle der Differenzen von Zeitmittelwerten, z. B. von $\left(\overline{KK_g^{B-A}}^3 - \overline{KK_g^{B-A}}^0 \right)$, größer sind als die von $\overline{KK_g^{B-A}}^3$ (das Subskript "3" steht hier für den Zeitraum 2071-2100).

²⁰³ Im Extremfall einer entarteten Marktwirtschaft könnten sich die Preise sogar so verhalten, dass der Gesamtverkaufswert $(1 - s_{ges,g}^Y) \cdot MaxWert^Y$ unabhängig vom Schaden $s_{ges,g}^Y$ einen konstanten Wert behält. In diesem Fall wäre es wirtschaftlich (aber nicht ethisch) sinnvoll, wenn man überhaupt keine Gegenmaßnahmen ergreifen würde, denn diese würden nur zusätzliche Kosten $K_{ges,g}^Y$ verursachen, aber nichts am zu erzielenden Gesamtverkaufserlös [$Fruchtpreis \cdot Fruchtertrag \cdot (1 - s_{ges,g}^Y)$]; vgl. Gleichungen (4.190) und (4.191)] ändern.

²⁰⁴ Das Argument x bzw. j wird im Folgenden der Einfachheit halber weggelassen.

Die Änderung der Gesamtschäden ΔS^{B-A} , für die in Kapitel 5.7 Ergebnisse dargestellt werden, zwischen den Zeiträumen x und 0 ist wie folgt definiert:

$$\Delta S^{B-A}(x) = \left(\overline{s_{ges,g}^B}^x - \overline{s_{ges,g}^A}^0 \right). \quad (4.200)$$

Die Gesamt-Kosten KKK^{B-A} (in €/a) des Klimawandels für ganz Hessen [d. h. für alle 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen (bzw. die 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeergitterpunkte)] erhält man durch Aufsummation von (4.198) über diese Gitterpunkte, nachdem man (4.198) mit der jeweiligen Teilfläche A_g , in der tatsächlich Obst innerhalb des Gitterpunkts g angebaut wird, multipliziert hat^{205 206}:

$$\begin{aligned} KKA^{B-A}(x) &:= \sum_{g=1}^{19} KK_g^{B-A} \cdot A_g \\ &= \underbrace{\sum_{g=1}^{19} \left(\overline{s_{ges,g}^B}^x - \overline{s_{ges,g}^A}^0 \right) \cdot MaxWert \cdot A_g}_{\text{Schadensanteil}} + \underbrace{\sum_{g=1}^{19} \left(\overline{K_{ges,g}^B}^x - \overline{K_{ges,g}^A}^0 \right) \cdot A_g}_{\text{Maßnahmeanteil}}. \end{aligned} \quad (4.201)$$

Diese Größe hängt natürlich wieder vom betrachteten Zeitintervall x bzw. Jahr j ab. Wenn die mittlere Anbaudichte ρ_g (bzw. Standdichte; z. B. in Anzahl der Bäume pro Fläche) und der Anteil $A_{Obst,g}/A_{gitt}$ der Gitterpunktsfläche (bzw. die Fläche $A_{Obst,g}$), in der tatsächlich die betrachtete Obstart angebaut wird, innerhalb jedes Gitterpunkts g bekannt ist, so kann man A_g wie folgt berechnen:

$$A_g := \frac{\rho_g}{\rho_{SIM}} \cdot \frac{A_{Obst,g}}{A_{gitt}} \cdot A_{gitt}. \quad (4.202)$$

ρ_{SIM} ist wieder die implizit in SIMWASER vorgegebene ‘‘Standdichte’’ [vgl. Abschnitt 4.10.11; wenn die Standdichte bereits in c_{Ernte} berücksichtigt wurde, so muss man den ρ_g/ρ_{SIM} -Term in A_g bei der Multiplikation mit $MaxWert$ in (4.201) weglassen, da dieser Term dann bereits in $MaxWert$ (Gleichung (4.190) mit (4.173)) enthalten ist]. Aus A_g kann man leicht die Gesamtanbaufläche A (mit Berücksichtigung der Standdichte) berechnen:

$$A := \sum_{g=1}^{19} A_g. \quad (4.203)$$

Kennt man, wie in diesem Projekt, die Standdichte ρ_g bzw. die Anbaufläche A_g innerhalb der Gitterpunkte nicht ausreichend genau, so muss man alternativ und in grober Approximation die Gleichung (4.198) mit Gebietsmittelwerten von s_{ges} und K_{ges} schreiben (bzw. über die Obstanbaugebietsgitterpunkte arithmetisch mitteln) und mit der Gesamt-

²⁰⁵ Bei der 0.2°-Auflösung gilt für die Fläche eines Gitterpunkte in Hessen: $A_{gitt} \approx 313.5 \text{ km}^2$. Diese Fläche ist aber natürlich nur zu einem kleinen Teil mit Obst bebaut (siehe Kapitel 4.5), so dass $A_g \ll A_{gitt}$ gilt!

²⁰⁶ Da der Ausdruck KK_g^{B-A} Terme enthält, die über unterschiedliche Zeiträume gemittelt werden, müsste man eigentlich jeden dieser Terme mit der jeweils in diesem Zeitraum t genutzten Anbaufläche $A_g(t)$ multiplizieren. Hier wird aber angenommen, dass die Anbauflächen zeitlich einigermaßen konstant bleiben.

obstanbaufläche A (diesmal ohne Berücksichtigung der Standdichte²⁰⁷: $A := \sum_g A_{Obst,g}$) multiplizieren:

$$KKA^{B-A} = \overline{KK_g^{B-A}}^g \cdot A =: KK^{B-A} \cdot A. \quad (4.204)$$

Die $\overline{KK_g^{B-A}}^g$ werden im Folgenden auch einfacher mit KK^{B-A} bezeichnet.

Schließlich kann man den Gewinn, den man in der “Tripel”-Dekade x dadurch erzielt, dass man die “B”-Strategie anstelle der “A”-Strategie fährt, berechnen [vgl. auch (4.196); hier bezieht sich der Gewinn aber nicht auf die Flächeneinheit, sondern die gesamte Obstanbaufläche]:

$$\begin{aligned} \text{Nettogewinn}^{B-A}(x) &:= (KKA^{A-A} - KKA^{B-A}) \\ &= [(4.201) \text{ mit } B \rightsquigarrow A] - (4.201) = \\ &= \sum_{g=1}^{19} \left[\left(s_{ges,g}^A x - s_{ges,g}^B x \right) \cdot \text{MaxWert} + \left(K_{ges,g}^A x - K_{ges,g}^B x \right) \right] \cdot A_g \\ &\approx \left(\overline{KK_g^{A-A}}(x)^g - \overline{KK_g^{B-A}}(x)^g \right) \cdot A. \end{aligned} \quad (4.205)$$

Man beachte, dass sich alle zeitlichen Mittel in (4.205) über den gleichen Zeitraum x (in der Zukunft) erstrecken und sich der Nettogewinn daher nur auf diese Zeitspanne bezieht. Die Klimakosten KK^{B-A} bzw. KKA^{B-A} in (4.197) bis (4.204) beziehen sich immer auf die Differenz, die zwischen dem Zeitraum x (Zukunft) und 0 (Gegenwart) auftritt. In den Gleichungen für den Nettogewinn [Gleichung (4.205) und (4.206)] wurde nicht wie in den Formeln (4.198) bzw. (4.197) für KK^{B-A} die Strategie B durch die Strategie A ersetzt, wenn $x = 0$ bzw. $j < 2001$ gewählt wurde.²⁰⁸ Man kann daher auch die Rentabilität im Zeitraum 1971-2000 mit diesen Gleichungen abschätzen.

Die Gleichung (4.205) kann auch für Jahreswerte (Jahr j) anstelle für 30-jährige Mittelwerte formuliert werden:

$$\begin{aligned} \text{Nettogewinn}^{B-A}(j) &:= \sum_{g=1}^{19} \left[\left(s_{ges,g}^A(j) - s_{ges,g}^B(j) \right) \cdot \text{MaxWert} \right. \\ &\quad \left. + \left(K_{ges,g}^A(j) - K_{ges,g}^B(j) \right) \right] \cdot A_g \\ &\approx \left(\overline{KK_{g;j}^{A-A}}(j)^g - \overline{KK_{g;j}^{B-A}}(j)^g \right) \cdot A. \end{aligned} \quad (4.206)$$

Wenn man nicht die Gesamtkosten pro Hektar für das gesamte Obstanbaugebiet, sondern nur pro Fläche (z. B. pro Hektar) berechnen möchte, so muss man anstelle von KKA^{B-A} die Werte von $KK^{B-A} := \overline{KK_g^{B-A}}^g$ betrachten.

Die über z. B. den Zeitraum 2002-2100 insgesamt anfallenden (akkumulierten) Zusatzkosten (bzw. Nettogewinne) für die Strategie “B-A” findet man, indem man die jährlichen

²⁰⁷ Wie gerade erwähnt wurde, ist die Standdichte u. U. bereits in c_{Ernte} [Gleichung (4.173)] berücksichtigt (kleinere Standdichte \rightarrow kleinerer Fruchtertrag pro Fläche, aber dann eventuell größere Obstanbaufläche). — Bei z. B. Streuobstwiesen ist es aber fraglich, ob sich die Maßnahmekosten [zweiter Term von (4.198), der mit A multipliziert wird] weiterhin proportional zur benutzten Streuobstfläche A verhalten, da in diesem Fall auch die relativ große, zwischen den Obstbäumen befindliche Fläche von den Maßnahmen betroffen wäre.

²⁰⁸ Bei KK^{B-A} interessiert insbesondere die Differenz zwischen den Zeiträumen 2071-2100 (mit Strategie B) und 1971-2000 (mit Strategie A). Daher wurde bei KK^{B-A} für 1971-2000 “B durch A ersetzt”. Beim Nettogewinn^{B-A} interessiert aber eher der Wert innerhalb eines bestimmten Zeitraums. Dieser Wert ist bereits die Differenz zwischen beiden Strategien.

Werte aus Gleichung (4.197) (evtl. noch vorher über das Gebiet gemittelt und mit der Gesamtoflanbaufläche multipliziert) [bzw. aus Formel (4.206)] über die Jahre 2002...2100 aufsummiert.

Um das Konfidenzintervall dieser aufsummierten Größe zu berechnen, wurde die Summe für jedes der M verwendeten Klimamodelle getrennt berechnet. Aus diesen M Werten konnte dann die Standardabweichung s_{akk} mit der gebräuchlichen Formel geschätzt werden. Hieraus folgt dann leicht ähnlich wie in Gleichung (4.28) das 95 %-Konfidenzintervall:

$$\text{Konf}(95\%) = \pm t_{(M-1),97.5\%} \cdot s_{akk}. \quad (4.207)$$

Die **Tabelle 4.26** listet die zur Kostenberechnung notwendigen Parameter *MaxWert* und die Gesamtanbaufläche A in Hessen als Funktion der Obstart. Der Vollständigkeit halber wurden auch die zur Berechnung von *MaxWert* benötigten Parameter *Fruchtpreis* und *Fruchtertrag* aus Formel (4.190) aufgeführt. Der hier gelistete Fruchtertrag bezieht sich auf Erträge vollkommen ohne Schaden. Um eine grobe Näherung für diese Werte zu erhalten, wurden die DWD-Werte (1971-2000) der Tabellen J.1, J.12, ... mit 1.15 multipliziert.

Tabelle 4.26: Bei den Kostenberechnungen verwendeter Fruchtpreis, Fruchtertrag, *MaxWert* und Anbaufläche als Funktion der Fruchtart. Die Werte in runden Klammern geben den Prozentsatz der Anbaufläche an, die für Verwertungsobst benutzt wird.

Obstart	Fruchtpreis ^a [€/t]	Fruchtertrag ^b [t/ha/Saison]	<i>MaxWert</i> ^c [€/ha/Saison]	Anbaufläche A^d [ha]	[%]
Apfel früh	350	35.3	12355	248	(36)
Apfel spät	350	38.1	13335	102	(36)
Sauerkirsche	500 ^e	9.2	4600	59	(88)
Süßkirsche früh	2000	6.7	13400	55 ^f	(9)
Süßkirsche spät	2000	7.0	14000	90	(9)
Birne früh	500	18.4	9200	15 ^g	(26)
Birne spät	500	19.2	9600	20	(26)
Wein ^h	750	12.9	9675	3590 ⁱ	
Pflaume früh	400 ^j	12.0	4800	20 ^k	(60)
Pflaume spät	400 ^l	13.2	5280	40	(60)

^a Verkaufspreis, den der Obstbauer im Mittel über alle Güteklassen inkl. Verwertungsobst erzielt.

^b Mittlerer Fruchtertrag für den Zeitraum "1971-2000" OHNE Frost-, Apfelwickler-, Hagel- und Trockenstressschäden = DWD-Wert aus den Tabellen J.1, J.12, ..., multipliziert mit 1.15.; vgl. auch die Diskussion in Kapitel 4.10.11 auf Seite 158.

^c Nach Formel (4.190) berechnet: $\text{MaxWert} = \text{Fruchtpreis} \cdot \text{Fruchtertrag}$.

^d Nach Formel (4.203) berechnet.

^e Sehr hoher Verwertungsobstanteil!

^f Die Aufteilung der Fläche auf den früh- und spätreifen Anteil ist unsicher!

^g Die Aufteilung der Fläche auf den früh- und spätreifen Anteil ist unsicher!

^h Preis für die Weintrauben, die für die Weinproduktion verwendet werden (Keltertrauben), im Mittel über alle Qualitätsstufen.

ⁱ Gesamtes Gebiet der Hessischen Bergstraße und des Rheingaus.

^j Hoher Verwertungsobstanteil!

^k Die Aufteilung der Fläche auf den früh- und spätreifen Anteil ist unsicher!

^l Hoher Verwertungsobstanteil!

Die Daten der Tabelle 4.26 wurden u. a. der *Baumobstanbauerhebung* (Hessisches Statistisches Landesamt, 2012), dem *BLE-Marktbericht Obst und Gemüse 30* (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2011)²⁰⁹, dem *Infodienst Landwirtschaft - Ernährung - Ländlicher Raum* [<https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/MLR.LEL,Lde/Startseite/Laendlicher+Raum>], dem *Marktbericht für die Obstregion Bodensee* [<http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/pb/,Lde/Startseite> (suche "LEL Marktbericht" im Suchfeld)], dem *Landinfo Heft 2/2010 (Sonderkulturen)* [<http://www.lel-bw.de/pb/,Lde/646855> (suche Beitrag von "Dr. Jürgen Oberhofer, DLR Rheinpfalz" im *Inhalt*)], der *Bundesanstalt für Agrarwirtschaft, Statistik Austria* [http://www.ama.at/Portal.Node/ama/public?genetics.rm=PCP&genetics.pm=gti_full&p.contentid=10008.103207&01_ZEITREIHE_OBST_AT.pdf], den Kenndatenblättern für die Hessische Bergstraße und den Rheingau [http://www.rp-darmstadt.hessen.de/irj/RPDA_Internet?cid=7b792dbb469d0e2474ee5fa93effaea7] und der *Markt Bilanz Obst 2013* des AMI (Agrarmarkt Informations-Gesellschaft mbH) [<http://www.ami-informiert.de>] entnommen. Die Anbauflächen nahmen in Hessen für einige Fruchtarten vor 2002 stark ab (siehe Jacob & Koch, 2005). Um realistische Kostenschätzungen zu erhalten, wurden nicht die mittleren Werte für 1971-2000, sondern eher die mittleren Werte für 2002-2012 aus Jacob & Koch (2005) und vom Hessisches Statistisches Landesamt (2012) verwendet. Die Angaben über den relativen Anteil der Flächen, die für Verwertungsobst benutzt werden (in der Tabelle in runden Klammern angegeben), wurden ebenfalls aus der zuletzt genannten Publikation entnommen. Die aufgeführten Fruchtpreise sind mit den Anteilen von Tafelobst und Verwertungsobst gewichtete Mittelwerte. Wenn keine konkreten Angaben zu den Verwertungsobstpreisen vorlagen, wurden 30 % des Tafelobstpreises als Verwertungsobstpreis angenommen.

Beim Wein wurden z. T. die Ertragsangaben in Hektolitern (die man z. B. auf [http://de.wikipedia.org/wiki/Rheingau_\(Weinbaugebiet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Rheingau_(Weinbaugebiet)) und auf [http://de.wikipedia.org/wiki/Hessische_Bergstraße](http://de.wikipedia.org/wiki/Hessische_Bergstra%C3%9Fe) findet) in Tonnen Trauben umgerechnet, in dem die Maßzahl mit 0.133 multipliziert wurde ($1 \text{ l} \hat{=} 1.33 \text{ kg}$).

Alle in der Tabelle aufgeführten Werte streuen sowohl von Quelle zu Quelle als auch von Jahr zu Jahr sehr stark und besitzen manchmal (wie die Flächen) auch noch einen ausgeprägten Trend²¹⁰. Da in dieser Arbeit nur klimatische und keine ökonomischen Einflüsse auf die Kosten und Erträge berücksichtigt werden können, wird angenommen, dass die Flächen und Preise, die hier einigermaßen repräsentativ für 2002-2012 gewählt wurden, auch in Zukunft approximativ konstant bleiben. Mögliche Inflationsraten u. ä. wurden nicht berücksichtigt. Die aktuellen Erträge²¹¹ können sich aber im Laufe der Zeit durch die verschiedenen, in diesem Projekt berechneten Schäden verändern. Auch ein Zuwachs der Erträge ist durch die Yield-Schäden s_Y , die auch negativ werden können, möglich.

4.13 Worst Case Szenarios

Da die Berechnung des Dormanzbrechungstermins (Kapitel 4.6.1.2) und des Dormanzschadens (Kapitel 4.7) sehr unsicher ist und für eine zuverlässige Vorhersage dieser Größen

²⁰⁹ Die dort aufgeführten *Notierungen* wurden als relative Werte in Beziehung zueinander gesetzt. Die mittleren Fruchtpreise für Arten/Sorten mit hohem Verwertungsanteil wurden entsprechend abgesenkt.

²¹⁰ Der häufig sogar, wenn man ihn bis 2100 extrapoliert, negative Flächen ergeben würde.

²¹¹ Im Gegensatz zu den maximalen, in der Tabelle gelisteten.

noch weitere Forschung geleistet werden muss, wurde auf Wunsch des HLOG zusätzlich zu den Rechnungen mit den *normalen* Chilling-Modellen noch untersucht, wie sich die Schäden und Kosten erhöhen, wenn man wesentlich extremere Ergebnisse als die des Kapitels 5.3 bzw. des Anhangs G annimmt.

Für diese sogenannten *Worst Case Szenarien* wurde zuerst angenommen, dass die Dormanz im Zeitraum 2071-2100 jedes x -te ($x \in \{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$) Jahr nicht gebrochen wird. In diesen speziellen Jahren wurde der Dormanzschaden immer nach der verbesserten Methode [Gleichung (4.99) ff.] berechnet. Das relative Chilling-Defizit wurde dabei auf $d_{rel} = 42.3\%$ gesetzt, so dass der Dormanzschaden s_D^o ohne Gegenmaßnahmen 100 % und der mit Maßnahmen $s_D^m = 30\%$ beträgt (siehe z. B. Abbildung 4.35).

Für die zwischen diesen Jahren liegenden Jahre wurde angenommen, dass die Dormanz immer gebrochen wurde.²¹² Fordert man z. B. bei $x = 5$, dass in allen Modellen die Dormanz in den Jahren 2075, 2080, ..., 2100 nicht gebrochen wird²¹³, so erhält man aber, wenn man irgendeine Größe betrachtet, die hier y genannt werden soll, und in welche die *NoReleaseProb* P_D (siehe Kapitel 4.7)²¹⁴ stark eingeht, eine unrealistisch große Standardabweichung $\sigma_{\bar{y}}$ für den *über die Modelle gemittelten* Mittelwert \bar{y} dieser Größe [vgl. Gleichung (4.15) mit \bar{y} anstelle von \bar{x} und ohne den ersten Term auf der rechten Seite]. Das liegt daran, dass auf Grund der nun scheinbar großen Korrelation der Modelle untereinander der Faktor $KO(M)$ aus Gleichung (4.16) ungefähr den Wert $M - 1$ annimmt. Wenn der theoretische Wert (Erwartungswert) der *NoReleaseProb* z. B. 20 % beträgt, so berechnet man für den Zeitraum 2071-2100 mit der Theorie aus Kapitel 4.4.1 ein 95 %-Konfidenzintervall der Breite $\pm 15.1\%$ für diesen Wert.²¹⁵

Wählt man hingegen die Jahre, in denen die Dormanz nicht gebrochen wird, rein zufällig mit einer Wahrscheinlichkeit $1/x \cdot 100\%$ aus, so dass die *NoRelease*-Jahre, welche den unterschiedlichen Modellen zugeordnet sind, statistisch unabhängig sind, so erhält man einen Schätzwert für das 95 %-Konfidenzintervall der *NoReleaseProb* P_D (wiederum als "Mittelwert über die 5 Klimamodellläufe") von nur $\pm 6.2\%$ (wenn der Erwartungswert wieder $P_D = 20\%$ beträgt).²¹⁶ Man muss bei dieser alternativen Vorgehensweise, die realistischere Konfidenzintervalle liefert und deshalb in dieser Arbeit auch für die Ergebnisrechnungen verwendet wurde, aber beachten, dass die *NoRelease*-Jahre zwischen den Modellen und in der Zeit zwar statistisch unabhängig gewählt werden sollten, aber die Nichtbrechung der Dormanz innerhalb eines Modells gleichzeitig für alle betrachteten Obstanbaugitterpunkte stattfinden sollte.²¹⁷ Weiterhin sollte bei der Berechnung einer anderen Größe (Gesamtkosten, Gesamtschaden, Nettogewinn usw.) jeweils wieder dieselbe Zufallsfolge benutzt werden, da alle diese Größen sich auf dieselben Klimarealisierungen

²¹² Das war bei den *normalen* Rechnungen mit Modell 1g (Kapitel G.3) sogar für Sorten mit hohem Chilling-Requirement fast immer der Fall. Die Nullsetzung in den Zwischenjahren gestattet außerdem eine eindeutige Definition des Worst Case Szenarios.

²¹³ Jeweils an allen betrachteten Obstanbaugitterpunkten.

²¹⁴ Der konkrete Wert von t_s ist hier unerheblich, da angenommen wurde, dass die Dormanz gar nicht gebrochen wurde. Man kann daher z. B. $t_s = 200$ annehmen.

²¹⁵ Der "theoretische" Wert für das Konfidenzintervall (genauer: für das Mutungsintervall des Mittelwerts) beträgt in diesem Fall $u_{0.975} \cdot \sqrt{P_D \cdot (1 - P_D) / 30} = 14.3\%$ ($u_{0.975} := 97.5\%$ -Quantil der Standardnormalverteilung = 1.96).

²¹⁶ Der "theoretische" Wert für das Konfidenzintervall beträgt in diesem Fall $u_{0.975} \cdot \sqrt{P_D \cdot (1 - P_D) / (30 \cdot 5)} = 6.4\%$.

²¹⁷ Hier muss daher eine starke räumliche Korrelation bestehen, die in der Realität aber auch beobachtet wird. Denn ein besonders warmer Winter wird sich auf alle benachbarten Obstanbaupixel ähnlich auswirken.

beziehen sollten.

Für den Zeitraum vor 2071 wurden die Dormanzschäden mit der *normalen* Methode berechnet, so dass hier dieselben Ergebnisse wie ohne das Worst Case Szenario erzielt werden.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse diskutiert. Am Ende jedes Unter- bzw. Unterunterkapitels findet man jeweils eine kurze Zusammenfassung. Weitere Ergebnisse in Form von Tabellen und Abbildungen findet man in den Anhängen B bis K, auf die in den folgenden Abschnitten verwiesen wird.

5.1 Mögliche klimatische Veränderungen in Hessen

Für die ersten 10 Klimagrößen der Tabelle 4.8 wurden 30-jährige Mittelwerte für die Zeitscheiben 1971-2000, 2001-2030 (bzw. 2002-2031¹), 2031-2060 und 2071-2100 berechnet.² Aus diesen Mittelwerten wurden auch Differenzen gebildet, um die Änderung des Klimas zwischen diesen Zeitabschnitten aufzuzeigen. Ferner wurden Trends für den Zeitraum 2011-2100 berechnet. Diese Rechnungen wurden für alle 13 Klimamodellläufe (3 dynamische und 10 WETTREG-Läufe; jeweils Szenario C20 und A1B) und für 1971-2000 auch mit den DWD-Beobachtungen durchgeführt. Für die Daten der dynamischen Modelle wurden hierbei die BIAS-korrigierten Daten verwendet. Aus den Werten der Einzelmodelle wurde auch noch ein Gesamtmittelwert berechnet. Bei den dargestellten Fehlerbalken handelt es sich um 95 %-Konfidenzintervalle, die nach der Methode aus Kapitel 4.4 berechnet wurden.

Obwohl es, wie in Kapitel 4.4 gezeigt wurde, nur sinnvoll ist, über maximal 5 Modelle³ (3 dynamische und 2 WETTREG-Läufe) zu mitteln, werden im Folgenden auch einige Fälle gezeigt, in denen alle 13 Klimamodellläufe berücksichtigt wurden. Hieran kann man gut erkennen, welchen dominierenden Einfluss in diesem Fall die WETTREG-Läufe haben.

Für alle Größen wurden monatliche, jahreszeitliche und jährliche Mittelwerte gebildet. Die folgenden Abbildungen zeigen nur einige wenige Beispiele, um den Rahmen des Berichts nicht zu sprengen. Ausführliche Tabellen mit monatlichen, saisonalen und Jahresmittelwerten für die oben angegebenen 30-Jahreszeiträume sowie die Differenzen 2071-2100 vs. 1971-2000 (als Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte) sind im **Anhang B** in tabellarischer Form und für die Differenzen auch in graphischer Form dargestellt.

Abbildung 5.1 zeigt den langjährigen Mittelwert (1971-2000) der Monatssummen des Gesamtniederschlags *PRECIPTOT* für verschiedene RCM's und DWD-Messungen (Gebietsmittelwert über das politische Hessen). Im linken Bild dieser Abbildung sind die unkorrigierten Werte dargestellt (identisch mit dem rechten Bild der Abbildung 4.9), die sich z. T. stark von den DWD-Messungen (graue Balken) unterscheiden. Im rechten

¹ Einige Größen, z. B. der Blühbeginn oder der Spätfrostschaden, benötigen Daten aus dem Vorjahr. Die Berechnung der Mittelwerte für den Zeitraum 2001-2030 würde daher die gleichzeitige Nutzung der Klimaszenarien C20 und A1B erfordern.

² Es wurden auch noch Standardabweichungen, die zur Berechnung der Konfidenzintervalle benötigt werden, p-Werte sowie Maxima und Minima (hier nicht gezeigt) berechnet.

³ Mit *Mittelwert über x Modelle* und mit *Mittelwert über x Klimamodellläufe* ist immer der Mittelwert über die Ergebnisse, welche bei Berechnung mit den Klimadaten der x verschiedenen Klimamodellläufe bezüglich einer bestimmten physikalischen Größe erzielt wurden, gemeint!

Bild sind die Werte nach der BIAS-Korrektur aufgetragen. Hier stimmen die Werte der 3 dynamischen Modelle gut mit den DWD-Beobachtungen überein. Die WETTREG-Läufe 0 und 1, die keiner Korrektur unterzogen wurden, unterscheiden sich aber z. B. im Juni, August und September um bis zu 20 % von den Beobachtungen.

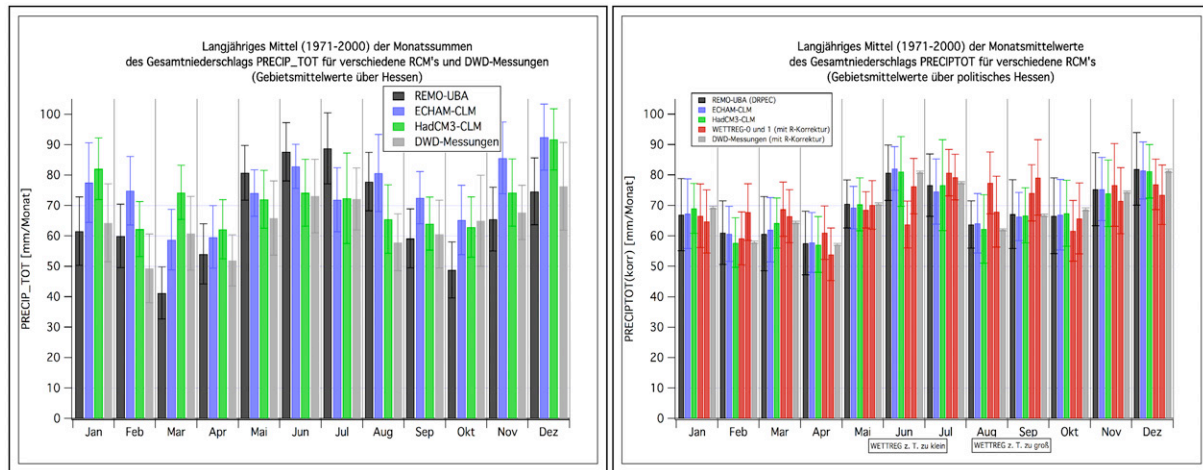


Abbildung 5.1: Langjährige Mittelwerte (1971-2000) der **Monatssummen des Gesamtniederschlags** *PRECIPTOT* für verschiedene RCM's und DWD-Messungen (Gebietsmittelwert über das politische Hessen); links: unkorrigiert; rechts: mit BIAS-Korrektur

Abbildung 5.2 (linkes Bild) zeigt die Änderungen der langjährigen Mittelwerte der Monatsmittelwerte des Gesamtniederschlags für verschiedene RCM's (2071-2100 vs. 1971-2000) als Gebietsmittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte. Es gibt große Unterschiede zwischen den Modellen, obwohl hier für die 3 dynamischen Modelle BIAS korrigierte Werte verwendet wurden.

Daher ist es sinnvoll, "Mittelwerte über die Modelle" zu bilden. Das Ergebnis ist im rechten Bild der Abbildung und in **Tabelle 5.1** dargestellt. Die signifikant von null verschiedenen Änderungen sind in der Tabelle *fett* gedruckt. Man beachte, dass die Konfidenzintervalle bei der Mittelung über die Modelle nicht wesentlich kleiner werden als die der Einzelmodelle, da außer der Varianz innerhalb eines Modells noch die Varianz zwischen den Modellen berücksichtigt werden muss. Im Januar ist (im Modellmittel) eine signifikante Zunahme (+12 mm) und im Sommer eine signifikante Abnahme [−19 mm im August und −47 mm für den Sommer (JJA)] des Niederschlags in den hessischen Obstanbaugebieten zu erwarten.

Tabelle 5.1: Differenz (2071-2100 vs. 1971-2000) der langjährigen Mittelwerte der **Monatssummen des Gesamtniederschlags** (*PRECIPTOT*; in mm/Monat); Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte und die 5 Modelle. Signifikant von null verschiedene Änderungen (auf dem 95%-Niveau) wurden *fett* gedruckt.

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Δ PRECIPTOT	12	8	3	5	-7	-10	-17	-19	-4	-2	3	11

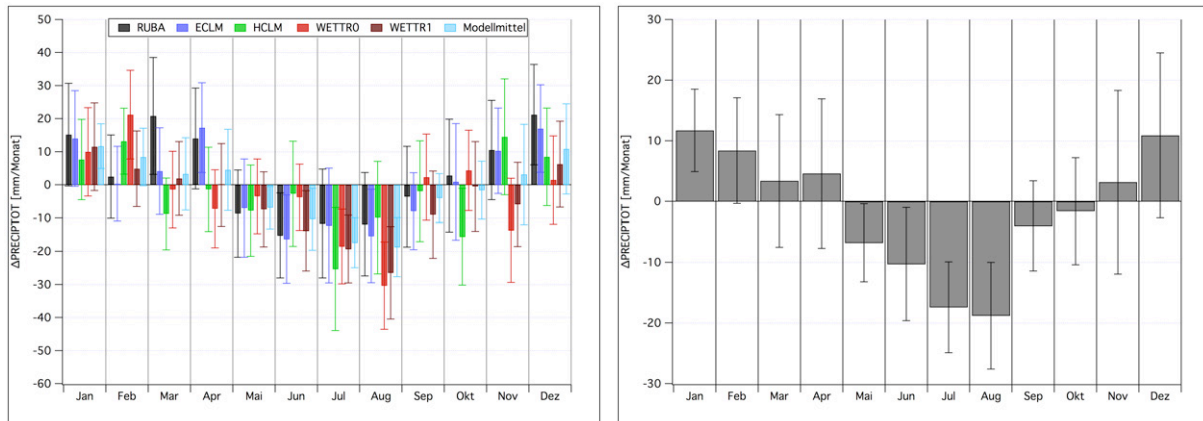


Abbildung 5.2: Differenz der langjährigen Mittelwerte der **Monatssummen des Gesamtniederschlags** (PRECIP_TOT; in mm/Monat) für verschiedene RCM's (2071-2100 vs. 1971-2000) (Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Links: Für die 3 dynamischen Modelle und 2 WETTREG-Läufe; rechts: Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe.

Abbildung 5.3 visualisiert die Differenz der langjährigen Mittelwerte der Monatsmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur T für verschiedene RCM's (2071-2100 vs. 1971-2000). Links sind die Ergebnisse für die Einzelmodelle (3 dynamische Modelle und 2 WETTREG-Läufe) dargestellt. Das rechte Bild und **Tabelle 5.2** bezieht sich auf die Mittelwerte über diese 5 Modelle. Alle Änderungen, auch die der Mittelwerte über die 5 Modelle, sind signifikant von null verschieden. Die Änderungen von T liegen zwischen $+1.9^{\circ}\text{C}$ im April und $+4.4^{\circ}\text{C}$ im August.

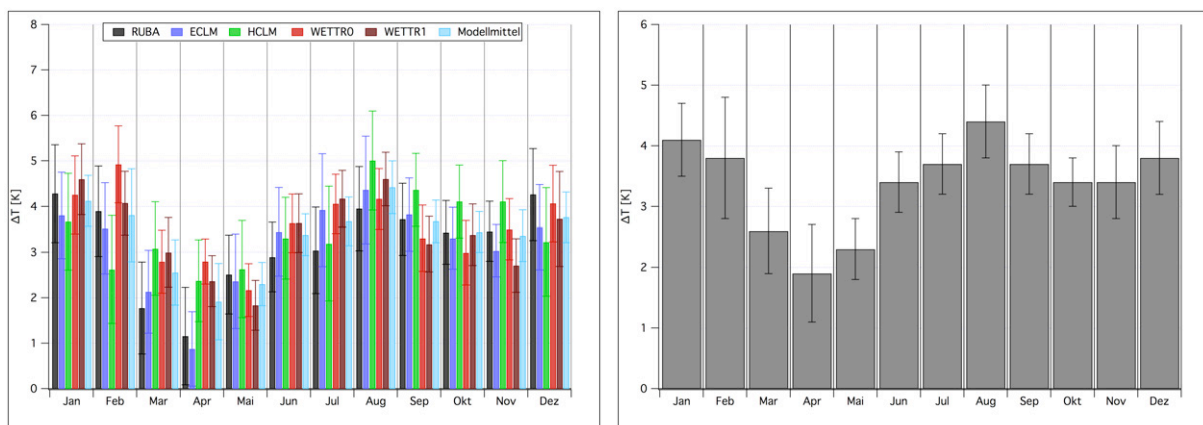


Abbildung 5.3: Differenz der langjährigen Mittelwerte der **Monatsmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur** T für verschiedene RCM's (2071-2100 vs. 1971-2000) (Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Links: Für die 3 dynamischen Modelle und 2 WETTREG-Läufe; rechts: Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe.

Tabelle 5.2: Differenz der langjährigen Mittelwerte der **Monatsmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur** T (2071-2100 vs. 1971-2000) (Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte und über die 5 Klimamodellläufe).

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
ΔT [K]	4.1	3.8	2.6	1.9	2.3	3.4	3.7	4.4	3.7	3.4	3.4	3.8

Als Beispiel für die Auswertung von saisonalen Daten sind in **Abbildung 5.4** die Differenzen der saisonalen Mittelwerte der Lufttemperatur aufgetragen. Im rechten Bild findet man die Mittelwerte dieser Differenzen über die jeweils 5 Modelle (Winter: +4.0 K; Frühling: 2.3 K; Sommer: +3.8 K; Herbst: +3.5 K) und zusätzlich (Balken ganz rechts) den Mittelwert über alle 4 Jahreszeiten (Jahresmittelwert) und alle 5 Modelle (+3.4 K). Alle Differenzen sind hoch signifikant von null verschieden.

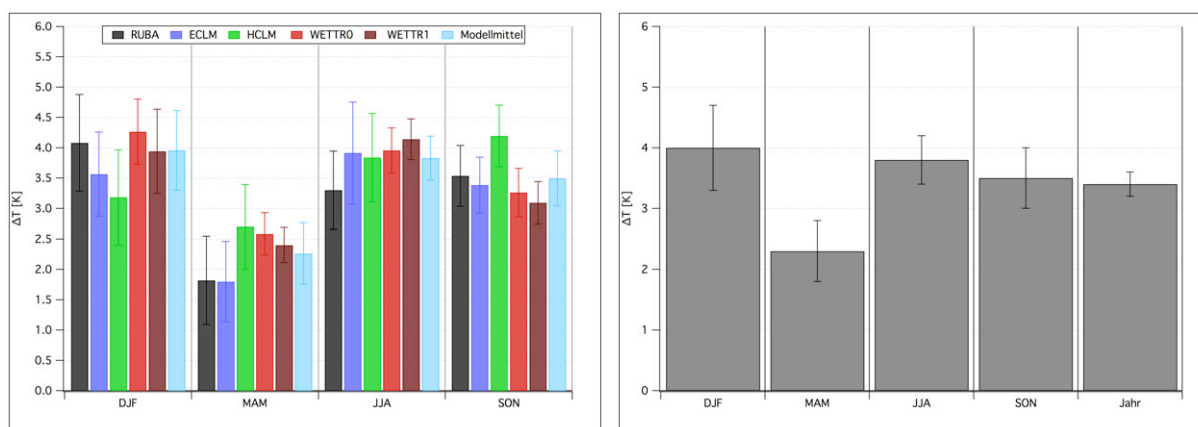


Abbildung 5.4: Differenz der langjährigen Mittelwerte der **saisonalen Mittelwerte der 2 m-Lufttemperatur** T für verschiedene RCM's (2071-2100 vs. 1971-2000). Links: Für die 3 dynamischen Modelle und 2 WETTREG-Läufe; rechts: Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe. Jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

Langjährige Mittelwerte (1971-2000) der Monatsmittelwerte der 10 m-Windgeschwindigkeit V_{10} für die 3 dynamischen Modelle und die 10 WETTREG-Läufe findet man in **Abbildung 5.5** oben links. Bereits in der "Gegenwart" (1971-2000) unterscheiden sich die (unkorrigierten) WETTREG-Werte stark von den DWD-Messungen (z. B. im April und Mai). Die Differenzen (2071-2100 vs. 1971-2000) der 30-jährigen Mittelwerte sind oben rechts dargestellt. Man beachte, dass die 10 WETTREG-Läufe wesentlich drastischere Änderungen prognostizieren als die 3 dynamischen Modelle. Die über alle 13 Klimamodellläufe gemittelten Änderungen findet man im Bild unten links der **Abbildung 5.5**. Alle Änderungen sind scheinbar signifikant. [Die Fehlerbalken wurden hier ohne die Modifikation (4.34), d. h. ohne Berücksichtigung der Korrelationen der WETTREG-Mittelwerte berechnet, und sind daher zu klein!]

Betrachtet man hingegen nur Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe, so wie es in Kapitel 4.4.3 empfohlen wurde, so ergibt sich das Bild unten rechts. In diesem sind die Fehlerbalken wesentlich größer, und viele Änderungen von V_{10} sind nun nicht mehr signifikant (n.s.). Beachtet man auch die Multiplizität (vgl. Seite 293), so ist streng genommen nur die Abnahme von -0.2 m/s im September signifikant.

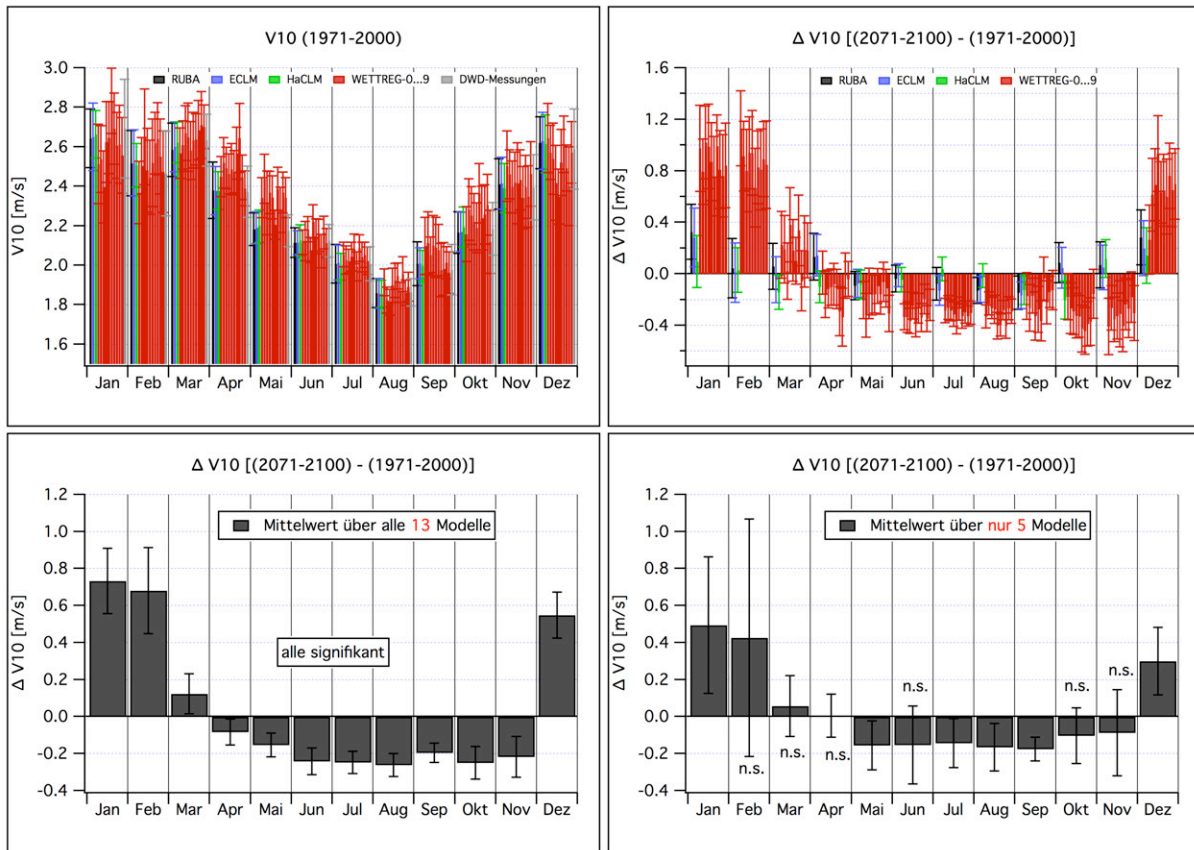


Abbildung 5.5: Langjährige Mittelwerte (1971-2000) der Monatsmittelwerte der 10 m-Windgeschwindigkeit V_{10} für die 3 dynamischen Modelle und die 10 WETTREG-Läufe (links oben); Differenz der Mittelwerte (2071-2100 vs. 1971-2000) für jeden der 13 Klimamodellläufe (oben rechts); Differenz der "Mittelwerte über die 13 Klimamodellläufe" (unten links); Differenz der Mittelwerte über nur 5 Modellläufe (unten rechts). Jeweils Mittelwerte über alle Gitterpunkte im (politischen) Hessen.

Abbildung 5.6 entspricht im Prinzip der **Abbildung 5.5**, nur werden hier Mittelwerte und Differenzen der relativen Luftfeuchte $Rel2$ dargestellt. Auch hier zeigt sich wieder ganz klar, dass die 10 WETTREG-Läufe keine unabhängigen Klimarealisierungen darstellen und dass die Ergebnisse bei einer Mittelung über 13 Klimamodellläufe klar von WETTREG dominiert werden. Die Fehlerbalken sind in diesem Falle wegen der Vernachlässigung der Modifikation (4.34) auch viel zu kurz. [Die Modifikation (4.34) kann nicht angewendet werden, da nicht genügend Modelle zur Bestimmung von ρ zur Verfügung stehen (siehe Fußnote 48 auf Seite 53).] Mittelt man nur über 5 Klimamodellläufe, so werden die Konfidenzintervalle wesentlich größer (rechtes Bild der **Abbildung 5.6**) und die relative Luftfeuchte nimmt im Sommer und Herbst [besonders im Juli (-6%) und August (-8%)] und im Jahresmittel (-2%) signifikant ab.

Im **Anhang B** findet man umfangreiche Tabellen und Graphiken zu 30-jährigen Mittelwerten (1971-2000, 2002-2031, 2031-2060 und 2071-2100) der wichtigsten Klimagrößen und deren Differenzen sowie zugehörige *Signifikanzen*. Dort werden sowohl langjährige Monatsmittelwerte als auch saisonale und Jahresmittelwerte mit zugehörigen 95%-Vertrauensintervallen angegeben. Bei Betrachtung von Mittelwerten über die verschiedenen Klimamodelle wird aus den oben genannten Gründen immer nur ein Mittelwert aus den Ergebnissen mit Rechnungen aus den Outputwerten von RUBA, ECLM, HCLM

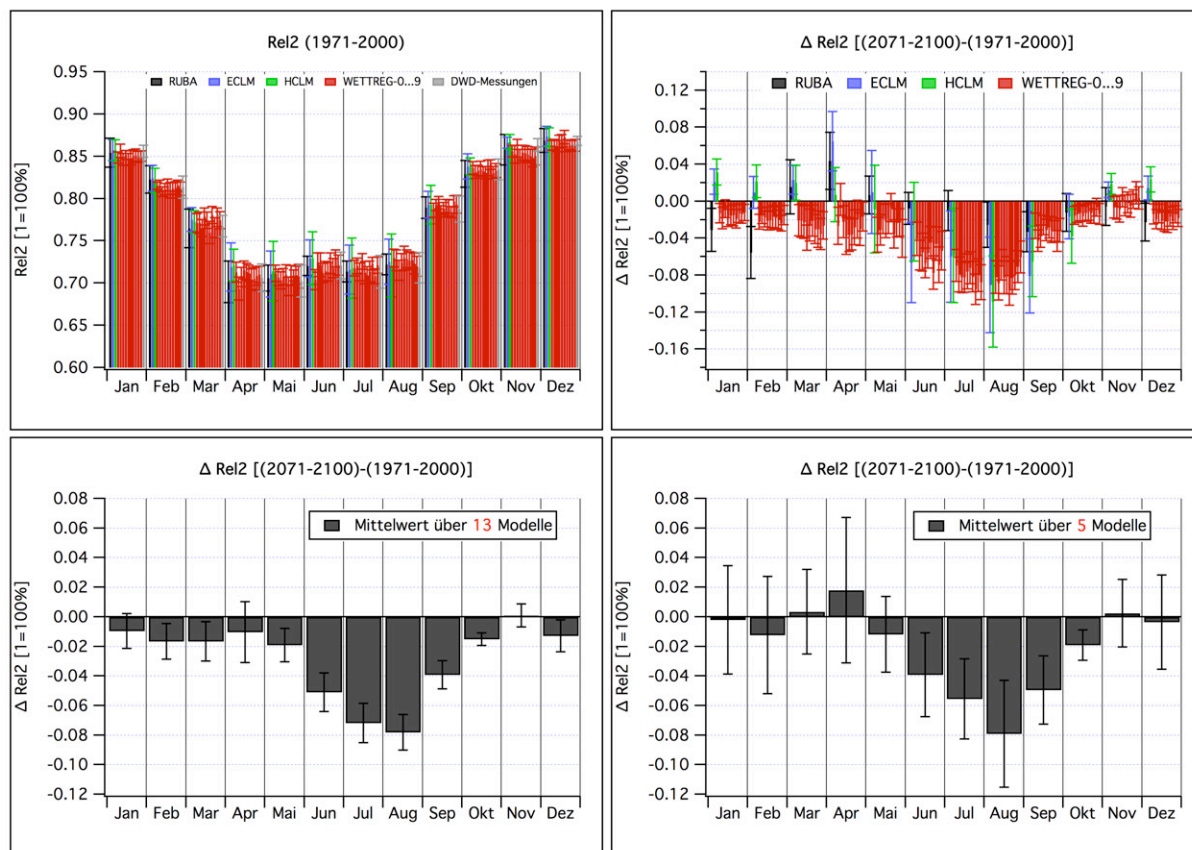


Abbildung 5.6: Langjährige Mittelwerte (2071-2100) der Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte $Rel2$ für die 3 dynamischen Modelle und die 10 WETTREG-Läufe (links oben); Differenz der Mittelwerte (2071-2100 vs. 1971-2000) für jeden der 13 Klimamodellläufe (oben rechts); Differenz der “Mittelwerte über die 13 Klimamodellläufe” (unten links); Differenz der Mittelwerte über nur 5 Modellläufe (unten rechts). Jeweils Mittelwerte über alle Gitterpunkte im (politischen) Hessen.

und den ersten beiden WETTREG-Läufen 0 und 1 angegeben. Räumlich wurde immer über die 19 signifikanten Obstanbaugitterpunkte (vgl. Abschnitt 4.5 und Abbildung 4.19 rechts) gemittelt.

Zusammenfassung: Fasst man die Ergebnisse des Anhang B zusammen, so erhält man für die Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und 19 Obstanbaugitterpunkte für die Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 folgendes Ergebnis: Die Lufttemperatur nimmt in allen Monaten und Jahreszeiten hoch signifikant zu (Tagesmittelwert T um 3.4 K, Tagesmaximumtemperatur Tx um 3.7 K und Tagesminimumtemperatur Tn um 3.1 K, jeweils im Jahresmittel; Zunahme von T im Winter: 4.0 K, im Frühling: 2.3 K, im Sommer: 3.8 K und 3.5 K im Herbst). Die relative Luftfeuchte nimmt im Sommer und Herbst [besonders im Juli (-6 %) und August (-8 %)] und im Jahresmittel (-2 %) signifikant ab, obwohl die Taupunkttemperatur hoch signifikant zunimmt (+2.8 K im Jahresmittel). Das kann damit erklärt werden, dass die absolute Luftfeuchte zwar zunimmt, aber dabei die Trockentemperatur stärker zunimmt als die Taupunkttemperatur. In diesem Fall verringert sich die relative Luftfeuchte trotz steigender absoluter Feuchte.

Die 10 m-Windgeschwindigkeit nimmt nur im September geringfügig um -0.2 m/s ab (bei Berücksichtigung der Multiplizität). Der Gesamtniederschlag nimmt im Sommer hoch signifikant ab (-47 mm) und im Winter (+31 mm), besonders im Januar (+12 mm), hoch

signifikant zu. Der Jahresmittelwert verändert sich aber nicht signifikant.

Der Gesamtbedeckungsgrad ändert sich nur im HCLM und bei WETTREG signifikant. Im Modellmittel tritt keine signifikante Änderung auf. Das Gleiche gilt für die Globalstrahlung, die nur in WETTREG hoch signifikant zunimmt (im Jahresmittel um über 17%). Der Luftdruck am Boden steigt hoch signifikant im Herbst und im Jahresmittel an, allerdings nur um ca. 1 hPa. Der Anstieg wird außerdem hauptsächlich durch die Ergebnisse von WETTREG hervorgerufen und die Prognose ist daher nicht sehr zuverlässig.

5.2 Veränderungen in der Phänologie

5.2.1 Mögliche Veränderungen im Blühbeginn, der Blühdauer und im Ende der Winterruhe

In diesem Kapitel seien zunächst nur für den frühreifen Apfel und die Aprikose einige Beispiele für die Prognose des Blühbeginns t_2 und des Termins t_1 , an dem das Chilling-Requirement erfüllt ist (*Release of Dormancy = Ende der Winterruhe*), gegeben. Zur Berechnung wurden die im Kapitel 4.6.6 beschriebenen, “optimierten” phänologischen Modelle verwendet. Weitere Ergebnisse, auch für die anderen Fruchtarten, findet man im **Anhang C** und **D**.

Abbildung 5.7 links zeigt für jedes der Jahre 1962-2100 die vom DWD beobachteten (grau; nur bis 2009 vorhanden) und die mit den Temperaturen der drei dynamischen Modelle und aus den WETTREG-Läufen 0 und 1 mit dem phänologischen Modell 29ba (siehe Anhang A) [mit DAYLENGTH-Term (4.93)] vorhergesagten Dormanzbrechungstermine t_1 . Dargestellt sind Mittelwerte über die 81 Gitterpunkte in Hessen. Zusätzlich sind als magenta-farbene dicke Kurve die “Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe” und als Quadrate die über je 30 Jahre gemittelten t_1 -Werte dieser Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen eingetragen. Die “Jahr zu Jahr”-Schwankungen und die Abweichungen der Ergebnisse bei Antrieb mit verschiedenen regionalen Klimamodellen sind erheblich. Im Mittel ist eine Verspätung von t_1 um ca. 20 Tage bis 2100 zu erkennen.

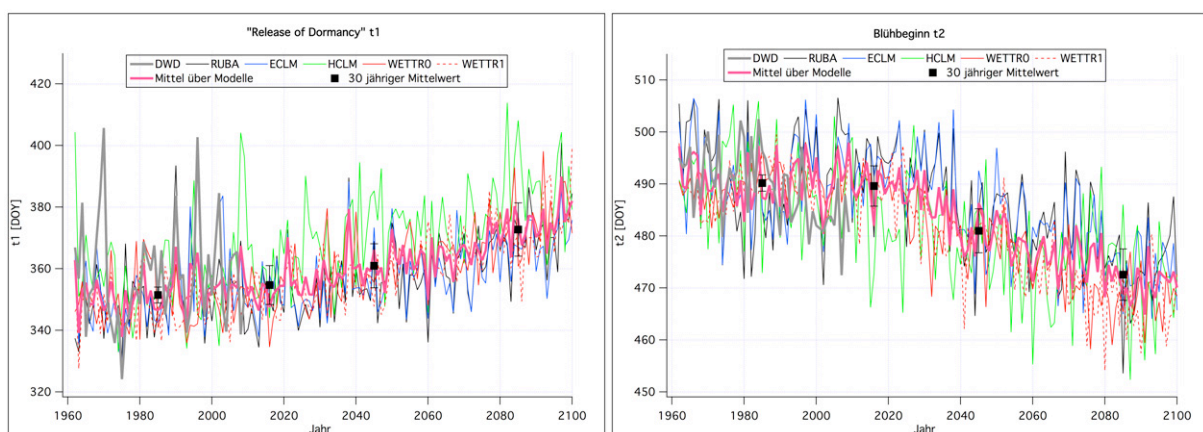


Abbildung 5.7: “Release of Dormancy t_1 ” (links) und **Blühbeginn t_2** (rechts) beim frühreifen **Apfel**, berechnet mit dem phänologischen Modell 29ba mit DAYLENGTH-Term. Jede der dünnen Kurven bezieht sich auf eines der 5 Klimamodelle, von denen die Temperaturen im phänologischen Modell 29ba benutzt wurden. Dargestellt sind Mittelwerte über die 81 Gitterpunkte in Hessen.

Das rechte Bild der **Abbildung 5.7** zeigt den zugehörigen Verlauf des Blühbeginntermins

t_2 . t_2 verfrüht sich bis 2100 im Mittel über die 5 Klimamodellläufe um etwas mehr als 20 Tage.⁴

Mittelt man die 5 Kurven der Abbildung 5.7, welche sich auf die regionalen Klimamodelle beziehen, so erhält man die schwarzen Kurven der **Abbildung 5.8 unten** (identisch mit den magenta-farbenen Kurven aus Abbildung 5.7). In dieser Abbildung sind auch noch die über die 5 RCM's gemittelten Ergebnisse der beiden anderen phänologischen Modelle [29fa = Chilling mit dem Positive Utah Model (rot); 29ga = Chilling mit dem Dynamic Model (blau)] eingetragen. Diese beiden Modelle zeigen eine geringere Verspätung von t_1 als Modell 29ba (links unten). Die Verfrühung des Blühtermins (rechts unten) wird aber von allen 3 Modellen, und auch vom reinen Forcing Modell 12a (grüne Kurve) ziemlich einheitlich vorhergesagt.

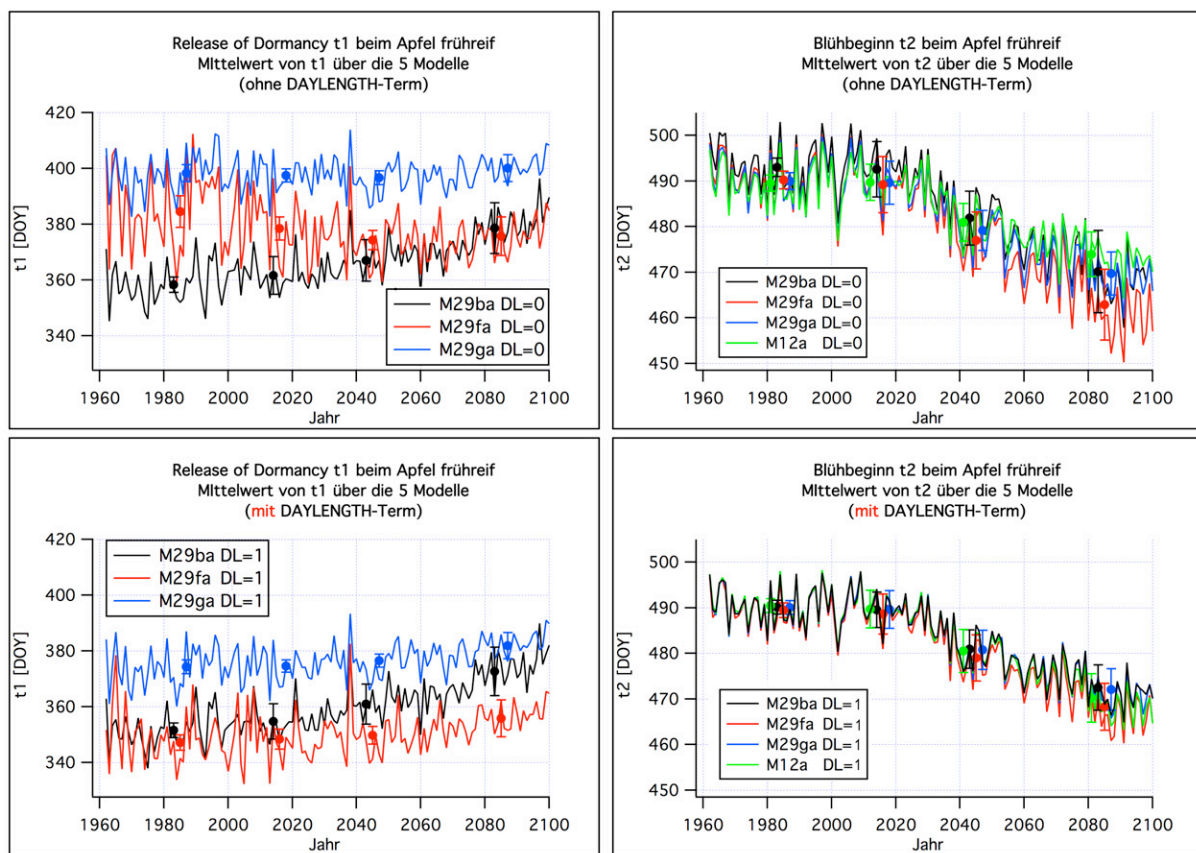


Abbildung 5.8: “Release of Dormancy t_1 ” (links) und Blühbeginn t_2 (rechts) beim frühreifen Apfel, berechnet mit verschiedenen phänologischen Modellen ohne (oben) und mit (unten) DAYLENGTH-Term. Dargestellt sind Mittelwerte der Ergebnisse, die mit den Temperaturen der 3 dynamischen Modelle und der WETTREG-Läufe 0 und 1 berechnet wurden. Die Punkte markieren Mittelwerte über 30-Jahresabschnitte, die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

Die oberen beiden Bilder der Abbildung 5.8 zeigen dieselben Größen, jedoch wurden die Modelle hier in der alten Version ohne DAYLENGTH-Term optimiert und dann damit die Vorhersage gerechnet. t_1 liegt nun wesentlich später, beim Modell 29ga (Chilling mit dem Dynamic Model) fällt dieser Termin auf Anfang Februar. Die Verfrühung des Blühtermins

⁴ t_1 - und t_2 -Werte größer 365 DOY beziehen sich auf das Folgejahr, welches auf das Jahr, in dem das Modell gestartet wurde und in dem die Dormanz einsetzt, folgt.

t_2 ist mit über 30 Tagen wesentlich größer als bei der Rechnung mit DAYLENGTH-Term. Auch sind die jährlichen Schwankungen größer. Das Modell 29fa (Chilling mit dem Positive Utah Model) weicht zum Ende des 21. Jahrhunderts auch stärker von den 3 anderen Modelle ab, und die Konfidenzintervalle sind auf Grund der größeren Jahr zu Jahr Schwankungen fast doppelt so groß.

In **Abbildung 5.9** sind die langjährigen Mittelwerte [1971-2000 (links oben) und 2071-2100 (links unten); Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen] über die Blühbeginnstermine t_2 des frühreifen Apfels, welche mit den unterschiedlichen Klimamodell-Temperaturen und Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term) berechnet wurden, als Balken aufgetragen. Die 1971-2000-Mittelwerte stimmen wegen der auf die Temperaturen angewandten BIAS-Korrektur gut überein. Die 2071-2100-Mittelwerte zeigen aber Unterschiede von bis zu 8 Tagen zwischen den Modellen, die z. T. auch signifikant sind.

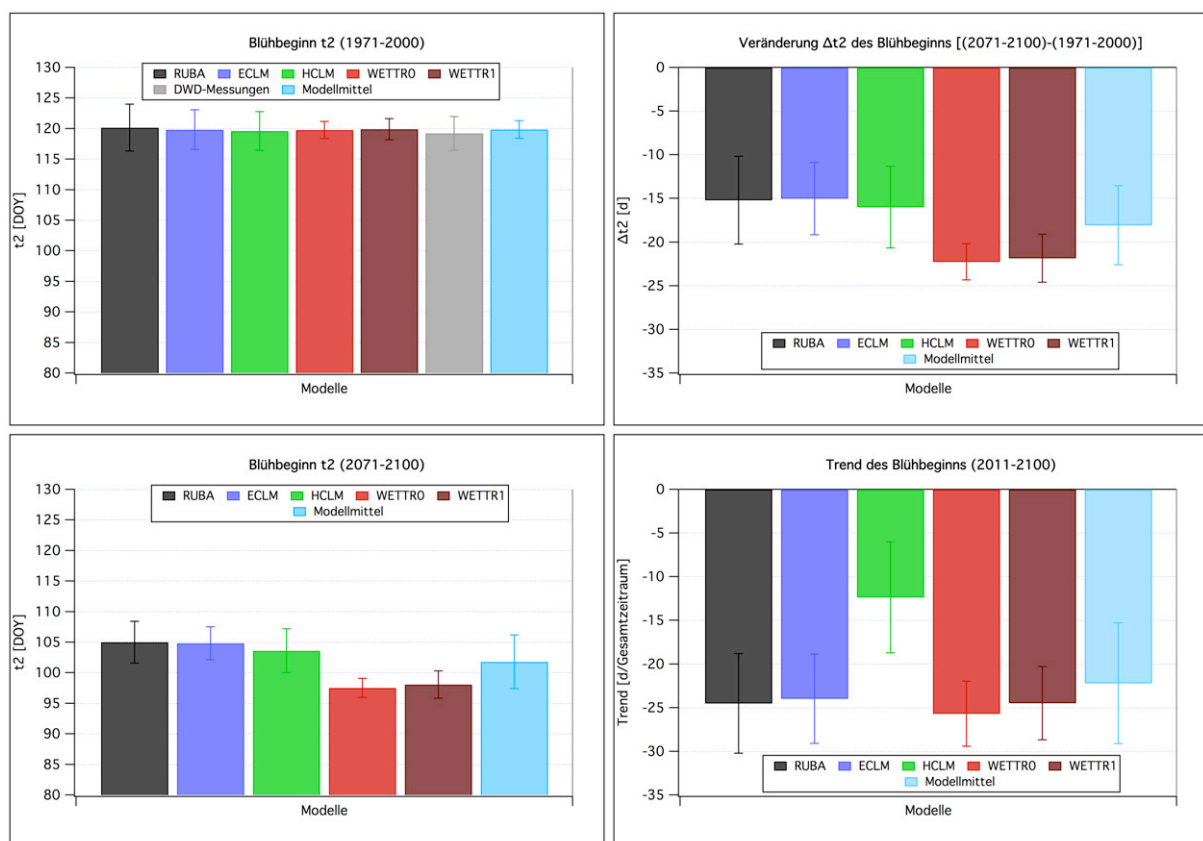


Abbildung 5.9: links: Mittelwerte der Termine des **Blühbeginns** (oben: 1971-2000; unten: 2071-2100); rechts: Differenz der Blühbeginnstermine (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 Klimamodelle und das Mittel über diese 5 Klimamodelle. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term berechnet. Dargestellt sind Gebietsmittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen für den frühreifen **Apfel**.

Rechts oben sind die Veränderungen im Blühbeginn [2071-2100 vs. 1971-2000] eingezeichnet. Die über die 5 Klimamodellläufe gemittelte Verfrühung (hellblauer Balken) beträgt -18 Tage. Die im Bild unten rechts eingetragenen Trends über den Zeitraum 2011-2100 zeigen um 5 bis 10 Tage größere Verfrühungen. Ein Blick auf [Abbildung 5.8](#) unten rechts zeigt, warum das so ist: Bis ca. 2010 hat t_2 relativ konstante Werte von 490 DOY (Anfang April), und erst danach setzt ein starker Trend zur Verfrühung ein.

Bei der Aprikose (**Abbildung 5.10**) findet der Blühbeginn mehr als 3 Wochen früher statt. Im Zeitraum 2071-2100 fällt er bei WETTREG auf einen Termin Mitte März. Die Verfrühung von im Mittel über die Modelle -20 d (± 5 d) ist noch etwas extremer als beim Apfel. Beim Trend (2011-2100) beträgt die Verfrühung sogar -22 d (± 8 d) und wäre betragsmäßig noch größer, wenn man mit den Temperaturen aus dem HadCM3-CLM nicht eine außergewöhnlich kleine Verfrühung berechnen würde (grüner Balken in **Abbildung 5.10** rechts unten).

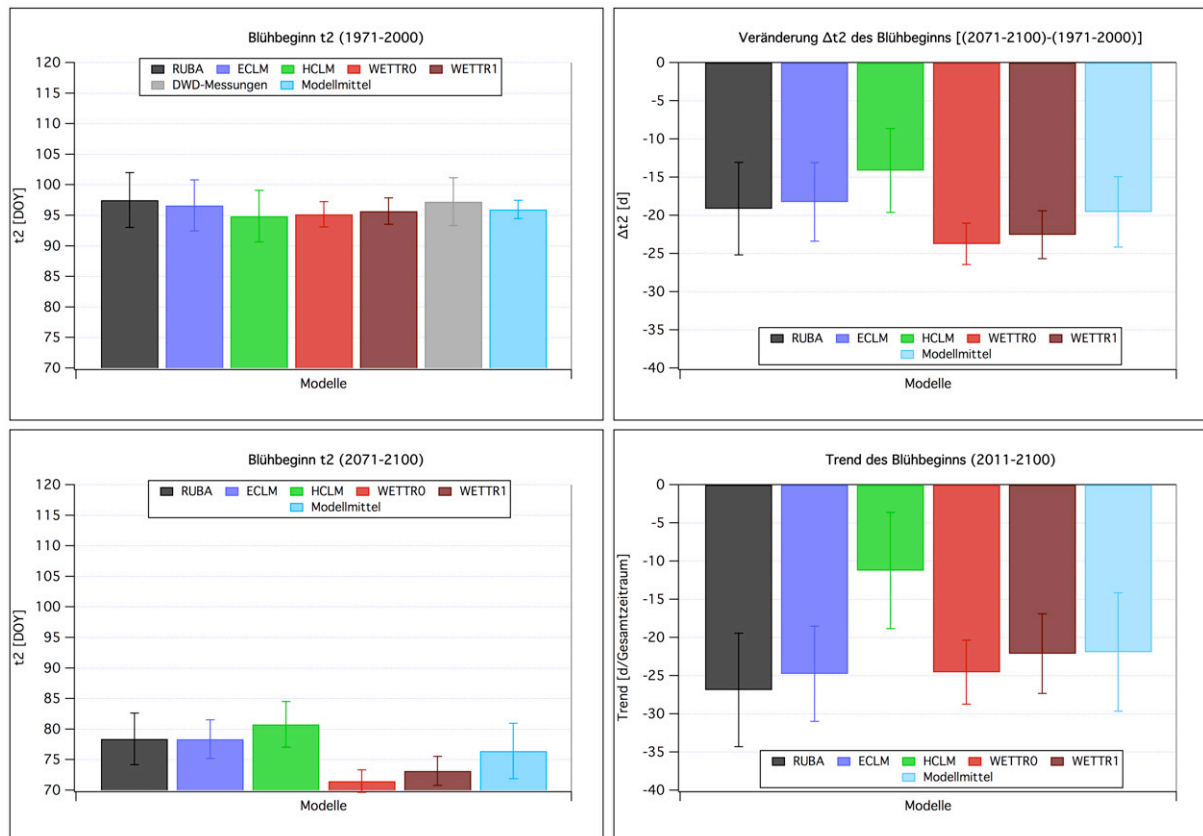


Abbildung 5.10: links: Mittelwerte der Termine des **Blühbeginns** (oben: 1971-2000; unten: 2071-2100); rechts: Differenz der Blühbeginnstermine (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 Klimamodelle und das Mittel über diese 5 Klimamodelle. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term berechnet. Dargestellt sind Gebietsmittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen für die **Aprikose**.

Analoge Ergebnisse in Form von Tabellen mit den *exakten Werten* einschließlich Konfidenzintervallen und p-Werten liegen auch für alle anderen 7 Fruchtarten vor (siehe **Anhang C**). In **Anhang D** werden auch Ergebnisse für die **Blühdauer** gelistet. Diese wurde nur für die 6 Obstarten berechnet, für die ausreichend viele Beobachtungen des Blühendes vorlagen, so dass das Modell 10a (ohne DAYLENGTH-Faktor) zur “Berechnung des Blühendes aus dem Blühbeginn” geeicht werden konnte (vgl. Tabelle 4.14).

Zusammenfassung: Die Termine für den Blühbeginn (jeweils Mittelwert über die 5 Klimamodellläufe) (und auch für den Austriebsbeginn bei Wein) verfrühen sich bei allen 9 Obstarten hoch signifikant um 15 Tage (Kirschen und Wein) bis 22 Tage (Pflirsich). Es ist eine gewisse Tendenz zu erkennen, dass Arten mit einem in der Gegenwart besonders frühen Blühtermin (**Abbildung C.1**) auch eine besonders starke Verfrühung in der Zukunft

aufweisen (**Abbildung C.2**). Allerdings unterscheiden sich die meisten Veränderungen Δt_2 im Blühtermin wegen der großen Konfidenzintervalle nicht signifikant von einander, so dass diese Aussage statistisch nicht abgesichert werden kann.

Bei der Blühdauer (ebenfalls Mittelwert über die 5 Klimamodellläufe) sind die Ergebnisse nicht so eindeutig. Beim Apfel und der Birne verlängert sich die Blühdauer leicht signifikant um knapp einen Tag (ca. 6%) (**Abbildung D.2**). Beim Wein verkürzt sich die Blühdauer aber um 0.7 Tage. Auch bei der (absoluten) Blühdauer (**Abbildung D.1**) spielt der Wein eine Sonderrolle, denn diese beträgt im Zeitraum 1971-2000 im Mittel nur 10.7 Tage. Dieses außergewöhnliche Verhalten ist wahrscheinlich eine Folge des extrem späten Blühtermins (16. Juni im Mittel über 1971-2000; siehe **Abbildung C.1** und **Tabelle C.6**).

5.2.2 Mögliche Veränderungen im Beginn der Pflückreife und der Reifeperiodenlänge

Abbildung 5.11 zeigt die mit dem Modell 12a-R und den Temperaturen der 5 RCM's und des DWD berechneten Termine t_3 des **Beginns der Pflückreife** beim frühreifen Apfel als Mittelwerte über die 19 signifikanten Obstanbaugitterpunkte. Ein Vergleich mit dem rechten Bild in **Abbildung 5.7** zeigt, dass sich der Blühbeginn beim frühreifen Apfel in Zukunft ähnlich stark verfrühen wird wie der Beginn der Pflückreife. Die Differenz *Pflückreife minus Blühbeginn* (die Länge der Reifeperiode) vergrößert sich daher nur um 3.4 Tage (vgl. den untersten Eintrag in der *Differenz*-Spalte der **Tabelle F.1**).

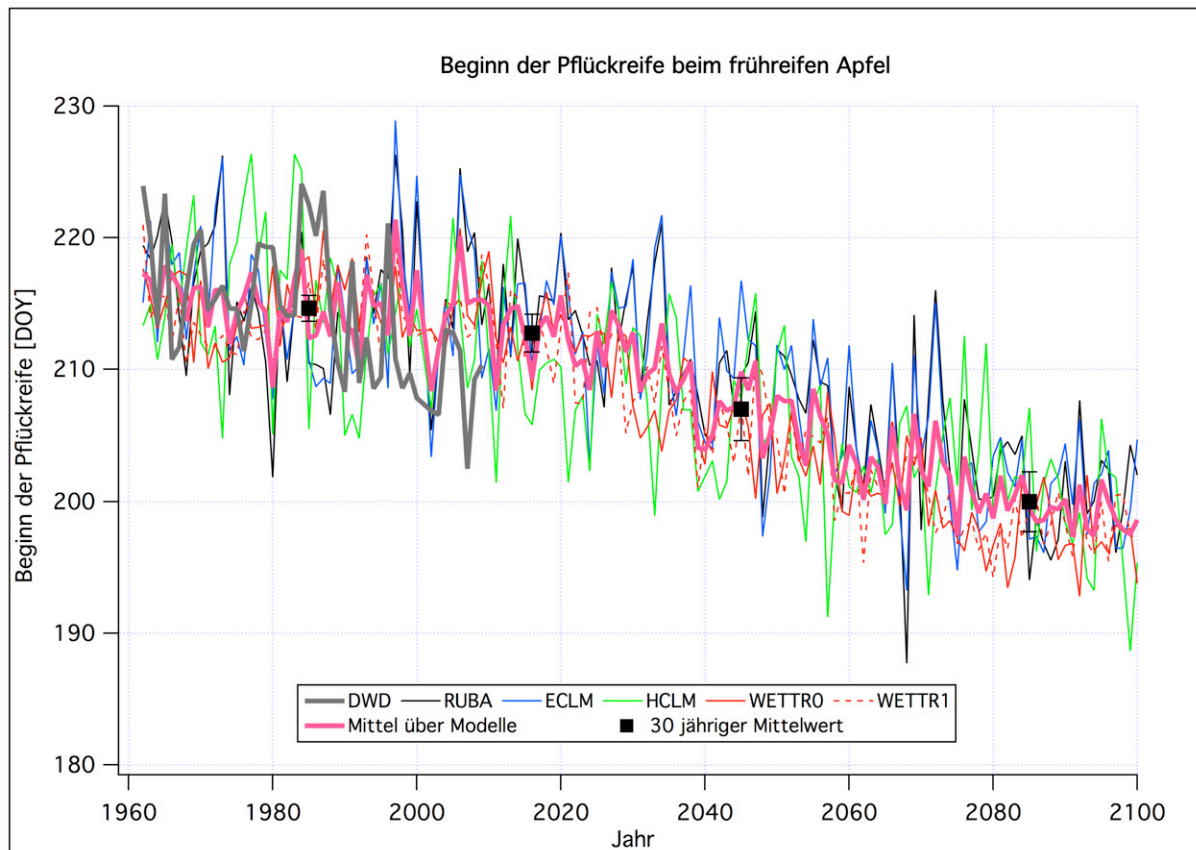


Abbildung 5.11: Beginn der **Pflückreife** t_3 von **frühreifem Apfel**, berechnet mit Modell 12a-R. Jede der dünnen Kurven bezieht sich auf eines der 5 Klimamodelle, von denen die Temperaturen im phänologischen Modell 12a-R benutzt wurden. Dargestellt sind Mittelwerte über die 19 Obstbaugitterpunkte. Die dicke graue Kurve wurde mit Hilfe von beobachteten Temperaturen (DWD) berechnet. Die dicke magenta-farbene Kurve ist der Mittelwerte über die 5 dünnen “Modellkurven”.

Im linken Bild der **Abbildung 5.12** sind die mit den Temperaturen der 5 RCM’s und des DWD für den Zeitraum 1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten) berechneten Reife-termine aufgetragen. Die Veränderungen zwischen diesen beiden 30-jährigen Mittelwerten findet man im Bild rechts oben. Die Verfrühung beträgt im Mittel über die 5 Klimamodell-läufe -14.6 Tage. Die Trends (2011-2100) zeigen eine noch etwas ausgeprägtere Tendenz zur Verfrühung, da der starke “lineare Verfrühungstrend” erst ab ca. 1990 einsetzt (vgl. **Abbildung 5.11**).

Weitere umfangreiche Tabellen für den Beginn der Pflückreife für verschiedene Frucht-arten und dessen zukünftige Veränderungen findet man im **Anhang E**.

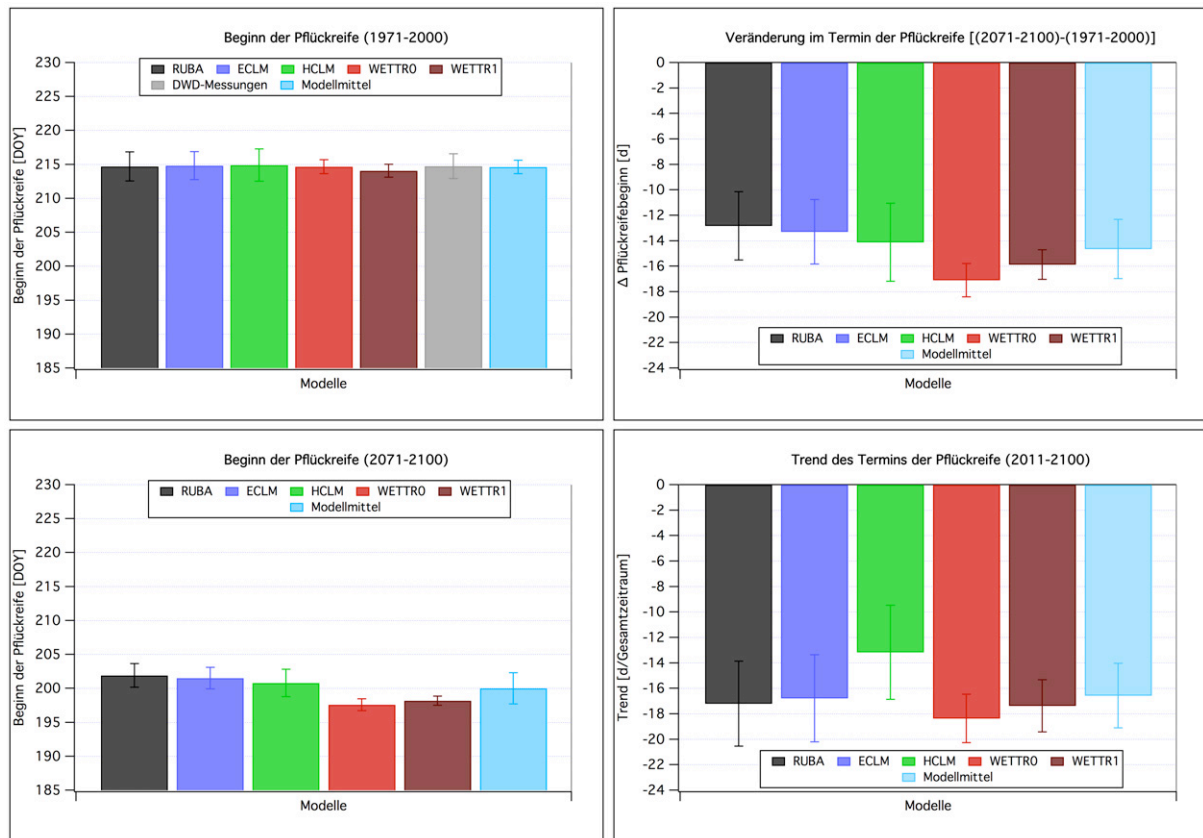


Abbildung 5.12: links: Mittelwerte der Termine des Beginns der **Pflückreife** (oben: 1971-2000; unten: 2071-2100); rechts: Differenz der Reifetermine (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 Klimamodelle und das Mittel über diese 5 Klimamodelle. Der Reifebeginn wurde mit Modell 12a-R berechnet. Dargestellt sind Gebietsmittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen für den **frühreifen Apfel**.

Die **Abbildung 5.13** zeigt die Veränderungen in der **Länge der Reifeperiode** beim spätreifen Apfel. Alle Modelle prognostizieren eine moderate Verlängerung der Reifeperiode. Im Mittel über alle 5 Modelle beträgt die Verlängerung 6.5 Tage. Dieses Verhalten ist auch typisch für den frühreifen Apfel und die früh- und spätreife Birne. Genaue Wert für alle Fruchtarten mit 95 %-Konfidenzintervallen findet man im **Anhang F**.

In **Abbildung 5.14** sind die Veränderungen bei der frühreifen Süßkirsche dargestellt. Diese treten in ähnlicher Form auch bei der spätreifen Süßkirsche, der Sauerkirsche, der Erdbeere und der früh- und spätreifen Pflaume auf. Die Änderungen sind nur gering und nicht signifikant.

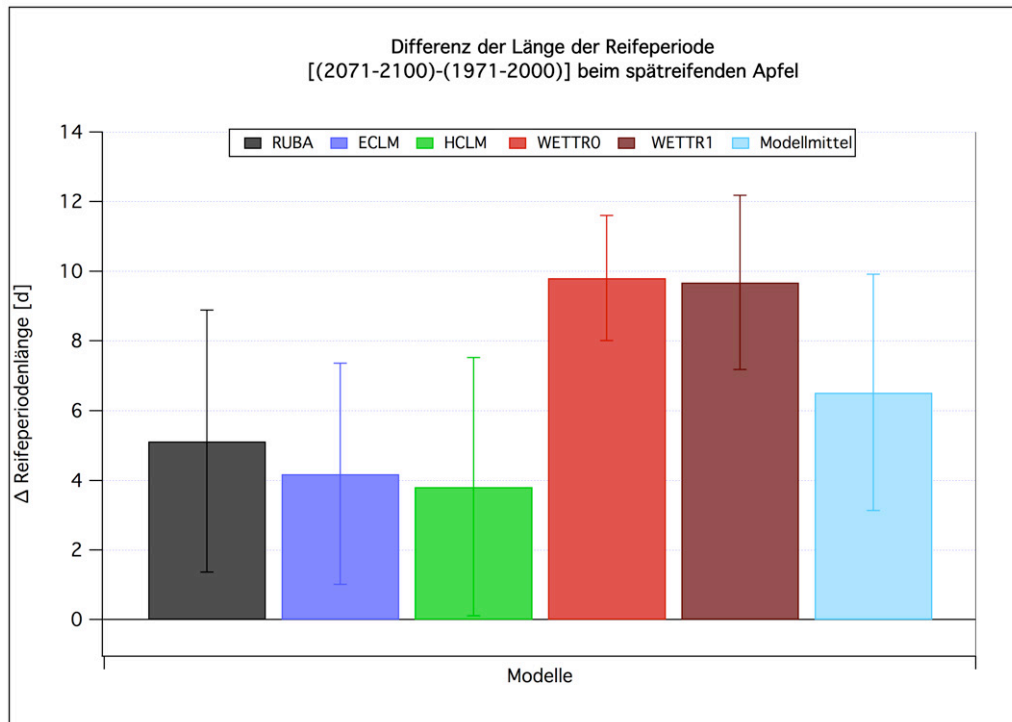


Abbildung 5.13: Differenz der **Länge der Reifeperiode** [(2071-2100)-(1971-2000)] beim **spätreifen Apfel** gemäß Modell-12a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM's. Gebietsmittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

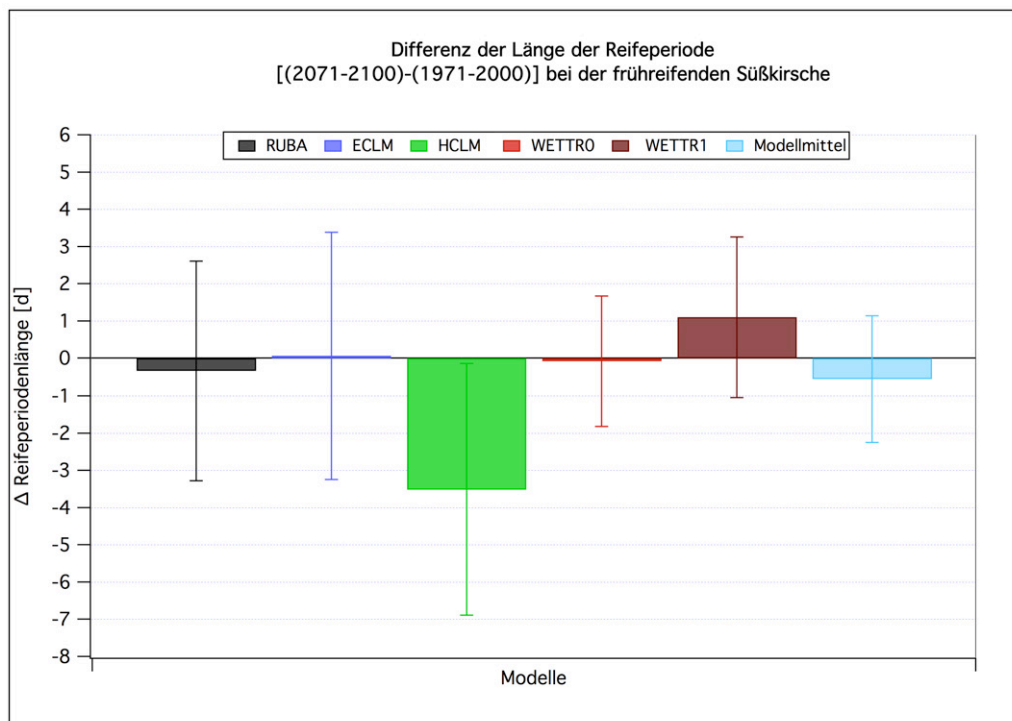


Abbildung 5.14: Differenz der **Länge der Reifeperiode** [(2071-2100)-(1971-2000)] bei der **frühreifen Süßkirsche** gemäß Modell-10a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM's. Gebietsmittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

Abbildung 5.15 zeigt schließlich die Verhältnisse beim Wein, bei dem in Zukunft eine signifikante, leichte Verkürzung der Reifeperiode um ca. 3 Tage zu erwarten ist. Dass sich der Wein anders verhält als die anderen hier betrachteten Fruchtarten, liegt daran, dass seine Blüte viel später (im Mittel 1971-2000 erst am 16. Juni) stattfindet, wohingegen die anderen Fruchtarten im April oder Anfang Mai blühen (vgl. [Abbildung C.1](#)). Die prognostizierten, mittleren Veränderungen der Tagesmitteltemperatur sind im Juni aber um ca. 1.5 K höher als im April (vgl. [Tabelle B.1](#)).

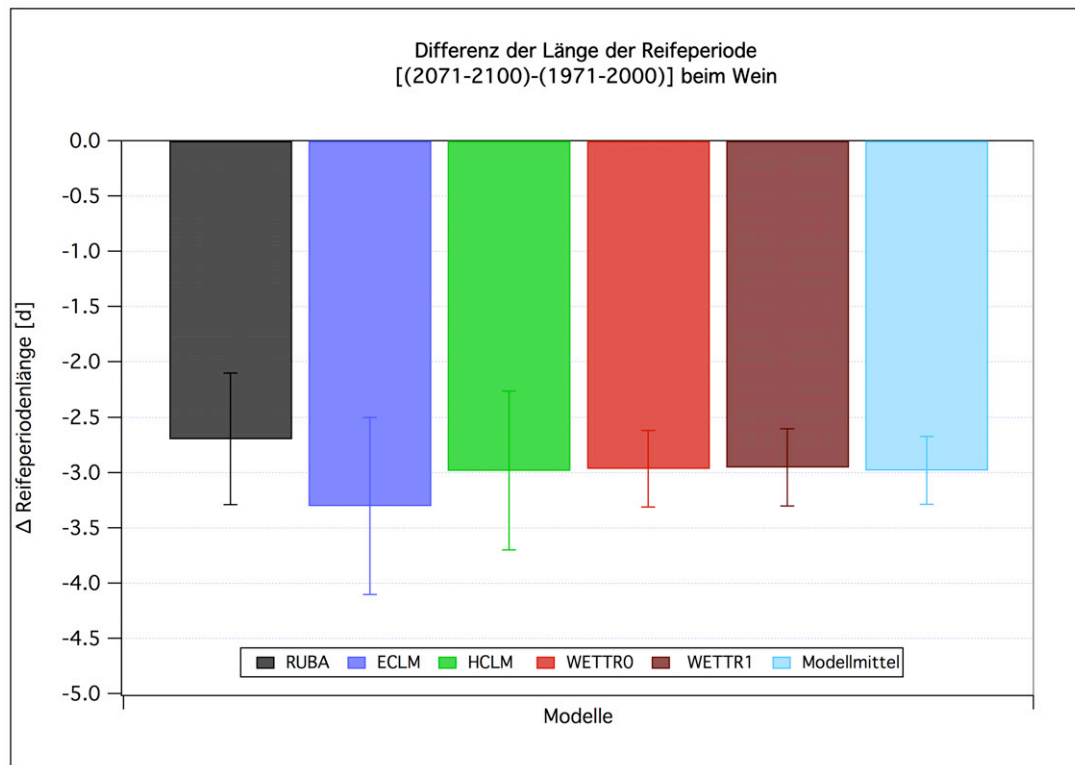


Abbildung 5.15: Differenz der **Länge der Reifeperiode** [(2071-2100)-(1971-2000)] beim **Wein** gemäß Modell-10a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM's. Gebietsmittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte.

Abbildung 5.16 vergleicht noch einmal alle drei in den vorhergehenden Abschnitten diskutierten, phänologischen Phasen für den Zeitraum 1971-2000 und 2071-2100 für den frühreifen und spätreifen Apfel, wobei die eingezeichneten Werte jeweils Mittelwerte über die mit den Daten der 5 regionalen Klimamodelle berechneten phänologischen Phasen sind. Die innerhalb der Balken angegebenen Zahlenwerte sind die Länge der Blühphase (Beginn bis Ende der Blüte) und die Länge der Phase von Blühende bis Pflückreife. Die Zahlen unterhalb der Balken sind die den Phasen zugeordneten "Tage im Jahr" (DOY). Die Phasen *Blühbeginn* und *Blühende* treten im Mittel im Zeitraum 2071-2100 gegenüber 1971-2000 um 18 Tage verfrüht auf. Die Reifeperiode ist dabei aber im Zeitraum 2071-2100 um 3 bzw. 6 Tage länger als 1971-2000.

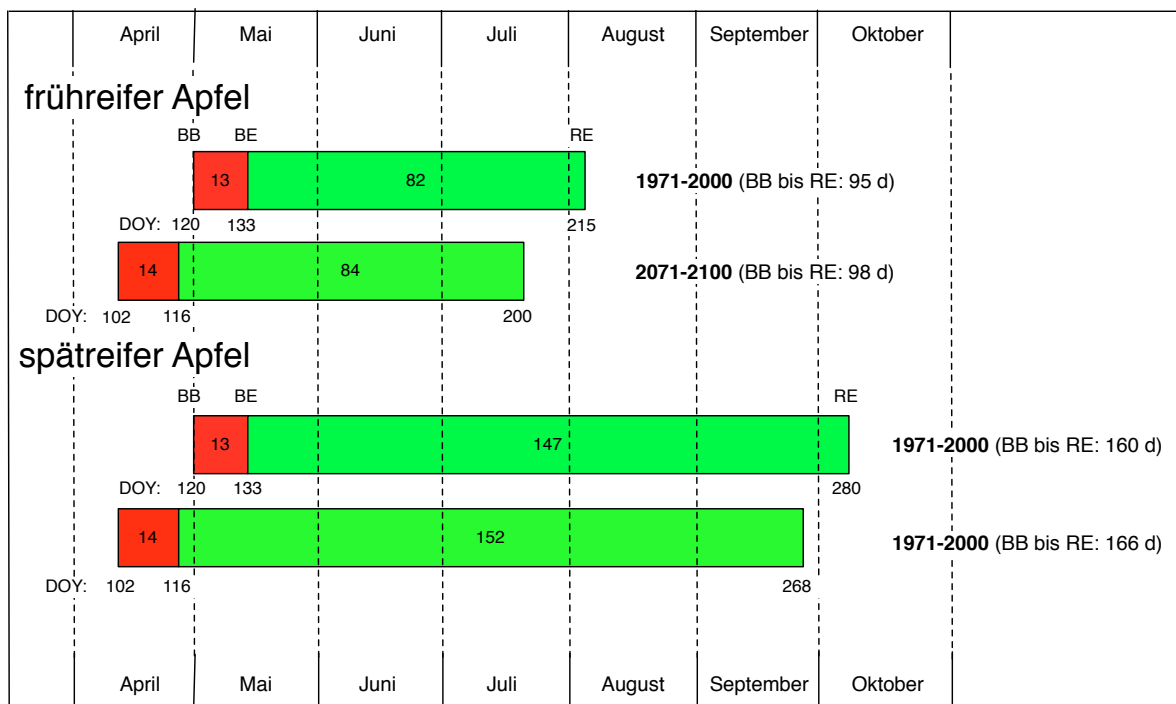


Abbildung 5.16: Mögliche Verschiebung der phänologischen Phasen [BB=Blühbeginn (BBCH60); BE=Blühende (BBCH69); RE=Pflückreife (BBCH87)] für früh- und spätreifenden Apfel, 2071-2100 vs. 1971-2000, Mittelwerte über die mit den 5 regionalen Klimamodellläufen berechneten Ergebnisse.

Zusammenfassung: Über die zukünftige Entwicklung des Beginns der Pflückreife und der Reifeperiodenlänge kann man folgende Aussagen treffen: Der Beginn der Pflückreife verfrüht sich bei allen Fruchtarten hoch signifikant zwischen 11.5 d beim spätreifen Apfel und 19.0 d bei der spätreifen Pflaume. Die Weinlese verschiebt sich sogar um 21.1 d zu früheren Terminen hin. Die Länge der Reifeperiode vergrößert sich beim Apfel und bei der Birne signifikant um 3.4 d beim frühreifen und 6.5 d beim spätreifen Apfel bis zu 6.8 d bei der frühreifen Birne (5.3 d bei der spätreifen Birne). Beim Wein verkürzt sich die Reifeperiode um 3 d (gerechnet bis zur *Pflückreife*) und um 6 d (gerechnet bis zur *Weinlese*). Diese Verkürzung kann durch den späten Blühtermin (Anfang bis Mitte Juni) erklärt werden, denn der Temperaturanstieg ist im Mai und Juni größer als im März und April (Abbildung B.1). Alle anderen Obstarten zeigen keine signifikanten Veränderungen in der Reifeperiodenlänge.

5.3 Mögliche Veränderungen im Ende der Winterruhe t_1 , bei der Wahrscheinlichkeit P_D für unvollständige Brechung der Dormanz, beim relativen Chilling-Defizit d_{rel} und beim Dormanzschaden s_D

Der Termin t_1 , an dem die Dormanz gebrochen wird, bzw. die Wahrscheinlichkeit P_D , dass die Dormanz nicht gebrochen wird, hängt, wenn man das Chilling-Requirement C^*

als festen Wert vorgibt, in den hier verwendeten Modellen nur vom Lufttemperaturverlauf $[T_n, T_x = f(t)]$ und vom verwendeten Chilling-Modell ab. Der Lufttemperaturverlauf wiederum hängt vom verwendeten regionalen Klimamodell ab. P_D ist nur indirekt über C^* von der Fruchtart und -sorte abhängig.

5.3.1 Veränderung im Ende der Winterruhe bei Vorgabe verschiedener C^* -Werte

Sehr interessante Ergebnisse erhält man, wenn man mit Hilfe der reinen Chillingmodelle (siehe Abschnitt 4.6.1.2) den Tag t_1 der Dormanzbrechung für verschiedene, fest vorgegebene Chilling-Requirements C^* berechnet. Die **Abbildungen 5.17 bis 5.19** zeigen das Resultat:

Im Chilling-Modell 1b (Weinberger-Eggert; **Abbildung 5.17**) ändert sich die Differenz der 30-jährigen Mittelwerte von t_1 (jeweils als Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen) zwischen den Zeiträumen 1971-2000 und 2071-2100 nur geringfügig mit C^* . Je nachdem, welches RCM die Temperaturen zur Berechnung von t_1 liefert, verändert sich allerdings die Größe der Differenz. Die Temperaturen aus dem ECLM liefern die kleinsten Änderungen, die aus dem HCLM die größten Änderungen. Auf Grund dieser großen Schwankungsbreite sind die 95 %-Konfidenzintervalle (senkrechte Linien) des Mittelwerts über alle 5 Modelle (dunkelgrüne, dicke Linie) auch sehr breit (bis ± 15 Tage). In der Info-Box innerhalb der Abbildung sind die (absoluten) Mittelwerte von t_1 als Mittelwert über die 5 Klimamodellläufe für den Zeitraum 1971-2000 für $C^* = 700$ CH ($t_1 = 30$. November) und für 1800 CH ($t_1 = 20$. Februar) eingetragen. Diese absoluten Werte von t_1 nehmen natürlich mit steigendem C^* im Gegensatz zu den Differenzen monoton zu.

Beim *Positive Utah Model* (Modell 1f) (**Abbildung 5.18**) nehmen die Veränderungen in t_1 mit steigendem C^* ab und werden für große C^* sogar negativ. D. h., dass sich t_1 in der Zukunft bei Pflanzen mit sehr großem Chilling-Requirement verfrühen wird, falls dieses Modell die Realität richtig beschreibt. — Die (absoluten) Mittelwerte von t_1 liegen für $C^* = 700$ CU/20 \cdot 24 = 840 CU im Zeitraum 1971-2000 um ca. 2 Wochen früher (14. November) als bei Modell 1b (30. November), und bei $C^* = 1800$ CU/20 \cdot 24 = 2160 CU liegt t_1 um ca. 3 Wochen später (14. März) als im Modell 1b (20. Februar).⁵

Beim *Dynamic Model* (Modell 1g) ist die Abnahme der Veränderung von t_1 mit zunehmendem C^* nicht so groß wie bei Modell 1f (**Abbildung 5.19**). Die absoluten Werte stimmen für $C^* = 700/18$ CP = 38.9 CP gut mit denen von Modell 1f überein. Bei $C^* = 1800/18$ CP = 100 CP liegen die Termine zwischen denen von Modell 1b und Modell 1g vorhergesagten Werten.

Viele Autoren (z.B. Fishman et al., 1987, Chmielewski et al., 2013, Darbyshire et al., 2011, Dennis, 2003 und Pérez et al., 2008) behaupten, dass das Modell 1b in wärmeren Klimaten bzw. in Zukunft bei wärmeren Wintern unzuverlässigere Ergebnisse liefert als die Modelle 1f und 1g, wobei Modell 1g wahrscheinlich die besten Resultate berechnet, da es stärker physiologisch-basiert ist.

⁵ Zur besseren Vergleichbarkeit wurde hier die in Kapitel 4.6.6 erwähnte, approximative Umrechnungsformel zwischen den CH, CU und CP verwendet ($1/24$ CD = 1 CH \approx 1 (CU/20) \cdot 24 \approx 1 CP/18). Für große C^* wäre allerdings die in Abschnitt 5.3.5 erwähnte Umrechnung korrekter. Da die Werte in den Graphiken aber mit den exakten C^* -Werten (d. h. mit z. B. 700 CU/20 \cdot 24 = 840 CU für Modell 1f und den Ordinatenwert "700") berechnet wurden, sind die Umrechnungsfaktoren nur beim direkten Vergleich zwischen den verschiedenen Modellen/Graphiken von Bedeutung.

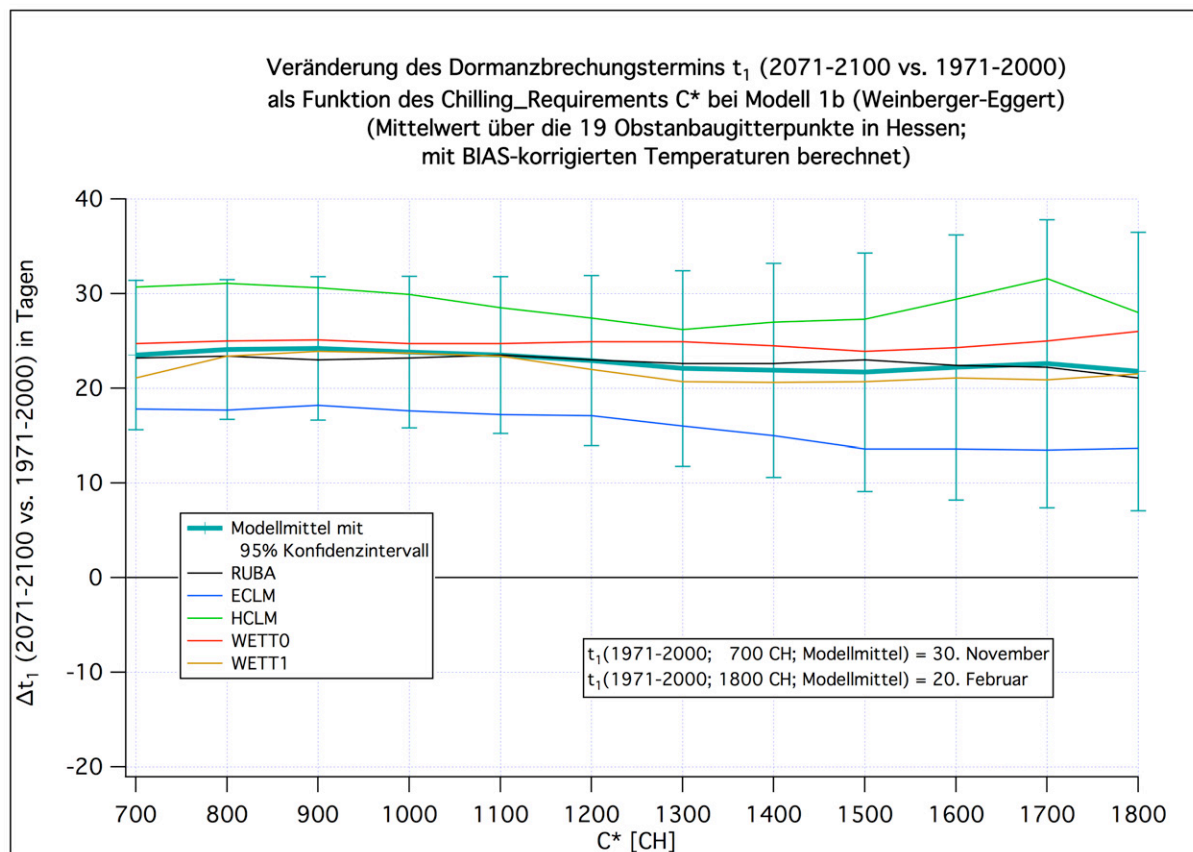


Abbildung 5.17: Veränderung des Dormanzbrechungstermins t_1 (2071-2100 vs. 1971-2000) als Funktion von C^* bei **Modell 1b** (Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen)

Bei Pflanzen mit einem hohen Chilling-Requirement C^* ist eine mögliche weitere Verspätung des bereits spät liegenden Dormanzbrechungstermins t_1 besonders kritisch. Die beiden letztgenannten Modelle prognostizieren aber gerade für solche Pflanzen nur eine geringe Verspätung oder gar eine Verfrühung des Endes der Winterruhe für die Zukunft. Daher sollte sich die Gefahr von Problemen mit unzureichendem Kältereiz und daraus basierender unvollständiger Brechung der Dormanz in Zukunft nicht merklich vergrößern. Diese Vermutung wird auch in den folgenden Abschnitten bestätigt, in dem Ergebnisse für die Wahrscheinlichkeit einer unvollständigen Brechung der Dormanz vorgestellt werden.

Weiterführende, interessante Ergebnisse zum Dormanzbrechungstermin und seiner möglichen, zukünftigen Verschiebung sowie zu seiner Abhängigkeit von C^* und der geographischen Lage findet man in [Chmielewski et al. \(2013\)](#).

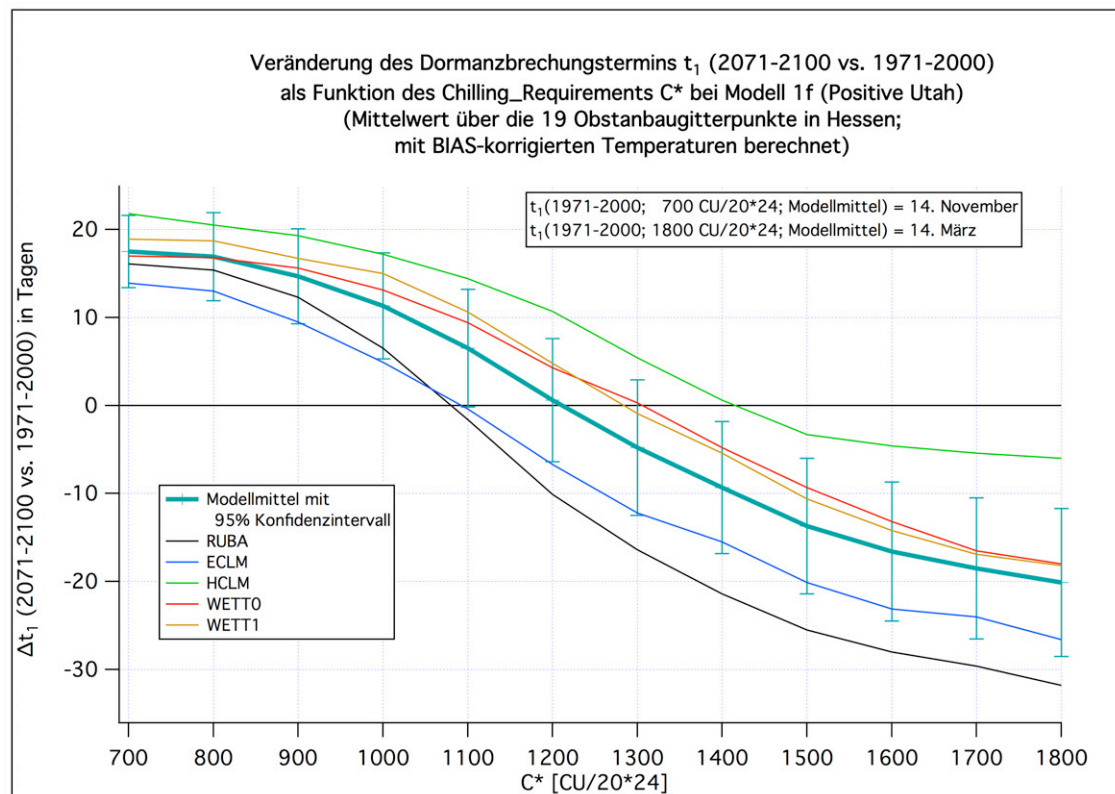


Abbildung 5.18: Veränderung des Dormanzbrechungstermins t_1 (2071-2100 vs. 1971-2000) als Funktion von C^* bei **Modell 1f** (Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen)

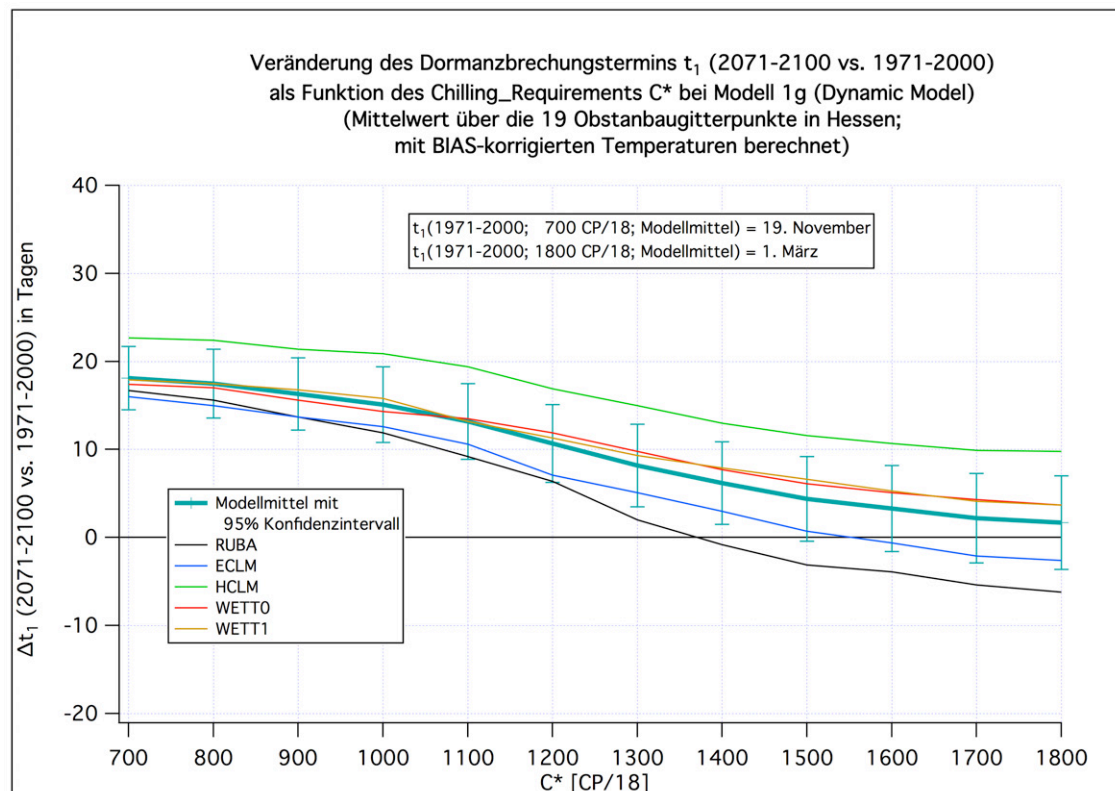


Abbildung 5.19: Veränderung des Dormanzbrechungstermins t_1 (2071-2100 vs. 1971-2000) als Funktion von C^* bei **Modell 1g** (Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen)

5.3.2 Wahrscheinlichkeit für unvollständige Brechung der Dormanz beim Weinberger-Eggert Modell (Modell 1b) und $C^* = 1600$ CH

Die linken Bilder der **Abbildung 5.20** zeigen die Wahrscheinlichkeit, dass die Dormanz im Zeitraum 1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten) überhaupt nicht gebrochen wird ($t_s = 200$ bzw. t_1 undefiniert; NoReleaseProb200), wenn das Chilling-Requirement C^* 1600 CH beträgt. Auf der rechten Seite ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Dormanz erst nach dem 31. März (90 DOY bzw. 455 DOY) gebrochen wird, für die beiden Zeiträume dargestellt (NoReleaseProb90). Gezeigt werden Gebietsmittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (siehe **Abbildung 4.19**) in Hessen für die drei dynamischen Modelle, für die zwei WETTREG-Läufe, für den Mittelwert über alle 5 Modelle und aus DWD-Temperaturen berechnete Werte (grau; nur für 1971-2000).

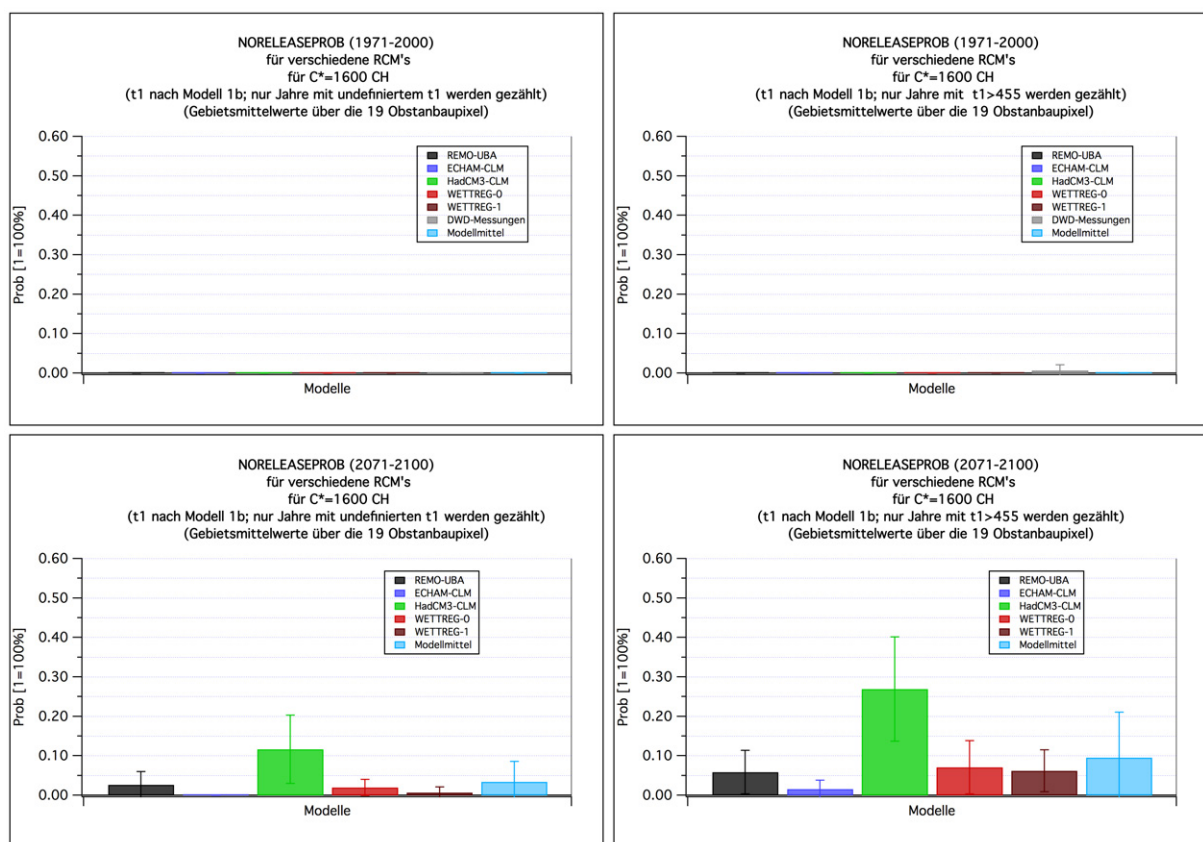


Abbildung 5.20: Links: NoReleaseProb200 (nur undefinierte Werte werden gezählt) für den Zeitraum 1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten) für die 5 RCM's und den Mittelwert über diese 5 Modelle. Rechts: NoReleaseProb90 (nur Termine ab dem 1. April werden gezählt). Modell 1b bei $C^* = 1600$ CH, Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen.

Die NoReleaseProb90 ist natürlich größer als die NoReleaseProb200, da bei ihr auch Dormanzbrechungstermine t_1 nach dem 31. März und nicht nur undefinierte t_1 gezählt werden.

Im Zeitraum 1971-2000 zeigen nur die "DWD-Werte für nach dem 31. März" mit 0.7% NoReleaseProb90-Werte, die größer als 0.0% sind (siehe **Tabelle G.2** im Anhang G). Diese sind aber statistisch überhaupt nicht signifikant von null verschieden. In der Zukunft (2071-2100) zeigen nur die aus HCLM-Temperaturen berechneten Wahrscheinlichkeiten (grüne Balken in **Abbildung 5.20**; 26.9% \pm 13.2%) signifikant von null abweichende Wer-

te.⁶ Im Mittel über alle 5 Modelle ist die NoReleaseProb90 mit 9.5 % (± 11.5 %) (hellblauer Balken) nicht signifikant von null verschieden.

In **Abbildung 5.21** sind die Dormanzbrechungstermine für die Jahre 2002 bis 2100 (x-Achse) und alle 81 Gitterpunkte im politischen Hessen (y-Achse) farbig markiert. Weiße Rechtecke stehen für Termine nach dem 31. März, schwarze Einträge visualisieren undefinierte t_1 -Werte. Die Spalte ganz links im oberen Bild der Abbildung markiert die 19 Obstanbaugitterpunkte (schwarze, 3 rote und lila Markierungen), die 8 Weinbaugitterpunkte (rote Markierungen) und die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte (lila Markierungen).

Das oberste Bild wurde mit unkorrigierten RUBA-Temperaturen berechnet, das mittlere mit BIAS-korrigierten RUBA-Temperaturen und das untere mit BIAS-korrigierten HCLM-Temperaturen. Die Dormanzbrechungstermine liegen bei Nutzung der unkorrigierten RUBA-Temperaturen zum Ende des 21. Jahrhunderts hin zwar später und es treten mehr undefinierte und mehr Termine nach dem 31. März auf als bei Rechnung mit den BIAS-korrigierten Temperaturen, jedoch liegen die aus HCLM-Temperaturen berechneten Termine im Mittel noch später und es treten dort bereits vor 2100 sehr späte Werte auf (z. B. 2008 und 2009). Im Mittelwert über alle Jahre und Gitterpunkte ergibt sich für das obere Bild ein Mittelwert für t_1 von 397 DOY (1. Februar), für das mittlere Bild erhält man 398 DOY (2. Februar) und für das untere Bild ergibt sich 410 DOY (14. Februar).

Abbildung 5.22 zeigt die Dormanzbrechungstermine für den Zeitraum 1962-2000, die aus DWD-Messungen (oberes Bild; hier Ergebnisse bis 2009), RUBA-Temperaturen⁷ (Szenario C20) und WETTREG2010-Temperaturen (Lauf 0) berechnet wurden. Erstaunlich ist, dass bereits in der Gegenwart bei Benutzung von DWD-Messungen viele Fälle mit $t_1 > 455$ DOY (nach dem 1. März) auftreten (z. B. 1963, 1970 und 1996). Berechnet man aus dem oberen Bild die NoReleaseProb90 für den Zeitraum 1971-2000, so erhält man hierfür 2.3 % (± 4.3 %; vgl. **Tabelle G.1**). Aus dem mittleren Bild (RUBA) ergibt sich eine NoReleaseProb90 von nur 0.7 % (± 1.4 %).

Die mit WETTREG berechneten t_1 -Werte (unteres Bild) haben eine wesentlich geringere zeitliche Varianz als die mit den anderen Modellen berechneten, da die zeitliche Autokorrelation der WETTREG-Temperaturen zu klein ist und daher die Monatsmittelwerte zu kleine Varianzen aufweisen (vgl. Kapitel 4.1.5). Bei WETTREG (im unteren Bild) treten überhaupt keine Werte nach dem 31. März auf (NoReleaseProb90 = 0 %).

⁶ Auch RUBA, WETTR0 und WETTR1 sind leicht signifikant, aber nur, wenn man die Multiplizität (siehe Seite 293) vernachlässigt.

⁷ Im Folgenden werden nur noch BIAS-korrigierte Temperaturen verwendet.

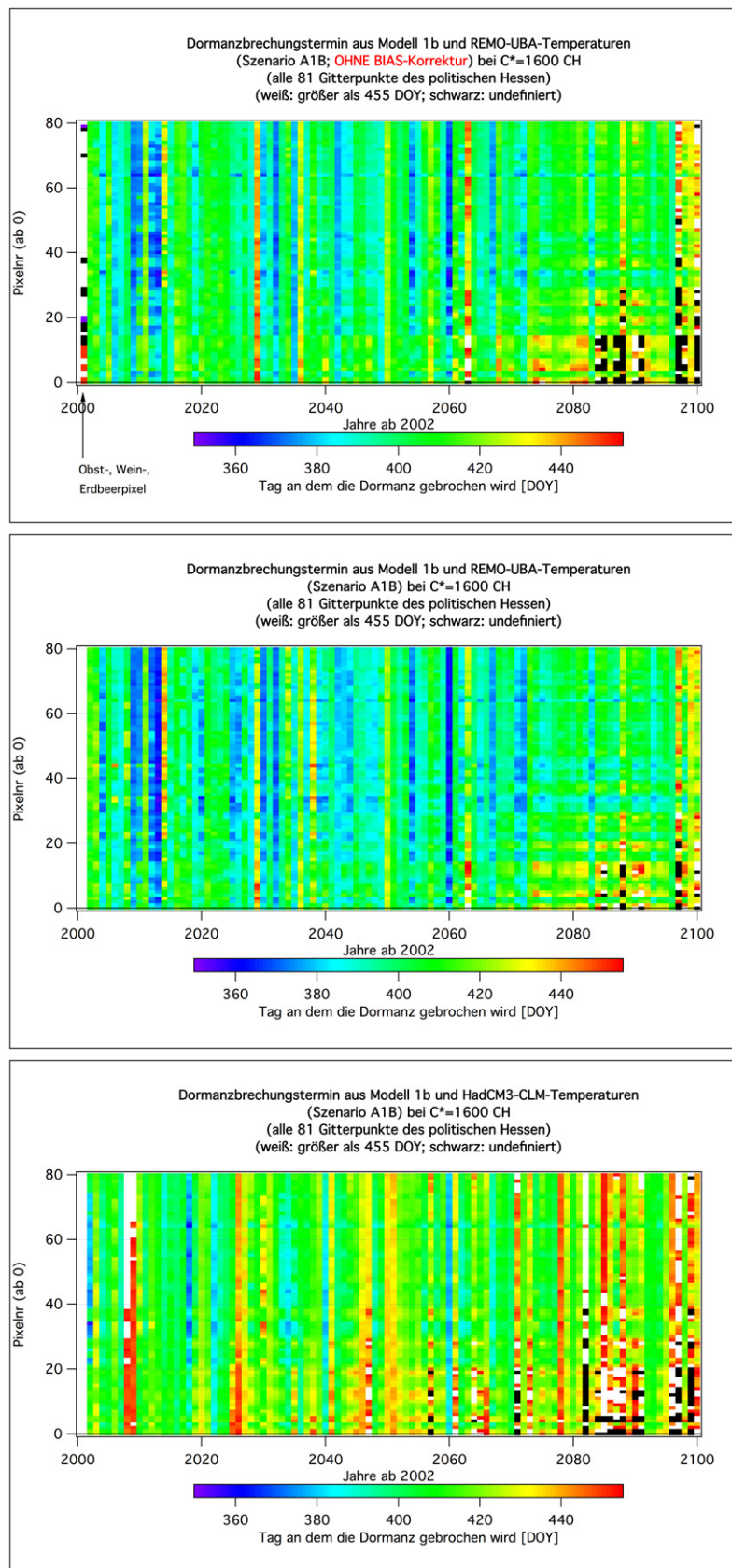


Abbildung 5.21: Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 2002-2100 für alle 81 Gitterpunkte in Hessen bei $C^* = 1600$ CH und Modell 1b. Oben: Aus RUBA-Temperaturen *ohne BIAS-Korrektur*; Mitte: Aus RUBA-Temperaturen *mit BIAS-Korrekturen*; Unten: Aus HCLM-Temperaturen *mit BIAS-Korrekturen* (jeweils Szenario A1B).

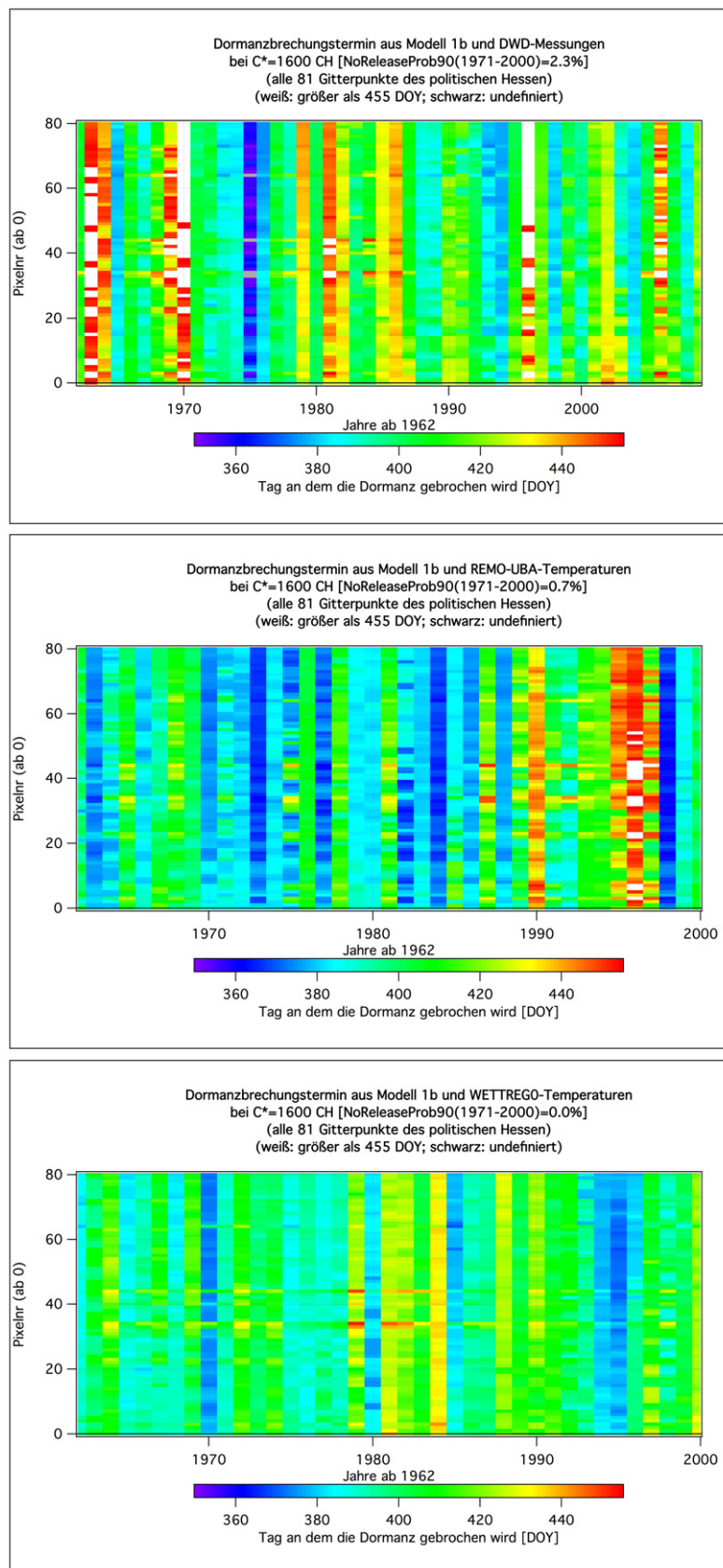


Abbildung 5.22: Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 1962-2009 bzw. 1962-2000 für alle 81 Gitterpunkte in Hessen bei $C^* = 1600$ CH und Modell 1b. Oben: Aus DWD-Temperaturen; Mitte: Aus REMO-UBA-Temperaturen; Unten: Aus WETTREG-Lauf0-Temperaturen. (Graue Rechtecke: Werte kleiner 350 DOY.)

Der zeitliche Verlauf des Mittelwerts der NoReleaseProb90⁸ über die 19 Obstanbaugitterpunkte für die 5 Modelle ist in **Abbildung 5.23** dargestellt. Man erkennt, dass die “Ereignisse” (Nichtbrechung der Dormanz) scheinbar ziemlich zufällig in bestimmten Jahren *gehäuft* auftreten (d. h. die NoReleaseProb90 nimmt große Werte an). Darin äußert sich die räumliche Korrelation der Gitterpunkte untereinander. Es tritt zwar auch eine Häufung der Ereignisse zum Ende des 21. Jahrhunderts auf (vor allem beim HCLM und bei WETTREG), jedoch ist die Anzahl der Jahre für statistisch signifikante Aussagen beim “Modellmittelwert” nicht groß genug, zumal auch schon vor dem Jahr 2000 “Ereignisse” auftraten.

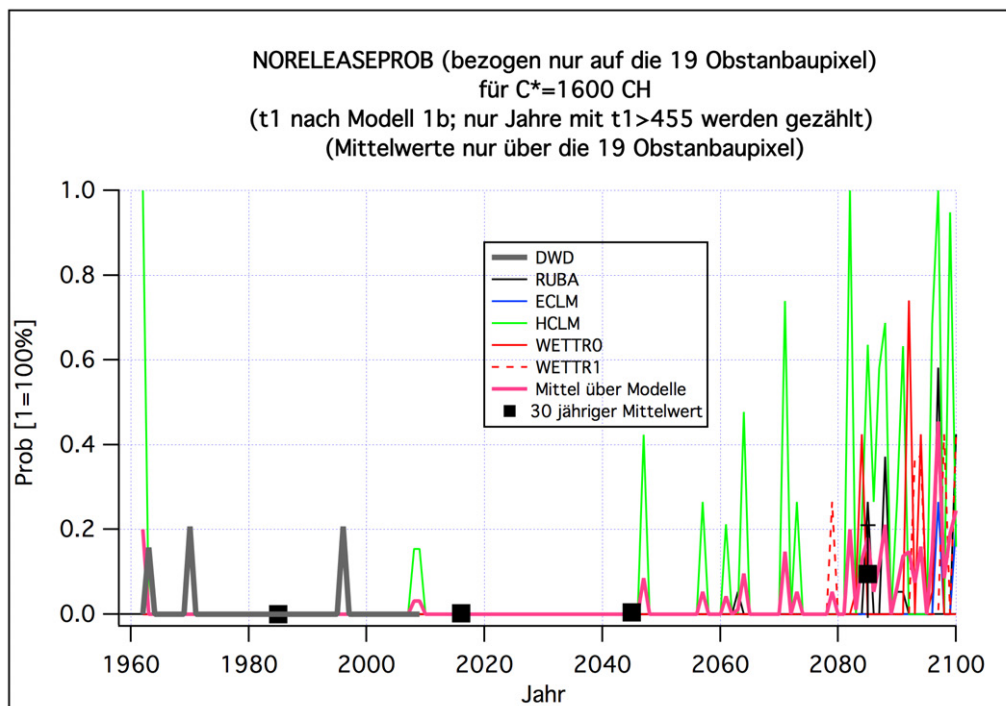


Abbildung 5.23: Räumliche Mittelwerte der “NoReleaseProb90” über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen aus DWD-Temperaturen und aus den 5 RCM’s. Modell 1b, $t_s = 90$ und $C^* = 1600$ CH.

Abbildung 5.24 vergleicht die Änderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) (obere Bilder) und den Trend über die Jahre 2011-2100 (untere Bilder), wenn man die Mittelwerte über alle 81 Gitterpunkte in Hessen (linke Bilder) und nur über die 19 Gitterpunkte mit Obstanbau (vgl. Kapitel 4.5) bildet (rechte Bilder). Die NoReleaseProb90 ist in den Obstanbaugebieten ca. zweimal so groß wie im Hessenmittel. Allerdings sind alle Differenzen und Trends, außer die beim HCLM (nur wenn man die Multiplizität vernachlässigt, sind auch WETTREG0, WETTREG1 und RUBA bei einem 95%-Signifikanzniveau leicht signifikant), nicht signifikant von null verschieden.

⁸ Genauer handelt es sich um den räumlichen Mittelwert über die Nullen und Einsen, die jedem Gitterpunkt in jedem Jahr zugeordnet werden (0 = Dormanz vor dem 1. April gebrochen; 1 = Dormanz erst nach dem 1. April gebrochen)

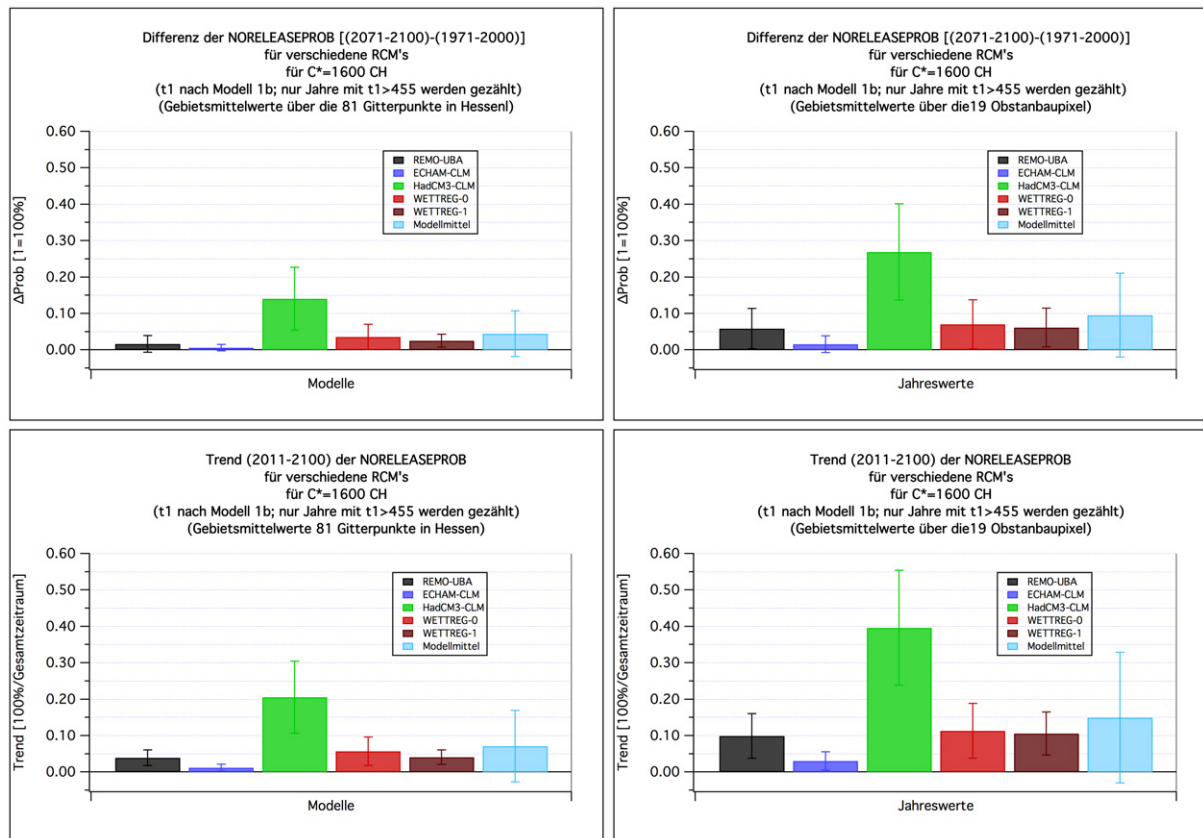


Abbildung 5.24: Links: Änderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 RCM's und den Mittelwert über diese 5 Modelle als Mittelwert *über die 81 Gitterpunkte im politischen Hessen*. Rechts: Differenz der NoReleaseProb90 und Trend für den Mittelwert *nur über die 19 Obstanbaupixel*. Für Modell 1b, $C^* = 1600$ CH und $t_s = 90$.

5.3.3 Beim Weinberger-Eggert Modell (Modell 1b) und $C^* = 1300$ CH und $C^* = 1000$ CH

Verringert man das Chilling-Requirement C^* von 1600 CH auf 1300 CH bzw. 1000 CH, so erhält man bei Nutzung von HCLM-Temperaturen anstelle des unteren Bildes in **Abbildung 5.21** die Bilder in **Abbildung 5.25**. Bei $C^* = 1300$ CH beträgt die NoReleaseProb90 im Zeitraum 2071-2100 nur noch 0.9 % (± 1.8 %).⁹ Nur 2082 wird die Dormanz an einigen Gitterpunkten erst nach dem 31. März erreicht oder gar nicht gebrochen (oberes Bild).

Keine der NoReleaseProb90's und auch keine der Änderungen dieser Wahrscheinlichkeiten unterscheidet sich signifikant von null. Bei $C^* = 1000$ CH liegen alle Dormanzbrechungstermine vor dem Tag 439 (14. März). Alle Termine bis auf einen fallen sogar auf einen Termin vor dem Tag 423 (27. Februar) (unteres Bild). Bis spätestens Ende Februar ist an allen Gitterpunkten und unabhängig davon, von welchem RCM die Temperaturen verwendet wurden, die Dormanz gebrochen. In vielen Jahren wird die Dormanz bereits vor dem 16. Dezember (350 DOY) gebrochen (graue Rechtecke).

⁹ Das ist gleichzeitig der größte Wert aller betrachteten Modelle in diesem Zeitraum.

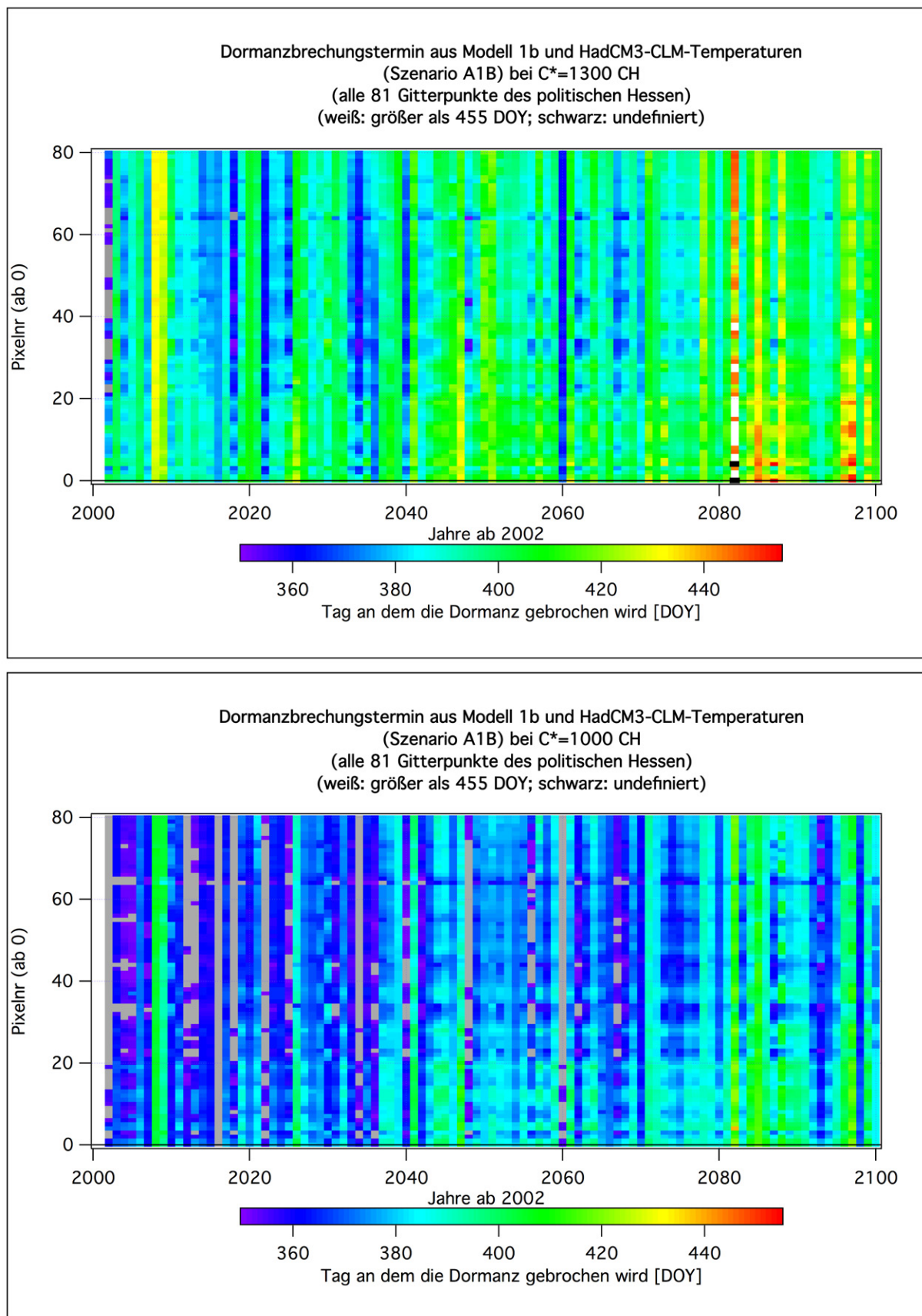


Abbildung 5.25: Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 2002-2100 für alle 81 Gitterpunkte in Hessen gemäß Modell 1b bei $C^* = 1300$ CH (oben) und $C^* = 1000$ CH (unten) bei Verwendung von HCLM-Temperaturen (BIAS-korrigiert). (Graue Rechtecke: Werte kleiner als 350 DOY.)

5.3.4 Beim Dynamic Model (Modell 1g) und $C^* = 89$ CP

Verwendet man die in Kapitel 4.6.6 erwähnte Umrechnungsformel “18 CH = 1 CP”, so entspricht ein C^* von 1600 CH beim Weinberger-Eggert-Modell (Modell 1b) in etwa 89 CP beim *Dynamic Model* (Modell 1g). Die mit diesem Modell und aus den Temperaturen der 5 regionalen Klimamodelle berechnete NoReleaseProb90, deren Änderung (2071-2100 vs. 1971-2000) und deren Trend (2011-2100) sind in **Abbildung 5.26** aufgetragen. Die Werte sind Gebietsmittelwerte über alle 81 Gitterpunkte in Hessen. Der Maximalwert der y-Skala wurde hier nicht kleiner als 0.35 gesetzt, um die sehr kleinen Werte der dargestellten Größen gegenüber den anderen Abbildungen nicht überzubetonen.

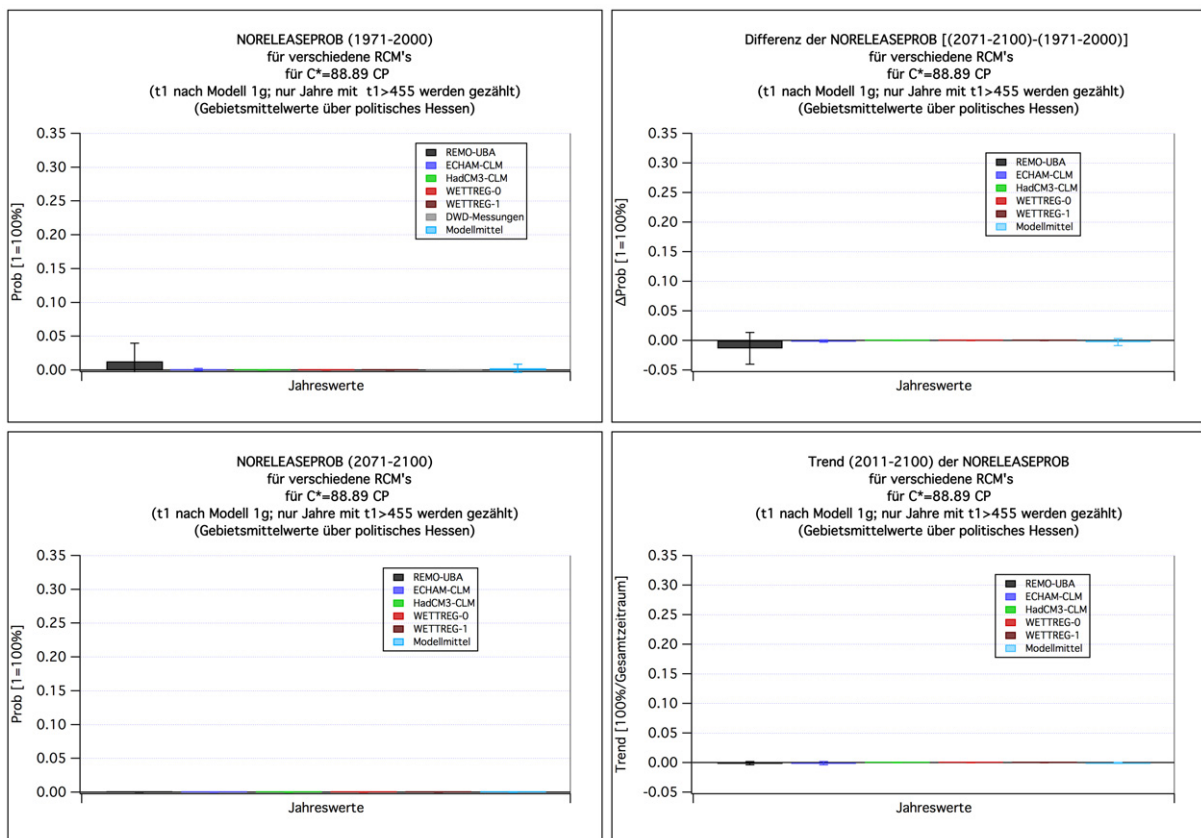


Abbildung 5.26: Links: NoReleaseProb90 (1971-2000) (oben) und (2071-2100) (unten). Rechts: Änderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 RCM's und den Mittelwert über diese 5 Modelle als Mittelwert über die 81 Gitterpunkte im politischen Hessen. Für Modell 1g, $C^* = 89$ CP und $t_s = 90$.

Nur die mit RUBA-Temperaturen berechnete NoReleaseProb90 weist im Zeitraum 1971-2000 einen erwähnenswerten Betrag auf [1.3 % (± 2.7 %)]; Bild oben links und **Tabelle G.9**]. Im Zeitraum 2071-2100 sind alle Wahrscheinlichkeiten identisch null (unten links). Die Änderungen (2071-2100 vs. 1971-2000) sind daher im Gegensatz zum Modell 1b negativ (oben rechts). Diese Änderungen sind aber sehr klein und keinesfalls statistisch signifikant von null verschieden (sogar für RUBA beträgt der p-Wert 0.33 und ist damit wesentlich größer als 0.05). Betrachtet man Mittelwerte nur über die 19 Obstanbaugitterpunkte, so sind die mit RUBA berechneten Werte noch kleiner [NoReleaseProb90 = 0.2 % (± 0.4 %)]. Alle anderen Werte sind identisch null (**Tabelle G.10**).

Der zeitliche Verlauf der Dormanzbrechungstermine aus Modell 1g für den Zeitraum

1962-2000 und 2002-2100 ist in **Abbildung 5.27** eingezeichnet. Hierbei wurden die BIAS korrigierten Temperaturen aus RUBA benutzt. Die spätesten Termine treten 1995-1997 auf. Gegenüber dem Zeitraum 1962-2000 ist im Zeitraum 2002-2100 eine leichte Tendenz zur Verfrühung von t_1 festzustellen. Dieses Ergebnis ist konsistent zu dem in Abschnitt 5.3.1 in **Abbildung 5.19** dargestellten Verhalten der Veränderung von t_1 zwischen 1971-2000 und 2071-2000: Dort verfrüht sich t_1 für große C^* ($1600 \text{ CH} \approx 89 \text{ CP}$), wenn man RUBA-Temperaturen verwendet. Rechnet man jedoch mit den anderen Modellen oder bildet Modellmittelwerte, so errechnet man eine leichte Verspätung bzw. fast keine Veränderung.

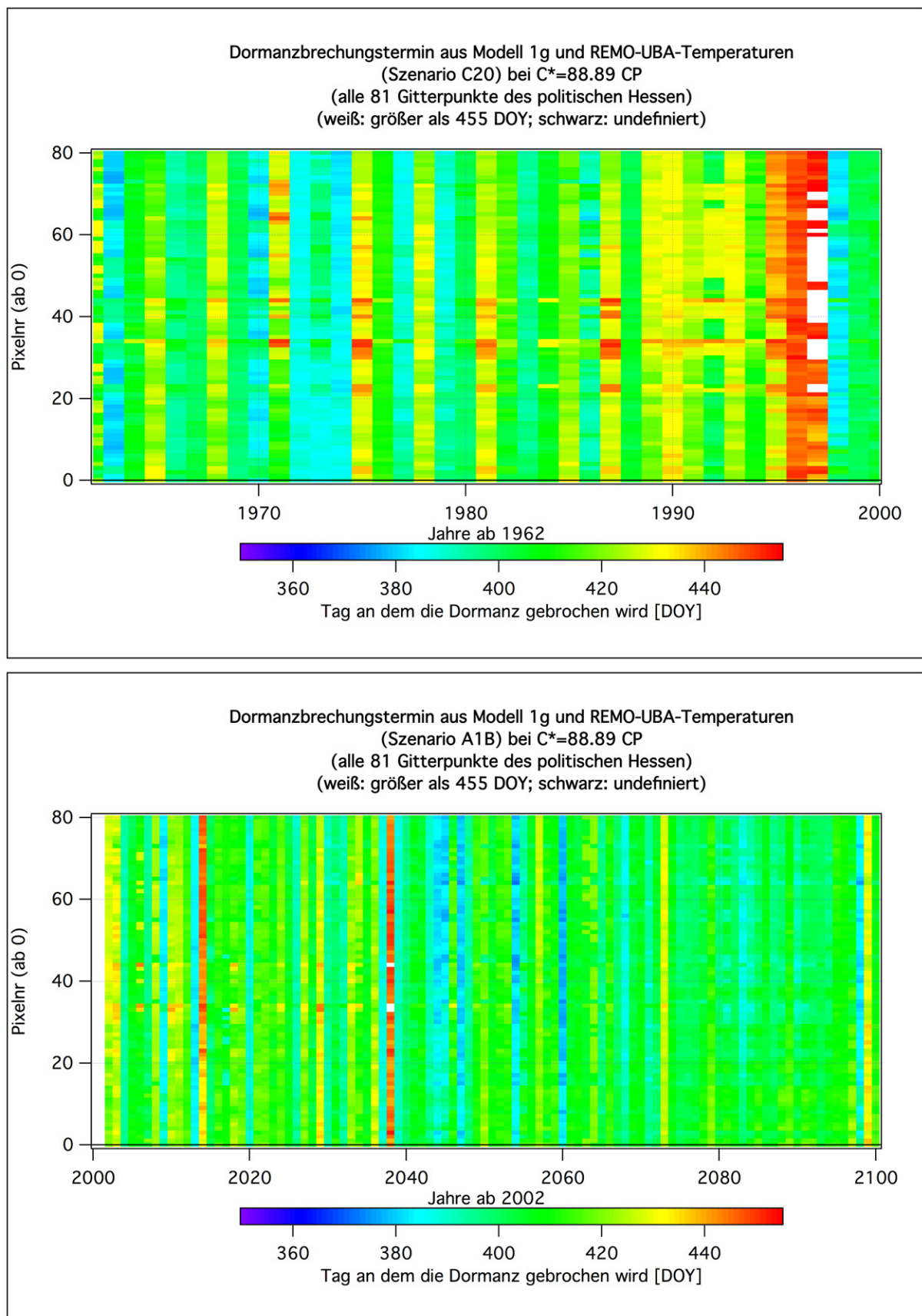


Abbildung 5.27: Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 1962-2000 (RUBA C20; oben) und 2002-2100 (RUBA A1B; unten) für alle 81 Gitterpunkte in Hessen gemäß Modell 1g bei $C^* = 89$ CP (mit BIAS-korrigierten Temperaturen berechnet).

5.3.5 Beim Positive Utah Model (Modell 1f) und $C^* = 1920$ CU

Beim *Positive Utah Model* wurde zunächst ebenfalls die in Kapitel 4.6.6 erwähnte Umrechnungsformel “20 CH = 24 CU” verwendet (siehe auch Fußnote 5 auf Seite 199). Hiermit ergaben sich aber bereit in der Gegenwart viel zu hohe NoReleaseProb90-Werte (Abbildung 5.28 und 5.29).

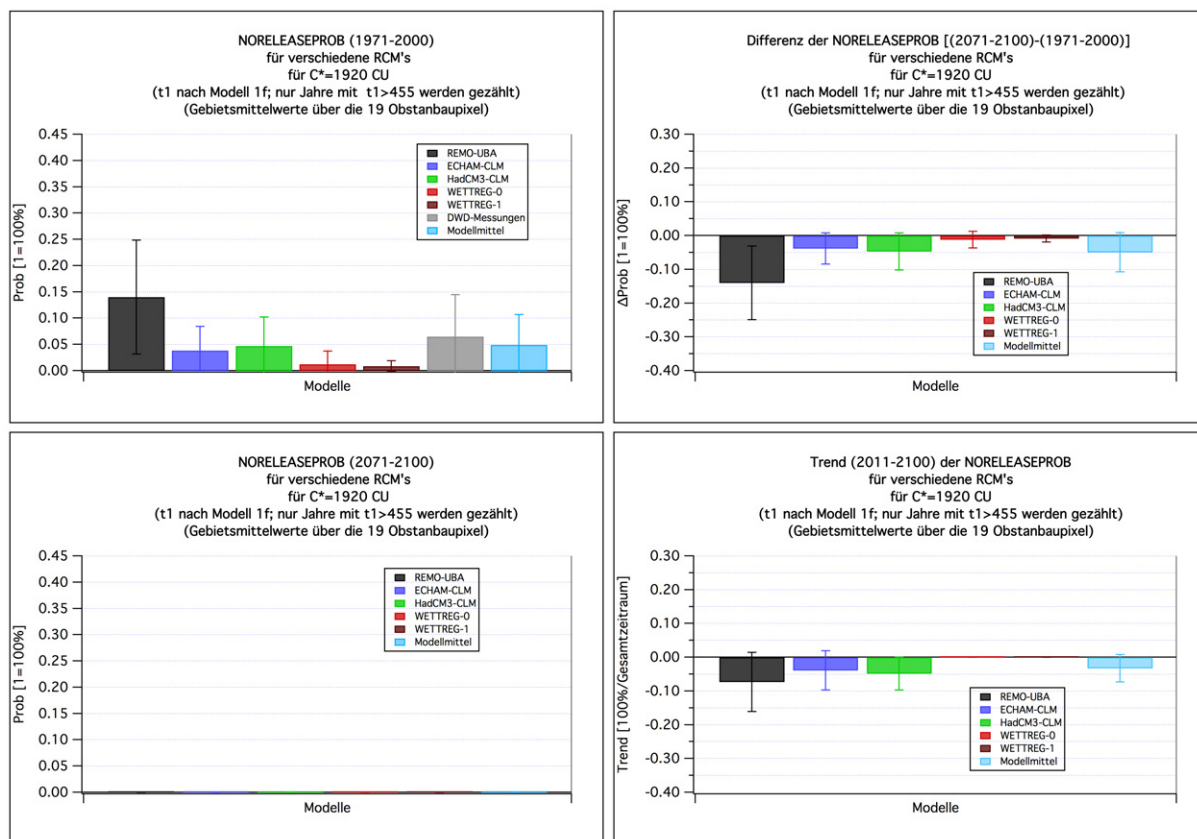


Abbildung 5.28: Links: NoReleaseProb90 (1971-2000) (oben) und (2071-2100) (unten). Rechts: Änderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 RCM's und den Mittelwert über diese 5 Modelle als Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen. Für Modell 1f, $C^* = 1920$ CU und $t_s = 90$.

Bei Benutzung von REMO-UBA-Temperaturen erhält man z. B. eine NoReleaseProb90 für den Zeitraum 1971-2000 von 14 % (± 11 %) (Abbildung 5.28 oben und 5.29 oben). Verwendet man DWD-Temperaturen (gemessene Werte), so beträgt die NoReleaseProb90 immerhin noch 6.5 %. Im Mittelwert über alle 81 Hessengitterpunkte erhält man sogar 26 % mit RUBA- und 12 % mit DWD-Temperaturen.

Die oben erwähnte Umrechnungsformel “20 CH = 24 CU” ist nur einigermaßen korrekt, wenn die Dormanzbrechungstermine t_1 um das Jahresende herum variieren. Tests ergaben, dass für sehr späte Termine um den 31. März herum folgende Formel zutreffender ist: “23.5 CH = 24 CU”. Mit dieser Faustformel erhält man dann 1632 CU als äquivalent zu 1600 CH. Die mit diesem Wert für C^* berechneten Ergebnisse sind im folgenden Kapitel dargestellt.

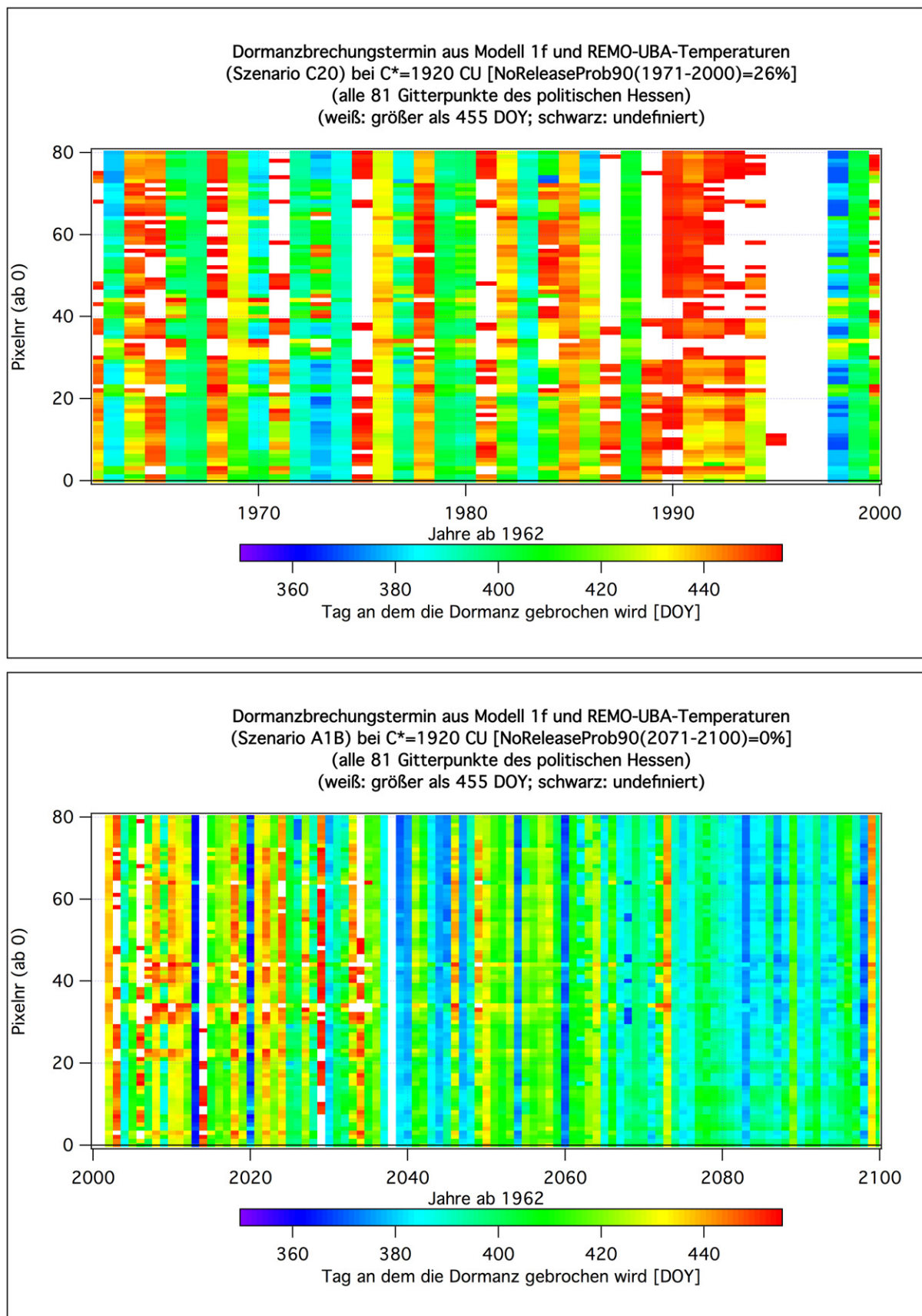


Abbildung 5.29: Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 1962-2000 (RUBA C20; oben) und 2002-2100 (RUBA A1B; unten) für alle 81 Gitterpunkte in Hessen gemäß Modell 1f bei $C^* = 1920$ CU (mit BIAS-korrigierten Temperaturen berechnet).

5.3.6 Beim Positive Utah Model (Modell 1f) und $C^* = 1632$ CU

Mit $C^* = 1632$ CU und Modell 1f erhält man die in **Abbildung 5.30** und **Abbildung 5.31** gezeigten Ergebnisse. Alle Ergebnisse sind zur Sicherheit 95 % (beidseitig) nicht signifikant von null verschieden.¹⁰ Es ist zwar eine leichte Tendenz zur Abnahme der NoReleaseProb90 zu erkennen, die allerdings auch zufällig zu Stande gekommen sein könnte und sich bei Nutzung anderer Daten ins Gegenteil verkehren könnte. Allerdings bestätigen die Ergebnisse der **Abbildung 5.18** eine Verfrüherung des Termins der *Release of Dormancy* in der Zukunft, wenn man hohe Chilling-Requirements voraussetzt und Modell 1f verwendet, woraus man folgern kann, dass sich die NoReleaseProb90 verringern muss.

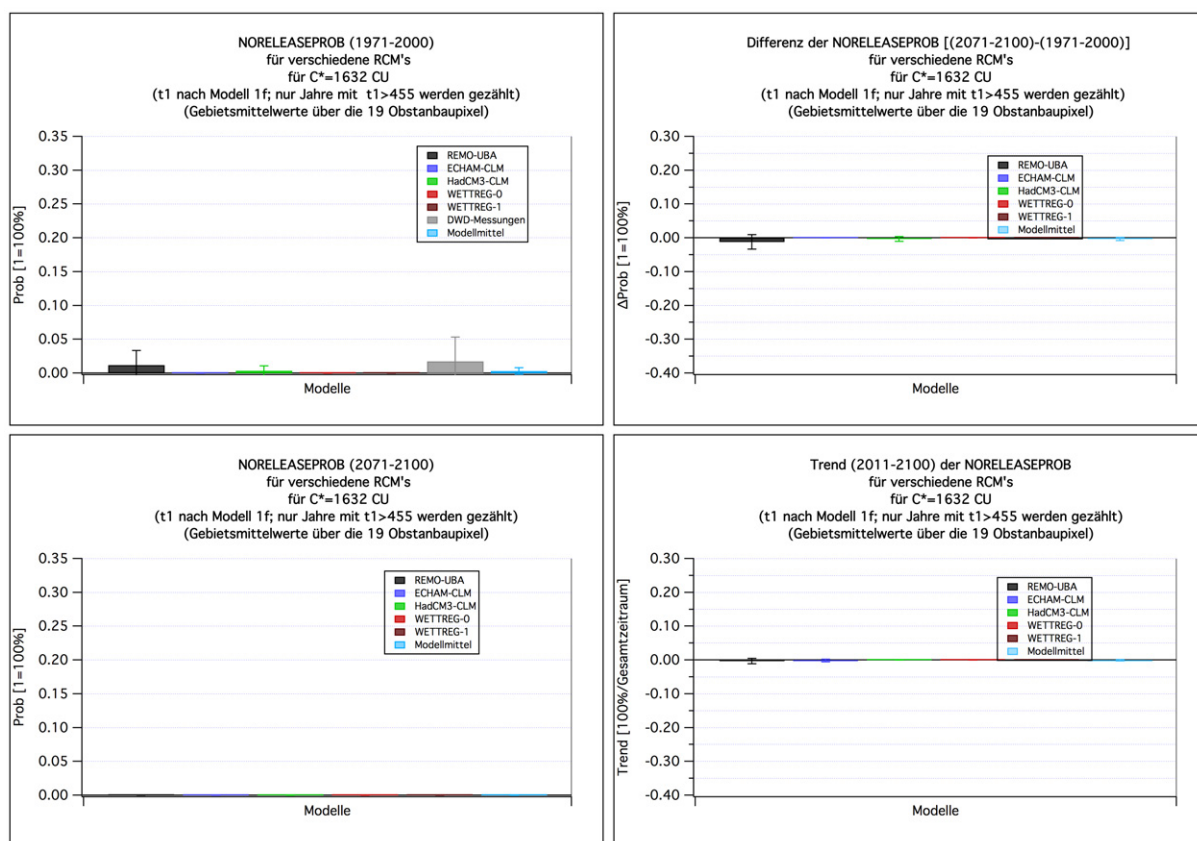


Abbildung 5.30: Links: NoReleaseProb90 (1971-2000) (oben) und (2071-2100) (unten). Rechts: Änderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 RCM's und den Mittelwert über diese 5 Modelle als Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen. Für Modell 1f, $C^* = 1632$ CU und $t_s = 90$.

Auffällig ist der graue Balken im Jahr 1963 in der **Abbildung 5.31** oben. Die Farbe grau wurde für Werte kleiner 350 DOY verwendet. Im Mittel wurde die Dormanz im Winter 1962-1963 bereits am 9. Dezember (343 DOY) gebrochen.

¹⁰ Die Fehlerbalken bzw. Konfidenzintervalle sind für kleine Wahrscheinlichkeiten zu klein dargestellt; siehe z. B. die Diskussion auf Seite 221 und die Fußnote 109 auf Seite 106.

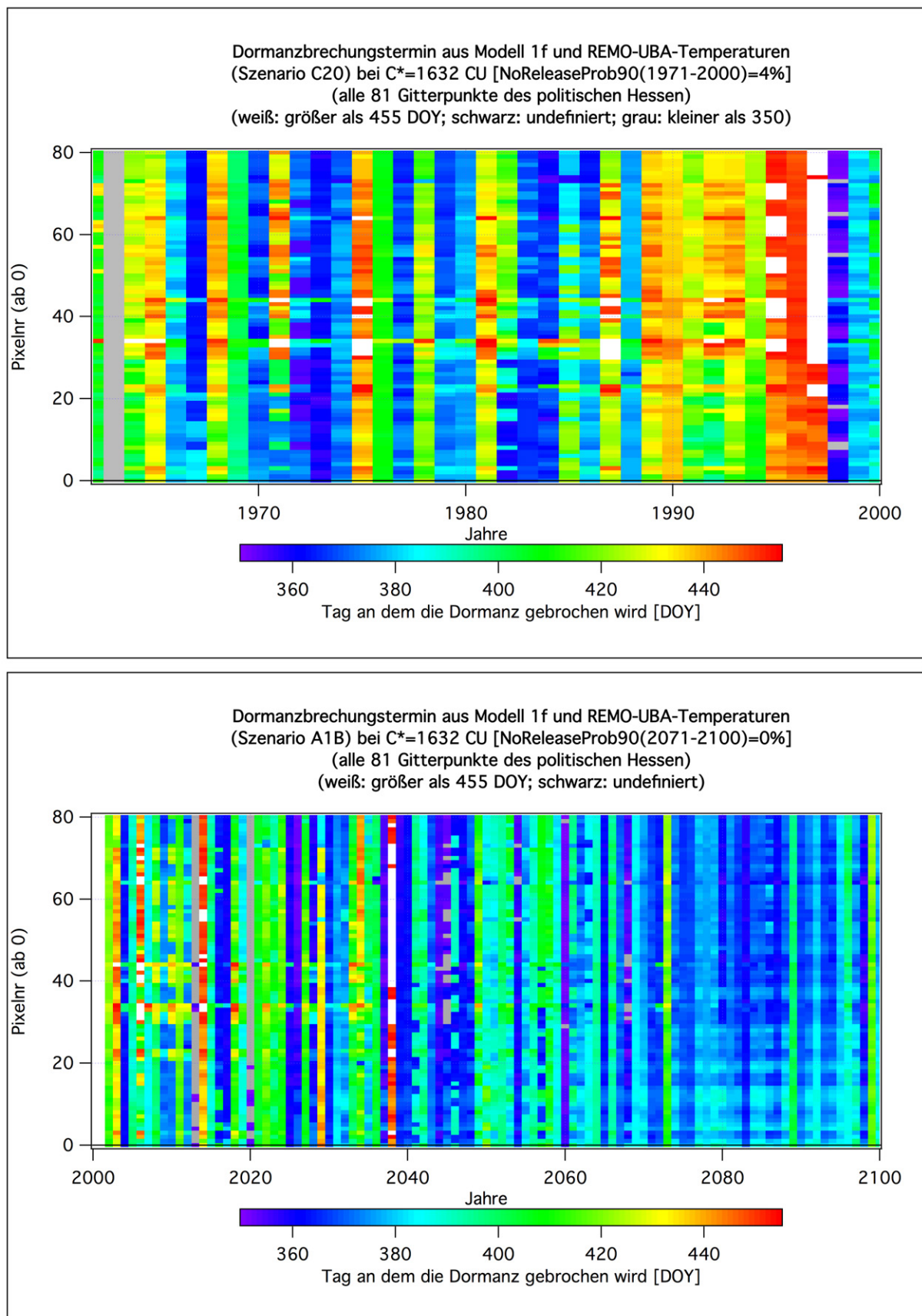


Abbildung 5.31: Dormanzbrechungstermine im Zeitraum 1962-2000 (RUBA C20; oben) und 2002-2100 (RUBA A1B; unten) für alle 81 Gitterpunkte in Hessen gemäß Modell 1f bei $C^* = 1632$ CU (mit BIAS-korrigierten Temperaturen berechnet). (Graue Rechtecke: Werte kleiner 350 DOY.)

Abbildung 5.32 erklärt, warum das so ist. Die Tagesmitteltemperaturen der Monate Oktober und November 1962 liegen fast genau in der Mitte des optimalen Chilling-Bereichs des Modells 1f. Dieser Bereich, in dem die Chilling-Rate-Funktion $R_c(T_{ih})$ den Wert 1 CU annimmt, erstreckt sich von $T_{ih} = 2.5\text{ °C}$ bis 9.2 °C . Diese beiden Temperaturen sind in der Abbildung als horizontale Linien eingetragen. Wenn die Tagesmittelwerte in der Mitte dieses Bereichs liegen, werden auch viele der stündlichen Temperaturwerte, mit denen das Chilling berechnet wird, in diesen Bereich fallen. In allen anderen Jahren sind die Oktober-Temperaturen für optimales Chilling zu warm und die November-Temperaturen zu kühl.

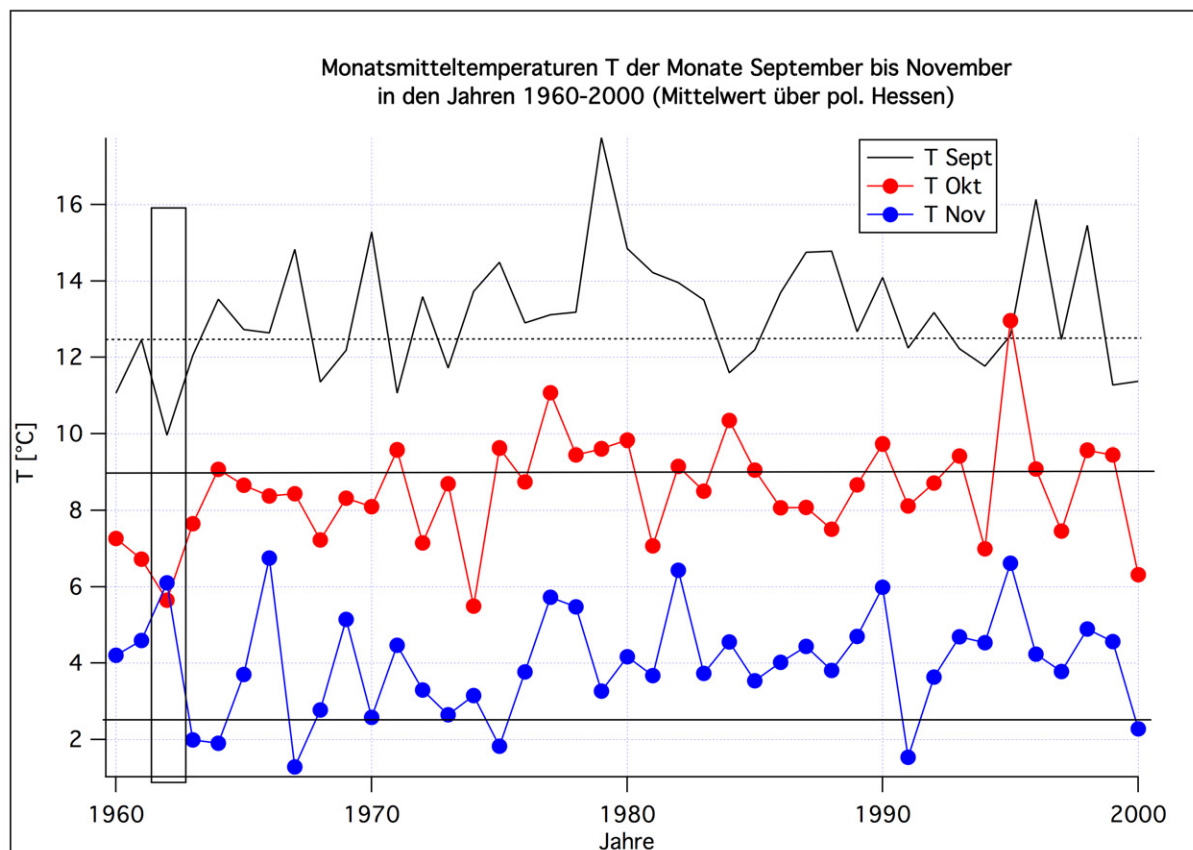


Abbildung 5.32: Monatsmitteltemperaturen der Monate September bis November und Schwellenwerte des Modell 1f [zwischen 2.5 °C und 9.2 °C beträgt $R_c(T_{ih}) = 1\text{ CU}$; vgl. Gleichung (4.41)]

5.3.7 Chillingsumme $S_c(t_s)$ bis zum Stichtag t_s

Die **Tabellen 5.3 bis 5.6** zeigen die Chillingsummen [Formel (4.36)] vom 1. September des Vorjahres bis zum Stichtag t_s (vgl. Tabelle 4.16).

Tabelle 5.3 wurde für den Stichtag $t_s = 106\text{ DOY}$ (16. April) des Apfels mit Hilfe des Chilling-Modells **1b** erstellt. Die Chillingsummen nehmen zwar zum Ende des 21. Jahrhunderts hin signifikant ab, aber sogar im Zeitraum 2071-2100 betragen die mittleren Chillingsummen noch über 2100 CH, so dass auch Sorten mit einem extrem hohen Chilling-Requirement im Mittel einen ausreichenden Kältereiz erhalten sollten. Die Werte in Klammern sind 95 %-Konfidenzintervalle. Das 5.5-fache dieser Werte entspricht ungefähr der zweifachen Standardabweichung der Jahreswerte [Gleichung (4.103)]. Das bedeu-

tet aber, dass z. B. beim HCLM im Zeitraum 2071-2100 in ca. 2.5% der Fälle (Jahre) $S_c(t_s) < 1370 \text{ CH}^{11}$ sein kann und *High Chiller* in einigen Jahren Schwierigkeiten bekommen können, wenn man Modell 1b benutzt (bzw. wenn sich die Pflanzen so verhalten, wie es Modell 1b beschreibt). Das wird durch die Tabelle 5.9 auch bestätigt, da dort die Dormanznichtbrechungswahrscheinlichkeit P_D beim Apfel 5.4% beträgt. Die Schäden betragen aber trotzdem (ohne Worst Case Szenario) nur 0.4% (Tabelle 5.10).

Tabelle 5.3: Statistik für die **Chillingsumme** $S_c(t_s)$ (in CH) bis zum Stichtag t_s beim **Apfel (Modell 1b)**, berechnet mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2492 (119)						
RUBA	2625 (107)	2686 (107)	2673 (90)	2266 (103)	-359 (146)	0.001	***
ECLM	2612 (102)	2611 (112)	2574 (98)	2349 (79)	-263 (127)	0.012	***
HCLM	2375 (108)	2263 (88)	2116 (79)	1909 (98)	-465 (143)	0.000	***
WETTR0	2513 (73)	2513 (58)	2380 (81)	2058 (77)	-456 (104)	0.000	***
WETTR1	2526 (56)	2548 (65)	2420 (75)	2111 (64)	-415 (84)	0.000	***
M-Mittel	2530 (112)	2524 (202)	2433 (267)	2139 (219)	-392 (223)	0.515	**

Für die anderen Obstarten sind die Verhältnisse ähnlich. Dies erkennt man an **Tabelle 5.4**, in der für die sechs hier betrachteten Obstarten jeweils die "Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe" eingetragen sind. Wegen der z. T. für die verschiedenen Klimamodelle sehr unterschiedlichen Ergebnisse sind die Konfidenzintervalle hier mehr als doppelt so groß wie bei den Einzelmodellergebnissen aus Tabelle 5.3. Die einfache Umrechnungsformel vom Konfidenzintervall des Mittelwerts auf die Standardabweichung der Jahreswerte, die dort verwendet wurde, gilt hier allerdings wegen der Mittelwertbildung über die 30 Jahre und 5 Modelle nicht mehr.

Tabelle 5.4: Statistik für die **Chillingsumme** $S_c(t_s)$ (in CH) bis zum Stichtag t_s bei den unterschiedlichen Obstarten (**Modell 1b**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel	2530 (112)	2524 (202)	2433 (267)	2139 (219)	-392 (223)	0.515	**
Sauerkirsche	2540 (111)	2535 (203)	2441 (268)	2146 (220)	-394 (223)	0.496	**
Süßkirsche	2489 (113)	2482 (199)	2399 (261)	2108 (217)	-381 (222)	0.567	**
Birne	2479 (113)	2471 (198)	2390 (260)	2100 (217)	-379 (222)	0.584	**
Wein	2460 (131)	2419 (199)	2301 (248)	1968 (190)	-492 (202)	0.069	***
Pflaume	2500 (113)	2492 (200)	2407 (263)	2116 (218)	-384 (223)	0.555	**

Die **Tabellen 5.5** und **5.6** zeigen analoge Ergebnisse für die Chillingsummen wie die beiden vorhergehenden Tabellen, nur diesmal bei Nutzung des Modells 1g. Bei diesem Chillingmodell ist nur beim HCLM und bei WETTREG eine signifikante Abnahme der Chillingsumme bis zum sortenabhängigen Stichtag t_s zu beobachten. Bei RUBA und dem

¹¹ Denn es gilt: $1909 - 5.5 \cdot 98 = 1370$.

ECLM wird sogar eine Zunahme beobachtet. In allen Fällen stehen aber auch im Zeitraum 2071-2100 im Mittel über 125 CP zum Chilling zur Verfügung.

Tabelle 5.5: Statistik für die **Chillingsumme** $S_c(t_s)$ (in CP) bis zum Stichtag t_s beim Apfel (**Modell 1g**), berechnet mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	132.9 (3.2)						
RUBA	129.0 (4.1)	132.2 (3.6)	135.8 (3.7)	133.9 (2.7)	4.9 (4.9)	4.884	*
ECLM	132.5 (3.7)	133.7 (3.4)	136.1 (3.5)	135.2 (2.4)	2.7 (4.3)	21.725	
HCLM	134.5 (3.7)	132.9 (3.8)	132.0 (3.0)	124.9 (2.7)	-9.6 (4.5)	0.007	***
WETTR0	132.7 (1.8)	134.2 (1.7)	131.6 (2.2)	126.9 (2.0)	-5.7 (2.6)	0.005	***
WETTR1	133.3 (2.1)	134.1 (2.1)	133.6 (1.5)	127.3 (2.2)	-5.9 (3.0)	0.018	***
M-Mittel	132.4 (2.0)	133.4 (1.6)	133.8 (2.4)	129.6 (5.7)	-2.7 (5.8)	27.800	

Tabelle 5.6: Statistik für die **Chillingsumme** $S_c(t_s)$ (in CP) bis zum Stichtag t_s bei den unterschiedlichen Obstarten (**Modell 1g**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel	132.4 (2.0)	133.4 (1.6)	133.8 (2.4)	129.6 (5.7)	-2.7 (5.8)	27.800	
Sauerkirsche	133.0 (2.0)	134.1 (1.6)	134.4 (2.5)	130.2 (5.8)	-2.8 (5.9)	26.979	
Süßkirsche	129.8 (1.9)	130.8 (1.6)	131.5 (2.3)	127.3 (5.5)	-2.5 (5.6)	29.639	
Birne	129.2 (1.8)	130.2 (1.6)	130.9 (2.3)	126.7 (5.4)	-2.5 (5.5)	29.646	
Wein	130.4 (1.6)	130.8 (1.6)	130.2 (2.9)	124.8 (6.3)	-5.6 (6.6)	8.051	
Pflaume	130.5 (1.9)	131.5 (1.6)	132.1 (2.4)	127.9 (5.5)	-2.6 (5.6)	28.840	

5.3.8 Relatives Chilling-Defizit d_{rel}

Das relative Chilling-Defizit [Formel (4.99)] für Modell 1b und 1g bei Verwendung der maximalen C^* -Werte (89 CP; vgl. rechte Spalte der Tabelle 4.16) ist in den Tabellen 5.7 und 5.8 dargestellt. $d_{rel} = -50\%$ bedeutet, dass die Chillingsumme zum Stichtag das 1.5-fache des Chilling-Requirements C^* beträgt. Bei Verwendung von Modell 1b und der C^* -Standardwerte ergeben sich im Zeitraum 2071-2100 sogar noch kleinere relative Chilling-Defizit-Werte [-71% bis -58% (bei Wein -52%)] als die in den Tabellen gezeigten. Bei Verwendung von Modell 1g und der C^* -Standardwerte liegen im Zeitraum 2071-2100 die relativen Chilling-Defizit-Werte sogar bei -86% bis -72%.

Wenn die 30-jährigen Mittelwerte des Chilling-Defizits negativ sind, bedeutet das natürlich noch nicht zwangsläufig, dass das auch in allen einzelnen Jahren der Fall sein muss. Jedoch zeigte bereits Abbildung 4.36, die mit dem t_s für Apfel erstellt wurde, dass wenigstens bei Nutzung von Modell 1g auch in allen Einzeljahren die Dormanz wesentlich früher als zum Stichtag t_s gebrochen wird. Das impliziert, dass auch alle $d_{rel} \leq 0$ sein müssen.

Tabelle 5.7: Statistik für das relative **Chillingdefizit** d_{rel} (in %) bei maximalen C^* -Werten bei den unterschiedlichen Obstarten (**Modell 1b**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel	-58.1 (7.0)	-57.8 (12.6)	-52.0 (16.7)	-33.7 (13.7)	24.5 (13.9)	0.510	**
Sauerkirsche	-58.8 (6.9)	-58.4 (12.7)	-52.6 (16.8)	-34.1 (13.7)	24.6 (13.9)	0.490	**
Süßkirsche	-55.6 (7.0)	-55.1 (12.4)	-49.9 (16.3)	-31.7 (13.6)	23.8 (13.9)	0.562	**
Birne	-54.9 (7.0)	-54.4 (12.4)	-49.4 (16.2)	-31.3 (13.5)	23.7 (13.8)	0.578	**
Wein	-53.7 (8.1)	-51.2 (12.4)	-43.8 (15.5)	-23.0 (11.9)	30.8 (12.6)	0.068	***
Pflaume	-56.2 (7.0)	-55.7 (12.5)	-50.5 (16.4)	-32.2 (13.6)	24.0 (13.9)	0.549	**

Tabelle 5.8: Statistik für das relative **Chillingdefizit** d_{rel} (in %) bei maximalen C^* -Werten bei den unterschiedlichen Obstarten (**Modell 1g**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel	-48.7 (2.2)	-49.9 (1.8)	-50.4 (2.7)	-45.7 (6.4)	3.1 (6.5)	27.794	
Sauerkirsche	-49.4 (2.3)	-50.7 (1.8)	-51.0 (2.8)	-46.2 (6.5)	3.2 (6.6)	26.976	
Süßkirsche	-45.9 (2.1)	-47.0 (1.8)	-47.8 (2.6)	-43.0 (6.2)	2.8 (6.3)	29.637	
Birne	-45.2 (2.1)	-46.3 (1.8)	-47.1 (2.6)	-42.4 (6.1)	2.8 (6.2)	29.647	
Wein	-46.5 (1.8)	-47.0 (1.8)	-46.3 (3.3)	-40.2 (7.0)	6.2 (7.4)	8.051	
Pflaume	-46.6 (2.1)	-47.7 (1.8)	-48.4 (2.7)	-43.7 (6.2)	2.9 (6.3)	28.841	

5.3.9 NoReleaseProb P_D , bezogen auf den Stichtag t_s

Die Wahrscheinlichkeit für die Nichtbrechung der Dormanz bis zum Stichtag t_s bei $C^* = 1600$ CH und Modell 1b (**Tabelle 5.9**) im Mittel über die 19 Obstanbaugitterpunkte zeigt kleinere Werte als die in Tabelle G.2 dargestellten für die NoReleaseProb90. Das liegt daran, dass die t_s für alle Obstarten größer sind als der bei der NoReleaseProb90 gewählte Stichtag ($t_s = 90$ DOY).

Tabelle 5.9: Statistik für die **NoReleaseProb** P_D (in %), bezogen auf die t_s -Werte aus Tabelle 4.16, bei den unterschiedlichen Obstarten (**Modell 1b**, bei maximalen C^* -Werten, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.2 (0.4)	5.4 (7.3)	5.4 (7.3)	11.883	
Sauerkirsche	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.2 (0.4)	5.3 (6.9)	5.3 (6.9)	11.290	
Süßkirsche	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.2 (0.4)	5.9 (7.6)	5.9 (7.6)	10.360	
Birne	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.2 (0.4)	6.3 (8.0)	6.3 (8.0)	10.155	
Wein	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.4 (0.9)	12.1 (11.6)	12.1 (11.6)	4.271	*
Pflaume	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.2 (0.4)	5.8 (7.5)	5.8 (7.5)	10.911	

Im Fall des Modell 1b bei maximalen C^* -Werten mit *Worst Case* = 20% sehen die Ergebnisse genauso aus wie in Tabelle 5.9, nur die Spalte (D) und (D-A) enthält für alle Obstarten die Werte "20.0 (6.2)". Für Modell 1g bei maximalen C^* -Werten mit *Worst*

Case = AUS enthält die Tabelle nur “0.0 (0.0)” (d. h., dass die Dormanz immer gebrochen wird), und bei Modell 1g und Worst Case = 20 % enthalten die Spalten (A), (B) und (C) nur “0.0 (0.0)” und die Spalten (D) und (D-A) bestehen nur aus “20.0 (6.2)”.

5.3.10 Dormanzschaden s_D^o ohne und s_D^m mit Gegenmaßnahmen

Die Dormanzschäden, die bei Verwendung von Modell 1b¹² ohne Ergreifung von Gegenmaßnahmen im Mittel über die 5 Klimamodellläufe auftreten, sind in **Tabelle 5.10** gelistet. Nur im Zeitraum 2071-2100 treten geringfügige Schäden auf, die aber nicht einmal signifikant von null verschieden sind. Man beachte, dass die Dormanzschäden im Zeitraum 2031-2060 exakt null sind, obwohl die NoReleaseProb (Tabelle 5.9) Werte größer als null zeigt.¹³ Die (hier nicht gezeigten) mit HCLM-Temperaturen und Modell 1b bei maximalen Werten von C^* berechneten Schadenswerte sind mit 1.4 % (Apfel für 2071-2100) wesentlich größer als bei den anderen Klimamodellen. Bei Modell 1g (Worst Case aus) sind alle Schäden exakt null.

Tabelle 5.10: Statistik für den Dormanzschaden s_D^o ohne Gegenmaßnahmen (in %) bei maximalen C^* -Werten bei den unterschiedlichen Obstarten (**Modell 1b, Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.4 (0.6)	0.4 (0.6)	21.427	
Sauerkirsche	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.3 (0.5)	0.3 (0.5)	21.870	
Süßkirsche	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.5 (0.8)	0.5 (0.8)	19.582	
Birne	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.5 (0.8)	0.5 (0.8)	19.747	
Wein	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.2 (1.4)	1.2 (1.4)	8.108	
Pflaume	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.5 (0.7)	0.5 (0.7)	19.243	

Da der Dormanzschaden ohne Maßnahmen beim Worst Case Szenario in jedem Jahr, in welchem die Dormanz nicht gebrochen wurde, zu 100 % angesetzt wurde, und die Dormanznichtbrechungswahrscheinlichkeit im Worst Case hier zu 20 % angenommen wurde, ergeben sich im Mittel für 2071-2100 Dormanzschäden von 20 % (**Tabelle 5.11**). Für Modell 1g ergeben sich für s_D^o beim “Worst Case 20 %” exakt die gleichen Schäden wie bei Modell 1b.

Die Dormanzschäden **mit** Gegenmaßnahmen **ohne** Worst Case Szenario sind sowohl für Modell 1b als auch für Modell 1g alle exakt null.

Da der Dormanzschaden **mit** Gegenmaßnahmen beim Worst Case Szenario in jedem Jahr, in welchem die Dormanz nicht gebrochen wurde, zu 30 % angesetzt wurde (vgl. Kapitel 4.13), und die Dormanznichtbrechungswahrscheinlichkeit im Worst Case hier 20 % beträgt, ergeben sich im Mittel für 2071-2100 Dormanzschäden von 6 % (**Tabelle 5.12**).

Modell 1g zeigt für s_D^m beim “Worst Case 20 %” exakt die gleichen Schäden wie bei Modell 1b.

An diesen Beispielen erkennt man deutlich, dass das Worst Case Szenario mit $s_D^o = 100\%$ und $s_D^m = 30\%$ in NoRelease-Jahren und bei “hoher Wahrscheinlichkeit für diese

¹² Bei Verwendung von Modell 1g sind alle Dormanzschäden identisch null!

¹³ Zur Erklärung siehe Gleichung (4.100).

Tabelle 5.11: Statistik für den Dormanzschaden s_D^0 ohne Gegenmaßnahmen (in %) bei maximalen C^* -Werten bei den unterschiedlichen Obstarten (**Modell 1b, Worst Case: 20 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	20.0 (6.2)	20.0 (6.2)	0.000	***
Sauerkirsche	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	20.0 (6.2)	20.0 (6.2)	0.000	***
Süßkirsche	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	20.0 (6.2)	20.0 (6.2)	0.000	***
Birne	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	20.0 (6.2)	20.0 (6.2)	0.000	***
Wein	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	20.0 (6.2)	20.0 (6.2)	0.000	***
Pflaume	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	20.0 (6.2)	20.0 (6.2)	0.000	***

Tabelle 5.12: Statistik für den Dormanzschaden s_D^1 mit Gegenmaßnahmen (in %) bei maximalen C^* -Werten bei den unterschiedlichen Obstarten (**Modell 1b, Worst Case: 20 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	6.0 (1.9)	6.0 (1.9)	0.000	***
Sauerkirsche	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	6.0 (1.9)	6.0 (1.9)	0.000	***
Süßkirsche	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	6.0 (1.9)	6.0 (1.9)	0.000	***
Birne	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	6.0 (1.9)	6.0 (1.9)	0.000	***
Wein	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	6.0 (1.9)	6.0 (1.9)	0.000	***
Pflaume	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	6.0 (1.9)	6.0 (1.9)	0.000	***

NoRelease-Jahre” (20 %) völlig andere Ergebnisse liefert als die hier benutzte und wahrscheinlich realistischere Rechnung mit $s_D = f(d_{rel})$ [Gleichungen (4.100) und (4.101)]. Denn d_{rel} ist fast immer so klein, dass bei Modell 1g praktisch überhaupt keine Schäden, und bei Modell 1b nur minimale Schäden (weniger als 1.2 % im Mittel über die 5 Klimamodelle im Zeitraum 2071-2100 beim Wein) auftreten.

5.3.11 Zusammenfassung

Die Temperaturänderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in den 5 betrachteten regionalen Klimamodellen sind nicht groß genug, um statistisch signifikante Aussagen über die Änderung der “Wahrscheinlichkeit für unzureichendes Chilling der Pflanzen” in 30-Jahresabschnitten machen zu können. Das gelingt nicht einmal für relativ hohe Werte des Chilling-Requirements C^* .

Ein Grund hierfür ist der, dass die Konfidenzintervalle für die Grundwahrscheinlichkeit p einer Binomialverteilung bei kleiner Versuchsanzahl N (hier $N = 30 =$ Anzahl der Jahre im Mittelungszeitraum) und kleinen “Schätzwerten \hat{p} für p ” ziemlich groß ausfallen. So ergibt sich für $N = 30$ und $\hat{p} = 0$ ein 95 %-Konfidenzintervall (Score Intervall; siehe [Agresti & Coull, 1998](#)), welches sich von 0 bis ca. $0.11 = 11\%$ erstreckt.

Das *Weinberger-Eggert-Modell* (Modell 1b) zeigt im Mittel über die 5 Klimamodelle eine leichte Zunahme [$4.5\% (\pm 6.3\%)$] für Hessen (**Tabelle G.1**) und $9.5\% (\pm 11.5\%)$ für die 19 Obstanbaugitterpunkte (**Tabelle G.2**) der *Wahrscheinlichkeit für unzureichendes*

Chilling (2071-2100 vs. 1971-2000 und $t_s = 90$). Auch bei Verwendung der artenabhängigen Stichtage t_s kommt man zu diesem Ergebnis (**Tabelle 5.9**). Beim *Dynamic Model* (Modell 1g), welches heutzutage als zuverlässigstes Chilling-Modell angesehen wird (vgl. das in Kapitel 5.3.1 auf Seite 199 Gesagte), ändert sich praktisch nichts [Differenz = -0.3% ($\pm 0.6\%$) in Hessen (**Tabelle G.9**) und = 0.0% für die 19 Obstanbaugitterpunkte bei 89 CP (**Tabelle G.10**)]. Beim *Positive Utah Model* (Modell 1f) ist eine sehr kleine Abnahme zu verzeichnen [-1.2% ($\pm 1.6\%$) in Hessen (**Tabelle G.12**) und -0.3% ($\pm 0.5\%$) für die 19 Obstanbaugitterpunkte (**Tabelle G.13**) bei $C^* = 1632$ CU]. Alle Änderungen sind nicht signifikant!

Interessant ist, dass alle drei Chilling-Modelle bereits im Zeitraum vor dem Jahr 2000 für $C^* = 1600$ CH (bzw. eine äquivalente Anzahl von CP bzw. CU) bei Nutzung der BIAS-korrigierten RUBA-Temperaturen Fälle mit kritischen, d. h. sehr späten Terminen (mit $t_1 > 90$ DOY) berechnen.

Betrachtet man die Schäden, die im Mittel durch die Nichtbrechung der Dormanz ohne Einsatz von Gegenmitteln auftreten (und ohne Worst Case Szenario), so sind diese im Fall von Modell 1b für alle betrachteten Obstarten kleiner als 1.2%. Alle diese Schäden sind nicht signifikant von null verschieden (Tabelle 5.10). Bei Verwendung von Modell 1g treten überhaupt keine Dormanzschäden auf. Bei Einsatz von Gegenmaßnahmen sind die Schäden in allen Zeiträumen identisch null.

Erst wenn man *künstlich* in vielen Jahren große Chilling-Defizite d_{rel} erzwingt (Worst Case Szenario), ergeben sich nennenswerte Dormanzschäden. Das Eintreten der in dieser Arbeit simulierten Worst Case Szenarien ist aber mit den Ergebnissen der heutzutage benutzten Chilling-Modelle nicht gut vereinbar und daher ziemlich unwahrscheinlich.

Eine ausführlichere Darstellung und Diskussion der Ergebnisse zur NoReleaseProbx findet man im **Anhang G**.

5.4 Mögliche Veränderungen in der Gefahr von Spätfrost während der Obstblüte

Im Folgenden werden einige Beispiele für Frostberechnungen, vorwiegend für den Apfel, diskutiert. Die vollständigen Ergebnisse findet man im **Anhang H**. Die zu Grunde liegende Theorie wurde bereits in Abschnitt 4.8 beschrieben.

Für die Temperaturen aus den drei dynamischen Modellen wurden die bezüglich BIAS korrigierten Daten verwendet. Um die Frostgrößen für ein bestimmtes Klimamodell zu berechnen, wurde zuerst der Blühbeginn mit einem bestimmten phänologischen Modell mit Hilfe der Temperaturen aus diesem Klimamodell berechnet. Dann wurde aus dem Blühbeginnstermin, den Temperaturen desselben Klimamodells und mit Hilfe von Modell 10a der Termin des Blühendes berechnet. Danach wurden die Tagesminimumtemperaturen [und ggf. noch andere Größen wie Windgeschwindigkeit, Gesamtbedeckungsgrad und relative Feuchte zur Berechnung von T_{mmf} bzw. T_f ; vgl. Gleichung (4.116) und (4.107)] desselben Klimamodells verwendet, um die eigentlichen Frostgrößen im S-Zeitraum zu bestimmen, wobei der S-Zeitraum mit Hilfe der zuvor berechneten Blühbeginn- und Blühendetermine bestimmt wurde.

5.4.1 Spätfrostwahrscheinlichkeiten

In **Abbildung 5.33** sind Spätfrostwahrscheinlichkeiten $P_{F,0}$ für den Zeitraum 1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten) dargestellt. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ba berechnet. Dargestellt sind Mittelwerte über alle 81 Gitterpunkte in Hessen.¹⁴ Zur Berechnung der Spätfrostwahrscheinlichkeiten $P_{F,x}$ wurde die Tagesminimumtemperatur T_n verwendet.

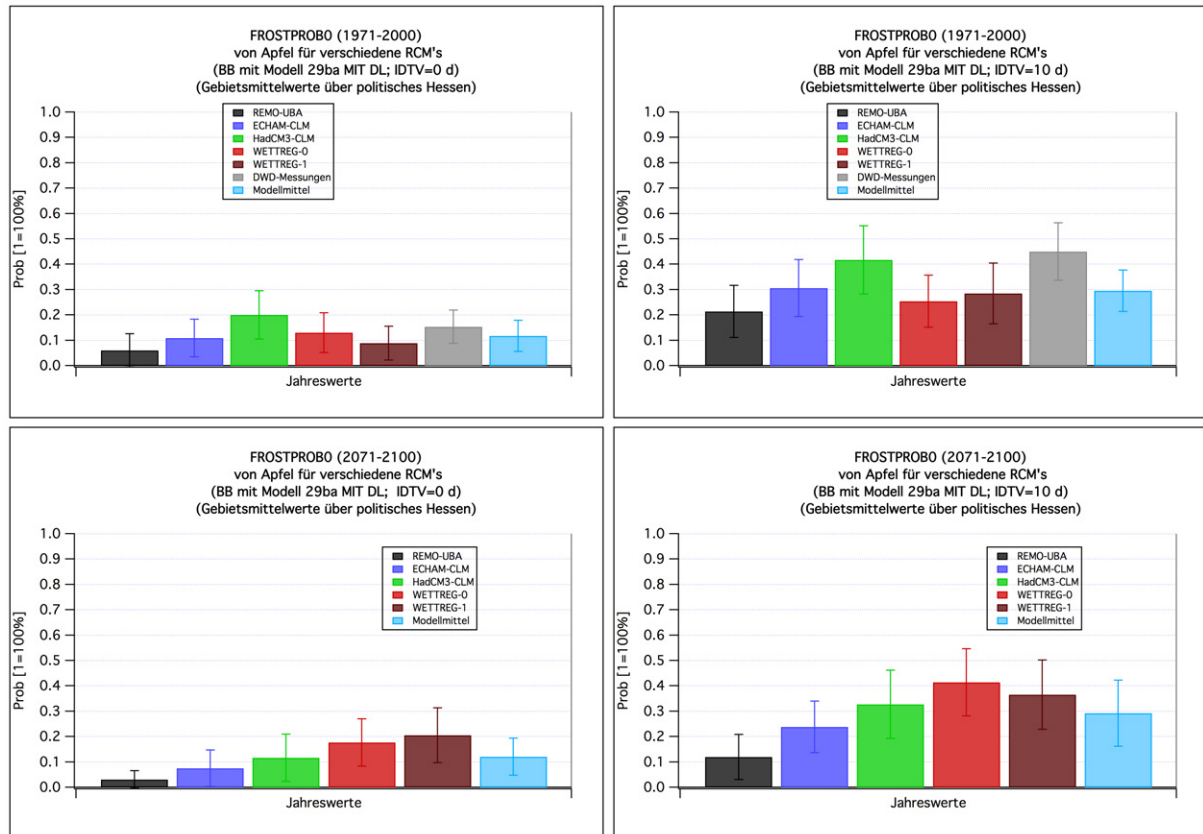


Abbildung 5.33: Wahrscheinlichkeit $P_{F,0}$ (= FROSTPROB0) für das Auftreten von Frost der “Stärke 0” [1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten)] im Zeitraum t_{Vor} (= IDTV) Tage vorm Blühbeginn des Apfels bis 31. Juli in den 5 Modellen und als Modellmittel; links: $t_{Vor} = 0$ d; rechts: $t_{Vor} = 10$ d. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ba berechnet. Mittelwerte über alle 81 Gitterpunkte in Hessen.

Das Blühende ist für $P_{F,x}$ (und auch für n_F^x) nicht von Belang und spielt nur für die Schäden eine Rolle. In den beiden linken Bildern wurde $t_{Vor} = 0$ d gewählt, d. h., dass nur die Spätfrostfälle zum und nach Blühbeginn berücksichtigt wurden. In den rechten Bildern wurde der normale Wert $t_{Vor} = 10$ d aus Tabelle 4.17 verwendet. Man erkennt, dass die Frostwahrscheinlichkeiten nun wesentlich größer sind. Das bedeutet, dass die größte Gefahr von Spätfrostfällen beim Apfel, die Schadenspotential aufweisen, scheinbar in den Zeitraum kurz vor der Blüte fällt.

Abbildung 5.34 vergleicht die Veränderungen der Wahrscheinlichkeiten $P_{F,0}$ (2071-2100 vs. 1971-2000), wenn man den Blühbeginn mit Modell 29ba (linkes Bild) und mit Modell 29ga (rechtes Bild) berechnet. t_{Vor} wurde in beiden Bildern auf 10 d gesetzt. Da beide Modelle sehr ähnliche Blühtermine berechnen (vgl. **Abbildung 5.8**, Bild rechts unten) sind auch die Änderungen der Frostwahrscheinlichkeiten im S-Zeitraum sehr ähnlich.

¹⁴ Die Ergebnisse, die man mit Modell 29ga und als Mittelwert nur über die 19 Obstanbaugitterpunkte berechnet, unterscheiden sich von denen in **Abbildung 5.33** nur um einige Prozentpunkte.

Die Wahrscheinlichkeiten $P_{F,1}$ und $P_{F,2}$ für Spätfrost der Stärke 1 ($-2\text{ °C} \leq T_n < 0\text{ °C}$) und Stärke 2 ($-4\text{ °C} \leq T_n < -2\text{ °C}$) wird in **Abbildung 5.35** visualisiert. Ein Vergleich mit $P_{F,0}$ (Abbildung 5.33 oben rechts) zeigt, dass $P_{F,1}$ und $P_{F,0}$ sehr ähnliche Werte haben. Das liegt daran, dass fast alle Spätfrostfälle in die Klasse 1 fallen, die in Klasse 0 als Teilmenge enthalten ist. Die Klasse 2 (Abbildung 5.35 rechts) ist bereits nur noch sehr gering belegt, so dass die Wahrscheinlichkeiten sehr klein sind.

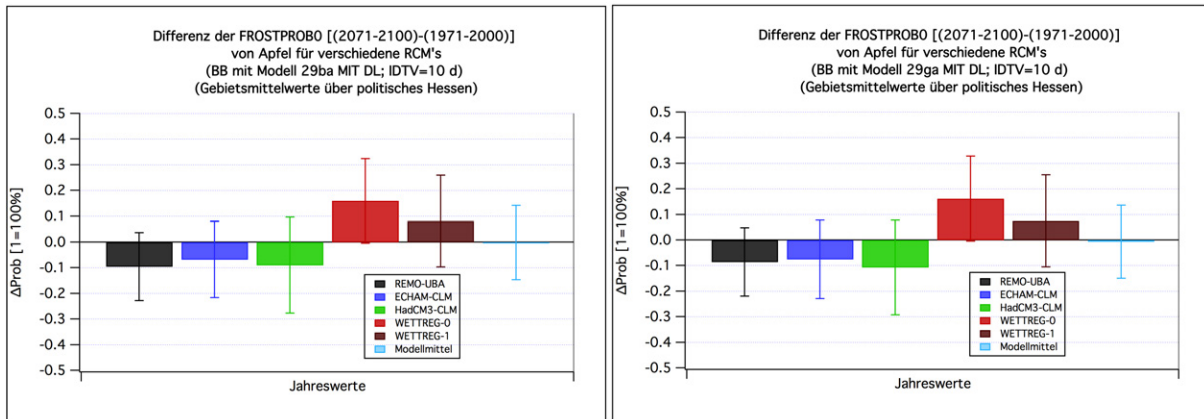


Abbildung 5.34: Differenz der Spätfrostwahrscheinlichkeiten $P_{F,0}$ (= FROSTPROB0) bei t_{Vor} (= IDTV) = 10 d [2071-2100 vs. 1971-2000]; Blühbeginn des Apfels berechnet mit Modell 29ba (links) und Modell 29ga (rechts); Gebietsmittelwerte über das politische Hessen.

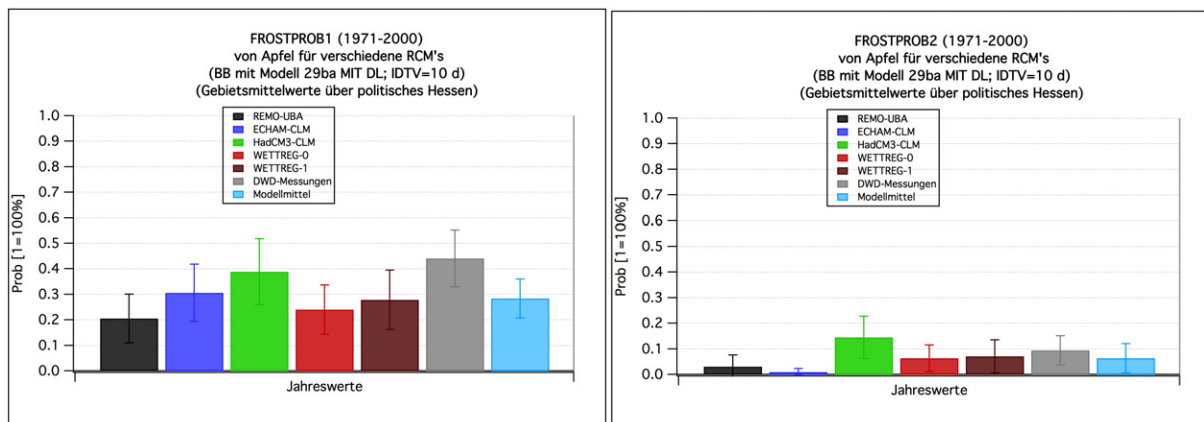


Abbildung 5.35: Wahrscheinlichkeit $P_{F,x}$ (= FROSTPROBx) für das Auftreten von Frost der “Stärke $x = 1$ ” (links) und “ $x = 2$ ” (rechts) [1971-2000] (Blühbeginn des Apfels mit Modell 29ba berechnet); t_{Vor} (= IDTV) = 10 d. Gebietsmittelwert über die 81 Gitterpunkte in Hessen.

5.4.2 Frostschäden

Die mittleren Frostschäden, berechnet mit T_{mmf} , an den Äpfeln werden in **Abbildung 5.36** gezeigt. Das Bild oben links zeigt die Mittelwerte für den Zeitraum 1971-2000. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term) und das Blühende mit Modell 10a berechnet. t_{Vor} wurde auf 10 d gesetzt. Das Bild links unten zeigt die für den Zeitraum 2071-2100 prognostizierten Schäden. Man beachte die großen Unsicherheiten bzw. breiten Konfidenzintervalle, die einen relativen Fehler von 100% nicht ausschließen.

Auf Grund dieser großen Unsicherheit sind die auf der rechten Seite dargestellten Veränderungen der Schäden (2071-2100 vs. 1971-2000) und auch die Trends (2011-2100) alle nicht signifikant von null verschieden.

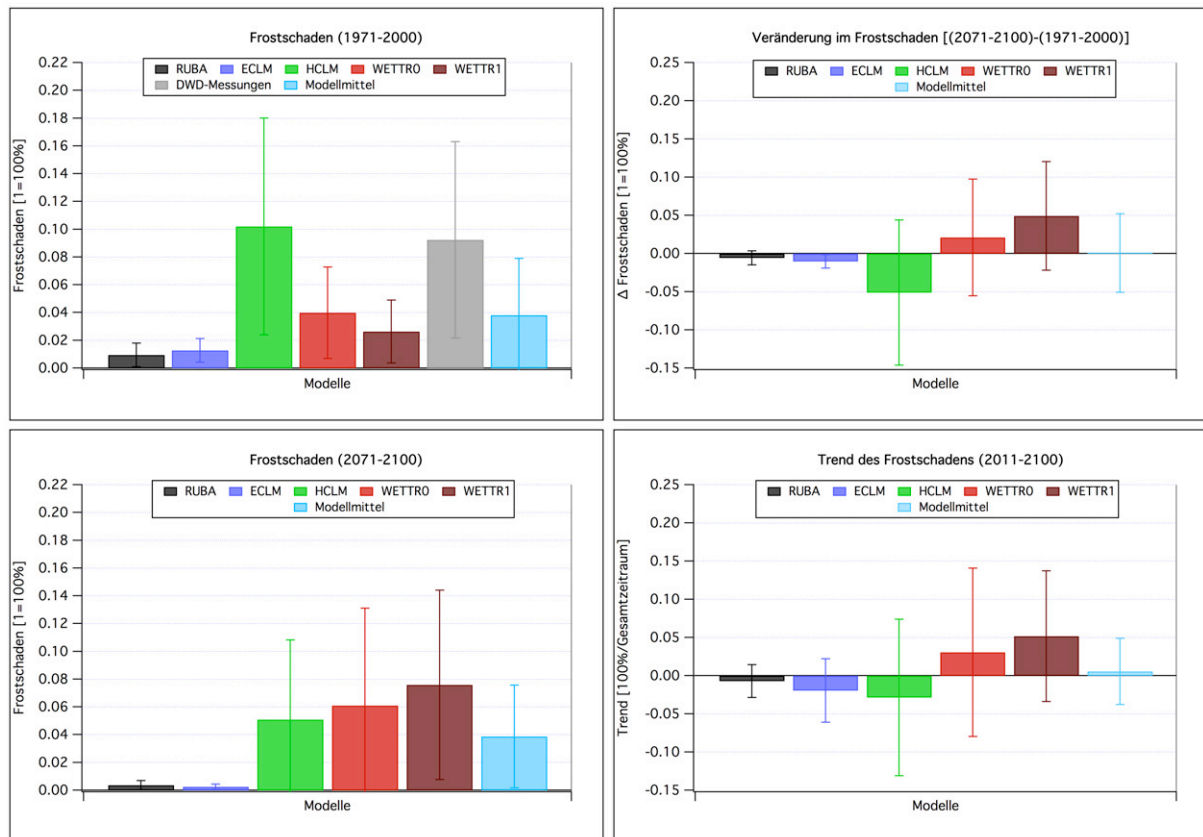


Abbildung 5.36: links: Frostschaden s_F (an den Früchten!) [1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten)] bezogen auf den Zeitraum t_{Vor} (= IDTV) Tage vorm Blühbeginn des Apfels bis 31. Juli in den 5 Modellen und als Modellmittel für den **Apfel**; rechts: Differenz der Frostschäden s_F (2071-2100 vs. 1971-2000) (oben) und Trend (2011-2100) (unten). $t_{Vor} = 10$ d. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term), das Blühende mit Modell 10a und der Frostschaden mit T_{mmf} berechnet. Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen.

Erstaunlich ist, dass der FROSTSCHADEN s_F (Abbildung 5.36 oben links und **Tabelle H.25** ff.) und auch die FROSTPROB0 $P_{F,0}$ (Abbildung 5.33 oben rechts und **Tabelle H.1** ff.) in RUBA (schwarzer Balken) wesentlich kleinere Werte aufweisen als die aus DWD-Beobachtungen (grauer Balken) berechneten Größen. Eine Ursache hierfür liegt darin, dass die Korrelation zwischen der Tagesmitteltemperatur T und der Tagesminimumtemperatur T_n in RUBA wesentlich größer ist ($R^2 = 0.71$, wenn man alle Apriltage der Jahre 1971-2000 am Gitterpunkt 136 in der Nähe von Frankfurt am Main betrachtet) als bei den DWD-Beobachtungen ($R^2 = 0.49$). Das führt dazu, dass in besonders kalten Frühjahren mit besonders kleinen T (hieraus wird der Blühbeginn berechnet) und T_n (hieraus wird T_{mmf} und daraus die Frostschäden berechnet) der Blühbeginn in RUBA besonders spät liegt und die kleinen T_n bereits vor Blühbeginn auftraten, so dass die Schäden gering bleiben. Beim DWD bzw. in der Realität sind die T_n dagegen unabhängiger vom vorhergehenden T -Verlauf bzw. vom aktuellen Blühbeginn. Betrachtet man nur die Tage mit Temperaturen $T_n < 0^\circ\text{C}$, so streuen die Temperaturen T für festes T_n beim DWD auch wesentlich stärker als bei RUBA. Weitere Ursachen für das oben

beschriebene Verhalten sind: Negative T_n werden beim DWD viel häufiger angenommen als bei RUBA. Beim DWD treten auch sehr oft um über 3K kältere T_n -Werte auf als bei RUBA, und die zeitliche Standardabweichung der T_n (über alle Apriltage der Jahre 1971-2000) ist in RUBA um ca. 0.4°C zu klein. Aus dieser Diskussion wird deutlich, dass für eine verlässliche Frostschadensberechnung nicht nur die korrekte Vorhersage der langjährigen Mittelwerte von T und T_n entscheidend ist (diese stimmen bei RUBA auf Grund der BIAS-Korrektur gut mit den Beobachtungen überein), sondern die gesamte zweidimensionale Verteilungsfunktion von T und T_n spielt eine gewichtige Rolle.

Bei der früher als der Apfel blühenden Aprikose¹⁵ treten zwar mittlere Schäden von bis zu 28 % (1971-2000; mit HadCM3-CLM-Temperaturen berechnet) auf und die Mittelwerte über alle 5 Modelle betragen etwas mehr als 14 %, die Konfidenzintervalle sind allerdings so groß (z. B. $\pm 12.7\%$ beim HadCM3-CLM 1971-2000), dass nur die Veränderung [2071-2100 vs. 1971-2000] beim HCLM signifikant von null verschieden ist (**Tabelle H.31**).

Warum die Unsicherheiten der Schätzwerte für den Schaden so groß sind, zeigt **Abbildung 5.37**. Dort sind die jährlichen, über die 19 Obstanbaugitterpunkte (links) und 4 Erdbeeranbaugitterpunkte (rechts) gemittelten Schäden (beide für Apfel!) aufgetragen. Man erkennt, dass sich die mittleren Schäden hauptsächlich aus einigen, wenigen größeren Schäden zusammensetzen, die in den beiden betrachteten 30-Jahresperioden auftreten. Würden einige Jahre mehr (weniger) mit großen Schäden auftreten, so würde sich der Gesamtschaden stark vergrößern (verkleinern).

Daran, dass die beiden Bilder in **Abbildung 5.37** sehr ähnlich aussehen, obwohl sich das linke Bild auf die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen und das rechte nur auf die 4 signifikanten Erdbeeranbaupixel bezieht (vgl. **Abbildung 4.19** rechts und **4.20** rechts), erkennt man, dass die Ereignisse mit größeren Frostschäden eine starke räumliche Korrelation aufweisen. Das ist auch anschaulich klar: Stärkere Nachtfröste betreffen meistens größere zusammenhängende Gebiete und nicht nur vereinzelte “Gitterpunkte”.

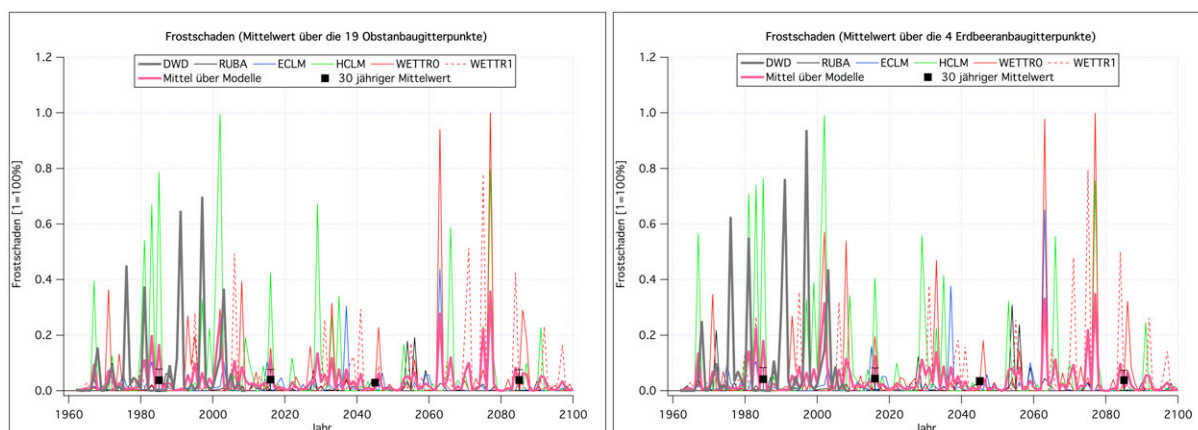


Abbildung 5.37: Jährlicher Verlauf des Gebietsmittelwerts der **Frostschäden** in den 5 Modellen für **Apfel**. Links: Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen. Rechts: Mittelwert nur über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term), das Blühende mit Modell 10a und der Frostschaden mit T_{mmf} berechnet.

¹⁵ Für die hier nur exemplarisch durchgeführte Berechnung der Frostschäden bei der Aprikose wurde das Blühende als Blühbeginn + 12 Tage angenommen, da keine phänologischen Beobachtungen für diese Phase bei der Aprikose vorlagen (siehe auch die Bemerkungen auf Seite 105). Da das “wahre Blühende” nicht bekannt war, wurden keine weiteren Auswertungen bezüglich Frost für die Aprikose vorgenommen.

5.4.3 Wahrscheinlichkeiten für Frostschäden

Die Wahrscheinlichkeiten für Frostschäden zwischen 0 % und 10 % (FROSTSCHADENS-PROB0 s_F^{0-10} ; linkes Bild) und zwischen 10 % und 50 % (FROSTSCHADENS-PROB1 s_F^{10-50} ; rechtes Bild) sind in **Abbildung 5.38** dargestellt. Die oberen Bilder beziehen sich auf den Zeitraum 1971-2000, die unteren auf 2071-2100. Die überwiegende Anzahl der Schäden zwischen 10 % und 50 % hat eine Wahrscheinlichkeit von weniger als 10 %. Die geringen Schäden (zwischen 0 % und 10 %) haben jedoch Wahrscheinlichkeiten von bis zu 50 %.

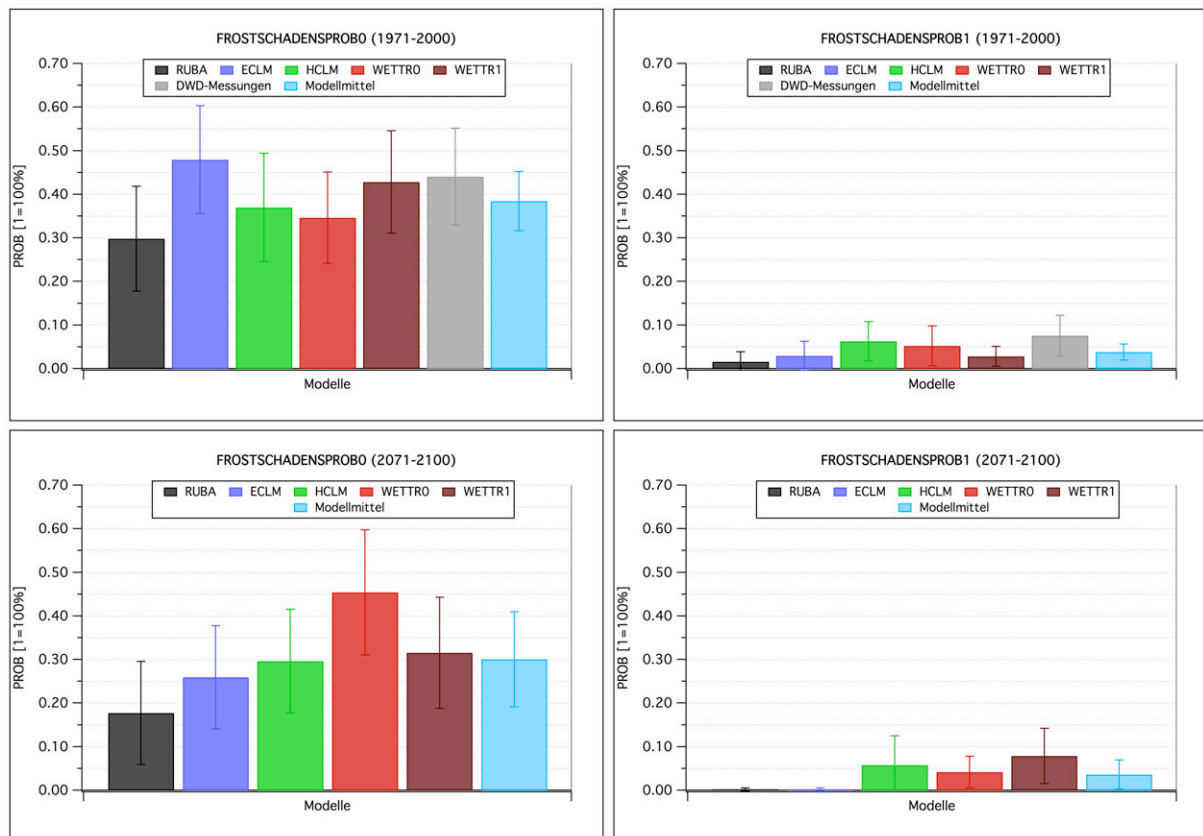


Abbildung 5.38: links: Wahrscheinlichkeit s_F^{0-10} (= **FROSTSCHADENS-PROB0**) für Frostschäden (an den Früchten!) der “Stärke 0” (1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten)) bezogen auf den Zeitraum t_{Vor} (= IDTV) Tage vorm Blühbeginn des Apfels bis 31. Juli in den 5 Modellen und als Modellmittel für den **Apfel**; rechts: Wahrscheinlichkeit s_F^{10-50} (= **FROSTSCHADENS-PROB1**) für Frostschäden der “Stärke 1” (1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten)). $t_{Vor} = 10$ d. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ga berechnet, das Blühende mit Modell 10a und der Frostschaden mit T_{mmf} . Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen.

5.4.4 Anzahl von Frosttagen

Abbildung 5.39 zeigt die mittlere Anzahl n_F^0 von Frosttagen pro Jahr (mit Stärke 0) innerhalb des S-Zeitraums für den Zeitraum 1971-2000 (oben links) und 2071-2100 (unten links) sowie die Veränderungen [2071-2100 vs. 1971-2000] (oben rechts) und die Trends (2011-2100; unten rechts) für den frühreifen Apfel als Gebietsmittelwerte für Hessen. Die Ergebnisse wurden mit dem auf Seite 119 erwähnten Sondermodus (es werden alle Tage im S-Zeitraum gezählt mit Minimum von $T_f < -2$ °C vor dem Blühbeginn und mit Minimum

von $T_f < 0$ °C zu oder nach dem Blühbeginn) und mit Hilfe der Feuchttemperatur T_f berechnet. Alle Veränderungen und Trends sind nicht signifikant von null verschieden.

Bei Betrachtung des rechten Bildes der Abbildung 5.39 fällt auf, dass die beiden WETTREG-Läufe eine Zunahme der FROSTTAGE0 prognostizieren, während die anderen Modelle eher eine Abnahme vorhersagen. Dieses Phänomen ist noch deutlicher zu beobachten, wenn man die Ergebnisse ohne Spezialmodus (hier nicht gezeigt) betrachtet. Der Grund hierfür liegt vermutlich darin, dass sich der Blühbeginnstermin in WETTREG2010 um 4-6 Tage stärker verfrüht als in den dynamischen Modellen (siehe *Differenzen* in den Tabellen des Anhang C). Diese starke Verfrühtung kann mit der im Vergleich zu den dynamischen Modellen besonders starken Erhöhung der Tagesmitteltemperatur T (1971-2000 vs. 2071-2100) in WETTREG2010 in den Monaten Februar bis April erklärt werden (Abbildung 5.3, linkes Bild und **Abbildung 5.40** links). Im Gegensatz zu der Tagesmitteltemperatur steigt die Tagesminimumtemperatur T_n , die in die Berechnung der FROSTTAGE0 eingeht, in den Monaten Februar bis April ungefähr in gleicher Stärke an wie in den dynamischen Modellen (Abbildung 5.40 rechts). Eine mathematisch fundiertere Diskussion dieses Phänomens findet man im **Anhang L.5** auf Seite 535.

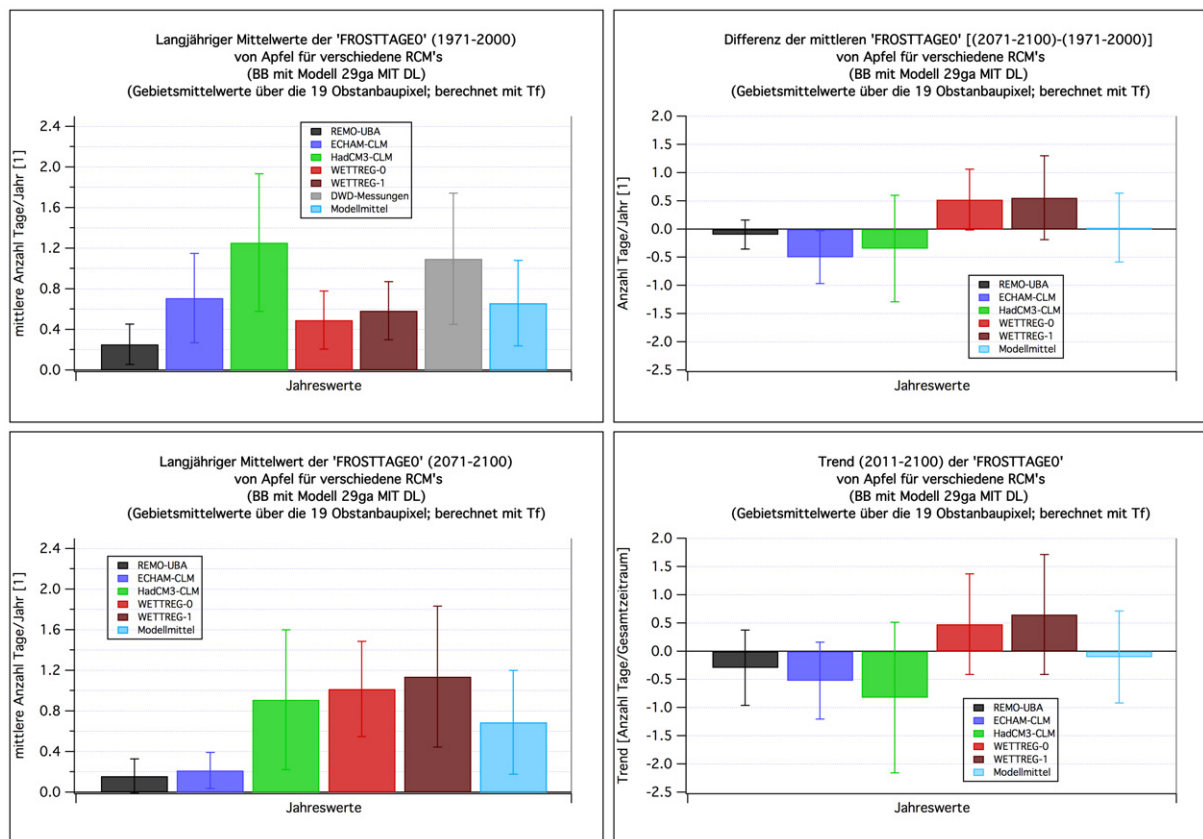


Abbildung 5.39: Links: Mittlere Anzahl von Frosttagen n_F^0 (= FROSTTAGE0) bezogen auf den Zeitraum t_{Vor} (= IDTV) Tage vorm Blühbeginn des Apfels bis 31. Juli (mit "Stärke 0"); oben links: 1971-2000; unten links: 2071-2100; rechts oben: Differenz der Frosttageanzahl 2071-2100 vs. 1971-2100; rechts unten: Trend der Frosttageanzahl 2011-2100. $t_{Vor} = 10$ d; Blühbeginn berechnet mit Modell 29ga; Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

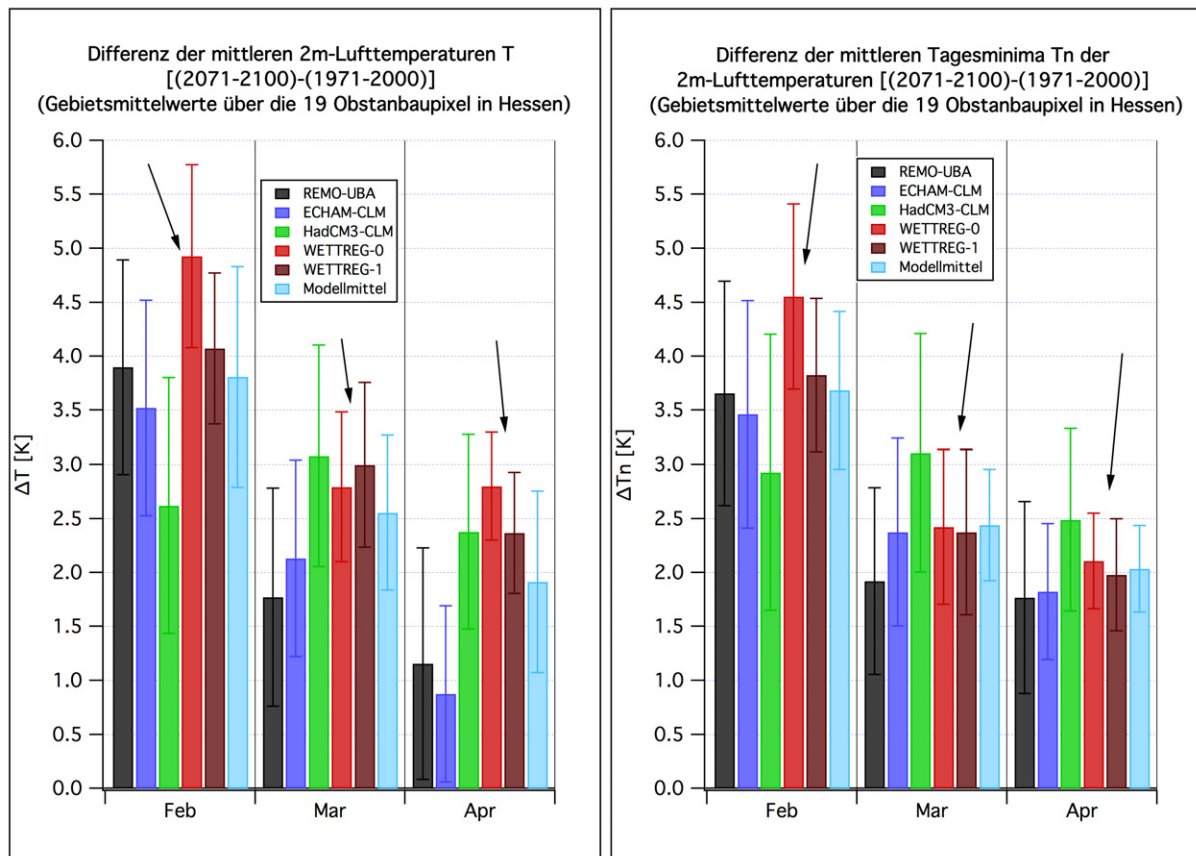


Abbildung 5.40: Links: Differenz der Monatsmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur T [(2071-2100) - (1971-2000)] in den Monaten Februar bis April (Mittelwert über die 19 Obstbaugitterpunkte); rechts: Differenz der Monatsmittelwerte der Tagesminimumtemperatur T_n [(2071-2100) - (1971-2000)].

5.4.5 Diskussion der Ergebnisse bezüglich Frost im Anhang H

Die Ergebnisse der Auswertungen für alle Frostgrößen und alle 6¹⁶ Fruchtarten findet man im **Anhang H**. Zur Berechnung des Blühbeginns wurde wieder (siehe Beginn von **Anhang C**) das verbesserte Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term) verwendet. Das Blühende wurde mit Modell 10a (ohne DAYLENGTH-Term) prognostiziert. Dabei wurden jeweils Mittelwerte über die 19 Obstbaugitterpunkte (bzw. die 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein) betrachtet.

Auffällig ist zunächst in **Tabelle H.1**, dass bei z. B. RUBA die FROSTPROB0 von 17.2% im Zeitraum 1971-2000 auf 31.0% im Zeitraum 2031-2060 zunimmt. Der Mittelwert in 2071-2100 beträgt hingegen nur 12.1% und ist damit geringer als 1971-2000. Weder die Zunahme noch die Abnahme sind aber statistisch signifikant (p-Wert gleich 8.4% bzw. 45.9%). Hauptursache für die vorübergehende Zunahme der FROSTPROB0 (und auch der FROSTSCHADENS-PROB0; vgl. **Tabelle H.32**) ist die Abnahme (der BIAS-korrigierten Werte) von T und T_n in RUBA nach dem Jahr 2000 (siehe **Abbildung 4.11**). RUBA verhält sich nämlich bezüglich der Abhängigkeit der Frostgrößen von der Temperatur ähnlich wie das HadCM3-CLM, so dass auch auf RUBA das in der Dis-

¹⁶ Für die anderen Fruchtarten lagen nicht genügend Beobachtungsdaten für das Blühende vor, so dass das Blühende-Modell 10a (ohne DAYLENGTH-Term) nicht geeicht werden konnte.

kussion am Ende des Kapitels L.6 auf Seite 537 Gesagte zutrifft und eine Abnahme der Temperatur eine Erhöhung des Frostrisikos im S-Zeitraum bedeutet (und umgekehrt).

Da im HCLM die Temperatur mit den Jahren monoton zunimmt, ist im HCLM zwischen 1971-2000 und 2031-2060 im Gegensatz zu RUBA auch eine Abnahme von 43.8 % auf 25.9 % (p-Wert = 6 %) zu beobachten, die aber ebenfalls nicht signifikant ist.

Die übrigen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen (man beachte dabei wieder das auf Seite 293 zur *Multiplizität* Gesagte): Nur die Süßkirsche zeigt im Mittel über die 5 Klimamodellläufe eine signifikante Abnahme der FROSTPROB0 [-20 % (± 13 %)] und FROSTPROB1 [-19 % (± 12 %)] zum Ende des 21. Jahrhunderts verglichen mit dem Ende des 20. Jahrhunderts (**Abbildung H.2** und **H.4**). FROSTPROB2 und FROSTPROB3 zeigen im Modellmittel keinerlei Signifikanzen (**Abbildung H.6** und **H.8**). Auch die Größe FROSTSCHADEN zeigt im Modellmittel keine signifikanten Änderungen (**Abbildung H.10**). Die FROSTSCHADENSPROB0 hingegen zeigt bei der Sauer- und Süßkirsche eine signifikante Abnahme [-18 % (± 13 %) bzw. -23 % (± 13 %)] (**Abbildung H.12**). Die Größen FROSTSCHADENSPROB1, FROSTSCHADENSPROB2 und FROSTTAGE0 zeigen keine signifikanten Änderungen.

Auffällig ist hier das Ergebnis, dass die FROSTSCHADENSPROB0 eine signifikante Abnahme um -18 % zeigt, obwohl sich der FROSTSCHADEN und die FROSTSCHADENSPROB1 sowie die FROSTSCHADENSPROB2 fast gar nicht verändern. Das kann damit erklärt werden, dass viele der Schäden nur sehr kleine Werte (< 1 %) aufweisen. Verringern sich nun beispielsweise alle Schäden um z. B. 1 %, so verringert sich der Gesamtschaden nur um weniger als 1 %. Aus dem Schadensbereich 0 % bis 10 %, der für die FROSTSCHADENSPROB0 entscheidend ist, fallen aber viele Schäden heraus (d. h. sie sind dann keine Schäden mehr) und ihr Wert kann sich kräftig verändern.

Für die Kirschen kann daher mit einer Abnahme der Wahrscheinlichkeit von leichten Frostschäden (d. h. mit Schäden zwischen 0 % und 10 %) gerechnet werden. Da in diese Größe aber bereits sehr viele kleine Schäden (alle, die größer null sind) mit gezählt werden, ist dieses Ergebnis für den Obstbau eher uninteressant. Die *Änderung der größeren Schäden* kann leider mit statistischen Mitteln nicht ausreichend vom *Rauschen* getrennt werden, jedenfalls nicht, wenn die einzelnen Größen, aus denen die Differenzen gebildet werden, aus nur jeweils 30 zur Verfügung stehenden Jahren berechnet werden. Daher kann keine gesicherte Aussage über die zukünftige Änderung dieser Größe getroffen werden. Das heißt aber nicht zwingend, dass es keine Änderungen in z. B. den Frostschäden geben kann. Wären die Prognosen der einzelnen regionalen Klimamodelle ähnlicher bzw. würden sich die Klimamodelle nicht so stark widersprechen, dann würden auch die Konfidenzintervalle *des Mittelwerts über die Modelle* kleiner werden und die z. B. vom HCLM vorhergesagte Änderung der Frostschäden von -5.1 % (siehe **Tabelle H.25**), die dann auch ungefähr von den anderen Modellen vorhergesagt werden könnte, würde vielleicht signifikant werden.

Im **Anhang L** wird eine alternative Methode zur Berechnung von Frostwahrscheinlichkeiten und -schäden vorgestellt, mit der es möglich ist, die störend großen Konfidenzintervalle mit Hilfe von Monte-Carlo-Methoden¹⁷ im Prinzip beliebig klein zu machen. Allerdings müssen einige andere Annahmen getroffen werden, die wiederum eine gewisse Unschärfe in die Sicherheit der Ergebnisse einbringen. Die Methode konnte aus Zeitgründen bisher leider auch nur exemplarisch angewendet werden.

¹⁷ Wenigstens für die Ergebnisse mit Daten aus einem einzelnen Klimamodell.

5.4.6 Zusammenfassung

Trotz der signifikanten Verfrühung des Blühbeginns bei allen Fruchtarten konnten, außer bei den Kirschen, keine signifikanten Veränderungen in den Frostschäden s_F prognostiziert werden. Nur bei den Sauer- und Süßkirschen berechnet man eine signifikante Abnahme der *FROSTSCHADENSPROB0* (s_F^{0-10} = Wahrscheinlichkeit für Schäden zwischen 0 % und 10 %) von 18 % bzw. 23 %, die aber wegen der oben diskutierten Trivialität der meisten Schäden für den Obstbauern kaum von Bedeutung ist. Bei den Süßkirschen verringert sich auch die *FROSTPROB0* ($P_{F,0}$ = Wahrscheinlichkeit, dass die Tagesminimumtemperatur $T_n < 0^\circ\text{C}$ ist) und die *FROSTPROB1* ($P_{F,1}$ = Wahrscheinlichkeit, dass $-2^\circ\text{C} \leq T_n < 0^\circ\text{C}$ gilt) um jeweils ca. 20 % signifikant, was aber ebenfalls aus den obigen Gründen kaum von Bedeutung ist. Die Anzahl n_F^0 der Frosttage (bezogen auf die für die Frostschutzberechnung wichtigere Feuchttemperatur, d. h. mit $T_f < -2^\circ\text{C}$ vor Blühbeginn und mit $T_f < 0^\circ\text{C}$ danach) ist bei allen betrachteten Fruchtarten nicht signifikant von null verschieden.

Dass die Veränderung der Frostschäden nicht signifikant ist, bedeutet aber nicht, dass die möglichen Veränderungen null oder ganz klein sind. Eine Zu- oder Abnahme innerhalb der 95 %-Konfidenzintervalle von Abbildung H.10 (bzw. sogar innerhalb der verdoppelten Konfidenzintervalle; vgl. Bemerkung auf Seite 50) ist nicht unwahrscheinlich.

Die theoretischen Überlegungen in Anhang L zeigen, dass mit den verbesserten Phänomodellen eher eine Abnahme der Frostschäden in Zukunft zu erwarten ist, wenn nur der Frühjahrstemperaturanstieg a der Tagesminimumtemperatur T_n und die Varianzen von T_n und des Blühbeginnstermins BB in der Zukunft ungefähr dieselben Werte behalten werden wie heutzutage. Die konventionellen GDD-Modelle (ohne DAYLENGTH-Korrektur) mit frühem Start der Forcing-Akkumulation würden unter diesen Voraussetzung zu gleichbleibenden Frostschäden führen.

5.5 Veränderungen bei den durch den Apfelwickler hervorgerufenen Schäden

Abbildung 5.41 stellt den Apfelwicklergenerationsindex I_A als Funktion der Zeit dar, der mit dem in Kapitel 4.9 beschriebenen Modell berechnet wurde. Die Ergebnisse wurden über die 19 Obstanbaugitterpunkte gemittelt. Man erkennt, dass die Anzahl der Generationen zum Ende des 21. Jahrhunderts hin kontinuierlich ansteigt. Ab 2080 werden im Mittel fast zwei komplette Generationen erreicht. Die zu kleinen Varianzen der Temperatur in WETTREG2010 (vgl. Abbildung 4.6) führen dazu, dass auch die Schwankungen der Anzahl der Apfelwicklergenerationen bei Nutzung der Temperaturen dieses Modells vollkommen unterschätzt werden (magenta-farbene Kurven).

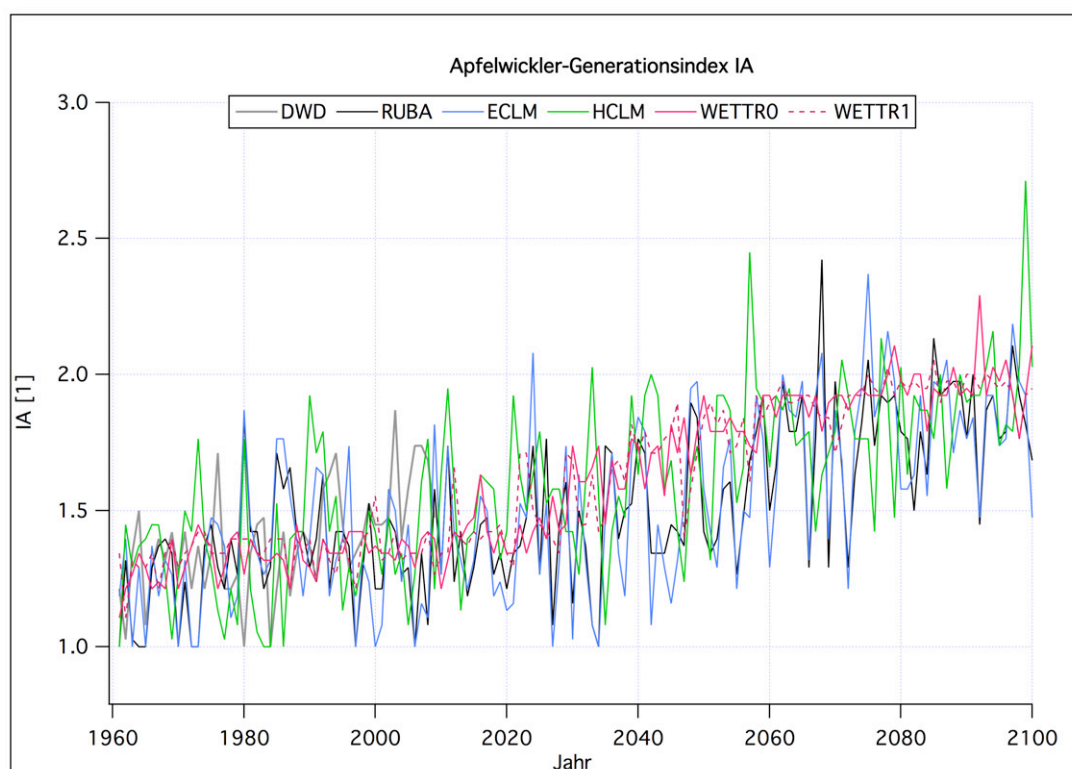


Abbildung 5.41: Apfelwicklergenerationsindex I_A als Funktion der Zeit, gemittelt über die 19 Obstanbaugitterpunkte, berechnet mit den Temperaturen der 5 regionalen Klimamodelle.

Aus den jährlichen Werten des Apfelwickler-Generationsindex I_A können nun für 30-jährige Zeitabschnitte für ein bestimmtes Gebiet Wahrscheinlichkeiten¹⁸ $Prob(k)$ ($\equiv Prob_k$) für das Auftreten der möglichen 5 Fälle ($I_A = k \in \{1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\}$) berechnet werden. **Abbildung 5.42** zeigt die Aufteilung dieser Wahrscheinlichkeiten für vier 30-Jahresabschnitte und die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen. Während 1971-2000 noch zu ca. 33% nur eine einzige Generation prognostiziert wurde, treten 2071-2100 mindestens eine beginnende zweite Generation auf. Mit etwas mehr als 70% dominiert $I_A = 2$, d. h. eine vollständige 2. Generation.

¹⁸ Bzw. relative Häufigkeiten als Schätzwert dieser Wahrscheinlichkeiten.

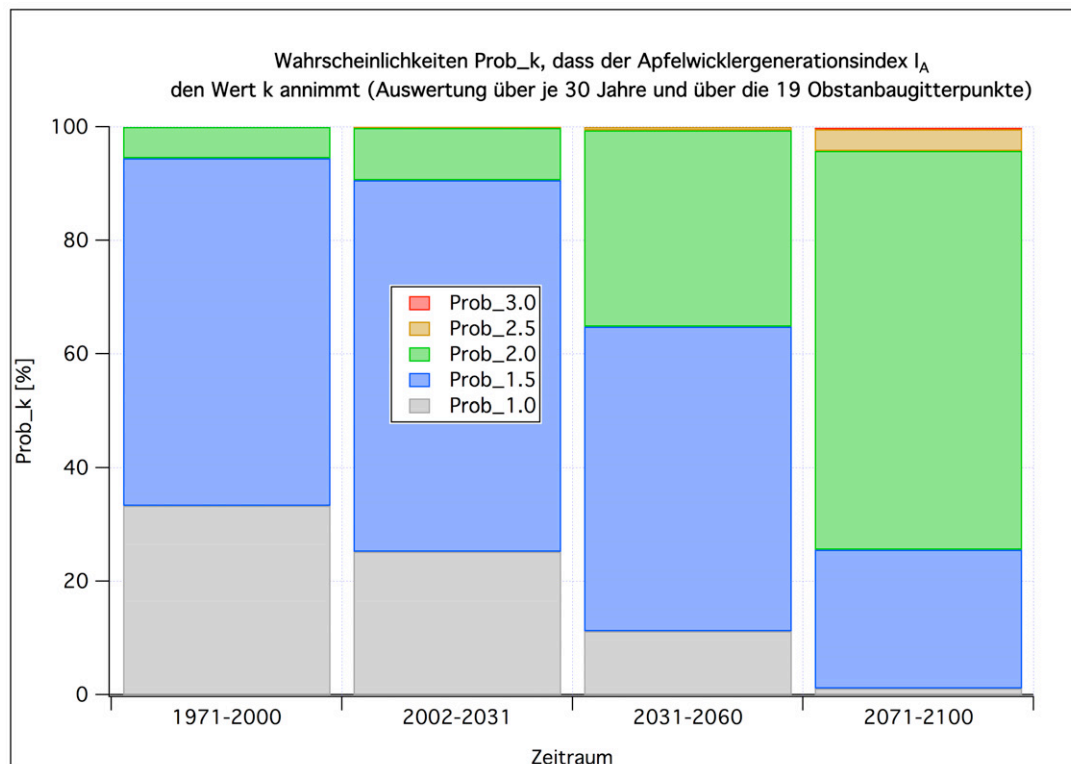


Abbildung 5.42: Wahrscheinlichkeit $Prob_k$, dass der Apfelwicklergenerationsindex I_A den Wert k annimmt (Mittelwerte über je 30 Jahre, über die 19 Obstanbaugitterpunkte und die 5 Klimamodelle).

Abbildung 5.43 zeigt ein Beispiel für mittlere¹⁹ Apfelwicklerschäden s_A^a ohne, Schäden s_A^{ext} mit der extensiven und $s_A^{ext-int}$ „mit der extensiven Methode im Zeitraum 1971-2000 und danach mit den intensiven Bekämpfungsmaßnahmen“ im Mittel über die 19 Obstanbaugitterpunkte und die 5 Klimamodelle. Die Fehlerbalken in der Abbildung sind zweiseitige 95 %-Konfidenzintervalle²⁰. Während sich die Schäden ohne Gegenmaßnahmen zwischen 8 % im Zeitraum 1971-2000 und 14 % im Zeitraum 2071-2100 bewegen (graue Balken), sind die Schäden bei Anwendung der extensiven Bekämpfungsmethode mit 2 % bis 3 % wesentlich geringer (blaue Balken). Die intensive Methode, die hier erst nach dem Jahr 2000 eingesetzt wird, verringert sogar noch die Schäden gegenüber dem Zeitraum 1971-2000, in dem noch die extensive Methode eingesetzt wurde (rote Balken). Allerdings sind die Kosten für den Einsatz der intensiven Methode auch höher als die für die extensive Methode. Die durch die verringerten Schäden am Obst eingesparten Verluste machen diese Mehrkosten aber mehr als wett.

¹⁹ Man unterscheide diese Schäden von denen in der Tabelle 4.18 gelisteten Schäden. Die hier dargestellten Schäden sind Mittelwerte über viele Jahre und Pixel, in denen verschiedene Generationsindizes I_A auftraten. Die Werte in Tabelle 4.18 beziehen sich immer auf feste I_A -Werte!

²⁰ Diese beziehen sich nur auf die statistischen Schwankungen der 30-jährigen Mittelwerte über das betrachtete Gebiet. Die Unsicherheiten im Modellansatz sind hierin nicht enthalten!

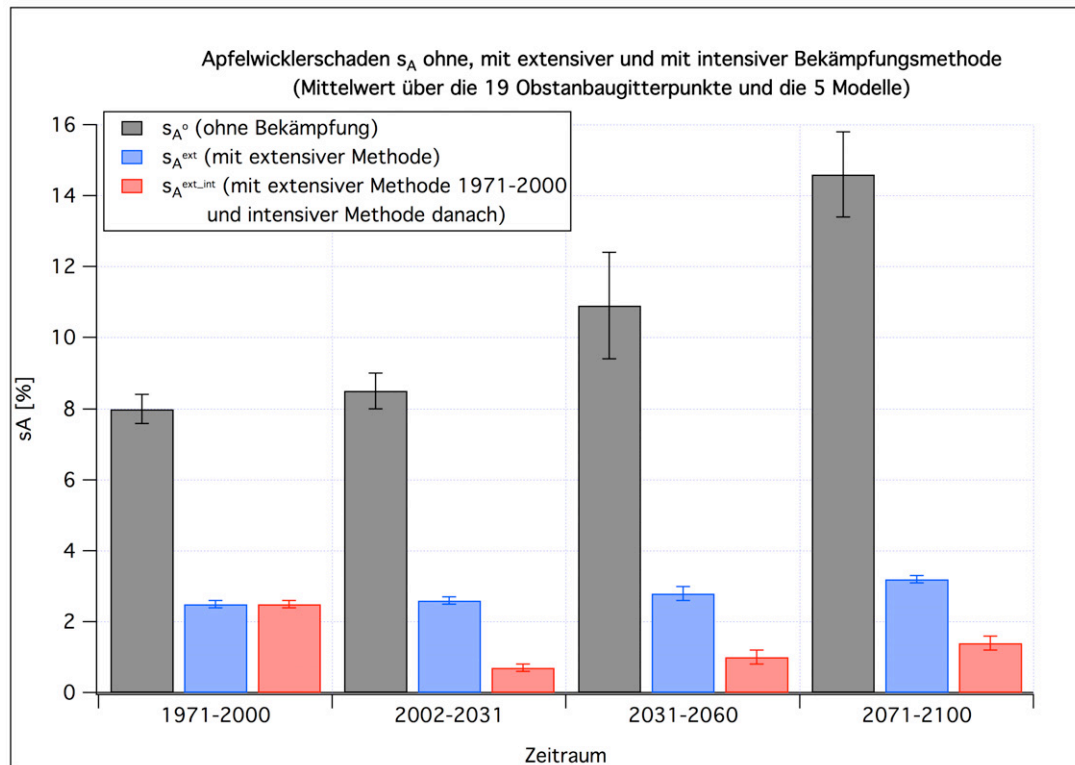


Abbildung 5.43: Apfelwicklerschaden s_A ohne, mit extensiver Bekämpfungsmethode und 'mit extensiver im Zeitraum 1971-2000 und danach mit intensiver Bekämpfungsmethode' (Mittelwerte über je 30 Jahre, über die 19 Obstanbaugitterpunkte und die 5 Klimamodelle).

Eine quantitative Aufschlüsselung der Ergebnisse für verschiedene Apfelwickler-Größen in Tabellenform findet man im **Anhang I**. Dort sind auch die Ergebnisse, die mit den Temperaturen der unterschiedlichen Klimamodelle berechnet wurden, zusätzlich zu den Mittelwerten über diese Ergebnisse gelistet.

Zusammenfassung: Der Generationsindex I_a des Apfelwicklers steigt hoch signifikant von einer oder einer partiellen 2. Generation im Zeitraum 1971-2000 auf fast zwei vollständige Generationen im Zeitraum 2071-2100 an. Der hierdurch verursachte Schaden steigt ebenfalls hoch signifikant (von null verschieden) um 6.6 % von 8.0 % auf 14.6 % an, wenn man überhaupt keine Maßnahmen gegen den Apfelwickler ergreifen würde. Bei Durchführung von extensiven Maßnahmen beträgt der Schaden 1971-2000 nur 2.5 % und steigt um nur 0.7 % auf 3.2 % im Zeitraum 2071-2100 an. Werden 1971-2000 extensive Maßnahmen durchgeführt und nach 2000 die um ca. 200 €/ha/a teureren intensiven Maßnahmen, so sinkt der mittlere Apfelwicklerschaden bis zum Zeitraum 2071-2100 um hoch signifikante -1.1 % auf 1.4 % ab.

5.6 Veränderungen im Wasserhaushalt, bei den Fruchterträgen und bei der Bienenflugintensität

Nun sollen einige Ergebnisse für Ertragsschäden mit und ohne CO₂-Effekt vorgestellt werden. Dabei werden Fälle mit und ohne Sommerberegnung unterschieden. Weiterhin findet man hier auch Resultate für die notwendige Sommerberegnungsmenge und die Transpirationsmenge im Zeitraum von Blühbeginn bis zur Reife.

Abbildung 5.44 zeigt die nach Gleichung (4.175) berechneten relativen Ertragsschäden für den frühreifen Apfel **ohne** Sommerberegnung mit und ohne CO₂-Düngung (vgl. Kapitel 4.10.7) als Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte und über den Zeitraum 1971-2000. Dargestellt sind die Ergebnisse, die mit den Wetterdaten der 5 Klimamodelle und mit regionalisierten Beobachtungen des DWD berechnet wurden (graue Balken), und die Mittelwerte über die Ergebnisse der 5 Modelle (hellblaue Balken). Die Schäden sind moderat und liegen zwischen 5% und 7%. Genauere Angaben in Tabellenform findet man in den **Tabellen J.3** und **J.4** im Anhang **J**. Dass sich die Schäden “in den einzelnen” Modellen nicht stärker unterscheiden, ist vor allem auf die BIAS-Korrektur der Niederschlagsdaten der RCM’s zurückzuführen.

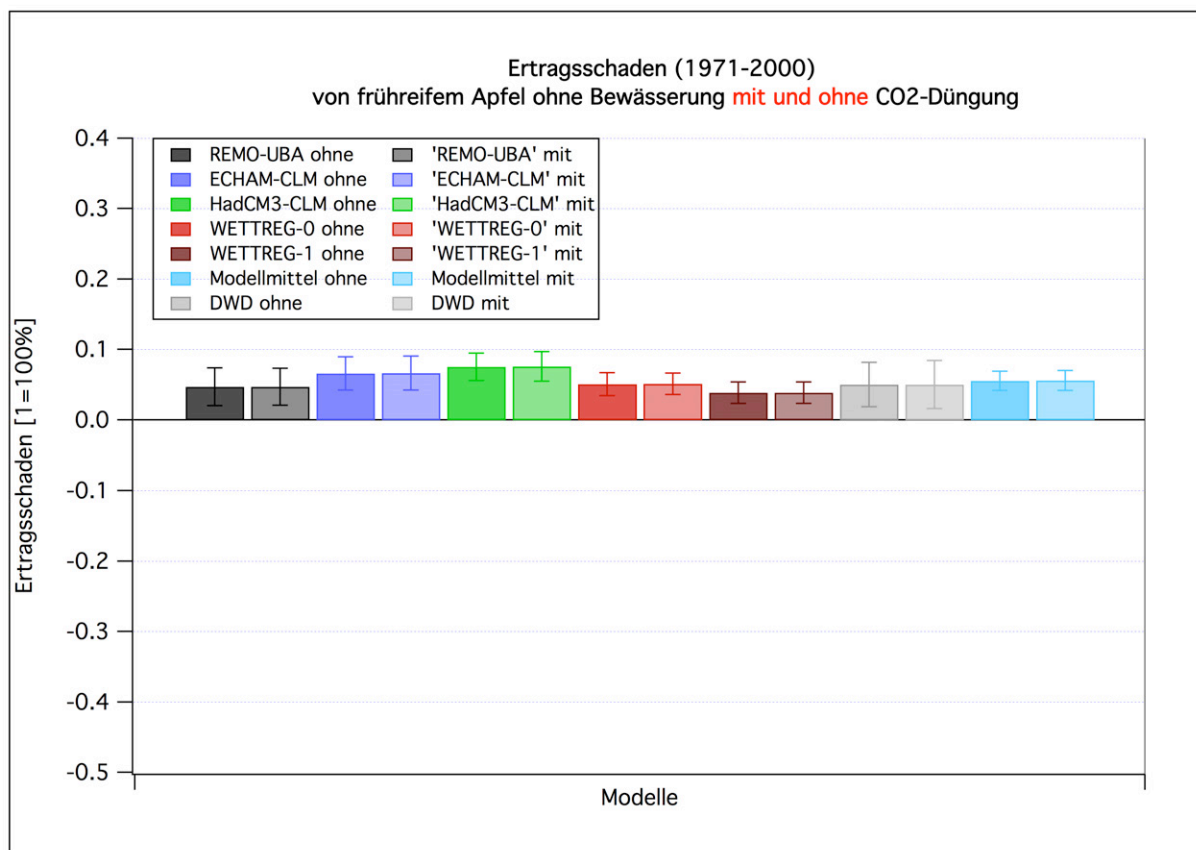


Abbildung 5.44: Relativer Ertragsschaden s_Y beim frühreifen Apfel **ohne Bewässerung**. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte und den Zeitraum 1971-2000 “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

In **Abbildung 5.45** sind die Veränderungen der relativen Ertragsschäden zwischen den Zeitabschnitten 1971-2000 und 2071-2100 **ohne künstliche Sommerberechnung** aufgetragen. Die jeweils linken Balken wurden ohne CO₂-Düngung berechnet und zeigen nur eine leichte und meistens nicht signifikante Zunahme (auf dem 95 %-Niveau). Die rechten Balken wurden mit CO₂-Düngung ermittelt und zeigen signifikant negative, relative Schäden. D. h., dass 2071-2100 ein Ertragsgewinn gegenüber 1971-2000 sogar ohne zusätzliche Sommerberechnung erzielt wird. Das liegt daran, dass der CO₂-Gehalt der Luft bis zum Ende des 21. Jahrhunderts stark ansteigt (Abbildung 4.44) und sich daher der Düngeeffekt mit der Zeit verstärkt. Die hier betrachteten Schadensänderungen beruhen auf Ertragsschäden, die sowohl durch Trockenstress und als auch durch sonstige meteorologische Bedingungen, die beispielsweise zu einer veränderten Reifeperiode führen, entstehen können.

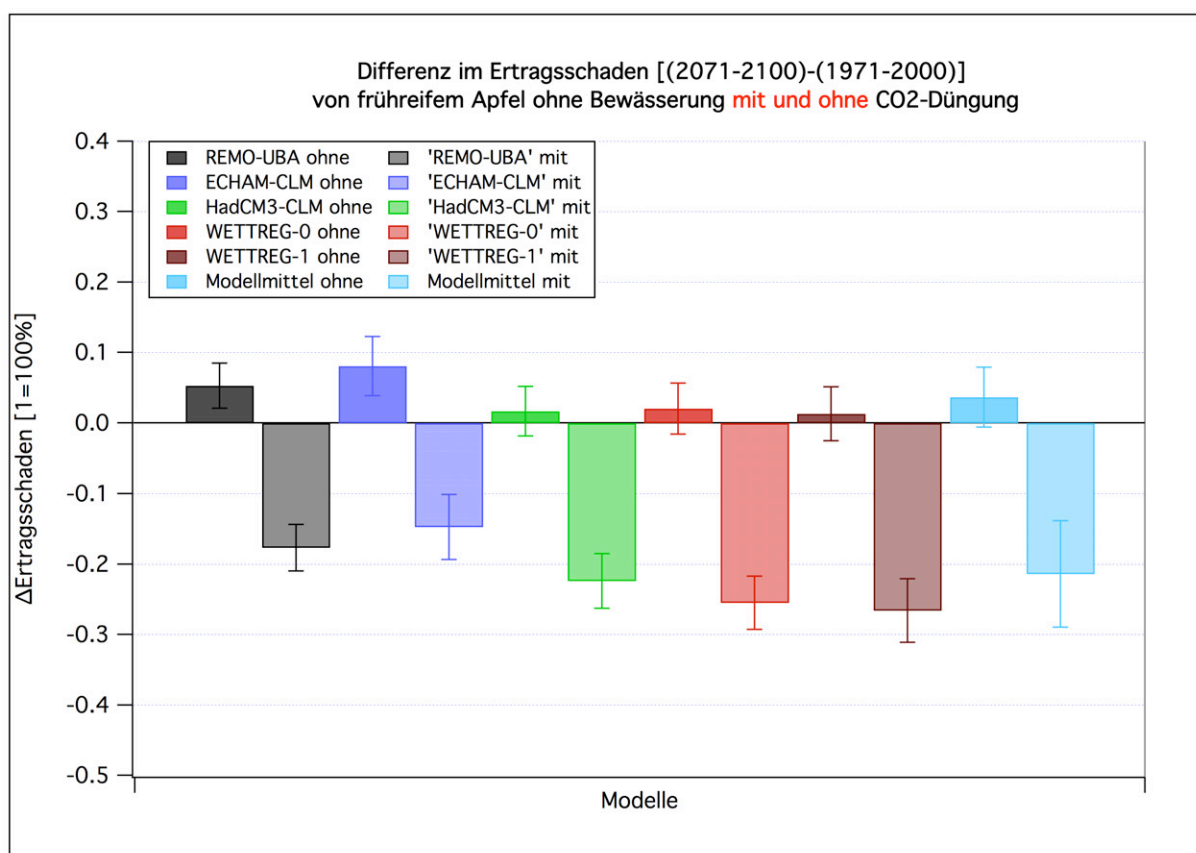


Abbildung 5.45: Veränderung $[(2071-2100)-(1971-2000)]$ des relativen **Ertragsschadens** s_Y beim frühreifen Apfel **ohne Bewässerung**. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstbaugitterpunkte “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

Die **Abbildungen 5.46** und **5.47** entsprechen den beiden vorhergehenden Abbildungen, nur wurden die Rechnungen nun **mit Sommerberechnung** durchgeführt. Gemäß der Definition des relativen Ertragsschadens [Gleichung (4.175)] sind die Schäden im Zeitraum 1971-2000 nun im Mittel gleich null. Ob mit oder ohne CO₂-Düngung gerechnet wird, spielt 1971-2000 keine Rolle, da die CO₂-Konzentration in diesem Zeitraum im Mittel gerade den Wert [CO₂]₀ aufweist und der CO₂-“Verstärkungsfaktor” daher den Wert eins hat [Gleichungen (4.171) und (4.172); siehe auch Fußnote 178 auf Seite 160].

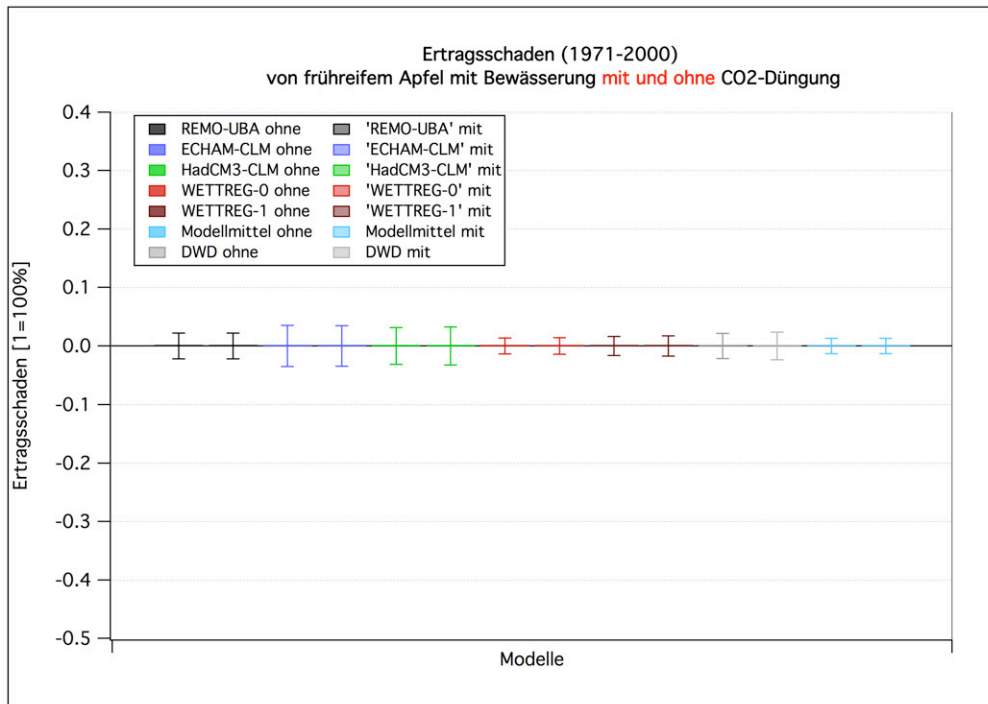


Abbildung 5.46: Relativer **Ertragsschaden** s_Y beim frühreifem Apfel **mit Bewässerung**. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte und den Zeitraum 1971-2000 “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

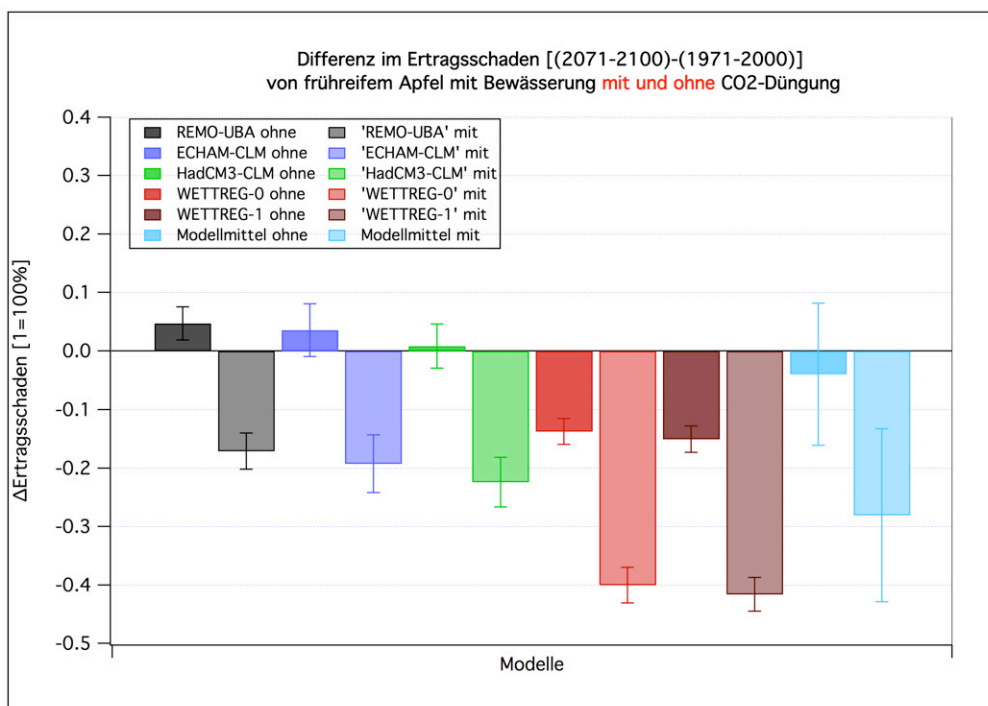


Abbildung 5.47: Veränderung [(2071-2100)-(1971-2000)] des relativen **Ertragsschadens** s_Y beim frühreifem Apfel **mit Bewässerung**. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

Die Veränderungen der Schäden bis 2071-2100 sind **mit Sommerberegnung** negativer als ohne. D. h., dass die Erträge zum Ende des 21. Jahrhunderts größer werden als ohne Sommerberegnung. Die Rechnungen mit REMO-UBA und ECHAM5-CLM ohne CO₂-Düngung ergeben zwar einen leichten Anstieg der Schäden, und das HadCM3-CLM zeigt ohne CO₂-Düngung keine Veränderung. Alle anderen Modellläufe sagen aber eine Abnahme der Schäden voraus. Im “Modellmittel” sind die Schäden ohne CO₂-Düngung nicht signifikant von null verschieden, mit CO₂-Düngung sind aber signifikante Ertragsgewinne von ca. 28 % ($\pm 15\%$; vgl. **Tabelle J.6**) zu erwarten.

In **Abbildung 5.48** ist die Bewässerungsmenge *SUMBEW* (in mm Wassersäule pro Saison) als Mittelwert für den Zeitraum 1971-2000 (jeweils von Blühbeginn bis zur Reife) für den frühreifen Apfel aufgetragen, die bei der Berechnungsmethode 3 (vgl. Kapitel 4.10.5) notwendig ist. Die Kenntnis dieser Größe ist z. B. notwendig, wenn man aus den weiter unten angegebenen Veränderungen relative Zu- und Abnahmen der Bewässerungsmenge berechnen möchte. Die CO₂-Düngung spielt im Zeitraum 1971-2000 wieder keine Rolle.

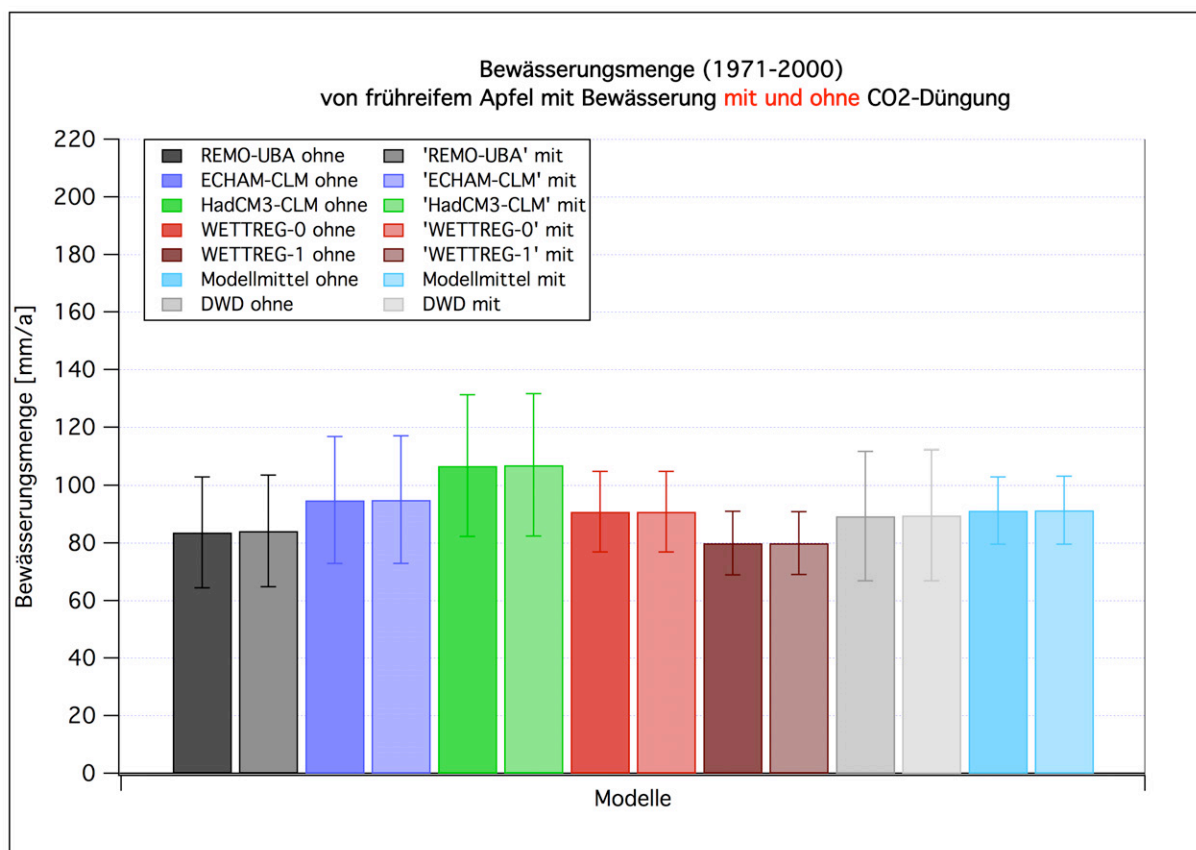


Abbildung 5.48: “Notwendige **Bewässerungsmenge** *SUMBEW* vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte und den Zeitraum 1971-2000 “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

Die Veränderung der notwendigen Beregnungsmenge zwischen 1971-2000 und 2071-2100 kann man der **Abbildung 5.49** entnehmen. Insgesamt ist eine Zunahme der Beregnungsmenge zu beobachten. Diese fällt mit CO₂-Düngung etwas geringer aus als ohne, da der Stomatawiderstand mit steigendem CO₂-Gehalt zunimmt [Gleichung (4.172)]. Im “Modellmittel” beträgt die Veränderung ohne CO₂-Düngung 52 mm/a (± 44 mm/s) und mit CO₂-Düngung 31 mm/a (± 40 mm/a; nicht signifikant!) (vgl. **Tabellen J.7** und **J.8**).

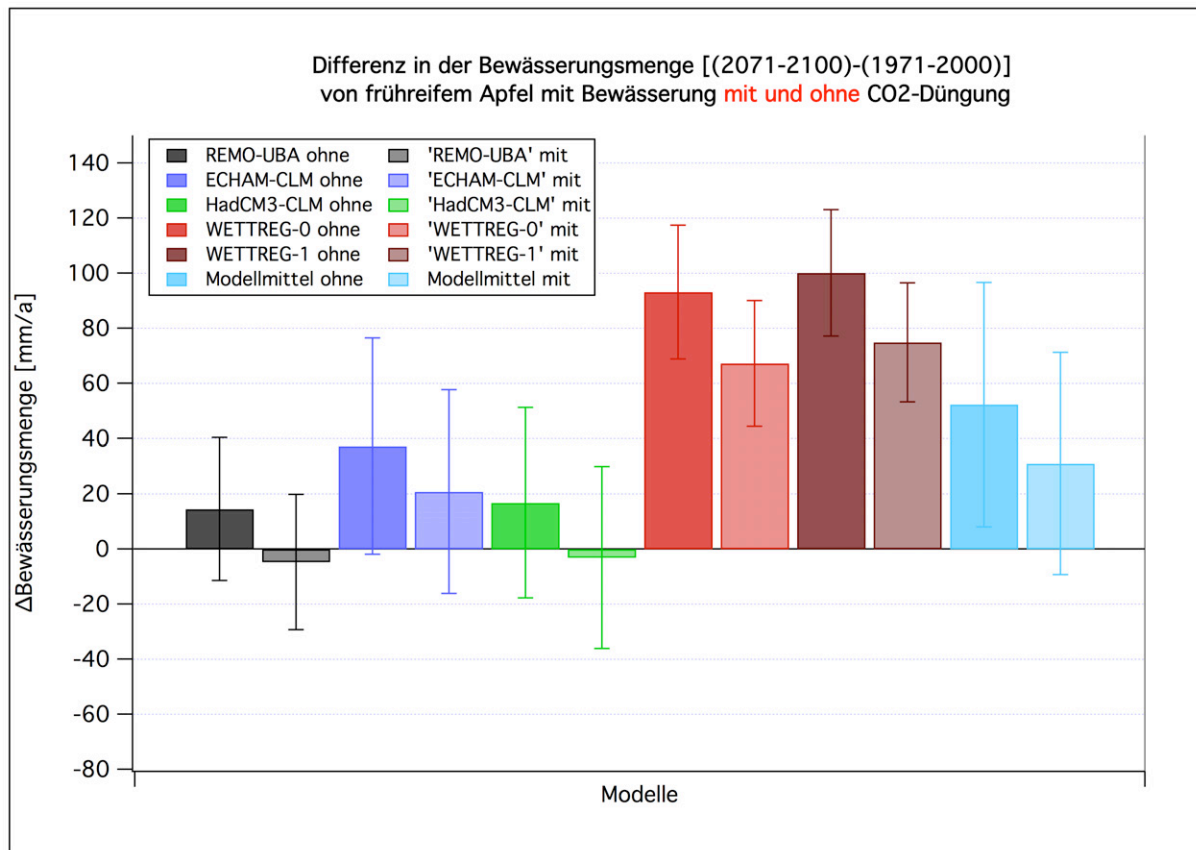


Abbildung 5.49: Veränderung [(2071-2100)-(1971-2000)] der “notwendigen **Bewässerungsmenge** *SUMBEW* vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifenden Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

Für die vom Blühbeginn bis zur Reife akkumulierte Transpirationsmenge *SUMTRSV* beim frühreifenden Apfel (mit Sommerberegnung) ergibt sich ein ganz ähnliches Ergebnis wie bei der Bewässerungsmenge, nur das hier die absoluten Werte von *SUMTRSV* (in mm pro Saison) mehr als doppelt so hoch sind wie bei der notwendigen Bewässerungsmenge (**Abbildung 5.50** und **5.51**).

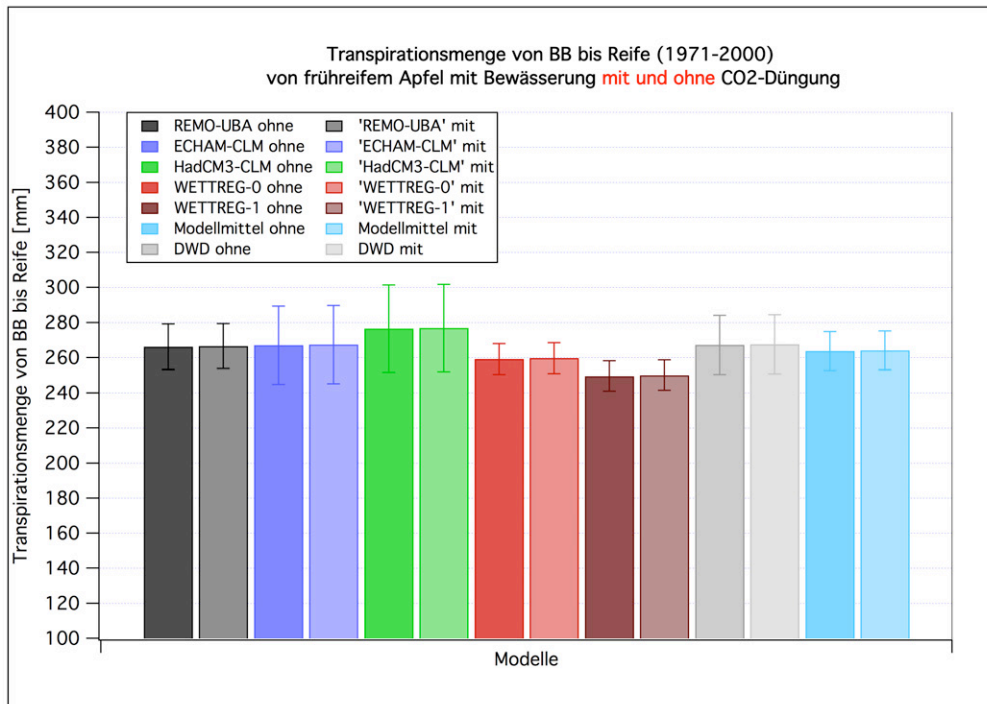


Abbildung 5.50: “Transpirationsmenge *SUMTRSV* vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte und den Zeitraum 1971-2000 “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

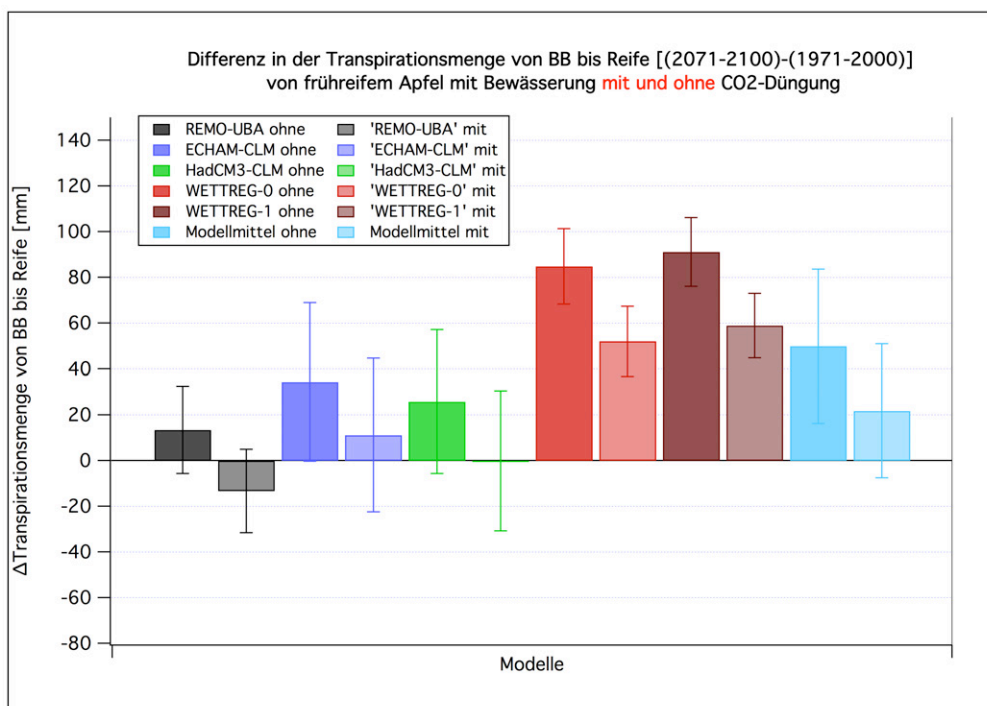


Abbildung 5.51: Veränderung [(2071-2100)-(1971-2000)] der “Transpirationsmenge *SUMTRSV* vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

Als letztes Beispiel der vielen SIMWASER-Outputgrößen sei noch die mittlere Bienenflugintensität (von Blühbeginn bis Blühende²¹) beim frühreifen Apfel gezeigt (vgl. Kapitel 4.10.6). **Abbildung 5.52** zeigt die mittlere relative Bienenflugintensität für alle Jahre von 1961 bis 2100, so wie sie mit den Wetterdaten der 5 Klimamodelle und mit den DWD-Beobachtungen berechnet wurden. Die Ergebnisse sind wie üblich Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte.²² Man erkennt große *Jahr zu Jahr*-Schwankungen und einen Trend zu etwas geringerer Bienenflugintensität in der Zukunft.

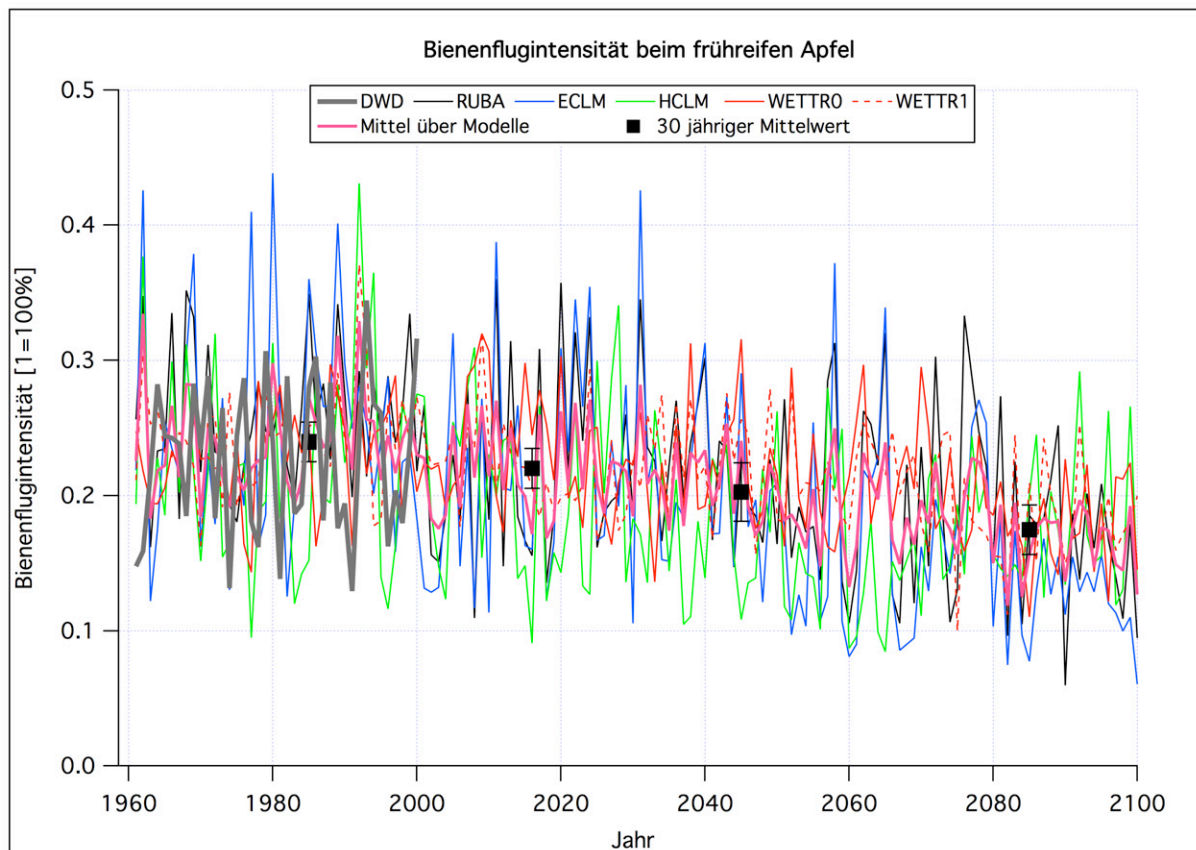


Abbildung 5.52: Relative Bienenflugintensität während der Blüte beim frühreifen Apfel, berechnet mit den Klimawerten der 5 RCM's und mit DWD-Werten. Jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

Die über den Zeitraum 1971-2000 gemittelten Intensitäten, berechnet mit den Outputdaten der 5 Klimamodelle und mit den DWD-Beobachtungen, sowie die "Modellmittelwerte" sind in **Abbildung 5.53** aufgetragen.

Die Veränderungen bis zum Zeitraum 2071-2100 findet man in der **Grafik 5.54**. Insgesamt nimmt die Intensität im "Modellmittel" signifikant um ca. 7.3% ($\pm 2.4\%$) ab (**Tabelle J.11**).

²¹ Da der Blühbeginn und das Blühende von der Obstart abhängen, hängen die Bienenflugintensitäten ebenfalls von der Obstart ab.

²² D. h., dass zuerst für jeden Gitterpunkt getrennt die Intensitäten berechnet wurden. Erst danach wurden die Ergebnisse gemittelt.

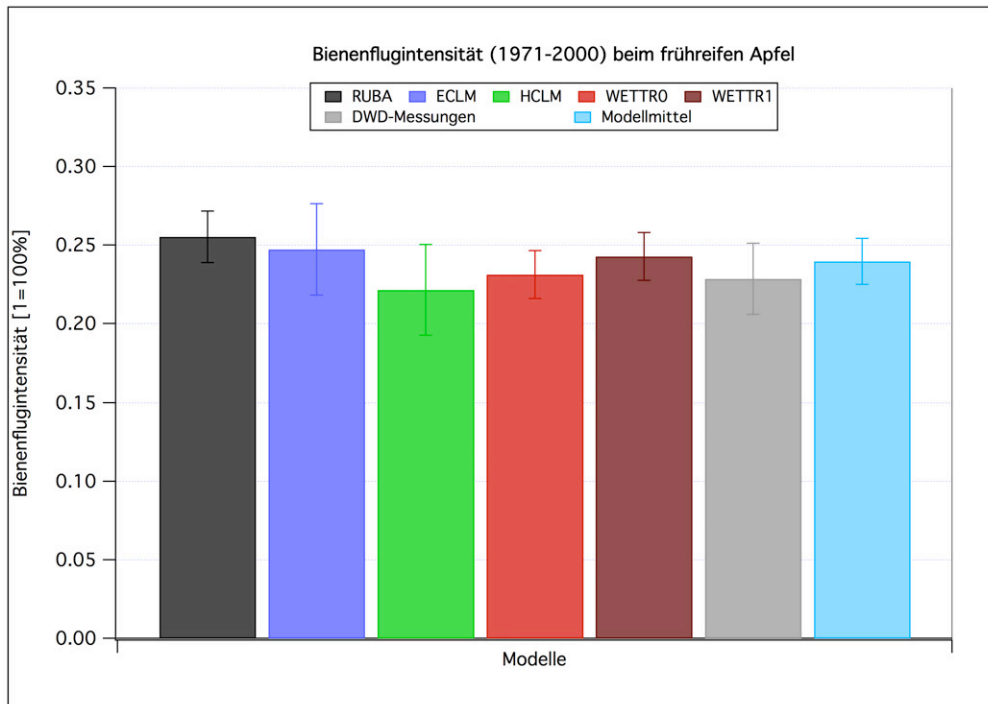


Abbildung 5.53: Mittlere relative **Bienenflugintensität** während der Blütezeit beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte und den Zeitraum 1971-2000.

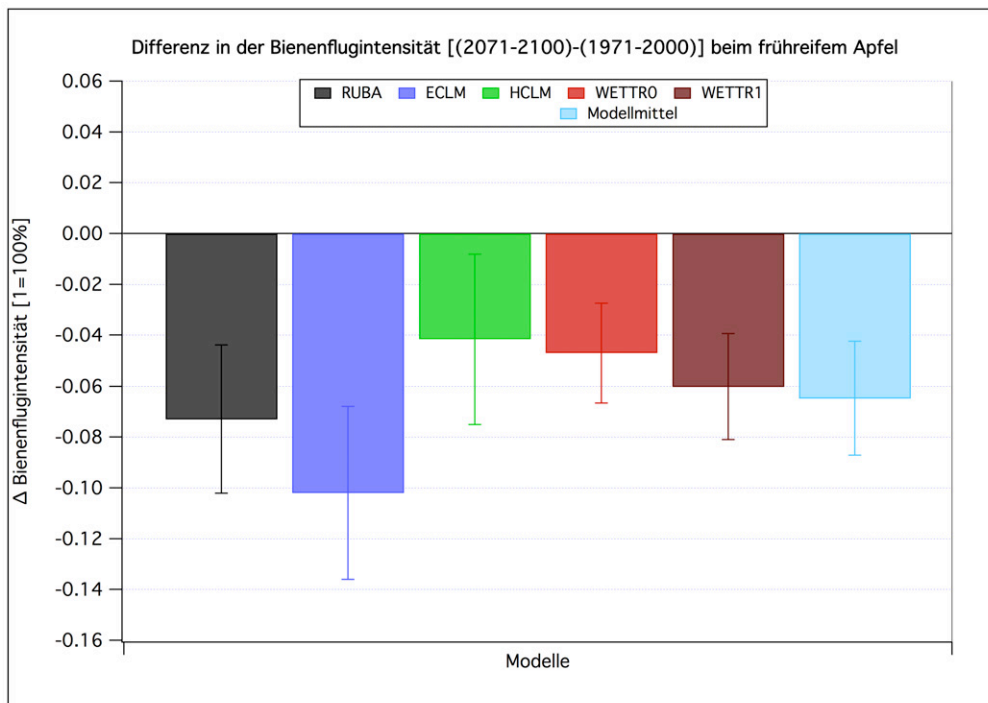


Abbildung 5.54: Veränderung [(2071-2100)-(1971-2000)] der mittleren relativen **Bienenflugintensität** während der Blütezeit beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

Ergebnisse für insgesamt 9 verschiedene Fruchtarten mit Unterscheidung von *frühreifend* und *spätreifend* bei 4 dieser 9 Fruchtarten findet man im Anhang J. Eine vergleichende Darstellung aller 13 Fruchtarten/-sorten für die Variablen Feuchtmassenertrag, Ertragsschaden, Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife, Transpirationsmenge von Blühbeginn bis Reife und die Bienenflugintensität während der Blüte findet man im Anhang J.14.

Zusammenfassung: Über die Veränderungen zwischen den beiden 30-Jahreszeiträumen 1971-2000 und 2071-2100 für die Mittelwerte “über die 5 Klimamodellläufe” und 19 Obstanbaugitterpunkte²³ kann man Folgendes konstatieren: Die **Ertragsschäden** ohne künstliche Sommerberegnung nehmen ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung leicht um 4 % bis 8 % zu (**Abbildung J.4**). Die Zunahme ist aber nur beim spätreifen Apfel, der Birne, beim Pfirsich und der spätreifen Pflaume signifikant. Mit Berücksichtigung der CO₂-Düngung ist eine signifikante Abnahme der Schäden (bzw. ein Ertragszuwachs) von ca. 14 % bis 41 % zu erwarten.²⁴

Mit Sommerberegnung (**Abbildung J.6**) sind alle Veränderungen der Ertragsschäden ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung nicht signifikant (auch beim spätreifen Apfel sind die Änderungen nicht signifikant, wenn man das auf Seite 429 Gesagte berücksichtigt), und alle Fruchtarten zeigen mit Berücksichtigung der CO₂-Düngung einen erheblichen, signifikanten Rückgang der Schäden bzw. einen Ertragszuwachs von 18 % bis 54 %.

Die **Sommerberegnung** ohne CO₂-Effekt nimmt beim spätreifen Apfel um 166 mm, bei der frühreifen Birne um 90 mm, bei der spätreifen Birne um 135 mm, beim Wein um 63 mm und bei der spätreifen Pflaume um 105 mm signifikant zu [(2071-2100)-(1971-2000); jeweils von Blühbeginn bis Reife]. Mit Berücksichtigung der CO₂-Düngung ist die Zunahme um 20 mm bis 40 mm²⁵ geringer als ohne (**Abbildung J.8**). Ein ganz ähnliches Ergebnis ergibt sich auch für die **Gesamttranspiration** von Blühbeginn bis zur Reife (**Abbildung J.10**).

Die mittlere Bienenflugintensität während der Blütezeit nimmt für alle Fruchtarten (außer beim Wein) um 4 % bis 7 % signifikant ab (**Abbildung J.12**). Beim sehr spät blühenden Wein ist eine nicht signifikante Zunahme um 2.5 % ($\pm 2.9\%$) zu beobachten (**Tabelle J.99**).

²³ bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte beim Wein und bei der Erdbeere.

²⁴ Man beachte aber die auf Seite 147 erwähnten Unsicherheiten in Bezug auf den CO₂-Düngeeffekt.

²⁵ Beim Wein ist wegen des höheren Ertrags (größerer LAI) praktisch keine Veränderung festzustellen.

5.7 Schäden und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen

Für Pfirsich, Aprikose und Erdbeere konnten keine Gesamtschäden und Gesamtkosten des Klimawandels bestimmt werden, da u. a. keine Frostrechnungen für diese Obstarten durchgeführt werden konnten (siehe Seite 105)!

5.7.1 Geordnete Schäden und Gesamtschäden

In diesem Abschnitt werden die in den vorhergehenden Kapiteln (Kapitel 5.3 ff.)²⁶ diskutierten Einzelschäden in geordnete Schäden ss_i [Gleichung (4.188)] und Gesamtschäden s_{ges} [Gleichung (4.187)] umgerechnet und die entsprechenden Ergebnisse dargestellt.

Wie bereits in Kapitel 4.7 erläutert wurde, muss man zur Bestimmung des Dormanzschadens das Chilling-Requirement C^* der betrachteten Obstart und -sorte kennen und kann dann mit den Chilling-Modellen aus Kapitel 4.6.1.2 prüfen, ob das Chilling-Requirement bis zu einem kritischen Stichtag t_s erfüllt ist. Da das zur Zeit von den meisten Autoren als verlässlichstes Chilling-Modell eingestufte Dynamic Model (Modell 1g) aber nur in seltenen Fällen und auch nur für Sorten/Arten mit sehr hohem Chilling-Requirement (ca. 89 CP bzw. 1600 CH) bei $t_s = 90$ DOY (31. März) keine Dormanzbrechung berechnet (siehe die Ergebnisse aus Anhang G.3 für $C^* = 89$ CP und Modell 1g), treten auch für größere t_s und/oder kleinere C^* keine nennenswerten Dormanzschäden auf. Für die t_s aus Tabelle 4.16, die für die Schadensberechnungen verwendet wurden, treten für $C^* \leq 89$ CP (Modell 1g) überhaupt keine Dormanzschäden auf. Die mit $C^* = 89$ CP berechneten Ergebnisse sind daher für alle $C^* \leq 89$ CP gültig!

Abbildung 5.55 zeigt die mittleren geordneten Schäden ss_i (Kapitel 4.11.3) und den Gesamtschaden s_{ges} für die Strategie g-g (Abschnitt 4.12.4) für die verschiedenen Obstarten, wenn die CO₂-Düngung und auch das Worst Case Szenario nicht berücksichtigt wird. Dabei wurde über je 30 Jahre und die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte) gemittelt. Im Zeitraum 1971-2000 wird der bei allen Obstarten positive Gesamtschaden (schwarze Balken) nur durch Frost (blaue Balken) (und beim Apfel z. T. durch den Apfelwickler; rote Balken) hervorgerufen. In der *Zukunft* verringert sich aber bei allen Arten außer bei der Kirsche, besonders bei den spätreifen Sorten, der Gesamtschaden durch den dann z. T. negativen Yieldschaden (d. h. Ertragszunahme; grüne Balken). Man beachte aber die großen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervalle), die dazu führen, dass nur beim spätreifen Apfel eine signifikante²⁷ Schadensabnahme (2071-2100 vs. 1971-2000) auftritt (siehe Tabelle K.3). Die Veränderungen der Schäden sind auch in **Abbildung 5.56** dargestellt. Dass die Yieldschäden bei den Kirschen im Mittel (nicht signifikant!) in der Zukunft zunehmen, liegt daran, dass die Kirschen bereits sehr früh reif werden (Ende Juni bis Mitte Juli; siehe Tabelle E.1). Da sich die Reifeperiode bei der Kirsche etwas verkürzt (Abbildung F.2), kann sie nicht von den besonders im Juli und August in der Zukunft stark steigenden Temperaturen (Abbildung B.1) und Einstrahlungsbedingungen (Abbildung B.9) profitieren.

²⁶ Die Methodik wurde bereits in den Kapiteln 4.7 ff. beschrieben.

²⁷ Vergleiche die Bemerkungen zur Multiplizität auf Seite 293!

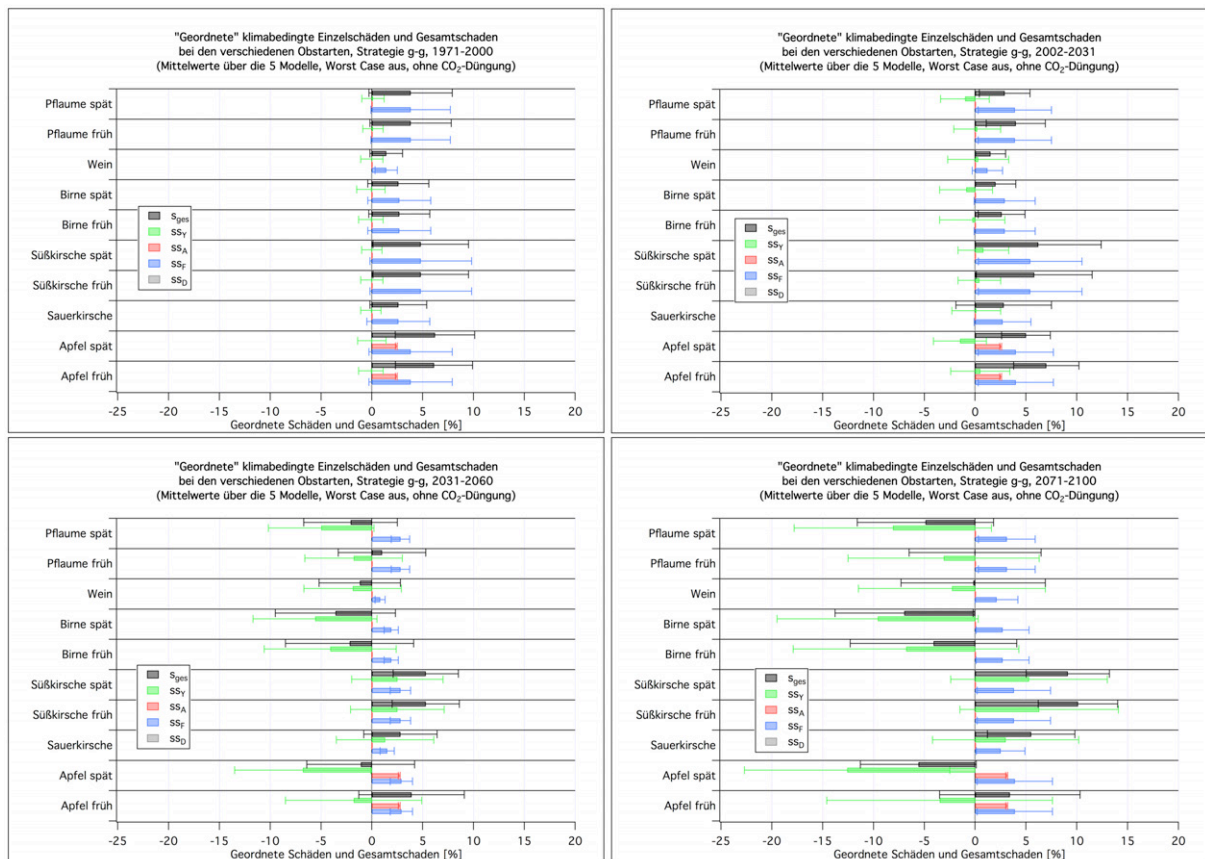


Abbildung 5.55: Geordnete Schäden ss_i und Gesamtschaden s_{ges} bei der **Strategie g-g** (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS); links oben: 1971-2000, rechts oben: 2002-2031; links unten: 2031-2060, rechts unten: 2071-2100.

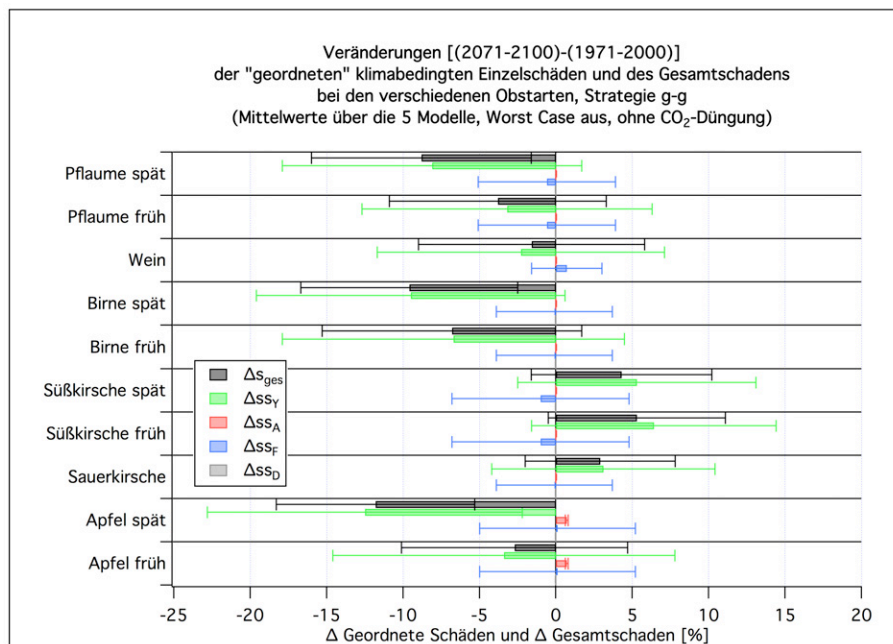


Abbildung 5.56: Veränderung Δss_i der geordneten Schäden und Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] bei **Strategie g-g** bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS).

Wie groß der Einfluss der beiden hier benutzten WETTREG-Läufe ist, zeigt die **Abbildung 5.57**. Hier sind die gleichen Schäden bei denselben Nebenbedingungen wie in der vorhergehenden Abbildung dargestellt, allerdings wurden diesmal nur die Klimadaten der 3 Modelle RUBA, ECLM und HCLM zur Berechnung der Schäden herangezogen. Nun zeigen nicht nur die Kirschen, sondern auch die frühreife Pflaume, der Wein und der frühreife Apfel positive Yieldschäden. Der Gesamtschaden hat jetzt beim frühreifen Apfel und beim Wein sogar das Vorzeichen geändert (siehe auch Tabelle K.4 und Abbildung K.6). Die großen Unterschiede im Yieldschaden s_Y zwischen WETTREG und den 3 dynamischen Modellen kann man gut in Tabelle J.5 beim frühreifen Apfel erkennen. Dass bei Berücksichtigung der WETTREG-Läufe in Abbildung 5.56 höhere Erträge (bzw. kleinere Yieldschäden) berechnet werden, liegt daran, dass das Modell WETTREG stärkere kurzweilige Einstrahlung vorhersagt. Diese führt, wenn die Bewässerung wie hier bei der g-Strategie ausreichend ist, zu gesteigerten Erträgen.

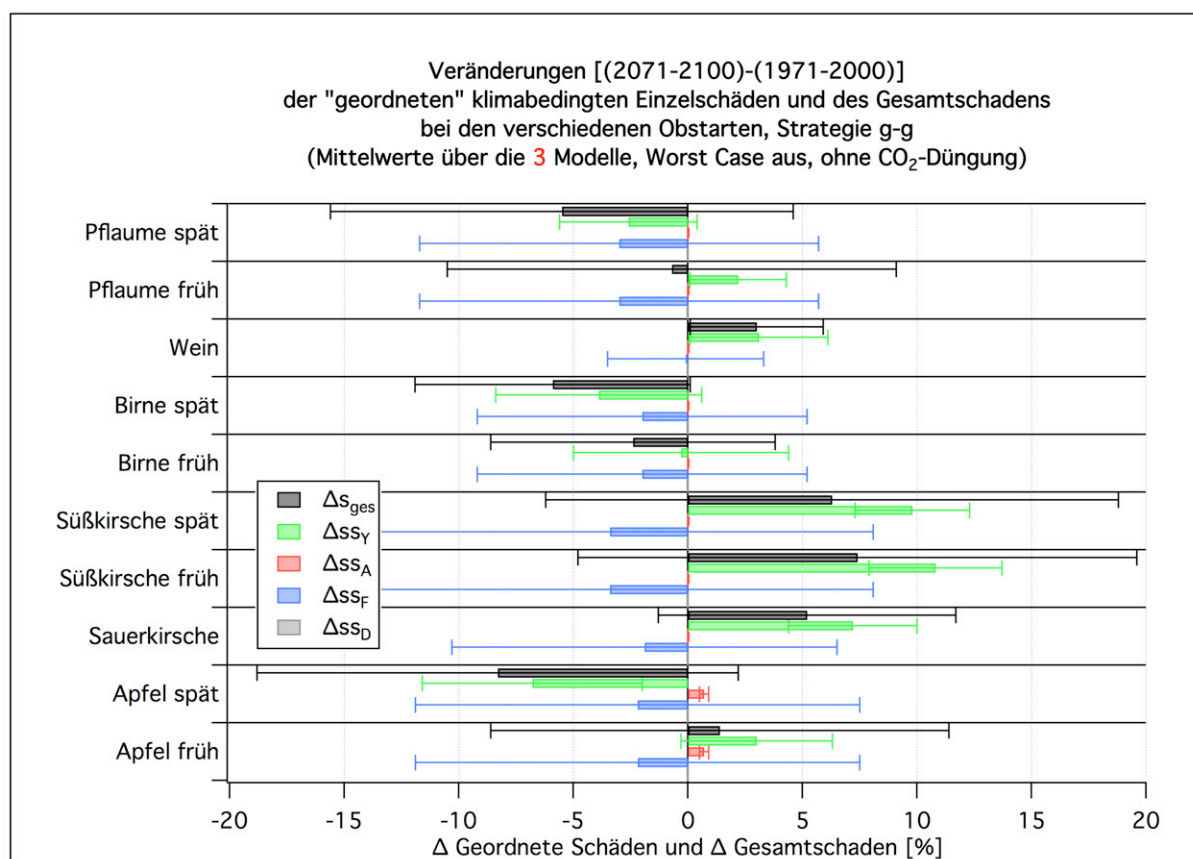


Abbildung 5.57: Veränderung Δss_i der geordneten Schäden und Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] bei **Strategie g-g** und Verwendung von **nur 3 Klimamodellläufen** bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS).

Mit CO₂-Düngung (**Abbildung 5.58**) sind die Schäden im Zeitraum 1971-2000 (hier wieder für die g-g-Strategie dargestellt) fast identisch mit denen der Abbildung 5.55. Danach werden die Yieldschäden s_Y aber sukzessive immer negativer (Ertragsgewinn), so dass bereits 2031-2060 alle Gesamtschäden signifikant negativ sind. Auch die Veränderungen (2071-2100 vs. 1971-2000) der Yield- und Gesamtschäden in **Abbildung 5.59** sind signifikant negativ (vgl. auch Tabelle K.5).

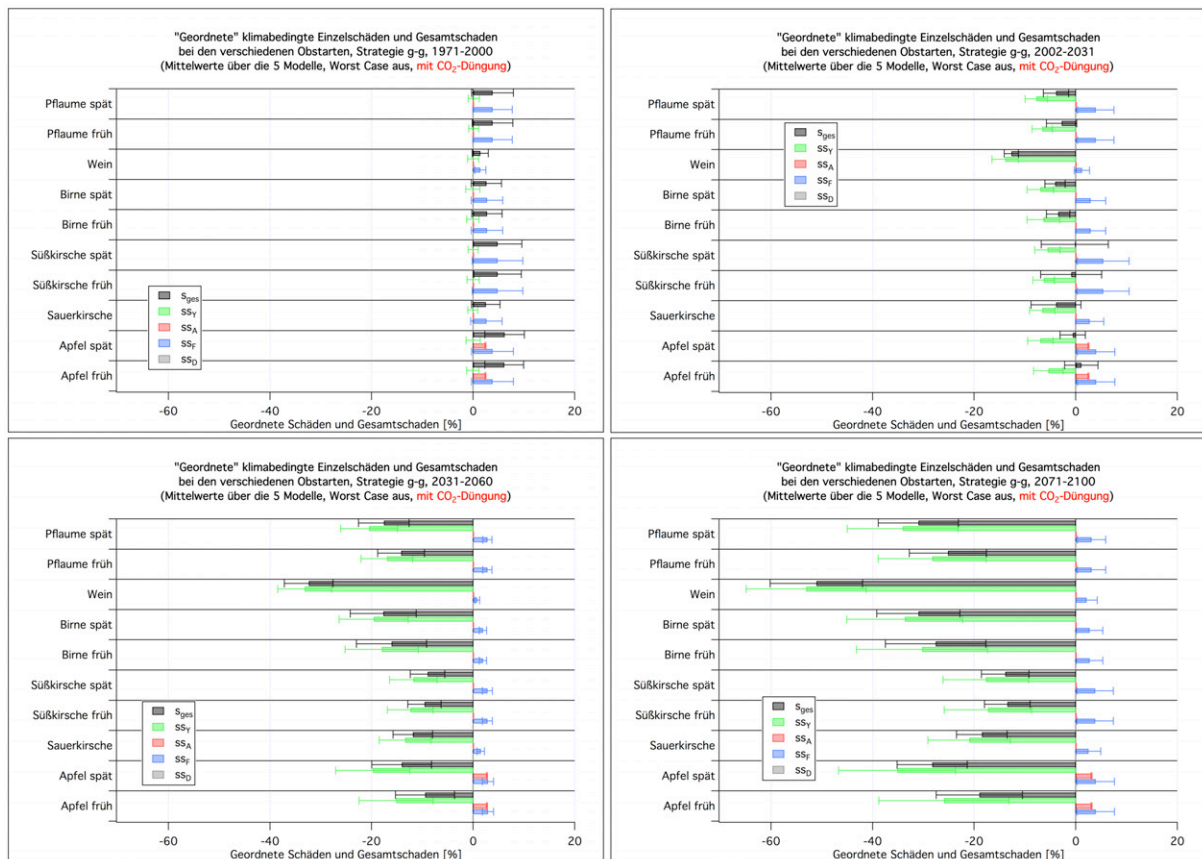


Abbildung 5.58: Geordnete Schäden ss_i und Gesamtschaden s_{ges} bei der **Strategie g-g (mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)**; links oben: 1971-2000, rechts oben: 2002-2031; links unten: 2031-2060, rechts unten: 2071-2100.

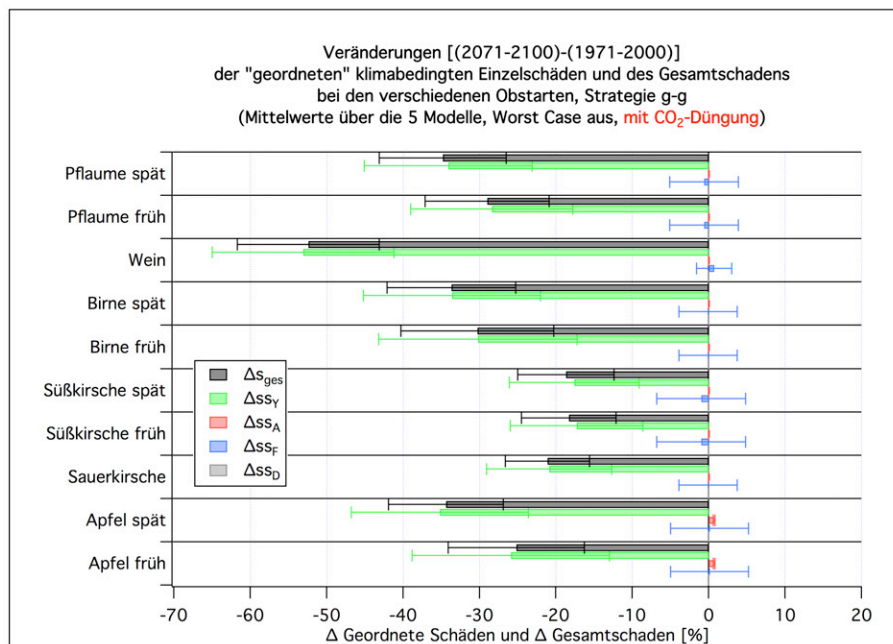


Abbildung 5.59: Veränderung Δss_i der geordneten Schäden und Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] bei **Strategie g-g** bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS**).

Abbildung 5.60 zeigt erneut, wie stark WETTREG die Schadensergebnisse beeinflusst. Das linke Bild zeigt die geordneten Schäden und den Gesamtschaden (inkl. CO₂-Düngung), der mit Hilfe des regionalen Klimamodells RUBA, welches hier stellvertretend für die dynamischen Klimamodelle verwendet wurde, berechnet wird. Rechts sind die Schäden eingezeichnet, die man erhält, wenn man über die Schäden, die man mit allen 5 Modellen berechnet hat, mittelt. Da die beiden WETTREG-Läufe zu sehr hohen Erträgen führen (negative Yieldschäden), steigen die Gewinne bis 2100 stark an, wenn man WETTREG in die Rechnungen miteinbezieht. Dass mit den WETTREG-Daten so hohe Erträge berechnet werden, liegt vor allem daran, dass die Globalstrahlung im Sommer um ca. 33% zu groß ist (vgl. [Abbildung 4.5](#)). Hätte man alle 10 WETTREG-Läufe in die Modellmittelwerte einbezogen, so wären die Endergebnisse hauptsächlich durch die unrealistischen WETTREG-Ergebnisse geprägt und mit großer Wahrscheinlichkeit zwar signifikant, aber trotzdem nicht realistisch.

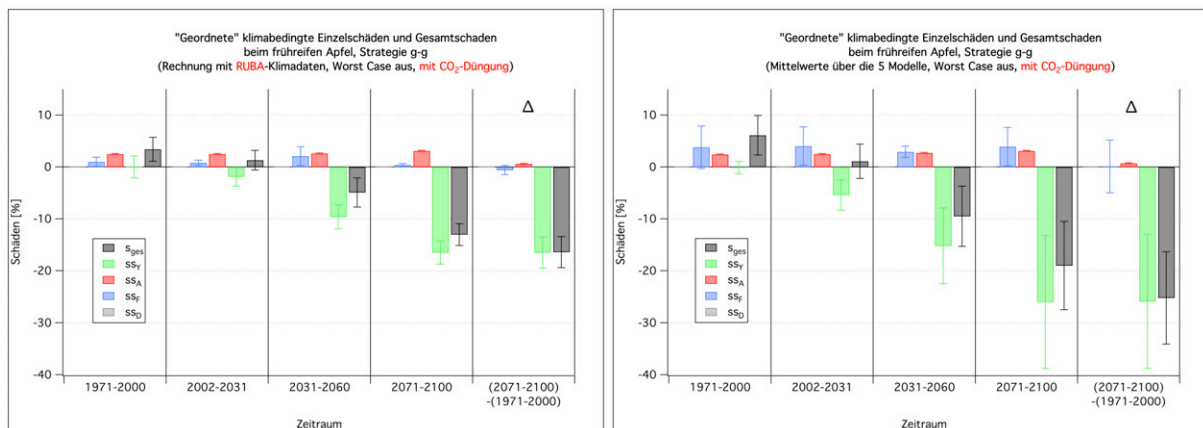


Abbildung 5.60: Geordnete Schäden ss_i und Gesamtschaden s_{ges} bei der **Strategie g-g (mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)**; links: berechnet mit RUBA, rechts: "Mittelwert über alle 5 Modelle".

In **Abbildung 5.61** sind die Schäden bei Anwendung des Worst Case Szenarios (mit $NoReleaseProb = 20\%$), aber ohne CO₂-Düngung, für die Strategie g-g aufgetragen. Vor 2071 sind die Ergebnisse mit denen der [Abbildung 5.55](#) identisch. Danach macht sich aber das nun eingeschaltete Worst Case Szenario bemerkbar, welches Dormanzschäden von 20% verursacht (hellgraue Balken) und zusammen mit den anderen Schäden zu Gesamtschäden von 14% ... 28% führt (schwarze Balken; vgl. auch [Tabelle K.6](#)). Die zugehörigen Veränderungen der Schäden sind in [Abbildung 5.62](#) verdeutlicht.

Tabellen und Abbildungen für den Gesamtschaden und seine Veränderung für die g-g-Strategie (ohne und mit CO₂-Düngung und für das Worst Case Szenario mit $NoReleaseProb 20\%$) findet man im **Anhang K.1.1** (Tabellen [K.3](#) ff.) bzw. **Anhang K.1.2** (Abbildungen [K.4](#) ff.).



Abbildung 5.61: Geordnete Schäden ss_i und Gesamtschaden s_{ges} bei der **Strategie g-g** (ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 20 %**); links oben: 1971-2000, rechts oben: 2002-2031; links unten: 2031-2060, rechts unten: 2071-2100.

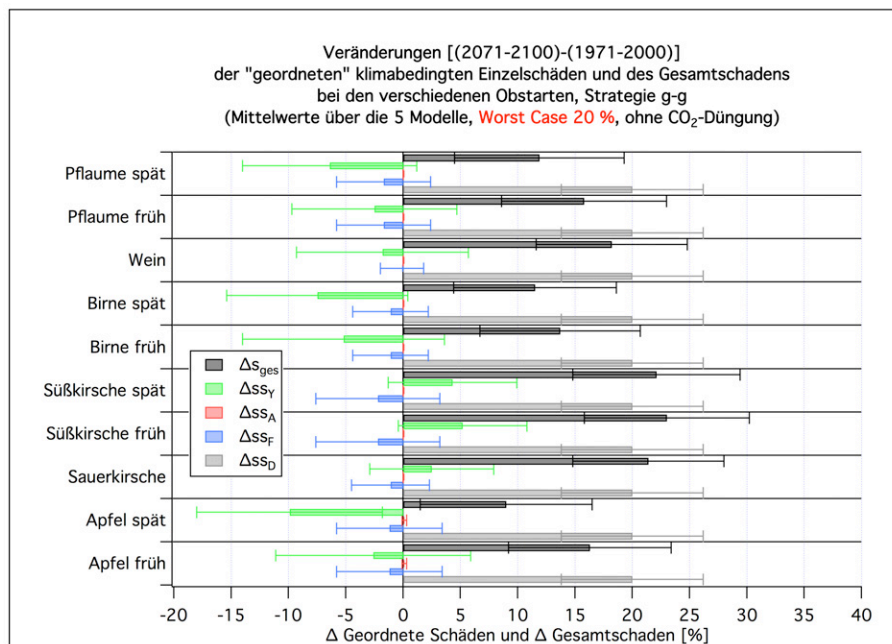


Abbildung 5.62: Veränderung Δss_i der geordneten Schäden und Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] bei **Strategie g-g** bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 20 %**).

Bei der m-g-Strategie (**Abbildung 5.63**), bei der anstelle der bei der g-g-Strategie benutzten extensiven Apfelwicklerbekämpfung ab 2001 die intensive Methode verwendet wird und bei der Frostschutzberegnung angewendet wird, sind die Apfelwicklerschäden (rote Balken) ab 2001 entsprechend geringer und die Frostschäden (blaue Balken) entfallen ganz. Die Gesamtschäden und die Veränderungen der Schäden (**Abbildung 5.64**) sind daher insgesamt *negativer*.

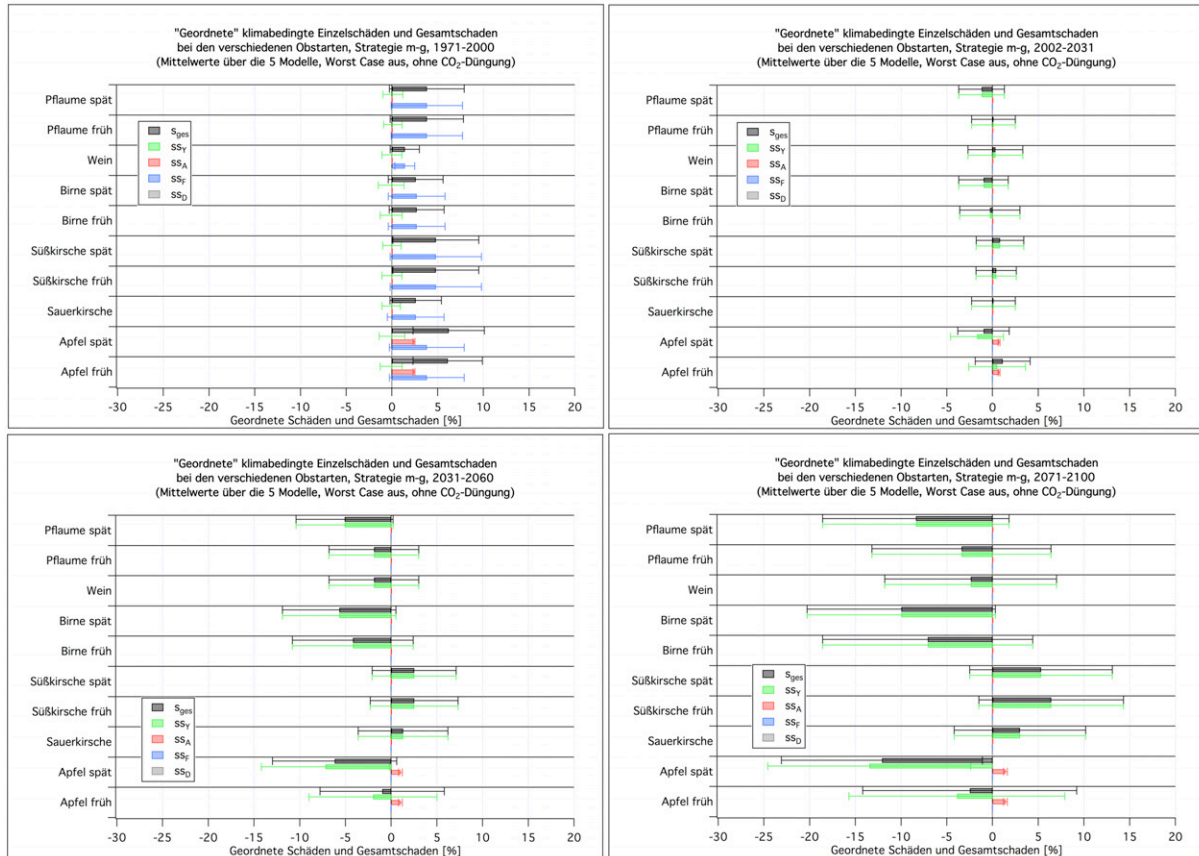


Abbildung 5.63: Geordnete Schäden ss_i und Gesamtschaden s_{ges} bei der **Strategie m-g** (ohne CO_2 -Düngung, Worst Case: AUS); links oben: 1971-2000, rechts oben: 2002-2031; links unten: 2031-2060, rechts unten: 2071-2100.

Tabellen und Abbildungen für den Gesamtschaden und seine Veränderung für die m-g-Strategie (ohne und mit CO_2 -Düngung und für die Worst Case Szenarien mit *NoReleaseProb* 20, 10, 7, 5, 4 und 3%) *im Mittel über die 5 Klimamodellläufe* findet man im **Anhang K.1.1** (Tabellen K.7 ff.) bzw. **Anhang K.1.2** (Abbildungen K.4 und K.9 ff.).

Die Unterschiede im Gesamtschaden zwischen “Worst Case 3%” und “Worst Case AUS” betragen nur ungefähr 0.5%.²⁸ Verglichen mit den breiten Konfidenzintervallen sind die zusätzlichen Schäden im Worst Case Szenario bei geringer *NoReleaseProb* ($\lesssim 5\%$) daher

²⁸ Der Unterschied ist kleiner als $0.03 \cdot 0.3 = 0.009 = 0.9\%$ ($0.03 = NoReleaseProb$, $0.3 =$ Schaden in einem NoRelease-Jahr), da der Dormanzschaden nicht *rein additiv* in den Gesamtschaden eingeht [siehe Gleichung (4.187)]. Weiterhin ist die Anzahl der NoRelease-Jahre hier eine Zufallsvariable, so dass der Dormanzschaden s_D beim Mittel über die Modelle keinen konstanten Wert besitzt. Auch wenn man geordnete Schäden betrachten würde, wäre die Änderung von Δss_D nicht gleich der Veränderung von s_{ges} , denn eine Änderung von $ss_D \equiv s_D$ verändert auch die *nachfolgenden* Schäden, die dann ebenfalls den Wert von s_{ges} beeinflussen.

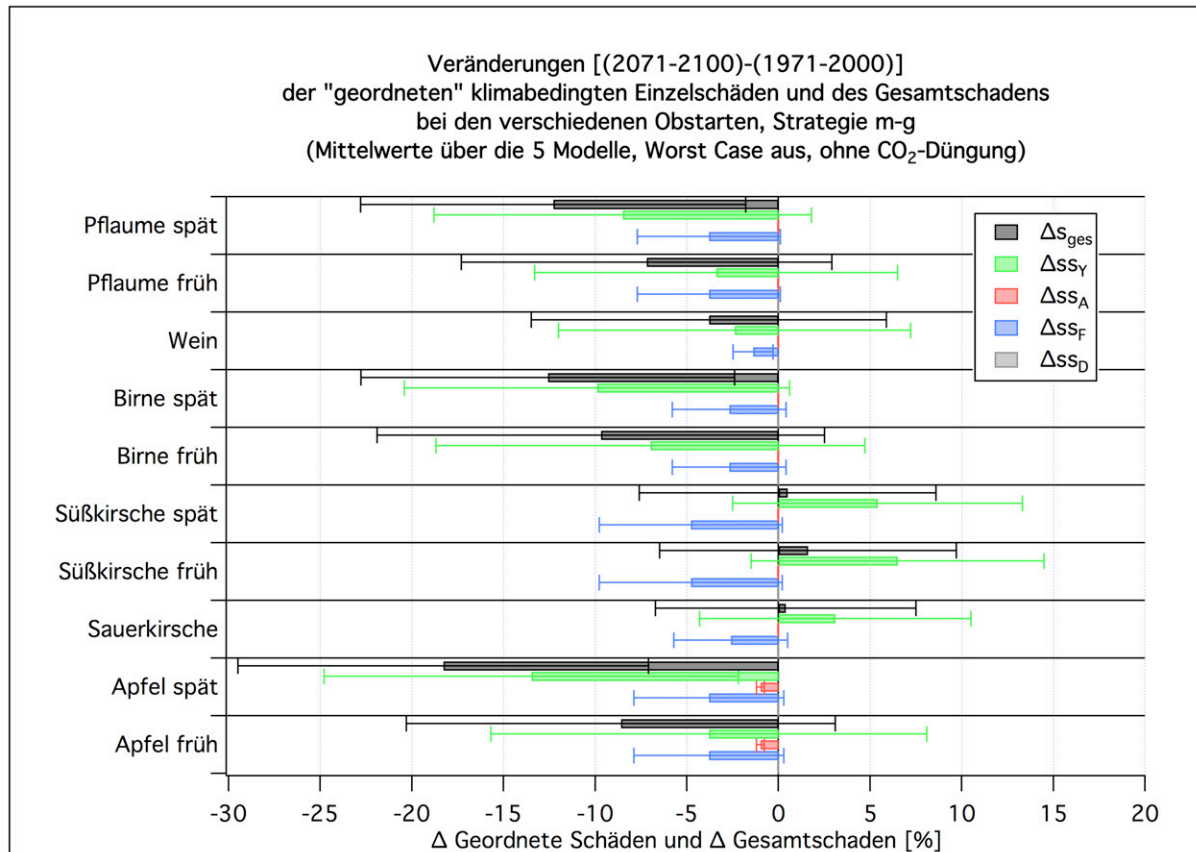


Abbildung 5.64: Veränderung Δss_i der geordneten Schäden und Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] bei **Strategie m-g** bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS).

vernachlässigbar.

Wenn man die Gesamtschäden und deren Veränderungen beim frühreifen Apfel für die 5 Klimamodelle getrennt aufträgt, so erhält man die **Abbildung 5.65**. Auch hier zeigen die beiden WETTREG-Läufe negative Gesamtschäden im Zeitraum 2071-2100, was eine negative Differenz des Schadens [(2071-2100)-(1971-2000)] bedingt. Das führt dazu, dass im Modellmittel (cyan-farbene Balken) keine signifikant von null verschiedenen Schäden im Zeitraum 2071-2100 auftreten.

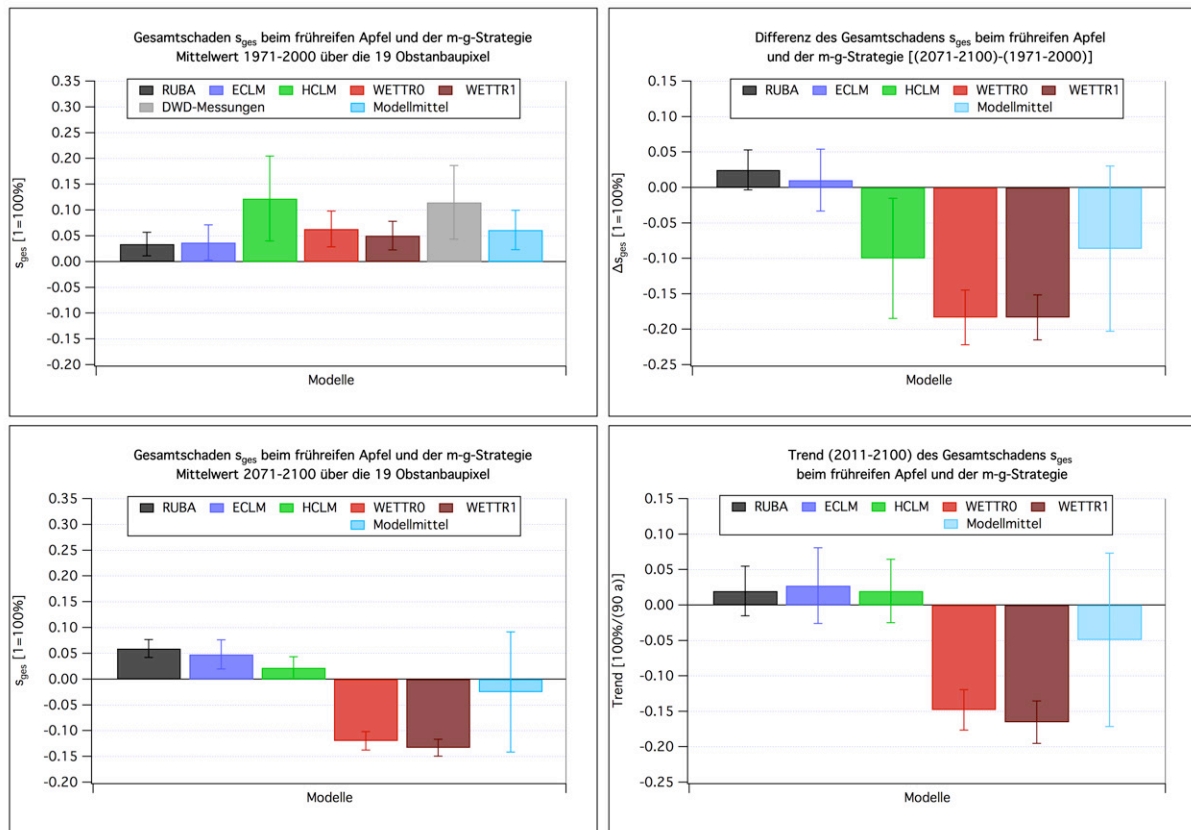


Abbildung 5.65: Gesamtschäden s_{ges} (in %) bei der **Strategie m-g** beim frühreifen Apfel (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; inkl. Apfelwicklerschaden); links: Mittelwerte 1971-2000 und 2071-2100, rechts: Differenzen und Trend.

Stellt man den jährlichen Verlauf der Gesamtschäden für alle 5 Modelle dar, so ergibt sich die **Abbildung 5.66**. Man erkennt sofort den Strategiewechsel nach dem Jahr 2000, denn ab diesem Jahr werden die großen Schäden (hauptsächlich Frostschäden und nur zu einem kleinen Teil “Apfelwickler-Restschäden bei der extensiven Bekämpfung”) durch die Anwendung der m-Strategie verhindert, was bei der bis zum Jahr 2000 angewendeten g-Strategie nicht der Fall war.

Um die Gesamtspannbreite der möglichen Schadensentwicklung zu verdeutlichen, reicht es nicht, nur einen einzigen *Modellmittelwert* zu betrachten. Denn außer den Ergebnissen der Standardrechnung (ohne CO₂-Düngung und ohne Worst Case Szenario) kann sich das Ergebnis auch durch die CO₂-Düngung oder durch das *Worst Case Szenario* verändern. Die CO₂-Düngung wurde in dieser Arbeit nicht permanent in die Rechnungen einbezogen, da die Annahmen, welche hierfür gemacht wurden, sehr spekulativ sind und weiterer Forschungsbedarf in dieser Richtung besteht. Ob die Ergebnisse des Worst Case Szenarios bezüglich des Dormanzschadens eintreffen, ist sogar sehr fraglich, denn alle *Impaktmodell-basierten* Rechnungen zeigen, dass in Hessen fast kein Risiko für merkbare Dormanzschäden besteht. Um dennoch die Gesamtspannbreite aller drei *Variationen* bzw. *Fälle* in einer Graphik zu vereinigen, wurde wie folgt vorgegangen: Es wurden für jedes Jahr j das Maximum und Minimum über die Ergebnisse²⁹, welche mit allen 5 Klimamo-

²⁹ In diesem Abschnitt sind das die Gesamtschäden, welche vorher über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte) gemittelt wurden.

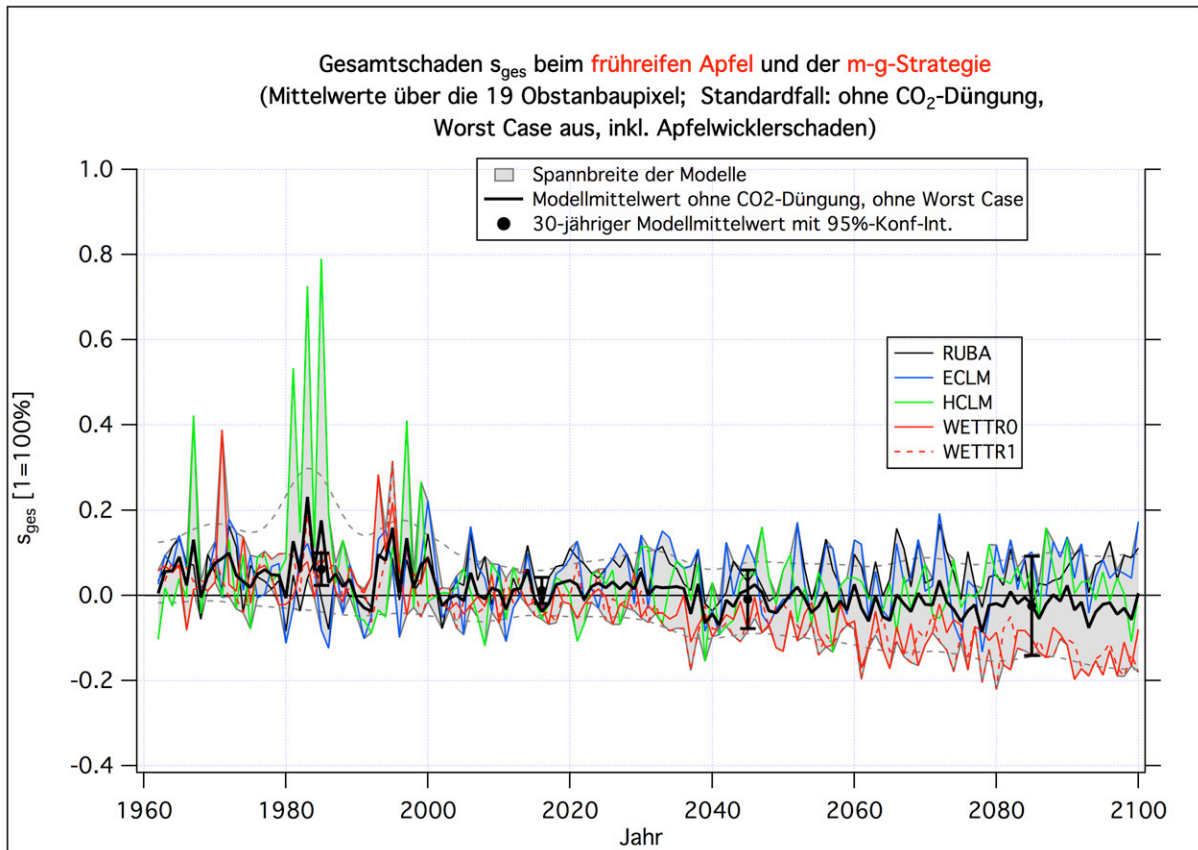


Abbildung 5.66: Verlauf der Gesamtschäden s_{ges} (in %) bei der **Strategie m-g** beim frühreifen Apfel (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS). Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle der 30-jährigen Mittelwerte “über die 5 Klimamodellläufe”.

dellen (Index m) gewonnen wurden, und zusätzlich über die 3 Impaktmodellvariationen (Index k) gebildet:

$$oG(j) = \max_{m=1\dots 5, k=1\dots 3} \left(\overline{s_{ges}(j, m, k)}^{19\text{Pixel}} \right) \quad (5.1)$$

$$uG(j) = \min_{m=1\dots 5, k=1\dots 3} \left(\overline{s_{ges}(j, m, k)}^{19\text{Pixel}} \right) \quad (5.2)$$

$oG(j)$ und $uG(j)$ bilden die obere und untere Begrenzungslinien des grauen *Unsicherheitsbereichs* in der Abbildung 5.67. Der graue Bereiche in der Abbildung gibt daher die Spannbreite des Gesamtschadens bei Rechnung mit den Klimadaten aller 5 Klimamodelle an, wobei zusätzlich noch die Schwankungsbreite der Impaktmodelle durch Rechnung ohne CO₂-Düngung, mit CO₂-Düngung und ohne CO₂-Düngung und mit “Worst Case Szenario 20 %” hinein gerechnet wurden. Die gestrichelten grauen Linien wurden aus den Begrenzungslinien des grauen Bereichs erzeugt, in dem diese mit einem Binomialfilter (22 Durchgänge; das entspricht in etwa einem gleitenden Mittel über 10 Jahre) geglättet wurden. Die schwarze Linie ist der “Modellmittelwert” des Standardfalls (keine CO₂-Düngung, Worst Case Szenario AUS), die rote Linie ergibt sich bei Rechnungen mit CO₂-Düngung und die blaue beim “Worst Case Szenario 20 %”. Die Fehlerbalken geben das 95 %-Konfidenzintervall der über einen Zeitraum von 30 Jahren gemittelten Modellmittelwerte an. Die Position der roten und blauen Fehlerbalken wurde leicht gegenüber

den wahren Mittelpunkten des 30-jährigen Zeitraums versetzt, damit keine Überlappung mit den anderen Balken entsteht.

Die gerade erwähnte **Abbildung 5.67** zeigt denselben Fall (Standardfall) wie **Abbildung 5.66**, nur sind nun zusätzlich auch die Ergebnisse bei eingeschalteter CO₂-Düngung und die des 20 %-Worst Case Szenarios eingezeichnet. Die großen positiven Peaks vor 2001 sind hauptsächlich durch Frostschäden bedingt. Nach 2070 kommen die großen positiven Schäden hauptsächlich durch das Worst Case Szenario (20 %) zu Stande. Die mit der Zeit zunehmend negativen Schäden im unteren Teil des Bildes sind auf die Einbeziehung der CO₂-Düngung zurückzuführen. Wie bereits bei der vorherigen Abbildung bemerkt wurde, werden ab 2001 alle Frostschäden durch die Gegenmaßnahmen (m-Strategie) vollkommen verhindert (siehe **Tabelle 4.24**)!

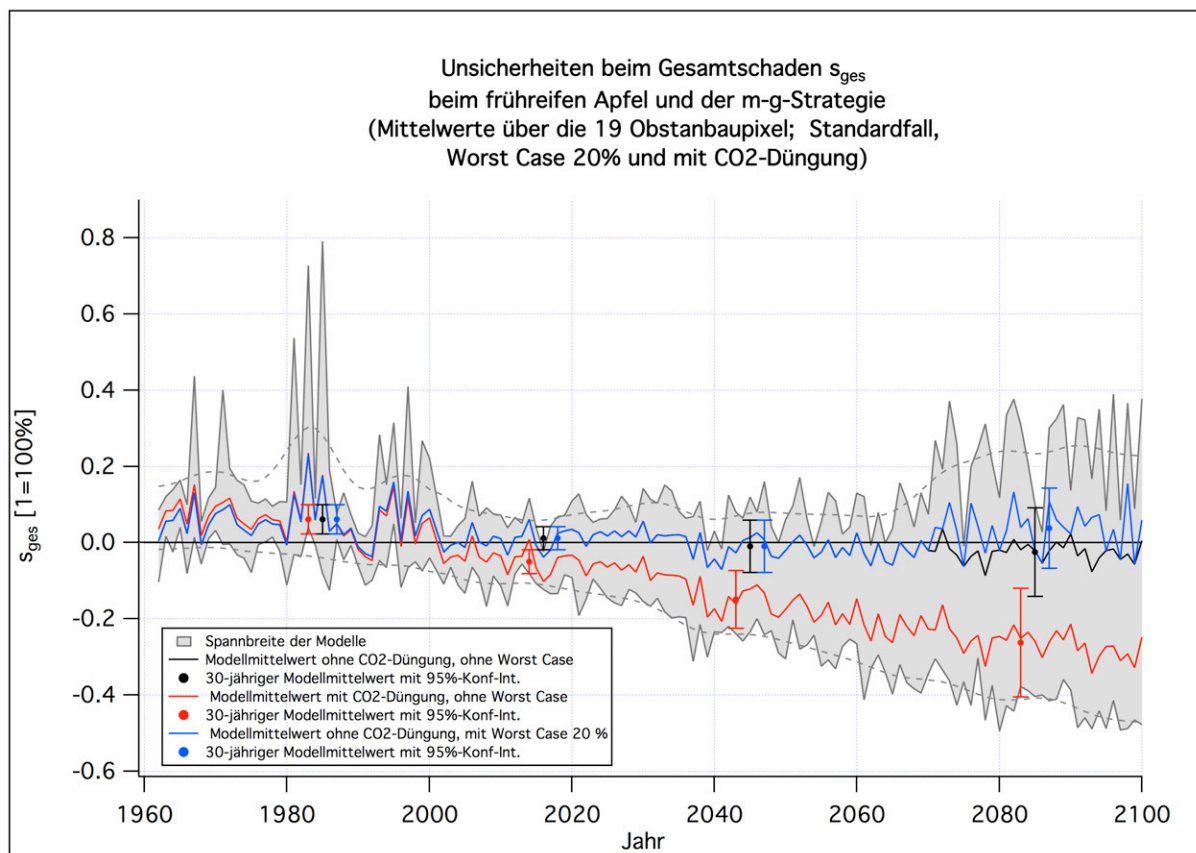


Abbildung 5.67: Unsicherheiten beim Gesamtschaden s_{ges} (in 1=100 %) bei der **Strategie m-g** beim frühreifen Apfel (**3 Fälle**: ohne CO₂-Düngung und ohne Worst Case (= Standardfall), mit CO₂-Düngung und ohne Worst Case, ohne CO₂-Düngung und mit Worst Case 20 %).

Wenn man die sehr spekulative “Worst Case 20%-Variation” weglässt, so erhält man die in **Abbildung 5.68** gezeigten Unsicherheiten. Hier stehen die Chancen gut, dass der Klimawandel vorwiegend negative Schäden (Gewinn!) hervorbringt, jedenfalls dann, wenn man die m-Strategie anwendet.

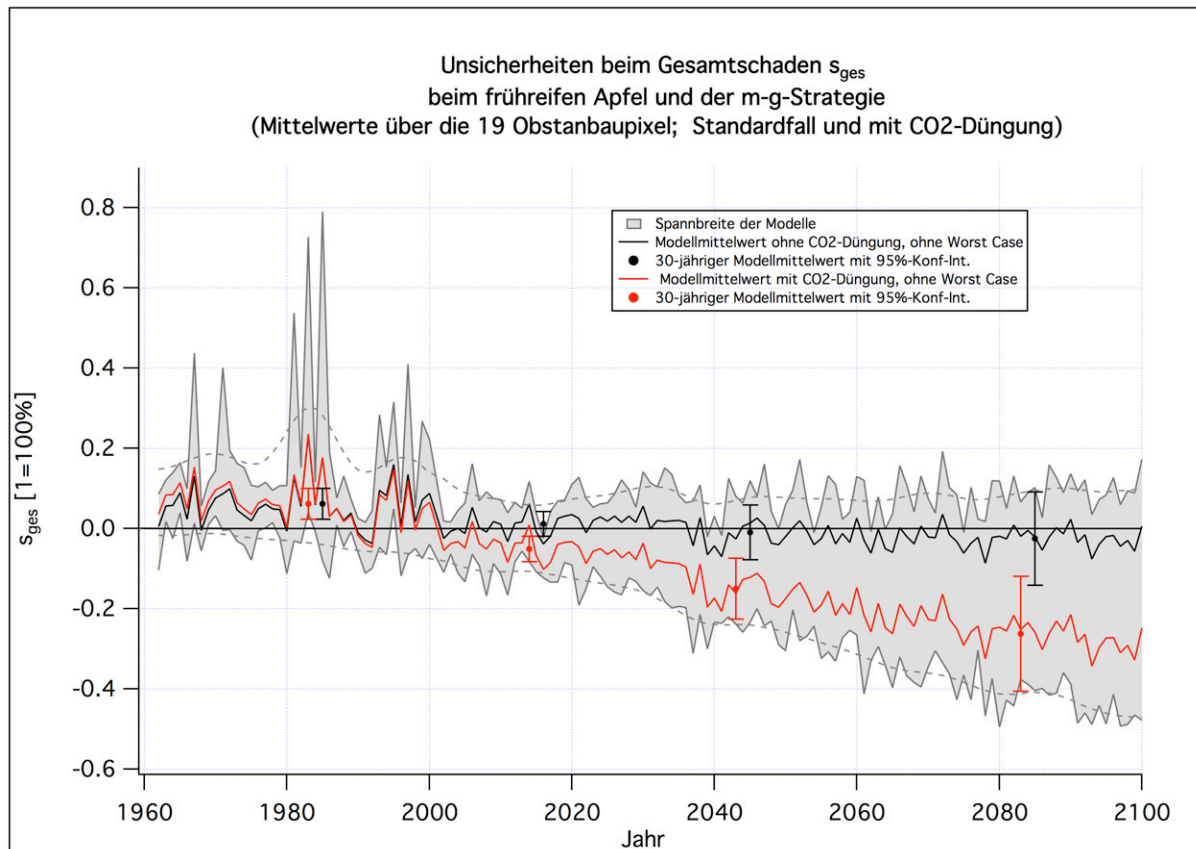


Abbildung 5.68: Unsicherheiten beim Gesamtschaden s_{ges} (in 1=100 %) bei der **Strategie m-g** beim frühreifen Apfel (**nur 2 Fälle:** ohne CO₂-Düngung und ohne Worst Case, mit CO₂-Düngung und ohne Worst Case).

Bei der g-g-Strategie werden die Frostschäden nicht bekämpft. Deshalb treten auch nach dem Jahr 2000, sogar im Standardfall (ohne Worst Case Szenario und ohne CO₂-Düngung), große Schäden auf (**Abbildung 5.69**). Interessant ist, dass die 95%-Vertrauensintervalle (schwarze Balken), besonders im Zeitraum 2071-2100, nun kleiner ausfallen als bei der m-g-Strategie (**Abbildung 5.66**). Das liegt zum Teil daran, dass die beiden WETTREG-Läufe hier einige große positive Schäden aufweisen, so dass sich der 30-jährige Mittelwert dieser WETTREG-Läufe, der vorher negativ war und sich von den drei dynamischen Modellen wesentlich unterschied, stärker an deren Mittelwerte annähert. Hierdurch wird s_{Mo}^2 [Gleichung (4.18)] bzw. s_m [Gleichung (4.22)] kleiner. Zusätzlich steigen die Freiheitsgrade FG [Gleichung (4.27)] an, weil s_1 [Gleichung (4.17)] nun größer ist. Größere FG verursachen aber kleinere t-Quantile [Gleichung (4.28)] und folglich schmalere Konfidenzintervalle.

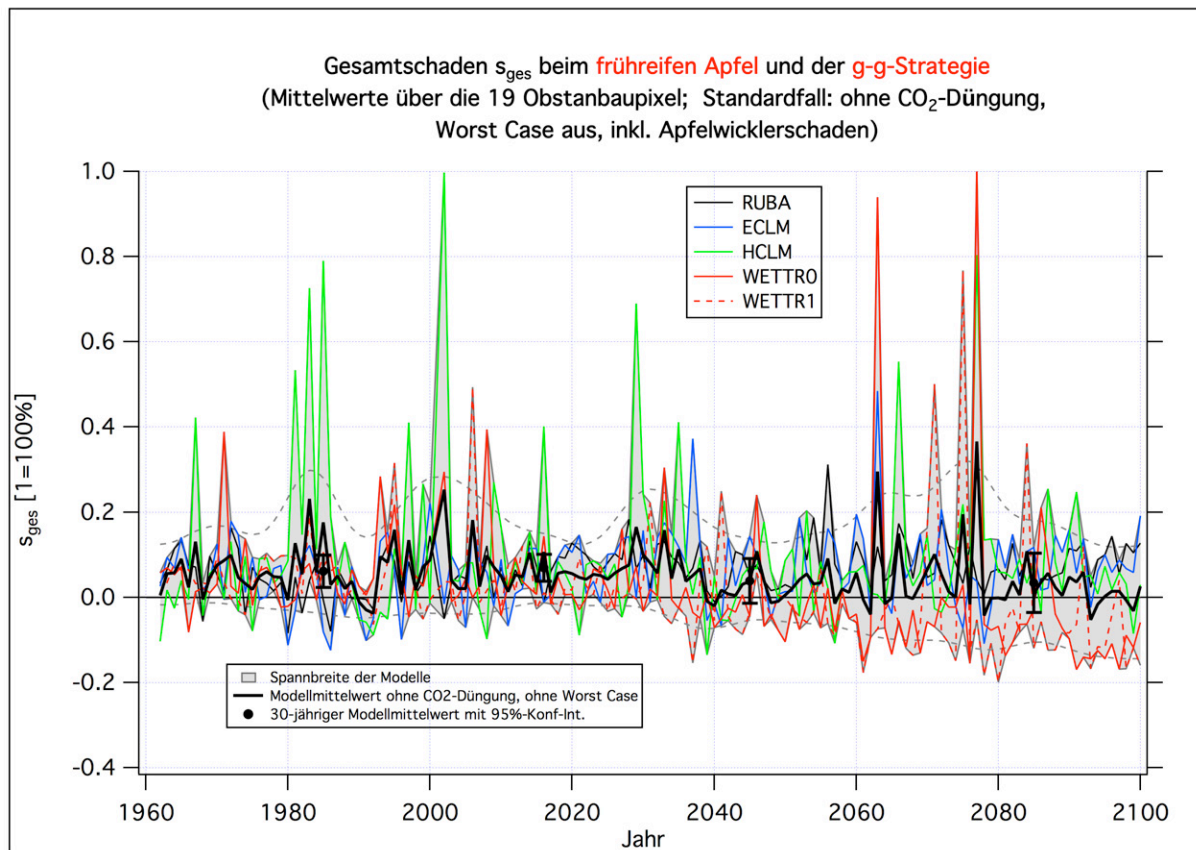


Abbildung 5.69: Verlauf der Gesamtschäden s_{ges} (in %) bei der **Strategie g-g** beim frühreifen Apfel (**Standardfall:** ohne CO₂-Düngung, **Worst Case:** AUS).

Bei eingeschaltetem Worst Case Szenario und der **g-g-Strategie** (ohne Maßnahmen gegen Nichtbrechung der Dormanz) ergeben sich in den Jahren, in denen die Dormanz im Worst Case Szenario nicht gebrochen wird, im Gegensatz zur **m-g-Strategie** nicht nur 30 %-ige Schäden, sondern Totalschäden. Die vielen Totalschäden in **Abbildung 5.70** nach 2070 werden aber abwechselnd “von verschiedenen Klimamodellen” durch das Worst Case Szenario angenommen. Die Wahrscheinlichkeit für einen Totalschaden in einem einzelnen Modell beträgt natürlich weiterhin nur 20 %. Fünf der größeren Schäden nach 2060 sind nicht nur auf die fehlende Dormanzbrechung im Worst Case Szenario, sondern auch auf Frostschäden (und zu einem wesentlich geringeren Teil auch auf Yieldschäden) zurückzuführen (vgl. **Abbildung 5.71**, in der keine Worst Case-Fälle einbezogen wurden).

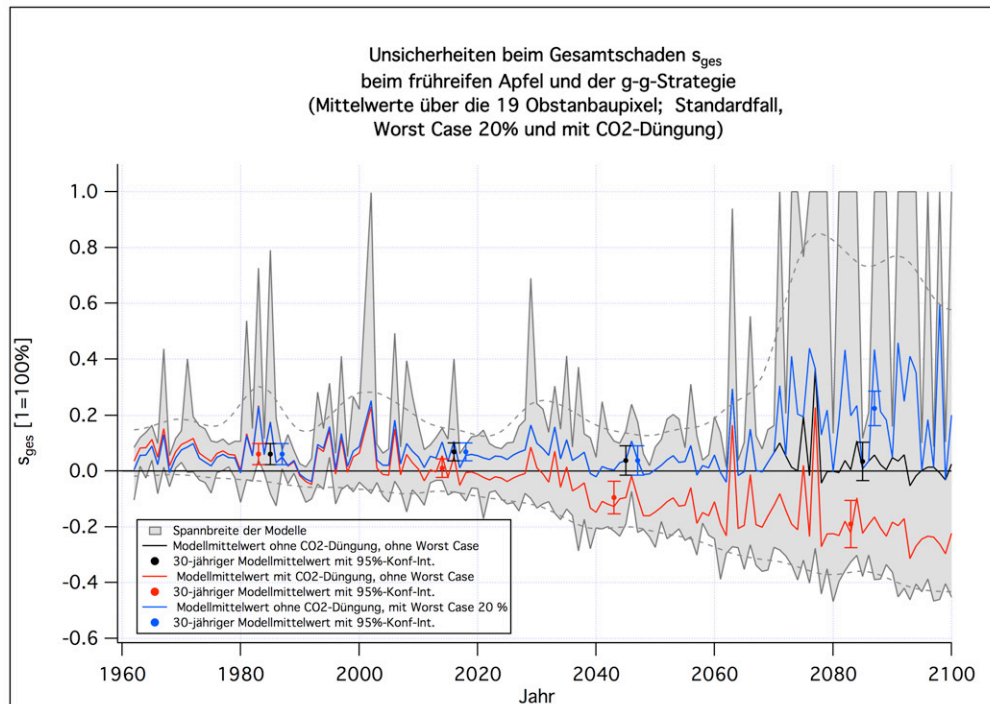


Abbildung 5.70: Unsicherheiten beim Gesamtschaden s_{ges} (in 1=100 %) bei der **Strategie g-g** beim frühreifen Apfel (**3 Fälle**: ohne CO₂-Düngung und ohne Worst Case, mit CO₂-Düngung und ohne Worst Case, ohne CO₂-Düngung und mit Worst Case 20 %).

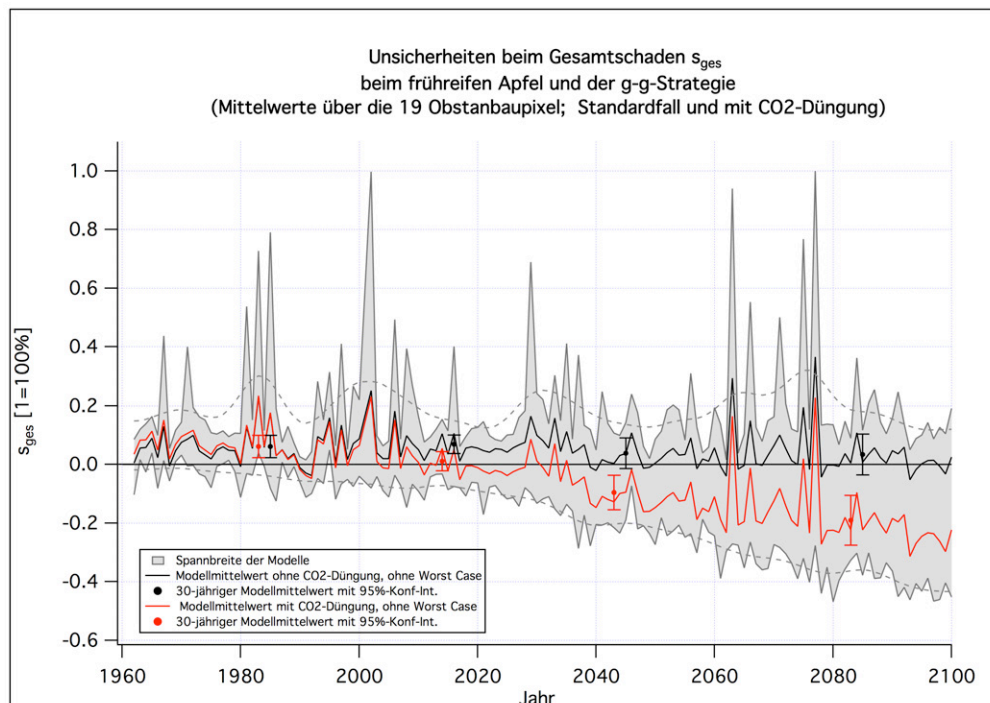


Abbildung 5.71: Unsicherheiten beim Gesamtschaden s_{ges} (in 1=100 %) bei der **Strategie g-g** beim frühreifen Apfel (**nur 2 Fälle**: ohne CO₂-Düngung und ohne Worst Case, mit CO₂-Düngung und ohne Worst Case).

Die Abbildungen (hier nicht gezeigt) für die **m-m-Strategie** entsprechen ab 2001 de-

nen der m-g-Strategie. Vor 2001 treten allerdings durch die Verwendung der m-Strategie, bei der im Gegensatz zur g-Strategie auch Spätfrostschäden bekämpft werden, nur sehr kleine Restschäden ($\approx 0.6\%$) durch den Apfelwickler (nur beim Apfel) auf, die von der intensiven Apfelwicklerbekämpfungsmethode nicht vollständig verhindert werden können (siehe Tabellen 5.13 ff. und K.16 ff. im Anhang K.1.1).

In Anhang K.1 sind in **Tabelle K.1** auch die Gesamtschäden und deren Veränderung bei der o-o-Strategie gelistet (siehe auch die Abbildungen K.1 und K.2). Da hier auch nach dem Jahr 2000 keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden, steigen die Schäden in der Zukunft im Gegensatz zur m-o-Strategie bei allen Fruchtarten von 1971-2000 um weitere 3% bis 12% auf 9% bis 33% (je nach Fruchtart) im Zeitraum 2071-2100 an.

Bei der m-o-Strategie (**Tabelle K.2** und Abbildungen K.1 und K.3) ergeben sich natürlich die größten negativen Veränderungen im Gesamtschaden, da bis 2000 keine Maßnahmen ergriffen werden und danach die Schäden mit maximalen Maßnahmen bekämpft werden.

Die **Tabellen 5.13** bis **5.15** vergleichen noch einmal die Gesamtschäden, welche bei Anwendung der verschiedenen Strategien und Impactmodell-Variationen beim frühreifen Apfel, dem spätreifen Apfel und dem Wein auftreten: Der spätreife Apfel verursacht [außer in der o-o-Strategie] immer kleinere Schäden (bzw. größere Gewinne) als der frühreife Apfel. Der Wein reagiert besonders positiv (negative Schäden) auf die CO₂-Düngung (CO₂ an). Nur die Änderungen [2071-2100 vs. 1971-2000] durch diesen CO₂-Effekt und beim *Worst Case Szenario* mit 20% in der g-g-Strategie, welches signifikant vergrößerte Schäden in der Zukunft aufweist, sind beim Wein signifikant. Bei allen drei Fruchtarten sind die Unterschiede in den Ergebnissen merklich verändert, wenn man die beiden WETTREG-Läufe nicht in die Mittelwerte miteinbezieht ("g-g nur 3 Mod."-Zeilen).

Bei der m-m-Strategie sind die Schäden im Zeitraum 1971-2000 natürlich am geringsten, da nun auch schon in diesen Jahren alle möglichen Maßnahmen ergriffen werden. Danach entsprechen die Schäden denen der m-x-Strategie ($x \in \{o, w, g, v, m\}$). Die Differenzen und Signifikanzen unterscheiden sich aber auf Grund der veränderten Werte im ersten Zeitraum. Die Differenzen sind i. Allg. größer (weniger negativ) als bei der m-g-Strategie und weniger signifikant von null verschieden.

Tabelle 5.13: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim frühreifen Apfel** (Standard: ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
o-o	16.4 (5.0)	18.2 (4.2)	19.0 (2.4)	25.5 (2.8)	9.1 (5.3)	0.294	**
m-o	16.4 (5.0)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-2.5 (11.7)	-18.9 (12.0)	0.982	**
g-g	6.1 (3.8)	7.0 (3.2)	3.9 (5.2)	3.4 (6.9)	-2.7 (7.4)	43.158	
g-g nur 3 Mod.	6.5 (9.5)	8.5 (4.5)	7.1 (2.2)	7.9 (2.0)	1.4 (10.0)	67.824	
g-g CO ₂ an	6.1 (3.8)	1.1 (3.3)	-9.5 (5.8)	-19.0 (8.5)	-25.2 (8.9)	0.019	***
g-g WC=20%	6.1 (3.8)	7.0 (3.2)	3.9 (5.2)	22.4 (6.2)	16.3 (7.1)	0.004	***
m-g	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-2.5 (11.7)	-8.6 (11.7)	11.590	
m-g CO ₂ an	6.1 (3.8)	-5.1 (3.2)	-15.0 (7.6)	-26.2 (14.3)	-32.4 (15.1)	0.395	**
m-g WC=20%	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	3.7 (10.5)	-2.4 (10.7)	58.609	
m-g WC=10%	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	0.7 (11.3)	-5.5 (11.4)	26.963	
m-g WC=7%	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-0.2 (11.7)	-6.3 (11.7)	22.253	
m-g WC=5%	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-1.0 (11.4)	-7.1 (11.4)	16.839	
m-g WC=4%	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-1.6 (11.9)	-7.8 (11.9)	15.206	
m-g WC=3%	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-2.0 (11.4)	-8.2 (11.5)	12.536	
m-m	0.6 (1.3)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-2.5 (11.7)	-3.1 (11.8)	50.970	
m-m CO ₂ an	0.6 (1.3)	-5.1 (3.2)	-15.0 (7.6)	-26.2 (14.3)	-26.9 (14.4)	0.661	**
m-m WC=20%	0.6 (1.3)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	3.7 (10.5)	3.1 (10.6)	45.886	

Tabelle 5.14: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim spätreifen Apfel** (Standard: ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
o-o	21.0 (5.0)	22.4 (3.2)	24.7 (2.6)	33.1 (5.1)	12.0 (6.5)	0.135	**
m-o	21.0 (5.0)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-12.1 (11.0)	-33.1 (10.9)	0.030	***
g-g	6.2 (3.9)	5.0 (2.4)	-1.1 (5.3)	-5.6 (5.7)	-11.8 (6.5)	0.153	**
g-g nur 3 Mod.	6.5 (9.9)	6.0 (3.7)	1.7 (4.8)	-1.8 (2.3)	-8.3 (10.5)	8.615	
g-g CO ₂ an	6.2 (3.9)	-0.6 (2.5)	-14.1 (5.9)	-28.3 (6.9)	-34.4 (7.5)	0.000	***
g-g WC=20%	6.2 (3.9)	5.0 (2.4)	-1.1 (5.3)	15.2 (6.6)	9.0 (7.5)	1.928	*
m-g	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-12.1 (11.0)	-18.3 (11.2)	0.843	**
m-g CO ₂ an	6.2 (3.9)	-6.9 (3.0)	-19.8 (7.5)	-36.0 (13.3)	-42.2 (13.1)	0.042	***
m-g WC=20%	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-5.3 (10.0)	-11.5 (9.8)	2.874	*
m-g WC=10%	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-8.6 (10.8)	-14.8 (11.0)	1.774	*
m-g WC=7%	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-9.5 (11.1)	-15.7 (11.2)	1.544	*
m-g WC=5%	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-10.4 (10.7)	-16.6 (10.9)	1.129	*
m-g WC=4%	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-11.2 (11.3)	-17.3 (11.4)	1.136	*
m-g WC=3%	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-11.6 (10.7)	-17.8 (10.9)	0.869	**
m-m	0.6 (1.5)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-12.1 (11.0)	-12.7 (11.2)	3.464	*
m-m CO ₂ an	0.6 (1.5)	-6.9 (3.0)	-19.8 (7.5)	-36.0 (13.3)	-36.6 (13.4)	0.163	**
m-m WC=20%	0.6 (1.5)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-5.3 (10.0)	-5.9 (10.2)	18.440	

Tabelle 5.15: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim Wein** (Standard: ohne CO₂-Düngung, ohne Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
o-o	3.5 (2.1)	4.5 (2.2)	4.5 (3.4)	9.1 (2.9)	5.6 (3.5)	0.220	**
m-o	3.5 (2.1)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-2.4 (9.4)	-5.9 (9.8)	16.823	
g-g	1.4 (1.6)	1.5 (1.5)	-1.2 (4.0)	-0.2 (7.1)	-1.6 (7.4)	60.110	
g-g nur 3 Mod.	1.1 (2.3)	2.6 (1.8)	1.1 (2.8)	4.1 (1.8)	3.0 (2.9)	4.246	*
g-g CO ₂ an	1.4 (1.6)	-12.7 (1.4)	-32.4 (4.8)	-51.1 (9.1)	-52.4 (9.3)	0.001	***
g-g WC=20%	1.4 (1.6)	1.5 (1.5)	-1.2 (4.0)	19.5 (6.5)	18.2 (6.6)	0.000	***
m-g	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-2.4 (9.4)	-3.8 (9.7)	33.990	
m-g CO ₂ an	1.4 (1.6)	-14.0 (2.8)	-33.4 (5.9)	-54.3 (12.9)	-55.6 (13.0)	0.029	***
m-g WC=20%	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	3.8 (7.9)	2.4 (8.1)	48.287	
m-g WC=10%	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	0.7 (9.4)	-0.7 (9.6)	85.093	
m-g WC=7%	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-0.1 (9.5)	-1.5 (9.8)	69.282	
m-g WC=5%	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-0.9 (9.2)	-2.3 (9.4)	53.572	
m-g WC=4%	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-1.6 (9.7)	-3.0 (10.0)	45.715	
m-g WC=3%	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-2.0 (9.2)	-3.4 (9.5)	38.222	
m-m	0.0 (1.2)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-2.4 (9.4)	-2.4 (9.6)	52.270	
m-m CO ₂ an	0.0 (1.1)	-14.0 (2.8)	-33.4 (5.9)	-54.3 (12.9)	-54.3 (12.9)	0.031	***
m-m WC=20%	0.0 (1.2)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	3.8 (7.9)	3.8 (8.0)	28.125	

Weitere ausführliche Ergebnisse in Form von Tabellen und Graphiken findet man im **Anhang K.1**.

Zusammenfassung: Die Gesamtschäden setzen sich (außer im Worst Case Szenario) nur aus den positiven Apfelwicklerschäden (nur beim Apfel), den positiven Frostschäden und den Yieldschäden zusammen, wobei letztere positive und negative Werte annehmen können. Bei den sinnvollen Strategiekombinationen g-g und m-g sind die Veränderungen der Gesamtschäden nur bei den spätreifenden Arten leicht-signifikant³⁰ negativ (-5% bis -18%), wenn man Rechnungen ohne CO₂-Düngung und ohne Worst Case Szenario betrachtet. Mit CO₂-Düngung ergeben sich hoch signifikante Gewinne von 20% bis 55% (d. h. negative Schäden von -20% bis -55%). Beim "Worst Case 20%"-Szenario ergeben sich bei der g-g-Strategie (außer beim spätreifen Apfel) signifikant positive Schadenszuwächse (12% bis 23%), bei der m-g-Strategie unterscheiden sich aber die Schäden wieder in der Zukunft nicht signifikant von denen im Zeitraum 1971-2000, weil nun "Maßnahmen gegen Nichtbrechung der Dormanz" durchgeführt werden.

³⁰ Und außer beim "spätreifen Apfel bei der g-g-Strategie" auch nur dann, wenn man die Multiplizität nicht berücksichtigt.

5.7.2 Rentabilität und Kosten

In diesem Kapitel sollen nun Ergebnisse für die Rentabilität [Gleichungen (4.205) und (4.206)] der einzelnen Strategien (Kapitel 4.12.4) und für die Gesamtkosten [siehe z. B. Gleichung (4.198) und (4.201)], welche durch Rest-Schäden und “Maßnahmen gegen die verschiedenen Schäden” im Rahmen des Klimawandels entstehen, aufgezeigt werden.

5.7.2.1 Rentabilität der Maßnahmen bzw. Strategien

Abbildung 5.72 veranschaulicht den Gewinn in Euro, den man pro Jahr und Hektar im Mittel über den Zeitraum 1971-2000 (grüne Balken) und über 2071-2100 (hellgrüne Balken) bei den unterschiedlichen Obstarten erwirtschaftet, wenn man die gemäßigte g-Strategie anstelle der o-Strategie, bei der überhaupt keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden, anwendet. Die Rechnungen wurden ohne CO₂-Effekt und ohne Worst Case Szenario durchgeführt. Außer bei der Sauerkirsche und der frühreifen Pflaume ergeben sich durch die Anwendung der g-Strategie immer Vorteile gegenüber der o-Strategie, wobei der Gewinn in Zukunft sogar noch zunimmt. Die nicht signifikanten, geringen Verluste bei der Sauerkirsche und der frühreifen Pflaume (siehe auch Tabellen 5.18 und K.20) verkehren sich in der Zukunft in Gewinne, so dass für alle 10 Fruchtarten die Anwendung der g-Strategie anstelle von “keinen Maßnahmen” empfohlen werden kann.

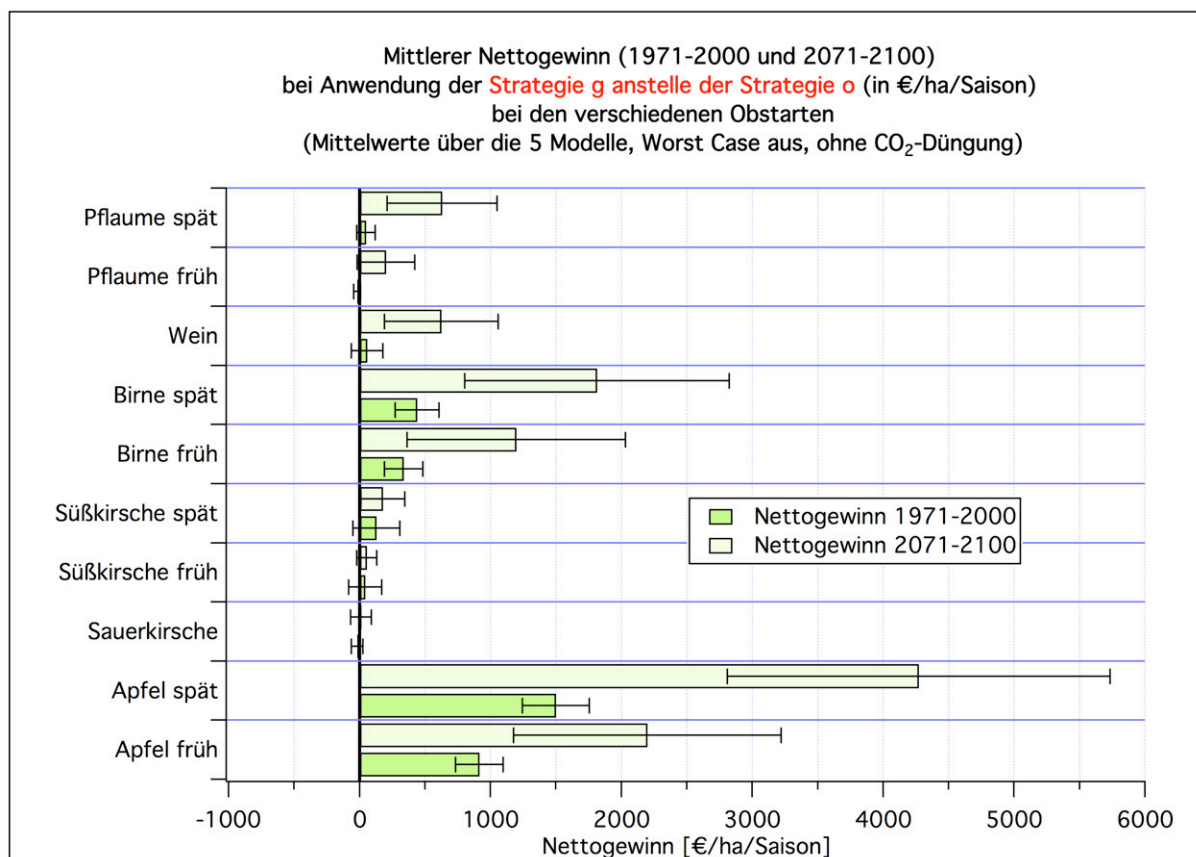


Abbildung 5.72: Mittlerer Nettogewinn (1971-2000 und 2071-2100) bei Verwendung der **Strategie g** anstelle von **Strategie o** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe mit 95 %-Konfidenzintervallen; ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

Verwendet man hingegen die m-Strategie (**Abbildung 5.73**), so erleidet man gegenüber der o-Strategie bei der Sauerkirsche und der Pflaume im Zeitraum 1971-2000 sogar leicht signifikante Verluste (siehe auch Tabelle K.22).

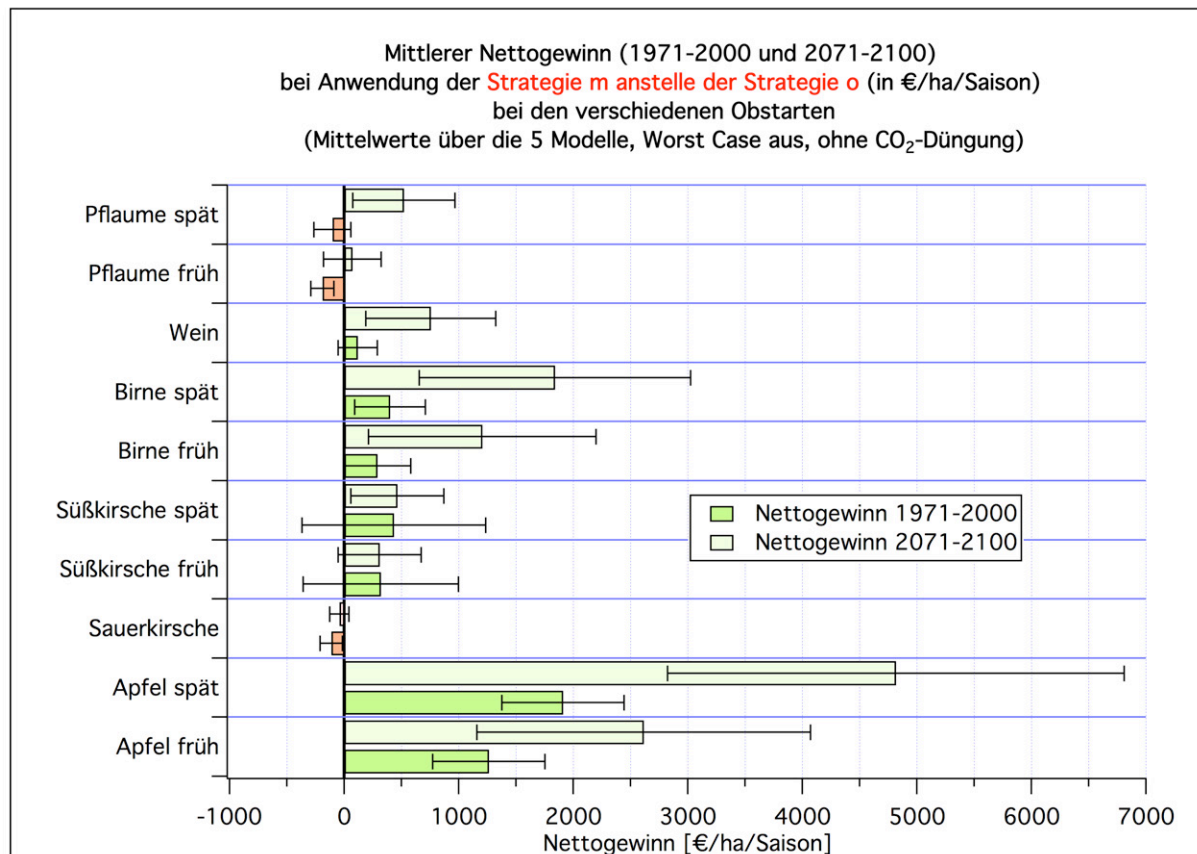


Abbildung 5.73: Mittlerer Nettogewinn (1971-2000 und 2071-2100) bei Verwendung der Strategie m anstelle von Strategie o (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe; ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

An **Abbildung 5.74** erkennt man, dass die m-Strategie bei der Sauerkirsche und Pflaume schlechter abschneidet als die g-Strategie. Das liegt vor allem daran, dass *MaxWert* (vgl. Tabelle 4.26) bei diesen Arten besonders klein ist und daher ein bestimmter Schaden keine sehr großen Schadens-Kosten hervorruft, so dass die Kosten des Maßnahmeanteils betragsmäßig z. T. größer sind als die durch den (eingesparten) Schadensanteil ([Gleichung (4.205)]). Bei Sauerkirsche und Pflaume ist es daher sinnvoller, die g-g-Strategie zu verwenden!

Abbildung 5.75 zeigt die Aufteilung des Nettogewinns in Schadensanteil und Maßnahmeanteil (im Mittel für den Zeitraum 2071-2100), wenn man die m-Strategie anstelle der g-Strategie anwendet. Der Schadensanteil (rot) ist der Gewinn, welcher durch Verringerung der Schäden aufgrund der Anwendung der m-Strategie anstelle der g-Strategie anfällt. Die blauen Balken sind die Mehrkosten, die durch die erweiterten Maßnahmen anfallen. Nur wenn die roten Balken länger als die negativen blauen sind, ist die erweiterte Strategie rentabel (positive schwarze Balken).³¹

³¹ Vergleicht man die m- mit der o-Strategie, so sind beide Anteile wesentlich größer! Beim spätreifen Apfel reicht der Schadensanteil bis ca. 6000 €/ha/a, der blaue Balken erstreckt sich bis ca. -1200 €.

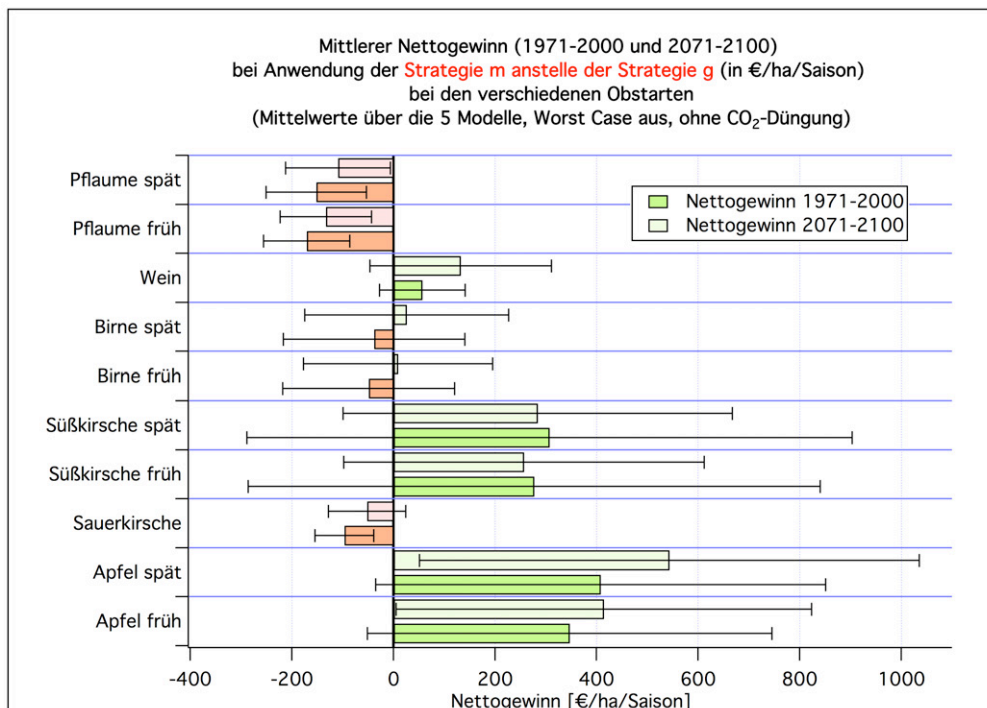


Abbildung 5.74: Mittlerer Nettogewinn (1971-2000 und 2071-2100) bei Verwendung der **Strategie m** anstelle von **Strategie g** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe; ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

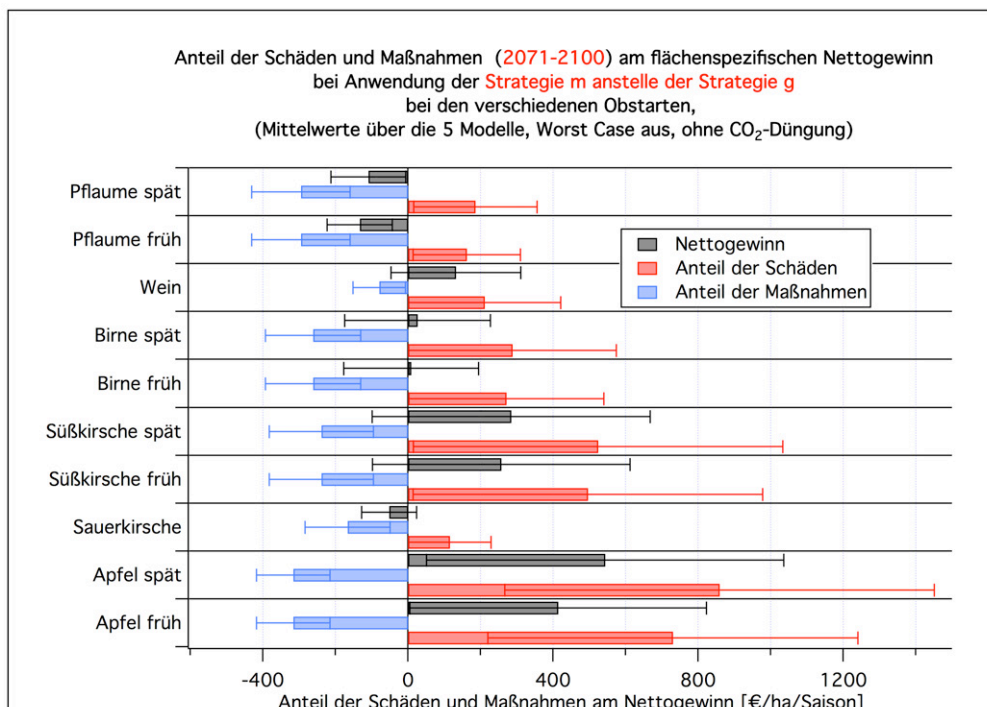


Abbildung 5.75: Anteil der Schäden und Maßnahmen am Nettogewinn (Mittelwert 2071-2100) bei Verwendung der **Strategie m** anstelle von **Strategie g** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe; ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

und der Nettogewinn ist mit ca. 4800 € auch wesentlich höher.

Die extrem breiten Konfidenzintervalle in der Abbildung 5.74 zeigen aber, dass man nicht mit großer Sicherheit sagen kann, dass die m-Strategie auf jeden Fall besser abschneidet als die g-Strategie. Warum die "Fehlerbalken" so groß sind, erkennt man in der **Abbildung 5.76**, welche den ab 2002 akkumulierten Nettogewinn beim frühreifen Apfel zeigt, wenn man die m-Strategie anstelle der g-Strategie anwendet.^{32 33} Die mit den Werten der 5 Klimamodelle berechneten Nettogewinnsummen unterscheiden sich erheblich. Das bedeutet, dass die Unsicherheiten beim Nettogewinn bzw. der Rentabilität überwiegend durch die Unterschiede in den Ergebnissen der Klimamodelle hervorgerufen werden. Denn bei den Kosten bzw. Schäden spielen nicht nur die Mittelwerte der einzelnen meteorologischen Größen eine Rolle, sondern auch die Varianzen und Extremwerte dieser Größen gehen stark in die Ergebnisse der Impaktmodelle ein. Und gerade hierin unterscheiden sich die RCM's zum Teil extrem.

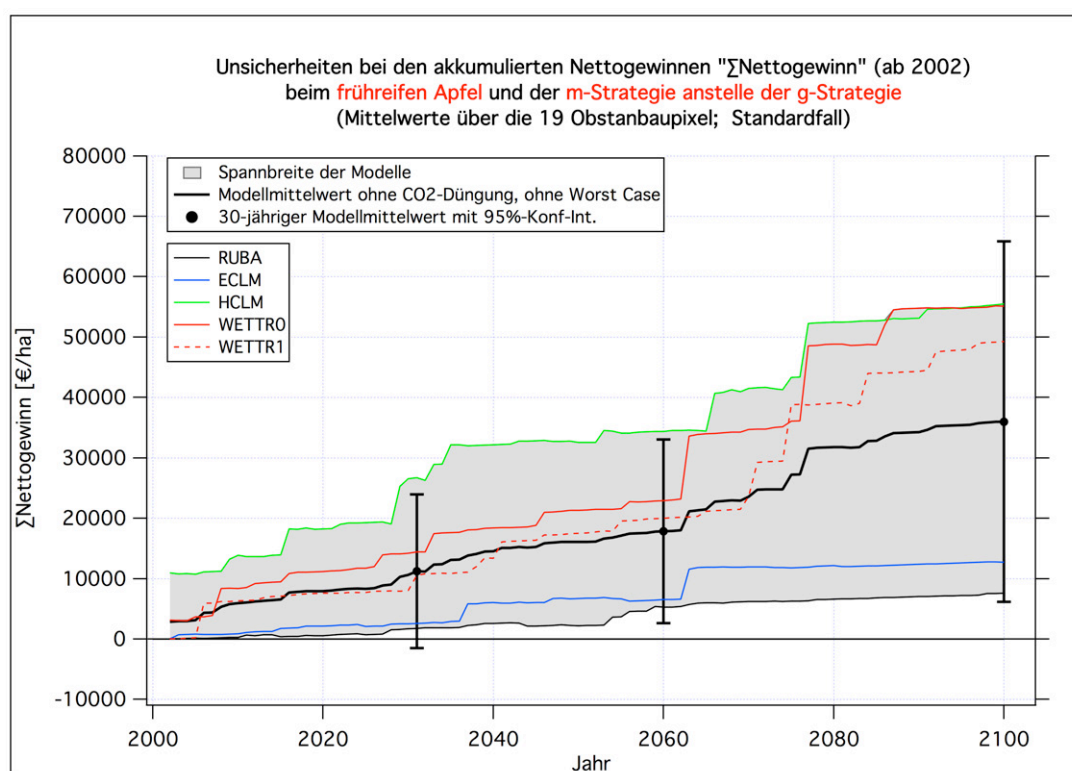


Abbildung 5.76: Akkumulierter Nettogewinn (ab 2002) (in €/ha) beim frühreifen Apfel bei Verwendung der **Strategie m anstelle von Strategie g** (für jedes der 5 Modelle und Modellmittelwert; ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

Die w-Strategie unterscheidet sich von der o-Strategie nur durch die in ihr durchgeführte extensive Bekämpfung des Apfelwicklers, so dass sich nur beim Apfel für den Nettogewinn zwischen w- und o-Strategie Werte ungleich null ergeben. Die v-Strategie unterscheidet

³² Der hohe Startwert des Nettogewinns im Jahr 2002 beim HCLM in Abbildung 5.76 wird durch einen 99.7%-igen Frostschaden hervorgerufen, der bei der g-Strategie auftritt, aber in der m-Strategie durch die Frostberegnung vermieden wird.

³³ Die Bezeichnung "30-jähriger Modellmittelwert" in der Abbildung bezieht sich auf die Endjahre der in den Tabellen 5.16 ff. bei den Mittelwerten benutzten 30-Jahresabschnitte. Die Werte sind keine Mittelwerte über 30 Jahresabschnitte, sondern, da es sich um akkumulierte Werte handelt, Mittelwerte der Summen von 2002 bis zu diesen Endjahren über die 5 Klimamodellläufe!

sich, da der Dormanzschaden (außer im Worst Case Szenario) immer vernachlässigbar ist, ebenfalls nur beim Apfel von der m-Strategie, weil auch hier nur Unterschiede bei der Apfelwicklerbekämpfung (extensiv bei v, intensiv bei m) bestehen (vgl. Tabelle 4.25).

Die **Tabellen 5.16 ff.** vergleichen die Rentabilität beim frühreifen und spätreifen Apfel, bei der Sauerkirsche und beim Wein für verschiedene Strategie-Kombinationen und Impaktmodell-Variationen (“CO₂ an” = mit CO₂-Düngung; “WC=20 %” = Worst Case mit *NoReleaseProb* = 20 %; “nur 3 Klimamodellläufe” = Rechnung ohne Einbeziehung der 2 WETTREG-Läufe). Man erkennt recht leicht, dass der Nettogewinn bzw. die Rentabilität i. Allg. größer wird, wenn man Fälle mit CO₂-Düngung oder angeschaltetem Worst Case Szenario in der Zukunft anstelle des Standardfalls betrachtet und die Strategie-Kombination dabei festhält³⁴. Das liegt daran, dass dann die Erträge (negative Yieldschäden) bzw. die Dormanzschäden größer werden. Im ersten Fall wird die Differenz ($s_{ges}^A - s_{ges}^B$) in Gleichung (4.196) größer, da hier angenommen wurde, dass $s_{ges}^B < s_{ges}^A$ gilt (A = weniger Maßnahmen) und die CO₂-Düngung den Term $(1 - s_Y)$, den man aus der Differenz der Gesamtschäden ausklammern könnte [siehe Formel (4.187)], größer als eins macht (negativer Yieldschaden). Im zweiten Fall steigt s_{ges}^A (der Schaden ohne Bekämpfung der Dormanz) stark an. In beiden Fällen wächst daher der “Schadensanteil” in Formel (4.196) kräftig an. Die “Kosten der Maßnahmen” verändern sich aber wenig oder gar nicht, so dass sich insgesamt ein größerer Nettogewinn ergibt.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Obstbauern bereits im Zeitraum 1971-2000 wenigstens die g-Strategie verwendet haben. Abbildung 5.72 zeigte ja bereits, dass es, zumindest beim Apfel und der Birne, fahrlässig wäre, gar keine Maßnahmen zu ergreifen. Da man in Zukunft für die Sauerkirsche und Pflaume bevorzugt die g-Strategie verwenden sollte, und für die anderen Obstarten wahrscheinlich die m-Strategie zu mehr Gewinn führen wird, wobei unter Umständen aber auch die g-Strategie weiterverwendet werden kann [denn es zeigen sich außer für den spätreifen Apfel (Pflaume und Sauerkirsche ausgenommen) keine signifikanten Unterschiede in der Abbildung 5.74], werden im Weiteren bevorzugt die g-g- und die m-g-Strategie-Kombinationen untersucht. Für Obstbauern, die bereits 1971-2000 alle möglichen Maßnahmen³⁵ eingesetzt haben, wird auch zusätzlich, allerdings nicht in allen Varianten, die m-m-Strategie betrachtet.

Für jede von diesen drei Strategiekombinationen werden neben dem Standardfall (keine CO₂-Düngung und kein Worst Case Szenario) noch die Variationen “CO₂-Düngung an” und “Worst Case Szenario mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten für die Nichtbrechung der Dormanz (*NoReleaseProb*)” berechnet. Die parallele Betrachtung dieser drei möglichen Variationen erschien nötig, da nach heutigem Forschungsstand nicht klar ist, ob sich der CO₂-Effekt tatsächlich so stark auswirkt wie hier berechnet, oder ob nach einiger Zeit eine Gewöhnung der Pflanzen und ein Rückgang des Effektes einsetzt. Die Nichtbrechung der Dormanz scheint zwar nach den an der HU durchgeführten Rechnungen in Hessen auch in Zukunft keine Probleme zu bereiten. Das Worst Case Szenario wurde aber trotzdem auf Wunsch des HLUg zusätzlich in die Rechnungen mit einbezogen. Schließlich besteht auch in Hinblick auf die Prozesse bei der Dormanzberechnung noch einiger Forschungsbedarf, so dass zukünftige Dormanzschäden nicht ganz auszuschließen sind.

³⁴ Und intensivere Maßnahmen bei der Strategie (B) durchführt.

³⁵ Man beachte: Die Maßnahmen und Schäden beziehen sich in dieser Arbeit immer nur auf Dormanz, Frost, Apfelwickler beim Apfel und Yield bzw. Sommerberegnung. Würde man weitere Schäden miteinbeziehen, so könnten sich die Ergebnisse ändern!

Tabelle 5.16: Statistik für den **Nettogewinn** (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim frühreifen Apfel** (Standard: ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
w-o	457. (39.)	476. (26.)	708. (160.)	1002. (111.)	545. (115.)	0.000	***
g-o	914. (182.)	1008. (305.)	1448. (392.)	2199. (1022.)	1285. (1052.)	2.747	*
v-o	1228. (491.)	1347. (463.)	1642. (506.)	2557. (1429.)	1330. (1432.)	6.267	
m-o	1262. (491.)	1383. (468.)	1689. (522.)	2614. (1455.)	1352. (1454.)	6.238	
m-g	347. (398.)	374. (344.)	241. (107.)	414. (409.)	67. (534.)	79.857	
m-g nur 3 Mod.	366. (955.)	346. (875.)	171. (122.)	179. (368.)	-187. (932.)	60.732	
m-g CO ₂ an	347. (398.)	417. (371.)	321. (120.)	578. (521.)	231. (618.)	44.755	
m-g WC=20%	347. (398.)	374. (344.)	241. (107.)	1949. (533.)	1601. (631.)	0.001	***

Tabelle 5.17: Statistik für den **Nettogewinn** (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim spätreifen Apfel** (Standard: ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
w-o	468. (34.)	488. (27.)	691. (124.)	942. (62.)	474. (70.)	0.000	***
g-o	1499. (254.)	1788. (380.)	2782. (877.)	4271. (1462.)	2771. (1503.)	0.688	**
v-o	1855. (532.)	2186. (628.)	3026. (988.)	4717. (1967.)	2862. (2073.)	1.856	*
m-o	1908. (532.)	2246. (637.)	3104. (1007.)	4814. (1992.)	2906. (2097.)	1.833	*
m-g	408. (443.)	458. (419.)	322. (122.)	543. (492.)	135. (621.)	65.861	
m-g nur 3 Mod.	432. (1065.)	443. (1067.)	252. (150.)	267. (494.)	-165. (1071.)	69.028	
m-g CO ₂ an	408. (443.)	502. (450.)	406. (139.)	721. (611.)	313. (714.)	37.472	
m-g WC=20%	408. (443.)	458. (419.)	322. (122.)	2367. (636.)	1959. (737.)	0.001	***

Tabelle 5.18: Statistik für den **Nettogewinn** (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **bei der Sauerkirsche** (Standard: ohne CO₂-Düngung, ohne Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
w-o	0. (0.)	0. (0.)	0. (0.)	0. (0.)	0. (0.)	100.000	
g-o	-18. (45.)	9. (118.)	-17. (54.)	9. (79.)	27. (86.)	49.841	
v-o	-115. (96.)	-95. (95.)	-169. (53.)	-43. (83.)	72. (119.)	22.513	
m-o	-115. (96.)	-95. (95.)	-169. (53.)	-43. (83.)	72. (119.)	22.513	
m-g	-97. (58.)	-104. (63.)	-152. (44.)	-52. (76.)	44. (93.)	34.130	
m-g nur 3 Mod.	-98. (138.)	-108. (95.)	-166. (61.)	-64. (62.)	35. (138.)	56.997	
m-g CO ₂ an	-97. (58.)	-97. (65.)	-142. (42.)	-25. (95.)	72. (109.)	18.866	
m-g WC=20%	-97. (58.)	-104. (63.)	-152. (44.)	482. (187.)	578. (194.)	0.000	***

Weitere Tabellen für den Nettogewinn bei allen 10 betrachteten Obstarten für verschiedenen Strategie-Kombinationen findet man im **Anhang K.2.1**.

Tabelle 5.19: Statistik für den **Nettogewinn** (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim Wein** (Standard: ohne CO₂-Düngung, ohne Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
w-o	0. (0.)	0. (0.)	0. (0.)	0. (0.)	0. (0.)	100.000	
g-o	58. (120.)	115. (115.)	331. (206.)	624. (436.)	565. (456.)	2.431	*
v-o	116. (171.)	172. (190.)	338. (212.)	755. (567.)	639. (571.)	3.375	*
m-o	116. (171.)	172. (190.)	338. (212.)	755. (567.)	639. (571.)	3.375	*
m-g	57. (84.)	57. (122.)	6. (43.)	132. (179.)	74. (196.)	44.921	
m-g nur 3 Mod.	25. (208.)	62. (166.)	-10. (27.)	49. (134.)	24. (205.)	78.808	
m-g CO ₂ an	57. (85.)	69. (133.)	27. (56.)	231. (272.)	173. (284.)	22.204	
m-g WC=20%	57. (84.)	57. (122.)	6. (43.)	1401. (425.)	1344. (432.)	0.000	***

Zusammenfassung: Die g-Strategie (mit extensiver Apfelwicklerbekämpfung und Sommerberegnung, aber ohne Maßnahmen gegen Spätfrost und Nichtbrechung der Dormanz; Tabelle 4.25) ist, verglichen mit einer Strategie ohne irgendwelche Maßnahmen (o-Strategie), für alle Obstarten rentabel (Abbildung 5.72). Die durch die g-Strategie zu erwirtschaftenden Gewinne sind sogar, außer für die Kirsche, die frühreife Pflaume und die spätreife Pflaume³⁶, signifikant größer null. Die maximale m-Strategie (zusätzlich mit Frostschutzberegnung, intensiver Apfelwicklerbekämpfung und Maßnahmen gegen Nichtbrechung der Dormanz) zeigt im zeitlichen Mittel für alle Obstarten, außer bei der Pflaume und Sauerkirsche, gegenüber der g-Strategie weitere Einsparungsmöglichkeiten (Gewinne), allerdings sind diese außer beim spätreifen Apfel sehr unsicher und nicht signifikant von null verschieden (Abbildung 5.74). Beim spätreifen Apfel kann man im Standardfall insgesamt, aufsummiert von 2002 bis 2100, ca. 46 000 €/ha ($\pm 36 000$ €/ha) einsparen (vgl. auch Abb. 5.76 für den frühreifen Apfel), wenn man die m- anstelle der g-Strategie verwendet. Bei der Pflaume und der Sauerkirsche treten aber durch die m-Strategie signifikante Verluste gegenüber der g-Strategie auf [$-19 000$ (± 800) €/ha bei der frühreifen Pflaume, $-17 000$ ($\pm 2 200$) €/ha bei der spätreifen Pflaume und $-10 000$ ($\pm 2 200$) €/ha bei der Sauerkirsche], so dass man für diese Obstarten besser keine maximale, sondern nur die gemäßigte g-Strategie anwenden sollte. Der *Nettogewinn* bzw. die Rentabilität der g- und m-Strategie wird i. Allg. größer, wenn man “Fälle mit” anstelle von “Fällen ohne” CO₂-Düngung betrachtet (Tabellen 5.16 ff.). Die m-Strategie wird gegenüber der g- und o-Strategie umso rentabler, je größer die *NoReleaseProb* im Worst Case Szenario angesetzt wird, da nur die m-Strategie die Nichtbrechung der Dormanz bekämpft. Bei *NoReleaseProb* = 20% ist dann sogar die m-Strategie auch für die Pflaume und Sauerkirsche zu empfehlen (Tabelle K.26; Spalte D).

5.7.2.2 Die Kosten des Klimawandels

Abbildung 5.77 visualisiert den Anteil der Kosten durch Schäden und Maßnahmen an den Gesamt-Zusatzkosten des Klimawandels pro Hektar und Saison im Zeitraum 2071-2100 gegenüber 1971-2000 bei Anwendung der g-g-Strategie ohne CO₂-Effekt und ohne Worst Case Szenario [Gleichung (4.198) mit $x = 3$ und $B = A = g$, gemittelt über die 19

³⁶ Bei dieser treten aber ab 2001 wieder signifikante Gewinne auf.

Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte].

Nur bei den Kirschen treten positive Zusatzkosten *KK* und Schadensanteile auf, was auf den frühen Reifetermin (Tabelle E.1) und die gleichzeitig leicht verkürzte Länge der Reifeperiode (Tabellen F.3 ff.) zurückzuführen ist. Bei allen anderen Obstarten ist der Schadensanteil negativ (Gewinn!), was durch die negativen Yieldschäden (Abbildung 5.55) [Verlängerung der Reifeperiode und/oder günstigere Wachstumsbedingungen (mehr Globalstrahlung, vor allem bedingt durch die beiden WETTREG-Läufe) in der Zukunft] im Zeitraum 2071-2100 hervorgerufen wird.

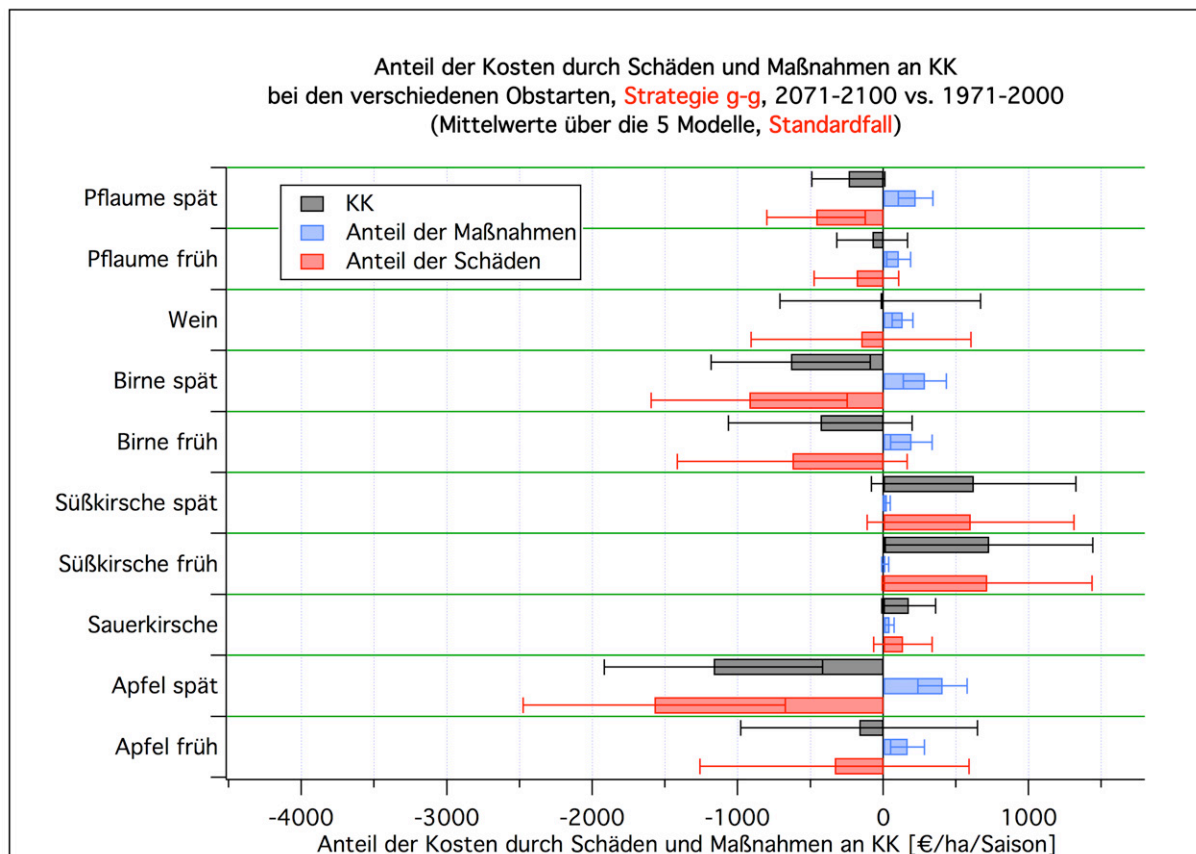


Abbildung 5.77: Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an den “Gesamtkosten *KK* des Klimawandels” (in €/ha/Saison) bei den verschiedenen Obstarten [(2071-2100) vs. (1971-2000)] (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

Verwendet man die m-g-Strategie (**Abbildung 5.78**), so wird der Maßnahmeanteil (blaue Balken) an *KK* größer, gleichzeitig verschieben sich aber die Schadenskostenanteile (rote Balken) außer bei der Sauerkirsche und Pflaume³⁷ zu kleineren Werten hin.

Man beachte, dass bei der m-g-Strategie nicht nur wie bei der g-g-Strategie die Veränderungen im Klima zwischen dem Zeitraum 1971-2000 und der Zukunft (2071-2100) in den Wert von *KK* einfließen, sondern auch noch die ab 2001³⁸ veränderte Strategie. Sogar dann, wenn sich das Klima nicht ändern würde, ergäben sich bei der m-g-Strategie *KK*-Werte ungleich null!³⁹

³⁷ Bei diesen ist die m-g-Strategie, wie im vorherigen Kapitel festgestellt wurde, nicht rentabel.

³⁸ In den Bildern ist meistens nur der Zeitraum 2071-2100 bzw. die Differenz (2071-2100)-(1971-2000)

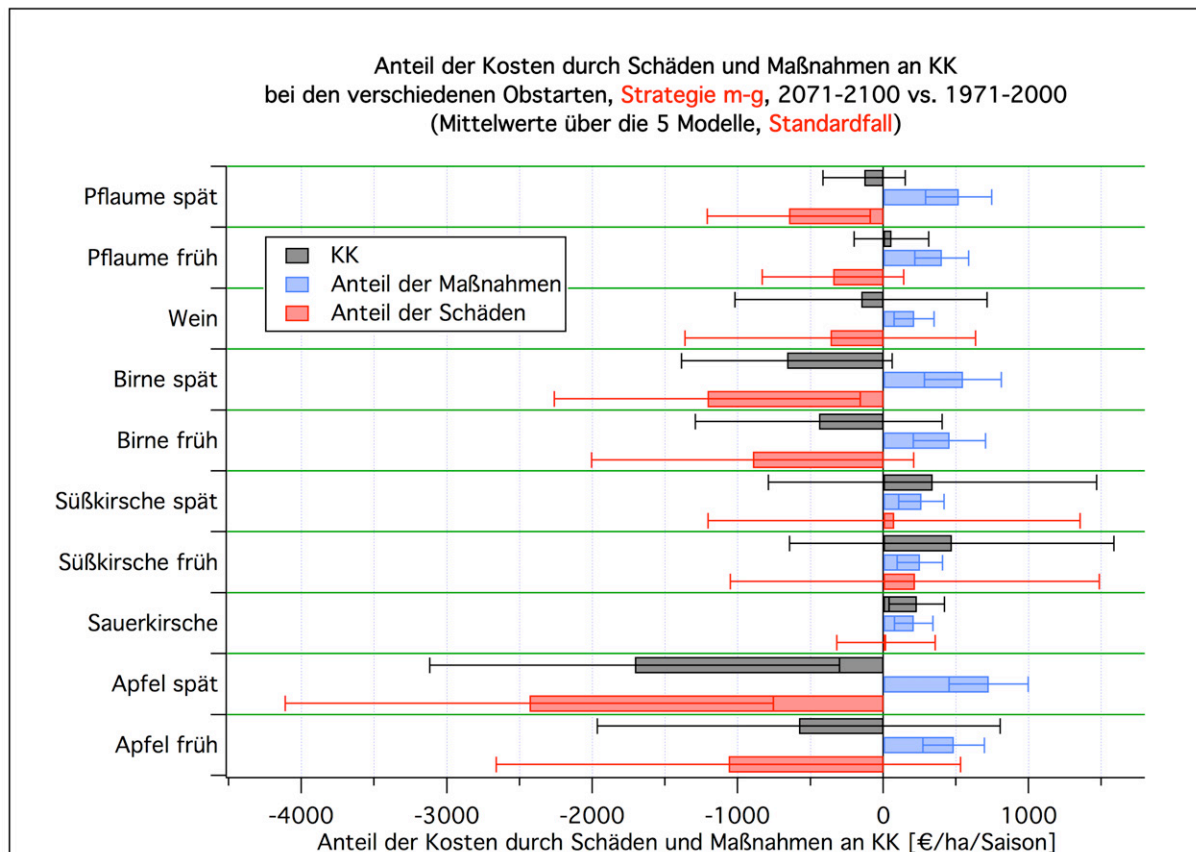


Abbildung 5.78: Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an den “Gesamtkosten *KK* des Klimawandels” (in €/ha/Saison) bei den verschiedenen Obstarten [(2071-2100) vs. (1971-2000)] (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

Bei der m-g-Strategie mit Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffekts (**Abbildung 5.79**) dominieren die zukünftigen Gewinne (negative Schadensanteile). Der Kostenanteil verringert sich gegenüber dem Fall ohne CO₂-Düngung nur leicht (da weniger Sommerberegnung nötig ist).

Im Worst Case Szenario 20% (**Abbildung 5.80**) steigen die Schadensanteile stark an, so dass sich für alle Obstarten außer dem spätreifen Apfel nun Zusatzkosten in der Zukunft ergeben. Diese sind allerdings nur z. T. statistisch signifikant. Die Zusatzkosten durch Maßnahmen steigen dabei gegenüber dem Fall ohne Worst Case Szenario durch die nötig werdenden Maßnahmen zur Dormanzbrechung nur minimal um ca. 46 €/ha/a an [Formel (4.98) mit $P_D = 20\%$].

dargestellt.

³⁹ Welchen Gewinn man durch die Strategieänderung allein erzielen kann, zeigen die im vorhergehenden Kapitel 5.7.2.1 diskutierten *Nettogewinn*-Werte, bei denen sich die beiden verglichenen Strategien aber im Gegensatz zu den hier betrachteten *Kosten* auf denselben Zeitraum beziehen.

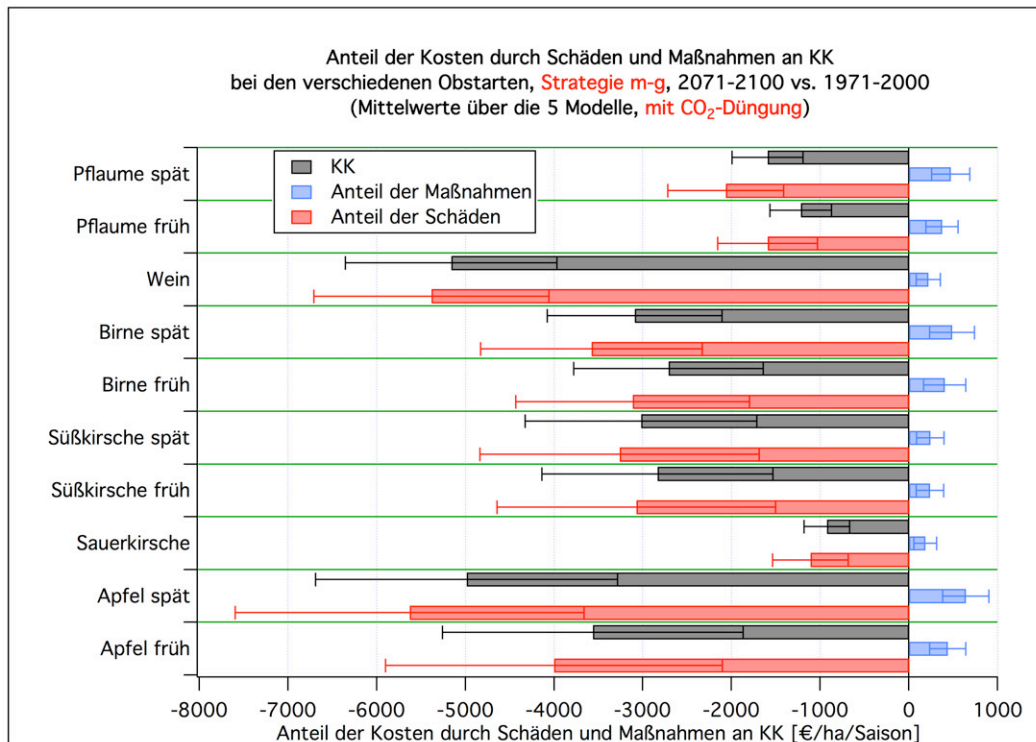


Abbildung 5.79: Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an den “Gesamtkosten *KK* des Klimawandels” (in €/ha/Saison) bei den verschiedenen Obstarten [(2071-2100) vs. (1971-2000)] (Strategie m-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: aus; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

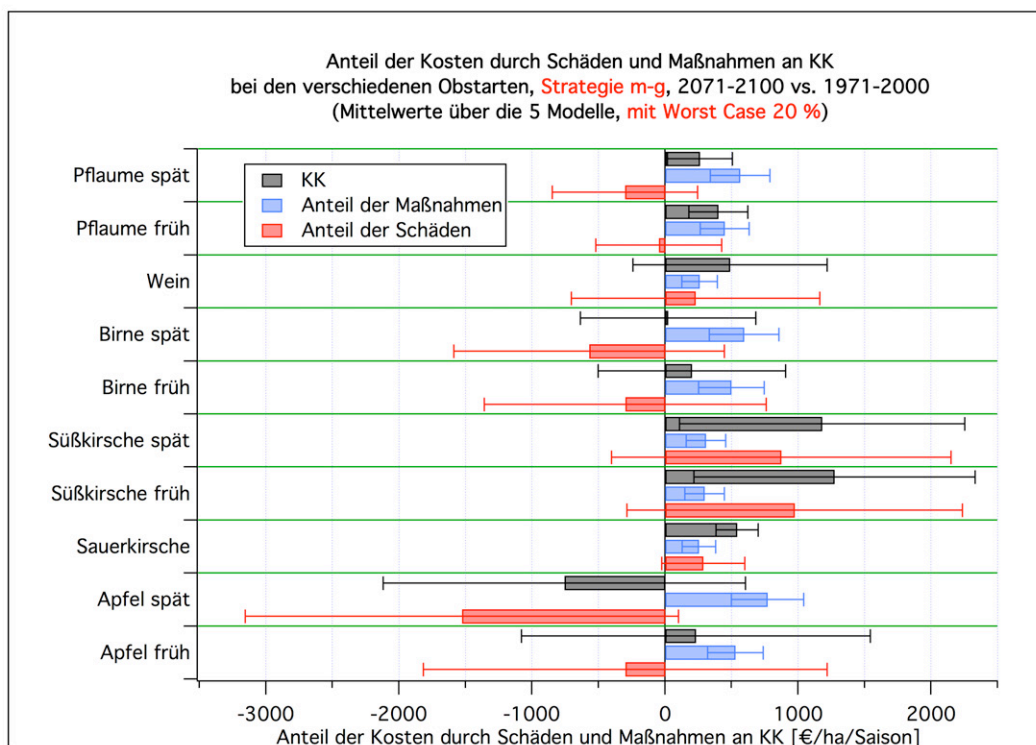


Abbildung 5.80: Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an den “Gesamtkosten *KK* des Klimawandels” (in €/ha/Saison) bei den verschiedenen Obstarten [(2071-2100) vs. (1971-2000)] (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20%; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

Abbildung 5.81 zeigt erneut für den frühreifen Apfel im Standardfall (Worst Case aus und ohne CO₂-Düngung), dass die Unsicherheiten im Wert von *KK* “zwischen den 5 Klimamodellen” erheblich sind. Mit den Klimadaten von RUBA und vom ECLM berechnet man signifikant positive Werte, und mit denen des HCLM und der beiden WETTREG-Läufe ergeben sich signifikant negative Zusatzkosten. Daher berechnet man für den “Modellmittelwert” [Differenz (2071-2100)-(1971-2000)]⁴⁰ zwangsläufig ein sehr großes Konfidenzintervall, welches von -1965 €/ha/a bis 803 €/ha/a reicht (vgl. die “m-g-Zeile” in Tabelle 5.20).

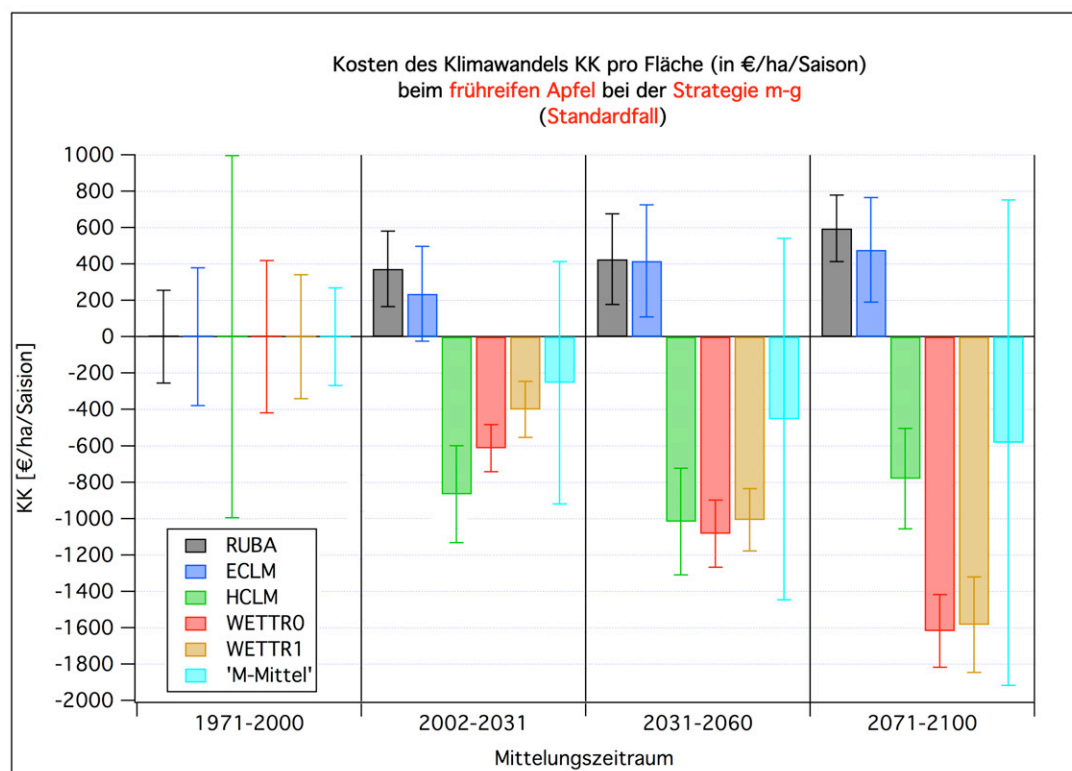


Abbildung 5.81: Kosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim frühreifen Apfel, berechnet mit den 5 unterschiedlichen Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

Die **Tabellen 5.20 bis 5.22** fassen die Ergebnisse für die flächenspezifischen Kosten *KK* des Klimawandels für den frühreifen und spätreifen Apfel sowie den Wein für verschiedene Strategiekombinationen und Impaktmodellvariationen zusammen.

Ganz ohne Maßnahmen (o-o; ohne Worst Case Szenario und ohne CO₂-Effekt), weder heutzutage noch in der Zukunft, wird man in der Zukunft bei allen 3 Obstarten mit zusätzlichen Kosten rechnen müssen (signifikant!). Die Einführung der m-Strategie nach dem Jahr 2000 (m-o) bringt bei allen drei Obstarten erhebliche Kosteneinsparungen bzw. Gewinne (beim Wein nicht signifikant). Obstbauern, die bereits 1971-2000 die gemäßigte Strategie g oder die maximale Strategie m angewendet haben, können in der “Zukunft” (ab 2001) dadurch sparen, dass sie auf die m-Strategie umsteigen bzw. diese weiterverwenden (nur leicht signifikant beim spätreifen Apfel). Sollte der CO₂-Effekt tatsächlich in der Intensität über einen langen Zeitraum (ohne Gewöhnungseffekt) so eintreten, wie

⁴⁰ Die Besonderheiten der Konfidenzintervalle der Gesamtkosten des Klimawandels (*KK* und *KKa*) wurden bereits auf Seite 176 diskutiert.

es die Impaktmodelle vorhersagen, so ist der Einsparungseffekt durch die m-Strategie in Zukunft sogar noch viel größer (signifikant! Siehe “CO₂ an”-Zeilen in den Tabellen).⁴¹ Bei Anwendung der g-Strategie gilt das Gleiche, nur sind die Gewinne bei den drei Fruchtarten nicht ganz so groß (signifikant).

In dem unwahrscheinlichen Fall, dass die Dormanz häufig nicht gebrochen wird (Worst Case Szenario, “WC= x %” Zeilen), ergeben sich beim spätreifen Apfel (ohne CO₂-Effekt) und Anwendung der m-g- oder m-m-Strategie sogar für eine *NoReleaseProb* von 20 % noch Einsparungen bzw. Gewinne gegenüber 1971-2000. Beim frühreifen Apfel treten aber für *NoReleaseProb* = 20 % trotz Bekämpfung zusätzliche Kosten auf. Beim Wein treten für alle *NoReleaseProb* > 4 % Zusatzkosten auf. Alle diese Aussagen sind aber statistisch nicht oder nur gering signifikant (H₀: Differenz ist null; H₁: Differenz ist ungleich null) und sind sehr unsicher.

Die **Abbildungen im Anhang K.2.2.2.1** zeigen die soeben für ausgewählte Obstarten diskutierten Ergebnisse für die Gesamtzusatzkosten *KK* pro Hektar und Jahr [(2071-2100) vs. (1971-2000)] sowie einige zusätzliche Fälle für alle 10 Obstarten mit 95%-Konfidenzintervallen. Rote Balken signalisieren Zusatzkosten, grüne bezeichnen Einsparungen bzw. Gewinne.

Die Gesamtzusatzkosten *KKA*, ebenfalls für [(2071-2100) vs. (1971-2000)], nun aber für ganz Hessen, wurden in den **Abbildungen im Anhang K.2.3.2.1** in analoger Form geplottet. Um *KKA* zu erhalten, wurden die *KK*-Werte mit der Gesamtanbaufläche aus Tabelle 4.26 multipliziert.

Tabelle 5.20: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim frühreifen Apfel** (ohne Zusatz zur Strategie = Standard: ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
o-o	0. (248.)	215. (271.)	322. (519.)	1118. (594.)	1118. (628.)	0.188	**
m-o	0. (248.)	-1167. (674.)	-1367. (932.)	-1495. (1229.)	-1495. (1274.)	3.112	*
g-g	0. (269.)	121. (236.)	-211. (868.)	-167. (791.)	-167. (813.)	65.276	
g-g nur 3 Mod.	0. (375.)	261. (298.)	113. (1893.)	278. (1290.)	278. (1119.)	48.701	
g-g CO ₂ an	0. (269.)	-613. (246.)	-1886. (943.)	-2986. (963.)	-2986. (987.)	0.012	***
g-g WC=20 %	0. (269.)	121. (236.)	-211. (868.)	2180. (764.)	2180. (803.)	0.000	***
m-g	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-581. (1335.)	-581. (1384.)	30.850	
m-g CO ₂ an	0. (269.)	-1029. (683.)	-2207. (1084.)	-3564. (1654.)	-3564. (1694.)	0.429	**
m-g WC=20 %	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	232. (1261.)	232. (1312.)	64.933	
m-g WC=10 %	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-171. (1274.)	-171. (1325.)	73.774	
m-g WC=7 %	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-281. (1317.)	-281. (1367.)	59.862	
m-g WC=5 %	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-388. (1286.)	-388. (1337.)	46.600	
m-g WC=4 %	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-473. (1329.)	-473. (1378.)	39.434	
m-g WC=3 %	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-526. (1287.)	-526. (1338.)	33.645	
m-m	0. (150.)	94. (355.)	-105. (760.)	-234. (1210.)	-234. (1227.)	62.484	
m-m CO ₂ an	0. (151.)	-682. (371.)	-1860. (862.)	-3217. (1545.)	-3217. (1559.)	0.459	**
m-m WC=20 %	0. (150.)	94. (355.)	-105. (760.)	579. (1069.)	579. (1089.)	21.354	

⁴¹ Bei Pflaume und Sauerkirsche sollte man aber auch in der Zukunft nur die g-Strategie anwenden, da die m-Strategie bei diesen Obstarten nicht rentabel ist!

Tabelle 5.21: Statistik für die **Gesamtkosten KK des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim spätreifen Apfel** (ohne Zusatz zur Strategie = Standard: ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden , Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
o-o	0. (261.)	183. (343.)	488. (412.)	1605. (1055.)	1605. (1063.)	0.911	**
m-o	0. (261.)	-2063. (792.)	-2616. (1020.)	-3209. (1167.)	-3209. (1219.)	0.187	**
g-g	0. (298.)	-106. (267.)	-795. (1001.)	-1167. (708.)	-1167. (750.)	0.490	**
g-g nur 3 Mod.	0. (435.)	-39. (363.)	-501. (2400.)	-797. (1088.)	-797. (1035.)	10.480	
g-g CO ₂ an	0. (299.)	-862. (277.)	-2562. (1093.)	-4268. (867.)	-4268. (902.)	0.000	***
g-g WC=20 %	0. (298.)	-106. (267.)	-795. (1001.)	1610. (880.)	1610. (923.)	0.115	**
m-g	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1710. (1349.)	-1710. (1408.)	2.803	*
m-g CO ₂ an	0. (299.)	-1364. (800.)	-2968. (1230.)	-4989. (1654.)	-4989. (1703.)	0.124	**
m-g WC=20 %	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-757. (1301.)	-757. (1362.)	19.780	
m-g WC=10 %	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1228. (1294.)	-1228. (1356.)	6.572	
m-g WC=7 %	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1356. (1329.)	-1356. (1389.)	5.359	
m-g WC=5 %	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1481. (1298.)	-1481. (1359.)	3.897	*
m-g WC=4 %	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1581. (1340.)	-1581. (1399.)	3.498	*
m-g WC=3 %	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1644. (1293.)	-1644. (1355.)	2.805	*
m-m	0. (179.)	-156. (303.)	-708. (794.)	-1301. (1182.)	-1301. (1207.)	4.017	*
m-m CO ₂ an	0. (178.)	-956. (321.)	-2560. (902.)	-4581. (1503.)	-4581. (1523.)	0.112	**
m-m WC=20 %	0. (179.)	-156. (303.)	-708. (794.)	-349. (972.)	-349. (998.)	41.018	

Tabelle 5.22: Statistik für die **Gesamtkosten KK des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim Wein** (ohne Zusatz zur Strategie = Standard: ohne CO₂-Düngung, ohne Apfelwicklerschaden , Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
o-o	0. (134.)	96. (273.)	99. (315.)	544. (269.)	544. (297.)	0.065	***
m-o	0. (134.)	-76. (420.)	-239. (481.)	-211. (797.)	-211. (817.)	51.324	
g-g	0. (146.)	40. (237.)	-174. (462.)	-21. (667.)	-21. (691.)	94.098	
g-g nur 3 Mod.	0. (196.)	165. (280.)	53. (649.)	380. (173.)	380. (255.)	0.427	**
g-g CO ₂ an	0. (146.)	-1329. (217.)	-3194. (508.)	-4931. (860.)	-4931. (878.)	0.001	***
g-g WC=20 %	0. (146.)	40. (237.)	-174. (462.)	1892. (619.)	1892. (633.)	0.000	***
m-g	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	-152. (843.)	-152. (866.)	65.061	
m-g CO ₂ an	0. (146.)	-1397. (356.)	-3221. (580.)	-5162. (1177.)	-5162. (1193.)	0.028	***
m-g WC=20 %	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	490. (705.)	490. (729.)	14.414	
m-g WC=10 %	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	169. (830.)	169. (853.)	61.238	
m-g WC=7 %	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	85. (847.)	85. (870.)	79.979	
m-g WC=5 %	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	1. (812.)	1. (836.)	99.793	
m-g WC=4 %	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	-67. (868.)	-67. (890.)	84.442	
m-g WC=3 %	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	-108. (818.)	-108. (842.)	73.867	
m-m	0. (104.)	40. (256.)	-123. (369.)	-95. (779.)	-95. (792.)	75.581	
m-m CO ₂ an	0. (105.)	-1340. (238.)	-3164. (461.)	-5104. (1114.)	-5104. (1123.)	0.023	***
m-m WC=20 %	0. (104.)	40. (256.)	-123. (369.)	548. (631.)	548. (644.)	8.049	

Die **Tabellen 5.23 bis 5.25** zeigen die Ergebnisse für die in ganz Hessen anfallenden Kosten *KKA* des Klimawandels [für alle 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. die 8 Weinbaugitterpunkte; Gleichung (4.201)] für den frühreifen und spätreifen Apfel sowie den Wein für verschiedene Strategiekombinationen und Impaktmodellvariationen. Die Werte in den Tabellen entsprechen denen der Tabellen für *KK*, nur wurden die Zahlen mit den in Tabelle 4.26 angegebenen Anbauflächen der entsprechenden Obstart multipliziert. Man beachte, dass die Werte in 1000 €/Saison angegeben sind, beim Wein sogar in 10 000 €/Saison!

Die größten finanziellen Zusatzkosten (2071-2100 vs. 1971-2000) aller hier gelisteten Kombinationen fallen, wegen der sehr großen Weinbaufläche, beim Wein im Worst Case Szenario 20% bei der g-g-Strategie an. Sie betragen gerundet **7 000 000 €/Jahr** ($\pm 2\,300\,000$ €/Jahr) ("Tabelle 5.25, Zeile: g-g WC=20%; Spalte: Differenz"). Die größten Einsparungen⁴² gegenüber 1971-2000 erzielt man ebenfalls beim Wein bei der m-g-Strategie mit CO₂-Effekt. Die Einsparungen betragen in diesem Fall für die Hessische Bergstraße und den Rheingau ca. **19 000 000 €/Jahr** ($\pm 4\,300\,000$ €/Jahr) ("Tabelle 5.25, Zeile: m-g CO₂ an, Spalte: Differenz" und Abbildung K.74).⁴³

Summiert man die jährlichen Einsparungen *KKA* vom Jahr 2002 an bis zum Jahr 2100 auf, so ergeben sich beim Wein und der m-g-Strategie mit CO₂-Düngung Einsparungen im Wert von **1 200 000 000 €** ($\pm 250\,000\,000$ €) ("Tabelle K.76, Zeile: Wein, Spalte: 2100" und Abbildung K.77). Bei der g-g-Strategie und im 20% Worst Case Szenario erleidet man hingegen bis zum Jahr 2100 aufsummierte Mehrkosten beim Wein von **190 000 000 €** ($\pm 170\,000\,000$ €) ("Tabelle K.74, Zeile: Wein, Spalte: 2100").

Tabelle 5.23: Statistik für die **Gesamtkosten *KKA* des Klimawandels (in 1000 €/Saison)** bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim frühreifen Apfel** (ohne Zusatz zur Strategie = Standard: ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
o-o	0.0 (61.6)	53.4 (67.1)	79.9 (128.2)	277.3 (147.1)	277.3 (155.7)	0.187	**
m-o	0.0 (61.6)	-289.5 (166.8)	-338.9 (230.9)	-370.8 (304.5)	-370.8 (315.7)	3.105	*
g-g	0.0 (66.6)	30.1 (58.6)	-52.4 (215.1)	-41.4 (195.9)	-41.4 (201.3)	65.248	
g-g nur 3 Mod.	0.0 (93.1)	64.7 (74.0)	28.1 (469.5)	68.9 (319.9)	68.9 (277.4)	48.701	
g-g CO ₂ an	0.0 (66.9)	-152.0 (61.1)	-467.8 (233.8)	-740.4 (238.7)	-740.4 (244.6)	0.011	***
g-g WC=20%	0.0 (66.6)	30.1 (58.6)	-52.4 (215.1)	540.8 (189.5)	540.8 (199.2)	0.000	***
m-g	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-144.1 (331.0)	-144.1 (343.1)	30.824	
m-g CO ₂ an	0.0 (66.9)	-255.3 (169.0)	-547.3 (268.7)	-883.8 (410.2)	-883.8 (420.1)	0.428	**
m-g WC=20%	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	57.5 (312.6)	57.5 (325.4)	64.928	
m-g WC=10%	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-42.5 (315.8)	-42.5 (328.5)	73.772	
m-g WC=7%	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-69.7 (326.5)	-69.7 (338.8)	59.853	
m-g WC=5%	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-96.1 (318.9)	-96.1 (331.4)	46.583	
m-g WC=4%	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-117.3 (329.3)	-117.3 (341.5)	39.413	
m-g WC=3%	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-130.4 (319.1)	-130.4 (331.7)	33.630	
m-m	0.0 (37.3)	23.4 (87.1)	-26.0 (188.2)	-58.0 (299.9)	-58.0 (304.1)	62.458	
m-m CO ₂ an	0.0 (37.3)	-169.2 (91.1)	-461.3 (213.6)	-797.8 (383.2)	-797.8 (386.5)	0.459	**
m-m WC=20%	0.0 (37.3)	23.4 (87.1)	-26.0 (188.2)	143.7 (265.1)	143.7 (269.9)	21.346	

⁴² Die *Einsparungen* beinhalten hier sämtliche Gewinne durch verringerte Schäden (inkl. höhere Erträge) sowie ggf. veränderte Maßnahmekosten im Sinne der Gleichung (4.198), welche hier allerdings noch mit der Weinanbaufläche "in Hessen" multipliziert wurde, um Gesamtkosten pro Jahr zu erhalten. Analoges gilt für die *Zusatzkosten*.

⁴³ In der Tabelle und der Graphik haben Einsparungen negative Vorzeichen!

Tabelle 5.24: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels (in 1000 €/Saison)** bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim spätreifen Apfel** (ohne Zusatz zur Strategie = Standard: ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
o-o	0.0 (26.6)	18.7 (33.3)	49.8 (41.3)	163.7 (107.5)	163.7 (108.3)	0.906	**
m-o	0.0 (26.6)	-210.5 (80.7)	-266.8 (103.9)	-327.3 (118.9)	-327.3 (124.3)	0.186	**
g-g	0.0 (30.4)	-10.8 (27.2)	-81.1 (101.8)	-119.0 (71.6)	-119.0 (75.9)	0.466	**
g-g nur 3 Mod.	0.0 (44.4)	-3.9 (35.2)	-51.1 (244.8)	-81.3 (110.6)	-81.3 (105.3)	10.410	
g-g CO ₂ an	0.0 (30.5)	-87.9 (28.3)	-261.4 (111.1)	-435.3 (86.2)	-435.3 (89.5)	0.000	***
g-g WC=20%	0.0 (30.4)	-10.8 (27.2)	-81.1 (101.8)	164.2 (89.8)	164.2 (94.1)	0.115	**
m-g	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-174.4 (137.5)	-174.4 (143.6)	2.799	*
m-g CO ₂ an	0.0 (30.5)	-139.1 (81.5)	-302.7 (125.3)	-508.9 (168.7)	-508.9 (173.7)	0.124	**
m-g WC=20%	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-77.2 (132.2)	-77.2 (138.5)	19.654	
m-g WC=10%	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-125.3 (131.6)	-125.3 (137.9)	6.523	
m-g WC=7%	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-138.3 (135.3)	-138.3 (141.5)	5.334	
m-g WC=5%	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-151.1 (132.1)	-151.1 (138.4)	3.878	*
m-g WC=4%	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-161.2 (136.5)	-161.2 (142.6)	3.489	*
m-g WC=3%	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-167.7 (131.7)	-167.7 (138.0)	2.797	*
m-m	0.0 (18.2)	-15.9 (30.6)	-72.3 (80.9)	-132.7 (120.5)	-132.7 (123.0)	4.009	*
m-m CO ₂ an	0.0 (18.2)	-97.5 (32.5)	-261.1 (91.8)	-467.3 (153.2)	-467.3 (155.2)	0.112	**
m-m WC=20%	0.0 (18.2)	-15.9 (30.6)	-72.3 (80.9)	-35.6 (98.6)	-35.6 (101.2)	40.773	

Tabelle 5.25: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels (in 10 000 €/Saison !!!)** bei der Anwendung verschiedener **Strategien B-A** und unterschiedlicher Modellvariationen **beim Wein** (ohne Zusatz zur Strategie = Standard: ohne CO₂-Düngung, ohne Apfelwicklerschaden, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

Strategie	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
o-o	0.0 (48.2)	34.5 (97.3)	35.4 (113.1)	195.3 (96.5)	195.3 (106.4)	0.064	***
m-o	0.0 (48.2)	-27.3 (150.3)	-85.8 (172.6)	-75.7 (285.9)	-75.7 (293.3)	51.313	
g-g	0.0 (52.3)	14.3 (85.0)	-62.6 (165.9)	-7.5 (238.9)	-7.5 (247.8)	94.089	
g-g nur 3 Mod.	0.0 (70.4)	59.3 (100.6)	18.8 (233.1)	136.6 (60.3)	136.6 (90.7)	0.386	**
g-g CO ₂ an	0.0 (52.6)	-477.0 (77.8)	-1146.6 (182.3)	-1770.2 (308.7)	-1770.2 (315.0)	0.001	***
g-g WC=20%	0.0 (52.3)	14.3 (85.0)	-62.6 (165.9)	679.1 (222.2)	679.1 (227.3)	0.000	***
m-g	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	-54.7 (302.6)	-54.7 (310.8)	65.053	
m-g CO ₂ an	0.0 (52.6)	-501.6 (127.3)	-1156.3 (208.1)	-1853.0 (422.4)	-1853.0 (428.4)	0.028	***
m-g WC=20%	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	176.1 (253.1)	176.1 (261.5)	14.409	
m-g WC=10%	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	60.5 (297.9)	60.5 (306.3)	61.238	
m-g WC=7%	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	30.5 (304.1)	30.5 (312.3)	79.979	
m-g WC=5%	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	0.3 (291.5)	0.3 (300.0)	99.793	
m-g WC=4%	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	-24.1 (311.3)	-24.1 (319.3)	84.431	
m-g WC=3%	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	-38.9 (293.6)	-38.9 (302.0)	73.854	
m-m	0.0 (37.5)	14.3 (90.7)	-44.2 (132.5)	-34.1 (279.7)	-34.1 (284.3)	75.573	
m-m CO ₂ an	0.0 (37.6)	-481.1 (84.9)	-1135.8 (165.4)	-1832.5 (399.9)	-1832.5 (403.2)	0.023	***
m-m WC=20%	0.0 (37.5)	14.3 (90.7)	-44.2 (132.5)	196.7 (226.4)	196.7 (231.2)	8.044	

Genauere Angaben zu den flächenspezifischen Gesamtkosten *KK* für alle Obstarten (in €/ha/a), für verschiedene Strategien und unterschiedliche Impaktmodellvariationen findet man in Form von Tabellen im **Anhang K.2.2.1** und als Graphiken im **Anhang K.2.2.2**. Dort findet man auch Angaben zu den akkumulierten Kosten ab 2002 (in €/ha). Analoge Ergebnisse zu den Gesamtkosten (ohne und mit Akkumulation) für ganz Hessen *KKA* (in €/a bzw. €) findet man als Tabellen im **Anhang K.2.3.1** und als Graphiken im

Anhang K.2.3.2.

Die 30-jährigen Mittelwerte von KK sind nur für Obstbauern mit genügend Finanzreserven interessant. Obstbauern mit wenig finanziellen Reserven können bereits durch einige wenige Jahre mit großen Schäden bzw. mit hohen Kosten für Gegenmaßnahmen und hohen Restschäden ruiniert werden. Daher ist auch der jährliche Verlauf mit Angabe der möglichen Extremwerte von Interesse. Im **Anhang K.2.2.2.2** findet man Graphiken für diesen jährlichen Verlauf der Kosten KK , die in der Form den Abbildungen 5.66 ff. bei den Gesamtschäden ähneln. Diese Graphiken für den jährlichen Verlauf sind natürlich nicht als “auf das Jahr genaue Prognosen” aufzufassen, sondern zeigen nur 5 unabhängige, mögliche Realisierungen⁴⁴.

Abbildung K.38 im Anhang K.2.2.2.2 zeigt die mit den Werten der 5 RCM's berechneten jährlichen KK -Werte [gemäß Gleichung (4.197)⁴⁵] für den Standardfall bei der g-g-Strategie und den **frühreifen Apfel**. Hier treten vor und nach dem Jahr 2000 vereinzelte Jahre mit hohen Zusatzkosten auf. Das ist besonders bei Rechnungen mit den Klimadaten aus dem HCLM und den beiden WETTREG-Läufen der Fall. Bei der m-g-Strategie (**Abbildung K.39**) entfallen die hohen Kostenpeaks nach 2000, denn nun wird ab 2001 die m-Strategie verwendet, die auch Frostschäden bekämpft.

Betrachtet man alle 3 Impaktmodellvariationen (Standardfall, mit CO₂-Düngung und mit Worst Case 20 %) gleichzeitig, so ergeben sich bei Anwendung der g-g-Strategie die in **Abbildung K.40** dargestellten Kosten. Die Bedeutung des breiten, grau unterlegten Bereichs wurde bereits auf Seite 252 f. ausführlich beschrieben. Die schwarze Kurve entspricht der dicken schwarzen Kurve (“Mittelwert über die 5 Klimamodellläufe” im Standardfall) aus **Abbildung K.38**. Die rote Kurve ist der “Modellmittelwert” mit eingeschalteter CO₂-Düngung, und die blaue Kurve ergibt sich im Worst Case Szenario mit einer *NoReleaseProb* von 20 %. Bei Anwendung der m-g-Strategie (**Abbildung K.41**) verkleinert sich der positive Unsicherheitsbereich für KK erheblich.

Beim **spätreifen Apfel** (**Abbildungen K.42 bis K.45**) ergibt sich ein ähnliches Bild, nur ist nun der mögliche Kostenbereich in der Zukunft zu negativeren Werten hin verschoben (Gewinne!). Ohne Worst Case Szenario wären ab ca. 2080 sogar fast alle Maximalwerte der 5 Modelle im negativen Bereich.

Bei der **Sauerkirsche** (**Abbildungen K.46 bis K.49**) ist leider das Gegenteil der Fall: Der Unsicherheitsbereich verschiebt sich insgesamt zu höheren Kosten hin. Im Gegensatz zum Apfel verursacht die g-g-Strategie im Standardfall und bei CO₂-Düngung weniger Kosten als die m-g-Strategie (vgl. Tabelle K.29, K.33 usw.). Das liegt daran, dass wie bereits in Kapitel 5.7.2.1 festgestellt wurde, die m-Strategie gegenüber der g-Strategie nicht rentabel ist.

Beim **Wein** (**Abbildungen K.50 bis K.53**) sind die Verhältnisse wieder ähnlich wie beim spätreifen Apfel.

Die Abbildungen für die **m-m-Strategie** ähneln sehr stark denen der m-g-Strategie, nur sind die Kosten KK (in den Abbildungen fast unmerklich⁴⁶) etwas zu größeren Werten hin verschoben. Daher wurde auf die Darstellung dieser Graphiken verzichtet.

⁴⁴ 5, weil 5 *unabhängige* RCM's verwendet wurden.

⁴⁵ Der Mittelwert von 1971-2100 ist in jedem Modell null.

⁴⁶ Bei den RCM's, die im Zeitraum 1971-2000 bei der m-g-Strategie größere Schäden bzw. hohe Kostenpeaks aufwiesen, z. B. beim HCLM, ist der Kostenanstieg allerdings gut sichtbar. Im “Modellmittelwert” erkennt man aber nur geringe Unterschiede!

Interessant ist es auch, die aufsummierten Gesamtkosten $\sum_{2002}^j KK$ des Klimawandels (pro Hektar) zu vergleichen. Die Summation über KK erfolgt ab 2002 jeweils bis zu dem Jahr j , welches auf der Abszisse der im Folgenden diskutierten Abbildungen aufgetragen ist. Die dicke schwarze Kurve in den unten zu besprechenden Graphiken ist der Mittelwert über die mit allen 5 RCM's berechneten, akkumulierten Gesamtkosten als Funktion der Jahre, bis zu denen aufsummiert wurde. Die mit "30-jähriger Modellmittelwert"⁴⁷ bezeichneten, dicken schwarzen Kreise sind die Summen von jeweils 2002 bis 2031, 2060 und 2100, deren Fehlerbalken die 95 %-Konfidenzintervallen dieser akkumulierten Werte darstellen.

Abbildung K.54 zeigt die Ergebnisse für die g-g-Strategie und den **frühreifen Apfel** im Standardfall. Die Rechnungen mit RUBA und dem ECLM ergeben hohe akkumulierte positive Zusatzkosten bis zum Jahr 2100. Dagegen berechnet man mit dem HCLM und den beiden WETTREG-Läufen große Einsparungen. Die Synopsis führt dann leider auf einen 95 %-Unsicherheitsbereich im Jahr 2100, der von ca. -80 000 bis über +60 000 €/ha reicht.

Beim Einsatz der m-g-Strategie (**Abbildung K.55**) ist das Ergebnis nicht viel besser: Alle Kosten sind zwar etwas zu kleineren, negativen Werten hin verschoben. Der große Unsicherheitsbereich bleibt aber bestehen!

Stellt man wieder alle drei Impaktmodellvariationen (Standardfall, CO₂-Düngung und Worst Case 20 %) gleichzeitig dar, so erhält man **Abbildung K.56** für die g-g- und **Abbildung K.57** für die m-g-Strategie. Die durch die Unsicherheiten der Impaktmodelle (mit der Fragestellung: Welche Variation ist korrekt?) ins Spiel gebrachte Erweiterung des Unschärfebereichs ist zwei- bis dreimal größer als die Variationsbreite der 5 Modelle innerhalb einer festgehaltenen Variation (z. B. innerhalb der schwarzen Fehlerbalken).

Beim **spätreifen Apfel** sind die Kosten wieder zu kleineren Kostenwerten hin verschoben. Das 95%-Konfidenzintervall für die bis 2100 akkumulierten Kosten ist aber mit einer Gesamtbreite von 140 000 €/ha beim Standardfall und der g-g-Strategie (**Abbildungen K.58**) und von 220 000 €/ha bei der m-g-Strategie (**Abbildungen K.59**) noch breiter als beim frühreifen Apfel. Dieser Unsicherheitsbereich wird noch mehr als doppelt so groß, wenn man wieder alle drei Impaktmodellvariationen gleichzeitig betrachtet (**Abbildungen K.60 und K.61**).

Bei der **Sauerkirsche** (**Abbildungen K.62 bis K.65**) überwiegen, außer bei der CO₂-Düngung, die Zusatzkosten (positive Werte). Allerdings bewegen sich die Kosten wegen der geringen Sauerkirscherträge (Tabelle 4.26) auf einem insgesamt niedrigerem Niveau.

Beim **Wein** (**Abbildungen K.66 bis K.69**) sind die Verhältnisse ähnlich wie beim frühreifen Apfel, nur ergeben sich durch den CO₂-Effekt größere Gewinne, was auf den beim Wein größer gewählten Parameter β [Siehe Formel (4.171); bei Wein: $\beta = 0.9$, sonst $\beta = 0.5$] in der maximalen Netto Photosynthese-Rate $PHOTSR$ zurückzuführen ist.

Die Abbildungen für die **m-m-Strategie** ähneln wieder sehr stark denen der m-g-Strategie, nur sind die akkumulierten Kosten $\sum KK$ (in den Abbildungen fast unmerklich⁴⁸) etwas zu größeren Werten hin verschoben. Daher wurde auf die Darstellung dieser Graphiken verzichtet. Nur bei der Sauerkirsche und der Pflaume sind die akkumulier-

⁴⁷ Die Bezeichnung "30-jähriger" bezieht sich hier auf die Endjahre der zuvor in den Tabellen K.27 ff. benutzten 30-Jahresabschnitte. Die Werte sind aber keine Mittelwerte über 30 Jahre, sondern nur Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe!

⁴⁸ Bei den RCM's, die im Zeitraum 1971-2000 bei der m-g-Strategie größere Schäden bzw. hohe Kostenpeaks aufwiesen, z. B. beim HCLM, ist der Kostenanstieg allerdings gut sichtbar. Im "Modellmittelwert" erkennt man aber nur geringe Unterschiede!

ten Gesamtkosten der m-m-Strategie zum Ende des 21. Jahrhunderts hin um 5000 bis 17 000 €/ha kleiner. Das liegt daran, dass die m-Strategie gegenüber der g-Strategie im Zeitraum 1971-2000 bei der Sauerkirsche nicht rentabel ist (vgl. Tabelle K.23). Die Anwendung der m-Strategie (mit höheren Maßnahmekosten $\overline{K}_{ges,g}^m$) in diesem Zeitraum verringert daher die zukünftigen Zusatzkosten gegenüber der m-g-Strategie [Gleichung (4.198)], was sich bei den ab 2002 aufsummierten Kosten besonders bemerkbar macht.

Die von 2002 bis 2100 aufsummierten Gesamtzusatzkosten $\sum_{2002}^{2100} KK$ pro Hektar bei der m-g-Strategie im Standardfall, mit CO₂-Düngung und im Worst Case Szenario 20 % jeweils **für alle 10 Obstarten** sind in den **Abbildungen K.70 bis K.72** im Anhang K.2.2.2.3 visualisiert. Im Standardfall sind alle Kosten bis auf die beim spätreifen Apfel nicht signifikant. Mit CO₂-Düngung ergeben sich für alle Obstarten signifikante Einsparungen, und bei eingeschaltetem “Worst Case Szenario 20 %” ähneln die Verhältnisse dem Standardfall, nur sind nun alle Zusatzkosten etwas größer. Statistisch signifikante Zusatzkosten ungleich null ergeben sich im “Worst Case Szenario 20 %” nur bei der Sauerkirsche und bei der frühreifen Pflaume.

Schließlich findet man in den **Abbildungen K.73 bis K.75** die Gesamtzusatzkosten KKA für ganz Hessen und in den **Abbildungen K.76 bis K.78** die von 2002-2100 aufsummierten Gesamtzusatzkosten $\sum_{2002}^{2100} KKA$ für ganz Hessen bei der m-g-Strategie im Standardfall, mit CO₂-Düngung und im “Worst Case Szenario 20 %”. Hier trifft wieder das gerade zu KK Bemerkte zu, jedoch werden die einzelnen Obstarten nun gemäß ihrer Anbaufläche (Tabelle 4.26) gewichtet, so dass hier der Apfel (in 1000 €/a) und der Wein (in 10 000 €/a) besonders hervorstechen.

Tabellen, auch für andere Strategiekombinationen, findet man für KKA im **Anhang K.2.3.1.1** und für $\sum KKA$ in **Anhang K.2.3.1.2**.

Zusammenfassung: Bei den Gesamtkosten KK des Klimawandels zeigt bei der m-g-Strategie (ohne CO₂-Effekt und ohne Worst Case) nur der spätreife Apfel eine signifikante, negative Veränderung der Kosten (Abbildung K.27). Bei der g-g-Strategie hat der späte Apfel und die späte Birne negative KK 's, aber auch nur dann, wenn man über alle 5 Modelle mittelt (Abbildung K.23). Lässt man die *unsicheren* WETTREG-Läufe weg, so erhält man überhaupt keine signifikanten negativen Veränderungen der Kosten mehr, sondern nun zeigen die Sauerkirsche und der Wein signifikante positive Kostensteigerungen (Abbildung K.24).

Wenn man die CO₂-Düngung berücksichtigt, errechnet man für alle Arten hoch signifikante Kostenabnahmen, sowohl bei der g-g- (Abbildung K.25) als auch bei der m-g-Strategie (Abbildung K.28). Ohne CO₂-Düngung, aber mit dem maximalen “Worst Case Szenario 20 %” nehmen die Kosten bei der g-g-Strategie bei allen Obstarten hoch signifikant zu (Abbildung K.26), und bei der m-g-Strategie ist eine signifikante Zunahme nur noch bei der Pflaume und Kirsche zu verzeichnen (Abbildung K.29).

Die höchsten Zusatzkosten KKA (2071-2100 vs. 1971-2000) aller hier untersuchter Kombinationen für ganz Hessen liegen zwischen **7 000 000 €/Jahr** ($\pm 2 300 000$ €/Jahr) beim Wein im Worst Case Szenario 20 % bei der g-g-Strategie (Tabelle 5.25). Die größten Einsparungen gegenüber 1971-2000 erzielt man ebenfalls beim Wein bei der m-g-Strategie mit CO₂-Effekt. Die Einsparungen betragen in diesem Fall für die Hessische Bergstraße und den Rheingau ca. **19 000 000 €/Jahr** ($\pm 4 300 000$ €/Jahr) (Tabelle 5.25).

Summiert man die jährlichen Einsparungen KKA vom Jahr 2002 an bis zum Jahr 2100

auf, so ergeben sich beim Wein und der m-g-Strategie mit CO₂-Düngung Einsparungen im Wert von **1 200 000 000 €** ($\pm 250\,000\,000$ €) (Tabelle K.76). Bei der g-g-Strategie und im 20% Worst Case Szenario erleidet man hingegen bis zum Jahr 2100 aufsummierte Mehrkosten beim Wein von **190 000 000 €** ($\pm 170\,000\,000$ €) (Tabelle K.74).

Warum sind einige Aussagen über die *Rentabilität* signifikant, aber fast alle Ergebnisse für die *Gesamtkosten* im Standardfall nicht signifikant?

Der aufmerksame Leser wird sich fragen, wieso z. B. bei der Pflaume leicht-signifikante Aussagen über die Rentabilität (Nettogewinn) der Form “*Strategie g ist kostengünstiger als Strategie m*” (vgl. Abbildung 5.74) möglich sind, obwohl (ohne CO₂-Effekt und ohne Worst Case) weder für die g-g-Strategie (Abb. K.23) noch für die m-g-Strategie⁴⁹ (Abb. K.27) signifikante Aussagen für die Zusatzkosten KK^{B-A} möglich sind und man nicht prognostizieren kann, ob in Zukunft insgesamt höhere oder niedrigere Gesamtkosten anfallen. **Abbildung 5.82** erklärt, warum das so ist: In der Graphik sind zwei mögliche Realisierungen der Gesamtkosten $KK_{g;j}^{B-A}$ für jeweils B–A = g–g und B–A = m–g schematisch aufgetragen. Die m-Maßnahmen nach 2000 führen in beiden Fällen (in allen Jahren nach 2000) zu höheren Gesamtkosten. Das bedeutet, dass in beiden Fällen die g-Strategie die kostengünstigere ist. Der *Nettogewinn*^{B–A}(j) berechnet sich für jede Realisierung als Differenz zwischen der zugehörigen g- (g-g-Strategie) und m-Kurve (m-g-Strategie) [siehe Gleichung (4.206) ohne Multiplikation mit A und ohne Mittelung über die Gitterpunkte g]. Da die Werte der m-Kurve mit denen der g-Kurve jeweils stark positiv korreliert sind, ergibt sich eine relativ kleine Varianz für die Differenz der Mittelwerte beider Kurven (Werte) über einen 30-jährigen Zeitabschnitt, denn die “Varianz der Differenz zweier positiv korrelierter Größen”⁵⁰ kann wesentlich kleiner sein als die “Varianz der Differenz bei statistischer Unabhängigkeit dieser Größen”. Bei beiden Realisierungen errechnet man einen signifikant negativen Nettogewinn (in diesem rein schematischen Beispiel von ca. -100 €/ha/a). Die m-Strategie ist daher gegenüber der g-Strategie nicht rentabel. Vergleicht man aber die Mittelwerte von $KK_{g;j}^{m-g}$ (oder auch $KK_{g;j}^{g-g}$) über die Jahre 2071-2100 und über 1971-2000, so erhält man für die erste Realisierung einen Kostenzuwachs und für die zweite spürbare Einsparungen in der Zukunft. Wegen der statistischen Unabhängigkeit⁵¹ der beiden Mittelwerte (in jeweils disjunkten Zeiträumen) ist die Varianz dieser Mittelwerte nun viel größer als die des Nettogewinns, so dass man hier große Konfidenzintervalle berechnet und keine signifikanten Aussagen über die Richtung der Kostenentwicklung möglich sind.

⁴⁹ Außer beim spätreifen Apfel.

⁵⁰ Die zwei Größen sind hier s_{ges}^A und s_{ges}^B bzw. K_{ges}^A und K_{ges}^B .

⁵¹ Im Beispiel aber auch wegen des weiten Auseinanderdriftens der beiden Realisierungen.

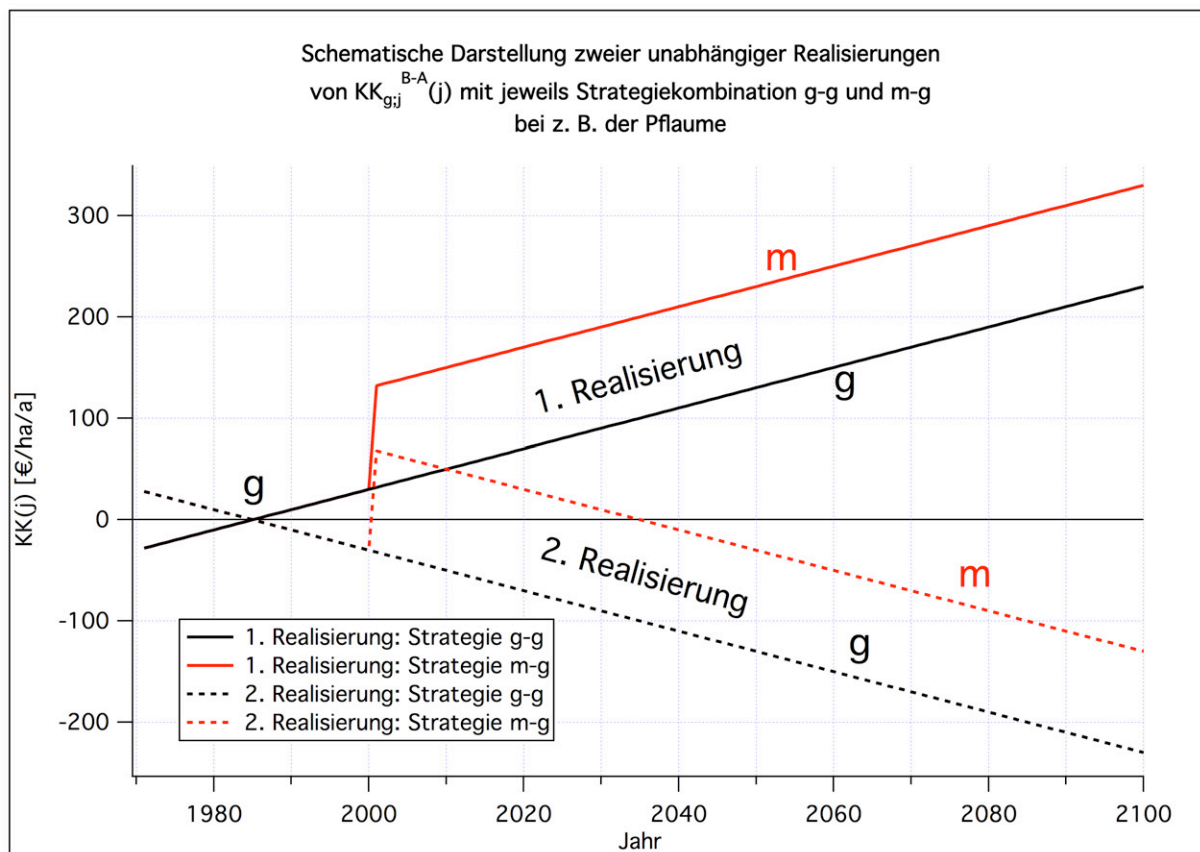


Abbildung 5.82: Schematische Darstellung zweier unabhängiger Realisierungen von $KK_{g;j}^{B-A}(j)$ mit jeweils Strategiekombination g-g und m-g bei z. B. der Pflaume.

6 Diskussion

Betrachtet man nur die klimatischen Veränderungen in den Obstbauregionen Hessens, so erhält man für viele Größen hoch signifikante Veränderungen in der Zukunft. So errechnet man z. B. in allen Monaten des Jahres einen signifikanten Anstieg der Lufttemperatur gegenüber heute (Tabellen B.1 ff. und Abbildung B.1 ff.), der Niederschlag nimmt im Winter signifikant zu und im Sommer signifikant ab (Tabelle B.20 und Abbildung B.7), und die Globalstrahlung nimmt (wegen der beiden WETTREG-Läufe) im September signifikant zu (Tabelle B.25 und Abbildung B.9). Auch die Schäden durch den Apfelwickler, die hier nur vom Temperaturverlauf abhängen, steigen signifikant an (Tabellen I.2 und I.3), wenn man keine intensiven Maßnahmen ergreift. Auch wenn man nur die phänologischen Phasen alleine betrachtet, so erhält man für den Blühbeginn (Abbildung C.2) und den Beginn der Pflückreife (Abbildung E.3) aller hier betrachteten Arten eine hoch signifikante Verfrühung. Die Reifeperiode verlängert sich beim Apfel und der Birne signifikant um einige Tage, und beim Wein verkürzt sie sich leicht um 3 Tage (Abbildung F.2).

Im Zusammenspiel von klimatischen Veränderungen und phänologischen Phasen, z. B. beim Frostschaden und Yieldschaden (mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung), liegen aber überhaupt keine¹ signifikanten Veränderungen mehr vor (Abbildung H.10 und blaue Balken in Abbildung J.6). Das liegt zum Teil daran, dass die Pflanzen auf das veränderte Klima reagieren und einen Teil der klimatischen Änderungen durch z. B. verfrühte Blühtermine kompensieren. Zum anderen werden aber auch die unterschiedlichen Verläufe der meteorologischen Größen in den verschiedenen RCM's durch die Impaktmodelle *verstärkt*², so dass sich die mit den Werten der 5 Klimamodellläufe berechneten Outputwerte der Impaktmodelle sehr stark unterscheiden und die Fehlerbalken stark anwachsen.

Das hat auch Folgen für die Gesamtschäden: Bei den sinnvollen Strategiekombinationen g-g und m-g sind die Veränderungen der Gesamtschäden nur bei den spätreifenden Arten leicht-signifikant negativ³, wenn man wieder die CO₂-Düngung und das Worst Case Szenario außer Acht lässt (Abbildung K.5 und K.9).

Bei den Gesamtkosten *KK* des Klimawandels gilt Ähnliches wie bei den Gesamtschäden, nur zeigt dort bei der m-g-Strategie (ohne CO₂-Effekt und ohne Worst Case) nur noch der spätreife Apfel eine signifikante, negative Veränderung der Kosten (Abbildung K.27). Bei der g-g-Strategie hat der späte Apfel und die späte Birne negative *KK*'s, aber auch nur dann, wenn man über alle 5 Modelle mittelt (Abbildung K.23). Lässt man die *unsicheren* WETTREG-Läufe weg, so erhält man überhaupt keine signifikanten negativen Veränderungen der Kosten mehr, sondern nun zeigen die Sauerkirsche und der Wein signifikante positive Kostensteigerungen (Abbildung K.24).

Die Mittelwerte dieser Kostenänderungen sind, auch wenn sie nicht signifikant sind, häufig trotzdem sehr groß [siehe z. B. die mittleren, aufsummierten Kosten *KKA* (die

¹ Auch die Veränderung beim spätreifen Apfel ist bei Berücksichtigung der Multiplizität nicht signifikant! Vgl. Seite 293!

² Vor allem deshalb, weil in den Impaktmodellen nicht nur die Mittelwerte der meteorologischen Größen, sondern deren Extremwerte, Andauer, Varianzen etc. eine große Rolle spielen.

³ Und außer beim "spätreifen Apfel bei der g-g-Strategie" auch nur dann, wenn man die Multiplizität nicht berücksichtigt.

Balken) in Abbildung K.2.3.2.2]. Ohne die Konfidenzintervalle hätte man beeindruckende Ergebnisse. Die extreme Breite der Konfidenzintervalle verhindert aber trotz der großen Mittelwerte eine eindeutige, klare Aussage über die Richtung der Veränderungen.

Ein ganz anderes Bild erhält man, wenn man die CO₂-Düngung anschaltet (bzw. annimmt, dass diese tatsächlich so eintritt wie angenommen): Jetzt errechnet man für alle Arten hoch signifikante Kostenabnahmen, sowohl bei der g-g- (Abbildung K.25) als auch bei der m-g-Strategie (Abbildung K.28). Ohne CO₂-Düngung, aber mit dem maximalen Worst Case Szenario 20 % nehmen die Kosten bei der g-g-Strategie bei allen Obstarten hoch signifikant zu (Abbildung K.26), und bei der m-g-Strategie ist eine signifikante Zunahme bei der Pflaume und Kirsche zu verzeichnen (Abbildung K.29).

Die Problematik lässt sich wie folgt zusammenfassen: Ohne den CO₂-Effekt, von dem man nicht genau weiß, ob er tatsächlich in der vorhergesagten Stärke eintritt oder ob nicht doch bei den Pflanzen im Freiland nach einigen Jahren ein Gewöhnungseffekt eintritt⁴, und ohne das vom Stand der heutigen Chillingmodelle als unwahrscheinlich anzusehende Worst Case Szenario, kann man fast überhaupt keine signifikanten Aussagen über die zukünftigen Veränderungen der Gesamtkosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen treffen.⁵

Warum das so ist, und ob es Möglichkeiten gibt, diese extrem großen Unsicherheiten zu verringern, oder ob es sogar noch andere Einflüsse gibt, welche die Bandbreite noch vergrößern können, soll im Folgenden noch kurz diskutiert werden.

Da leider sehr häufig die hier wesentlichen Begriffe *Signifikanz* bzw. *Nicht-Signifikanz* und *Konfidenzintervall* falsch verstanden und interpretiert werden, sollen sie vor der Diskussion dieser Unsicherheiten noch einmal kurz erläutert werden: Wenn Unterschiede zwischen zwei Größen (z. B. zwei Mittelwerte) als *statistisch nicht signifikant* bezeichnet werden, so bedeutet das, dass die beobachteten und alle noch extremeren Unterschiede mit einer relativ hohen Wahrscheinlichkeit rein zufällig zu Stande gekommen sein können, auch wenn in Wirklichkeit überhaupt kein Unterschied besteht. Der sogenannte p-Wert gibt diese Wahrscheinlichkeit an. Ist er größer als eine vorgegebene Schranke, z. B. 5 % (Fehler 1. Art) bei einer 95 %-igen Sicherheit, so ist der Unterschied nicht signifikant. *Nicht signifikant* heißt aber nicht, dass dann kein Unterschied besteht! Die natürlichen Schwankungen der Größe sind nur entweder zu groß oder die Anzahl der betrachteten unabhängigen Werte (Jahre) ist zu klein, um den Unterschied mit Hilfe der Statistik von rein zufälligen Ergebnisse zu unterscheiden.⁶ Ein *95 %-Konfidenzintervall* wird den gesuchten, wahren Erwartungswert bei unabhängiger Wiederholung des Experiments in 95 % der Fälle umschließen.⁷ Ist der Nullwert im Konfidenzintervall enthalten, so unterscheidet sich

⁴ Damit der CO₂-Düngeeffekt Wirkung zeigt, muss man natürlich eine ausreichende Nährstoffversorgung der Pflanzen voraussetzen. Wie in einer Studie innerhalb des Projekts “Carbo-Extreme” (Reichstein et al., 2013) festgestellt wurde, können aber extreme Wetterereignisse (Dürre, Hitzeperioden u. ä.) auch einen gegenläufigen Effekt hervorrufen und die CO₂-Aufnahme der Vegetation vorübergehend erheblich verringern.

⁵ Die Fehlerbalken in diesem Fall (ohne CO₂-Düngung und ohne Worst Case Szenario) müssten eigentlich sogar noch größer gewählt werden, da auch die in SIMWASER und bei den Kostenrechnungen benötigten Parameter für die verschiedenen Fruchtarten große Unsicherheiten aufweisen!

⁶ Umgekehrt bedeutet ein *signifikanter Unterschied* nicht unbedingt, dass dieser Unterschied für das betrachtete Problem bedeutsam ist. Wenn z. B. extrem viele Jahre vorliegen und die natürlichen Schwankungen gering sind, können kleinste Differenzen (z. B. 0.01 K) bereits signifikant sein. Eine Änderung der 30-jährigen Mitteltemperatur um 0.01 K wäre aber sicherlich nicht erwähnenswert.

⁷ Die Aussage, dass der wahre, gesuchte Erwartungswert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % in das

der Mittelwert (als Schätzwert für den Erwartungswert) nicht signifikant von null (siehe z. B. [Wilks, 2006](#), Kap. 5.1.7 oder [Storch & Zwiers, 2008](#), Kap. 5.4.1 und 6.2.5).

6.1 Unsicherheiten bei den phänologischen Modellen

Die in Kapitel 4.6.4 aufgedeckten, systematischen Unzulänglichkeiten der klassischen Forcing-Modelle und deren Behebung (Kapitel 4.6.5) sind nicht nur für die hier behandelten Schäden und Kosten von Relevanz.⁸ Phänologische Modelle werden, meist in sehr einfacher Form⁹, in terrestrischen Biosphären-Modellen eingesetzt, die wiederum Bestandteil von globalen Klimamodellen sind. Ein Vergleich von 14 terrestrischen Biosphären-Modellen ergab ([Richardson et al., 2012](#)), dass keines dieser Modelle in Hinblick auf den Blattflächenindex (Leaf Area Index = LAI) oder die Kohlenstoffflüsse korrekte Ergebnisse lieferte. Die meisten Modelle berechneten einen zu frühen *Saisonbeginn*¹⁰ und ein zu spätes *Saisonende*, was zu einer Überschätzung der jährlichen Brutto-Ökosystem-Photosynthese (gross ecosystem photosynthesis) über Laubwald (nach Rescaling bezüglich des saisonalen Maximalwerts der GEP) von $\approx 20\%$ führte. Entscheidender als die GEP¹¹ ist aber für die Klimamodelle, dass durch den zeitlichen Versatz der Vegetationsperiode auch die latenten und sensiblen Wärmeflüsse sowie die Strahlungsflüsse (falsche Albedo) fehlerhaft berechnet werden. Diese Fehler können dann, verstärkt durch die unzähligen im Klima vorhandenen Feedback-Mechanismen, sogar zu fehlerhaften Klimaprognosen führen ([Richardson et al., 2013](#))! Die Implementation von verbesserten phänologischen Modellen in die Klimamodelle würde daher sicherlich zu veränderten Ergebnissen der Klimamodelle führen, was dann natürlich auch veränderte Resultate der Impaktmodelle nach sich ziehen würde!

6.2 Unsicherheiten bei den Klimamodellen

Eigentlich sollte man annehmen, dass die Schäden und die Rentabilität (bzw. der Nettogewinn), die man mit den Klimadaten der 5 verschiedenen Klimamodelle berechnet, wegen der durchgeführten BIAS-Korrektur wenigstens im Zeitraum 1971-2000 ähnlich sein sollten.¹² Leider das ist nicht einmal der Fall. Dass sich ein so uneinheitliches Bild ergibt, liegt

Konfidenzintervalls fällt, ist hingegen falsch. Der Erwartungswert ist nämlich in der klassischen Statistik (außer bei der Bayes'schen Betrachtungsweise in gewisser Weise) keine Zufallsvariable, sondern ein konstanter Wert. Die Grenzen des Konfidenzintervalls sind hingegen aber Zufallsvariablen.

⁸ Besonders für die Berechnung der Frost- und Yieldschäden in der Zukunft sind korrekte phänologische Modelle wichtig. Ohne diese Korrektur hätte man zu große Frostschäden und eine zu starke Verkürzung der Reifephase berechnet.

⁹ Z. B. erfolgt die Blattentfaltung (ab welcher der LAI zunimmt) oder die Seneszenz (Abnahme des LAI) zu einem fest vorgeschriebenen Datum, oder es wird ein einfacher Temperaturschwellenwert oder ein "Temperatursummenmodell der Form von Gleichung (4.35)" zur Bestimmung dieser und ähnlicher phänologischer Phasen verwendet, jedoch "ohne Parameteroptimierung mit Hilfe von phänologischen Beobachtungswerten".

¹⁰ Das entspricht genau den in Kapitel 4.6.4 aufgedeckten Defiziten der klassischen Phänomodelle.

¹¹ Weil nur die wenigsten Klimamodelle bzw. deren Land Surface Schemes einen Jahresgang von CO₂ bzw. der Photosynthese-Rate simulieren. Zu den in dieser Arbeit benutzten Land Surface Schemes der Klimamodelle siehe Kapitel 4.1.4.

¹² Der Mittelwert von *KK* im Zeitraum 1971-2000 ist per Definition null [siehe Text nach Gleichung (4.198)].

daran, dass sich die Schäden und Kosten auf nicht lineare Weise aus den Klimagrößen errechnen. Daher bewirken übereinstimmende 30-jährige Klimamittelwerte nicht, dass auch die Schäden und Kosten übereinstimmen. Diese hängen nämlich tatsächlich sehr sensibel vom täglichen oder gar stündlichen Verlauf ab.¹³ Für die Amplitude dieser *Verläufe* sind aber nicht nur die Momente erster Ordnung (Mittelwerte) entscheidend, sondern auch die höherer Ordnung (Varianzen, Schiefen etc.) und auch das Zusammenspiel der unterschiedlichen Größen untereinander (Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit usw.; siehe z. B. die Frostschadensberechnungen in Abschnitt 4.8.3) und deren Autokovarianzen. Diese zusätzlichen Anforderungen an die Inputdaten der Impaktmodelle sind aber leider vor allem beim Modell WETTREG (Kapitel 4.1.5.1) nur sehr unzureichend erfüllt, so dass sich die stark widersprüchlichen Ergebnisse ergeben. Hinzu kommen noch die unrealistischen Prognosen für die Globalstrahlung in den WETTREG-Läufen.

Ferner muss man bei der Interpretation der Ergebnisse beachten, dass in allen Projekten, die im Rahmen von INKLIM-A durchgeführt wurden, nur ein einziges vieler möglicher SRES-Emissionsszenarien betrachtet wurde. Wenn sich die Treibhausgas- und Aerosol-Emissionen sowie die zukünftigen Landnutzungsänderungen aber anders entwickeln sollten, als es das hier verwendete Szenario A1B¹⁴ vorgibt, können die hier vorgestellten Ergebnisse stark von denen, die sich mit den wahren Randbedingungen ergeben würden, abweichen. Die Unsicherheit in den hier dargestellten Ergebnissen wird dadurch noch einmal vergrößert.

6.3 Unsicherheiten bei den Impaktmodellen

Wie am Anfang des letzten Abschnitts beschrieben wurde, werden die Unterschiede der RCM-Ergebnisse durch die Impaktmodelle häufig drastisch verstärkt, da die Klimamodelle die für Impaktmodelle wichtigen täglichen Minimal- und Maximalwerte, weitere Extremwerte, Varianzen, Autokorrelationen usw. zum Teil noch sehr unsicher modellieren. Wie auch schon erwähnt wurde, besteht für die Modelle, welche die Dormanzbrechung und den CO₂-Effekt beschreiben, noch großer Forschungsbedarf (siehe auch Kapitel 7).

Viele pflanzenspezifische Parameter sind auch noch nicht ausreichend genau bestimmt. Da viele dieser Parameter aber nicht nur von der Pflanzenart und -sorte, sondern sogar vom *einzelnen Individuum* abhängen, müsste man genau genommen eine statistische Verteilung für jeden einzelnen Parameter annehmen¹⁵ und die Impaktmodelle über die gesamten Verteilungen integrieren. Man erhielte dann für die gesuchten Outputparameter ebenfalls eine statistische Verteilung, für die man dann Mittelwerte, Quantile u. ä. berechnen könnte.

Die Fehlerbandbreite der Impaktmodelle und der für die Kostenrechnungen benötigten

¹³ Der Frostschaden hängt beispielsweise sehr sensibel von der Minimumtemperatur der Luft ab.

¹⁴ Die **A1**-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, und rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien. Das **B** in A1B bezeichnet die Untergruppe, welche eine bestimmte Ausrichtung bezüglich technologischer Änderungen im Energiesektor beschreibt: (**balanced**) ausgewogene Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen. Im Gegensatz zum A1B-Szenario, welches eine mittlere globale Erwärmung [2090-2099 vs. 1980-1999] von 2.8 K [5 % . . . 95 %-Bandbreite (=90 %-Konfidenzintervall): 1.7 . . . 4.4 K] erwarten lässt, sind z. B. im A1FI (FI=fossil-intensive Nutzung) 4.0 K [Bandbreite: 2.4 . . . 6.4 K] möglich. Siehe IPCC, 2007, Seite 14 und 18.

¹⁵ Unter Berücksichtigung der Kovarianzen usw.

Obstpreise, Obstanbauflächen, Maßnahmekosten usw. (vgl. Kapitel 4.12.2) müssten im Prinzip in den “in dieser Arbeit berechneten Fehlerbalken” noch zusätzlich berücksichtigt werden.¹⁶ Hierdurch würden diese Fehlerbereiche noch weiter verbreitert. Da leider keine Schätzwerte für die Fehler der Impaktmodelle und Kosten-Parameter vorliegen, konnten diese Unsicherheiten aber *nicht* hinzugerechnet werden.

Um die Unsicherheiten der einzelnen Impaktmodelle genauer zu bestimmen, könnte man auch, ähnlich wie bei den Klimamodellen, Ensembles von verschiedenen Impaktmodellen für eine bestimmte, gesuchte Größe (z. B. Spätfrostschaden oder Yieldschaden) rechnen und danach den möglichen Fehler, ähnlich wie im Kapitel 4.4 beschrieben, bestimmen.

In Zukunft werden in einem wärmeren Klima Schädlinge und Pflanzenkrankheiten eine größere Rolle als heutzutage spielen. Für die dadurch verursachten Schäden, und auch für die Schäden durch wahrscheinlich zunehmende Extremwetterereignisse, müssen neue Modelle entwickelt oder bereits bestehende verbessert werden. Deren Ergebnisse müssen dann zusätzlich zu den hier berücksichtigten Schäden in die Ergebnisse einfließen.

6.4 Konsequenzen

Die breiten 95 %-Konfidenzintervalle und auch die großen grauen Bereiche in den Abbildungen, welche den Standardfall, die CO₂-Düngung und das Worst Case Szenario zusammenfassend darstellen (z. B. Abbildung K.38 ff. oder Abbildung K.40 ff.) führen zwar dazu, dass keine eindeutige, verlässliche Prognose über die Entwicklung der Kosten bzw. Schäden möglich ist. Diese Bereiche verdeutlichen aber, welche Extremfälle unter Umständen auftreten können. Aussagen der Form “es wird nicht teurer werden als...” sind für Entscheidungsträger vermutlich auch interessant. Daher sind Ergebnisse, die Aussagen über Veränderungen machen und die nicht signifikant von null verschieden sind, nicht ganz wertlos. Genauere Aussagen sind nach dem heutigen Stand des Wissens mit den derzeitigen Modellversionen leider nicht möglich. Sicherlich lässt sich die Spannweite der möglichen Ergebnisse durch realistischere Modelle (z. B. ohne die sehr unwahrscheinliche Zunahme der Globalstrahlung in WETTREG; siehe z. B. Abbildung 4.5) und weitere Forschungsergebnisse zur Dormanz und zum CO₂-Effekt noch etwas verkleinern. Allerdings setzen die großen natürlichen Variationen der meteorologischen Größen, die dazu führen, dass sogar 30-jährige Mittelwerte eines einzelnen Modells noch relativ große Unsicherheiten aufweisen¹⁷, eine obere Schranke für die zu erzielende Genauigkeit der Vorhersagen. Weiterhin wird in letzter Zeit wieder vermehrt darüber diskutiert, ob bei den sehr vielen Freiheitsgraden und Rückkopplungsmechanismen, die bei der Entwicklung des Klimas eine Rolle spielen, überhaupt verlässliche Klimaprognosen möglich sind. [Zum Beispiel wird das Auftauen von Permafrostböden sicherlich das Freisetzen von zusätzlichem Kohlendioxid und Methan verursachen.¹⁸ Das damit einhergehende Pflanzenwachstum wird allerdings zu einer erhöhten Aufnahme von Kohlendioxid führen. Oder: Eine vermehrte Gewittertätigkeit wird zu mehr Ozon in der oberen Troposphäre führen, was den Treibhauseffekt

¹⁶ Bisher wurden nur die Unsicherheiten bei der CO₂-Düngung und beim Worst Case Szenario durch Ein- und Ausschalten dieser *Effekte* rudimentär berücksichtigt.

¹⁷ Inzwischen wurden auch *Low Frequency Oscillations* (LFO) in der Atmosphäre nachgewiesen, die ohne externe Anregung und ohne Wechselwirkung mit anderen Sphären des Klimasystems Schwankungen in klimatologischer Zeitskala (bis zu 40 Jahren) erzeugen können (Lange, 2010, S. 466).

¹⁸ Lange (2010)

verstärken wird¹⁹. Oder: Hitzeperioden und vor allem Dürreperioden vermindern die CO₂-Aufnahme der Vegetation im globalen Maßstab erheblich, so dass eine Zunahme dieser Extremereignisse zu einer zusätzlichen Erhöhung der CO₂-Konzentration führt und somit den Treibhauseffekt weiter verstärkt²⁰. Auch die Rolle der Ozeane (Absorption von CO₂ und Wärme) ist noch nicht zufriedenstellend geklärt²¹. Oder: Von insgesamt 117 Klimamodellläufen (mit 37 verschiedenen Klimamodellen aus dem CMIP5-Projekt) überschätzten 114 den Anstieg der global gemittelten Oberflächentemperatur erheblich (z. B. ist der über die Modellläufe gemittelte Trend (1998-2012) $((0.21 \pm 0.03) \text{ K pro Dekade})$ mehr als viermal größer als der beobachtete Trend $((0.05 \pm 0.08) \text{ K pro Dekade})$ ²²) usw. Viele weitere Beispiele und eine grundlegende Diskussion zu diesem Thema findet man in [Lange \(2010\)](#), insbesondere in seinen Kapiteln 8.3(h) und 8.3(i).]

Die eben erwähnten 95 %-Konfidenzintervalle beziehen sich, wie bei Formel (4.31) auf Seite 50 ausgeführt wurde, nur auf die *Erwartungswerte* der betrachteten Größe (\approx Mittelwert über sehr viele Realisierungen). Der Zufallsbereich einer einzelnen Klimarealisierung, so wie wir ihn erleben werden²³, ist ungefähr noch einmal doppelt so breit wie die in den Abbildungen und Tabellen angegebenen Unsicherheitsbereiche für die “Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe”!

Zusammenfassend kann man zwar sagen, dass durch den CO₂-Effekt eine Chance besteht, dass der Klimawandel zu einer zukünftigen Reduzierung der Kosten bzw. zu einem Nettogewinn führen wird. Bezieht man aber die Unsicherheiten durch Vernachlässigung vieler (den zukünftigen Gewinn reduzierenden) Krankheiten und Schädlinge²⁴, von Extremwetterschäden u. ä. mit ein, und berücksichtigt außerdem, dass neben dem hier verwendeten A1B-Emissionsszenario auch noch viele andere Szenarien denkbar sind²⁵, so kann man keine verbindliche Aussage über zukünftige Zusatzkosten im Obstbau treffen. Allerdings kann man wahrscheinlich, wenigstens beim Apfel, Kosten einsparen, wenn man bei der Schadensbekämpfung von der gemäßigten g-Strategie (nur extensive Apfelwicklerbekämpfung und Sommerberegnung) auf die maximale m-Strategie (zusätzliche Frostberegnung und intensive Apfelwicklerbekämpfung sowie ggf. Maßnahmen zur Dormanzbrechung²⁶) umstellt (Abbildung 5.74). Bei der Pflaume und Sauerkirsche sollte man hingegen auf die teurere m-Strategie verzichten und weiterhin die g-Strategie anwenden. Man beachte, dass diese Aussagen nur für das hier betrachtete Szenario A1B und bis zum Jahr 2100 gültig sind. Stärkere klimatische Veränderungen in einem extremeren Szenario oder

¹⁹ http://www.dlr.de/dlr/presse/desktopdefault.aspx/tabid-10172/213_read-3700/year-all/#gallery/6106

²⁰ [Reichstein et al., 2013](#)

²¹ Siehe [Kosaka & Xie \(2013\)](#) und <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/pause-beim-klimawandel-kuehler-pazifik-bremst-globale-erwaermung-a-919066.html>

²² Siehe [Fyfe et al. \(2013\)](#)

²³ Beim Wetter und Klima wird im Gegensatz zu anderen statistischen Problemen (z. B. Gewicht der Menschen einer bestimmten Bevölkerungsgruppe) in der Realität immer nur eine einzige Möglichkeit realisiert. Weiterhin fehlt in der atmosphärischen Physik die Möglichkeit zu systematischen Experimenten mit variierbaren Anfangs- und Randbedingungen, so dass Hypothesen zum Klima im Popper’schen Sinne nicht falsifizierbar sind und daher diese Theorien von “zugespitzten” Vertretern der Popper’schen Richtung eher in den Bereich der Philosophie verlegt werden würden als sie im Bereich der Naturwissenschaften zu belassen. (siehe [Lange, 2012](#))

²⁴ Von denen manche vielleicht heutzutage noch gar nicht bekannt sind.

²⁵ Vgl. Abschnitt 6.2.

²⁶ Die aber wahrscheinlich nicht nötig sein werden.

auch nach dem Jahr 2100 können durchaus signifikante Auswirkungen auf den Obstbau haben. Sogar im Szenario A1B und bis zum Jahr 2100 ist der Klimawandel im Obstbau sicherlich spürbar, nur kann auf Grund der großen Differenzen zwischen den Klimamodellläufen keine sichere Aussage getroffen werden, wie stark und in welche Richtung diese Veränderungen verlaufen.

Aus dem oben Gesagten kann man eigentlich nur das folgende Fazit ziehen (Chmielewski & Blümel, 2013):

Sowohl in der methodischen Herangehensweise, als auch in der Entwicklung verlässlicher Impaktmodelle ist noch viel Arbeit zu leisten. Die hier vorgestellten Methoden und Ansätze sind ein erster Versuch, sich dieser durchaus schwierigen Problematik zu nähern. Gegenwärtig liegt der größte Wert solcher Studien vor allem in der Entwicklung von geeigneten Methoden zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels im Obstbau. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle sind bereits eine gute Grundlage für solche Testrechnungen. Jedoch sind in den RCM's nicht alle Größen in gleicher Weise zuverlässig, was dazu führt, dass die Ergebnisse der Impaktmodelle stark davon abhängen, welches RCM als Lieferant für die erforderlichen Eingangsgrößen gewählt wurde. Somit haben derzeit noch methodische Aspekte wie die Entwicklung und Validierung von Impaktmodellen den Vorrang gegenüber einer dezidierten Berechnung von Ertragsschäden auf der Grundlage von Klimaszenarien."

7 Offene Fragen und Ausblick

In den Ergebniskapiteln wurde deutlich, dass die Schäden und Kosten des Klimawandels im Obstbau insbesondere von der korrekten Modellierung der **Dormanzbrechung** und des **CO₂-Düngeeffekts** abhängen. Leider besteht gerade in Hinblick auf diese Punkte noch erheblicher Forschungsbedarf. Weiterhin kann der Blühbeginn in der Zukunft in einem wärmeren Klima stark vom Chillinganteil der Chilling-Forcing-Modelle abhängen. Über die Form des optimalen Modellansatzes (sequentiell, parallel etc.) besteht aber noch kein Konsens, und sogar dann, wenn das korrekte Modell bekannt wäre, lassen sich die Parameter nicht oder nur unzureichend anhand von phänologischen und meteorologischen Daten in mittleren Breiten optimieren. Hierzu müsste man Pflanzen aus südlicheren, wärmeren Ländern heranziehen, bei denen schon heutzutage der Chilling-Term eine Rolle spielt. Bei diesen *südländischen* Pflanzen ist aber häufig unklar, ob sie sich so verhalten wie die in Hessen wachsenden. Man müsste daher genetisch ähnliche Pflanzen aus z. B. phänologischen Gärten (<http://gpm.hu-berlin.de> oder <http://ipg.hu-berlin.de>) zu diesen Modelloptimierungen heranziehen.

Die folgende Liste fasst die eben genannten sowie noch einige weitere Punkte, für die Forschungsbedarf besteht, zusammen:

- CO₂-Düngung und Stärke des Gewöhnungseffekts. (Kap. 4.10.7)
- Wahl des Stichtags t_s [vgl. Formel (4.102)] bei der Berechnung der Chillingsumme und Berechnung des Dormanzschadens bzw. Brechung der Dormanz. (Kap. 4.7)
- Korrekte Modellierung und Parameterbestimmung für den Chillinganteil der Chilling-Forcing-Modelle. (Kap. 4.6.1.2)
- Entwicklung verlässlicherer Modelle für den Beginn der Pflückreife. (Kap. 4.6.3)
- Verminderung der Unsicherheiten durch Abweichungen zwischen den Klimamodellen (Kap. 4.3.1) oder/und offensichtliche Fehler in den Klimamodellen (Kap. 4.1.5.1).
- Bestimmung der Unsicherheiten der Impaktmodelle und Verminderung dieser Unsicherheiten durch Verbesserung der Modelle. [Diese Unsicherheiten wurden bisher nur in Hinblick auf den CO₂-Effekt und die Dormanzbrechung (im Worst Case Szenario) betrachtet. Man sollte aber auch die Bandbreite, die innerhalb der Impaktmodelle bezüglich der anderen Größen möglich ist, berücksichtigen¹.]
- Berücksichtigung der Hangneigung und Exposition (u. ä.) beim Wein.
- Bestimmung der Pflanzenparameter (siehe z. B. Abschnitt 4.10.4 und Tabelle 4.17) und deren Abhängigkeit vom Klima (wie z. B. in der *Global Change Experimental Facility* in Bad Lauchstädt bei Halle; <http://www.ufz.de/exploratories/index.php?en=21240>)

¹ Z. B. durch Ensembles von verschiedenen Impaktmodellen.

- Forschungen zur Mikroevolution: Womöglich können sich einige Arten rasch an die neuen Herausforderungen anpassen.
- Berücksichtigung weiterer Schädlinge und Krankheiten. Hier wurde nur beim Apfel der Apfelwickler berücksichtigt (Kap. 4.9).
- Berücksichtigung von Extremereignissen (Hagel, Sturm, Überschwemmungen etc.). (Kap. 4.11.4)

Wenn ausreichend genaue Antworten bzw. Forschungsergebnisse für möglichst viele dieser Punkte vorliegen, und zusätzlich auch viele der noch in den Klimamodellen vorhandenen Unzulänglichkeiten beseitigt sind, können vielleicht konkretere und signifikante Aussagen zu den zukünftigen Kosten des Klimawandels im Obstbau gemacht werden. Wegen der großen natürlichen Variabilität des Klimas, der mannigfachen Variationsbreite der verschiedenen biologischen Arten und Sorten und der Ungewissheit, welches SRES-Szenario am besten die zukünftigen Treibhausgas- und Aerosol-Emissionen sowie die Landnutzungsänderungen beschreibt, werden die Fehlerbandbreiten aber sicherlich immer relativ groß bleiben.

8 Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan

Die späte Bereitstellung der Mess- und Modelldaten des DWD sowie die vom Projektverbund beschlossene und an der HU-Berlin durchgeführte BIAS-Korrektur dieser Daten (Kapitel 4.3) sowie die Regionalisierung der WETTREG2010-Daten (Kapitel 4.2.5) führte dazu, dass erst Anfang 2011 alle benötigten Modelldatensätze zur Verfügung standen. Erst danach konnten diese uneingeschränkt für die Impaktmodelle verwendet werden. Daher musste aus Zeitgründen auf die geplanten Untersuchungen zu weiteren, über den Apfelwickler hinausgehenden Schädlingen und Pflanzenkrankheiten sowie die Modellverfeinerungen für den Wein (Hangneigung etc.) verzichtet werden.

Anhang

A Modellübersicht

Tabelle A.1: Modellansätze zur Modellierung der phänologischen Phasen, die im Rahmen von INKLIM-A verwendet wurden.

Modell	Optimierte Parameter	Gleichung	Bemerkung
Reine Chilling-Modelle			
Modell 1b	C^*	(4.40) und (4.36), (4.37)	<i>Weinberger-Eggert Model</i> $t_0 = 1.$ September $t_1 =$ Ende der Dormanz
Modell 1f	C^*	(4.41) und (4.36), (4.37)	<i>Positive Utah Model</i> $t_0 = 1.$ September $t_1 =$ Ende der Dormanz
Modell 1g	C^*	(4.42) ... (4.44) und (4.36), (4.37)	<i>Dynamic Model</i> $t_0 = 1.$ September $t_1 =$ Ende der Dormanz
Reine Forcing-Modelle			
Modell 10a	F^*, T_{BF}	(4.45), (4.46), Kap. 4.6.2	$t_1 =$ Blühbeginn vorgegeben $t_2 =$ Blühende gesucht
Modell 11a	$F^*, T_{BF}, [EXPO]$	(4.45), (4.93)	<i>Spring-Warming Model</i> $t_1 =$ fest vorgegeben (z. B. 1. Jan.) $t_2 =$ Blühbeginn gesucht
Modell 12a	$t_1, F^*, T_{BF}, [EXPO]$	(4.45), (4.93)	t_1 wird mit optimiert $t_2 =$ Blühbeginn gesucht
Modell 10a-R	$F^*, T_{BF}, EXPO\beta$	(4.48), Kap. 4.6.3	$t_2 =$ Blühbeginn vorgegeben $t_3 =$ Beginn der Pflückreife gesucht
Modell 12a-R	$t_1, F^*, T_{BF}, EXPO\beta$	(4.49), Kap. 4.6.3	t_1 wird mit optimiert $t_3 =$ Beginn der Pflückreife gesucht
Apfelwicklermodell	$GTSUM\delta_{krit}^a$	(4.123), (4.124), Kap. 4.9	$t_1 = 1.$ Januar; $t_2 = 1.$ August; $GTSUM\delta$ gesucht
Chilling-Forcing-Modelle			
Modell 29ba	$C^*, F^*, T_{BF}, [EXPO]$	Gleichungen von Modell 1b und Modell 11a	$t_0 = 1.$ September $t_2 =$ Blühbeginn gesucht
Modell 29fa	$C^*, F^*, T_{BF}, [EXPO]$	Gleichungen von Modell 1f und Modell 11a	$t_0 = 1.$ September $t_2 =$ Blühbeginn gesucht
Modell 29ga	$C^*, F^*, T_{BF}, [EXPO]$	Gleichungen von Modell 1g und Modell 11a	$t_0 = 1.$ September $t_2 =$ Blühbeginn gesucht

^a Gemeint sind hiermit die kritischen Schwellenwerte aus der 1. Spalte der Tabelle 4.18.

B Mögliche klimatische Veränderungen in Hessen

Im Folgenden (**Tabelle B.1** bis **B.30**) werden mögliche klimatische Veränderungen in Hessen gelistet. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte über die Ergebnisse von je 5 Klimamodellen (RUBA, ECLM, HCLM, WETTR0 und WETTR1; vgl. Abschnitt 4.1.4 und 4.1.5) über die 19 Obstanbaugitterpunkte (vgl. Abschnitt 4.5). Gezeigt werden Mittelwerte über die Jahre 1971-2000, 2002-2031¹, 2031-2060 und 2071-2100 sowie die Differenzen der Mittelwerte der Zeiträume 2071-2100 und 1971-2000.

Die Werte in Klammern sind einseitige 95 %-Konfidenzintervalle in derselben Einheit wie die Mittelwerte. Zur Interpretation dieser Werte beachte man das am Ende von Kapitel 4.4.1 auf Seite 49 Gesagte! Die p-Werte (in %) beziehen sich auf den t-Test² mit H_0 : "Differenz gleich null" und H_1 : "Differenz ungleich null". Die Differenzen, p-Werte und Signifikanzen beziehen sich immer auf die Differenz '(2071-2100)-(1971-2000)'. Differenzen zwischen den in den Tabellen grau unterlegten Zeitabschnitten 2002-2031 bzw. 2031-2060 und 1971-2000 wurden zwar berechnet, werden hier aber nicht dargestellt, da diese meistens weniger oder nicht signifikant sind und ihre Darstellung diesen Bericht noch umfangreicher gemacht hätte.

In den Tabellen, in denen Jahresmittelwerte gelistet sind, werden zusätzlich zum Mittelwert über die 5 Klimamodelle (*M-Mittel*) noch die Mittelwerte der 5 Einzelmodelle und der DWD-Beobachtungen dargestellt. Bei RUBA, ECLM und HCLM wurden BIAS-korrigierte Werte verwendet. Beim Gesamtniederschlag PRECIPTOT wurden bei WETTR-REG 'Daten mit Niederschlagskorrektur' verwendet (vgl. Fußnote zu Tabelle 4.7).

In manchen Tabellen ist die Genauigkeit der Angabe für die Mittelwerte bzw. Differenzen verglichen mit der Größe der Konfidenzintervalle zu hoch (unangemessen viele Nachkommastellen) (z. B. bei **Tabelle B.19**). Dies liegt daran, dass die Tabellen per Computerprogramm erstellt wurden und nicht manuell nachbearbeitet wurden, um Tippfehler zu vermeiden.

Man beachte, dass bei den Angaben zur Signifikanz (*, **, ***) das Problem der *Multiplicität* nicht berücksichtigt wurde. Eigentlich hätte man z. B. beim Test der monatlichen Differenzen (12 parallel ausgeführte Tests) das Signifikanzniveau erhöhen bzw. den α -Fehler verringern müssen (*einfache Bonferroni Methode*: $\alpha \rightarrow \alpha/12$) oder sequentielle Test, z. B. *Holm's Sequentially-Rejective Bonferroni Method*, anwenden müssen. Eine gute Übersicht über diese Problematik gibt [Shaffer \(1995\)](#). Voraussetzung für diese Tests ist, dass die verschiedenen Testgrößen weitestgehend unabhängig voneinander sind.

Würde man z. B. den Holm's-Test³ auf **Tabelle B.16** anwenden, so wäre nur die Dif-

¹ Die Nutzung des Zeitabschnitts 2001-2030 würde die Berechnungen erheblich erschweren, da dann z. B. für die Berechnung des Blühbeginns (Anhang C) im Jahr 2001 Temperaturen des Jahres 2000 benötigt würden. Diese sind aber im Szenario C20 enthalten. Für 2002-2031 können alle benötigten Daten dem Szenario A1B entnommen werden.

² Siehe hierzu die Bemerkungen zum Konfidenzbereich von δ am Ende des Kapitels 4.4.1 nach Gleichung (4.28).

³ Bei diesem Test werden die aufsteigend geordneten p-Werte $p(j)$ ($j = 1 \dots n = 12$) mit $\alpha/(n - j + 1)$ verglichen. Gilt $p(j) \leq \alpha/(n - j + 1)$, so wird die zugehörige Nullhypothese verworfen. Anderfalls werden alle zu $p(k)$, $k \geq j$ gehörigen Nullhypothesen akzeptiert.

ferenz im September auf dem 95 %-Niveau signifikant von null verschieden. Denn der p-Wert im September ist mit 0.244 % kleiner als $5 \%/ (12-1+1)$. Der nächst größere p-Wert (0.590 % im August) ist aber bereits größer als $5 \%/ (12-2+1) = 0.455 \%$, so dass für diese und alle anderen Differenzen (außer für die Septemberrdifferenz) die “H0: Die Differenz ist null” nicht verworfen werden kann.

Berücksichtigt man die *Multiplizität* nicht, so hat die Wahrscheinlichkeit in einer Tabelle (der Form von **Tabelle B.16**) mit 12 (unabhängigen) monatlichen Differenzen einen *Fehler 1. Art* zu machen (d. h., dass mindestens ein oder mehrere ‘*’ für Signifikanz angegeben werden, obwohl alle Erwartungswerte der monatlichen Differenzen exakt null sind und überhaupt keine signifikanten Differenzen zwischen den Erwartungswerten bestehen) den Wert $1 - (1 - \alpha)^M = 45.9 \%$, wenn man für den einfachen α -Fehler $0.05 = 5 \%$ und für die Anzahl M der gleichzeitigen Tests 12 (12 Monate) wählt. Das bedeutet, dass man im Durchschnitt in jeder zweiten Tabelle rein zufällig mindestens eine signifikante Differenz erhalte, obwohl in Wirklichkeit überhaupt keine Unterschiede in den Grundgesamtheiten bestehen.

Anschließend an die Darstellung der Tabellen werden die Differenzen [(2071-2100) - (1971-2000)] der monatlichen Mittelwerte, die gleichzeitig “über alle 5 Modelle” gemittelt wurden, noch in den **Abbildungen B.1 bis B.10** ab Seite 304 graphisch dargestellt.

Tabelle B.1: Statistik für die **Tagesmitteltemperatur T (Monatsmittelwerte in °C)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5 \%$; **: $p < 1 \%$; ***: $p < 0.1 \%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Jan	0.9 (0.3)	1.6 (0.5)	3.1 (0.7)	5.0 (0.5)	4.1 (0.6)	0.000	***
Feb	1.7 (0.3)	2.7 (0.4)	3.9 (0.5)	5.5 (1.0)	3.8 (1.0)	0.010	***
Mär	5.2 (0.3)	5.3 (0.4)	6.7 (0.5)	7.7 (0.7)	2.6 (0.7)	0.001	***
Apr	8.7 (0.4)	8.3 (0.5)	9.6 (0.8)	10.6 (0.8)	1.9 (0.8)	0.060	***
Mai	13.4 (0.4)	13.5 (0.5)	14.4 (0.4)	15.7 (0.3)	2.3 (0.5)	0.000	***
Jun	16.3 (0.3)	16.9 (0.3)	17.8 (0.6)	19.7 (0.4)	3.4 (0.5)	0.000	***
Jul	18.3 (0.3)	19.0 (0.3)	20.1 (0.6)	22.0 (0.4)	3.7 (0.5)	0.000	***
Aug	17.9 (0.3)	18.5 (0.4)	20.0 (0.5)	22.4 (0.5)	4.4 (0.6)	0.000	***
Sep	14.0 (0.3)	14.8 (0.2)	16.0 (0.4)	17.7 (0.4)	3.7 (0.5)	0.000	***
Okt	9.2 (0.3)	9.9 (0.3)	10.9 (0.3)	12.6 (0.4)	3.4 (0.4)	0.000	***
Nov	4.5 (0.3)	5.3 (0.2)	6.4 (0.5)	7.8 (0.5)	3.4 (0.6)	0.000	***
Dez	2.1 (0.4)	2.7 (0.6)	4.1 (0.7)	5.9 (0.4)	3.8 (0.6)	0.000	***

Tabelle B.2: Statistik für die **Tagesmitteltemperatur T (saisonale Mittelwerte in °C)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5 \%$; **: $p < 1 \%$; ***: $p < 0.1 \%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DJF	1.6 (0.3)	2.3 (0.4)	3.7 (0.4)	5.5 (0.6)	4.0 (0.7)	0.000	***
MAM	9.1 (0.3)	9.0 (0.4)	10.2 (0.6)	11.3 (0.5)	2.3 (0.5)	0.000	***
JJA	17.5 (0.2)	18.1 (0.2)	19.3 (0.6)	21.4 (0.3)	3.8 (0.4)	0.000	***
SON	9.2 (0.2)	10.0 (0.1)	11.1 (0.4)	12.7 (0.4)	3.5 (0.5)	0.000	***

Tabelle B.3: Statistik für die **Tagesmitteltemperatur T (Jahresmittelwerte in °C)**. (Mittelwerte jeweils über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	9.4 (0.3)						
RUBA	9.4 (0.3)	9.7 (0.2)	10.7 (0.3)	12.6 (0.3)	3.2 (0.4)	0.000	***
ECLM	9.4 (0.2)	9.8 (0.2)	10.7 (0.3)	12.6 (0.3)	3.2 (0.4)	0.000	***
HCLM	9.4 (0.3)	10.2 (0.3)	11.5 (0.4)	12.8 (0.3)	3.5 (0.4)	0.000	***
WETTR0	9.4 (0.1)	10.0 (0.2)	11.3 (0.2)	12.9 (0.2)	3.5 (0.2)	0.000	***
WETTR1	9.4 (0.1)	10.0 (0.2)	11.3 (0.2)	12.9 (0.2)	3.4 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	9.4 (0.1)	9.9 (0.2)	11.1 (0.4)	12.8 (0.2)	3.4 (0.2)	0.000	***

Tabelle B.4: Statistik für die **Tagesmaximumtemperatur Tx (Monatsmittelwerte in °C)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Jan	3.3 (0.3)	4.1 (0.4)	5.6 (0.6)	7.5 (0.6)	4.2 (0.7)	0.000	***
Feb	5.0 (0.3)	5.9 (0.4)	7.2 (0.6)	9.0 (1.2)	4.0 (1.3)	0.098	***
Mär	9.4 (0.4)	9.4 (0.5)	10.8 (0.8)	12.0 (1.2)	2.6 (1.2)	0.207	**
Apr	13.7 (0.5)	13.1 (0.9)	14.6 (1.2)	15.4 (1.8)	1.8 (1.8)	5.231	
Mai	18.6 (0.5)	18.8 (0.6)	19.8 (0.6)	21.2 (0.4)	2.6 (0.6)	0.000	***
Jun	21.5 (0.3)	22.1 (0.4)	23.1 (0.9)	25.3 (1.0)	3.8 (1.1)	0.012	***
Jul	23.7 (0.5)	24.4 (0.5)	25.7 (0.9)	27.9 (1.0)	4.2 (1.0)	0.000	***
Aug	23.7 (0.5)	24.4 (0.7)	26.1 (0.8)	29.0 (0.8)	5.3 (0.9)	0.000	***
Sep	19.3 (0.4)	20.3 (0.3)	21.5 (0.6)	23.7 (0.4)	4.3 (0.6)	0.000	***
Okt	13.5 (0.3)	14.1 (0.3)	15.2 (0.5)	17.2 (0.5)	3.8 (0.6)	0.000	***
Nov	7.2 (0.3)	8.0 (0.2)	9.3 (0.5)	10.8 (0.4)	3.6 (0.5)	0.000	***
Dez	4.3 (0.4)	5.0 (0.7)	6.3 (0.8)	8.2 (0.6)	3.9 (0.7)	0.000	***

Tabelle B.5: Statistik für die **Tagesmaximumtemperatur Tx (saisonale Mittelwerte in °C)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DJF	4.2 (0.2)	4.9 (0.4)	6.4 (0.4)	8.3 (0.8)	4.1 (0.9)	0.002	***
MAM	13.9 (0.3)	13.8 (0.6)	15.1 (0.9)	16.2 (1.1)	2.3 (1.1)	0.332	**
JJA	23.0 (0.3)	23.6 (0.3)	25.0 (0.8)	27.4 (0.8)	4.4 (0.9)	0.000	***
SON	13.3 (0.2)	14.1 (0.2)	15.3 (0.5)	17.2 (0.4)	3.9 (0.4)	0.000	***

Tabelle B.6: Statistik für die **Tagesmaximumtemperatur Tx** . (Jahresmittelwerte in °C). (Mittelwerte jeweils über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	13.6 (0.3)						
RUBA	13.6 (0.3)	13.8 (0.2)	14.9 (0.3)	16.8 (0.4)	3.2 (0.5)	0.000	***
ECLM	13.6 (0.3)	14.0 (0.3)	14.9 (0.4)	16.9 (0.4)	3.3 (0.5)	0.000	***
HCLM	13.6 (0.4)	14.4 (0.3)	15.8 (0.5)	17.2 (0.3)	3.6 (0.5)	0.000	***
WETTR0	13.7 (0.1)	14.3 (0.2)	15.9 (0.3)	17.8 (0.2)	4.2 (0.2)	0.000	***
WETTR1	13.8 (0.1)	14.4 (0.2)	15.9 (0.3)	17.8 (0.2)	4.1 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	13.6 (0.1)	14.2 (0.3)	15.5 (0.6)	17.3 (0.6)	3.7 (0.6)	0.000	***

Tabelle B.7: Statistik für die **Tagesminimumtemperatur Tn** (Monatsmittelwerte in °C) (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Jan	-1.7 (0.4)	-0.9 (0.6)	0.6 (0.9)	2.4 (0.3)	4.1 (0.5)	0.000	***
Feb	-1.3 (0.3)	-0.3 (0.4)	0.8 (0.4)	2.4 (0.7)	3.7 (0.7)	0.000	***
Mär	1.5 (0.3)	1.7 (0.3)	3.0 (0.3)	3.9 (0.4)	2.4 (0.5)	0.000	***
Apr	3.9 (0.3)	3.7 (0.3)	4.9 (0.7)	5.9 (0.3)	2.0 (0.4)	0.000	***
Mai	8.2 (0.3)	8.2 (0.4)	9.0 (0.4)	10.2 (0.7)	2.0 (0.7)	0.009	***
Jun	11.2 (0.2)	11.7 (0.3)	12.6 (0.5)	14.0 (0.2)	2.8 (0.3)	0.000	***
Jul	13.1 (0.2)	13.7 (0.3)	14.6 (0.2)	16.1 (0.3)	3.0 (0.3)	0.000	***
Aug	12.8 (0.2)	13.2 (0.3)	14.4 (0.3)	16.4 (0.8)	3.5 (0.8)	0.004	***
Sep	9.8 (0.2)	10.5 (0.3)	11.6 (0.3)	13.0 (0.6)	3.2 (0.6)	0.000	***
Okt	5.8 (0.2)	6.6 (0.2)	7.5 (0.6)	9.1 (0.5)	3.2 (0.6)	0.000	***
Nov	2.0 (0.3)	2.7 (0.3)	3.8 (0.6)	5.1 (0.8)	3.2 (0.9)	0.010	***
Dez	-0.2 (0.4)	0.4 (0.5)	1.6 (0.5)	3.4 (0.3)	3.6 (0.5)	0.000	***

Tabelle B.8: Statistik für die **Tagesminimumtemperatur Tn** (saisonale Mittelwerte in °C) (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DJF	-1.1 (0.3)	-0.3 (0.3)	1.0 (0.4)	2.8 (0.3)	3.8 (0.4)	0.000	***
MAM	4.5 (0.2)	4.5 (0.3)	5.6 (0.5)	6.7 (0.3)	2.1 (0.4)	0.000	***
JJA	12.4 (0.1)	12.9 (0.2)	13.9 (0.3)	15.5 (0.3)	3.1 (0.3)	0.000	***
SON	5.9 (0.1)	6.6 (0.2)	7.6 (0.5)	9.1 (0.7)	3.2 (0.7)	0.026	***

Tabelle B.9: Statistik für die **Tagesminimumtemperatur T_n** (Jahresmittelwerte in °C). (Mittelwerte jeweils über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	5.5 (0.3)						
RUBA	5.5 (0.2)	5.8 (0.2)	6.9 (0.3)	8.7 (0.3)	3.2 (0.3)	0.000	***
ECLM	5.5 (0.2)	5.8 (0.2)	6.8 (0.3)	8.5 (0.2)	3.0 (0.3)	0.000	***
HCLM	5.4 (0.3)	6.3 (0.3)	7.6 (0.3)	8.9 (0.3)	3.4 (0.4)	0.000	***
WETTR0	5.5 (0.1)	6.0 (0.2)	7.0 (0.2)	8.4 (0.1)	2.9 (0.2)	0.000	***
WETTR1	5.5 (0.1)	5.9 (0.2)	7.0 (0.2)	8.3 (0.1)	2.8 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	5.5 (0.1)	6.0 (0.2)	7.1 (0.4)	8.5 (0.3)	3.1 (0.3)	0.000	***

Tabelle B.10: Statistik für die **relative Luftfeuchte Rel2** (monatliche Mittelwerte in %) (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Jan	84.3 (0.5)	84.3 (1.3)	84.4 (2.9)	84.1 (4.0)	-0.2 (4.0)	89.558	
Feb	80.4 (0.6)	80.1 (1.4)	79.9 (1.8)	79.3 (4.0)	-1.1 (4.1)	50.837	
Mär	75.0 (0.8)	75.6 (0.9)	76.0 (1.5)	75.4 (2.7)	0.4 (2.7)	74.786	
Apr	68.9 (1.4)	70.7 (1.9)	70.1 (2.7)	70.6 (5.0)	1.7 (5.0)	43.193	
Mai	69.1 (1.3)	69.3 (1.2)	68.8 (1.2)	67.7 (1.8)	-1.4 (2.1)	20.763	
Jun	69.9 (0.9)	69.2 (2.7)	69.1 (0.9)	65.8 (2.7)	-4.1 (2.8)	0.889	**
Jul	69.5 (1.4)	69.0 (1.1)	67.0 (2.2)	63.6 (2.5)	-5.9 (2.7)	0.038	***
Aug	70.3 (1.2)	69.3 (1.7)	66.7 (4.4)	62.2 (3.6)	-8.1 (3.7)	0.097	***
Sep	77.4 (0.8)	76.6 (1.1)	75.4 (1.7)	72.5 (3.0)	-5.0 (3.1)	0.623	**
Okt	82.4 (0.7)	82.7 (0.6)	82.4 (0.8)	80.5 (1.4)	-1.9 (1.5)	1.714	*
Nov	84.9 (0.7)	85.6 (1.0)	85.5 (1.4)	85.4 (2.0)	0.4 (2.0)	60.029	
Dez	85.7 (0.4)	85.2 (0.7)	85.2 (1.9)	85.4 (3.3)	-0.3 (3.3)	82.436	

Tabelle B.11: Statistik für die **relative Luftfeuchte Rel2** (saisonale Mittelwerte in %) (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DJF	83.5 (0.4)	83.3 (1.1)	83.3 (2.2)	83.0 (3.7)	-0.5 (3.8)	71.163	
MAM	71.0 (0.7)	71.9 (0.8)	71.6 (1.8)	71.2 (2.9)	0.2 (2.9)	86.752	
JJA	69.9 (0.9)	69.2 (0.7)	67.6 (1.9)	63.9 (2.6)	-6.0 (2.6)	0.077	***
SON	81.6 (0.4)	81.6 (0.5)	81.2 (0.8)	79.5 (0.8)	-2.1 (0.9)	0.005	***

Tabelle B.12: Statistik für die **relative Luftfeuchte Rel2 (Jahresmittelwerte in %)**. (Mittelwerte jeweils über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	76.1 (0.6)						
RUBA	76.1 (0.8)	76.8 (0.6)	76.1 (0.8)	74.7 (0.9)	-1.4 (1.1)	1.770	*
ECLM	76.8 (1.0)	76.5 (1.0)	76.8 (1.1)	75.1 (1.4)	-1.7 (1.7)	4.710	*
HCLM	76.8 (1.0)	76.9 (0.8)	76.0 (1.1)	75.0 (1.0)	-1.8 (1.3)	1.077	*
WETTR0	76.3 (0.3)	76.1 (0.2)	75.2 (0.4)	73.5 (0.3)	-2.8 (0.4)	0.000	***
WETTR1	76.3 (0.3)	76.0 (0.3)	75.2 (0.4)	73.3 (0.3)	-3.0 (0.5)	0.000	***
M-Mittel	76.5 (0.4)	76.4 (0.4)	75.9 (0.8)	74.3 (0.9)	-2.1 (1.0)	0.041	***

Tabelle B.13: Statistik für die **Taupunkttemperatur Tdew (Monatsmittelwerte in °C)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Jan	-1.6 (0.3)	-0.8 (0.6)	0.6 (0.9)	2.3 (0.3)	3.9 (0.5)	0.000	***
Feb	-1.4 (0.3)	-0.5 (0.4)	0.6 (0.4)	2.1 (0.8)	3.5 (0.8)	0.000	***
Mär	1.0 (0.3)	1.2 (0.3)	2.5 (0.3)	3.4 (0.4)	2.5 (0.5)	0.000	***
Apr	3.0 (0.3)	3.0 (0.2)	4.1 (0.5)	5.1 (0.2)	2.1 (0.4)	0.000	***
Mai	7.6 (0.3)	7.7 (0.4)	8.5 (0.4)	9.5 (0.4)	1.9 (0.5)	0.000	***
Jun	10.6 (0.2)	11.0 (0.6)	11.8 (0.6)	12.9 (0.3)	2.3 (0.4)	0.000	***
Jul	12.4 (0.2)	12.9 (0.2)	13.5 (0.2)	14.5 (0.4)	2.1 (0.4)	0.000	***
Aug	12.2 (0.2)	12.5 (0.2)	13.4 (0.4)	14.7 (0.3)	2.4 (0.4)	0.000	***
Sep	10.0 (0.2)	10.6 (0.3)	11.6 (0.2)	12.7 (0.2)	2.7 (0.3)	0.000	***
Okt	6.3 (0.3)	7.1 (0.2)	8.0 (0.3)	9.4 (0.3)	3.1 (0.4)	0.000	***
Nov	2.1 (0.3)	3.0 (0.4)	4.0 (0.6)	5.4 (0.6)	3.3 (0.7)	0.000	***
Dez	-0.1 (0.4)	0.4 (0.5)	1.7 (0.6)	3.5 (0.3)	3.6 (0.5)	0.000	***

Tabelle B.14: Statistik für die **Taupunkttemperatur Tdew (saisonale Mittelwerte in °C)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DJF	-1.0 (0.2)	-0.3 (0.3)	1.0 (0.4)	2.7 (0.3)	3.7 (0.4)	0.000	***
MAM	3.8 (0.2)	4.0 (0.2)	5.0 (0.4)	6.0 (0.2)	2.2 (0.3)	0.000	***
JJA	11.7 (0.1)	12.1 (0.3)	12.9 (0.3)	14.0 (0.3)	2.3 (0.3)	0.000	***
SON	6.1 (0.2)	6.9 (0.1)	7.9 (0.3)	9.2 (0.4)	3.0 (0.4)	0.000	***

Tabelle B.15: Statistik für die **Taupunkttemperatur Tdew (Jahresmittelwerte in °C)**. (Mittelwerte jeweils über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	5.2 (0.3)						
RUBA	5.1 (0.2)	5.6 (0.2)	6.5 (0.3)	8.0 (0.2)	2.9 (0.2)	0.000	***
ECLM	5.2 (0.2)	5.5 (0.2)	6.4 (0.2)	7.9 (0.2)	2.7 (0.3)	0.000	***
HCLM	5.1 (0.3)	5.9 (0.3)	7.0 (0.3)	8.1 (0.2)	2.9 (0.3)	0.000	***
WETTR0	5.3 (0.1)	5.8 (0.2)	6.8 (0.2)	8.0 (0.1)	2.8 (0.2)	0.000	***
WETTR1	5.3 (0.1)	5.7 (0.2)	6.8 (0.2)	7.9 (0.1)	2.6 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	5.2 (0.1)	5.7 (0.2)	6.7 (0.3)	8.0 (0.1)	2.8 (0.1)	0.000	***

Tabelle B.16: Statistik für die **10 m-Windgeschwindigkeit (monatliche Mittelwerte in m/s)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Jan	2.5 (0.1)	2.7 (0.1)	2.7 (0.1)	2.9 (0.3)	0.4 (0.4)	2.445	*
Feb	2.4 (0.1)	2.6 (0.2)	2.5 (0.1)	2.8 (0.6)	0.4 (0.6)	16.788	
Mär	2.5 (0.1)	2.6 (0.1)	2.5 (0.1)	2.6 (0.2)	0.0 (0.2)	58.680	
Apr	2.4 (0.1)	2.4 (0.1)	2.3 (0.1)	2.4 (0.1)	0.0 (0.1)	93.931	
Mai	2.3 (0.2)	2.2 (0.2)	2.1 (0.1)	2.1 (0.0)	-0.2 (0.2)	6.592	
Jun	2.1 (0.0)	2.1 (0.0)	2.1 (0.1)	2.0 (0.1)	-0.1 (0.1)	7.119	
Jul	2.0 (0.0)	2.0 (0.1)	2.0 (0.1)	1.9 (0.1)	-0.1 (0.1)	1.960	*
Aug	1.8 (0.0)	1.9 (0.0)	1.8 (0.0)	1.7 (0.1)	-0.1 (0.1)	0.590	**
Sep	2.0 (0.1)	1.9 (0.1)	1.9 (0.1)	1.8 (0.0)	-0.2 (0.1)	0.244	**
Okt	2.1 (0.1)	2.1 (0.1)	2.0 (0.1)	1.9 (0.1)	-0.1 (0.1)	7.722	
Nov	2.3 (0.1)	2.3 (0.1)	2.2 (0.1)	2.2 (0.2)	-0.1 (0.2)	28.021	
Dez	2.5 (0.1)	2.5 (0.2)	2.5 (0.2)	2.7 (0.2)	0.2 (0.2)	1.206	*

Tabelle B.17: Statistik für die **10 m-Windgeschwindigkeit V10 (saisonale Mittelwerte in m/s)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DJF	2.4 (0.0)	2.6 (0.1)	2.6 (0.1)	2.8 (0.4)	0.4 (0.4)	5.689	
MAM	2.4 (0.1)	2.4 (0.1)	2.3 (0.1)	2.3 (0.1)	0.0 (0.1)	41.624	
JJA	2.0 (0.0)	2.0 (0.0)	1.9 (0.1)	1.9 (0.1)	-0.1 (0.1)	1.736	*
SON	2.1 (0.1)	2.1 (0.0)	2.0 (0.1)	2.0 (0.1)	-0.1 (0.1)	1.861	*

Tabelle B.18: Statistik für die **10 m-Windgeschwindigkeit V10 (Jahresmittelwerte in m/s)**. (Mittelwerte jeweils über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.21 (0.05)	2.24 (0.03)	2.23 (0.03)	2.23 (0.04)	0.04 (0.05)	10.536	
RUBA	2.19 (0.03)	2.24 (0.03)	2.23 (0.03)	2.23 (0.04)	0.04 (0.05)	69.214	
ECLM	2.19 (0.03)	2.22 (0.03)	2.21 (0.03)	2.20 (0.04)	0.01 (0.05)	33.697	
HCLM	2.19 (0.03)	2.21 (0.03)	2.19 (0.03)	2.18 (0.03)	-0.02 (0.04)	57.699	
WETTR0	2.27 (0.04)	2.34 (0.04)	2.24 (0.05)	2.29 (0.05)	0.02 (0.07)	68.131	
WETTR1	2.29 (0.04)	2.34 (0.04)	2.23 (0.04)	2.30 (0.04)	0.01 (0.05)	73.599	
M-Mittel	2.23 (0.06)	2.27 (0.08)	2.22 (0.02)	2.24 (0.06)	0.01 (0.08)		

Tabelle B.19: Statistik für den **Gesamtniederschlag PRECIPTOT (monatliche Summen in mm)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Jan	59.4 (4.8)	62.2 (4.4)	65.0 (6.3)	71.1 (5.0)	11.7 (6.8)	0.106	**
Feb	50.8 (3.7)	56.1 (7.9)	53.6 (6.0)	59.3 (8.1)	8.4 (8.7)	5.611	
Mär	59.1 (5.0)	61.8 (7.2)	67.5 (10.7)	62.5 (10.1)	3.4 (10.9)	51.830	
Apr	52.4 (4.3)	59.1 (5.8)	55.1 (4.9)	57.0 (12.0)	4.6 (12.3)	41.656	
Mai	66.9 (3.8)	65.6 (5.3)	64.3 (5.4)	60.1 (5.2)	-6.8 (6.4)	3.579	*
Jun	72.4 (7.4)	70.7 (8.3)	72.9 (6.7)	62.1 (6.7)	-10.3 (9.3)	3.119	*
Jul	76.8 (6.1)	73.8 (9.7)	66.1 (14.1)	59.4 (4.5)	-17.4 (7.5)	0.002	***
Aug	65.7 (7.8)	61.2 (3.4)	58.7 (8.6)	46.9 (4.6)	-18.8 (8.8)	0.014	***
Sep	64.5 (3.8)	61.8 (8.7)	64.7 (7.1)	60.5 (6.4)	-4.0 (7.4)	28.114	
Okt	62.7 (5.9)	71.4 (6.4)	66.8 (9.2)	61.2 (6.9)	-1.6 (8.8)	71.846	
Nov	67.3 (4.3)	73.7 (7.3)	67.9 (6.1)	70.5 (14.8)	3.2 (15.1)	63.534	
Dez	71.5 (4.3)	70.0 (6.1)	69.4 (6.2)	82.4 (13.1)	10.9 (13.6)	10.032	

Tabelle B.20: Statistik für den **Gesamtniederschlag PRECIPTOT (saisonale Summen in mm)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DJF	181.7 (7.5)	188.3 (9.2)	188.8 (13.5)	213.0 (6.9)	31.3 (10.0)	0.000	***
MAM	178.5 (7.3)	186.4 (15.0)	186.9 (14.5)	179.6 (19.7)	1.1 (20.5)	90.953	
JJA	214.9 (9.4)	205.7 (9.1)	197.7 (18.7)	168.4 (8.3)	-46.5 (12.3)	0.000	***
SON	194.6 (8.4)	206.9 (12.3)	199.5 (19.3)	192.2 (10.4)	-2.4 (13.1)	71.569	

Tabelle B.21: Statistik für den **Gesamtniederschlag PRECIPTOT (Jahressumme mm)**. (Mittelwerte jeweils über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	771.1 (48.4)						
RUBA	768.7 (35.1)	829.7 (35.0)	825.6 (40.6)	804.9 (44.7)	36.3 (55.7)	19.739	
ECLM	772.0 (30.9)	787.5 (32.4)	787.5 (33.6)	777.2 (47.2)	5.3 (55.4)	84.879	
HCLM	770.9 (36.4)	798.4 (45.0)	764.8 (37.3)	741.6 (41.5)	-29.3 (54.1)	28.285	
WETTR0	767.5 (30.3)	776.0 (27.3)	742.5 (37.4)	728.5 (27.8)	-38.9 (40.2)	5.777	
WETTR1	769.6 (27.2)	744.0 (34.0)	739.7 (31.9)	712.0 (24.3)	-57.6 (35.8)	0.206	**
M-Mittel	769.7 (16.3)	787.1 (33.3)	772.0 (40.0)	752.9 (41.9)	-16.9 (43.7)	41.361	

Tabelle B.22: Statistik für den **Gesamtbedeckungsgrad CLCT (monatliche Mittelwerte in %)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Jan	77.8 (3.2)	78.1 (5.2)	78.3 (3.4)	80.3 (2.8)	2.5 (3.9)	18.683	
Feb	74.2 (4.0)	74.9 (5.1)	74.8 (5.3)	75.7 (4.4)	1.5 (5.4)	55.660	
Mär	69.7 (4.6)	70.9 (3.0)	71.9 (7.7)	69.8 (9.1)	0.0 (9.2)	99.505	
Apr	65.3 (6.0)	67.2 (6.8)	64.6 (8.9)	65.8 (12.7)	0.4 (12.6)	93.608	
Mai	64.7 (4.1)	62.7 (3.2)	61.2 (6.4)	59.1 (8.1)	-5.5 (8.3)	16.325	
Jun	63.9 (4.3)	62.3 (4.4)	62.3 (8.5)	54.7 (9.6)	-9.1 (9.9)	6.314	
Jul	60.9 (2.5)	59.0 (4.4)	54.5 (6.5)	49.5 (11.2)	-11.4 (11.7)	5.304	
Aug	59.5 (4.4)	56.3 (4.9)	51.5 (8.1)	44.4 (11.8)	-15.1 (11.9)	2.229	*
Sep	65.5 (5.2)	62.4 (4.4)	63.4 (5.7)	58.1 (2.7)	-7.4 (5.4)	1.266	*
Okt	69.7 (4.0)	71.4 (5.9)	70.0 (7.3)	66.7 (3.7)	-3.0 (5.1)	23.016	
Nov	77.8 (2.6)	79.3 (4.5)	77.6 (4.8)	78.0 (6.7)	0.3 (6.8)	91.840	
Dez	80.6 (2.6)	79.0 (2.1)	80.0 (2.3)	81.9 (4.2)	1.3 (4.5)	54.420	

Tabelle B.23: Statistik für den **Gesamtbedeckungsgrad CLCT (saisonale Mittelwerte in %)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DJF	77.7 (3.6)	77.5 (3.8)	77.8 (3.9)	79.4 (4.0)	1.8 (4.6)	40.032	
MAM	66.6 (5.1)	66.9 (4.2)	65.9 (7.6)	64.9 (9.8)	-1.7 (9.8)	68.268	
JJA	61.4 (3.4)	59.2 (4.0)	56.0 (7.4)	49.5 (10.6)	-11.9 (10.4)	3.219	*
SON	70.9 (4.0)	71.0 (5.2)	70.4 (6.2)	67.6 (4.0)	-3.4 (5.0)	16.253	

Tabelle B.24: Statistik für den **Gesamtbedeckungsgrad CLCT (Jahresmittelwerte in %)**. (Mittelwerte jeweils über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	69.5 (0.7)						
RUBA	66.9 (0.8)	67.1 (0.9)	67.1 (1.1)	66.8 (0.8)	0.0 (1.1)	95.278	
ECLM	72.8 (1.4)	72.7 (1.5)	73.1 (1.6)	71.3 (1.6)	-1.5 (2.1)	15.534	
HCLM	72.5 (1.2)	71.6 (1.2)	71.2 (1.3)	69.1 (1.5)	-3.4 (1.9)	0.050	***
WETTR0	66.9 (0.6)	66.1 (0.5)	62.8 (1.0)	59.8 (0.8)	-7.1 (1.0)	0.000	***
WETTR1	66.5 (0.7)	65.5 (0.8)	63.1 (0.9)	59.4 (0.8)	-7.1 (1.1)	0.000	***
M-Mittel	69.1 (4.1)	68.6 (4.1)	67.5 (5.8)	65.3 (6.7)	-3.8 (6.9)	22.500	

Tabelle B.25: Statistik für die **Globalstrahlung Glob (Monatsmittelwerte in W/m^2)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Jan	32.1 (0.9)	31.6 (2.1)	31.0 (2.3)	29.6 (3.2)	-2.6 (3.2)	9.751	
Feb	60.4 (1.9)	59.2 (2.6)	58.9 (3.0)	57.8 (2.9)	-2.6 (3.4)	12.079	
Mär	105.7 (3.0)	104.1 (3.3)	101.7 (10.0)	105.4 (15.3)	-0.3 (15.8)	95.952	
Apr	167.2 (4.9)	161.5 (9.1)	166.0 (10.2)	161.4 (25.3)	-5.8 (26.2)	56.859	
Mai	208.0 (5.7)	210.0 (5.9)	213.3 (6.3)	216.2 (11.5)	8.2 (12.4)	17.938	
Jun	221.3 (3.9)	225.6 (9.6)	226.1 (20.0)	241.8 (30.7)	20.4 (31.2)	14.289	
Jul	220.1 (5.6)	224.9 (6.9)	234.2 (17.5)	245.2 (32.3)	25.1 (33.2)	10.348	
Aug	195.1 (5.2)	201.2 (7.4)	210.9 (14.4)	225.0 (25.4)	29.9 (26.3)	3.445	*
Sep	132.9 (3.0)	137.9 (6.2)	135.4 (5.0)	143.2 (5.2)	10.4 (5.9)	0.120	**
Okt	77.7 (2.7)	75.8 (3.2)	75.6 (6.1)	79.5 (3.4)	1.8 (4.2)	38.567	
Nov	38.8 (2.0)	37.1 (5.1)	38.0 (4.5)	37.3 (5.1)	-1.5 (5.1)	50.032	
Dez	25.2 (1.2)	25.6 (1.3)	25.2 (1.5)	23.9 (3.7)	-1.2 (3.7)	42.974	

Tabelle B.26: Statistik für die **Globalstrahlung Glob (saisonale Mittelwerte in W/m^2)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DJF	38.6 (0.9)	38.2 (1.6)	37.7 (2.4)	36.4 (3.3)	-2.1 (3.3)	15.289	
MAM	160.2 (2.6)	158.5 (4.4)	160.3 (8.9)	161.0 (17.6)	0.7 (17.9)	91.354	
JJA	212.1 (3.3)	217.1 (5.2)	223.7 (16.5)	237.3 (28.9)	25.2 (29.2)	7.501	
SON	83.1 (1.6)	83.5 (3.7)	82.9 (4.8)	86.6 (3.2)	3.5 (3.4)	4.461	*

Tabelle B.27: Statistik für die **Globalstrahlung Glob (Jahresmittelwerte in W/m^2)**. (Mittelwerte jeweils über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	123.7 (2.2)						
RUBA	123.7 (1.9)	121.4 (2.1)	120.3 (2.0)	119.8 (2.0)	-3.8 (2.7)	0.538	**
ECLM	124.1 (3.4)	123.8 (3.4)	121.9 (3.3)	124.4 (3.9)	0.3 (5.1)	89.393	
HCLM	123.9 (3.0)	124.7 (2.7)	124.0 (3.2)	126.9 (2.7)	3.0 (4.0)	14.006	
WETTR0	123.9 (1.2)	126.8 (1.0)	134.2 (1.9)	141.3 (1.5)	17.3 (1.9)	0.000	***
WETTR1	124.4 (1.3)	127.5 (1.3)	133.0 (1.6)	142.1 (1.6)	17.7 (2.0)	0.000	***
M-Mittel	124.0 (1.3)	124.8 (2.7)	126.7 (8.1)	130.9 (12.7)	6.9 (12.8)	20.881	

Tabelle B.28: Statistik für den **Luftdruck p_s am Boden (Monatsmittelwerte in hPa)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Jan	992.9 (1.0)	994.6 (1.9)	994.3 (2.4)	993.7 (1.8)	0.8 (2.0)	39.835	
Feb	991.8 (1.0)	993.2 (3.3)	993.2 (1.9)	992.6 (3.2)	0.8 (3.2)	60.084	
Mär	990.9 (0.9)	990.3 (2.3)	990.1 (1.3)	990.8 (1.9)	-0.1 (2.0)	88.625	
Apr	989.4 (1.0)	988.1 (1.4)	989.1 (0.8)	989.8 (1.4)	0.3 (1.7)	68.193	
Mai	990.5 (0.6)	991.3 (0.9)	991.6 (1.3)	992.2 (1.2)	1.7 (1.3)	1.135	*
Jun	991.6 (0.4)	991.9 (1.1)	991.6 (0.4)	992.5 (0.5)	0.9 (0.6)	0.795	**
Jul	991.9 (0.4)	992.0 (0.6)	992.5 (0.9)	992.8 (1.6)	0.8 (1.7)	23.974	
Aug	992.1 (0.5)	992.4 (0.3)	992.9 (0.5)	993.5 (1.6)	1.4 (1.6)	7.720	
Sep	992.4 (0.5)	992.8 (1.3)	992.5 (0.7)	993.3 (1.0)	1.0 (1.1)	7.830	
Okt	992.6 (0.7)	992.3 (0.7)	992.9 (1.8)	994.2 (0.8)	1.6 (1.0)	0.303	**
Nov	991.6 (0.9)	991.3 (1.0)	992.9 (1.0)	992.2 (1.2)	0.6 (1.4)	41.227	
Dez	992.3 (0.9)	992.8 (1.2)	993.3 (1.3)	992.7 (1.0)	0.4 (1.3)	55.986	

Tabelle B.29: Statistik für den **Luftdruck ps am Boden (saisonale Mittelwerte in hPa)** (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DJF	992.4 (0.6)	993.5 (1.4)	993.6 (1.6)	993.0 (1.8)	0.6 (1.8)	44.534	
MAM	990.3 (0.5)	989.9 (1.0)	990.3 (0.4)	990.9 (0.7)	0.6 (0.8)	12.296	
JJA	991.9 (0.3)	992.1 (0.5)	992.4 (0.6)	992.9 (1.3)	1.0 (1.3)	9.449	
SON	992.2 (0.3)	992.1 (0.7)	992.8 (0.6)	993.3 (0.5)	1.0 (0.6)	0.055	***

Tabelle B.30: Statistik für den **Luftdruck ps am Boden (Jahresmittelwerte in hPa)**. (Mittelwerte jeweils über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	991.7 (0.4)						
RUBA	991.7 (0.5)	991.8 (0.5)	992.3 (0.5)	992.5 (0.5)	0.8 (0.7)	1.552	*
ECLM	991.9 (0.5)	992.2 (0.5)	992.7 (0.5)	993.0 (0.5)	1.1 (0.7)	0.179	**
HCLM	991.5 (0.5)	991.7 (0.4)	992.2 (0.4)	992.1 (0.5)	0.7 (0.7)	5.711	
WETTR0	991.7 (0.3)	991.8 (0.3)	992.1 (0.3)	992.4 (0.3)	0.8 (0.4)	0.047	***
WETTR1	991.7 (0.3)	992.2 (0.3)	992.0 (0.3)	992.6 (0.3)	0.9 (0.4)	0.004	***
M-Mittel	991.7 (0.2)	991.9 (0.3)	992.3 (0.3)	992.5 (0.3)	0.8 (0.4)	0.004	***

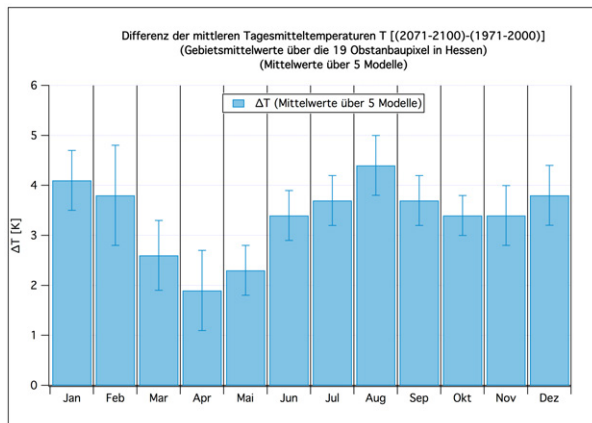


Abbildung B.1: Tagesmitteltemperatur T (jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe)

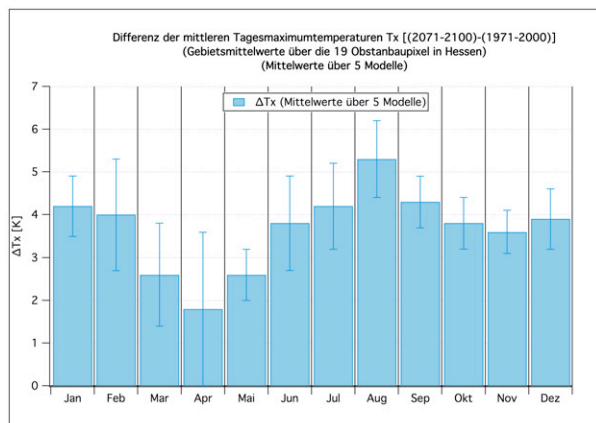


Abbildung B.2: Tagesmaximumtemperatur Tx

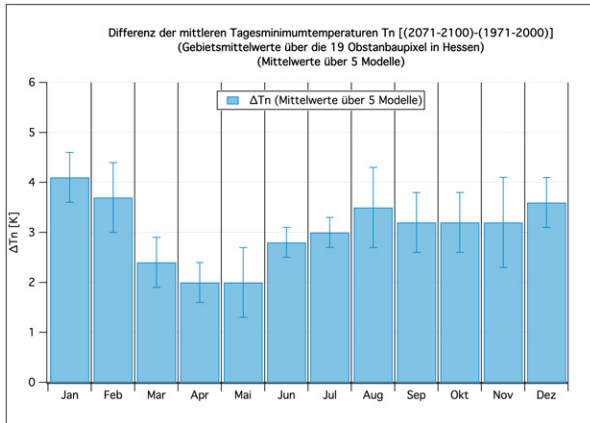


Abbildung B.3: Tagesminimumtemperatur T_n

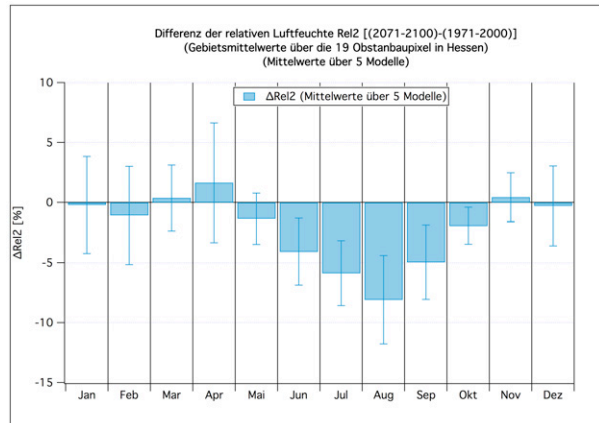


Abbildung B.4: Relative Luftfeuchte Rel2

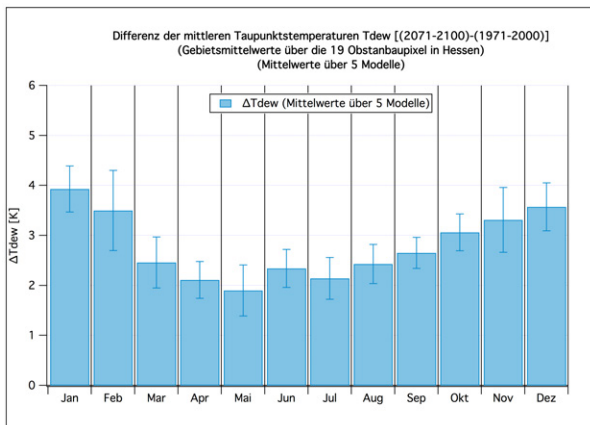


Abbildung B.5: Taupunkttemperatur T_{dew}

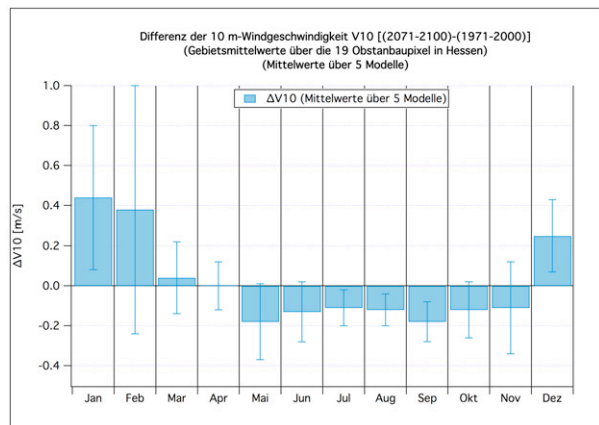


Abbildung B.6: 10 m-Windgeschwindigkeit V_{10}

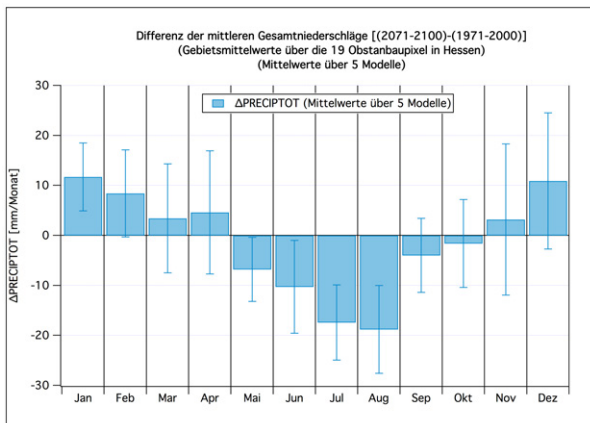


Abbildung B.7: Gesamtniederschlag PRECIPTOT

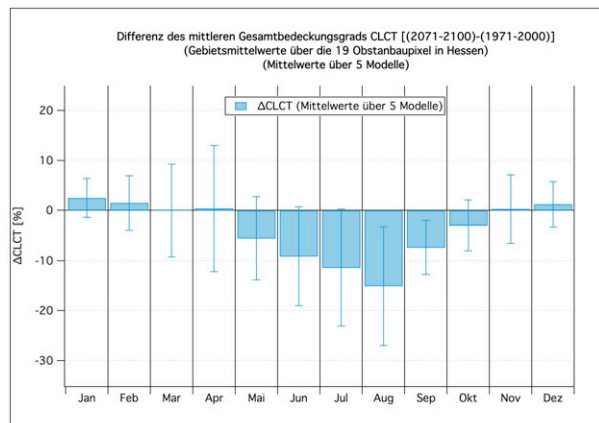


Abbildung B.8: Gesamtbedeckungsgrad CLCT

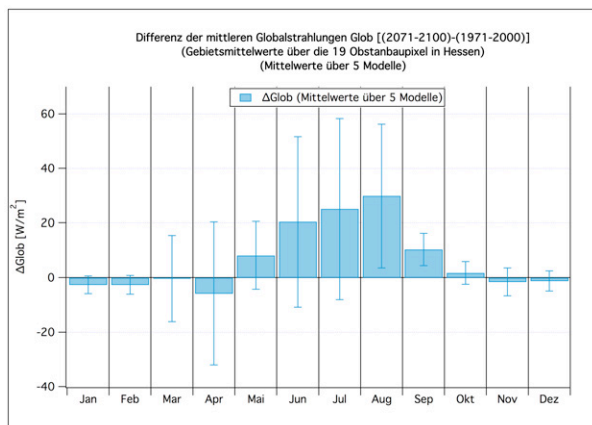


Abbildung B.9: Globalstrahlung Glob

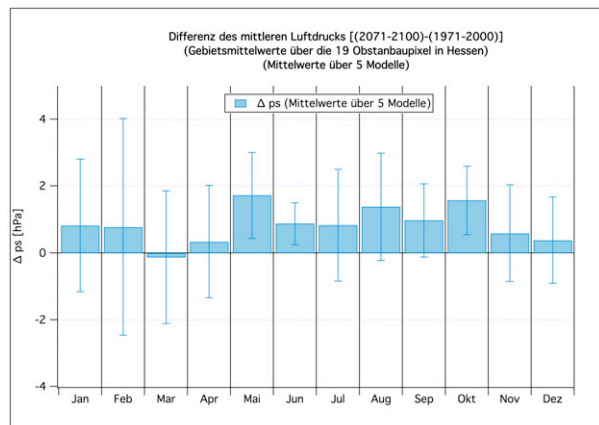


Abbildung B.10: Luftdruck ps am Boden

C Ergebnisse für den Blühbeginn

Zur Berechnung des Blühbeginns wurde das optimierte Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term verwendet. Die optimierten Parameter findet man in Tabelle 4.12. Für den Forcing-Anteil des Modell 29ga wurde die Gleichung (4.45) zusammen mit (4.93) (bzw. (4.94) für Wein) verwendet. Für den Chilling-Anteil wird das *Dynamic Model* (Modell 1g) benutzt, welches heutzutage als zuverlässigstes Chilling-Modell angesehen wird (vgl. das in Kapitel 5.3.1 auf Seite 199 Gesagte).

Die in den Tabellen unter “DWD” angegebenen Werte sind keine regionalisierten Beobachtungswerte des Blühbeginns, sondern diese Blühbeginn-Termine wurden aus Konsistenzgründen wie die anderen Werte mit Modell 29ga aus Temperaturen berechnet, nur dass hier regionalisierte, beobachtete Temperaturen anstelle von Temperaturvorhersagen der Klimamodelle benutzt wurden. Diese Mittelwerte des Blühbeginns sind aber fast identisch mit den Mittelwerten aus regionalisierten Beobachtungswerten. Letztere findet man in eckigen Klammern in der jeweiligen Tabellenüberschrift. Z. B. beträgt für den frühreifen Apfel und für die Zeitspanne 1971-2000 der mittlere Blühbeginn, gemittelt über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen, 119.8 DOY, wenn man diesen Wert aus regionalisierten Beobachtungen des Blühbeginns berechnet, und 119.2 DOY, wenn man die Termine mit Modell 29ga aus regionalisierten, beobachteten Temperaturen berechnet.

Dass die Unterschiede zwischen dem Mittelwert \bar{y} der mit DWD-Klimadaten berechneten Modellwerte y_i und dem Mittelwert \bar{x} der beobachteten Blühbeginn-Werte x_i (über jeweils N Jahre) im Allgemeinen klein sein müssen, erkennt man folgendermaßen: Wenn man annimmt, dass die Residuen $y_i - x_i$ annähernd normalverteilt sind und dass das Modell erwartungstreu ist (d. h., dass $E[y_i] = E[x_i]$ gilt; $E[z]$ ist hierbei der Erwartungswert von z), die Werte der unterschiedlichen Jahre statistisch unabhängig sind (d. h., dass für $j \neq i$ die x_i paarweise unabhängig von den y_j und die x_i unabhängig von den y_j sein sollen) und N nicht zu klein ist ($N \gtrsim 20$), so ist $(\bar{y} - \bar{x})$ approximativ normalverteilt mit dem Mittelwert 0 und der Varianz RMSE^2/N .¹ Es gilt also

$$(\bar{y} - \bar{x}) \sim N\left(0, \frac{\text{RMSE}^2}{N}\right). \quad (\text{C.1})$$

RMSE ist der Root Mean Square Error bzgl. x_i und y_i .² Daraus folgt sofort, dass

$$\text{Prob}\left(|\bar{y} - \bar{x}| < 1.96 \frac{\text{RMSE}}{\sqrt{N}}\right) = 95\% \quad (\text{C.2})$$

gilt. $\text{Prob}(A)$ bezeichnet hier die Wahrscheinlichkeit der Aussage A .³ Leider sind nicht alle

¹ Unter diesen Voraussetzungen kann man auch leicht die folgenden Beziehung herleiten: $E\left[(\bar{y} - \bar{x})^2\right] = E\left[\text{RMSE}^2/N\right]$. Hieraus folgt aber leider nicht, dass $|\bar{y} - \bar{x}| \approx \text{RMSE}/\sqrt{N}$ gilt. Beide Terme konvergieren zwar mit $N \rightarrow \infty$ stochastisch gegen null, aber es gilt immer Gleichung (C.2).

² RMSE^2 ist nichts anderes als der gewöhnliche Schätzwert für die Varianz von $y_i - x_i$ im Fall, dass der Erwartungswert von $y_i - x_i$ bekannt und identisch null ist.

³ Die Gleichung (C.2) kann natürlich auch für andere Wahrscheinlichkeiten als 95% geschrieben werden, wenn man das entsprechende Quantil der Standardnormalverteilung anstelle von 1.96 einsetzt.

y_i unabhängig von den x_j , da im Optimierungszeitraum die Blühtermine jedes zweiten Jahrs zur Optimierung des Modells benutzt wurden (vgl. Kapitel 4.6.6). Wenn man alle Jahre des Gesamtzeitraums zur Optimierung verwendet hätte, so wäre die Differenz der Mittelwerte daher noch wesentlich geringer als die, welche man mit Formel (C.2) und dem “alten” RMSE berechnet.⁴ Würde man hingegen für die Mittelwerte nur Blühbeginnstermine aus Jahren verwenden, die nicht zur Optimierung verwendet wurden, den RMSE aber trotzdem wieder mit allen Jahren berechnen, so müsste man die Varianz der Normalverteilung in den Gleichungen (C.1) und (C.2) etwas größer ansetzen als RMSE^2/N . Wie die Auswertungen bestätigen, ergibt die Gleichung (C.2) aber im Mittel über alle 30 Jahre bei der hier benutzten Optimierungsstrategie realistische Abschätzungen für die Mittelwertdifferenzen. Das liegt daran, dass hier Werte sowohl aus den direkt zur Optimierung benutzten Jahren (die *geraden* Jahre) als auch aus *unabhängigen* Jahren (die *ungeraden* Jahre) in die Mittelwerte eingehen.

Für $N = 30$ und $\text{RMSE} \approx 4$ d (vgl. Tabelle 4.12) erhält man z. B. $\text{Prob}(|\bar{y} - \bar{x}| < 1.43 \text{ d}) = 95\%$. Bei der Aprikose sind die Unterschiede zwischen den beobachteten und *berechneten* Mittelwerten besonders groß ($\bar{x} = 101.2$ DOY und $\bar{y} = 97.2$ DOY; siehe Tabelle C.9). Das liegt daran, dass bei der Aprikose die RMSE’s im Optimierungszeitraum besonders groß sind (siehe Tabelle 4.12; $\text{RMSE-VER}=9.2$ d). Daher ergeben sich nach Gleichung (C.2) (mit $N = 20$ anstelle von $N = 30$ wegen des bei der Aprikose kürzeren Mittelungszeitraums von 1971-1990) auch relativ große Differenzen zwischen den Mittelwerten ($\text{Prob}(|\bar{y} - \bar{x}| < 4.0 \text{ d}) = 95\%$). Außerdem muss man noch berücksichtigen, dass die Optimierung bei der Aprikose auf Grund der schlechten Datenlage nur über 15 der insgesamt 81 Gitterpunkte in Hessen durchgeführt werden konnte (vgl. Fußnote e zu Tabelle 4.12 bzw. Tabelle 4.10).

Für Erdbeere, Pfirsich, Aprikose und Pflaume beziehen sich die DWD-Mittelwerte nur auf den Zeitraum 1971-1990, da nach 1990 für diese Arten keine bzw. keine *ausreichend dichten* Beobachtungen vorlagen (vgl. Tabelle 4.5).⁵

Die Termine des Blühbeginns unterscheiden sich bei den frühreifenden und spätreifenden Sorten nur wenig (um maximal einige Tage), so dass beim Blühbeginn im Folgenden nicht weiter zwischen früh- und spätreifenden Sorten unterschieden wird. Da die Datenbasis beim *frühreifen* Apfel wesentlich besser ist als beim *spätreifen* (siehe Tabelle 4.5), wurden immer, wenn benötigt (z. B. zur Eichung der Modelle), die Daten des frühreifen Apfels verwendet.

Die Tabellen zeigen 30-jährige Mittelwerte \bar{t}_2 des Blühbeginns (in DOY) über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. über die 8 Weinbau-Gitterpunkte bei Wein und die 4 Erdbeer-Gitterpunkte bei der Erdbeere) (vgl. Abschnitt 4.5) mit einseitigem⁶ 95%-“Konfidenzintervall” *Konf95* in Klammern (in Tagen) für vier 30-jährige Zeitabschnitte sowie die Differenz ‘(2071-2100)-(1971-2000)’ (in Tagen) und den p-Wert (in %) zur H_0 :

⁴ Dass die Differenz in diesem Fall kleiner ist, sieht man leicht ein, wenn man z. B. anstelle des “echten” phänologischen Modells eine lineare Regression der Form $y_i = ax_i + b$ betrachtet (was zugegebener Maßen nicht besonders sinnvoll ist) und die unbekanntenen Koeffizienten a und b mit der *Methode der kleinsten Quadrate* optimiert (d. h. $\sum (y_i - x_i)^2 = \text{Minimum}$ bzgl. a und b). In diesem extremen Spezialfall ergibt sich $y_i = x_i$, woraus folgt, dass $\bar{y} - \bar{x}$ sogar exakt null ist!

⁵ Da die Blühbeginn-Termine modelliert wurden, hätte man die Jahre 1991-2000 natürlich berechnen können. Jedoch wären in diesem Fall die zusätzlichen Ausgabegrößen, wie z. B. der Root Mean Square Error RMSE, undefiniert gewesen.

⁶ Das beidseitige Konfidenzintervall für den Erwartungswert des Blühbeginns erstreckt sich von $\bar{t}_2 - \text{Konf95}$ bis $\bar{t}_2 + \text{Konf95}$.

“Differenz gleich null” und H1: “Differenz ungleich null”. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$. Zum Aufbau der Tabellen und zu den benutzten Zeitabschnitten beachte man die Bemerkungen am Anfang des Anhangs B. Werte der Form “(xx.yy)” stellen den Mittelwert, der jeweils in der ersten Zeile für ein “Modell” als ‘Tag im Jahr’ (DOY) gelistet wird, als normales *Datum* dar.

Tabelle C.1: Blühbeginn beim **Apfel**, berechnet mit Modell 29ga (DL=1).[Beobachtet (1971-2000): 119.8 (2.7)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	119.2 (2.7) (29.04.)						
RUBA	120.2 (3.8) (30.04.)	122.5 (2.8) (02.05.)	113.3 (3.3) (23.04.)	105.0 (3.4) (15.04.)	-15.2 (5.0)	0.000	***
ECLM	119.8 (3.3) (30.04.)	121.5 (2.2) (02.05.)	113.5 (3.5) (23.04.)	104.8 (2.7) (15.04.)	-15.0 (4.1)	0.000	***
HCLM	119.6 (3.2) (30.04.)	114.2 (3.7) (24.04.)	106.8 (2.9) (17.04.)	103.6 (3.6) (14.04.)	-16.0 (4.7)	0.000	***
WETTR0	119.8 (1.4) (30.04.)	118.5 (1.8) (28.04.)	108.1 (2.1) (18.04.)	97.5 (1.6) (08.04.)	-22.2 (2.1)	0.000	***
WETTR1	119.9 (1.7) (30.04.)	117.8 (1.8) (28.04.)	108.6 (2.1) (19.04.)	98.1 (2.2) (08.04.)	-21.8 (2.8)	0.000	***
M-Mittel	119.9 (1.5) (30.04.)	118.9 (3.8) (29.04.)	110.1 (3.7) (20.04.)	101.8 (4.4) (12.04.)	-18.1 (4.5)	0.007	***

Tabelle C.2: Blühbeginn bei der **Sauerkirsche**, berechnet mit Modell 29ga (DL=1).[Beobachtet (1971-2000): 115.1 (2.5)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	114.4 (2.4) (24.04.)						
RUBA	115.5 (3.5) (25.04.)	117.4 (2.6) (27.04.)	109.6 (3.0) (20.04.)	102.7 (2.9) (13.04.)	-12.8 (4.5)	0.000	***
ECLM	115.2 (3.1) (25.04.)	116.4 (2.1) (26.04.)	109.4 (3.2) (19.04.)	102.1 (2.3) (12.04.)	-13.1 (3.8)	0.000	***
HCLM	115.1 (2.8) (25.04.)	110.1 (3.4) (20.04.)	104.0 (2.5) (14.04.)	101.0 (3.1) (11.04.)	-14.1 (4.1)	0.000	***
WETTR0	115.1 (1.4) (25.04.)	114.2 (1.6) (24.04.)	104.8 (1.9) (15.04.)	96.5 (1.4) (06.04.)	-18.7 (1.9)	0.000	***
WETTR1	115.5 (1.6) (25.04.)	113.6 (1.7) (24.04.)	105.4 (1.9) (15.04.)	96.8 (1.9) (07.04.)	-18.7 (2.5)	0.000	***
M-Mittel	115.3 (1.3) (25.04.)	114.3 (3.3) (24.04.)	106.6 (3.0) (17.04.)	99.8 (3.4) (10.04.)	-15.5 (3.5)	0.001	***

Tabelle C.3: Blühbeginn bei der **Süßkirsche**, berechnet mit Modell 29ga (DL=1).[Beobachtet (1971-2000): 108.9 (2.8)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	109.0 (2.6) (19.04.)						
RUBA	110.3 (3.4) (20.04.)	112.0 (2.5) (22.04.)	104.0 (3.1) (14.04.)	97.3 (2.9) (07.04.)	-13.0 (4.4)	0.000	***
ECLM	110.0 (3.1) (20.04.)	110.7 (2.0) (21.04.)	103.6 (3.3) (14.04.)	96.8 (2.3) (07.04.)	-13.2 (3.8)	0.000	***
HCLM	109.8 (3.0) (20.04.)	104.6 (3.6) (15.04.)	99.2 (2.4) (09.04.)	96.0 (3.0) (06.04.)	-13.8 (4.1)	0.000	***
WETTR0	109.8 (1.6) (20.04.)	108.2 (1.7) (18.04.)	99.2 (1.9) (09.04.)	91.6 (1.4) (02.04.)	-18.2 (2.0)	0.000	***
WETTR1	110.3 (1.8) (20.04.)	108.3 (1.8) (18.04.)	100.1 (1.8) (10.04.)	92.0 (1.9) (02.04.)	-18.2 (2.5)	0.000	***
M-Mittel	110.0 (1.3) (20.04.)	108.8 (3.2) (19.04.)	101.2 (2.7) (11.04.)	94.7 (3.1) (05.04.)	-15.3 (3.2)	0.000	***

Tabelle C.4: Blühbeginn bei der **Birne**, berechnet mit Modell 29ga (DL=1).[Beobachtet (1971-2000): 112.9 (3.3)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	111.8 (3.2) (22.04.)						
RUBA	113.8 (4.1) (24.04.)	115.3 (2.9) (25.04.)	104.7 (4.1) (15.04.)	96.1 (3.8) (06.04.)	-17.8 (5.5)	0.000	***
ECLM	113.1 (3.6) (23.04.)	114.0 (2.3) (24.04.)	104.8 (4.3) (15.04.)	95.8 (3.0) (06.04.)	-17.3 (4.6)	0.000	***
HCLM	112.4 (3.6) (22.04.)	106.1 (4.3) (16.04.)	99.2 (2.9) (09.04.)	95.9 (3.8) (06.04.)	-16.5 (5.1)	0.000	***
WETTR0	112.8 (1.7) (23.04.)	110.5 (2.2) (20.04.)	99.4 (2.4) (09.04.)	88.9 (1.6) (30.03.)	-23.9 (2.3)	0.000	***
WETTR1	113.2 (2.0) (23.04.)	110.5 (2.2) (21.04.)	100.6 (2.3) (11.04.)	89.9 (2.3) (31.03.)	-23.4 (3.0)	0.000	***
M-Mittel	113.1 (1.5) (23.04.)	111.3 (4.1) (21.04.)	101.7 (3.1) (12.04.)	93.3 (4.2) (03.04.)	-19.8 (4.3)	0.001	***

Tabelle C.5: Blühbeginn bei der **Erdbeere**, berechnet mit Modell 29ga (DL=1).[Beobachtet (1971-1990): 125.6 (2.8)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	125.6 ^a (2.2) (06.05.)						
RUBA	124.6 (3.5) (05.05.)	126.8 (2.5) (07.05.)	119.0 (2.9) (29.04.)	109.6 (3.2) (20.04.)	-15.0 (4.6)	0.000	***
ECLM	124.6 (2.9) (05.05.)	126.6 (1.9) (07.05.)	119.7 (3.0) (30.04.)	110.7 (2.5) (21.04.)	-13.9 (3.7)	0.000	***
HCLM	124.1 (2.8) (04.05.)	119.9 (3.1) (30.04.)	111.6 (2.6) (22.04.)	108.0 (3.4) (18.04.)	-16.1 (4.3)	0.000	***
WETTR0	124.4 (1.1) (04.05.)	123.0 (1.6) (03.05.)	114.0 (1.9) (24.04.)	102.9 (1.7) (13.04.)	-21.5 (2.0)	0.000	***
WETTR1	124.6 (1.6) (05.05.)	121.7 (1.7) (02.05.)	113.0 (1.9) (23.04.)	102.6 (1.9) (13.04.)	-21.9 (2.5)	0.000	***
M-Mittel	124.5 (1.4) (04.05.)	123.6 (3.7) (04.05.)	115.5 (4.3) (25.04.)	106.8 (4.4) (17.04.)	-17.7 (4.6)	0.008	***

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

Tabelle C.6: Blühbeginn beim **Wein**, berechnet mit Modell 29ga (DL=2).[Beobachtet (1971-2000): 167.6 (3.0)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	166.6 (2.6) (16.06.)						
RUBA	166.9 (3.1) (16.06.)	169.1 (3.0) (18.06.)	161.8 (2.4) (11.06.)	154.6 (2.3) (04.06.)	-12.3 (3.8)	0.000	***
ECLM	167.8 (3.7) (17.06.)	168.8 (3.6) (18.06.)	164.4 (3.4) (13.06.)	155.9 (2.4) (05.06.)	-11.9 (4.3)	0.000	***
HCLM	169.1 (4.2) (18.06.)	163.8 (2.7) (13.06.)	157.2 (3.3) (06.06.)	151.9 (2.8) (01.06.)	-17.2 (5.0)	0.000	***
WETTR0	166.4 (1.4) (15.06.)	165.6 (1.3) (15.06.)	156.5 (1.2) (06.06.)	148.9 (1.4) (29.05.)	-17.5 (2.0)	0.000	***
WETTR1	166.0 (1.5) (15.06.)	165.3 (1.8) (14.06.)	158.0 (1.7) (07.06.)	149.6 (1.2) (30.05.)	-16.5 (1.9)	0.000	***
M-Mittel	167.3 (1.8) (16.06.)	166.5 (2.6) (16.06.)	159.6 (3.9) (09.06.)	152.2 (3.6) (01.06.)	-15.1 (3.8)	0.001	***

Tabelle C.7: Beginn des **Austriebs** beim **Wein**, berechnet mit Modell 29ga (DL=2).[Beobachtet (1971-2000): 117.7 (3.1)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	118.6 (2.2) (29.04.)						
RUBA	119.9 (3.5) (30.04.)	122.9 (2.8) (03.05.)	116.0 (2.5) (26.04.)	110.9 (2.6) (21.04.)	-9.0 (4.3)	0.010	***
ECLM	119.5 (3.3) (30.04.)	122.6 (2.4) (03.05.)	117.3 (2.8) (27.04.)	111.4 (2.5) (21.04.)	-8.1 (4.0)	0.016	***
HCLM	120.7 (3.0) (01.05.)	117.1 (3.1) (27.04.)	109.6 (2.7) (20.04.)	107.7 (3.0) (18.04.)	-13.0 (4.2)	0.000	***
WETTR0	119.1 (1.5) (29.04.)	118.2 (1.6) (28.04.)	109.8 (2.1) (20.04.)	100.4 (1.5) (10.04.)	-18.7 (2.1)	0.000	***
WETTR1	118.3 (1.7) (28.04.)	116.7 (1.7) (27.04.)	109.2 (1.9) (19.04.)	100.4 (2.0) (10.04.)	-17.9 (2.5)	0.000	***
M-Mittel	119.5 (1.4) (30.04.)	119.5 (3.6) (30.04.)	112.3 (4.9) (22.04.)	106.2 (6.8) (16.04.)	-13.3 (7.1)	0.644	**

Tabelle C.8: Blühbeginn beim **Pfirsich**, berechnet mit Modell 29ga (DL=1).[Beobachtet (1971-1990): 107.3 (4.8)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	107.3 ^a (3.2) (17.04.)						
RUBA	107.6 (4.0) (18.04.)	107.8 (2.7) (18.04.)	97.2 (4.2) (07.04.)	86.6 (4.1) (28.03.)	-21.0 (5.6)	0.000	***
ECLM	106.8 (3.6) (17.04.)	106.7 (2.2) (17.04.)	97.7 (4.3) (08.04.)	87.7 (3.1) (29.03.)	-19.1 (4.7)	0.000	***
HCLM	105.1 (3.6) (15.04.)	100.0 (4.4) (10.04.)	91.6 (2.8) (02.04.)	88.0 (3.6) (29.03.)	-17.1 (5.0)	0.000	***
WETTR0	106.6 (1.6) (17.04.)	102.5 (2.3) (13.04.)	92.7 (2.4) (03.04.)	80.7 (1.9) (22.03.)	-25.9 (2.4)	0.000	***
WETTR1	107.0 (2.0) (17.04.)	102.8 (2.3) (13.04.)	92.3 (2.4) (02.04.)	81.1 (2.3) (22.03.)	-26.0 (3.0)	0.000	***
M-Mittel	106.6 (1.5) (17.04.)	104.0 (3.6) (14.04.)	94.3 (3.3) (04.04.)	84.8 (4.2) (26.03.)	-21.8 (4.3)	0.000	***

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

Tabelle C.9: Blühbeginn bei der **Aprikose**, berechnet mit Modell 29ga (DL=1).[Beobachtet (1971-1990): 101.2 (5.3)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	97.2 ^a (3.9) (07.04.)						
RUBA	97.5 (4.5) (08.04.)	96.8 (3.1) (07.04.)	86.3 (4.6) (27.03.)	78.4 (4.2) (19.03.)	-19.1 (6.0)	0.000	***
ECLM	96.6 (4.2) (07.04.)	95.0 (2.6) (05.04.)	86.7 (4.3) (28.03.)	78.4 (3.2) (19.03.)	-18.2 (5.2)	0.000	***
HCLM	94.9 (4.2) (05.04.)	90.5 (4.7) (01.04.)	83.1 (3.4) (24.03.)	80.8 (3.7) (22.03.)	-14.1 (5.5)	0.000	***
WETTR0	95.2 (2.1) (05.04.)	91.3 (2.8) (01.04.)	82.2 (2.6) (23.03.)	71.5 (1.9) (12.03.)	-23.7 (2.7)	0.000	***
WETTR1	95.7 (2.2) (06.04.)	91.8 (2.8) (02.04.)	82.6 (2.4) (24.03.)	73.2 (2.4) (14.03.)	-22.5 (3.1)	0.000	***
M-Mittel	96.0 (1.5) (06.04.)	93.1 (2.8) (03.04.)	84.2 (2.5) (25.03.)	76.4 (4.6) (17.03.)	-19.5 (4.6)	0.001	***

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

Tabelle C.10: Blühbeginn bei der **Pflaume**, berechnet mit Modell 29ga (DL=1).[Beobachtet (1971-1990): 113.0 (4.5)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	111.8 ^a (3.5) (22.04.)						
RUBA	111.8 (4.2) (22.04.)	113.3 (2.9) (23.04.)	102.6 (4.1) (13.04.)	93.9 (3.9) (04.04.)	-18.0 (5.6)	0.000	***
ECLM	111.1 (3.8) (21.04.)	112.0 (2.4) (22.04.)	102.6 (4.3) (13.04.)	93.7 (3.0) (04.04.)	-17.4 (4.7)	0.000	***
HCLM	110.3 (3.6) (20.04.)	104.0 (4.4) (14.04.)	97.2 (3.0) (07.04.)	93.7 (3.8) (04.04.)	-16.6 (5.1)	0.000	***
WETTR0	110.8 (1.8) (21.04.)	108.1 (2.3) (18.04.)	97.2 (2.4) (07.04.)	86.7 (1.6) (28.03.)	-24.1 (2.3)	0.000	***
WETTR1	111.3 (2.1) (21.04.)	108.5 (2.2) (18.04.)	98.5 (2.3) (08.04.)	87.6 (2.2) (29.03.)	-23.7 (3.0)	0.000	***
M-Mittel	111.1 (1.5) (21.04.)	109.2 (4.3) (19.04.)	99.6 (3.1) (10.04.)	91.1 (4.2) (01.04.)	-19.9 (4.3)	0.001	***

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

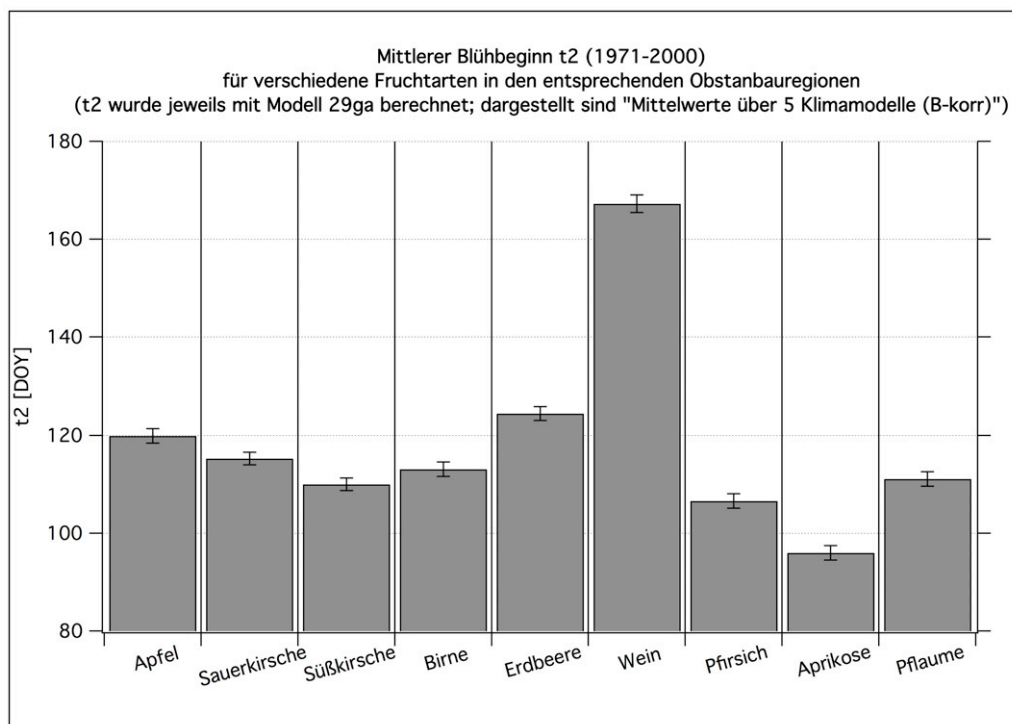


Abbildung C.1: Termin des **mittleren Blühbeginns** t_2 für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein). Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

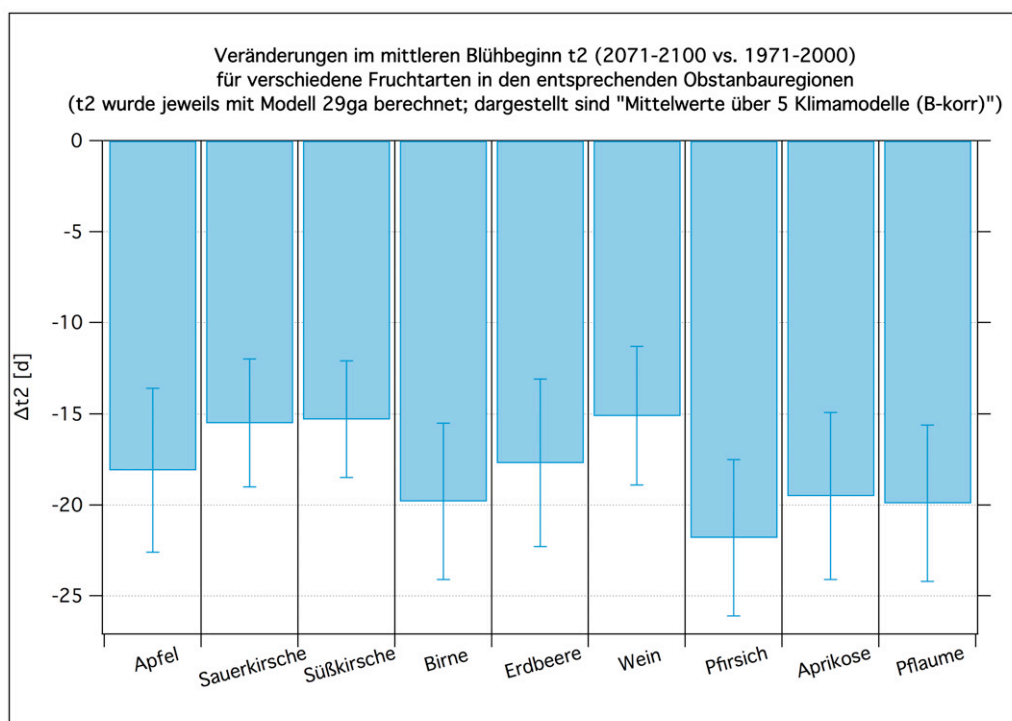


Abbildung C.2: Veränderung des Termins des **mittleren Blühbeginns** t_2 für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein). Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

D Ergebnisse für die Blühdauer

Die Blühdauer wird als Differenz aus dem Termin des Blühendes und des Blühbeginns berechnet. Zur Berechnung des Blühendes wurde Modell 10a ohne DAYLENGTH-Term¹ benutzt (siehe Kapitel 4.6.2 und Tabelle A.1; die optimierten Parameter findet man in Tabelle 4.14).

Die in den Tabellen unter “DWD” angegebenen Werte sind keine regionalisierten Beobachtungswerte der Blühdauer, sondern diese Blühdauer-Werte wurden aus Konsistenzgründen wie die anderen Werte mit Modell 10a aus Temperaturen berechnet, nur das hier regionalisierte, beobachtete Temperaturen anstelle von Temperaturvorhersagen der Klimamodelle benutzt wurden. Allerdings wurde der Blühbeginn nicht wie bei den regionalen Klimamodellen mit Modell 29ga berechnet, sondern aus den regionalisierten, beobachteten DWD-Werten bestimmt. Die so berechneten Mittelwerte sind aber fast identisch mit den Differenzen aus regionalisierten Beobachtungswerten sowohl des Blühendes als auch des Blühbeginns.² Der Mittelwert der Blühdauer über die 19 Obstanbaugitterpunkte und die Zeitspanne 1971-2000 beträgt bei der hier verwendeten Methode und beim frühreifen Apfel 13.2 Tage. Die Differenz “beobachtetes Blühende - beobachteter Blühbeginn” unterscheidet sich mit 13.4 Tagen nur minimal von diesem Wert.

Die Blühdauer unterscheidet sich bei den frühreifenden und spätreifenden Sorten nur sehr wenig, so dass bei der Blühdauer im Folgenden nicht weiter zwischen früh- und spätreifenden Sorten unterschieden wird. Da die Datenbasis beim *frühreifen* Apfel wesentlich besser ist als beim *spätreifen* (siehe Tabelle 4.5), wurden immer, wenn benötigt (z. B. zur Eichung der Modelle), die Daten des frühreifen Apfels verwendet.

Die Tabellen zeigen 30-jährige Mittelwerte der Blühdauer (in Tagen) über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. über die 8 Weinbau-Gitterpunkte bei Wein) (vgl. Abschnitt 4.5) mit einseitigem 95%-Konfidenzintervall in Klammern (in Tagen) für vier 30-jährige Zeitabschnitte sowie die Differenz ‘(2071-2100)-(1971-2000)’ (in Tagen) und den p-Wert (in %) zur H0: “Differenz gleich null” und H1: “Differenz ungleich null”. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$. Zum Aufbau der Tabellen und zu den benutzen Zeitabschnitten beachte man auch die Bemerkungen am Anfang des Anhangs B.

¹ Dieser bewirkt wegen des kurzen Zeitraums zwischen Blühbeginn und Blühende keine merkliche Verbesserung.

² Die regionalisierten Beobachtungswerte des Blühendes werden in eckigen Klammern in der Tabellenlegende angegeben.

Tabelle D.1: Blühdauer beim **Apfel** [Blühbeginn berechnet mit Modell 29ga (DL=1); Blühende mit Modell 10a (DL=0)]. [Beobachtetes Blühende (1971-2000): 133.5 (2.5)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	13.2 (0.6)						
RUBA	12.6 (0.4)	13.2 (0.6)	13.4 (0.6)	13.6 (0.7)	1.0 (0.8)	1.101	*
ECLM	12.8 (0.6)	13.2 (0.7)	13.6 (0.7)	14.3 (0.4)	1.5 (0.7)	0.006	***
HCLM	13.2 (0.6)	13.6 (0.5)	13.7 (0.5)	13.1 (0.4)	-0.1 (0.7)	80.109	
WETTR0	13.0 (0.4)	13.0 (0.4)	13.7 (0.5)	14.0 (0.4)	1.0 (0.5)	0.026	***
WETTR1	12.8 (0.4)	13.4 (0.3)	13.4 (0.4)	14.1 (0.5)	1.3 (0.6)	0.007	***
M-Mittel	12.9 (0.3)	13.3 (0.3)	13.6 (0.3)	13.8 (0.5)	0.9 (0.6)	0.284	**

Tabelle D.2: Blühdauer bei der **Sauerkirsche** [Blühbeginn berechnet mit Modell 29ga (DL=1); Blühende mit Modell 10a (DL=0)]. [Beobachtetes Blühende (1971-2000): 128.5 (2.2)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	13.0 (0.6)						
RUBA	12.4 (0.5)	13.0 (0.7)	13.2 (0.6)	13.1 (0.6)	0.7 (0.7)	5.967	
ECLM	12.5 (0.6)	13.2 (0.7)	13.4 (0.6)	13.7 (0.5)	1.2 (0.7)	0.151	**
HCLM	13.0 (0.6)	13.5 (0.6)	13.1 (0.4)	12.7 (0.4)	-0.3 (0.7)	45.036	
WETTR0	12.8 (0.4)	12.8 (0.4)	13.4 (0.5)	13.4 (0.4)	0.6 (0.5)	2.437	*
WETTR1	12.6 (0.4)	12.9 (0.4)	12.9 (0.4)	13.4 (0.5)	0.8 (0.6)	0.883	**
M-Mittel	12.7 (0.3)	13.1 (0.3)	13.2 (0.3)	13.3 (0.4)	0.6 (0.5)	1.385	*

Tabelle D.3: Blühdauer bei der **Süßkirsche** [Blühbeginn berechnet mit Modell 29ga (DL=1); Blühende mit Modell 10a (DL=0)]. [Beobachtetes Blühende (1971-2000): 123.0 (2.3)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	13.7 (0.7)						
RUBA	13.3 (0.5)	13.7 (0.7)	13.9 (0.7)	13.8 (0.6)	0.5 (0.8)	18.553	
ECLM	13.2 (0.6)	14.0 (0.7)	14.1 (0.6)	14.1 (0.5)	0.9 (0.7)	2.233	*
HCLM	13.6 (0.7)	14.1 (0.8)	13.2 (0.4)	13.2 (0.7)	-0.4 (0.9)	40.593	
WETTR0	13.7 (0.4)	14.1 (0.5)	14.2 (0.6)	13.7 (0.4)	0.0 (0.6)	94.253	
WETTR1	13.3 (0.5)	13.5 (0.5)	13.5 (0.4)	13.5 (0.4)	0.1 (0.7)	65.901	
M-Mittel	13.4 (0.3)	13.9 (0.3)	13.8 (0.4)	13.7 (0.3)	0.2 (0.4)	26.754	

Tabelle D.4: Blühdauer bei der **Birne** [Blühbeginn berechnet mit Modell 29ga (DL=1); Blühende mit Modell 10a (DL=0)]. [Beobachtetes Blühende (1971-2000): 126.4 (2.7)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	13.3 (0.6)						
RUBA	12.7 (0.5)	13.3 (0.7)	13.9 (0.7)	13.8 (0.7)	1.1 (0.8)	0.966	**
ECLM	12.8 (0.6)	13.5 (0.7)	14.0 (0.7)	14.1 (0.6)	1.3 (0.8)	0.257	**
HCLM	13.3 (0.7)	13.9 (0.8)	13.3 (0.4)	13.2 (0.7)	-0.1 (1.0)	85.602	
WETTR0	13.2 (0.4)	13.6 (0.5)	14.1 (0.5)	13.8 (0.4)	0.6 (0.5)	2.641	*
WETTR1	12.8 (0.5)	13.2 (0.5)	13.5 (0.4)	13.4 (0.4)	0.6 (0.6)	7.365	
M-Mittel	13.0 (0.3)	13.5 (0.3)	13.7 (0.4)	13.7 (0.4)	0.7 (0.5)	0.412	**

Tabelle D.5: Blühdauer beim **Wein** [Blühbeginn berechnet mit Modell 29ga (DL=2); Blühende mit Modell 10a (DL=0)]. [Beobachtetes Blühende (1971-2000): 178.4 (3.0)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	10.8 (0.4)						
RUBA	10.9 (0.3)	10.5 (0.3)	10.6 (0.3)	10.0 (0.2)	-1.0 (0.4)	0.000	***
ECLM	10.7 (0.4)	10.3 (0.4)	10.5 (0.4)	9.7 (0.3)	-1.0 (0.5)	0.004	***
HCLM	10.9 (0.3)	10.7 (0.3)	10.3 (0.3)	10.0 (0.3)	-0.9 (0.4)	0.004	***
WETTR0	10.6 (0.2)	10.6 (0.2)	10.2 (0.3)	10.3 (0.3)	-0.3 (0.4)	13.784	
WETTR1	10.7 (0.3)	10.5 (0.3)	10.3 (0.2)	10.5 (0.3)	-0.2 (0.4)	32.028	
M-Mittel	10.7 (0.2)	10.5 (0.2)	10.4 (0.2)	10.1 (0.4)	-0.7 (0.4)	0.339	**

Tabelle D.6: Blühdauer bei der **Pflaume** [Blühbeginn berechnet mit Modell 29ga (DL=1); Blühende mit Modell 10a (DL=0)]. [Beobachtetes Blühende (1971-1990): 125.6 (3.8)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	12.3 ^a (0.6)						
RUBA	12.0 (0.5)	12.4 (0.6)	13.0 (0.7)	12.9 (0.7)	0.9 (0.9)	4.632	*
ECLM	12.1 (0.6)	12.7 (0.7)	13.1 (0.6)	13.1 (0.5)	1.0 (0.8)	2.262	*
HCLM	12.5 (0.7)	12.9 (0.8)	12.3 (0.5)	12.3 (0.7)	-0.2 (0.9)	71.016	
WETTR0	12.5 (0.4)	13.0 (0.5)	13.1 (0.6)	12.8 (0.4)	0.4 (0.5)	18.291	
WETTR1	12.0 (0.5)	12.5 (0.5)	12.7 (0.4)	12.4 (0.5)	0.4 (0.6)	24.344	
M-Mittel	12.2 (0.3)	12.7 (0.3)	12.9 (0.4)	12.7 (0.3)	0.5 (0.4)	2.481	*

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

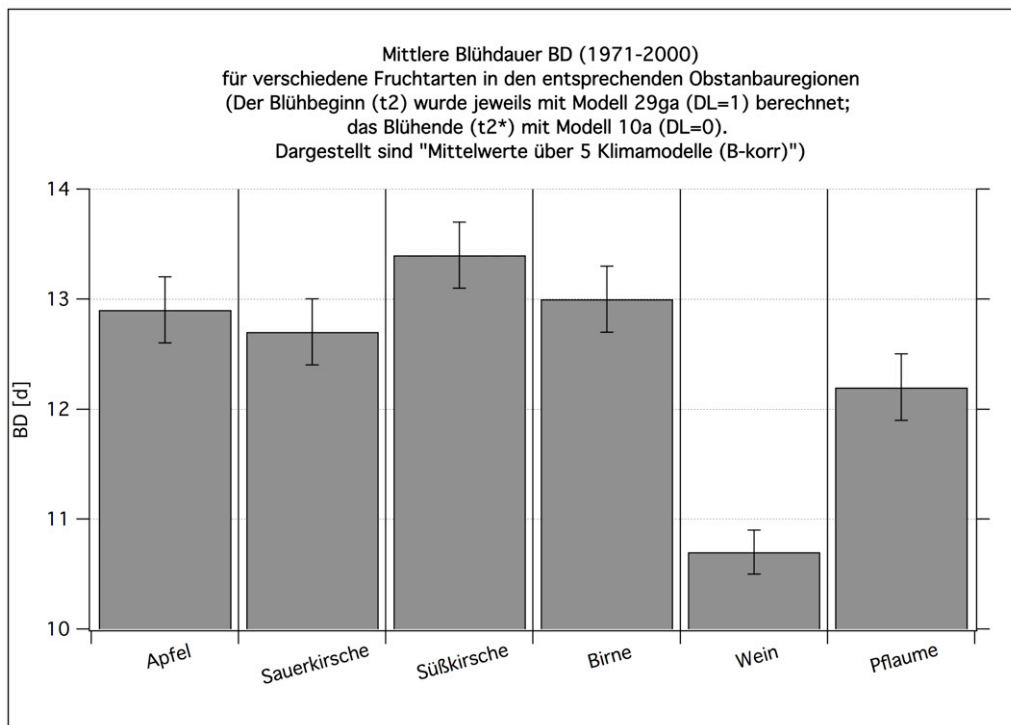


Abbildung D.1: Mittlere Blühdauer für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein). Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

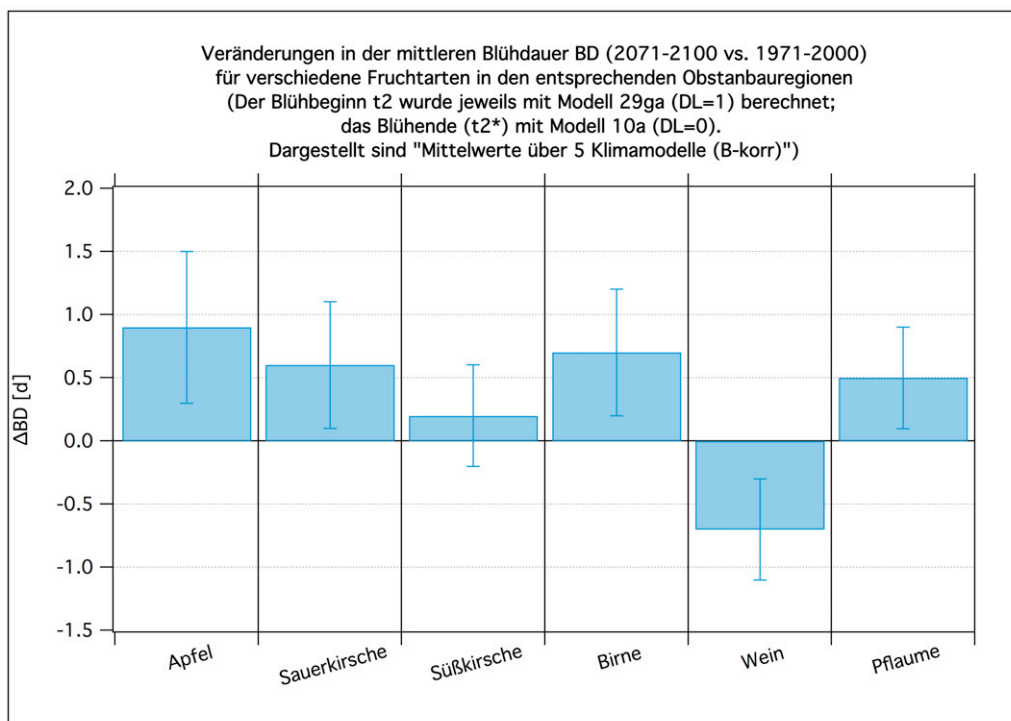


Abbildung D.2: Veränderung der mittleren Blühdauer für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein). Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

E Ergebnisse für den Beginn der Pflückreife

In diesem Abschnitt werden alle Ergebnisse für den *Beginn der Pflückreife* für die Obstarten, für die phänologische Beobachtungen dieses Termins vorlagen (vgl. Tabelle 4.5), dargestellt.

Zunächst werden in **Tabelle E.1** die mittleren beobachteten Reife-Termine gelistet.¹ Die Werte sind Mittelwerte für den Zeitraum 1971-2000 über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bei Wein über die 8 Weinbaugitterpunkte)² und wurden aus den regionalisierten phänologischen Beobachtungen des DWD (Kapitel 4.2.3) bestimmt. Die 95%-Konfidenzintervalle in der Tabelle und den Abbildungen beziehen sich auf die 30-jährigen (bzw. 19-jährigen) *Mittelwerte* über die 19 (8) Obstanbaugitterpunkte (Weinbaugitterpunkte). Die Konfidenzintervalle der *jährlichen*, über die 19 bzw. 8 Gitterpunkte gemittelten Reifetermine sind ca. um den Faktor $\sqrt{30} = 5.5$ bzw. $\sqrt{19} = 4.4$ größer. In Abbildung E.1 auf Seite 326 sind die in der Tabelle gelisteten mittleren Reifetermine graphisch dargestellt.

Man beachte, dass die räumliche Variation des Reifetermins (für jeweils festgehaltenes Jahr) auch ziemlich große Werte aufweist.³ So liegt die räumliche Standardabweichung des Reifetermins innerhalb der 19 Obstanbaugitterpunkte (für jeweils festes Jahr) im Zeitraum 1971-2000 zwischen 4 d und 10 d.

Die Tabellen E.2 bis E.13 wurden mit den optimierten Modelle 10a-R bzw. 12a-R (siehe Kapitel 4.6.3 und Tabelle 4.15) mit Hilfe der Tagesmitteltemperaturen der 5 regionalen Klimamodelle und der beobachteten DWD-Werte für die vier 30-Jahreszeiträume als Mittelwerte berechnet. In den Klammern hinter dem Mittelwert (in DOY) wird jeweils das 95%-Konfidenzintervall (in Tagen) angegeben, darunter in Klammern der mittlere Eintrittstermin als normales Datum. Der p-Wert in der vorletzten Spalte bezieht sich jeweils auf die Differenz [(2071-2100)-(1971-2000)] in der *Differenz*-Spalte.

Schließlich sind in Abbildung E.2 die mit den Modellen 10a-R und 12a-R berechneten und “über die 5 Klimamodellläufe” gemittelten Reifetermine visualisiert. Die Werte stimmen sehr gut mit den beobachteten der Abbildung E.1 überein. Nur bei der Erdbeere und der Reife vom Wein gibt es Unterschiede von 5 bzw. 8 Tagen. Diese sind darauf zurückzuführen, dass die Mittelbildung bei den Beobachtungswerten nur über den Zeitraum 1971-1990 bei der Erdbeere und 1991-2009 beim Wein erfolgte (vgl. Tabelle E.1), bei den fünf modellierten Werten wurde hingegen einheitlich über den Zeitraum 1971-2000 gemittelt.

In Abbildung E.3 wurden dann noch die Veränderungen im mittleren Beginn der Pflückreife geplottet. Die Verfrühungen dieses Termins betragen im Zeitraum 2071-2100 gegenüber 1971-2000 zwischen -11.5 Tagen beim spätreifen Apfel und -21.1 Tagen bei der

¹ Diese beobachteten Termine werden zum Vergleich mit den modellierten Werten auch jeweils am Ende der Tabellenüberschrift der Tabellen E.2 bis E.13 in eckigen Klammern angegeben.

² Bei der Erdbeere ergibt die Auswertung nur für die 4 Erdbeergitterpunkte (Abschnitt 4.5) den Mittelwert 165 DOY, der nur um einen Tag vom Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte, der in Tabelle E.1 gelistet wird, abweicht. Das 95%-Konfidenzintervall beträgt dann ± 2.4 d.

³ Die Werte an benachbarten Gitterpunkten (im jeweils selben Jahr) sind aber im Gegensatz zu den räumlichen Mittelwerten in aufeinander folgenden Jahren stark miteinander korreliert!

Weinlese.

Alle hier aufgeführten Aussagen über die Reifetermine sind wegen der am Ende von Abschnitt 4.6.3 auf Seite 72 erwähnten Probleme relativ unsicher.

Tabelle E.1: Termin des **mittleren Beginns der Pflückreife t_3** (Mittelwert über 1971-2000) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein) aus regionalisierten DWD-Beobachtungen. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

Obstart	Reifebeginn [DOY]	Konf95 [d]	Datum	Bemerkung
Apfel (frühreif)	216	± 2.1	04.08.	(1971-2000)
Apfel (spätfrühreif ^a)	281	± 1.6	08.10.	(1971-2000)
Sauerkirsche	197	± 2.6	16.07.	(1971-2000)
Süßkirsche (frühreif)	175	± 2.2	24.06.	(1971-2000)
Süßkirsche (spätreif)	188	± 2.7	07.07.	(1971-2000)
Birne (frühreif)	241	± 2.4	29.08.	(1971-2000)
Birne (spätreif)	274	± 2.3	01.10.	(1971-2000)
Erdbeere	166	± 2.3	15.06.	(1971-1990)
Wein (Reife)	235	± 4.1	23.08.	(1991-2009; Mittel über die 8 Weinbaupixel)
Wein (Lese)	273	± 2.7	30.09.	(1971-2000; Mittel über die 8 Weinbaupixel)
Pflaume (frühreif)	226	± 3.6	14.08.	(1971-1990)
Pflaume (spätreif)	257	± 3.0	14.09.	(1971-1990)

^a Gemäß der Angaben vom DWD wurden Boskop, Jonagold und Idared berücksichtigt.

Tabelle E.2: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) beim **frühreifen Apfel**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$. [Beobachtete Pflückreife (1971-2000): 215.7 (2.1)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	214.7 (1.8) (03.08.)						
RUBA	214.7 (2.1) (03.08.)	214.3 (1.7) (02.08.)	209.0 (1.7) (28.07.)	201.9 (1.7) (21.07.)	-12.8 (2.7)	0.000	***
ECLM	214.8 (2.0) (03.08.)	213.5 (1.9) (01.08.)	209.5 (2.0) (29.07.)	201.5 (1.6) (21.07.)	-13.3 (2.5)	0.000	***
HCLM	214.9 (2.4) (03.08.)	211.0 (1.9) (30.07.)	205.8 (2.2) (25.07.)	200.8 (2.0) (20.07.)	-14.1 (3.1)	0.000	***
WETTR0	214.7 (1.0) (03.08.)	212.7 (1.2) (01.08.)	205.1 (1.2) (24.07.)	197.6 (0.9) (17.07.)	-17.1 (1.3)	0.000	***
WETTR1	214.1 (1.0) (02.08.)	212.3 (1.3) (31.07.)	205.5 (1.2) (24.07.)	198.2 (0.7) (17.07.)	-15.9 (1.2)	0.000	***
M-Mittel	214.6 (1.0) (03.08.)	212.8 (1.4) (01.08.)	207.0 (2.4) (26.07.)	200.0 (2.3) (19.07.)	-14.6 (2.3)	0.000	***

Tabelle E.3: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) beim **spätreifen Apfel**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%. [Beobachtete Pflückreife (1971-2000): 280.6 (1.6)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	279.8 (1.2) (07.10.)						
RUBA	279.7 (1.6) (07.10.)	279.4 (1.1) (06.10.)	275.3 (1.2) (02.10.)	269.6 (1.2) (27.09.)	-10.1 (1.9)	0.000	***
ECLM	279.8 (1.6) (07.10.)	278.7 (1.1) (06.10.)	275.0 (1.4) (02.10.)	268.9 (1.3) (26.09.)	-10.8 (2.0)	0.000	***
HCLM	279.9 (1.4) (07.10.)	276.8 (1.4) (04.10.)	272.3 (1.5) (29.09.)	267.7 (1.4) (25.09.)	-12.2 (2.0)	0.000	***
WETTR0	279.8 (0.6) (07.10.)	278.1 (0.7) (05.10.)	272.9 (0.9) (30.09.)	267.4 (0.6) (24.09.)	-12.4 (0.8)	0.000	***
WETTR1	279.5 (0.6) (07.10.)	277.9 (0.7) (05.10.)	273.0 (0.9) (30.09.)	267.4 (0.4) (24.09.)	-12.2 (0.7)	0.000	***
M-Mittel	279.7 (0.7) (07.10.)	278.2 (1.1) (05.10.)	273.7 (1.6) (01.10.)	268.2 (1.1) (25.09.)	-11.5 (1.2)	0.000	***

Tabelle E.4: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) bei der **Sauerkirsche**, berechnet mit Modell 10a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%. [Beobachtete Pflückreife (1971-2000): 197.1 (2.6)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	197.7 (2.4) (17.07.)						
RUBA	195.9 (3.1) (15.07.)	198.5 (2.1) (17.07.)	191.1 (2.1) (10.07.)	182.8 (2.4) (02.07.)	-13.1 (3.9)	0.000	***
ECLM	197.2 (3.0) (16.07.)	198.2 (2.0) (17.07.)	193.1 (2.5) (12.07.)	184.2 (1.9) (03.07.)	-13.1 (3.5)	0.000	***
HCLM	197.3 (3.3) (16.07.)	192.6 (2.4) (12.07.)	185.2 (2.7) (04.07.)	179.8 (2.7) (29.06.)	-17.5 (4.1)	0.000	***
WETTR0	196.4 (1.4) (15.07.)	195.3 (1.3) (14.07.)	185.9 (1.5) (05.07.)	177.0 (1.0) (26.06.)	-19.3 (1.7)	0.000	***
WETTR1	195.6 (1.3) (15.07.)	195.1 (1.5) (14.07.)	186.0 (1.4) (05.07.)	178.1 (0.8) (27.06.)	-17.5 (1.5)	0.000	***
M-Mittel	196.5 (1.6) (15.07.)	195.9 (2.8) (15.07.)	188.3 (4.5) (07.07.)	180.4 (3.8) (29.06.)	-16.1 (3.9)	0.005	***

Tabelle E.5: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) bei der **frühreifen Süßkirsche**, berechnet mit Modell 10a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$. [Beobachtete Pflückreife (1971-2000): 174.8 (2.2)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	174.7 (2.4) (24.06.)						
RUBA	173.6 (3.2) (23.06.)	175.9 (2.5) (25.06.)	168.2 (2.2) (17.06.)	160.3 (2.4) (09.06.)	-13.3 (4.0)	0.000	***
ECLM	174.4 (3.0) (23.06.)	175.2 (2.5) (24.06.)	170.2 (2.7) (19.06.)	161.2 (2.1) (10.06.)	-13.2 (3.6)	0.000	***
HCLM	174.8 (3.4) (24.06.)	169.9 (2.6) (19.06.)	162.5 (2.7) (12.06.)	157.5 (2.6) (06.06.)	-17.3 (4.2)	0.000	***
WETTR0	173.9 (1.3) (23.06.)	173.4 (1.2) (22.06.)	163.7 (1.4) (13.06.)	155.7 (1.0) (05.06.)	-18.3 (1.6)	0.000	***
WETTR1	173.5 (1.4) (23.06.)	172.9 (1.4) (22.06.)	164.3 (1.4) (13.06.)	156.4 (0.8) (05.06.)	-17.1 (1.6)	0.000	***
M-Mittel	174.0 (1.6) (23.06.)	173.5 (2.7) (22.06.)	165.8 (4.1) (15.06.)	158.2 (2.9) (07.06.)	-15.8 (3.0)	0.000	***

Tabelle E.6: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) bei der **spätreifen Süßkirsche**, berechnet mit Modell 10a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$. [Beobachtete Pflückreife (1971-2000): 187.6 (2.7)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	187.3 (2.5) (06.07.)						
RUBA	186.3 (3.2) (05.07.)	188.3 (2.5) (07.07.)	180.9 (2.3) (30.06.)	172.1 (2.5) (21.06.)	-14.2 (4.0)	0.000	***
ECLM	187.1 (3.1) (06.07.)	187.8 (2.6) (07.07.)	183.0 (2.8) (02.07.)	173.1 (2.1) (22.06.)	-14.1 (3.6)	0.000	***
HCLM	187.4 (3.5) (06.07.)	182.5 (2.6) (02.07.)	174.7 (2.8) (24.06.)	169.2 (2.6) (18.06.)	-18.2 (4.3)	0.000	***
WETTR0	186.5 (1.3) (05.07.)	185.6 (1.3) (05.07.)	175.7 (1.4) (25.06.)	167.1 (1.0) (16.06.)	-19.4 (1.6)	0.000	***
WETTR1	185.8 (1.4) (05.07.)	185.0 (1.4) (04.07.)	176.1 (1.5) (25.06.)	168.1 (0.7) (17.06.)	-17.7 (1.6)	0.000	***
M-Mittel	186.6 (1.6) (06.07.)	185.9 (2.6) (05.07.)	178.1 (4.5) (27.06.)	169.9 (3.0) (19.06.)	-16.7 (3.1)	0.000	***

Tabelle E.7: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) bei der **frühreifen Birne**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%. [Beobachtete Pflückreife (1971-2000): 240.6 (2.4)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	240.1 (1.5) (28.08.)						
RUBA	240.2 (2.0) (28.08.)	240.6 (1.3) (29.08.)	235.9 (1.5) (24.08.)	229.3 (1.6) (17.08.)	-10.9 (2.6)	0.000	***
ECLM	240.3 (2.2) (28.08.)	239.6 (1.6) (28.08.)	235.8 (1.9) (24.08.)	228.3 (1.8) (16.08.)	-12.0 (2.8)	0.000	***
HCLM	240.4 (2.1) (28.08.)	236.9 (1.6) (25.08.)	231.3 (1.9) (19.08.)	226.5 (1.7) (14.08.)	-13.9 (2.6)	0.000	***
WETTR0	240.1 (0.7) (28.08.)	238.8 (0.8) (27.08.)	232.1 (0.9) (20.08.)	226.0 (0.7) (14.08.)	-14.2 (1.0)	0.000	***
WETTR1	240.1 (0.8) (28.08.)	238.6 (1.0) (27.08.)	232.3 (1.0) (20.08.)	226.2 (0.6) (14.08.)	-13.9 (1.0)	0.000	***
M-Mittel	240.2 (1.0) (28.08.)	238.9 (1.5) (27.08.)	233.5 (2.5) (21.08.)	227.3 (1.7) (15.08.)	-13.0 (1.8)	0.000	***

Tabelle E.8: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) bei der **spätreifen Birne**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%. [Beobachtete Pflückreife (1971-2000): 274.0 (2.3)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	272.2 (1.5) (29.09.)						
RUBA	272.3 (2.0) (29.09.)	272.1 (1.4) (29.09.)	267.0 (1.6) (24.09.)	259.7 (1.6) (17.09.)	-12.6 (2.5)	0.000	***
ECLM	272.4 (2.1) (29.09.)	271.1 (1.5) (28.09.)	266.5 (1.8) (24.09.)	258.6 (1.7) (16.09.)	-13.7 (2.7)	0.000	***
HCLM	272.4 (1.9) (29.09.)	268.5 (1.7) (26.09.)	262.7 (2.0) (20.09.)	257.1 (1.8) (14.09.)	-15.3 (2.6)	0.000	***
WETTR0	272.3 (0.7) (29.09.)	270.3 (0.9) (27.09.)	263.6 (1.1) (21.09.)	256.8 (0.8) (14.09.)	-15.6 (1.0)	0.000	***
WETTR1	272.0 (0.8) (29.09.)	270.1 (0.9) (27.09.)	263.7 (1.1) (21.09.)	256.6 (0.6) (14.09.)	-15.3 (1.0)	0.000	***
M-Mittel	272.3 (0.9) (29.09.)	270.4 (1.5) (27.09.)	264.7 (2.3) (22.09.)	257.8 (1.5) (15.09.)	-14.5 (1.6)	0.000	***

Tabelle E.9: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) bei der **Erdbeere**, berechnet mit Modell 10a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%. [Beobachtete Pflückreife (1971-1990): 164.6 (2.4)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	162.9 ^a (1.9) (12.06.)						
RUBA	160.8 (3.3) (10.06.)	162.9 (2.4) (12.06.)	155.1 (2.1) (04.06.)	146.4 (2.5) (26.05.)	-14.4 (4.0)	0.000	***
ECLM	161.3 (2.8) (10.06.)	162.6 (2.1) (12.06.)	157.1 (2.6) (06.06.)	148.2 (2.1) (28.05.)	-13.1 (3.5)	0.000	***
HCLM	160.9 (3.0) (10.06.)	156.2 (2.8) (05.06.)	149.0 (2.7) (29.05.)	144.4 (2.8) (24.05.)	-16.4 (4.0)	0.000	***
WETTR0	160.9 (1.1) (10.06.)	159.6 (1.4) (09.06.)	150.3 (1.5) (30.05.)	140.7 (1.2) (21.05.)	-20.2 (1.6)	0.000	***
WETTR1	160.4 (1.4) (09.06.)	159.4 (1.4) (08.06.)	150.2 (1.5) (30.05.)	141.0 (1.2) (21.05.)	-19.4 (1.8)	0.000	***
M-Mittel	160.9 (1.5) (10.06.)	160.1 (3.2) (09.06.)	152.3 (4.5) (01.06.)	144.1 (3.9) (24.05.)	-16.7 (4.0)	0.002	***

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

Tabelle E.10: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) beim **Wein**, berechnet mit Modell 10a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%. [Beobachtete Pflückreife (1991-2009): 235.0 (4.1)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	243.0 ^a (3.1) (31.08.)						
RUBA	242.3 (3.3) (30.08.)	244.1 (3.1) (01.09.)	236.1 (2.6) (24.08.)	227.3 (2.3) (15.08.)	-15.0 (4.0)	0.000	***
ECLM	243.2 (3.9) (31.08.)	243.6 (3.9) (01.09.)	238.4 (3.7) (26.08.)	228.0 (2.6) (16.08.)	-15.2 (4.6)	0.000	***
HCLM	244.5 (4.5) (02.09.)	238.2 (2.8) (26.08.)	230.7 (3.5) (19.08.)	224.3 (2.8) (12.08.)	-20.2 (5.2)	0.000	***
WETTR0	241.6 (1.4) (30.08.)	240.2 (1.4) (28.08.)	229.9 (1.3) (18.08.)	221.2 (1.3) (09.08.)	-20.5 (1.9)	0.000	***
WETTR1	241.3 (1.6) (29.08.)	239.9 (1.8) (28.08.)	231.3 (1.7) (19.08.)	221.9 (1.1) (10.08.)	-19.4 (1.9)	0.000	***
M-Mittel	242.6 (1.9) (31.08.)	241.2 (2.9) (29.08.)	233.3 (4.3) (21.08.)	224.5 (3.6) (13.08.)	-18.1 (3.8)	0.000	***

^a Das ist der Mittelwert über 1971-2000. Der über 1991-2009 gemittelte Reifetermin beträgt 234.6 (3.9).

Tabelle E.11: Statistik für den **Beginn der Lese** (in DOY) beim **Wein**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$. [Beobachtete Weinlese (1971-2000): 273.0 (2.7)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	273.5 (2.1) (30.09.)						
RUBA	273.9 (2.9) (01.10.)	273.4 (2.0) (30.09.)	266.1 (2.3) (23.09.)	255.4 (2.2) (12.09.)	-18.6 (3.5)	0.000	***
ECLM	274.5 (3.2) (01.10.)	272.2 (2.4) (29.09.)	265.5 (2.8) (22.09.)	254.0 (2.6) (11.09.)	-20.5 (4.0)	0.000	***
HCLM	275.2 (2.9) (02.10.)	268.9 (2.3) (26.09.)	260.2 (2.8) (17.09.)	252.5 (2.4) (09.09.)	-22.7 (3.7)	0.000	***
WETTR0	273.2 (1.1) (30.09.)	270.2 (1.3) (27.09.)	260.5 (1.5) (18.09.)	251.1 (1.1) (08.09.)	-22.1 (1.5)	0.000	***
WETTR1	272.7 (1.2) (30.09.)	270.1 (1.4) (27.09.)	261.0 (1.6) (18.09.)	251.0 (0.7) (08.09.)	-21.7 (1.3)	0.000	***
M-Mittel	273.9 (1.4) (01.10.)	270.9 (2.0) (28.09.)	262.7 (3.4) (20.09.)	252.8 (2.1) (10.09.)	-21.1 (2.3)	0.000	***

Tabelle E.12: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) bei der **frühreifen Pflaume**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$. [Beobachtete Pflückreife (1971-1990): 225.7 (3.6)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	226.0 ^a (2.1) (14.08.)						
RUBA	223.5 (2.9) (11.08.)	223.1 (2.3) (11.08.)	216.2 (2.3) (04.08.)	207.5 (2.2) (27.07.)	-16.0 (3.6)	0.000	***
ECLM	223.6 (2.9) (12.08.)	222.0 (2.4) (10.08.)	216.7 (2.6) (05.08.)	206.9 (2.1) (26.07.)	-16.7 (3.4)	0.000	***
HCLM	223.8 (3.1) (12.08.)	218.9 (2.4) (07.08.)	211.8 (2.7) (31.07.)	205.6 (2.5) (25.07.)	-18.3 (3.9)	0.000	***
WETTR0	223.8 (1.2) (12.08.)	221.0 (1.4) (09.08.)	211.4 (1.4) (30.07.)	202.4 (1.1) (21.07.)	-21.5 (1.6)	0.000	***
WETTR1	223.2 (1.1) (11.08.)	220.5 (1.6) (09.08.)	211.8 (1.6) (31.07.)	202.9 (0.9) (22.07.)	-20.2 (1.4)	0.000	***
M-Mittel	223.6 (1.3) (12.08.)	221.1 (1.8) (09.08.)	213.6 (3.1) (02.08.)	205.1 (2.7) (24.07.)	-18.5 (2.8)	0.000	***

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

Tabelle E.13: Statistik für den Beginn der Pflückreife (in DOY) bei der **spätreifen Pflaume**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%. [Beobachtete Pflückreife (1971-1990): 257.3 (3.0)]

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	256.3 ^a (1.9) (13.09.)						
RUBA	254.0 (2.8) (11.09.)	253.8 (2.1) (11.09.)	246.8 (2.1) (04.09.)	237.7 (2.1) (26.08.)	-16.2 (3.5)	0.000	***
ECLM	254.1 (2.9) (11.09.)	252.5 (2.3) (10.09.)	246.6 (2.5) (04.09.)	236.4 (2.3) (24.08.)	-17.6 (3.7)	0.000	***
HCLM	254.3 (2.8) (11.09.)	249.1 (2.3) (06.09.)	241.4 (2.7) (29.08.)	234.4 (2.4) (22.08.)	-19.9 (3.7)	0.000	***
WETTR0	254.2 (1.0) (11.09.)	251.5 (1.2) (09.09.)	242.2 (1.4) (30.08.)	233.2 (1.0) (21.08.)	-21.0 (1.4)	0.000	***
WETTR1	253.8 (1.1) (11.09.)	250.9 (1.3) (08.09.)	242.3 (1.5) (30.08.)	233.6 (0.7) (22.08.)	-20.3 (1.2)	0.000	***
M-Mittel	254.1 (1.3) (11.09.)	251.6 (2.0) (09.09.)	243.9 (3.1) (01.09.)	235.1 (2.1) (23.08.)	-19.0 (2.3)	0.000	***

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

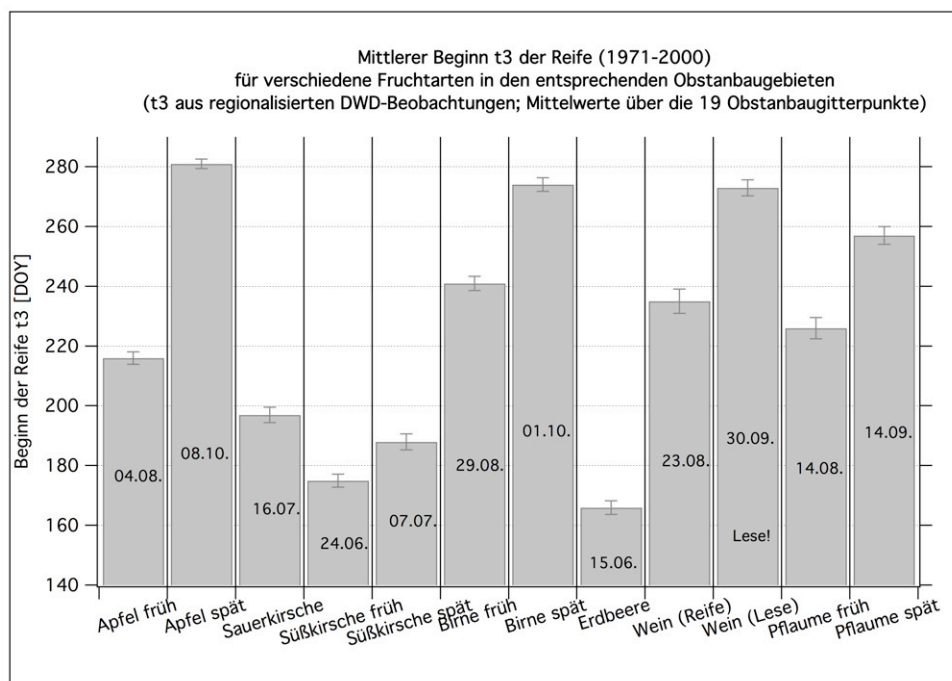


Abbildung E.1: Termin des **mittleren Beginns der Pflückreife t₃** (Mittelwert über 1971-2000; bei Erdbeere über 1971-1990; bei Reife von Wein über 1991-2009) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein) aus **regionalisierten DWD-Beobachtungen**. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

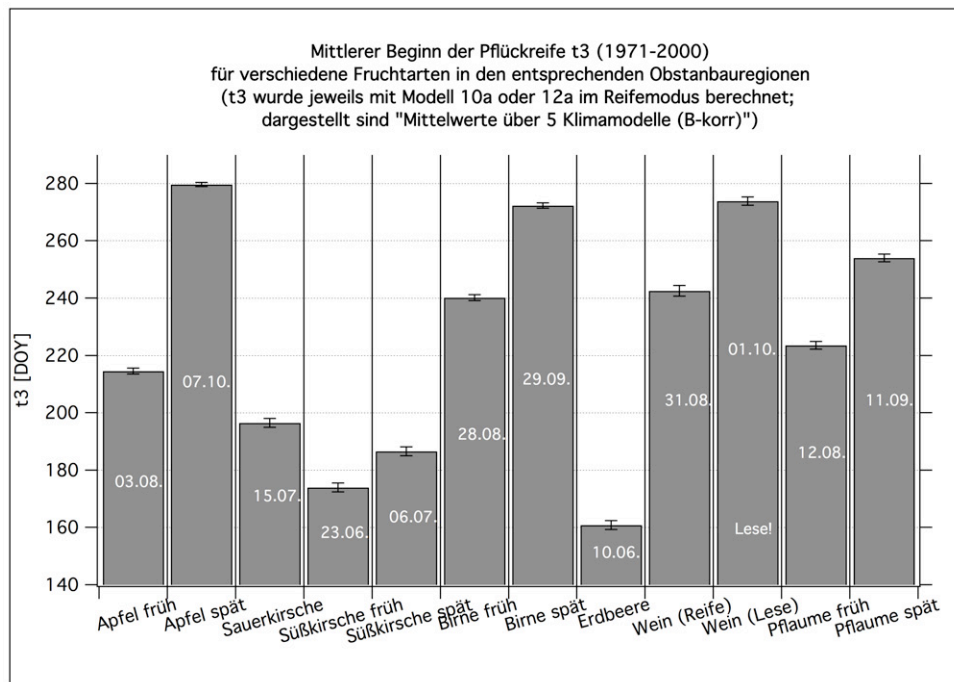


Abbildung E.2: Termin des **mittleren Beginns der Pflückreife t_3** (Mittelwert über 1971-2000) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein bzw. 4 Erdbeergitterpunkte), **berechnet mit Modell 10a-R bzw. 12a-R**. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

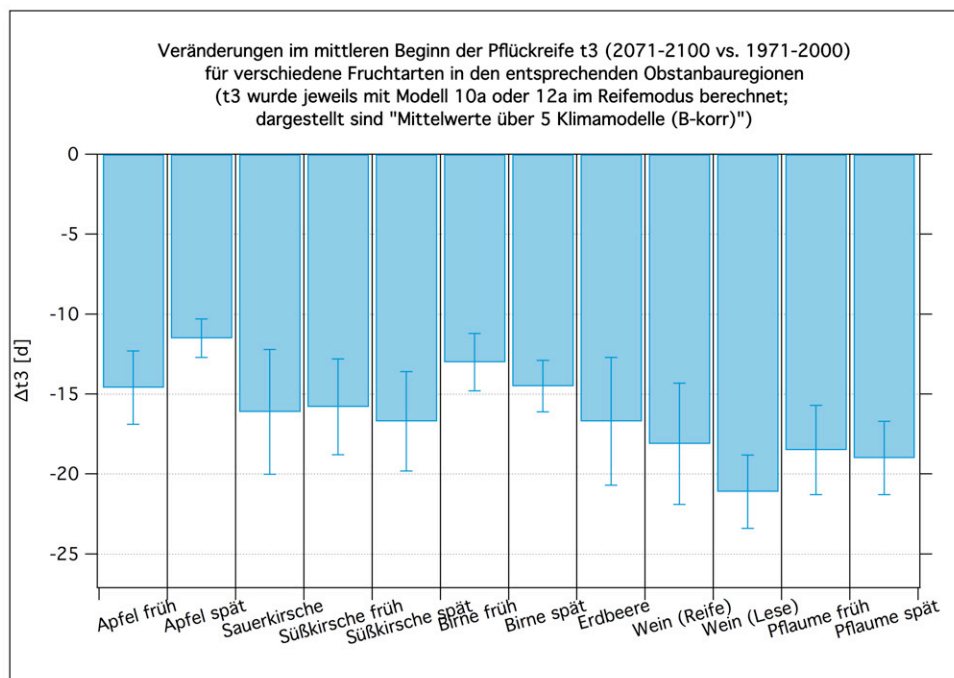


Abbildung E.3: Veränderungen des Termins des **mittleren Beginns der Pflückreife t_3** (2071-2100 vs. 1971-2000) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein bzw. 4 Erdbeergitterpunkte), **berechnet mit Modell 10a-R bzw. 12a-R**. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

F Ergebnisse für die Länge der Reifeperiode

Die folgenden Tabellen zeigen 30-jährige Mittelwerte für die Länge der Reifeperiode und die Veränderung der 30-jährigen Mittelwerte zwischen 1971-2000 und 2071-2100 mit 95%-Konfidenzintervallen (in Klammern) mit zugehörigem p-Wert (für den t-Test). Die *Länge der Reifeperiode* wurde hierbei als Differenz zwischen *Beginn der Pflückreife* (Anhang E; berechnet mit Modell 10a-R bzw. 12a-R) und Blühbeginn (Anhang C; berechnet mit Modell 29ga mit Daylength-Term) berechnet.¹ Als Input für die phänologischen Modelle wurden beobachtete Temperaturen des DWD und der 5 hier betrachteten regionalen Klimamodelle verwendet. Die Zeile *M-Mittel* enthält die Mittelwerte über die Ergebnisse der 5 RCM's (vgl. Kapitel 4.4). Dargestellt sind jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

Die Veränderungen in der Länge der Reifeperiode [(2071-2100)-(1971-2000)] lassen sich in drei Klassen einteilen (vgl. z. B. Abbildung F.2): Die Reifeperiode (Mittel über die 5 Klimamodellläufe und die entsprechenden Obstanbaugitterpunkte) verlängert sich signifikant beim Apfel und der Birne (um 3 bis 7 Tage mit großen Unsicherheitsbereichen). Bei der Kirsche, Erdbeere und Pflaume sind die Veränderungen nur gering und nicht signifikant. Beim Wein verkürzt sich die "Reifeperiode" um ca. 3 Tage bzgl. der Pflückreife und 6 Tage bzgl. der Lese, was auf den späten Blühbeginn zurückzuführen ist (vgl. die Diskussion auf Seite 196).

Alle hier aufgeführten Aussagen über die Reifetermine sind wegen der am Ende von Abschnitt 4.6.3 auf Seite 72 erwähnten Probleme relativ unsicher.

Tabelle F.1: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) beim **frühreifen Apfel**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	94.7 (2.0)						
RUBA	94.5 (2.4)	91.9 (2.3)	95.6 (2.8)	96.9 (2.4)	2.4 (3.3)	15.470	
ECLM	95.0 (2.1)	91.9 (2.3)	96.1 (3.0)	96.7 (2.3)	1.7 (3.1)	26.781	
HCLM	95.3 (2.0)	96.8 (2.5)	99.0 (2.1)	97.2 (2.6)	1.9 (3.3)	24.869	
WETTR0	94.9 (0.9)	94.2 (1.3)	97.0 (1.7)	100.1 (1.3)	5.2 (1.6)	0.000	***
WETTR1	94.2 (1.1)	94.5 (1.2)	96.9 (1.8)	100.1 (2.2)	6.0 (2.4)	0.001	***
M-Mittel	94.8 (0.9)	93.9 (2.3)	96.9 (1.6)	98.2 (1.8)	3.4 (2.0)	0.205	**

¹ Normalerweise wird die Länge der Reifeperiode als Differenz zwischen Reifetermin und Blühendetermin definiert. Wegen der auf Seite 62 erläuterten Probleme wird hier aber anstelle des Blühendetermins der Blühbeginn verwendet. Da sich die berechnete Blühdauer im Modellmittel um weniger als einen Tag zwischen den Zeiträumen 1971-2000 und 2071-2100 ändert (vgl. Tabelle D.1 ff.), kann man die hier angegebenen Reifeperiodenlängen bei Bedarf leicht auf die übliche Definition umrechnen. Die Werte der *Differenzen* sind sogar fast identisch mit denen bei der üblichen Definition.

Tabelle F.2: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) beim **spätreifen Apfel**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	159.7 (2.2)						
RUBA	159.5 (2.7)	156.9 (2.5)	161.9 (2.8)	164.6 (2.7)	5.1 (3.8)	0.841	**
ECLM	159.9 (2.3)	157.2 (2.1)	161.6 (3.0)	164.1 (2.3)	4.2 (3.2)	1.045	*
HCLM	160.3 (2.4)	162.6 (2.7)	165.5 (2.2)	164.1 (2.9)	3.8 (3.7)	4.360	*
WETTR0	160.1 (1.2)	159.6 (1.5)	164.8 (1.8)	169.9 (1.4)	9.8 (1.8)	0.000	***
WETTR1	159.6 (1.4)	160.1 (1.5)	164.3 (1.7)	169.3 (2.1)	9.7 (2.5)	0.000	***
M-Mittel	159.9 (1.0)	159.3 (2.6)	163.6 (2.0)	166.4 (3.3)	6.5 (3.4)	0.261	**

Tabelle F.3: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) bei der **Sauerkirsche**, berechnet mit Modell 10a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	82.4 (2.3)						
RUBA	80.4 (1.6)	81.1 (2.3)	81.5 (2.4)	80.1 (2.1)	-0.3 (2.6)	81.883	
ECLM	82.0 (2.3)	81.8 (2.5)	83.7 (2.6)	82.0 (2.0)	0.1 (3.0)	97.224	
HCLM	82.2 (2.4)	82.5 (2.3)	81.2 (2.1)	78.8 (1.8)	-3.4 (3.0)	2.934	*
WETTR0	81.2 (1.3)	81.1 (1.4)	81.1 (1.6)	80.5 (1.1)	-0.7 (1.7)	41.612	
WETTR1	80.2 (1.2)	81.5 (1.3)	80.6 (1.4)	81.3 (2.0)	1.1 (2.3)	33.251	
M-Mittel	81.2 (1.0)	81.6 (0.9)	81.6 (1.4)	80.6 (1.3)	-0.6 (1.6)	43.310	

Tabelle F.4: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) bei der **frühreifen Süßkirsche**, berechnet mit Modell 10a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	65.5 (2.5)						
RUBA	63.3 (1.8)	63.9 (2.5)	64.2 (2.5)	63.0 (2.4)	-0.3 (2.9)	82.143	
ECLM	64.4 (2.6)	64.5 (3.0)	66.5 (2.7)	64.4 (2.1)	0.1 (3.3)	96.750	
HCLM	65.0 (2.9)	65.3 (2.7)	63.3 (2.2)	61.5 (1.9)	-3.5 (3.4)	4.146	*
WETTR0	64.1 (1.4)	65.2 (1.5)	64.5 (1.7)	64.1 (1.1)	-0.1 (1.7)	93.348	
WETTR1	63.3 (1.3)	64.6 (1.4)	64.1 (1.4)	64.4 (1.7)	1.1 (2.2)	30.763	
M-Mittel	64.0 (1.1)	64.7 (1.0)	64.5 (1.4)	63.5 (1.4)	-0.5 (1.7)	51.589	

Tabelle F.5: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) bei der **spätreifen Süßkirsche**, berechnet mit Modell 10a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	78.2 (2.7)						
RUBA	76.0 (2.1)	76.3 (2.7)	76.8 (2.6)	74.8 (2.4)	-1.2 (3.1)	43.127	
ECLM	77.1 (2.8)	77.1 (3.2)	79.3 (2.8)	76.3 (2.2)	-0.9 (3.5)	62.588	
HCLM	77.6 (3.1)	77.9 (3.1)	75.5 (2.3)	73.1 (2.0)	-4.4 (3.7)	1.872	*
WETTR0	76.7 (1.4)	77.4 (1.6)	76.5 (1.8)	75.5 (1.2)	-1.2 (1.8)	18.774	
WETTR1	75.6 (1.4)	76.7 (1.4)	76.0 (1.5)	76.1 (1.9)	0.5 (2.3)	65.774	
M-Mittel	76.6 (1.1)	77.1 (1.0)	76.8 (1.6)	75.2 (1.4)	-1.4 (1.7)	10.165	

Tabelle F.6: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) bei der **frühreifen Birne**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	127.0 (2.7)						
RUBA	126.4 (3.0)	125.3 (2.7)	131.2 (3.5)	133.3 (3.1)	6.9 (4.2)	0.166	**
ECLM	127.2 (3.0)	125.6 (2.8)	131.0 (3.6)	132.5 (2.7)	5.3 (4.0)	0.959	**
HCLM	128.0 (3.0)	130.8 (3.5)	132.1 (2.5)	130.6 (3.1)	2.6 (4.2)	22.481	
WETTR0	127.3 (1.5)	128.3 (1.8)	132.7 (2.0)	137.0 (1.4)	9.7 (2.0)	0.000	***
WETTR1	126.9 (1.6)	128.1 (1.6)	131.7 (1.8)	136.4 (2.2)	9.5 (2.6)	0.000	***
M-Mittel	127.2 (1.1)	127.6 (2.4)	131.8 (1.7)	133.9 (3.0)	6.8 (3.1)	0.080	***

Tabelle F.7: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) bei der **spätreifen Birne**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	159.1 (2.7)						
RUBA	158.5 (2.9)	156.8 (2.8)	162.3 (3.5)	163.6 (3.1)	5.1 (4.2)	1.708	*
ECLM	159.2 (2.8)	157.1 (2.7)	161.7 (3.5)	162.9 (2.7)	3.6 (3.9)	6.582	
HCLM	160.0 (3.0)	162.4 (3.4)	163.5 (2.5)	161.2 (3.1)	1.2 (4.2)	57.611	
WETTR0	159.6 (1.6)	159.9 (1.9)	164.2 (2.1)	167.8 (1.5)	8.3 (2.1)	0.000	***
WETTR1	158.7 (1.7)	159.6 (1.7)	163.2 (1.8)	166.8 (2.2)	8.1 (2.7)	0.000	***
M-Mittel	159.2 (1.1)	159.1 (2.4)	163.0 (1.6)	164.5 (3.1)	5.3 (3.2)	0.464	**

Tabelle F.8: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) bei der **Erdbeere**, berechnet mit Modell 10a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeieranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	37.0 ^a (1.4)						
RUBA	36.3 (1.2)	36.1 (1.4)	36.1 (1.6)	36.8 (1.5)	0.5 (1.9)	56.810	
ECLM	36.7 (1.4)	35.9 (1.5)	37.4 (1.5)	37.5 (1.4)	0.8 (1.9)	41.737	
HCLM	36.7 (1.3)	36.3 (1.1)	37.3 (1.6)	36.5 (1.7)	-0.3 (2.1)	79.519	
WETTR0	36.5 (0.8)	36.7 (0.8)	36.3 (0.9)	37.8 (1.0)	1.3 (1.3)	4.071	*
WETTR1	35.8 (0.7)	37.6 (0.9)	37.1 (0.9)	38.3 (1.5)	2.5 (1.6)	0.317	**
M-Mittel	36.4 (0.6)	36.5 (0.7)	36.8 (0.7)	37.4 (0.8)	1.0 (1.0)	6.270	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

Tabelle F.9: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) beim **Wein**, berechnet mit Modell 10a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	75.2 (0.5)						
RUBA	75.4 (0.4)	75.0 (0.4)	74.3 (0.4)	72.7 (0.4)	-2.7 (0.6)	0.000	***
ECLM	75.3 (0.5)	74.8 (0.6)	74.0 (0.6)	72.0 (0.6)	-3.3 (0.8)	0.000	***
HCLM	75.4 (0.6)	74.4 (0.4)	73.5 (0.6)	72.4 (0.4)	-3.0 (0.7)	0.000	***
WETTR0	75.2 (0.2)	74.6 (0.2)	73.4 (0.3)	72.2 (0.3)	-3.0 (0.3)	0.000	***
WETTR1	75.2 (0.2)	74.5 (0.2)	73.3 (0.3)	72.3 (0.3)	-3.0 (0.3)	0.000	***
M-Mittel	75.3 (0.2)	74.7 (0.2)	73.7 (0.5)	72.3 (0.2)	-3.0 (0.3)	0.000	***

Tabelle F.10: Statistik für die Länge der Zeitspanne "**Blühbeginn bis Weinlese**" (in Tagen) beim **Wein**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	105.6 (2.3)						
RUBA	107.1 (1.7)	104.3 (2.2)	104.2 (1.7)	100.8 (1.9)	-6.2 (2.4)	0.000	***
ECLM	106.7 (2.5)	103.3 (2.6)	101.1 (2.2)	98.0 (2.0)	-8.6 (3.2)	0.000	***
HCLM	106.1 (2.6)	105.0 (1.7)	103.0 (2.2)	100.6 (1.9)	-5.5 (3.2)	0.101	**
WETTR0	106.8 (1.0)	104.6 (1.0)	104.0 (1.1)	102.2 (1.3)	-4.5 (1.6)	0.000	***
WETTR1	106.7 (1.0)	104.7 (1.3)	102.9 (1.5)	101.4 (1.2)	-5.3 (1.6)	0.000	***
M-Mittel	106.7 (1.2)	104.4 (1.0)	103.1 (1.2)	100.6 (1.7)	-6.0 (2.0)	0.000	***

Tabelle F.11: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) bei der **frühreifen Pflaume**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	112.8 ^a (2.6)						
RUBA	111.7 (2.5)	109.8 (2.7)	113.6 (3.6)	113.7 (2.9)	2.0 (3.8)	29.428	
ECLM	112.5 (2.8)	110.0 (3.1)	114.1 (3.6)	113.3 (2.7)	0.8 (3.8)	69.356	
HCLM	113.5 (2.9)	114.9 (3.0)	114.6 (2.5)	111.8 (2.7)	-1.6 (3.9)	40.010	
WETTR0	113.1 (1.2)	112.9 (1.7)	114.2 (1.8)	115.7 (1.3)	2.6 (1.8)	0.413	**
WETTR1	111.9 (1.4)	112.0 (1.6)	113.4 (1.8)	115.3 (2.1)	3.4 (2.5)	0.805	**
M-Mittel	112.5 (1.1)	111.9 (2.2)	114.0 (1.7)	113.9 (1.7)	1.4 (1.9)	14.482	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

Tabelle F.12: Statistik für die Länge der Reifeperiode (in Tagen) bei der **spätreifen Pflaume**, berechnet mit Modell 12a-R mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	143.1 ^a (2.9)						
RUBA	142.2 (2.9)	140.5 (2.9)	144.2 (3.5)	143.9 (3.0)	1.7 (4.1)	40.314	
ECLM	142.9 (3.1)	140.6 (3.2)	144.0 (3.6)	142.7 (2.8)	-0.2 (4.1)	92.305	
HCLM	144.0 (3.1)	145.1 (3.2)	144.2 (2.7)	140.7 (2.9)	-3.3 (4.2)	11.879	
WETTR0	143.4 (1.5)	143.4 (1.9)	145.0 (2.0)	146.5 (1.4)	3.1 (2.0)	0.284	**
WETTR1	142.5 (1.6)	142.4 (1.6)	143.9 (1.8)	145.9 (2.2)	3.4 (2.6)	1.275	*
M-Mittel	143.0 (1.1)	142.4 (1.9)	144.2 (1.6)	144.0 (2.6)	0.9 (2.8)	47.583	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

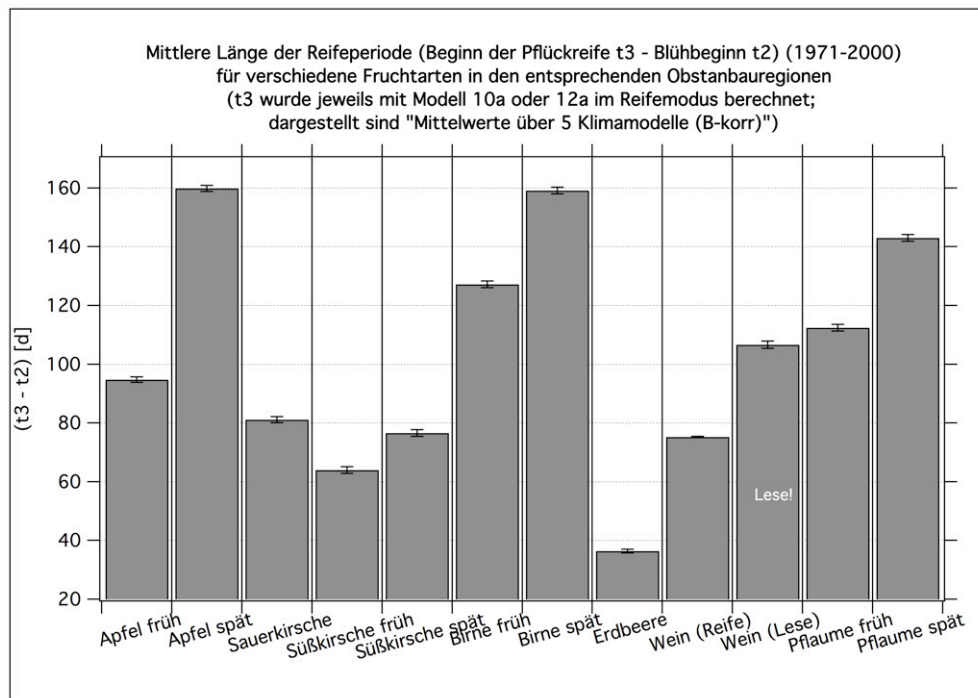


Abbildung F.1: Mittlere Länge der Reifeperiode $t_3 - t_2$ (Mittelwert über 1971-2000) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein bzw. 4 Erdbeergitterpunkte), berechnet mit Modell 10a-R bzw. 12a-R. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

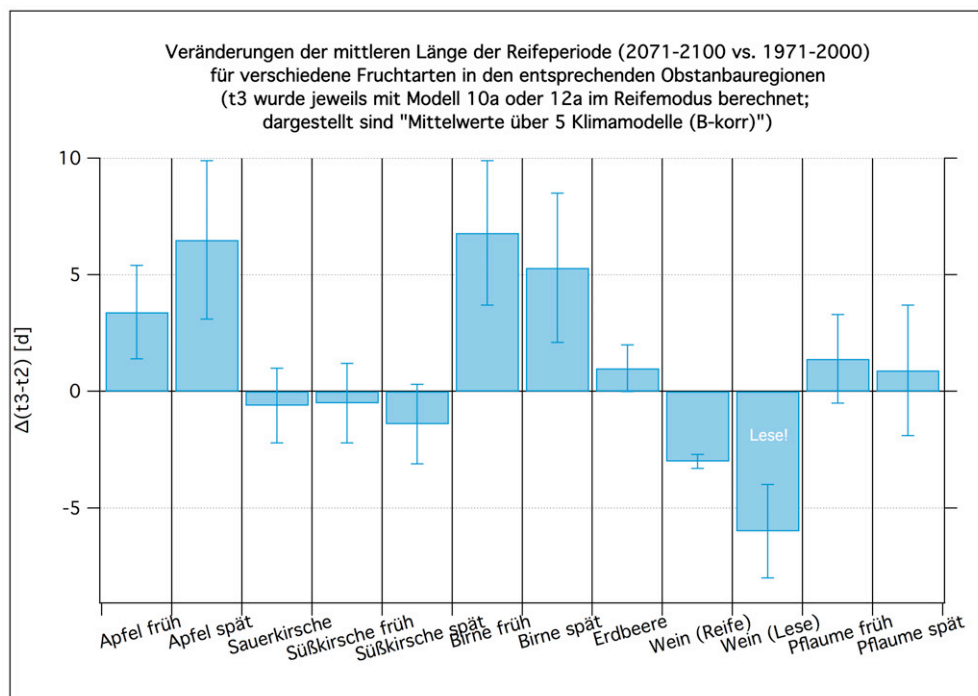


Abbildung F.2: Veränderungen der mittleren Länge der Reifeperiode ($\Delta(t_3 - t_2)$) (2071-2100 vs. 1971-2000) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein bzw. 4 Erdbeergitterpunkte), berechnet mit Modell 10a-R bzw. 12a-R. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

G Ergebnisse für die Wahrscheinlichkeit *NoRelease-Probx* für unvollständige Brechung der Dormanz

Die folgenden Ergebnisse wurden mit den in Abschnitt 4.6.1.2 beschriebenen, reinen Chilling-Modellen berechnet. Das Chilling-Modell, das Chilling-Requirement C^* und der Stichtag t_s wurden fest vorgegeben. Sodann wurde mit der in Kapitel 4.7 beschriebenen Methode die “Wahrscheinlichkeit P_D für die unvollständige Brechung der Dormanz” (= *NoReleaseProbx*; $x = t_s$) mit Hilfe der Tagesminimum und -maximumtemperaturen aus den drei dynamischen Klimamodellen und den WETTREG-Läufen 0 und 1 berechnet.

Die Tabellen zeigen 30-jährige Mittelwerte (in %) über alle 81 Gitterpunkte in Hessen bzw. die 19 Obstanbaugitterpunkte, die 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte (vgl. Abschnitt 4.5) mit einseitigem 95 %-Konfidenzintervall in Klammern (in %) für vier 30-jährige Zeitabschnitte sowie die Differenz ‘(2071-2100)-(1971-2000)’ (in %) und den p-Wert (in %) zur H_0 : “Differenz gleich null” und H_1 : “Differenz ungleich null”. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$. Zum Aufbau der Tabellen und zu den benutzen Zeitabschnitten beachte man auch die Bemerkungen am Anfang des Anhangs B.

Für jedes der 3 Chilling-Modelle wurden die *NoReleaseProbx*-Werte für $C^* = 1000$ CH, 1300 CH und 1600 CH [bzw. mit den für Modell 1f und 1g umgerechneten Werten: 18 CH \approx 1 CP (vgl. Abschnitt 4.6.6), 23.5 CH \approx 24.0 CU (vgl. Abschnitt 5.3.5)] jeweils für $t_s = 90$ und $t_s = 200$ berechnet. Es zeigte sich, dass nur für die $C^* = 1600$ CH entsprechenden Chilling-Requirements ‘Werte von *NoReleaseProbx*’ größer null auftraten.¹ Nur bei Modell 1b ergaben sich auch für $t_s = 200$ (d. h. keine Dormanzbrechung bis zum Sommer) Werte größer null. Bei den beiden anderen Modellen waren die Wahrscheinlichkeiten für unvollständige Dormanzbrechung bis zum Tag t_s nur für $t_s = 90$ größer als null. Im Folgenden sind daher nur Tabellen für $C^* = 1600$ ‘CH’, die wenigstens einen Wert größer null enthalten, aufgeführt. Bei den Signifikanzangaben in den folgenden Tabellen wurde wie in den vorhergehenden Kapiteln die Multiplizität nicht berücksichtigt. Nach dem auf Seite 293 Gesagtem ist in z. B. **Tabelle G.1** nur die Differenz beim HCLM und bei WETTR1 signifikant. Der Wert von WETTR0 ist mit 4.6 % nämlich bereits größer als $5\% / (5 - 3 + 1) = 1.67\%$. In **Tabelle G.2** ist nur die Differenz beim HCLM signifikant, wenn man die Multiplizität berücksichtigt usw.

Weitere Ergebnisse zur Dormanz werden in Abschnitt 5.3 diskutiert. Konkrete Angaben in Tabellenform über *Dormanzschäden* findet man in Kapitel 5.3.10, für das *relative Chillingdefizit* in Kapitel 5.3.8 und für die *Chillingsumme bis zum artenabhängigen Stichtag t_s* in Kapitel 5.3.7.

G.1 Modell 1b, $C^* = 1600$ CH und $t_s = 90$ (31. März)

Bei Modell 1b sind nur einige wenige Veränderungen in der *NoReleaseProb90* bei $C^* = 1600$ CH signifikant, wenn man die Ergebnisse einzelner Modelle betrachtet. Die größten

¹ Für Modell 1b, $t_s = 90$ und $C^* = 1300$ CH traten allerdings einige Werte ungleich null auf, die aber kleiner als 3 % waren und sich nicht signifikant von null unterschieden!

und signifikantesten Änderungen prognostiziert das HCLM. Im Mittel über die 5 Klimamodellläufe treten aber nur an den 8 Weinbaugitterpunkten leicht signifikante Änderungen auf (eine Vergrößerung der NoReleaseProb90 um 17 %).

Tabelle G.1: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in **Modell 1b** bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über **alle 81 Gitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.3 (4.3)						
RUBA	0.7 (1.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	2.3 (1.9)	1.6 (2.3)	16.011	
ECLM	0.0 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.6 (0.9)	0.6 (0.9)	19.203	
HCLM	0.0 (0.1)	2.8 (4.4)	0.8 (1.1)	14.1 (8.6)	14.0 (8.6)	0.236	**
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	3.6 (3.5)	3.6 (3.5)	4.567	*
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	2.5 (1.8)	2.5 (1.8)	0.776	**
M-Mittel	0.2 (0.3)	0.6 (1.2)	0.2 (0.3)	4.6 (6.3)	4.5 (6.3)	12.724	

Tabelle G.2: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in **Modell 1b** bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über die **19 Obstanbaugitterpunkte** in Hessen).

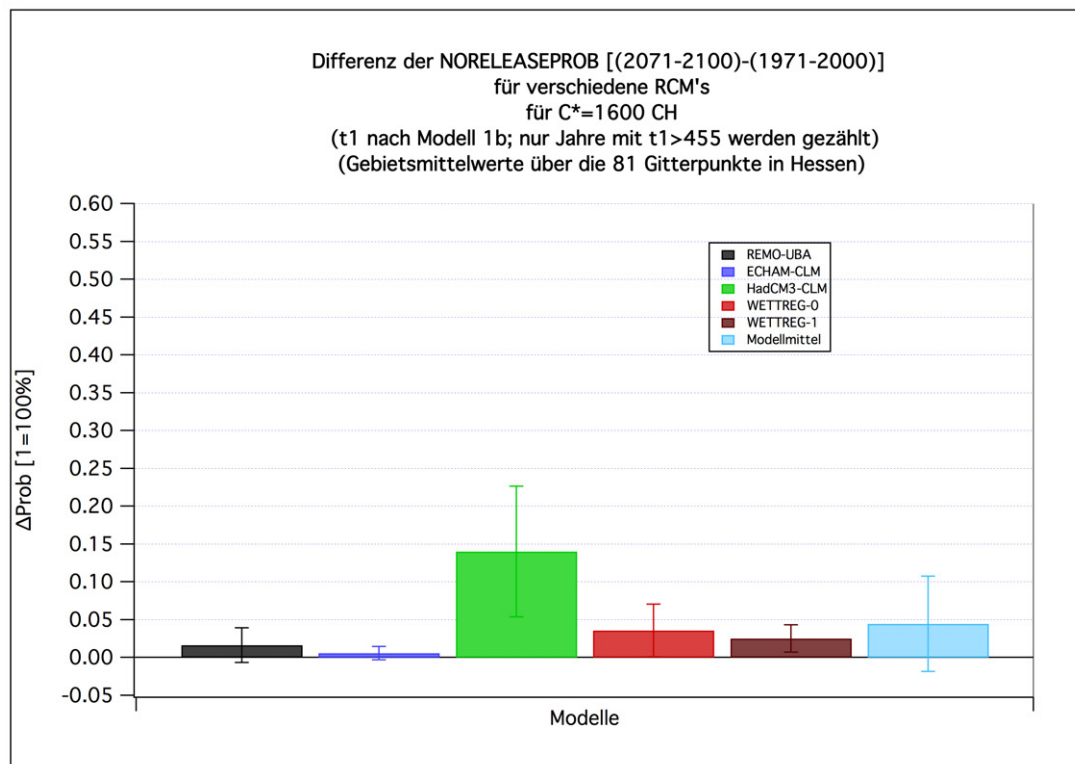
	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.7 (1.4)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	5.8 (5.5)	5.8 (5.5)	3.870	*
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.6 (2.3)	1.6 (2.3)	16.381	
HCLM	0.0 (0.0)	1.0 (1.5)	2.3 (3.4)	26.9 (13.2)	26.9 (13.2)	0.026	***
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	7.1 (6.7)	7.1 (6.7)	4.048	*
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	6.2 (5.3)	6.2 (5.3)	2.445	*
M-Mittel	0.0 (0.0)	0.2 (0.4)	0.5 (1.0)	9.5 (11.5)	9.5 (11.5)	8.722	

Tabelle G.3: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in **Modell 1b** bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über die **8 Weinbaugitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (0.0)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	14.6 (10.5)	14.6 (10.5)	0.801	**
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	4.2 (5.9)	4.2 (5.9)	16.079	
HCLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	4.2 (5.9)	36.7 (15.3)	36.7 (15.3)	0.003	***
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	15.9 (11.6)	15.9 (11.6)	0.927	**
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	15.9 (10.2)	15.9 (10.2)	0.346	**
M-Mittel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.8 (1.8)	17.4 (13.2)	17.4 (13.2)	1.799	*

Tabelle G.4: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in **Modell 1b** bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über die **4 Erdbeeranbaugitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.8 (1.7)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	8.4 (7.9)	8.4 (7.9)	3.880	*
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	2.5 (3.8)	2.5 (3.8)	18.389	
HCLM	0.0 (0.0)	1.6 (2.3)	4.2 (6.1)	35.1 (15.7)	35.1 (15.7)	0.008	***
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	10.1 (9.8)	10.1 (9.8)	4.340	*
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	11.8 (10.1)	11.8 (10.1)	2.413	*
M-Mittel	0.0 (0.0)	0.3 (0.7)	0.8 (1.8)	13.6 (14.6)	13.6 (14.6)	6.171	

**Abbildung G.1:** Veränderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) bei **Modell 1b** und $C^* = 1600$ CH; Mittelwert über **alle 81 Gitterpunkte** in Hessen. Die Mittelwerte der NoReleaseProb90 im Zeitraum 1971-2000 bei den Modellen sind kleiner 0.0007.

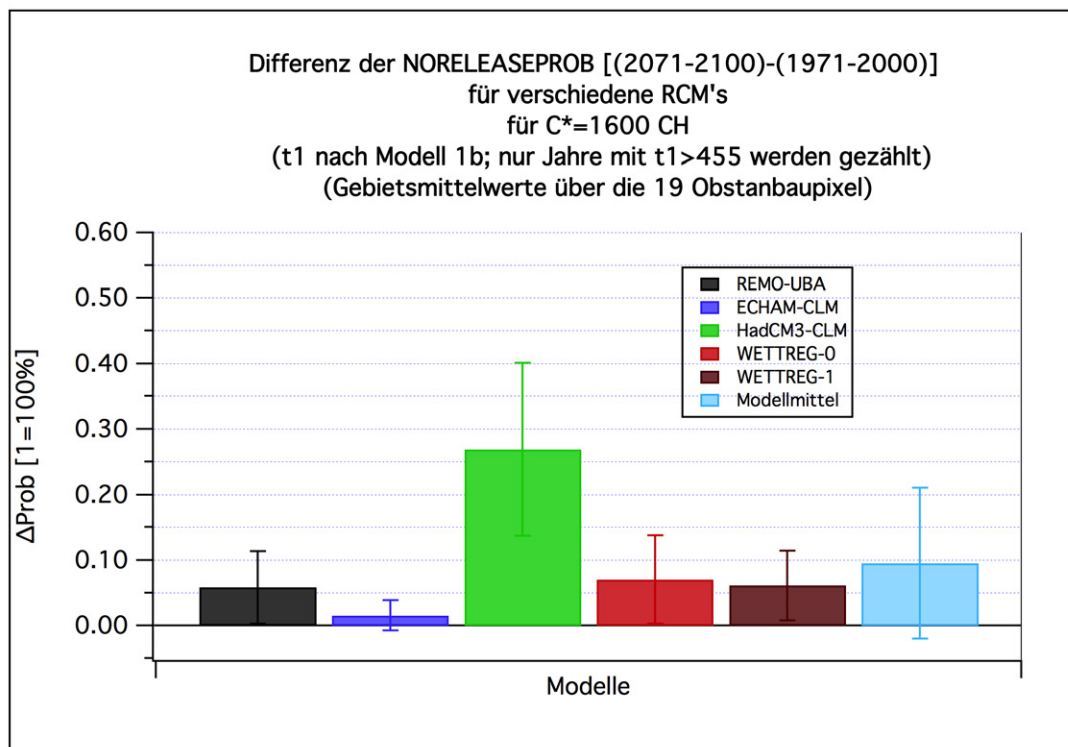


Abbildung G.2: Veränderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) bei **Modell 1b** und $C^* = 1600$ CH; Mittelwert über die **19 Obstanbaugitterpunkte** in Hessen. Die Mittelwerte der NoReleaseProb90 im Zeitraum 1971-2000 bei den Modellen betragen alle 0.0000.

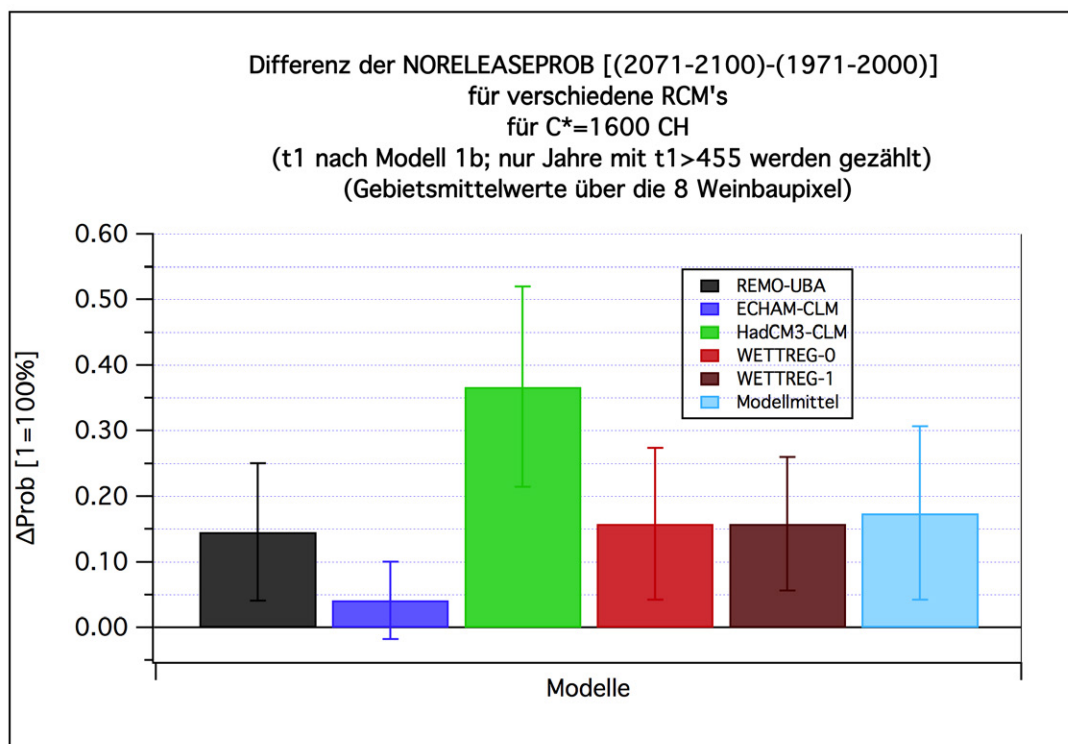


Abbildung G.3: Veränderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) bei **Modell 1b** und $C^* = 1600$ CH; Mittelwert über die **8 Weinbaugitterpunkte** in Hessen. Die Mittelwerte der NoReleaseProb90 im Zeitraum 1971-2000 bei den Modellen betragen alle 0.0000.

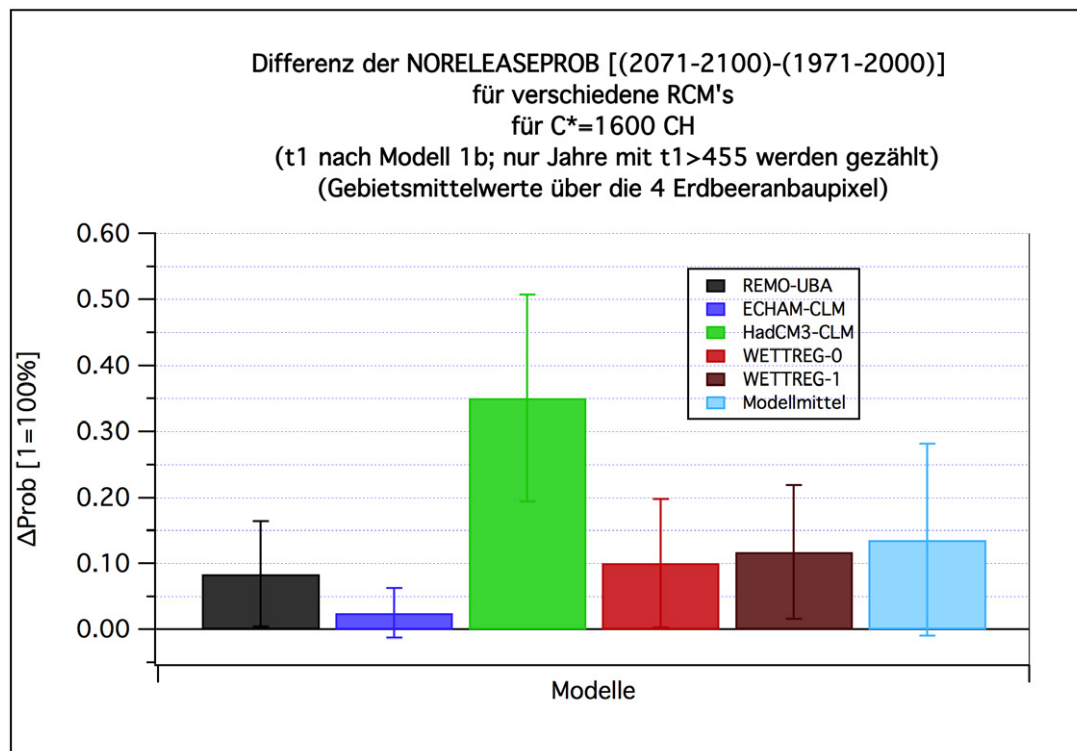


Abbildung G.4: Veränderung der NoReleaseProb90 (2071-2100 vs. 1971-2000) bei **Modell 1b** und $C^* = 1600 \text{ CH}$; Mittelwert über die 4 **Erdbeergitterpunkte** in Hessen. Die Mittelwerte der NoReleaseProb90 im Zeitraum 1971-2000 bei den Modellen betragen allen 0.0000.

G.2 Modell 1b, $C^* = 1600$ CH und $t_s = 200$ (keine Dormanzbrechung)

Bei Modell 1b sind nur ganz wenige Veränderungen in der NoReleaseProb200 bei $C^* = 1600$ CH signifikant, wenn man die Ergebnisse einzelner Modelle betrachtet. Die größten und signifikantesten Änderungen prognostiziert wieder das HCLM. Im Mittel über die 5 Klimamodellläufe treten überhaupt keine signifikanten Änderungen auf.

Tabelle G.5: Statistik für die NoReleaseProb200 (in %) in **Modell 1b** bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über alle **81 Gitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (0.0)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.1 (1.2)	1.1 (1.2)	6.757	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.1 (0.2)	0.1 (0.2)	32.587	
HCLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.3 (0.6)	4.6 (3.0)	4.6 (3.0)	0.390	**
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.9 (0.9)	0.9 (0.9)	5.193	
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.5 (0.6)	0.5 (0.6)	10.132	
M-Mittel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.1 (0.1)	1.4 (2.1)	1.4 (2.1)	14.335	

Tabelle G.6: Statistik für die NoReleaseProb200 (in %) in **Modell 1b** bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über die **19 Obstanbaugitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (0.0)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	2.7 (3.4)	2.7 (3.4)	11.770	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.7 (1.4)	11.6 (8.7)	11.6 (8.7)	1.040	*
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.9 (2.0)	1.9 (2.0)	6.174	
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.7 (1.4)	0.7 (1.4)	32.558	
M-Mittel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.1 (0.3)	3.4 (5.2)	3.4 (5.2)	16.122	

Tabelle G.7: Statistik für die NoReleaseProb200 (in %) in **Modell 1b** bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über die **8 Weinbaugitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (0.0)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	7.9 (7.7)	7.9 (7.7)	4.430	*
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.8 (1.7)	0.8 (1.7)	32.558	
HCLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.7 (3.4)	23.4 (11.7)	23.4 (11.7)	0.031	***
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	7.9 (7.9)	7.9 (7.9)	4.941	*
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	3.3 (3.5)	3.3 (3.5)	5.779	
M-Mittel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.3 (0.7)	8.7 (10.2)	8.7 (10.2)	8.123	

Tabelle G.8: Statistik für die NoReleaseProb200 (in %) in Modell 1b bei $C^* = 1600$ CH (Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (0.0)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	3.4 (5.4)	3.4 (5.4)	21.093	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.7 (3.4)	18.5 (10.7)	18.5 (10.7)	0.148	**
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.8 (1.7)	0.8 (1.7)	32.558	
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.8 (1.7)	0.8 (1.7)	32.558	
M-Mittel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.3 (0.7)	4.7 (9.1)	4.7 (9.1)	24.083	

G.3 Modell 1g, $C^* = 89$ CP und $t_s = 90$ (31. März)

Bei Modell 1g treten überhaupt keine signifikanten Veränderungen in der NoReleaseProb90 bei $C^* = 89$ CP auf. Und auch die Absolutwerte unterscheiden sich nicht signifikant von null. Wenn man davon ausgeht, dass dieses Modell die Chilling-Akkumulation am verlässlichsten beschreibt (vgl. Seite 199 in Abschnitt 5.3.1), so muss man folgern, dass die Dormanzbrechung bei den betrachteten Obstarten bis zum Jahr 2100 keine Probleme bereiten wird.

Tabelle G.9: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1g bei $C^* = 89$ CP (Mittelwerte über alle 81 Gitterpunkte in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (0.0)						
RUBA	1.3 (2.7)	0.0 (0.0)	0.1 (0.3)	0.0 (0.0)	-1.3 (2.7)	32.558	
ECLM	0.1 (0.2)	0.0 (0.0)	0.1 (0.3)	0.0 (0.0)	-0.1 (0.2)	32.558	
HCLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
M-Mittel	0.3 (0.6)	0.0 (0.0)	0.1 (0.1)	0.0 (0.0)	-0.3 (0.6)	33.618	

Tabelle G.10: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in Modell 1g bei $C^* = 89$ CP (Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (0.0)						
RUBA	0.2 (0.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.2 (0.4)	32.558	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
M-Mittel	0.0 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.1)	32.505	

Tabelle G.11: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in **Modell 1g** bei $C^* = 89$ CP (Mittelwerte über die **8 Weinbaugitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (0.0)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
M-Mittel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	

Die Tabelle der Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in **Modell 1g** bei $C^* = 89$ CP (Mittelwerte über die **4 Erdbeeranbaugitterpunkte** in Hessen) enthält wie **Tabelle G.11** nur Nullwerte.

G.4 Modell 1f, $C^* = 1632$ CU und $t_s = 90$ (31. März)

Bei Modell 1f treten bei $C^* = 1632$ CU fast keine Veränderungen in der NoReleaseProb90 auf. Alle Änderungen sind nicht signifikant und die Absolutwerte unterscheiden sich nicht signifikant von null.

Tabelle G.12: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in **Modell 1f** bei $C^* = 1632$ CU (Mittelwerte über **alle 81 Gitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	3.0 (5.7)						
RUBA	3.9 (4.8)	0.9 (1.2)	1.8 (3.7)	0.0 (0.0)	-3.9 (4.8)	10.497	
ECLM	0.9 (1.4)	0.1 (0.3)	1.2 (2.1)	0.0 (0.0)	-0.9 (1.4)	16.738	
HCLM	0.5 (1.0)	2.0 (3.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.5 (1.0)	32.558	
WETTR0	0.4 (0.8)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.4 (0.8)	32.558	
WETTR1	0.2 (0.4)	0.0 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.2 (0.4)	16.079	
M-Mittel	1.2 (1.6)	0.6 (0.8)	0.6 (1.1)	0.0 (0.0)	-1.2 (1.6)	13.502	

Tabelle G.13: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in **Modell 1f** bei $C^* = 1632$ CU (Mittelwerte über die **19 Obstanbaugitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	1.7 (3.6)						
RUBA	1.2 (2.1)	0.2 (0.4)	0.3 (0.7)	0.0 (0.0)	-1.2 (2.1)	25.688	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.2 (0.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	0.3 (0.7)	0.5 (1.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.3 (0.7)	32.558	
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
M-Mittel	0.3 (0.5)	0.1 (0.2)	0.1 (0.2)	0.0 (0.0)	-0.3 (0.5)	19.624	

Tabelle G.14: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in **Modell 1f** bei $C^* = 1632$ CU (Mittelwerte über die **8 Weinbaugitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.4 (0.8)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
M-Mittel	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	

Tabelle G.15: Statistik für die NoReleaseProb90 (in %) in **Modell 1f** bei $C^* = 1632$ CU (Mittelwerte über die **4 Erdbeeranbaugitterpunkte** in Hessen).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.8 (1.7)						
RUBA	0.8 (1.7)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.8 (1.7)	32.588	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	0.0 (0.0)	0.8 (1.7)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
M-Mittel	0.2 (0.3)	0.2 (0.3)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.2 (0.3)	32.505	

H Ergebnisse für Frostwahrscheinlichkeiten, Frostschäden und Frosttage

Die folgenden Tabellen zeigen 30-jährige Mittelwerte (in %) über die 19 Obstanbau-Gitterpunkte¹ mit einseitigem 95%-Konfidenzintervall in Klammern (in %) für vier 30-jährige Zeitabschnitte sowie die Differenz '(2071-2100)-(1971-2000)' (in %) und den zugehörigen p-Wert (in %; bei FROSTTAGE0 in *Tagen pro Jahr*) zur H0: "Differenz gleich null" und H1: "Differenz ungleich null". Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$. Zum Aufbau der Tabellen und zu den benutzten Zeitabschnitten beachte man auch die Bemerkungen am Anfang des Anhangs B. Weiterhin beachte man die Bemerkungen auf Seite 106 zu den Konfidenzintervallen von Wahrscheinlichkeiten.

Bei den mit DWD gekennzeichneten Mittelwerten in den Tabellen wurden die Werte mit Hilfe der regionalisierten, beobachteten Messwerte berechnet. Die dabei benutzten Termine des Blühbeginns beziehen sich bei den DWD-Werten ebenfalls auf beobachtete Werte. Das Blühende wurde jedoch mit Modell 10a (vgl. Kapitel 4.6.2 und Anhang D) berechnet. Bei der Pflaume beziehen sich die mit DWD gekennzeichneten Mittelwerte für 1971-2000 in den Tabellen nur auf den Zeitraum 1971-1990, da nach 1990 nicht genügend Beobachtungen für den Blühbeginn vorlagen (vgl. Tabelle 4.5).

Für Pfirsich, Aprikose und Erdbeere konnten keine Frostrechnungen durchgeführt werden (siehe Seite 105). Daher konnten für diese Obstarten auch keine Gesamtschäden und Gesamtkosten des Klimawandels bestimmt werden!

H.1 Wahrscheinlichkeiten $P_{F,0}$ für das Auftreten von Spätfrost der Stärke 0 während des S-Zeitraums (FROSTPROB0)

Die hier folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Ergebnisse für die **FROSTPROB0** ($P_{F,0}$). Diese ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass an mindestens einem Tag im S-Zeitraum für die Tagesminimum-Temperatur T_n gilt: $T_n < 0$ °C. Eine genaue Definition und Diskussion dieser Größe findet man in Abschnitt 4.8.1 auf Seite 104. — Zur Berechnung des Termins des Blühbeginns wurde Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term (DL=1) verwendet. Man beachte, dass sich der S-Zeitraum beim Wein auf den Zeitraum ab 9 Tage vorm *Austriebsbeginn* bezieht (vgl. Seite 116).

¹ bzw. über die 8 Weinbau-Gitterpunkte bei Wein.

Tabelle H.1: Statistik für die FROSTPROB0 beim **Apfel** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	49.0 (12.7)						
RUBA	17.2 (10.6)	24.8 (10.1)	31.0 (12.2)	12.1 (9.1)	-5.1 (13.6)	45.911	
ECLM	28.2 (11.3)	29.9 (13.5)	44.5 (14.9)	15.9 (8.1)	-12.3 (13.6)	7.536	
HCLM	43.8 (14.8)	40.2 (15.7)	25.9 (12.2)	31.0 (13.0)	-12.8 (19.3)	18.931	
WETTR0	24.9 (11.5)	37.2 (11.3)	37.2 (12.9)	37.0 (13.9)	12.0 (17.7)	17.827	
WETTR1	28.0 (11.7)	29.7 (12.5)	33.3 (13.1)	27.8 (13.9)	-0.2 (17.8)	98.080	
M-Mittel	28.4 (10.1)	32.4 (6.7)	34.4 (7.4)	24.8 (11.6)	-3.7 (14.3)	59.514	

Tabelle H.2: Statistik für die FROSTPROB0 bei der **Sauerkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	59.1 (13.3)						
RUBA	28.5 (12.2)	35.3 (11.9)	37.0 (12.8)	14.7 (10.3)	-13.8 (15.6)	8.194	
ECLM	40.7 (13.2)	45.8 (14.7)	51.3 (14.4)	18.0 (8.5)	-22.7 (15.4)	0.476	**
HCLM	49.3 (15.0)	48.8 (16.6)	29.2 (13.6)	37.7 (14.4)	-11.5 (20.3)	26.031	
WETTR0	33.7 (13.1)	48.1 (12.8)	40.6 (13.8)	36.8 (14.2)	3.1 (18.9)	74.319	
WETTR1	41.0 (12.3)	40.5 (12.8)	38.7 (13.6)	28.9 (13.9)	-12.1 (18.2)	18.618	
M-Mittel	38.6 (7.3)	43.7 (6.5)	39.4 (8.6)	27.2 (11.4)	-11.4 (12.9)	8.053	

Tabelle H.3: Statistik für die FROSTPROB0 bei der **Süßkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	74.9 (12.7)						
RUBA	40.6 (14.6)	51.2 (13.7)	47.5 (14.6)	22.3 (13.3)	-18.4 (19.4)	6.217	
ECLM	56.2 (14.6)	61.1 (14.7)	61.5 (14.2)	25.3 (11.4)	-30.9 (18.2)	0.124	**
HCLM	63.0 (13.6)	58.2 (16.8)	38.0 (14.6)	45.8 (16.3)	-17.2 (20.8)	10.254	
WETTR0	52.1 (13.4)	62.1 (12.3)	50.1 (14.0)	41.8 (14.6)	-10.2 (19.4)	29.551	
WETTR1	59.3 (12.0)	61.4 (11.9)	49.7 (13.8)	34.0 (13.9)	-25.3 (18.0)	0.677	**
M-Mittel	54.2 (8.2)	58.8 (6.7)	49.4 (9.4)	33.8 (10.4)	-20.4 (12.7)	0.279	**

Tabelle H.4: Statistik für die FROSTPROB0 bei der **Birne** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	63.0 (13.1)						
RUBA	32.2 (13.5)	40.5 (12.7)	44.0 (13.7)	23.1 (13.3)	-9.1 (18.6)	33.090	
ECLM	48.9 (14.4)	52.2 (14.9)	57.6 (15.1)	24.4 (11.3)	-24.4 (18.0)	0.870	**
HCLM	54.7 (15.5)	55.8 (16.8)	40.1 (14.6)	45.1 (16.0)	-9.6 (21.8)	37.889	
WETTR0	40.5 (13.5)	55.3 (12.8)	49.0 (13.8)	46.8 (14.7)	6.3 (19.5)	52.212	
WETTR1	50.2 (12.0)	50.9 (12.9)	47.3 (13.7)	36.1 (13.9)	-14.1 (18.0)	12.204	
M-Mittel	45.3 (8.1)	50.9 (6.4)	47.6 (7.8)	35.1 (11.8)	-10.2 (13.6)	13.365	

Tabelle H.5: Statistik für die FROSTPROB0 beim **Wein** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	33.3 (14.6)						
RUBA	6.3 (7.9)	5.0 (4.2)	7.1 (7.4)	0.8 (1.7)	-5.4 (8.1)	18.115	
ECLM	13.7 (9.7)	17.5 (10.7)	18.8 (11.8)	2.9 (2.6)	-10.8 (10.0)	3.426	*
HCLM	24.6 (12.9)	27.1 (15.4)	14.2 (9.9)	14.2 (11.3)	-10.4 (16.8)	21.929	
WETTR0	14.6 (11.2)	13.3 (9.3)	15.4 (10.7)	15.4 (10.5)	0.8 (15.1)	91.343	
WETTR1	17.5 (12.1)	11.7 (9.3)	13.3 (9.9)	17.9 (13.4)	0.4 (17.6)	96.297	
M-Mittel	15.3 (6.2)	14.9 (8.4)	13.8 (4.6)	10.2 (8.0)	-5.1 (9.6)	28.148	

Tabelle H.6: Statistik für die FROSTPROB0 bei der **Pflaume** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	67.9 ^a (12.2)						
RUBA	36.6 (14.3)	46.5 (13.4)	48.9 (14.2)	26.3 (13.5)	-10.3 (19.3)	28.701	
ECLM	52.2 (14.8)	58.1 (14.6)	59.7 (14.7)	26.5 (11.5)	-25.7 (18.4)	0.701	**
HCLM	60.9 (15.0)	57.9 (16.8)	44.7 (15.2)	47.9 (15.8)	-13.0 (21.4)	22.756	
WETTR0	46.7 (13.3)	59.3 (12.8)	51.5 (13.9)	51.9 (15.1)	5.2 (19.7)	59.869	
WETTR1	55.5 (12.2)	57.9 (12.1)	51.0 (13.7)	39.3 (13.8)	-16.2 (18.0)	7.707	
M-Mittel	50.4 (8.4)	55.9 (6.4)	51.2 (7.7)	38.4 (12.4)	-12.0 (14.2)	9.177	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

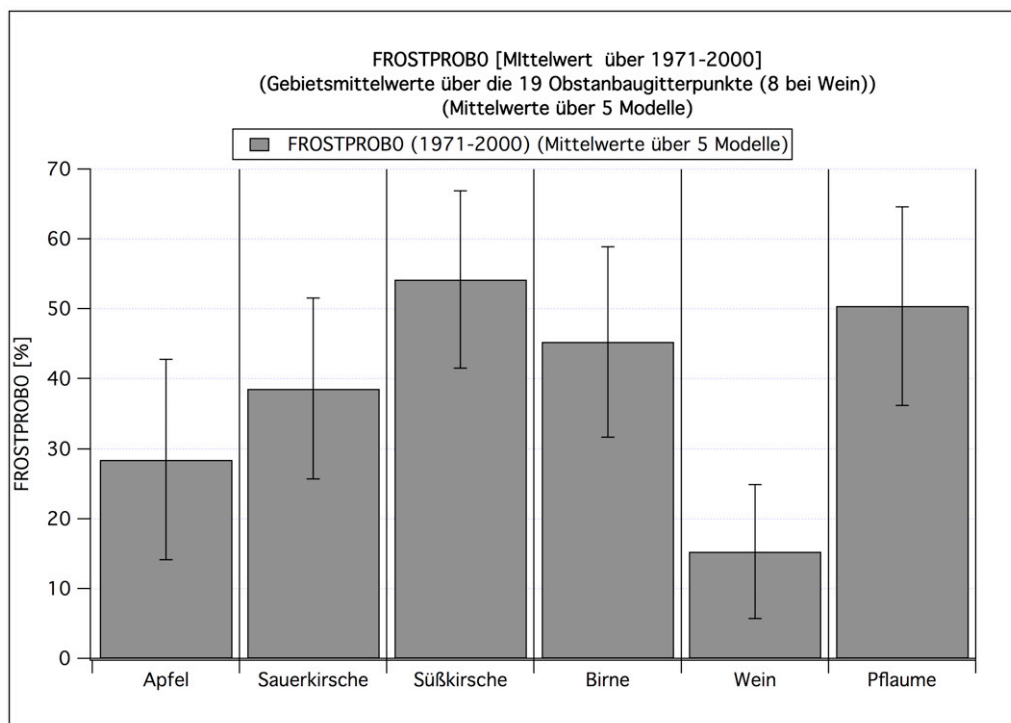


Abbildung H.1: Mittelwert (1971-2000) der **FROSTPROB0** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

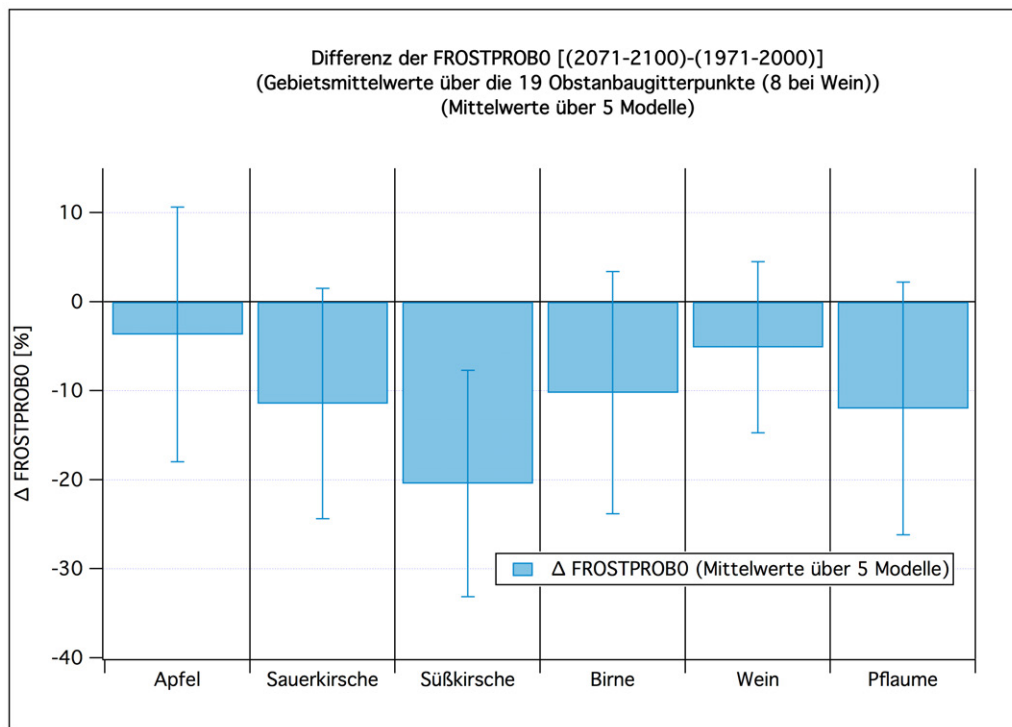


Abbildung H.2: Veränderung der **FROSTPROB0** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

H.2 Wahrscheinlichkeiten $P_{F,1}$ für das Auftreten von Spätfrost der Stärke 1 während des S-Zeitraums (FROSTPROB1)

Die folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Ergebnisse für die **FROSTPROB1** ($P_{F,1}$). Diese ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass an mindestens einem Tag im S-Zeitraum für die Tagesminimum-Temperatur T_n gilt: $-2\text{ °C} \leq T_n < 0\text{ °C}$. Eine genaue Definition und Diskussion dieser Größe findet man in Abschnitt 4.8.1 auf Seite 104. — Zur Berechnung des Termins des Blühbeginns wurde Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term (DL=1) verwendet. Man beachte, dass sich der S-Zeitraum beim Wein auf den Zeitraum ab 9 Tage vorm *Austriebsbeginn* bezieht (vgl. Seite 116).

Tabelle H.7: Statistik für die FROSTPROB1 beim **Apfel** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	47.7 (12.5)						
RUBA	16.8 (10.2)	24.6 (10.0)	30.8 (12.1)	12.1 (9.1)	-4.7 (13.4)	48.174	
ECLM	28.2 (11.3)	29.9 (13.5)	44.5 (14.9)	15.9 (8.1)	-12.3 (13.6)	7.536	
HCLM	41.2 (14.3)	38.1 (15.6)	25.2 (11.7)	30.7 (12.7)	-10.5 (18.8)	26.669	
WETTR0	23.7 (10.7)	36.4 (11.3)	37.2 (12.9)	35.9 (13.3)	12.2 (16.8)	14.961	
WETTR1	27.7 (11.5)	29.1 (12.2)	33.1 (13.1)	27.7 (13.7)	0.0 (17.5)	99.645	
M-Mittel	27.5 (9.1)	31.6 (6.6)	34.2 (7.6)	24.5 (11.1)	-3.1 (13.5)	63.792	

Tabelle H.8: Statistik für die FROSTPROB1 bei der **Sauerkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	58.1 (13.2)						
RUBA	28.0 (11.9)	34.9 (11.8)	36.8 (12.7)	14.7 (10.3)	-13.3 (15.4)	8.941	
ECLM	40.7 (13.2)	45.8 (14.7)	51.3 (14.4)	18.0 (8.5)	-22.7 (15.4)	0.476	**
HCLM	46.8 (14.5)	46.7 (16.2)	28.4 (13.1)	37.5 (14.2)	-9.2 (19.9)	35.566	
WETTR0	32.6 (12.5)	47.2 (12.8)	40.6 (13.8)	35.6 (13.5)	2.9 (18.0)	74.403	
WETTR1	40.0 (11.9)	39.5 (12.4)	38.5 (13.5)	28.7 (13.8)	-11.3 (17.9)	21.122	
M-Mittel	37.6 (6.7)	42.8 (6.5)	39.1 (8.8)	26.9 (10.9)	-10.7 (12.3)	8.477	

Tabelle H.9: Statistik für die FROSTPROB1 bei der **Süßkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	73.8 (13.1)						
RUBA	39.8 (14.3)	50.3 (13.4)	47.2 (14.5)	22.3 (13.3)	-17.5 (19.1)	7.246	
ECLM	55.9 (14.5)	61.1 (14.7)	61.5 (14.2)	25.3 (11.4)	-30.5 (18.1)	0.129	**
HCLM	59.8 (13.3)	55.8 (16.3)	37.0 (14.2)	45.3 (16.1)	-14.6 (20.5)	16.019	
WETTR0	50.1 (13.2)	60.8 (12.3)	49.9 (13.9)	41.0 (14.1)	-9.2 (18.9)	33.703	
WETTR1	58.6 (11.8)	60.7 (11.6)	49.6 (13.8)	33.8 (13.8)	-24.8 (17.8)	0.712	**
M-Mittel	52.8 (7.7)	57.7 (6.6)	49.0 (9.7)	33.5 (10.1)	-19.3 (12.2)	0.311	**

Tabelle H.10: Statistik für die FROSTPROB1 bei der **Birne** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	61.4 (13.2)						
RUBA	31.7 (13.3)	40.2 (12.6)	43.7 (13.6)	23.1 (13.3)	-8.6 (18.4)	35.504	**
ECLM	48.9 (14.4)	52.2 (14.9)	57.6 (15.1)	24.4 (11.3)	-24.4 (18.0)	0.870	
HCLM	52.4 (15.0)	53.5 (16.5)	38.4 (14.2)	44.2 (15.6)	-8.2 (21.2)	44.092	
WETTR0	39.3 (13.0)	54.2 (12.6)	48.9 (13.7)	45.9 (14.3)	6.6 (18.9)	48.500	
WETTR1	49.3 (11.8)	50.0 (12.6)	47.3 (13.7)	35.9 (13.7)	-13.4 (17.7)	13.577	
M-Mittel	44.3 (7.8)	50.0 (6.3)	47.2 (8.1)	34.7 (11.2)	-9.6 (13.1)	14.177	

Tabelle H.11: Statistik für die FROSTPROB1 beim **Wein** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	33.3 (14.6)						
RUBA	6.3 (7.9)	5.0 (4.2)	7.1 (7.4)	0.8 (1.7)	-5.4 (8.1)	18.115	*
ECLM	13.7 (9.7)	17.5 (10.7)	18.8 (11.8)	2.9 (2.6)	-10.8 (10.0)	3.426	
HCLM	24.2 (12.9)	26.3 (14.9)	14.2 (9.9)	13.7 (11.0)	-10.4 (16.6)	21.259	
WETTR0	14.2 (10.8)	13.3 (9.3)	15.4 (10.7)	15.0 (10.1)	0.8 (14.5)	90.957	
WETTR1	16.7 (11.3)	11.7 (9.3)	13.3 (9.9)	17.1 (12.7)	0.4 (16.6)	96.043	
M-Mittel	15.0 (6.0)	14.8 (8.0)	13.8 (4.6)	9.9 (7.7)	-5.1 (9.2)	26.031	

Tabelle H.12: Statistik für die FROSTPROB1 bei der **Pflaume** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	67.1 ^a (12.3)						
RUBA	35.7 (14.0)	45.4 (13.0)	48.0 (13.9)	26.3 (13.5)	-9.5 (19.0)	32.423	**
ECLM	52.2 (14.8)	58.1 (14.6)	59.7 (14.7)	26.5 (11.5)	-25.7 (18.4)	0.701	
HCLM	57.2 (14.4)	55.2 (16.4)	43.3 (14.8)	47.4 (15.6)	-9.8 (20.8)	34.797	
WETTR0	44.9 (13.0)	58.4 (12.7)	51.3 (13.8)	51.2 (14.9)	6.3 (19.3)	51.858	
WETTR1	54.6 (12.0)	57.2 (11.9)	51.0 (13.7)	39.1 (13.7)	-15.5 (17.8)	8.681	
M-Mittel	48.9 (7.7)	54.9 (6.2)	50.7 (7.6)	38.1 (12.1)	-10.8 (13.6)	11.161	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

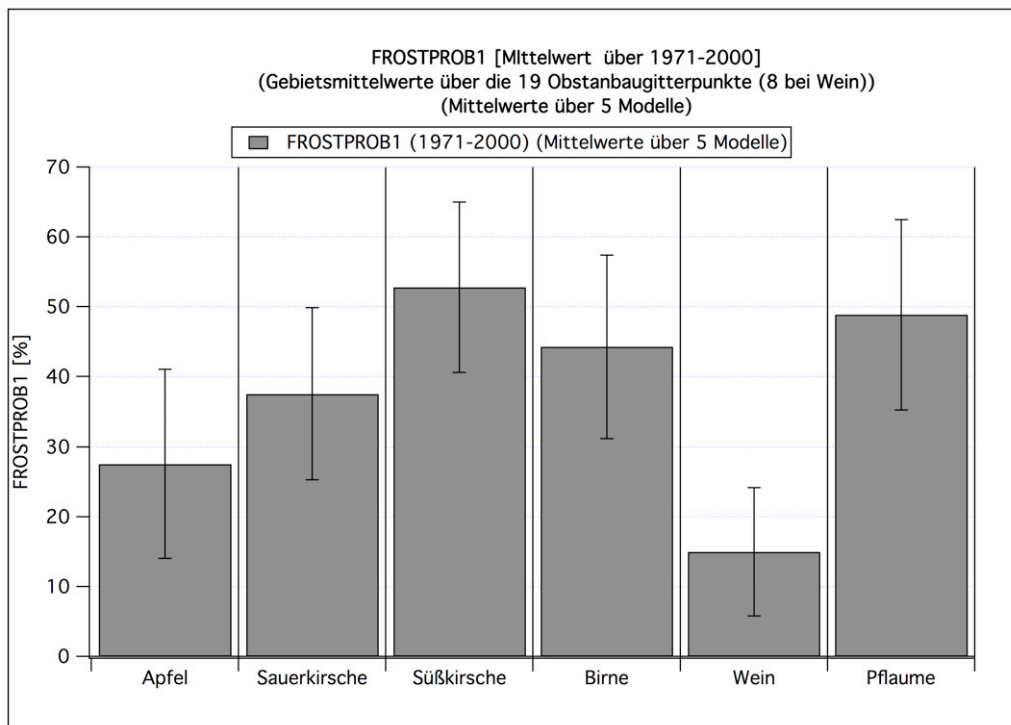


Abbildung H.3: Mittelwert (1971-2000) der **FROSTPROB1** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

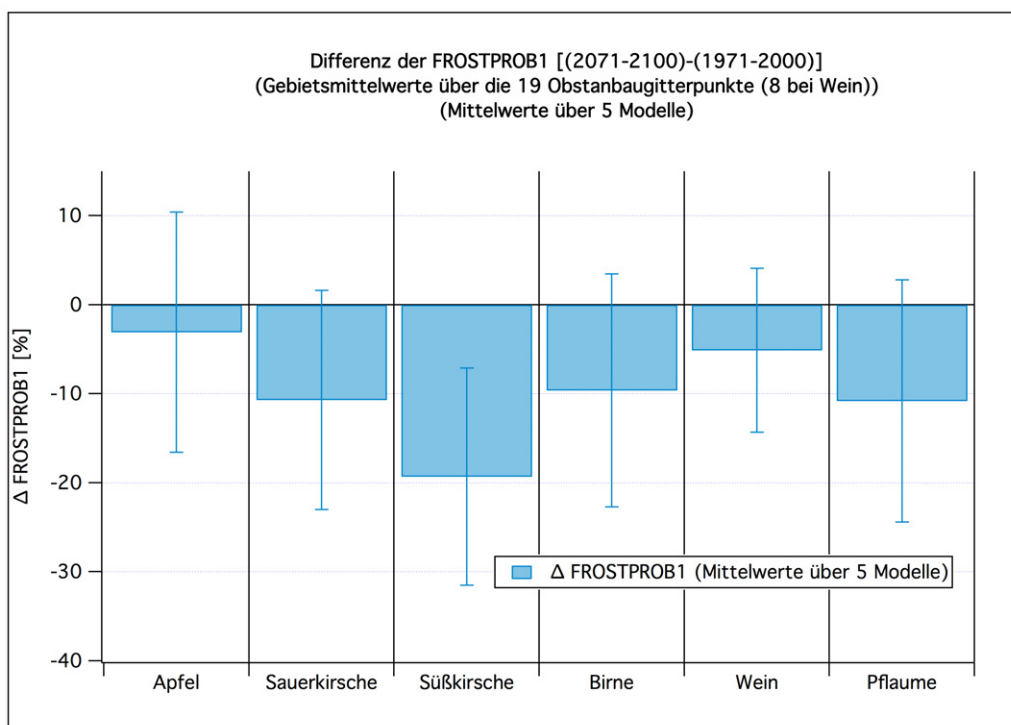


Abbildung H.4: Veränderung der **FROSTPROB1** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

H.3 Wahrscheinlichkeiten $P_{F,2}$ für das Auftreten von Spätfrost der Stärke 2 während des S-Zeitraums (FROSTPROB2)

Die folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Ergebnisse für die **FROSTPROB2** ($P_{F,2}$). Diese ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass an mindestens einem Tag im S-Zeitraum für die Tagesminimum-Temperatur T_n gilt: $-4\text{ °C} \leq T_n < -2\text{ °C}$. Eine genaue Definition und Diskussion dieser Größe findet man in Abschnitt 4.8.1 auf Seite 104. — Zur Berechnung des Termins des Blühbeginns wurde Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term (DL=1) verwendet. Man beachte, dass sich der S-Zeitraum beim Wein auf den Zeitraum ab 9 Tage vorm *Austriebsbeginn* bezieht (vgl. Seite 116).

Tabelle H.13: Statistik für die FROSTPROB2 beim **Apfel** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	13.3 (8.2)						
RUBA	2.3 (2.6)	0.9 (1.2)	2.6 (3.4)	0.0 (0.0)	-2.3 (2.6)	8.489	
ECLM	0.9 (1.8)	0.3 (0.7)	1.6 (2.3)	0.0 (0.0)	-0.9 (1.8)	32.558	
HCLM	18.8 (11.8)	16.7 (11.0)	4.4 (6.2)	5.3 (7.2)	-13.5 (13.5)	5.027	
WETTR0	6.0 (5.4)	6.5 (4.8)	2.6 (2.7)	8.4 (6.9)	2.4 (8.6)	57.128	
WETTR1	4.6 (4.3)	4.2 (5.3)	5.1 (4.3)	10.0 (9.3)	5.4 (10.2)	28.779	
M-Mittel	6.5 (7.9)	5.7 (7.5)	3.3 (1.6)	4.7 (5.0)	-1.8 (8.6)	66.353	

Tabelle H.14: Statistik für die FROSTPROB2 bei der **Sauerkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	16.3 (8.7)						
RUBA	4.2 (3.8)	2.3 (2.1)	3.5 (3.8)	0.0 (0.0)	-4.2 (3.8)	3.011	*
ECLM	1.4 (2.9)	1.2 (1.3)	2.3 (3.5)	0.0 (0.0)	-1.4 (2.9)	32.558	
HCLM	21.6 (13.0)	20.9 (12.2)	5.8 (6.5)	5.8 (7.9)	-15.8 (15.0)	3.934	*
WETTR0	7.5 (6.8)	8.9 (6.5)	3.1 (2.8)	8.2 (7.1)	0.7 (9.6)	88.437	
WETTR1	8.1 (6.1)	6.7 (6.7)	7.0 (4.9)	10.5 (9.6)	2.4 (11.2)	66.498	
M-Mittel	8.6 (8.5)	8.0 (8.9)	4.3 (1.7)	4.9 (5.2)	-3.7 (9.3)	40.282	

Tabelle H.15: Statistik für die FROSTPROB2 bei der **Süßkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	26.3 (10.4)						
RUBA	9.1 (6.6)	9.1 (5.5)	10.0 (5.7)	0.7 (0.8)	-8.4 (6.6)	1.441	*
ECLM	6.7 (6.4)	5.4 (4.3)	6.3 (6.3)	0.0 (0.0)	-6.7 (6.4)	4.132	*
HCLM	29.5 (14.5)	31.0 (14.2)	11.4 (9.3)	8.1 (8.3)	-21.4 (16.5)	1.189	*
WETTR0	10.7 (7.2)	14.0 (8.6)	4.5 (3.1)	10.3 (7.6)	-0.4 (10.2)	93.935	
WETTR1	15.8 (8.0)	10.8 (8.0)	10.7 (7.1)	10.5 (9.6)	-5.3 (12.3)	39.208	
M-Mittel	14.3 (10.0)	14.1 (11.5)	8.6 (2.8)	5.9 (5.8)	-8.4 (10.7)	11.027	

Tabelle H.16: Statistik für die FROSTPROB2 bei der **Birne** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	19.8 (9.6)						
RUBA	6.1 (5.1)	4.6 (3.5)	8.6 (5.6)	0.7 (0.8)	-5.4 (5.1)	3.790	*
ECLM	5.6 (5.8)	2.1 (2.0)	5.2 (5.8)	0.0 (0.0)	-5.6 (5.8)	5.701	
HCLM	26.7 (14.1)	26.0 (13.6)	13.0 (9.3)	7.7 (8.3)	-19.0 (16.1)	2.149	*
WETTR0	8.0 (6.9)	11.2 (7.8)	4.7 (3.2)	11.0 (7.6)	2.9 (10.1)	56.061	
WETTR1	11.2 (6.3)	9.1 (7.1)	10.0 (6.8)	10.5 (9.6)	-0.7 (11.3)	89.526	
M-Mittel	11.5 (9.6)	10.6 (10.6)	8.3 (3.2)	6.0 (5.9)	-5.6 (10.5)	26.764	

Tabelle H.17: Statistik für die FROSTPROB2 beim **Wein** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.7 (6.8)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	8.8 (7.2)	6.7 (7.2)	0.0 (0.0)	3.7 (6.0)	-5.0 (9.2)	27.915	
WETTR0	1.2 (1.4)	0.8 (1.7)	0.4 (0.8)	3.8 (6.8)	2.5 (7.0)	46.941	
WETTR1	2.5 (4.3)	1.3 (2.6)	0.0 (0.0)	4.6 (6.5)	2.1 (7.7)	59.078	
M-Mittel	2.5 (3.8)	1.8 (2.8)	0.1 (0.2)	2.4 (2.7)	-0.1 (4.4)	96.797	

Tabelle H.18: Statistik für die FROSTPROB2 bei der **Pflaume** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	22.3 ^a (9.3)						
RUBA	7.9 (6.1)	7.9 (5.2)	10.5 (6.5)	0.7 (0.8)	-7.2 (6.2)	2.376	*
ECLM	8.1 (8.0)	4.2 (3.4)	8.0 (7.1)	0.0 (0.0)	-8.1 (8.0)	4.881	*
HCLM	31.3 (14.1)	29.1 (14.2)	17.0 (11.3)	8.8 (8.6)	-22.5 (16.2)	0.754	**
WETTR0	9.4 (6.9)	13.6 (8.6)	5.4 (3.6)	11.5 (7.7)	2.1 (10.1)	68.334	
WETTR1	13.5 (7.1)	10.0 (7.5)	10.8 (7.3)	10.5 (9.6)	-3.0 (11.7)	60.636	
M-Mittel	14.0 (10.8)	13.0 (11.1)	10.4 (4.2)	6.3 (6.2)	-7.7 (11.7)	16.922	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

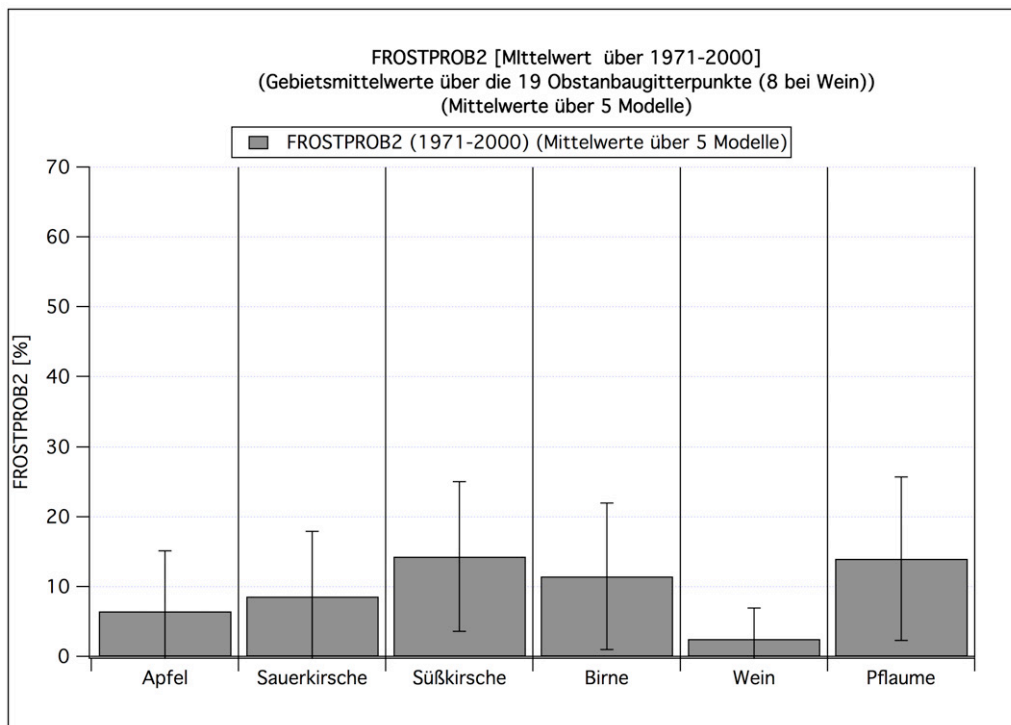


Abbildung H.5: Mittelwert (1971-2000) der **FROSTPROB2** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

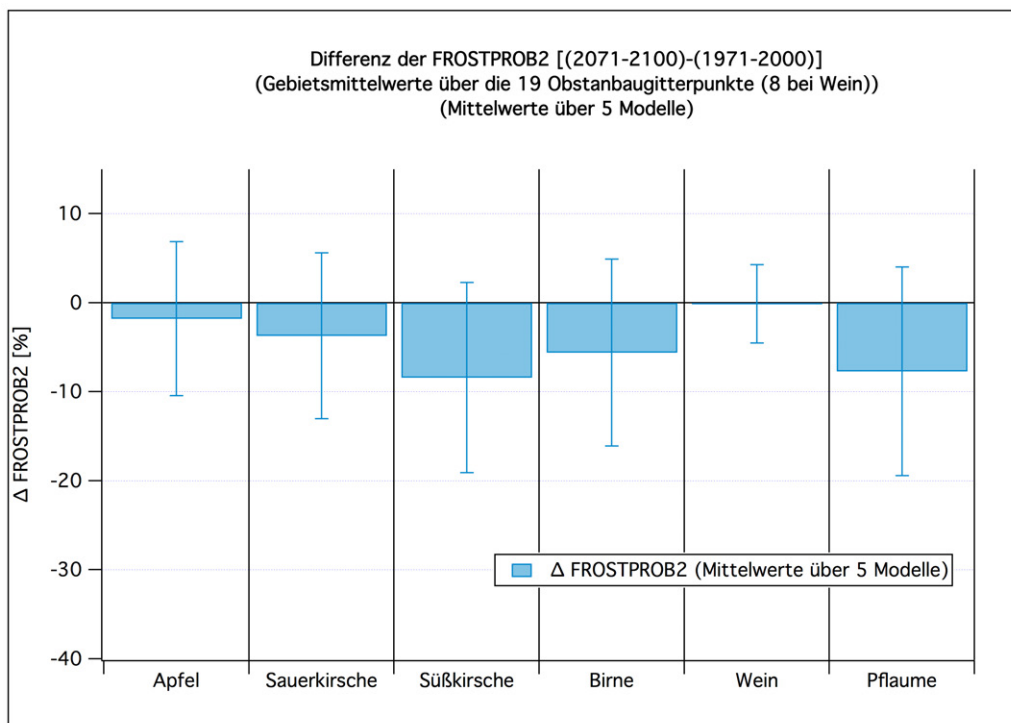


Abbildung H.6: Veränderung der **FROSTPROB2** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

H.4 Wahrscheinlichkeiten $P_{F,3}$ für das Auftreten von Spätfrost der Stärke 3 während des S-Zeitraums (FROSTPROB3)

Die folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Ergebnisse für die **FROSTPROB3** ($P_{F,3}$). Diese ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass an mindestens einem Tag im S-Zeitraum für die Tagesminimum-Temperatur T_n gilt: $T_n < -4$ °C. Eine genaue Definition und Diskussion dieser Größe findet man in Abschnitt 4.8.1 auf Seite 104. — Zur Berechnung des Termins des Blühbeginns wurde Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term (DL=1) verwendet. Man beachte, dass sich der S-Zeitraum beim Wein auf den Zeitraum ab 9 Tage vorm *Austriebsbeginn* bezieht (vgl. Seite 116).

Tabelle H.19: Statistik für die FROSTPROB3 beim **Apfel** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.9 (1.1)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	3.9 (3.6)	3.9 (6.1)	0.2 (0.4)	0.5 (0.8)	-3.3 (3.7)	7.181	
WETTR0	0.0 (0.0)	0.3 (0.7)	0.0 (0.0)	1.7 (3.6)	1.7 (3.6)	32.558	
WETTR1	0.5 (1.1)	0.4 (0.7)	0.2 (0.4)	0.3 (0.5)	-0.2 (1.1)	76.604	
M-Mittel	0.9 (1.8)	0.9 (1.5)	0.1 (0.1)	0.5 (0.8)	-0.4 (1.9)	69.042	

Tabelle H.20: Statistik für die FROSTPROB3 bei der **Sauerkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	1.5 (1.4)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	6.7 (6.2)	5.8 (6.6)	0.2 (0.4)	0.7 (1.0)	-6.0 (6.3)	6.145	
WETTR0	0.2 (0.4)	1.0 (1.3)	0.0 (0.0)	1.7 (3.6)	1.6 (3.6)	37.702	
WETTR1	0.5 (1.1)	0.9 (1.8)	0.2 (0.4)	0.5 (0.6)	0.0 (1.2)	99.682	
M-Mittel	1.5 (3.2)	1.5 (2.4)	0.1 (0.1)	0.6 (0.8)	-0.9 (3.2)	54.074	

Tabelle H.21: Statistik für die FROSTPROB3 bei der **Süßkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	4.0 (3.4)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	10.5 (9.2)	8.6 (8.1)	0.2 (0.4)	0.9 (1.3)	-9.7 (9.3)	4.212	*
WETTR0	0.3 (0.7)	1.4 (1.4)	0.0 (0.0)	1.9 (3.6)	1.6 (3.6)	38.395	
WETTR1	0.7 (1.1)	1.2 (2.1)	0.2 (0.4)	0.7 (0.7)	0.0 (1.3)	99.540	
M-Mittel	2.3 (5.0)	2.2 (3.8)	0.1 (0.1)	0.7 (0.9)	-1.6 (5.1)	47.136	

Tabelle H.22: Statistik für die FROSTPROB3 bei der **Birne** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.1 (1.9)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.2 (0.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.2 (0.4)	32.558	
HCLM	8.6 (8.3)	7.7 (7.4)	1.1 (1.3)	0.9 (1.3)	-7.7 (8.4)	7.011	
WETTR0	0.2 (0.4)	1.2 (1.3)	0.0 (0.0)	1.9 (3.6)	1.7 (3.6)	32.837	
WETTR1	0.5 (1.1)	1.0 (2.1)	0.2 (0.4)	0.7 (0.7)	0.2 (1.2)	77.575	
M-Mittel	1.9 (4.1)	2.0 (3.4)	0.2 (0.5)	0.7 (0.9)	-1.2 (4.2)	51.507	

Tabelle H.23: Statistik für die FROSTPROB3 beim **Wein** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (0.0)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	0.0 (0.0)	0.4 (0.8)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
WETTR0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.4 (0.8)	0.4 (0.9)	32.588	
WETTR1	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
M-Mittel	0.0 (0.0)	0.1 (0.2)	0.0 (0.0)	0.1 (0.2)	0.1 (0.2)	32.531	

Tabelle H.24: Statistik für die FROSTPROB3 bei der **Pflaume** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	3.1 ^a (2.2)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.5 (1.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.5 (1.1)	32.558	
HCLM	11.2 (9.5)	7.9 (7.6)	2.1 (2.5)	0.9 (1.3)	-10.4 (9.5)	3.389	*
WETTR0	0.5 (0.8)	1.6 (1.9)	0.0 (0.0)	1.9 (3.6)	1.4 (3.6)	44.107	
WETTR1	0.5 (1.1)	1.0 (2.1)	0.2 (0.4)	0.7 (0.7)	0.2 (1.2)	77.575	
M-Mittel	2.6 (5.6)	2.1 (3.5)	0.5 (1.0)	0.7 (0.9)	-1.9 (5.7)	43.818	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

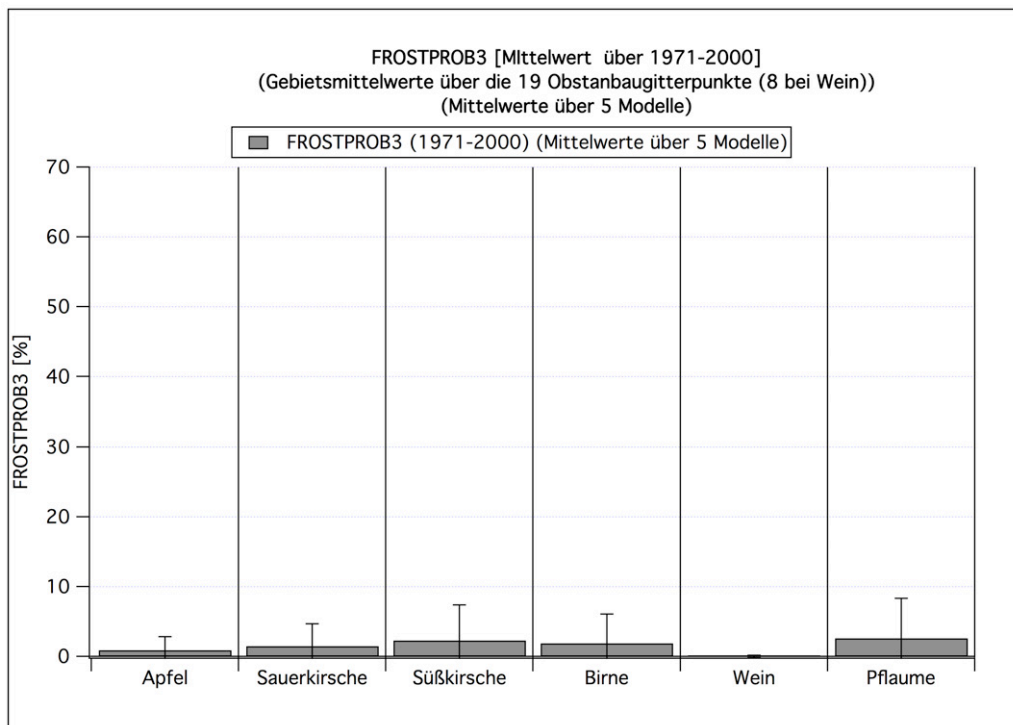


Abbildung H.7: Mittelwert (1971-2000) der **FROSTPROB3** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

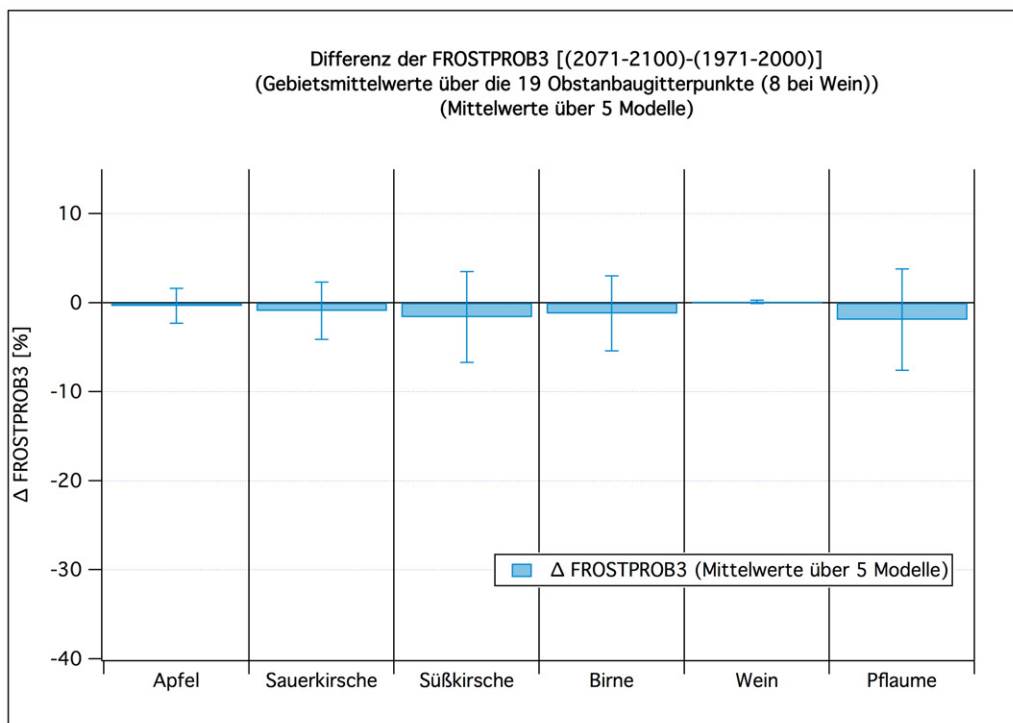


Abbildung H.8: Veränderung der **FROSTPROB3** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

H.5 Frostschäden an der Frucht (FROSTSCHADEN)

Die folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Ergebnisse für den **FROSTSCHADEN** [s_F ; vgl. Gleichung (4.119)] an den Früchten. Hierbei wurden mehrere, aufeinander folgende Schadensereignisse innerhalb eines Winters berücksichtigt [vgl. die Diskussion bei Formel (4.120)]. Eine genaue Definition und Diskussion dieser Größe findet man in Abschnitt 4.8.4 ab Seite 113. Der FROSTSCHADEN s_F wurde mit der zweifach modifizierten Feuchttemperatur T_{mmf} nach Gleichung (4.116) berechnet. — Zur Berechnung des Termins des Blühbeginns wurde Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term (DL=1) verwendet. Der Termin des Blühendes wurde mit Modell 10a (ohne DAYLENGTH-Term) bestimmt. Man beachte, dass sich der S-Zeitraum beim Wein auf den Zeitraum ab 9 Tage vorm *Austriebsbeginn* bezieht (vgl. Seite 116).

Tabelle H.25: Statistik für den FROSTSCHADEN beim **Apfel** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	9.2 (7.1)						
RUBA	1.0 (0.9)	0.8 (0.5)	2.1 (1.8)	0.4 (0.3)	-0.6 (0.9)	19.950	
ECLM	1.3 (0.8)	1.4 (1.0)	2.3 (2.1)	0.2 (0.2)	-1.0 (0.9)	2.251	*
HCLM	10.2 (7.8)	9.8 (8.3)	3.0 (3.0)	5.1 (5.7)	-5.1 (9.5)	28.557	
WETTR0	4.0 (3.3)	4.6 (3.4)	3.2 (2.6)	6.1 (7.0)	2.1 (7.7)	57.773	
WETTR1	2.6 (2.3)	3.4 (3.7)	4.0 (2.9)	7.6 (6.8)	4.9 (7.1)	16.777	
M-Mittel	3.8 (4.1)	4.0 (3.7)	2.9 (1.1)	3.9 (3.7)	0.1 (5.1)	97.734	

Tabelle H.26: Statistik für den FROSTSCHADEN bei der **Sauerkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.5 (5.2)						
RUBA	0.6 (0.4)	0.5 (0.3)	0.8 (0.6)	0.2 (0.1)	-0.4 (0.4)	5.622	
ECLM	0.8 (0.5)	1.0 (0.8)	1.0 (0.6)	0.2 (0.1)	-0.7 (0.5)	1.687	*
HCLM	7.7 (6.9)	7.4 (7.3)	1.1 (1.1)	2.9 (3.5)	-4.7 (7.6)	21.723	
WETTR0	1.7 (1.4)	2.7 (2.1)	2.1 (1.8)	4.4 (6.8)	2.7 (6.9)	44.108	
WETTR1	2.3 (2.2)	1.9 (1.7)	2.6 (2.1)	4.8 (4.7)	2.5 (5.1)	32.582	
M-Mittel	2.6 (3.1)	2.7 (2.8)	1.5 (0.7)	2.5 (2.4)	-0.1 (3.8)	94.352	

Tabelle H.27: Statistik für den FROSTSCHADEN bei der **Süßkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	12.9 (8.2)						
RUBA	1.7 (1.3)	1.3 (0.8)	2.1 (1.5)	0.3 (0.2)	-1.3 (1.4)	5.273	**
ECLM	1.7 (1.1)	2.1 (1.4)	2.4 (1.9)	0.2 (0.2)	-1.5 (1.1)	0.789	
HCLM	12.8 (9.8)	13.3 (10.2)	2.6 (2.5)	5.2 (6.3)	-7.5 (11.4)	19.091	
WETTR0	4.0 (3.1)	6.3 (5.1)	3.1 (2.6)	5.7 (7.0)	1.6 (7.6)	66.427	
WETTR1	4.0 (2.7)	4.0 (3.6)	3.8 (2.6)	7.5 (6.8)	3.6 (7.2)	32.286	
M-Mittel	4.8 (5.0)	5.4 (5.1)	2.8 (1.0)	3.8 (3.6)	-1.0 (5.8)	71.225	

Tabelle H.28: Statistik für den FROSTSCHADEN bei der **Birne** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.1 (4.1)						
RUBA	0.9 (0.8)	0.6 (0.3)	1.6 (1.3)	0.4 (0.3)	-0.5 (0.8)	22.643	*
ECLM	1.3 (1.0)	1.1 (0.8)	1.6 (1.0)	0.2 (0.1)	-1.1 (1.0)	2.371	
HCLM	8.0 (7.1)	7.8 (7.1)	2.5 (2.2)	3.4 (4.5)	-4.5 (8.2)	27.501	
WETTR0	1.3 (0.9)	3.3 (2.5)	1.7 (1.2)	4.9 (6.6)	3.7 (6.6)	26.879	
WETTR1	2.2 (1.7)	1.8 (1.4)	2.3 (1.6)	4.4 (3.9)	2.2 (4.2)	29.465	
M-Mittel	2.7 (3.1)	2.9 (3.0)	1.9 (0.7)	2.7 (2.6)	-0.1 (3.8)	97.429	

Tabelle H.29: Statistik für den FROSTSCHADEN beim **Wein** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	7.9 (7.9)						
RUBA	0.3 (0.3)	0.0 (0.0)	0.1 (0.1)	0.1 (0.1)	-0.2 (0.3)	23.452	
ECLM	0.3 (0.3)	0.5 (0.4)	0.5 (0.6)	0.0 (0.0)	-0.3 (0.3)	7.704	
HCLM	2.9 (3.2)	3.4 (5.1)	0.6 (0.7)	3.0 (3.4)	0.1 (4.6)	95.029	
WETTR0	1.3 (2.0)	1.6 (2.3)	1.6 (2.1)	3.6 (6.7)	2.3 (6.9)	50.070	
WETTR1	2.3 (3.8)	0.5 (0.6)	0.9 (0.9)	3.7 (4.3)	1.4 (5.6)	62.618	
M-Mittel	1.4 (1.1)	1.2 (1.5)	0.8 (0.5)	2.1 (2.1)	0.7 (2.3)	55.875	

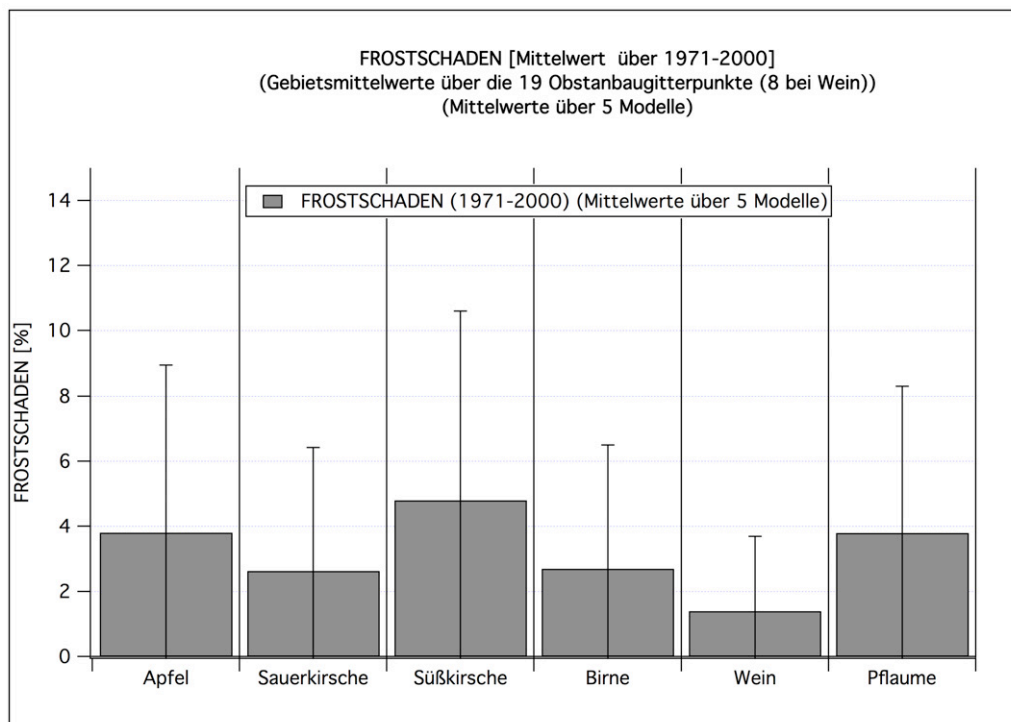
Tabelle H.30: Statistik für den FROSTSCHADEN bei der **Pflaume** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.4 ^a (3.6)						
RUBA	1.5 (1.1)	1.0 (0.5)	2.4 (1.7)	0.6 (0.6)	-0.8 (1.3)	18.200	*
ECLM	2.3 (1.8)	1.7 (1.1)	2.3 (1.4)	0.3 (0.2)	-2.1 (1.8)	2.418	
HCLM	10.2 (7.9)	9.6 (7.8)	3.9 (3.3)	4.2 (5.1)	-6.1 (9.2)	19.419	
WETTR0	2.1 (1.4)	4.5 (3.2)	2.5 (1.6)	5.6 (6.3)	3.5 (6.5)	27.848	
WETTR1	2.8 (1.7)	2.5 (1.8)	3.1 (1.9)	5.0 (4.1)	2.2 (4.4)	30.705	
M-Mittel	3.8 (3.9)	3.9 (3.6)	2.8 (0.9)	3.1 (2.8)	-0.6 (4.5)	76.676	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

Tabelle H.31: Statistik für den FROSTSCHADEN bei der **Aprikose** (in %). (Blühende=Blühbeginn + 12 d!)

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	22.9 (10.6)						
RUBA	9.9 (8.1)	9.1 (6.0)	13.0 (8.7)	2.2 (1.5)	-7.7 (8.2)	6.681	
ECLM	12.4 (10.4)	10.1 (6.0)	11.1 (7.0)	1.2 (0.8)	-11.2 (10.4)	3.658	*
HCLM	27.7 (12.7)	23.4 (12.8)	17.3 (11.6)	7.4 (7.3)	-20.3 (14.4)	0.685	**
WETTR0	11.4 (7.9)	18.8 (9.8)	7.3 (3.9)	10.8 (7.9)	-0.6 (10.9)	91.309	
WETTR1	10.1 (5.0)	9.8 (6.5)	11.1 (6.6)	11.2 (8.9)	1.1 (10.1)	82.688	
M-Mittel	14.3 (8.0)	14.3 (6.5)	11.9 (3.6)	6.5 (5.1)	-7.7 (9.0)	8.656	

**Abbildung H.9:** Mittelwert (1971-2000) des **FROSTSCHADENS** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

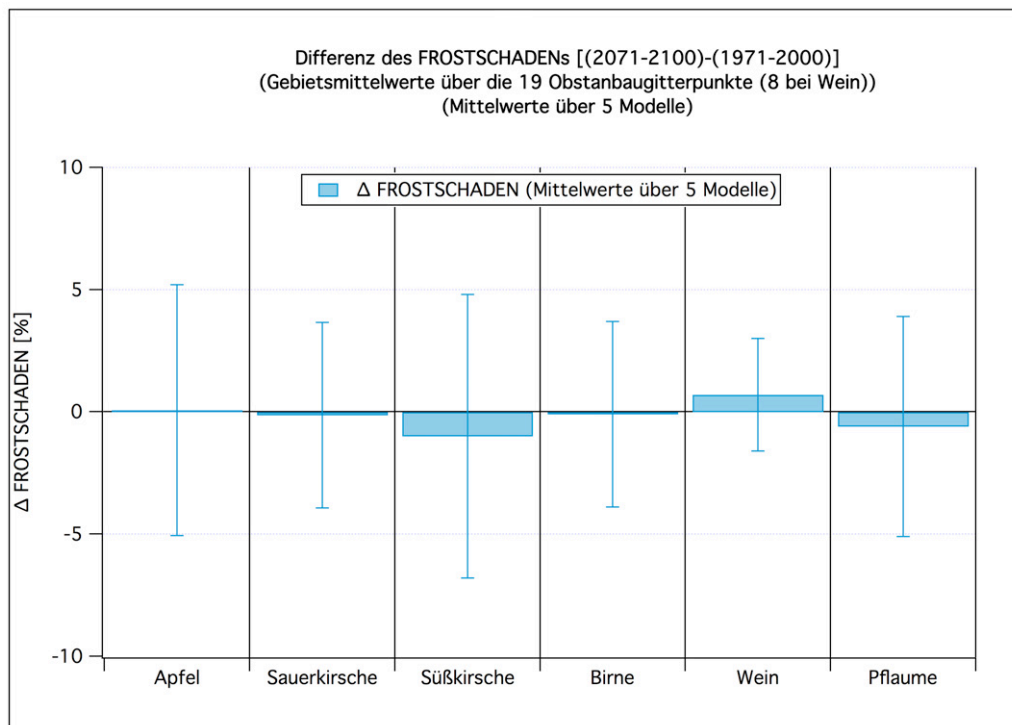


Abbildung H.10: Veränderung des **FROTSCHADENS** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

H.6 Wahrscheinlichkeit s_F^{0-10} für das Auftreten von Schäden der Stärke 0 an den Früchten (FROSTSCHADENSPROB0)

Die folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Ergebnisse für die **FROSTSCHADENSPROB0** (s_F^{0-10}) (= Wahrscheinlichkeit für 0% – 10%-Schäden) an den Früchten. Eine genaue Definition und Diskussion dieser Größe findet man in Abschnitt 4.8.5 ab Seite 117. Die FROSTSCHADENSPROB0 s_F^{0-10} wurde aus den Schäden berechnet, die mit der zweifach modifizierten Feuchttemperatur T_{mmf} nach Gleichung (4.116) berechnet worden waren. — Zur Berechnung des Termins des Blühbeginns wurde Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term (DL=1) verwendet. Der Termin des Blühendes wurde mit Modell 10a (ohne DAYLENGTH-Term) bestimmt. Man beachte, dass sich der S-Zeitraum beim Wein auf den Zeitraum ab 9 Tage vorm *Austriebsbeginn* bezieht (vgl. Seite 116).

Tabelle H.32: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB0 beim **Apfel** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	44.1 (11.1)						
RUBA	29.8 (12.0)	36.2 (11.8)	40.0 (13.0)	17.7 (11.8)	-12.1 (16.5)	14.848	
ECLM	47.9 (12.4)	39.7 (13.2)	51.2 (14.2)	25.9 (11.9)	-22.0 (16.8)	1.120	*
HCLM	37.0 (12.4)	34.1 (12.4)	30.5 (13.4)	29.7 (11.9)	-7.3 (16.8)	38.833	
WETTR0	34.6 (10.5)	47.9 (10.6)	54.1 (11.6)	45.4 (14.3)	10.8 (17.4)	21.972	
WETTR1	42.8 (11.8)	44.4 (12.9)	47.7 (11.0)	31.6 (12.8)	-11.3 (17.0)	19.011	
M-Mittel	38.4 (6.8)	40.5 (5.9)	44.7 (9.4)	30.1 (10.9)	-8.4 (12.4)	17.343	

Tabelle H.33: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB0 bei der **Sauerkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	59.3 (12.3)						
RUBA	44.1 (14.1)	50.6 (12.7)	49.6 (14.1)	20.4 (13.0)	-23.8 (18.8)	1.405	*
ECLM	63.0 (13.2)	56.5 (13.9)	61.9 (14.0)	29.1 (12.7)	-33.9 (18.0)	0.038	***
HCLM	48.9 (14.5)	47.4 (14.6)	37.8 (14.7)	37.7 (14.0)	-11.2 (19.7)	26.059	
WETTR0	52.3 (13.6)	63.9 (10.8)	60.5 (12.1)	49.2 (15.3)	-3.1 (20.0)	75.947	
WETTR1	58.2 (12.7)	58.8 (12.5)	59.1 (11.0)	38.9 (14.4)	-19.3 (18.8)	4.396	*
M-Mittel	53.3 (7.1)	55.4 (6.9)	53.8 (10.5)	35.1 (11.6)	-18.3 (13.2)	0.883	**

Tabelle H.34: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB0 bei der **Süßkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	64.4 (13.5)						
RUBA	52.9 (13.2)	64.4 (12.5)	57.3 (14.1)	28.9 (15.0)	-24.0 (19.6)	1.723	*
ECLM	71.2 (13.2)	68.3 (12.8)	68.0 (12.9)	36.9 (14.1)	-34.2 (18.9)	0.060	***
HCLM	54.9 (13.6)	49.3 (15.8)	41.2 (14.2)	44.9 (15.7)	-10.0 (20.4)	32.989	
WETTR0	65.1 (11.5)	74.7 (10.6)	65.1 (13.2)	52.9 (14.4)	-12.2 (18.1)	18.061	
WETTR1	73.2 (10.0)	71.1 (12.2)	71.0 (9.6)	40.3 (13.3)	-32.8 (16.3)	0.018	***
M-Mittel	63.5 (9.8)	65.5 (10.3)	60.5 (12.9)	40.8 (9.0)	-22.6 (12.8)	0.103	**

Tabelle H.35: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB0 bei der **Birne** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	59.2 (12.2)						
RUBA	45.0 (13.7)	55.5 (12.9)	54.0 (13.7)	30.9 (15.1)	-14.1 (20.0)	16.224	
ECLM	65.8 (13.7)	60.6 (13.5)	64.8 (13.8)	36.0 (14.0)	-29.7 (19.2)	0.301	**
HCLM	48.9 (14.9)	51.6 (16.8)	43.6 (14.1)	48.6 (15.5)	-0.3 (21.1)	97.770	
WETTR0	58.6 (13.0)	69.3 (10.3)	68.1 (12.2)	58.0 (14.5)	-0.6 (19.0)	95.014	
WETTR1	66.2 (10.9)	64.3 (12.6)	71.2 (8.9)	46.5 (13.3)	-19.7 (16.9)	2.312	*
M-Mittel	56.9 (9.8)	60.2 (7.8)	60.4 (12.2)	44.0 (11.4)	-12.9 (14.3)	7.569	

Tabelle H.36: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB0 beim **Wein** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	35.4 (13.8)						
RUBA	12.9 (11.1)	15.0 (9.0)	19.2 (11.6)	4.2 (7.0)	-8.7 (12.9)	17.963	
ECLM	33.7 (13.6)	25.4 (13.7)	28.7 (13.0)	7.1 (5.8)	-26.7 (14.6)	0.069	***
HCLM	22.5 (10.9)	27.5 (15.6)	21.7 (12.8)	16.2 (10.6)	-6.2 (14.8)	40.263	
WETTR0	24.6 (11.3)	30.8 (11.8)	33.3 (13.8)	30.8 (14.3)	6.2 (17.9)	48.679	
WETTR1	30.4 (13.8)	31.7 (12.4)	30.9 (12.5)	27.5 (13.1)	-2.9 (18.6)	75.529	
M-Mittel	24.8 (7.7)	26.1 (7.3)	26.8 (6.0)	17.2 (13.3)	-7.7 (14.3)	26.316	

Tabelle H.37: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB0 bei der **Pflaume** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	64.3 ^a (11.6)						
RUBA	46.4 (13.3)	60.5 (12.5)	55.2 (14.6)	35.1 (15.1)	-11.3 (19.7)	25.558	
ECLM	64.8 (13.9)	65.6 (12.7)	65.4 (12.8)	38.8 (13.8)	-26.0 (19.2)	0.882	**
HCLM	51.5 (14.2)	49.3 (16.5)	45.4 (14.6)	48.9 (15.2)	-2.6 (20.4)	79.890	
WETTR0	62.1 (12.2)	71.6 (10.6)	67.5 (12.4)	61.0 (14.3)	-1.1 (18.4)	90.437	
WETTR1	70.2 (9.7)	69.2 (11.9)	72.8 (9.0)	48.3 (13.0)	-21.9 (15.9)	0.790	**
M-Mittel	59.0 (10.2)	63.2 (9.4)	61.3 (11.4)	46.4 (10.4)	-12.6 (13.9)	7.381	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

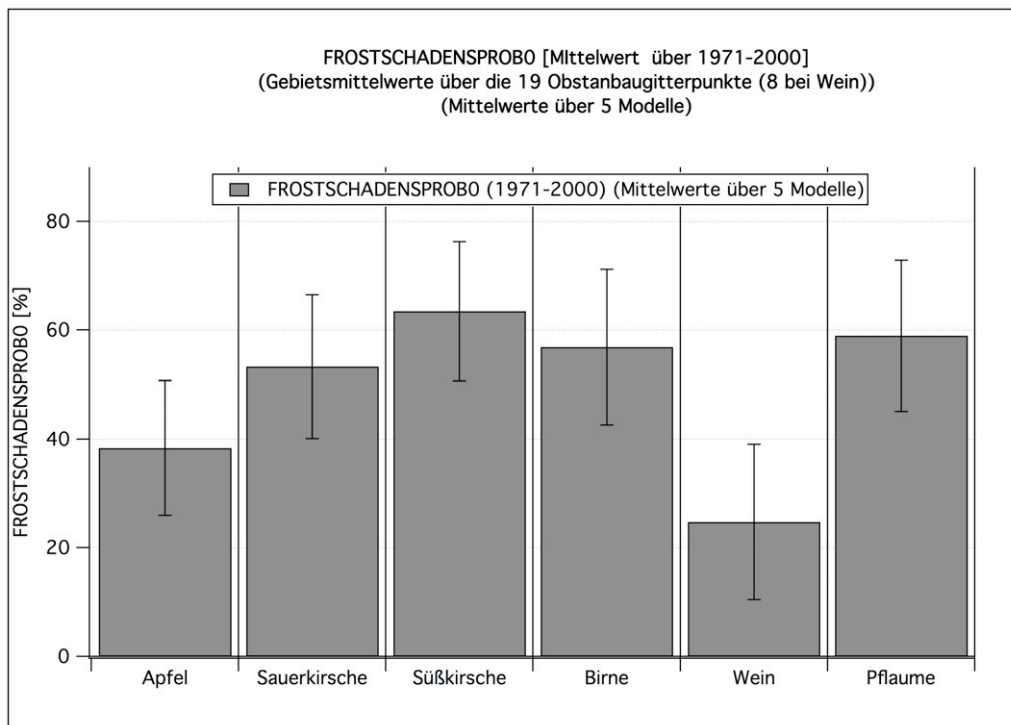


Abbildung H.11: Mittelwert (1971-2000) der **FROSTSCHADENSPROB0** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

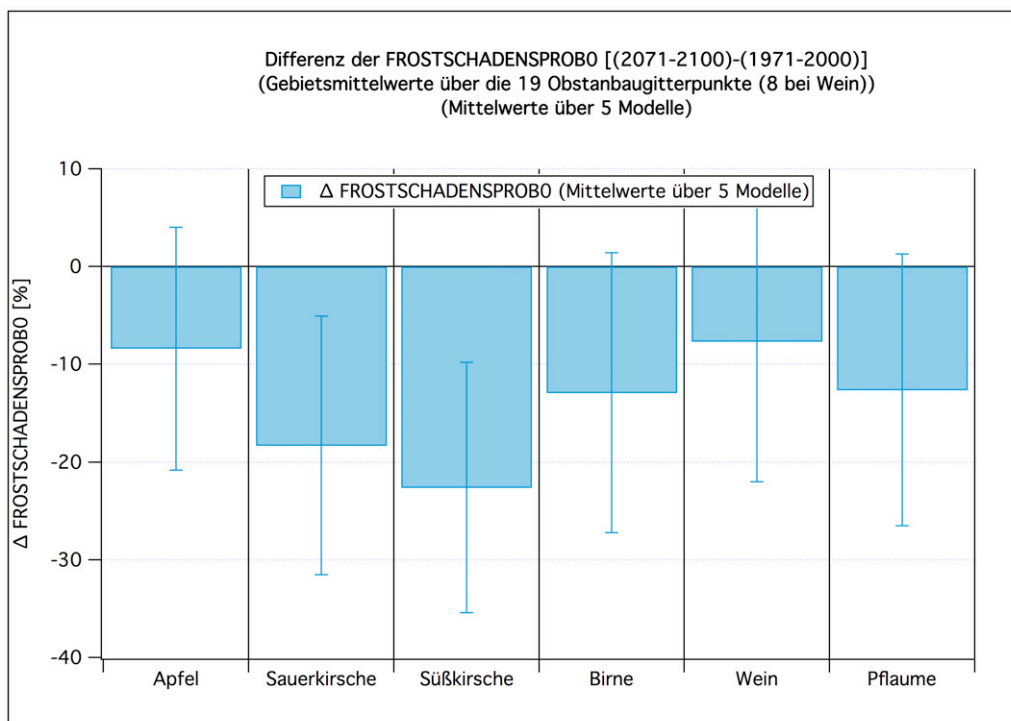


Abbildung H.12: Veränderung der **FROSTSCHADENSPROB0** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

H.7 Wahrscheinlichkeit s_F^{10-50} für das Auftreten von Schäden der Stärke 1 an den Früchten (FROSTSCHADENSPROB1)

Die folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Ergebnisse für die **FROSTSCHADENSPROB1** (s_F^{10-50}) (= Wahrscheinlichkeit für 10 % – 50 %-Schäden) an den Früchten. Eine genaue Definition und Diskussion dieser Größe findet man in Abschnitt 4.8.5 ab Seite 117. Der FROSTSCHADENSPROB1 s_F^{10-50} wurde aus den Schäden berechnet, die mit der zweifach modifizierten Feuchttemperatur T_{mmf} nach Gleichung (4.116) berechnet worden waren. — Zur Berechnung des Termins des Blühbeginns wurde Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term (DL=1) verwendet. Der Termin des Blühendes wurde mit Modell 10a (ohne DAYLENGTH-Term) bestimmt. Man beachte, dass sich der S-Zeitraum beim Wein auf den Zeitraum ab 9 Tage vorm *Austriebsbeginn* bezieht (vgl. Seite 116).

Tabelle H.38: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB1 beim **Apfel** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	7.6 (4.7)						
RUBA	1.6 (2.3)	0.7 (1.4)	4.7 (5.9)	0.2 (0.4)	-1.4 (2.3)	22.052	
ECLM	3.0 (3.3)	1.7 (2.4)	3.0 (3.6)	0.2 (0.4)	-2.8 (3.4)	9.763	
HCLM	6.3 (4.5)	7.5 (5.2)	3.9 (5.2)	5.8 (6.7)	-0.5 (8.0)	89.485	
WETTR0	5.2 (4.5)	4.9 (3.7)	4.2 (4.0)	4.2 (3.7)	-1.1 (5.7)	71.272	
WETTR1	2.8 (2.3)	3.5 (4.2)	6.8 (5.7)	7.9 (6.4)	5.1 (6.7)	13.431	
M-Mittel	3.8 (1.8)	3.7 (2.5)	4.5 (2.2)	3.6 (3.3)	-0.1 (3.7)	93.334	

Tabelle H.39: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB1 bei der **Sauerkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	4.7 (3.9)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.4 (0.7)	0.5 (0.8)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.9 (1.8)	0.9 (1.3)	0.4 (0.7)	0.0 (0.0)	-0.9 (1.8)	32.558	
HCLM	2.6 (2.8)	4.9 (4.8)	0.4 (0.7)	4.4 (5.4)	1.7 (6.0)	56.142	
WETTR0	1.7 (1.7)	2.6 (3.1)	3.2 (4.5)	1.6 (2.9)	-0.2 (3.3)	91.671	
WETTR1	0.9 (1.5)	3.2 (4.1)	4.0 (4.7)	5.1 (5.2)	4.2 (5.4)	12.397	
M-Mittel	1.2 (1.0)	2.4 (1.5)	1.7 (1.7)	2.2 (2.3)	1.0 (2.4)	41.069	

Tabelle H.40: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB1 bei der **Süßkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.0 (4.1)						
RUBA	2.3 (3.2)	0.5 (1.1)	2.8 (3.8)	0.0 (0.0)	-2.3 (3.2)	16.239	
ECLM	2.8 (4.8)	3.1 (4.0)	2.1 (2.9)	0.0 (0.0)	-2.8 (4.8)	23.644	
HCLM	5.1 (3.7)	5.5 (4.2)	5.1 (5.7)	4.6 (5.6)	-0.5 (6.6)	87.050	
WETTR0	3.8 (3.1)	2.8 (2.7)	6.0 (7.0)	2.3 (3.3)	-1.6 (4.5)	48.781	
WETTR1	3.9 (3.6)	5.1 (5.2)	4.6 (4.8)	6.3 (5.0)	2.4 (6.1)	42.404	
M-Mittel	3.6 (1.9)	3.4 (1.5)	4.1 (2.4)	2.6 (2.8)	-0.9 (3.2)	54.824	

Tabelle H.41: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB1 bei der **Birne** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	8.4 (6.5)						
RUBA	1.4 (2.3)	0.2 (0.4)	3.7 (5.5)	0.0 (0.0)	-1.4 (2.3)	21.112	
ECLM	2.1 (2.9)	1.9 (2.9)	2.3 (3.7)	0.0 (0.0)	-2.1 (2.9)	14.309	
HCLM	7.2 (6.0)	7.4 (7.4)	5.4 (6.7)	2.3 (2.6)	-5.0 (6.4)	12.798	
WETTR0	2.5 (2.5)	4.2 (4.8)	2.8 (3.7)	1.9 (2.7)	-0.5 (3.6)	77.208	
WETTR1	1.6 (1.4)	4.0 (4.7)	4.2 (3.7)	7.9 (6.9)	6.3 (7.1)	7.841	
M-Mittel	3.0 (2.4)	3.5 (2.2)	3.7 (2.1)	2.4 (3.4)	-0.5 (3.9)	76.893	

Tabelle H.42: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB1 beim **Wein** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	4.2 (3.9)						
RUBA	0.4 (0.9)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.4 (0.9)	32.558	
ECLM	0.0 (0.0)	0.4 (0.9)	1.7 (3.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	5.4 (4.7)	1.7 (2.0)	1.2 (1.9)	3.8 (5.6)	-1.7 (7.2)	64.528	
WETTR0	1.3 (1.9)	1.7 (2.4)	0.8 (1.7)	0.0 (0.0)	-1.3 (1.9)	18.427	
WETTR1	0.8 (1.2)	0.4 (0.9)	1.7 (2.7)	5.0 (5.6)	4.2 (5.7)	14.394	
M-Mittel	1.6 (2.3)	0.8 (0.8)	1.1 (1.0)	1.8 (2.3)	0.2 (3.0)	90.912	

Tabelle H.43: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB1 bei der **Pflaume** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	8.7 ^a (6.0)						
RUBA	4.1 (4.5)	0.7 (1.4)	6.7 (8.5)	0.3 (0.7)	-3.7 (4.6)	10.932	
ECLM	5.1 (5.7)	2.8 (3.9)	4.2 (5.0)	0.0 (0.0)	-5.1 (5.7)	7.758	
HCLM	8.1 (5.3)	10.2 (7.7)	6.9 (7.9)	4.6 (4.9)	-3.6 (7.1)	32.075	
WETTR0	4.6 (4.5)	5.3 (5.9)	5.1 (5.6)	3.1 (3.4)	-1.4 (5.6)	61.122	
WETTR1	3.3 (3.0)	4.9 (5.2)	5.4 (4.6)	11.0 (8.9)	7.7 (9.3)	10.349	
M-Mittel	5.0 (2.3)	4.8 (3.1)	5.6 (3.0)	3.8 (4.7)	-1.2 (5.1)	61.168	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

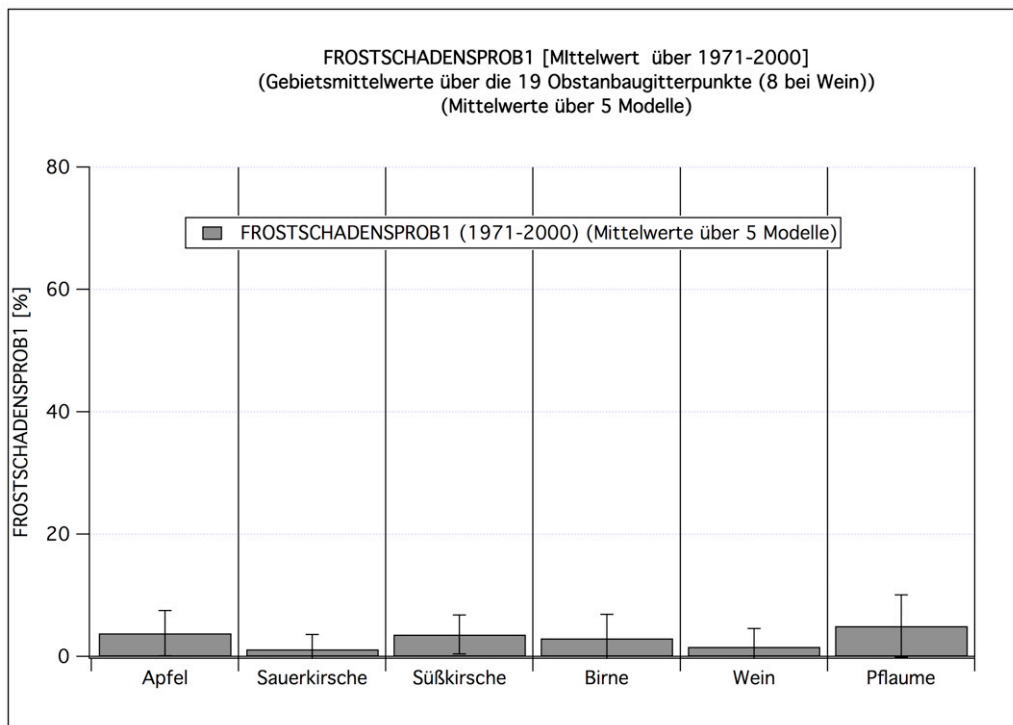


Abbildung H.13: Mittelwert (1971-2000) der **FROTSCHADENSPROB1** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

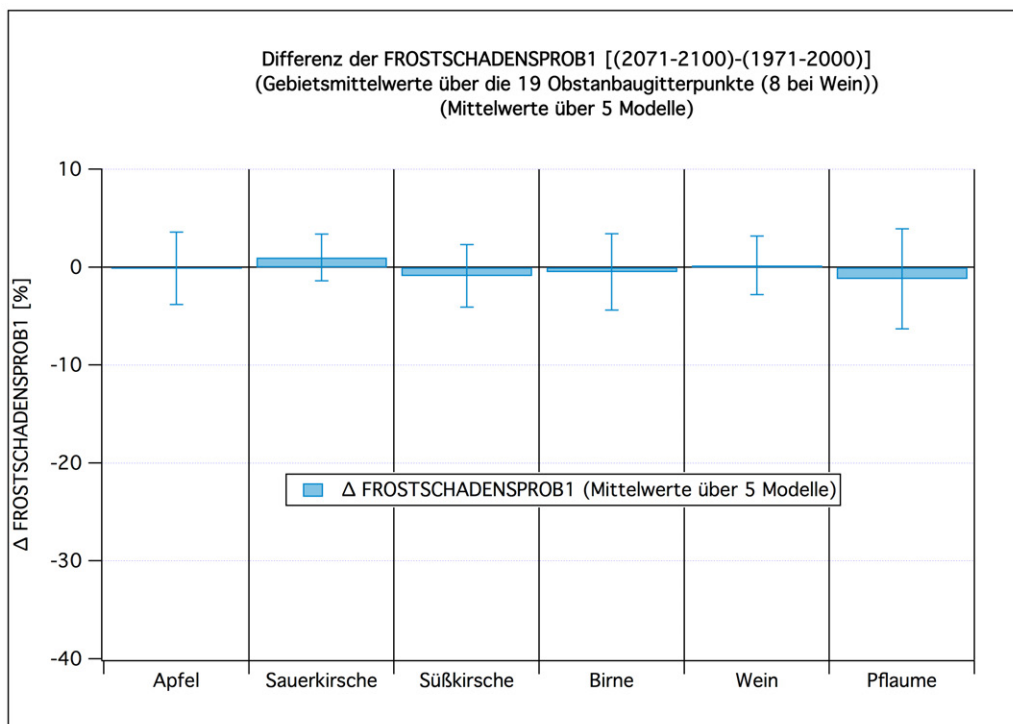


Abbildung H.14: Veränderung der **FROTSCHADENSPROB1** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

H.8 Wahrscheinlichkeit s_F^{50-100} für das Auftreten von Schäden der Stärke 1 an den Früchten (FROSTSCHADENSPROB2)

Die folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Ergebnisse für die **FROSTSCHADENSPROB2** (s_F^{50-100}) (= Wahrscheinlichkeit für 50 % – 100 %-Schäden) an den Früchten. Eine genaue Definition und Diskussion dieser Größe findet man in Abschnitt 4.8.5 ab Seite 117. Der FROSTSCHADENSPROB2 s_F^{50-100} wurde aus den Schäden berechnet, die mit der zweifach modifizierten Feuchttemperatur T_{mmf} nach Gleichung (4.116) berechnet worden waren. — Zur Berechnung des Termins des Blühbeginns wurde Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term (DL=1) verwendet. Der Termin des Blühendes wurde mit Modell 10a (ohne DAYLENGTH-Term) bestimmt. Man beachte, dass sich der S-Zeitraum beim Wein auf den Zeitraum ab 9 Tage vorm *Austriebsbeginn* bezieht (vgl. Seite 116).

Tabelle H.44: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB2 beim **Apfel** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	7.0 (7.0)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.4 (0.7)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.2 (0.4)	0.7 (1.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	9.9 (9.1)	8.6 (8.9)	1.8 (2.1)	4.0 (5.9)	-5.8 (10.7)	27.948	
WETTR0	2.6 (2.9)	3.5 (3.8)	1.2 (1.5)	4.2 (6.9)	1.6 (7.4)	66.840	
WETTR1	1.2 (1.8)	1.9 (3.3)	1.6 (1.6)	6.1 (6.9)	4.9 (7.1)	16.731	
M-Mittel	2.7 (4.4)	2.8 (3.5)	1.1 (0.6)	2.9 (3.0)	0.1 (5.0)	95.622	

Tabelle H.45: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB2 bei der **Sauerkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	4.9 (4.6)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.2 (0.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	7.2 (7.7)	5.4 (7.1)	0.3 (0.7)	1.6 (2.9)	-5.6 (8.2)	17.362	
WETTR0	0.5 (0.8)	1.4 (1.8)	0.7 (0.8)	3.3 (6.8)	2.8 (6.9)	40.959	
WETTR1	1.4 (2.1)	0.5 (0.8)	1.0 (1.2)	3.5 (4.1)	2.1 (4.6)	35.816	
M-Mittel	1.8 (3.2)	1.5 (2.3)	0.4 (0.4)	1.7 (2.0)	-0.1 (3.6)	93.464	

Tabelle H.46: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB2 bei der **Süßkirsche** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	10.9 (8.2)						
RUBA	0.4 (0.5)	0.2 (0.4)	0.5 (0.8)	0.0 (0.0)	-0.4 (0.5)	16.079	
ECLM	0.0 (0.0)	0.2 (0.4)	0.5 (1.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	10.9 (10.2)	11.7 (10.9)	1.1 (1.6)	3.7 (5.9)	-7.2 (11.6)	21.716	
WETTR0	2.1 (2.2)	4.9 (5.2)	1.0 (1.1)	4.2 (6.9)	2.1 (7.2)	55.625	
WETTR1	1.6 (2.1)	2.1 (3.4)	1.9 (1.9)	6.5 (7.0)	4.9 (7.3)	17.919	
M-Mittel	3.0 (4.9)	3.8 (5.0)	1.0 (0.5)	2.9 (3.1)	-0.1 (5.4)	96.465	

Tabelle H.47: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB2 bei der **Birne** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	4.0 (3.6)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	6.5 (7.4)	5.2 (7.3)	0.7 (1.0)	2.8 (4.7)	-3.7 (8.6)	39.580	
WETTR0	0.0 (0.0)	1.6 (2.3)	0.3 (0.5)	4.0 (6.9)	4.0 (6.9)	23.991	
WETTR1	1.2 (1.8)	0.3 (0.5)	0.7 (0.8)	2.1 (2.6)	0.9 (3.1)	57.503	
M-Mittel	1.5 (2.9)	1.4 (2.1)	0.3 (0.3)	1.8 (2.3)	0.2 (3.5)	88.814	

Tabelle H.48: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB2 beim **Wein** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	7.5 (8.5)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
HCLM	2.1 (4.3)	2.9 (5.2)	0.0 (0.0)	2.5 (3.6)	0.4 (5.4)	88.046	
WETTR0	0.8 (1.7)	1.3 (1.9)	1.2 (1.9)	3.3 (6.8)	2.5 (7.0)	47.268	
WETTR1	1.7 (3.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.7 (2.7)	0.0 (4.3)	99.799	
M-Mittel	0.9 (1.1)	0.8 (1.4)	0.2 (0.5)	1.5 (2.0)	0.6 (2.3)	60.974	

Tabelle H.49: Statistik für die FROSTSCHADENSPROB2 bei der **Pflaume** (in %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	3.4 ^a (2.6)						
RUBA	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	100.000	
ECLM	0.5 (1.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	-0.5 (1.1)	32.558	
HCLM	8.2 (8.3)	6.5 (7.7)	1.9 (2.5)	3.2 (5.4)	-5.1 (9.7)	29.781	
WETTR0	0.0 (0.0)	2.1 (2.6)	0.3 (0.5)	4.4 (6.9)	4.4 (6.9)	20.640	
WETTR1	0.7 (1.1)	0.5 (0.8)	0.7 (0.8)	1.7 (1.9)	1.0 (2.1)	33.035	
M-Mittel	1.9 (3.8)	1.8 (2.7)	0.6 (0.8)	1.9 (2.4)	0.0 (4.3)	98.431	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

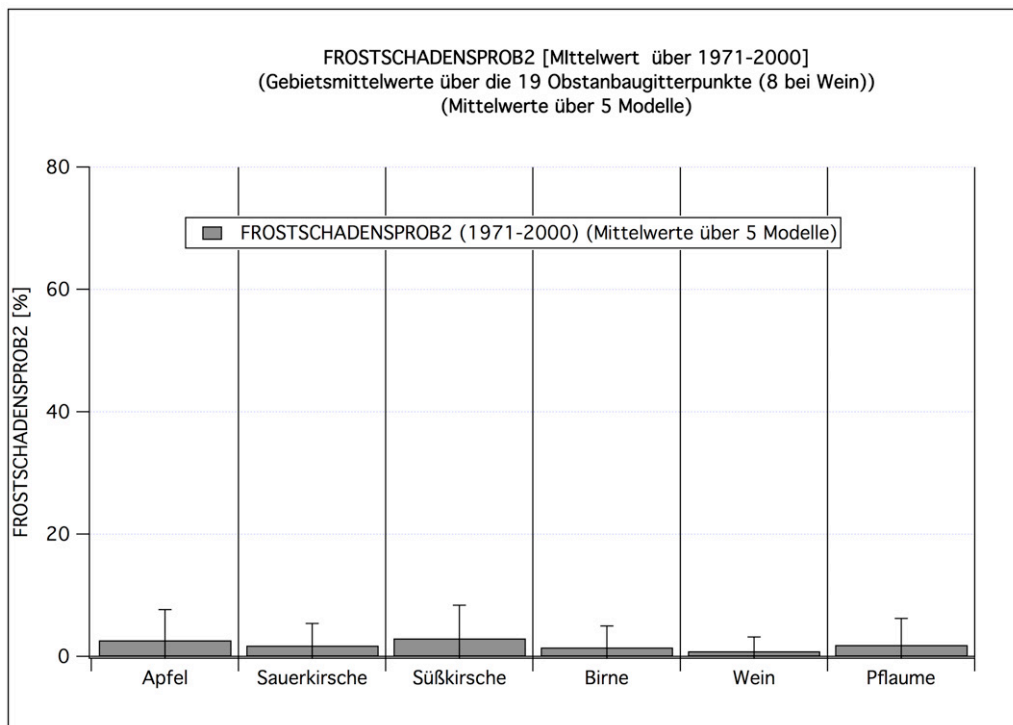


Abbildung H.15: Mittelwert (1971-2000) der **FROSTSCHADENSPROB2** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

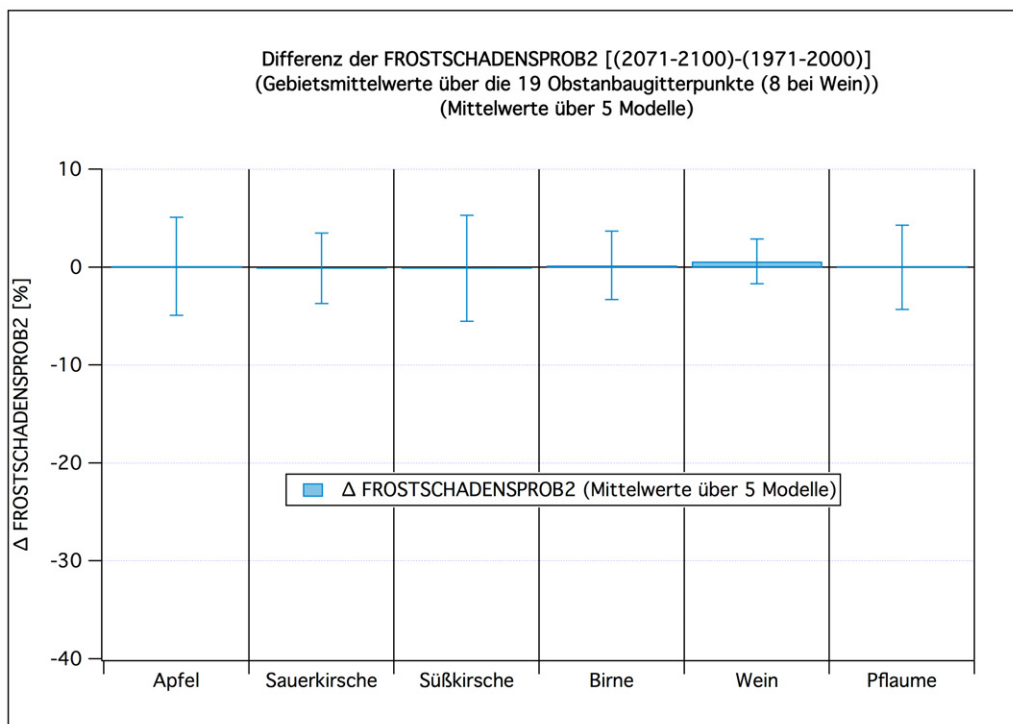


Abbildung H.16: Veränderung der **FROSTSCHADENSPROB2** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

H.9 Mittlere Anzahl n_F^0 der Frosttage pro Jahr mit Froststärke 0 (FROSTTAGE0)

Die folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Ergebnisse für die Größe **FROSTTAGE0** (n_F^0) im Sondermodus (= mittlere Anzahl von Tagen pro Jahr mit $T_f < -2$ °C vor Blühbeginn oder mit $T_f < 0$ °C zum und nach dem Blühbeginn im S-Zeitraum). Eine genaue Definition und Diskussion dieser Größe findet man in Abschnitt 4.8.6 ab Seite 118. FROSTTAGE0 = n_F^0 wurde mit der normalen Feuchttemperatur T_f nach Gleichung (4.107) (mit $Fak(V_z) \equiv 1$) berechnet, wobei der in Abschnitt 4.8.6 erwähnte Sondermodus verwendet wurde. FROSTTAGE0 kann daher direkt zur Berechnung der *mittleren Kosten für Frostschutzmaßnahmen* verwendet werden. — Zur Berechnung des Termins des Blühbeginns wurde Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term (DL=1) verwendet. Man beachte, dass sich der S-Zeitraum beim Wein auf den Zeitraum ab 9 Tage vorm *Austriebsbeginn* bezieht (vgl. Seite 116).

Tabelle H.50: Statistik für die FROSTTAGE0 beim **Apfel** (in Tage pro Jahr).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	1.1 (0.6)						
RUBA	0.3 (0.2)	0.3 (0.2)	0.7 (0.5)	0.2 (0.2)	-0.1 (0.3)	45.339	*
ECLM	0.7 (0.4)	0.5 (0.4)	0.8 (0.4)	0.2 (0.2)	-0.5 (0.5)	3.845	
HCLM	1.3 (0.7)	1.5 (0.8)	0.7 (0.4)	0.9 (0.7)	-0.3 (0.9)	46.731	
WETTR0	0.5 (0.3)	0.6 (0.3)	0.9 (0.4)	1.0 (0.5)	0.5 (0.5)	5.657	
WETTR1	0.6 (0.3)	0.5 (0.3)	0.9 (0.5)	1.1 (0.7)	0.6 (0.7)	13.980	
M-Mittel	0.7 (0.4)	0.7 (0.5)	0.8 (0.2)	0.7 (0.5)	0.0 (0.6)	92.384	

Tabelle H.51: Statistik für die FROSTTAGE0 bei der **Sauerkirsche** (in Tage pro Jahr).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	1.7 (0.8)						
RUBA	0.5 (0.3)	0.6 (0.3)	1.0 (0.6)	0.2 (0.2)	-0.3 (0.4)	9.183	**
ECLM	1.1 (0.5)	0.8 (0.5)	1.1 (0.5)	0.3 (0.2)	-0.8 (0.5)	0.477	
HCLM	1.7 (0.9)	2.1 (0.9)	0.9 (0.5)	1.1 (0.8)	-0.6 (1.2)	29.483	
WETTR0	0.7 (0.4)	1.1 (0.4)	1.2 (0.5)	1.1 (0.5)	0.4 (0.6)	16.697	
WETTR1	1.1 (0.4)	0.8 (0.4)	1.1 (0.6)	1.2 (0.7)	0.2 (0.8)	65.140	
M-Mittel	1.0 (0.5)	1.1 (0.7)	1.0 (0.3)	0.8 (0.6)	-0.2 (0.7)	50.651	

Tabelle H.52: Statistik für die FROSTTAGE0 bei der **Süßkirsche** (in Tage pro Jahr).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.8 (1.0)						
RUBA	1.1 (0.6)	1.2 (0.5)	1.6 (0.8)	0.4 (0.4)	-0.7 (0.7)	6.712	***
ECLM	1.9 (0.6)	1.5 (0.7)	1.8 (0.7)	0.5 (0.3)	-1.4 (0.7)	0.020	
HCLM	2.5 (1.1)	3.0 (1.2)	1.4 (0.7)	1.7 (1.0)	-0.9 (1.5)	25.548	
WETTR0	1.3 (0.5)	2.2 (0.7)	1.8 (0.6)	1.5 (0.6)	0.2 (0.7)	53.016	
WETTR1	1.8 (0.6)	1.5 (0.5)	1.8 (0.7)	1.5 (0.8)	-0.3 (1.0)	60.417	
M-Mittel	1.7 (0.5)	1.9 (0.8)	1.7 (0.4)	1.1 (0.7)	-0.6 (0.8)	13.830	

Tabelle H.53: Statistik für die FROSTTAGE0 bei der **Birne** (in Tage pro Jahr).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.1 (0.9)						
RUBA	0.8 (0.5)	0.8 (0.4)	1.6 (0.8)	0.6 (0.5)	-0.2 (0.7)	55.047	**
ECLM	1.6 (0.6)	1.1 (0.7)	1.7 (0.8)	0.6 (0.4)	-1.0 (0.7)	0.934	
HCLM	2.2 (1.1)	2.7 (1.1)	1.4 (0.7)	1.7 (1.0)	-0.6 (1.4)	43.965	
WETTR0	1.0 (0.4)	1.8 (0.6)	1.8 (0.6)	1.7 (0.6)	0.7 (0.7)	6.899	
WETTR1	1.4 (0.5)	1.2 (0.5)	1.8 (0.7)	1.6 (0.8)	0.3 (1.0)	57.392	
M-Mittel	1.4 (0.6)	1.5 (0.8)	1.7 (0.4)	1.2 (0.6)	-0.2 (0.8)	67.199	

Tabelle H.54: Statistik für die FROSTTAGE0 beim **Wein** (in Tage pro Jahr).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.9 (0.7)						
RUBA	0.1 (0.1)	0.1 (0.2)	0.1 (0.1)	0.0 (0.1)	-0.1 (0.1)	14.020	*
ECLM	0.5 (0.4)	0.3 (0.2)	0.3 (0.3)	0.0 (0.0)	-0.5 (0.4)	1.699	
HCLM	0.5 (0.4)	0.6 (0.4)	0.3 (0.2)	0.6 (0.6)	0.1 (0.7)	72.789	
WETTR0	0.2 (0.2)	0.2 (0.2)	0.4 (0.3)	0.5 (0.3)	0.2 (0.4)	22.388	
WETTR1	0.4 (0.3)	0.3 (0.3)	0.5 (0.4)	0.7 (0.5)	0.3 (0.6)	25.974	
M-Mittel	0.4 (0.2)	0.3 (0.2)	0.3 (0.1)	0.4 (0.3)	0.0 (0.4)	90.070	

Tabelle H.55: Statistik für die FROSTTAGE0 bei der **Pflaume** (in Tage pro Jahr).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.4 ^a (0.8)						
RUBA	1.1 (0.7)	1.1 (0.5)	1.8 (0.9)	0.8 (0.6)	-0.3 (0.9)	47.460	**
ECLM	1.9 (0.7)	1.3 (0.7)	2.0 (0.9)	0.7 (0.5)	-1.2 (0.9)	0.752	
HCLM	2.6 (1.2)	2.9 (1.2)	1.7 (0.8)	1.9 (1.1)	-0.7 (1.6)	34.816	
WETTR0	1.2 (0.5)	2.3 (0.7)	2.0 (0.7)	1.8 (0.6)	0.6 (0.8)	10.646	
WETTR1	1.6 (0.6)	1.5 (0.6)	2.1 (0.8)	1.8 (0.9)	0.2 (1.0)	76.433	
M-Mittel	1.7 (0.6)	1.8 (0.8)	1.9 (0.4)	1.4 (0.6)	-0.3 (0.8)	48.203	

^a Mittelwert nur von 1971-1990.

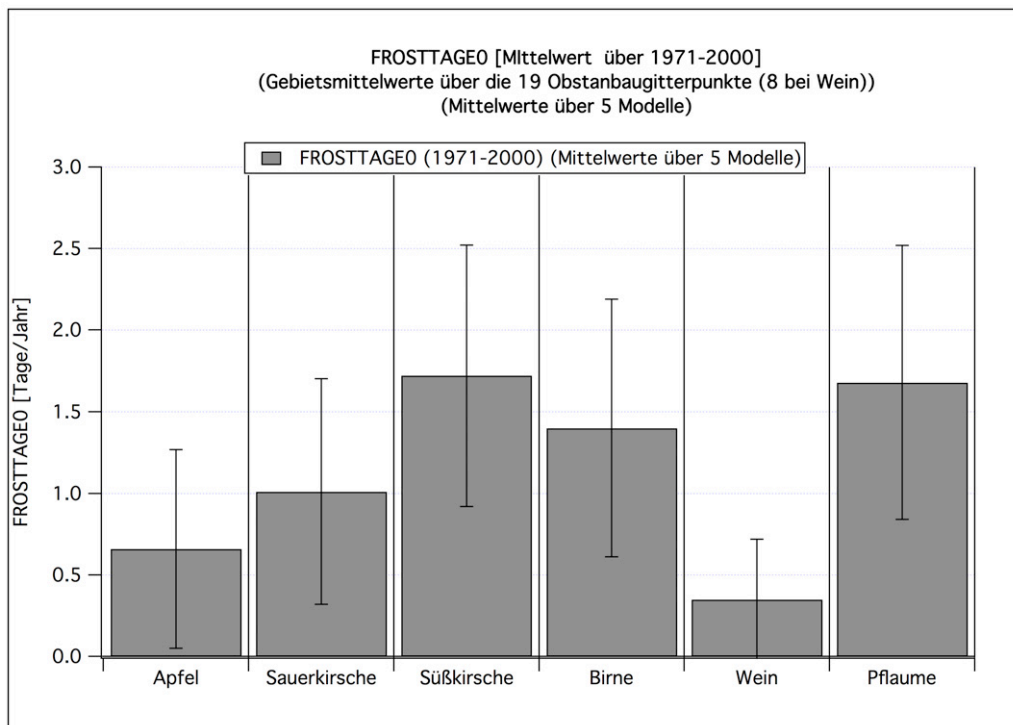


Abbildung H.17: Mittelwert (1971-2000) der **FROSTTAGE0** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

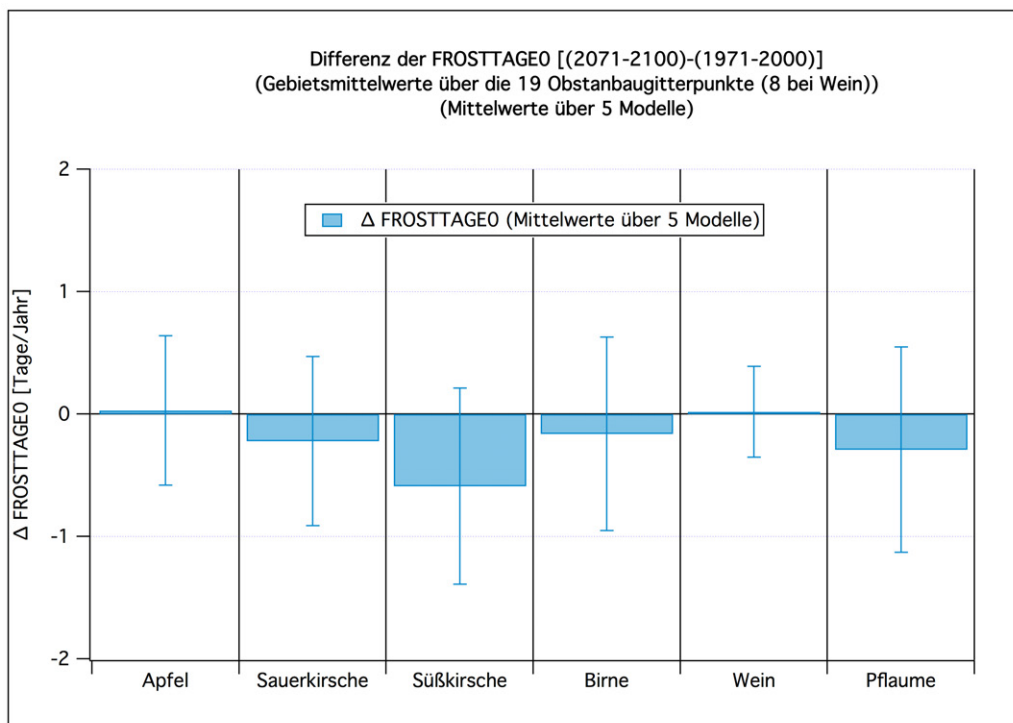


Abbildung H.18: Veränderung der **FROSTTAGE0** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

I Ergebnisse für verschiedene Apfelwicklergrößen

Die folgenden Ergebnisse wurden mit dem im Abschnitt 4.9 beschriebenen Apfelwicklermodell berechnet. Dazu wurde zuerst der Apfelwicklergenerationsindex I_A mit Hilfe der Tagesminimum und -maximumtemperaturen aus den drei dynamischen Klimamodellen und den WETTREG-Läufen 0 und 1 berechnet. Danach konnten dann mit Hilfe der Werte aus Tabelle 4.18 die Schäden mit und ohne Bekämpfung und die zugehörigen Kosten für die Maßnahmen bestimmt werden. Die Schäden und Kosten wurden dabei zunächst für jedes Jahr, jeden Gitterpunkt und jedes Modell getrennt aus I_A berechnet. Erst danach wurden Mittelwerte über das Gebiet und die Zeit gebildet. Diese Vorgehensweise war nötig, da die Schäden und Kosten nicht linear von I_A abhängen.

Die folgenden Tabellen zeigen 30-jährige Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (vgl. Abschnitt 4.5) mit einseitigem 95 %-Konfidenzintervall in Klammern für vier 30-jährige Zeitabschnitte sowie die Differenz '(2071-2100)-(1971-2000)' und den p-Wert zur H_0 : "Differenz gleich null" und H_1 : "Differenz ungleich null". Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$. Zum Aufbau der Tabellen und zu den benutzten Zeitabschnitten beachte man auch die Bemerkungen am Anfang des Anhangs B. Eine kurze Diskussion einiger Ergebnisse findet man in Kapitel 5.5.

Die Angaben zum Generationsindex I_A sind weitestgehend unabhängig von der Fruchtart. Die Schätzungen der Schäden und Bekämpfungskosten in den folgenden Tabellen beziehen sich auf den Apfel (vgl. Kapitel 4.9).

Die Tabellen I.1 bis I.6 zeigen die Ergebnisse für den Apfelwickler-Generationsindex I_A , die Apfelwickler-Schäden ohne Gegenmaßnahmen und bei Anwendung von extensiven und intensiven Maßnahmen sowie die Kosten für die Durchführung der extensiven und intensiven Maßnahmen.

Die Tabelle I.7 zeigt am Beispiel der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von zwei vollständigen Apfelwicklergenerationen ($I_A = 2$), wie sehr sich die Ergebnisse, welche man mit WETTREG-Temperaturen erhält, von denen unterscheiden, die mit Hilfe der Temperaturen der dynamischen Klimamodelle berechnet wurden. Im Zeitraum 1971-2000 ist die Wahrscheinlichkeit bei Nutzung der WETTREG-Temperaturen noch um durchschnittlich 8 % kleiner als bei den dynamischen Modellen. Das liegt daran, dass auf Grund der zu kleinen Varianzen der Temperaturen (vgl. Abbildung 4.6) in WETTREG2010 fast nie besonders warme Jahre auftreten. Zum Ende des 21. Jahrhunderts hin treten hingegen bei WETTREG zwei vollständige Generationen mit signifikant größerer Wahrscheinlichkeit als bei den anderen Modellen auf. Die Wahrscheinlichkeit ist um ca. 20 % größer als bei den dynamischen Modellen.

Tabelle I.1: Statistik für den **Generationsindex I_A des Apfelwicklers**, berechnet mit dem *Apfelwickler-Degree Day Modell* mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	1.36 (0.06)						
RUBA	1.37 (0.07)	1.37 (0.07)	1.51 (0.08)	1.82 (0.07)	0.45 (0.10)	0.000	***
ECLM	1.37 (0.09)	1.38 (0.10)	1.49 (0.10)	1.82 (0.09)	0.46 (0.12)	0.000	***
HCLM	1.36 (0.10)	1.50 (0.08)	1.68 (0.11)	1.89 (0.09)	0.53 (0.13)	0.000	***
WETTR0	1.35 (0.02)	1.42 (0.04)	1.73 (0.04)	1.96 (0.04)	0.61 (0.04)	0.000	***
WETTR1	1.36 (0.03)	1.43 (0.05)	1.71 (0.06)	1.95 (0.02)	0.58 (0.03)	0.000	***
M-Mittel	1.36 (0.04)	1.42 (0.05)	1.62 (0.13)	1.89 (0.07)	0.53 (0.08)	0.000	***

Tabelle I.2: Statistik für den **Schaden durch den Apfelwickler ohne Maßnahmen** (in %), berechnet mit dem *Apfelwickler-Degree Day Modell* mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	8.0 (0.5)						
RUBA	8.1 (0.6)	8.1 (0.6)	9.4 (1.0)	13.5 (1.0)	5.4 (1.2)	0.000	***
ECLM	8.4 (0.8)	8.5 (0.9)	9.7 (1.1)	13.5 (1.2)	5.1 (1.4)	0.000	***
HCLM	8.4 (0.8)	9.3 (0.9)	11.7 (1.4)	14.6 (1.3)	6.2 (1.5)	0.000	***
WETTR0	7.6 (0.1)	8.1 (0.4)	12.0 (0.7)	15.7 (0.4)	8.1 (0.4)	0.000	***
WETTR1	7.7 (0.1)	8.3 (0.5)	11.8 (0.9)	15.7 (0.3)	8.0 (0.3)	0.000	***
M-Mittel	8.0 (0.4)	8.5 (0.5)	10.9 (1.5)	14.6 (1.2)	6.6 (1.2)	0.000	***

Tabelle I.3: Statistik für den **Schaden durch den Apfelwickler bei extensiven Maßnahmen** (in %), berechnet mit dem *Apfelwickler-Degree Day Modell* mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.5 (0.1)						
RUBA	2.5 (0.1)	2.5 (0.1)	2.7 (0.1)	3.1 (0.1)	0.6 (0.1)	0.000	***
ECLM	2.5 (0.1)	2.5 (0.1)	2.7 (0.1)	3.1 (0.1)	0.6 (0.2)	0.000	***
HCLM	2.5 (0.1)	2.7 (0.1)	2.9 (0.1)	3.2 (0.1)	0.7 (0.2)	0.000	***
WETTR0	2.5 (0.0)	2.6 (0.1)	3.0 (0.1)	3.3 (0.0)	0.8 (0.1)	0.000	***
WETTR1	2.5 (0.0)	2.6 (0.1)	2.9 (0.1)	3.3 (0.0)	0.8 (0.0)	0.000	***
M-Mittel	2.5 (0.1)	2.6 (0.1)	2.8 (0.2)	3.2 (0.1)	0.7 (0.1)	0.000	***

Tabelle I.4: Statistik für den **Schaden durch den Apfelwickler bei extensiven Maßnahmen im Zeitraum 1971-2000 und intensiven danach** (in %), berechnet mit dem *Apfelwickler-Degree Day Modell* mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.5 (0.1)						
RUBA	2.5 (0.1)	0.6 (0.1)	0.8 (0.1)	1.3 (0.1)	-1.2 (0.2)	0.000	***
ECLM	2.5 (0.1)	0.7 (0.1)	0.8 (0.1)	1.3 (0.1)	-1.2 (0.2)	0.000	***
HCLM	2.5 (0.1)	0.8 (0.1)	1.1 (0.2)	1.4 (0.1)	-1.1 (0.2)	0.000	***
WETTR0	2.5 (0.0)	0.6 (0.1)	1.1 (0.1)	1.5 (0.0)	-0.9 (0.1)	0.000	***
WETTR1	2.5 (0.0)	0.7 (0.1)	1.1 (0.1)	1.5 (0.0)	-0.9 (0.0)	0.000	***
M-Mittel	2.5 (0.1)	0.7 (0.1)	1.0 (0.2)	1.4 (0.2)	-1.1 (0.2)	0.000	***

Tabelle I.5: Statistik für die **Kosten der Bekämpfung des Apfelwicklers mit extensiven Maßnahmen** (in €/ha/a), berechnet mit dem *Apfelwickler-Degree Day Modell* mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	163 (7)						
RUBA	163 (9)	164 (8)	179 (9)	212 (7)	48 (11)	0.000	***
ECLM	163 (10)	165 (11)	177 (11)	213 (9)	50 (14)	0.000	***
HCLM	162 (11)	178 (9)	197 (12)	220 (10)	57 (14)	0.000	***
WETTR0	162 (3)	170 (4)	203 (4)	227 (4)	65 (5)	0.000	***
WETTR1	164 (3)	172 (5)	201 (6)	225 (2)	61 (4)	0.000	***
M-Mittel	163 (4)	170 (6)	191 (15)	219 (7)	56 (8)	0.000	***

Tabelle I.6: Statistik für die **Kosten der Bekämpfung des Apfelwicklers mit extensiven Maßnahmen im Zeitraum 1971-2000 und mit intensiven Maßnahmen danach** (in €/ha/a), berechnet mit dem *Apfelwickler-Degree Day Modell* mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	163 (7)						
RUBA	163 (9)	361 (7)	372 (6)	386 (3)	223 (9)	0.000	***
ECLM	163 (10)	360 (8)	367 (8)	388 (5)	225 (11)	0.000	***
HCLM	162 (11)	371 (6)	380 (7)	391 (7)	229 (13)	0.000	***
WETTR0	162 (3)	368 (3)	384 (1)	392 (3)	230 (4)	0.000	***
WETTR1	164 (3)	369 (3)	383 (2)	390 (1)	226 (3)	0.000	***
M-Mittel	163 (4)	366 (5)	377 (9)	389 (2)	227 (5)	0.000	***

Tabelle I.7: Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Apfelwicklergenerationsindex $I_A = 2$ (d. h. für zwei vollständige Generationen) (in %), berechnet mit dem *Apfelwickler-Degree Day Modell* mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	4.8 (4.5)						
RUBA	6.5 (5.9)	6.2 (5.8)	18.9 (10.3)	61.1 (10.7)	54.5 (12.1)	0.000	***
ECLM	10.1 (7.7)	10.9 (8.1)	23.1 (11.7)	56.7 (11.6)	46.6 (13.7)	0.000	***
HCLM	10.4 (8.5)	17.8 (9.2)	40.0 (13.3)	65.4 (10.9)	55.0 (13.6)	0.000	***
WETTR0	0.2 (0.4)	4.4 (4.0)	46.6 (8.0)	81.9 (4.4)	81.8 (4.4)	0.000	***
WETTR1	0.5 (1.1)	6.7 (5.6)	44.5 (9.9)	86.0 (3.4)	85.5 (3.5)	0.000	***
M-Mittel	5.5 (5.5)	9.2 (5.6)	34.6 (14.7)	70.2 (15.2)	64.7 (15.7)	0.006	***

J Ergebnisse des Bodenwasser- und Ertragsmodells SIMWASER

Die Berechnungsmethode für die in den jeweils ersten beiden Tabellen für jede Obstart angegebenen Feuchtmassenertrag (Fruchtertrag) ist in Abschnitt 4.10.11 beschrieben. Die Methode zur Berechnung der Ertragsschäden ist in Kapitel 4.10.12 dargestellt. Zu den Schäden mit und ohne CO₂-Düngung (Kapitel 4.10.7) und deren Varianzen bzw. Konfidenzintervallen im Zeitraum 1971-2000 beachte man die Fußnote 178 auf Seite 160. Die übrigen Größen wurden in Kapitel 4.10.5 und 4.10.6 beschrieben. Eine kurze Diskussion der Ergebnisse findet man in Kapitel 5.6 ab Seite 243. Einen ausführlicheren Vergleich der Mittelwerte “über die 5 Klimamodellläufe” und deren Veränderungen für die verschiedenen Obstarten sowie eine Diskussion dieser Ergebnisse findet man in Anhang J.14.

J.1 Frühreifender Apfel

Tabelle J.1: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) beim frühreifen Apfel (**mit Bewässerung** und **ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	30.7 (0.7)						
RUBA	31.3 (0.7)	30.0 (0.6)	30.3 (0.6)	29.8 (0.6)	-1.5 (0.9)	0.161	**
ECLM	30.2 (1.1)	29.5 (0.8)	29.2 (0.9)	29.1 (0.9)	-1.1 (1.4)	12.137	
HCLM	30.2 (0.9)	30.1 (0.7)	30.2 (0.9)	29.9 (0.7)	-0.3 (1.1)	66.172	
WETTR0	31.2 (0.4)	31.9 (0.4)	33.6 (0.5)	35.5 (0.6)	4.3 (0.7)	0.000	***
WETTR1	30.8 (0.5)	31.4 (0.5)	33.4 (0.4)	35.5 (0.5)	4.6 (0.7)	0.000	***
M-Mittel	30.7 (0.6)	30.6 (1.3)	31.3 (2.5)	32.0 (4.0)	1.2 (4.1)	45.093	

Tabelle J.2: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) beim frühreifen Apfel (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	30.6 (0.7)						
RUBA	31.2 (0.7)	31.8 (0.6)	34.3 (0.8)	36.5 (0.7)	5.3 (1.0)	0.000	***
ECLM	30.0 (1.0)	31.3 (0.8)	33.2 (1.1)	35.8 (1.1)	5.8 (1.5)	0.000	***
HCLM	30.1 (1.0)	31.9 (0.7)	34.3 (1.1)	36.8 (0.9)	6.7 (1.3)	0.000	***
WETTR0	31.1 (0.4)	33.8 (0.5)	38.0 (0.7)	43.5 (0.9)	12.4 (0.9)	0.000	***
WETTR1	30.7 (0.5)	33.2 (0.6)	37.9 (0.6)	43.5 (0.7)	12.8 (0.9)	0.000	***
M-Mittel	30.6 (0.6)	32.4 (1.3)	35.6 (2.8)	39.2 (4.9)	8.6 (4.9)	0.844	**

Tabelle J.3: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim frühreifen Apfel (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	5.0 (3.1)						
RUBA	4.7 (2.7)	6.7 (1.9)	7.3 (2.0)	10.0 (1.9)	5.3 (3.2)	0.173	**
ECLM	6.6 (2.4)	12.6 (2.9)	11.8 (2.6)	14.7 (3.5)	8.1 (4.2)	0.032	***
HCLM	7.5 (1.9)	6.4 (2.2)	8.0 (2.1)	9.2 (3.0)	1.7 (3.5)	35.046	
WETTR0	5.1 (1.6)	4.6 (1.4)	2.4 (2.5)	7.1 (3.3)	2.0 (3.6)	25.782	
WETTR1	3.9 (1.5)	3.9 (1.3)	2.4 (2.1)	5.2 (3.6)	1.3 (3.8)	49.920	
M-Mittel	5.6 (1.4)	6.8 (4.3)	6.4 (5.0)	9.2 (4.1)	3.7 (4.2)	7.926	

Tabelle J.4: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim frühreifen Apfel (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	5.0 (3.4)						
RUBA	4.7 (2.6)	0.5 (1.8)	-6.6 (2.4)	-12.9 (2.1)	-17.7 (3.3)	0.000	***
ECLM	6.7 (2.4)	6.3 (2.9)	-2.1 (3.2)	-8.1 (4.1)	-14.7 (4.6)	0.000	***
HCLM	7.6 (2.1)	-0.1 (2.2)	-6.4 (2.3)	-14.8 (3.4)	-22.4 (3.9)	0.000	***
WETTR0	5.1 (1.5)	-2.3 (1.5)	-13.6 (2.6)	-20.3 (3.5)	-25.5 (3.8)	0.000	***
WETTR1	3.9 (1.5)	-2.9 (1.5)	-13.7 (2.0)	-22.7 (4.3)	-26.6 (4.5)	0.000	***
M-Mittel	5.6 (1.4)	0.3 (4.6)	-8.5 (6.3)	-15.8 (7.4)	-21.4 (7.6)	0.143	**

Tabelle J.5: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim frühreifen Apfel (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%. — Zu den Konfidenzintervallen, besonders in Spalte (A), vergleiche die Diskussion auf Seite 160.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.2)						
RUBA	0.0 (2.2)	4.0 (1.9)	3.2 (2.0)	4.7 (1.8)	4.7 (2.8)	0.161	**
ECLM	0.0 (3.5)	2.1 (2.7)	3.0 (3.0)	3.5 (3.0)	3.5 (4.5)	12.137	
HCLM	0.0 (3.1)	0.3 (2.3)	-0.1 (2.9)	0.8 (2.2)	0.8 (3.8)	66.166	
WETTR0	0.0 (1.3)	-2.3 (1.1)	-7.5 (1.4)	-13.7 (1.8)	-13.7 (2.2)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.6)	-1.8 (1.5)	-8.5 (1.3)	-15.1 (1.6)	-15.1 (2.3)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.3)	0.5 (3.1)	-2.0 (7.1)	-4.0 (12.0)	-3.9 (12.1)	41.802	

Tabelle J.6: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim frühreifen Apfel (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.4)						
RUBA	0.0 (2.2)	-2.0 (1.9)	-10.1 (2.5)	-17.1 (2.3)	-17.1 (3.1)	0.000	***
ECLM	0.0 (3.5)	-4.1 (2.8)	-10.7 (3.7)	-19.3 (3.7)	-19.2 (4.9)	0.000	***
HCLM	0.0 (3.2)	-6.0 (2.4)	-14.2 (3.5)	-22.4 (2.9)	-22.4 (4.3)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.4)	-8.7 (1.5)	-22.3 (2.2)	-40.1 (2.7)	-40.0 (3.0)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.8)	-8.1 (1.9)	-23.4 (1.9)	-41.6 (2.4)	-41.6 (2.9)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.3)	-5.8 (3.2)	-16.1 (7.9)	-28.1 (14.7)	-28.1 (14.8)	0.623	**

Tabelle J.7: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim frühreifen Apfel (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	89.4 (22.4)						
RUBA	83.6 (19.3)	71.0 (15.5)	81.3 (18.3)	98.1 (18.2)	14.4 (26.0)	26.996	
ECLM	94.9 (21.9)	117.5 (30.9)	107.4 (29.1)	132.1 (33.4)	37.3 (39.2)	6.224	
HCLM	106.7 (24.5)	96.1 (24.3)	112.0 (26.6)	123.4 (25.2)	16.7 (34.4)	33.520	
WETTR0	90.9 (14.0)	108.7 (12.5)	126.7 (17.3)	184.0 (20.4)	93.1 (24.3)	0.000	***
WETTR1	80.0 (11.1)	98.0 (14.6)	131.5 (14.0)	180.2 (20.5)	100.1 (23.0)	0.000	***
M-Mittel	91.2 (11.6)	98.3 (17.9)	111.8 (21.0)	143.6 (44.1)	52.3 (44.2)	2.748	*

Tabelle J.8: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim frühreifen Apfel (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	89.6 (22.8)						
RUBA	84.2 (19.3)	66.9 (15.4)	71.0 (17.1)	79.4 (16.0)	-4.7 (24.6)	70.098	
ECLM	95.0 (22.0)	113.4 (29.8)	98.0 (27.0)	115.8 (30.4)	20.8 (36.8)	26.168	
HCLM	107.1 (24.6)	90.7 (22.9)	100.9 (25.2)	103.9 (23.1)	-3.1 (33.0)	84.969	
WETTR0	90.9 (14.0)	101.9 (12.3)	111.9 (16.2)	158.1 (18.6)	67.2 (22.8)	0.000	***
WETTR1	79.9 (10.9)	92.6 (14.1)	116.1 (12.7)	154.7 (19.0)	74.8 (21.6)	0.000	***
M-Mittel	91.4 (11.8)	93.1 (17.5)	99.6 (18.5)	122.4 (39.7)	31.0 (40.3)	10.891	

Tabelle J.9: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim frühreifen Apfel (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	267.3 (16.8)						
RUBA	266.2 (12.9)	254.0 (13.1)	267.1 (15.1)	279.6 (14.6)	13.4 (19.0)	16.552	
ECLM	267.1 (22.3)	280.4 (27.2)	275.6 (26.2)	301.4 (27.4)	34.3 (34.6)	5.148	
HCLM	276.6 (24.8)	271.3 (20.1)	286.0 (26.9)	302.3 (20.2)	25.7 (31.4)	10.562	
WETTR0	259.3 (8.8)	275.0 (9.5)	297.8 (9.9)	344.1 (14.3)	84.8 (16.6)	0.000	***
WETTR1	249.7 (8.5)	265.1 (8.9)	296.0 (8.6)	340.8 (12.7)	91.1 (15.0)	0.000	***
M-Mittel	263.8 (11.1)	269.2 (9.0)	284.5 (13.0)	313.6 (32.5)	49.9 (33.6)	1.102	*

Tabelle J.10: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim frühreifen Apfel (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	267.7 (16.7)						
RUBA	266.7 (12.8)	247.3 (13.0)	250.6 (14.4)	253.4 (13.5)	-13.4 (18.2)	14.767	
ECLM	267.5 (22.3)	274.2 (26.9)	261.3 (25.3)	278.6 (25.9)	11.1 (33.5)	51.100	
HCLM	277.0 (24.8)	264.6 (19.7)	270.7 (25.8)	276.8 (18.9)	-0.1 (30.5)	99.317	
WETTR0	259.8 (8.8)	267.1 (9.1)	279.5 (9.3)	311.8 (12.8)	52.0 (15.3)	0.000	***
WETTR1	250.2 (8.5)	257.4 (8.6)	277.9 (7.9)	309.1 (11.6)	58.9 (14.1)	0.000	***
M-Mittel	264.3 (11.1)	262.1 (9.2)	268.0 (11.8)	286.0 (28.7)	21.7 (29.3)	12.309	

Tabelle J.11: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) beim frühreifen Apfel, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	21.5 (2.3)						
RUBA	25.4 (2.1)	21.6 (2.9)	19.7 (2.3)	16.9 (2.5)	-8.5 (3.2)	0.000	***
ECLM	24.5 (3.2)	21.7 (3.7)	18.9 (3.3)	13.2 (1.9)	-11.3 (3.6)	0.000	***
HCLM	21.3 (2.9)	18.6 (2.8)	16.1 (1.9)	16.7 (1.9)	-4.5 (3.4)	1.116	*
WETTR0	22.4 (1.7)	22.6 (1.7)	19.9 (1.7)	17.0 (1.3)	-5.5 (2.1)	0.000	***
WETTR1	23.5 (1.7)	21.2 (1.5)	21.1 (1.8)	17.0 (1.4)	-6.5 (2.1)	0.000	***
M-Mittel	23.4 (1.7)	21.1 (1.7)	19.2 (2.0)	16.1 (1.9)	-7.3 (2.4)	0.000	***

J.2 Spätreifender Apfel

Tabelle J.12: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) beim spätreifen Apfel (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	33.1 (0.8)						
RUBA	33.3 (1.0)	32.5 (0.7)	33.5 (0.7)	34.6 (0.7)	1.3 (1.2)	2.935	*
ECLM	32.0 (1.2)	32.2 (0.9)	32.8 (1.0)	34.4 (1.0)	2.4 (1.5)	0.291	**
HCLM	32.1 (1.0)	33.3 (0.9)	34.7 (1.1)	35.4 (0.8)	3.3 (1.3)	0.000	***
WETTR0	33.6 (0.3)	34.7 (0.4)	38.0 (0.5)	41.2 (0.5)	7.7 (0.5)	0.000	***
WETTR1	33.5 (0.4)	34.6 (0.5)	37.6 (0.5)	41.5 (0.5)	8.0 (0.6)	0.000	***
M-Mittel	32.9 (0.9)	33.5 (1.3)	35.3 (3.0)	37.4 (4.5)	4.5 (4.6)	5.268	

Tabelle J.13: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) beim spätreifen Apfel (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	33.0 (0.9)						
RUBA	33.2 (1.0)	34.3 (0.8)	37.6 (0.9)	41.8 (0.9)	8.6 (1.3)	0.000	***
ECLM	31.9 (1.2)	34.0 (1.0)	36.9 (1.2)	41.7 (1.3)	9.8 (1.7)	0.000	***
HCLM	32.0 (1.1)	35.2 (0.9)	39.0 (1.3)	42.9 (1.1)	10.9 (1.5)	0.000	***
WETTR0	33.5 (0.4)	36.5 (0.6)	42.6 (0.9)	49.8 (0.7)	16.4 (0.8)	0.000	***
WETTR1	33.4 (0.4)	36.4 (0.6)	42.2 (0.8)	50.1 (0.7)	16.8 (0.8)	0.000	***
M-Mittel	32.8 (0.9)	35.3 (1.4)	39.7 (3.3)	45.3 (5.4)	12.5 (5.5)	0.324	**

Tabelle J.14: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim spätreifen Apfel (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	11.5 (3.4)						
RUBA	10.7 (3.1)	10.0 (2.6)	10.6 (2.4)	15.5 (3.4)	4.8 (4.5)	3.650	*
ECLM	12.3 (2.0)	15.2 (3.5)	15.1 (3.1)	20.6 (5.0)	8.3 (5.3)	0.315	**
HCLM	13.2 (2.7)	10.3 (3.1)	16.5 (3.8)	17.5 (4.1)	4.3 (4.9)	8.027	
WETTR0	9.4 (2.1)	10.5 (2.1)	12.0 (4.1)	19.5 (3.2)	10.1 (3.8)	0.000	***
WETTR1	8.4 (2.0)	12.5 (2.7)	11.2 (3.5)	20.7 (3.5)	12.3 (3.9)	0.000	***
M-Mittel	10.8 (2.0)	11.7 (2.2)	13.1 (2.7)	18.8 (2.4)	8.0 (2.9)	0.000	***

Tabelle J.15: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim spätreifen Apfel (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	11.5 (3.6)						
RUBA	10.7 (3.1)	3.9 (2.6)	-3.0 (2.9)	-7.2 (3.8)	-17.9 (4.8)	0.000	***
ECLM	12.4 (1.9)	9.4 (3.7)	2.4 (3.6)	-0.2 (5.9)	-12.6 (6.1)	0.019	***
HCLM	13.2 (2.9)	4.2 (3.4)	3.4 (4.0)	-4.7 (4.8)	-17.9 (5.5)	0.000	***
WETTR0	9.4 (2.0)	4.2 (2.2)	-2.2 (4.1)	-3.3 (3.7)	-12.7 (4.2)	0.000	***
WETTR1	8.5 (1.9)	6.3 (2.7)	-3.0 (3.5)	-1.8 (4.3)	-10.2 (4.7)	0.007	***
M-Mittel	10.8 (2.0)	5.6 (2.4)	-0.5 (3.3)	-3.4 (2.8)	-14.3 (3.3)	0.000	***

Tabelle J.16: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim spätreifen Apfel (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.5)						
RUBA	0.0 (3.0)	2.3 (2.2)	-0.8 (2.2)	-4.1 (2.1)	-4.1 (3.6)	2.935	*
ECLM	0.0 (3.8)	-0.8 (2.8)	-2.4 (3.1)	-7.5 (3.1)	-7.5 (4.8)	0.291	**
HCLM	0.0 (3.3)	-3.8 (2.7)	-7.9 (3.4)	-10.2 (2.4)	-10.1 (4.0)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.0)	-3.3 (1.3)	-13.2 (1.6)	-22.9 (1.3)	-22.8 (1.6)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.2)	-3.2 (1.4)	-12.2 (1.6)	-23.9 (1.4)	-23.8 (1.9)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.5)	-1.8 (2.9)	-7.3 (7.1)	-13.7 (11.3)	-13.7 (11.5)	2.999	*

Tabelle J.17: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim spätreifen Apfel (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.7)						
RUBA	0.0 (3.0)	-3.4 (2.3)	-13.6 (2.7)	-25.9 (2.7)	-25.9 (4.0)	0.000	***
ECLM	0.0 (3.8)	-6.8 (3.0)	-15.7 (3.8)	-30.9 (4.0)	-30.9 (5.4)	0.000	***
HCLM	0.0 (3.3)	-9.9 (2.9)	-21.9 (4.1)	-34.0 (3.3)	-34.0 (4.6)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.1)	-9.1 (1.9)	-27.5 (2.6)	-49.0 (2.1)	-48.9 (2.4)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.3)	-9.1 (1.9)	-26.4 (2.4)	-50.3 (2.2)	-50.2 (2.5)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.5)	-7.7 (3.0)	-21.0 (7.9)	-38.0 (13.7)	-38.0 (13.8)	0.159	**

Tabelle J.18: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim spätreifen Apfel (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	156.6 (33.6)						
RUBA	149.3 (28.8)	132.9 (27.7)	158.4 (30.9)	232.5 (33.8)	83.2 (43.5)	0.032	***
ECLM	160.2 (30.6)	195.3 (43.7)	206.9 (46.4)	306.3 (58.4)	146.2 (65.0)	0.005	***
HCLM	174.1 (37.7)	193.3 (30.7)	277.6 (52.4)	318.9 (50.7)	144.9 (62.0)	0.002	***
WETTR0	140.3 (18.6)	171.7 (18.7)	241.0 (32.4)	359.1 (25.8)	218.8 (31.2)	0.000	***
WETTR1	133.5 (15.7)	179.9 (21.7)	231.1 (29.0)	370.2 (27.5)	236.7 (31.2)	0.000	***
M-Mittel	151.5 (19.0)	174.6 (26.3)	223.0 (50.2)	317.4 (64.1)	166.0 (65.1)	0.079	***

Tabelle J.19: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim spätreifen Apfel (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	157.3 (33.7)						
RUBA	149.8 (28.9)	126.2 (26.9)	140.8 (28.9)	197.7 (31.0)	48.0 (41.5)	2.428	*
ECLM	160.9 (30.8)	188.6 (42.7)	191.3 (44.8)	273.4 (54.2)	112.5 (61.4)	0.060	***
HCLM	174.3 (37.7)	185.4 (29.7)	255.6 (48.9)	281.0 (48.0)	106.7 (59.8)	0.075	***
WETTR0	141.0 (18.5)	162.3 (18.5)	219.5 (30.7)	314.8 (23.6)	173.8 (29.4)	0.000	***
WETTR1	134.4 (15.9)	170.4 (20.9)	209.5 (27.1)	325.0 (24.9)	190.6 (29.1)	0.000	***
M-Mittel	152.1 (18.8)	166.6 (26.4)	203.4 (47.8)	278.4 (59.0)	126.3 (60.5)	0.220	**

Tabelle J.20: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim spätreifen Apfel (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	407.8 (25.5)						
RUBA	406.1 (22.9)	395.2 (22.8)	426.2 (25.6)	489.0 (26.6)	82.9 (34.4)	0.001	***
ECLM	403.0 (32.4)	431.6 (37.3)	450.1 (40.9)	546.7 (46.0)	143.7 (55.2)	0.000	***
HCLM	414.8 (36.3)	444.1 (27.4)	513.8 (46.8)	571.2 (40.0)	156.5 (52.9)	0.000	***
WETTR0	388.0 (10.7)	417.3 (13.3)	493.6 (19.9)	594.9 (18.1)	207.0 (20.7)	0.000	***
WETTR1	381.3 (12.0)	417.2 (13.1)	481.2 (19.8)	601.8 (18.4)	220.4 (21.6)	0.000	***
M-Mittel	398.6 (15.6)	421.1 (18.6)	473.0 (39.9)	560.7 (53.2)	162.1 (53.9)	0.032	***

Tabelle J.21: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim spätreifen Apfel (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	408.5 (25.4)						
RUBA	406.8 (22.9)	385.1 (22.4)	401.5 (24.6)	447.8 (24.7)	40.9 (33.0)	1.587	*
ECLM	403.6 (32.4)	422.2 (36.9)	428.6 (39.8)	509.4 (43.7)	105.8 (53.4)	0.021	***
HCLM	415.4 (36.4)	433.8 (27.1)	488.6 (44.8)	528.9 (38.1)	113.5 (51.6)	0.005	***
WETTR0	388.7 (10.4)	405.3 (12.1)	464.6 (18.1)	543.2 (16.3)	154.4 (19.0)	0.000	***
WETTR1	382.1 (12.1)	405.5 (12.2)	452.8 (18.1)	549.8 (16.6)	167.6 (20.1)	0.000	***
M-Mittel	399.3 (15.5)	410.4 (19.1)	447.2 (37.0)	515.8 (48.0)	116.4 (49.3)	0.118	**

Tabelle J.22: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) beim spätreifen Apfel, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	23.1 (2.3)						
RUBA	25.5 (1.6)	22.6 (2.7)	21.5 (2.2)	18.5 (2.5)	-7.0 (2.9)	0.002	***
ECLM	24.7 (2.9)	22.4 (3.2)	19.6 (3.0)	14.8 (2.0)	-9.9 (3.4)	0.000	***
HCLM	22.3 (2.9)	20.3 (2.5)	17.4 (2.2)	18.2 (1.8)	-4.1 (3.4)	1.938	*
WETTR0	23.3 (1.5)	23.7 (1.6)	21.6 (1.7)	18.6 (1.3)	-4.7 (2.0)	0.001	***
WETTR1	24.5 (1.5)	22.1 (1.3)	22.3 (1.4)	18.5 (1.6)	-6.0 (2.1)	0.000	***
M-Mittel	24.1 (1.4)	22.2 (1.4)	20.5 (2.2)	17.7 (1.8)	-6.3 (2.2)	0.001	***

J.3 Sauerkirche

Tabelle J.23: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der Sauerkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	8.0 (0.1)						
RUBA	8.0 (0.1)	7.9 (0.2)	7.7 (0.1)	7.3 (0.2)	-0.7 (0.2)	0.000	***
ECLM	7.7 (0.2)	7.8 (0.3)	7.5 (0.2)	7.3 (0.3)	-0.4 (0.3)	1.426	*
HCLM	7.7 (0.2)	7.4 (0.2)	7.3 (0.2)	7.1 (0.2)	-0.6 (0.3)	0.066	***
WETTR0	8.1 (0.1)	8.3 (0.1)	8.3 (0.1)	8.3 (0.2)	0.2 (0.2)	4.599	*
WETTR1	8.0 (0.1)	8.1 (0.1)	8.3 (0.1)	8.3 (0.1)	0.3 (0.2)	0.101	**
M-Mittel	7.9 (0.2)	7.9 (0.4)	7.8 (0.6)	7.7 (0.7)	-0.2 (0.7)	45.379	

Tabelle J.24: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der Sauerkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	8.0 (0.2)						
RUBA	8.0 (0.1)	8.4 (0.2)	8.9 (0.2)	9.1 (0.2)	1.1 (0.2)	0.000	***
ECLM	7.7 (0.2)	8.3 (0.3)	8.6 (0.3)	9.1 (0.3)	1.5 (0.4)	0.000	***
HCLM	7.6 (0.2)	7.9 (0.2)	8.3 (0.3)	8.9 (0.3)	1.3 (0.4)	0.000	***
WETTR0	8.1 (0.1)	8.8 (0.2)	9.5 (0.2)	10.4 (0.2)	2.3 (0.3)	0.000	***
WETTR1	8.0 (0.1)	8.6 (0.2)	9.5 (0.2)	10.4 (0.2)	2.4 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	7.9 (0.2)	8.4 (0.4)	9.0 (0.7)	9.6 (0.9)	1.7 (0.9)	0.693	**

Tabelle J.25: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Sauerkirsche (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.1 (2.0)						
RUBA	1.5 (1.5)	3.2 (1.5)	5.0 (1.7)	10.1 (1.5)	8.7 (2.0)	0.000	***
ECLM	2.0 (2.0)	6.9 (2.7)	7.0 (2.4)	12.1 (2.5)	10.1 (3.2)	0.000	***
HCLM	4.0 (2.4)	5.4 (1.9)	8.5 (1.7)	10.5 (2.4)	6.5 (3.3)	0.020	***
WETTR0	1.6 (1.1)	-0.4 (1.3)	-0.7 (1.2)	1.2 (1.4)	-0.4 (1.8)	65.589	
WETTR1	0.8 (1.3)	-0.2 (1.4)	-1.7 (1.1)	-1.0 (1.5)	-1.8 (1.9)	7.085	
M-Mittel	2.0 (1.3)	3.0 (4.1)	3.6 (5.7)	6.6 (7.5)	4.6 (7.6)	16.902	

Tabelle J.26: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Sauerkirsche (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.1 (2.3)						
RUBA	1.5 (1.4)	-3.6 (1.5)	-9.6 (2.1)	-13.1 (1.8)	-14.6 (2.2)	0.000	***
ECLM	2.0 (2.0)	-0.2 (2.6)	-8.1 (3.2)	-12.6 (3.0)	-14.6 (3.6)	0.000	***
HCLM	4.0 (2.4)	-1.5 (1.9)	-6.4 (2.2)	-14.2 (3.2)	-18.2 (3.9)	0.000	***
WETTR0	1.6 (1.1)	-7.5 (1.5)	-16.3 (1.8)	-25.4 (2.4)	-27.1 (2.6)	0.000	***
WETTR1	0.8 (1.4)	-7.1 (1.9)	-17.3 (1.7)	-27.7 (2.2)	-28.5 (2.5)	0.000	***
M-Mittel	2.0 (1.3)	-4.0 (3.8)	-11.5 (6.1)	-18.6 (9.1)	-20.6 (9.2)	0.348	**

Tabelle J.27: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Sauerkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (1.8)						
RUBA	0.0 (1.6)	1.9 (1.9)	3.8 (1.7)	8.7 (2.0)	8.7 (2.5)	0.000	***
ECLM	0.0 (2.6)	-0.9 (3.3)	3.0 (3.0)	5.3 (3.4)	5.3 (4.2)	1.426	*
HCLM	0.0 (3.0)	3.0 (2.6)	5.5 (2.8)	7.2 (2.8)	7.2 (4.0)	0.066	***
WETTR0	0.0 (1.4)	-2.3 (1.6)	-2.6 (1.6)	-2.5 (2.1)	-2.5 (2.5)	4.598	*
WETTR1	0.0 (1.6)	-1.3 (1.7)	-3.2 (1.5)	-3.9 (1.7)	-3.9 (2.2)	0.101	**
M-Mittel	0.0 (1.1)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	3.0 (7.2)	3.0 (7.4)	32.475	

Tabelle J.28: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Sauerkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (1.9)						
RUBA	0.0 (1.6)	-4.8 (1.9)	-10.7 (2.0)	-14.0 (2.2)	-14.0 (2.7)	0.000	***
ECLM	0.0 (2.6)	-8.0 (3.5)	-12.0 (3.6)	-19.2 (4.1)	-19.2 (4.8)	0.000	***
HCLM	0.0 (3.1)	-3.8 (2.8)	-9.1 (3.3)	-17.0 (3.7)	-17.0 (4.7)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.5)	-9.1 (1.9)	-17.8 (2.2)	-28.2 (3.1)	-28.1 (3.4)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.7)	-8.1 (2.1)	-18.5 (2.0)	-29.7 (2.4)	-29.7 (2.9)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.1)	-6.8 (2.5)	-13.6 (5.3)	-21.6 (8.7)	-21.6 (8.8)	0.244	**

Tabelle J.29: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Sauerkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	53.4 (15.7)						
RUBA	44.6 (13.1)	44.3 (11.9)	43.2 (11.8)	52.3 (11.7)	7.7 (17.2)	37.457	
ECLM	52.6 (13.1)	79.9 (23.2)	60.2 (18.9)	82.5 (22.8)	29.9 (25.9)	2.459	*
HCLM	60.5 (18.7)	49.5 (15.3)	56.3 (16.4)	64.8 (16.1)	4.3 (24.1)	72.204	
WETTR0	53.4 (11.1)	63.7 (10.9)	66.3 (10.7)	79.6 (14.1)	26.2 (17.6)	0.423	**
WETTR1	45.1 (8.8)	52.7 (10.3)	63.5 (9.3)	76.2 (12.0)	31.1 (14.6)	0.008	***
M-Mittel	51.3 (6.5)	58.0 (14.7)	57.9 (8.3)	71.1 (13.7)	19.8 (14.8)	1.139	*

Tabelle J.30: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Sauerkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	53.4 (15.7)						
RUBA	44.8 (13.2)	41.0 (11.7)	37.9 (11.5)	43.1 (11.1)	-1.7 (16.8)	83.884	
ECLM	53.1 (13.1)	77.5 (22.7)	55.5 (17.9)	71.7 (20.9)	18.7 (24.2)	12.733	
HCLM	60.5 (18.6)	47.8 (14.9)	51.4 (15.5)	55.6 (14.4)	-4.8 (23.1)	67.628	
WETTR0	53.9 (11.2)	59.5 (10.2)	59.7 (10.1)	67.6 (12.6)	13.8 (16.5)	10.075	
WETTR1	45.2 (8.6)	49.6 (10.0)	56.1 (8.6)	64.6 (11.2)	19.4 (13.8)	0.668	**
M-Mittel	51.5 (6.5)	55.1 (15.3)	52.1 (7.7)	60.5 (12.6)	9.1 (13.8)	18.416	

Tabelle J.31: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Sauerkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	139.1 (9.8)						
RUBA	134.3 (6.7)	133.4 (8.1)	132.0 (7.5)	131.3 (7.5)	-3.0 (9.9)	54.047	
ECLM	133.8 (11.2)	152.0 (18.1)	138.6 (14.9)	150.2 (16.8)	16.4 (19.8)	10.229	
HCLM	137.9 (14.4)	128.6 (12.5)	129.8 (13.5)	135.7 (12.2)	-2.2 (18.5)	81.539	
WETTR0	135.5 (6.5)	143.4 (7.1)	144.6 (6.5)	150.6 (8.4)	15.1 (10.4)	0.550	**
WETTR1	129.1 (5.4)	136.5 (5.9)	140.8 (5.9)	147.5 (6.4)	18.4 (8.2)	0.003	***
M-Mittel	134.1 (4.7)	138.8 (9.1)	137.2 (5.3)	143.1 (9.8)	8.9 (10.6)	9.241	

Tabelle J.32: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Sauerkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	139.4 (9.8)						
RUBA	134.6 (6.7)	129.7 (8.0)	123.5 (7.3)	119.2 (7.0)	-15.5 (9.5)	0.186	**
ECLM	134.1 (11.2)	148.5 (17.9)	131.1 (14.5)	139.0 (15.9)	4.9 (19.1)	60.899	
HCLM	138.1 (14.5)	125.2 (12.4)	122.8 (13.0)	124.8 (11.6)	-13.3 (18.2)	14.771	
WETTR0	135.8 (6.5)	139.0 (6.8)	135.5 (6.2)	135.9 (7.6)	0.1 (9.8)	99.154	
WETTR1	129.4 (5.4)	132.3 (5.7)	131.8 (5.7)	133.1 (5.8)	3.8 (7.7)	33.423	
M-Mittel	134.4 (4.7)	134.9 (9.2)	128.9 (4.7)	130.4 (9.0)	-4.0 (9.8)	39.953	

Tabelle J.33: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) bei der Sauerkirsche, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	19.8 (2.0)						
RUBA	22.5 (2.0)	20.4 (2.9)	18.2 (2.1)	15.8 (2.1)	-6.7 (2.8)	0.001	***
ECLM	21.9 (3.0)	19.2 (3.3)	17.4 (2.7)	12.6 (1.6)	-9.3 (3.4)	0.000	***
HCLM	19.6 (2.6)	16.8 (3.1)	16.2 (2.0)	15.6 (1.7)	-4.0 (3.0)	1.186	*
WETTR0	20.0 (1.6)	20.0 (1.6)	18.5 (1.4)	16.6 (1.2)	-3.4 (2.0)	0.117	**
WETTR1	21.3 (1.8)	20.5 (1.6)	19.5 (1.8)	17.0 (1.3)	-4.4 (2.2)	0.025	***
M-Mittel	21.1 (1.3)	19.4 (1.5)	17.9 (1.3)	15.5 (2.0)	-5.6 (2.2)	0.008	***

J.4 Frühreifende Süßkirsche

Tabelle J.34: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der Süßkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	5.8 (0.1)						
RUBA	5.9 (0.1)	5.8 (0.1)	5.6 (0.1)	5.2 (0.1)	-0.7 (0.2)	0.000	***
ECLM	5.7 (0.1)	5.6 (0.2)	5.4 (0.2)	5.0 (0.2)	-0.6 (0.2)	0.000	***
HCLM	5.6 (0.2)	5.5 (0.1)	5.2 (0.2)	5.0 (0.2)	-0.5 (0.3)	0.019	***
WETTR0	5.9 (0.1)	6.0 (0.1)	5.9 (0.1)	5.8 (0.2)	0.0 (0.2)	84.809	
WETTR1	5.8 (0.1)	5.9 (0.1)	5.9 (0.1)	5.8 (0.1)	0.1 (0.2)	48.106	
M-Mittel	5.8 (0.1)	5.7 (0.2)	5.6 (0.4)	5.4 (0.5)	-0.4 (0.5)	13.091	

Tabelle J.35: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der Süßkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	5.8 (0.1)						
RUBA	5.9 (0.1)	6.1 (0.1)	6.5 (0.1)	6.5 (0.1)	0.6 (0.2)	0.000	***
ECLM	5.7 (0.1)	6.0 (0.2)	6.2 (0.2)	6.4 (0.2)	0.7 (0.3)	0.000	***
HCLM	5.5 (0.2)	5.8 (0.2)	6.0 (0.2)	6.4 (0.2)	0.8 (0.3)	0.000	***
WETTR0	5.8 (0.1)	6.3 (0.1)	6.8 (0.2)	7.3 (0.2)	1.5 (0.3)	0.000	***
WETTR1	5.7 (0.1)	6.2 (0.1)	6.8 (0.1)	7.3 (0.2)	1.5 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	5.7 (0.1)	6.1 (0.3)	6.5 (0.4)	6.8 (0.6)	1.0 (0.6)	1.034	*

Tabelle J.36: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Süßkirsche (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.6 (2.0)						
RUBA	0.4 (1.8)	2.8 (1.7)	5.3 (1.9)	12.4 (2.1)	12.0 (2.7)	0.000	***
ECLM	1.0 (2.2)	4.5 (2.1)	6.1 (2.5)	13.2 (2.6)	12.2 (3.4)	0.000	***
HCLM	2.6 (2.6)	3.3 (2.2)	7.6 (2.2)	10.4 (3.1)	7.8 (4.0)	0.026	***
WETTR0	0.2 (1.8)	-1.5 (1.8)	-0.8 (2.2)	1.5 (2.6)	1.2 (3.1)	42.199	
WETTR1	0.2 (1.7)	-1.5 (2.2)	-1.5 (2.1)	0.0 (1.8)	-0.2 (2.4)	85.197	
M-Mittel	0.9 (1.1)	1.5 (3.5)	3.3 (5.2)	7.5 (7.9)	6.6 (8.0)	8.315	

Tabelle J.37: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Süßkirsche (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.6 (2.1)						
RUBA	0.4 (1.7)	-4.1 (1.6)	-9.5 (2.3)	-10.5 (2.4)	-10.9 (2.9)	0.000	***
ECLM	1.0 (2.2)	-2.8 (2.0)	-9.3 (3.1)	-10.8 (3.3)	-11.8 (3.8)	0.000	***
HCLM	2.6 (2.8)	-4.0 (2.3)	-7.8 (2.8)	-14.4 (4.2)	-17.0 (4.9)	0.000	***
WETTR0	0.2 (1.8)	-8.6 (2.1)	-16.5 (2.8)	-24.8 (3.8)	-25.0 (4.2)	0.000	***
WETTR1	0.2 (1.9)	-8.5 (2.5)	-17.2 (2.4)	-26.2 (2.6)	-26.4 (3.1)	0.000	***
M-Mittel	0.9 (1.1)	-5.6 (3.2)	-12.1 (5.5)	-17.3 (9.5)	-18.2 (9.7)	0.639	**

Tabelle J.38: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.2)						
RUBA	0.0 (1.8)	2.5 (1.7)	4.9 (1.9)	12.1 (2.2)	12.1 (2.8)	0.000	***
ECLM	0.0 (2.6)	1.0 (2.7)	4.9 (2.7)	11.3 (3.4)	11.3 (4.2)	0.000	***
HCLM	0.0 (3.4)	2.1 (2.6)	6.1 (2.9)	9.3 (3.4)	9.3 (4.7)	0.019	***
WETTR0	0.0 (1.8)	-1.8 (1.9)	-1.2 (2.3)	0.3 (2.9)	0.3 (3.4)	84.807	
WETTR1	0.0 (1.8)	-1.7 (2.3)	-2.1 (2.3)	-0.9 (2.0)	-0.9 (2.7)	48.104	
M-Mittel	0.0 (1.2)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	6.4 (7.9)	6.4 (8.0)	9.056	

Tabelle J.39: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.2)						
RUBA	0.0 (1.7)	-4.4 (1.7)	-9.8 (2.3)	-10.7 (2.5)	-10.7 (3.0)	0.000	***
ECLM	0.0 (2.5)	-6.3 (2.8)	-10.4 (3.2)	-12.5 (4.0)	-12.5 (4.6)	0.000	***
HCLM	0.0 (3.5)	-5.0 (2.8)	-9.0 (3.5)	-15.2 (4.3)	-15.2 (5.4)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.9)	-8.9 (2.2)	-16.8 (2.9)	-25.5 (4.1)	-25.5 (4.5)	0.000	***
WETTR1	0.0 (2.0)	-8.8 (2.6)	-17.7 (2.6)	-26.8 (2.8)	-26.8 (3.4)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.2)	-6.7 (2.2)	-12.7 (4.8)	-18.2 (9.5)	-18.2 (9.6)	0.632	**

Tabelle J.40: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	32.6 (10.4)						
RUBA	29.9 (8.7)	26.8 (9.1)	29.6 (9.1)	26.3 (8.8)	-3.6 (12.1)	55.516	
ECLM	33.9 (9.9)	51.3 (17.2)	36.0 (11.5)	39.9 (14.5)	6.1 (17.2)	48.175	
HCLM	40.7 (15.6)	34.2 (10.7)	34.4 (11.9)	38.9 (11.1)	-1.8 (18.8)	84.947	
WETTR0	31.5 (7.5)	33.9 (7.6)	36.2 (8.5)	44.1 (11.0)	12.5 (13.0)	5.866	
WETTR1	25.2 (6.4)	29.3 (7.4)	34.0 (8.6)	42.5 (9.9)	17.3 (11.6)	0.422	**
M-Mittel	32.2 (5.9)	35.1 (10.1)	34.1 (4.8)	38.3 (8.1)	6.1 (9.8)	21.314	

Tabelle J.41: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	32.7 (10.3)						
RUBA	29.9 (8.7)	25.0 (8.7)	25.5 (8.2)	22.0 (7.6)	-7.9 (11.3)	16.600	
ECLM	34.4 (9.9)	48.7 (16.3)	32.2 (10.5)	34.0 (13.1)	-0.4 (16.1)	95.812	
HCLM	40.6 (15.7)	33.1 (10.4)	31.1 (11.3)	32.4 (10.2)	-8.2 (18.4)	37.285	
WETTR0	31.5 (7.4)	31.6 (7.4)	31.8 (7.8)	35.6 (9.5)	4.1 (11.8)	48.650	
WETTR1	25.2 (6.4)	27.4 (7.1)	29.5 (8.2)	35.3 (9.0)	10.1 (10.9)	6.839	
M-Mittel	32.3 (5.9)	33.1 (9.9)	30.0 (4.4)	31.8 (6.7)	-0.5 (8.7)	91.296	

Tabelle J.42: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	95.9 (5.9)						
RUBA	96.2 (4.7)	94.8 (5.7)	93.7 (5.3)	87.7 (5.4)	-8.5 (7.0)	1.755	*
ECLM	96.6 (7.3)	105.5 (12.1)	95.6 (9.2)	93.5 (10.5)	-3.1 (12.6)	62.549	
HCLM	95.5 (11.9)	90.8 (8.9)	89.3 (9.2)	90.4 (8.4)	-5.1 (14.3)	48.091	
WETTR0	93.3 (5.0)	95.9 (4.5)	97.5 (5.0)	99.5 (7.1)	6.3 (8.5)	14.716	
WETTR1	88.0 (3.9)	92.9 (4.7)	93.4 (5.1)	96.4 (5.1)	8.4 (6.3)	1.009	*
M-Mittel	93.9 (3.7)	96.0 (5.6)	93.9 (3.3)	93.5 (5.4)	-0.4 (6.4)	90.030	

Tabelle J.43: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	96.2 (6.0)						
RUBA	96.5 (4.7)	92.0 (5.7)	87.5 (5.1)	79.4 (5.1)	-17.1 (6.8)	0.000	***
ECLM	96.8 (7.3)	103.0 (12.1)	90.1 (9.0)	86.1 (10.1)	-10.7 (12.2)	8.371	
HCLM	95.6 (11.9)	88.3 (8.7)	84.3 (8.7)	82.6 (7.8)	-13.0 (14.0)	6.856	
WETTR0	93.5 (5.0)	92.9 (4.3)	91.0 (4.8)	89.1 (6.4)	-4.4 (7.9)	27.590	
WETTR1	88.2 (3.9)	89.8 (4.5)	86.9 (5.0)	86.2 (4.7)	-1.9 (6.0)	52.475	
M-Mittel	94.1 (3.7)	93.2 (5.8)	88.0 (3.2)	84.7 (4.5)	-9.4 (5.7)	0.178	**

Tabelle J.44: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) bei der frühreifen Süßkirsche, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	17.6 (2.2)						
RUBA	18.3 (1.7)	17.4 (2.3)	15.5 (2.2)	12.9 (2.1)	-5.5 (2.7)	0.015	***
ECLM	18.6 (2.7)	15.5 (2.5)	14.0 (2.0)	11.1 (2.0)	-7.5 (3.3)	0.003	***
HCLM	16.4 (2.7)	15.2 (3.1)	15.0 (2.4)	12.9 (1.6)	-3.5 (3.1)	2.545	*
WETTR0	17.0 (1.6)	15.4 (1.6)	15.7 (1.7)	14.6 (1.2)	-2.3 (1.9)	1.844	*
WETTR1	17.7 (1.9)	17.5 (1.8)	15.6 (1.3)	15.2 (1.6)	-2.6 (2.4)	3.798	*
M-Mittel	17.6 (1.0)	16.2 (1.0)	15.2 (1.1)	13.3 (1.9)	-4.3 (2.1)	0.042	***

J.5 Spätreifende Süßkirsche

Tabelle J.45: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der Süßkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.1 (0.1)						
RUBA	6.2 (0.1)	6.0 (0.1)	5.9 (0.1)	5.5 (0.1)	-0.7 (0.2)	0.000	***
ECLM	5.9 (0.1)	5.9 (0.1)	5.6 (0.1)	5.4 (0.2)	-0.5 (0.2)	0.000	***
HCLM	5.9 (0.2)	5.7 (0.1)	5.5 (0.1)	5.3 (0.2)	-0.5 (0.2)	0.001	***
WETTR0	6.2 (0.1)	6.3 (0.1)	6.3 (0.1)	6.2 (0.2)	0.0 (0.2)	58.901	
WETTR1	6.1 (0.1)	6.2 (0.1)	6.2 (0.1)	6.2 (0.1)	0.1 (0.1)	9.235	
M-Mittel	6.1 (0.2)	6.0 (0.3)	5.9 (0.4)	5.7 (0.6)	-0.3 (0.6)	21.767	

Tabelle J.46: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der Süßkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.1 (0.1)						
RUBA	6.2 (0.1)	6.4 (0.1)	6.7 (0.1)	6.8 (0.1)	0.7 (0.2)	0.000	***
ECLM	5.9 (0.1)	6.3 (0.1)	6.5 (0.2)	6.7 (0.2)	0.8 (0.2)	0.000	***
HCLM	5.8 (0.2)	6.0 (0.1)	6.3 (0.2)	6.7 (0.2)	0.9 (0.2)	0.000	***
WETTR0	6.2 (0.1)	6.7 (0.1)	7.2 (0.1)	7.8 (0.2)	1.6 (0.2)	0.000	***
WETTR1	6.1 (0.1)	6.5 (0.1)	7.1 (0.1)	7.7 (0.1)	1.6 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	6.0 (0.2)	6.4 (0.3)	6.8 (0.5)	7.1 (0.7)	1.1 (0.7)	1.201	*

Tabelle J.47: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Süßkirsche (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	1.4 (1.7)						
RUBA	1.0 (1.8)	3.8 (1.5)	6.0 (1.8)	12.2 (1.6)	11.2 (2.3)	0.000	***
ECLM	1.7 (1.9)	7.2 (2.6)	7.2 (2.3)	13.2 (2.3)	11.5 (2.9)	0.000	***
HCLM	3.9 (2.5)	5.1 (1.9)	8.5 (1.5)	11.3 (2.4)	7.4 (3.4)	0.005	***
WETTR0	1.0 (1.3)	-0.6 (1.4)	-0.1 (1.4)	1.6 (2.1)	0.6 (2.4)	64.265	
WETTR1	0.6 (1.4)	-0.1 (1.6)	-0.8 (1.5)	-0.2 (1.6)	-0.7 (2.1)	49.461	
M-Mittel	1.6 (1.4)	3.1 (4.2)	4.2 (5.3)	7.6 (7.9)	6.0 (8.1)	11.127	

Tabelle J.48: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Süßkirsche (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	1.4 (1.9)						
RUBA	1.0 (1.7)	-2.9 (1.4)	-8.4 (2.2)	-10.1 (1.8)	-11.1 (2.4)	0.000	***
ECLM	1.7 (1.8)	0.1 (2.4)	-7.7 (3.0)	-10.5 (2.7)	-12.3 (3.2)	0.000	***
HCLM	4.0 (2.6)	-1.8 (1.8)	-6.3 (2.0)	-12.8 (3.2)	-16.7 (4.1)	0.000	***
WETTR0	1.0 (1.3)	-7.6 (1.6)	-15.3 (1.9)	-24.2 (3.2)	-25.2 (3.4)	0.000	***
WETTR1	0.6 (1.5)	-6.9 (2.0)	-16.0 (1.8)	-25.8 (2.3)	-26.4 (2.7)	0.000	***
M-Mittel	1.7 (1.5)	-3.8 (4.2)	-10.7 (5.7)	-16.7 (9.6)	-18.3 (9.7)	0.641	**

Tabelle J.49: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (1.7)						
RUBA	0.0 (1.7)	3.0 (1.6)	5.2 (1.8)	11.4 (1.8)	11.4 (2.5)	0.000	***
ECLM	0.0 (2.2)	0.6 (2.4)	4.6 (2.5)	9.1 (2.9)	9.1 (3.6)	0.000	***
HCLM	0.0 (2.6)	3.2 (2.3)	6.0 (2.5)	8.9 (2.6)	8.9 (3.6)	0.001	***
WETTR0	0.0 (1.6)	-1.8 (1.8)	-1.2 (1.7)	-0.8 (2.5)	-0.8 (2.9)	58.908	
WETTR1	0.0 (1.6)	-0.8 (1.9)	-1.8 (1.8)	-2.0 (1.7)	-2.0 (2.3)	9.234	
M-Mittel	0.0 (1.0)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	5.3 (7.8)	5.3 (7.9)	13.436	

Tabelle J.50: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (1.8)						
RUBA	0.0 (1.6)	-3.6 (1.5)	-9.0 (2.1)	-10.6 (2.0)	-10.6 (2.5)	0.000	***
ECLM	0.0 (2.2)	-6.4 (2.4)	-10.0 (3.0)	-14.3 (3.5)	-14.3 (4.0)	0.000	***
HCLM	0.0 (2.7)	-3.5 (2.4)	-8.5 (3.0)	-14.7 (3.4)	-14.7 (4.3)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.6)	-8.6 (2.0)	-16.1 (2.2)	-25.8 (3.6)	-25.8 (3.8)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.8)	-7.5 (2.2)	-16.8 (2.1)	-27.1 (2.4)	-27.1 (3.0)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.0)	-5.9 (2.5)	-12.1 (5.0)	-18.5 (9.3)	-18.5 (9.4)	0.549	**

Tabelle J.51: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	45.0 (12.4)						
RUBA	40.7 (11.1)	37.5 (10.1)	37.5 (10.1)	40.8 (10.3)	0.1 (14.9)	99.074	
ECLM	46.5 (11.6)	71.2 (20.3)	48.9 (15.4)	60.8 (17.8)	14.3 (20.9)	17.429	
HCLM	51.6 (18.5)	43.1 (12.2)	49.9 (14.9)	55.3 (13.8)	3.7 (22.7)	74.469	
WETTR0	47.0 (9.7)	50.8 (9.1)	55.2 (9.0)	62.5 (12.8)	15.5 (15.7)	5.305	
WETTR1	37.3 (8.2)	44.4 (8.3)	48.8 (9.0)	58.3 (10.9)	21.0 (13.3)	0.265	**
M-Mittel	44.6 (6.1)	49.4 (14.1)	48.1 (5.7)	55.5 (9.7)	10.9 (11.2)	5.605	

Tabelle J.52: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	45.5 (12.6)						
RUBA	41.0 (11.1)	35.2 (10.1)	32.7 (9.6)	32.7 (9.4)	-8.3 (14.3)	24.837	
ECLM	46.4 (11.5)	68.4 (20.0)	43.9 (14.3)	51.0 (16.1)	4.7 (19.4)	62.972	
HCLM	51.8 (18.6)	40.8 (11.6)	44.6 (13.8)	47.5 (12.8)	-4.3 (22.2)	69.800	
WETTR0	46.9 (9.4)	48.0 (8.6)	49.4 (8.3)	52.8 (11.5)	5.9 (14.6)	42.430	
WETTR1	37.8 (8.1)	41.8 (8.1)	43.1 (8.7)	49.3 (10.1)	11.4 (12.6)	7.499	
M-Mittel	44.8 (6.1)	46.8 (13.9)	42.7 (5.3)	46.6 (9.0)	1.9 (10.6)	72.071	

Tabelle J.53: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	122.4 (7.3)						
RUBA	121.6 (5.4)	119.0 (6.1)	116.7 (6.3)	113.6 (6.0)	-8.0 (7.9)	4.766	*
ECLM	121.3 (8.9)	134.9 (14.3)	120.4 (11.7)	125.7 (12.4)	4.4 (15.0)	55.787	
HCLM	122.0 (13.0)	113.4 (10.3)	115.3 (11.2)	117.6 (9.8)	-4.4 (16.0)	58.120	
WETTR0	120.8 (5.9)	125.2 (6.1)	125.3 (5.4)	128.8 (8.0)	8.0 (9.8)	10.756	
WETTR1	114.4 (5.0)	120.1 (5.2)	120.8 (5.0)	124.7 (5.7)	10.2 (7.4)	0.772	**
M-Mittel	120.0 (4.1)	122.5 (8.5)	119.7 (3.4)	122.1 (7.0)	2.0 (7.9)	59.508	

Tabelle J.54: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Süßkirsche (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	122.7 (7.3)						
RUBA	121.9 (5.5)	115.4 (6.1)	108.7 (6.1)	102.4 (5.6)	-19.4 (7.6)	0.000	***
ECLM	121.5 (9.0)	131.6 (14.3)	113.3 (11.4)	115.4 (11.9)	-6.1 (14.6)	40.626	
HCLM	122.3 (13.1)	110.2 (10.2)	108.6 (10.6)	107.3 (9.1)	-14.9 (15.6)	6.085	
WETTR0	121.1 (5.9)	121.1 (5.8)	116.9 (5.2)	115.1 (7.2)	-6.0 (9.1)	18.959	
WETTR1	114.7 (5.0)	116.1 (5.0)	112.5 (4.8)	111.3 (5.2)	-3.4 (7.1)	33.842	
M-Mittel	120.3 (4.1)	118.9 (8.4)	112.0 (3.3)	110.3 (6.1)	-10.0 (7.2)	0.806	**

Tabelle J.55: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) bei der spätreifen Süßkirsche, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	17.9 (2.0)						
RUBA	19.0 (1.6)	17.9 (2.3)	15.9 (2.1)	13.6 (2.0)	-5.4 (2.5)	0.008	***
ECLM	19.0 (2.7)	16.2 (2.5)	14.6 (2.1)	11.4 (1.7)	-7.7 (3.1)	0.001	***
HCLM	17.0 (2.6)	15.6 (3.0)	15.2 (2.2)	13.5 (1.5)	-3.6 (2.9)	1.732	*
WETTR0	17.3 (1.5)	16.3 (1.5)	16.0 (1.6)	14.9 (1.1)	-2.4 (1.8)	1.069	*
WETTR1	18.4 (1.8)	17.9 (1.7)	16.4 (1.3)	15.6 (1.5)	-2.7 (2.3)	1.903	*
M-Mittel	18.1 (1.0)	16.8 (0.9)	15.6 (1.0)	13.8 (1.9)	-4.4 (2.0)	0.045	***

J.6 Frühreifende Birne

Tabelle J.56: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der frühreifen Birne (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	16.0 (0.4)						
RUBA	16.1 (0.4)	15.5 (0.3)	15.9 (0.3)	15.8 (0.3)	-0.3 (0.5)	24.662	
ECLM	15.5 (0.5)	15.2 (0.4)	15.3 (0.4)	15.4 (0.4)	-0.1 (0.6)	82.609	
HCLM	15.4 (0.5)	15.7 (0.3)	16.1 (0.4)	16.0 (0.3)	0.5 (0.6)	5.762	
WETTR0	16.3 (0.2)	16.7 (0.2)	17.9 (0.2)	19.0 (0.2)	2.7 (0.3)	0.000	***
WETTR1	16.2 (0.2)	16.6 (0.2)	17.7 (0.2)	19.0 (0.2)	2.8 (0.3)	0.000	***
M-Mittel	15.9 (0.5)	16.0 (0.8)	16.6 (1.4)	17.0 (2.3)	1.1 (2.3)	24.482	

Tabelle J.57: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der frühreifen Birne (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	16.0 (0.4)						
RUBA	16.1 (0.4)	16.5 (0.3)	18.0 (0.4)	19.3 (0.4)	3.2 (0.5)	0.000	***
ECLM	15.4 (0.5)	16.1 (0.4)	17.4 (0.5)	18.8 (0.5)	3.5 (0.7)	0.000	***
HCLM	15.4 (0.5)	16.7 (0.4)	18.2 (0.5)	19.5 (0.5)	4.2 (0.6)	0.000	***
WETTR0	16.2 (0.2)	17.7 (0.3)	20.2 (0.3)	23.2 (0.4)	6.9 (0.4)	0.000	***
WETTR1	16.2 (0.2)	17.5 (0.3)	20.0 (0.3)	23.2 (0.4)	7.0 (0.4)	0.000	***
M-Mittel	15.8 (0.5)	16.9 (0.9)	18.8 (1.6)	20.8 (2.7)	5.0 (2.8)	0.771	**

Tabelle J.58: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Birne (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.0 (2.9)						
RUBA	5.9 (3.0)	6.6 (2.4)	6.2 (1.7)	9.3 (2.3)	3.4 (3.7)	7.332	
ECLM	7.3 (2.1)	12.2 (3.6)	11.4 (2.6)	15.3 (4.2)	8.0 (4.6)	0.108	**
HCLM	9.1 (2.0)	6.4 (3.0)	9.5 (3.2)	10.5 (3.5)	1.4 (3.9)	46.361	
WETTR0	5.3 (1.6)	4.7 (1.2)	4.8 (3.1)	10.0 (3.3)	4.7 (3.7)	1.403	*
WETTR1	3.8 (1.4)	5.6 (1.7)	4.5 (2.7)	9.7 (3.7)	5.9 (3.9)	0.440	**
M-Mittel	6.3 (2.1)	7.1 (3.3)	7.3 (3.4)	11.0 (2.6)	4.7 (3.2)	0.600	**

Tabelle J.59: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Birne (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.0 (3.2)						
RUBA	6.0 (3.0)	0.4 (2.4)	-7.8 (2.2)	-13.5 (2.5)	-19.4 (3.8)	0.000	***
ECLM	7.3 (2.1)	6.1 (3.7)	-2.1 (3.0)	-6.6 (4.9)	-13.9 (5.3)	0.000	***
HCLM	9.1 (2.2)	-0.1 (3.1)	-4.6 (3.3)	-12.9 (4.1)	-22.0 (4.6)	0.000	***
WETTR0	5.3 (1.5)	-1.9 (1.3)	-10.5 (3.1)	-15.3 (3.8)	-20.6 (4.0)	0.000	***
WETTR1	3.8 (1.3)	-1.0 (1.8)	-10.8 (2.5)	-15.7 (4.6)	-19.5 (4.8)	0.000	***
M-Mittel	6.3 (2.2)	0.7 (3.7)	-7.1 (4.4)	-12.8 (4.0)	-19.1 (4.3)	0.000	***

Tabelle J.60: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Birne (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.2)						
RUBA	0.0 (2.4)	3.6 (2.0)	1.2 (1.9)	1.7 (1.9)	1.8 (3.0)	24.661	
ECLM	0.0 (3.1)	1.7 (2.4)	1.0 (2.6)	0.4 (2.8)	0.4 (4.1)	82.627	
HCLM	0.0 (2.9)	-2.0 (2.2)	-4.1 (2.8)	-3.5 (2.2)	-3.5 (3.6)	5.762	
WETTR0	0.0 (1.0)	-2.7 (1.1)	-9.6 (1.3)	-16.7 (1.5)	-16.7 (1.8)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.2)	-2.2 (1.4)	-9.4 (1.3)	-17.3 (1.5)	-17.3 (1.9)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.2)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-7.1 (11.5)	-7.1 (11.7)	16.848	

Tabelle J.61: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Birne (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.5)						
RUBA	0.0 (2.4)	-2.5 (2.1)	-12.3 (2.3)	-20.2 (2.3)	-20.2 (3.2)	0.000	***
ECLM	0.0 (3.1)	-4.6 (2.5)	-12.8 (3.2)	-22.5 (3.5)	-22.4 (4.5)	0.000	***
HCLM	0.0 (3.0)	-8.4 (2.3)	-18.4 (3.3)	-27.1 (2.9)	-27.0 (4.1)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.1)	-8.9 (1.6)	-24.3 (2.1)	-42.8 (2.3)	-42.8 (2.5)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.3)	-8.4 (1.8)	-24.0 (2.1)	-43.5 (2.2)	-43.5 (2.5)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.2)	-6.6 (3.4)	-18.3 (7.3)	-31.2 (13.9)	-31.2 (14.0)	0.350	**

Tabelle J.62: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Birne (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	106.6 (25.5)						
RUBA	99.4 (23.8)	81.4 (19.0)	98.8 (20.8)	129.7 (22.0)	30.3 (31.7)	6.074	
ECLM	112.2 (23.1)	134.0 (33.6)	133.9 (33.6)	181.2 (39.8)	69.1 (45.3)	0.359	**
HCLM	128.8 (28.2)	131.9 (25.1)	177.4 (35.0)	192.2 (32.8)	63.5 (42.4)	0.402	**
WETTR0	98.6 (15.8)	119.6 (13.4)	162.1 (23.1)	238.0 (21.6)	139.3 (26.2)	0.000	***
WETTR1	89.1 (11.9)	116.7 (17.9)	158.3 (21.1)	238.9 (23.5)	149.8 (26.0)	0.000	***
M-Mittel	105.6 (17.2)	116.7 (22.8)	146.1 (34.7)	196.0 (53.0)	90.4 (54.2)	0.650	**

Tabelle J.63: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Birne (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	107.1 (25.6)						
RUBA	99.6 (23.7)	77.3 (18.7)	87.7 (18.9)	110.7 (19.8)	11.1 (30.2)	46.508	
ECLM	112.5 (23.2)	129.7 (33.2)	124.6 (32.3)	163.4 (37.6)	50.9 (43.4)	2.253	*
HCLM	129.1 (28.3)	127.3 (24.6)	165.1 (33.0)	170.1 (31.3)	41.0 (41.3)	5.200	
WETTR0	98.7 (15.7)	113.5 (12.6)	148.2 (21.8)	210.5 (19.8)	111.8 (24.8)	0.000	***
WETTR1	89.6 (11.7)	111.0 (17.3)	144.2 (19.6)	210.7 (21.5)	121.1 (24.2)	0.000	***
M-Mittel	105.9 (17.2)	111.7 (22.5)	134.0 (33.5)	173.0 (48.2)	67.2 (48.4)	1.343	*

Tabelle J.64: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Birne (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	310.3 (20.0)						
RUBA	311.3 (16.8)	296.8 (15.9)	315.6 (16.9)	333.8 (18.0)	22.5 (24.1)	6.664	
ECLM	310.3 (24.8)	320.9 (27.6)	325.0 (27.5)	364.4 (31.2)	54.0 (39.1)	0.757	**
HCLM	315.1 (27.9)	326.8 (20.7)	363.6 (31.5)	384.2 (25.4)	69.1 (36.9)	0.042	***
WETTR0	299.9 (8.9)	320.9 (8.1)	366.1 (13.0)	427.5 (14.2)	127.6 (16.5)	0.000	***
WETTR1	294.5 (9.2)	316.8 (10.5)	361.3 (13.0)	425.5 (14.0)	131.0 (16.5)	0.000	***
M-Mittel	306.2 (10.6)	316.4 (11.3)	346.3 (27.0)	387.1 (50.3)	80.8 (52.3)	1.273	*

Tabelle J.65: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Birne (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	310.7 (20.0)						
RUBA	311.8 (16.7)	290.6 (15.8)	300.5 (16.4)	309.3 (17.0)	-2.5 (23.4)	83.268	
ECLM	310.7 (24.8)	315.3 (27.6)	312.0 (27.2)	342.4 (30.5)	31.7 (38.5)	10.478	
HCLM	315.5 (27.9)	320.5 (20.6)	348.6 (30.7)	360.0 (24.9)	44.5 (36.6)	1.813	*
WETTR0	300.4 (8.8)	313.3 (7.5)	348.8 (12.2)	396.6 (13.2)	96.2 (15.6)	0.000	***
WETTR1	295.0 (9.3)	309.4 (10.0)	343.9 (12.1)	394.9 (13.2)	99.9 (15.8)	0.000	***
M-Mittel	306.7 (10.6)	309.8 (11.2)	330.7 (25.7)	360.6 (46.1)	53.9 (48.3)	3.619	*

Tabelle J.66: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) bei der frühreifen Birne, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	18.6 (2.0)						
RUBA	22.3 (2.0)	18.9 (2.6)	16.1 (2.1)	13.3 (2.1)	-8.9 (2.8)	0.000	***
ECLM	21.6 (3.0)	18.2 (3.2)	15.6 (2.6)	11.2 (1.6)	-10.4 (3.4)	0.000	***
HCLM	18.4 (2.8)	16.3 (2.9)	14.6 (1.8)	13.8 (1.7)	-4.6 (3.2)	0.619	**
WETTR0	19.2 (1.5)	18.0 (1.7)	16.3 (1.6)	14.0 (1.1)	-5.3 (1.8)	0.000	***
WETTR1	20.8 (1.8)	18.7 (1.6)	17.6 (1.7)	14.5 (1.3)	-6.3 (2.1)	0.000	***
M-Mittel	20.5 (1.7)	18.0 (1.2)	16.1 (1.1)	13.4 (1.5)	-7.1 (2.1)	0.000	***

J.7 Spätreifende Birne

Tabelle J.67: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der spätreifen Birne (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	16.7 (0.4)						
RUBA	16.7 (0.5)	16.2 (0.3)	16.7 (0.3)	16.9 (0.3)	0.2 (0.6)	38.579	
ECLM	16.0 (0.5)	16.0 (0.4)	16.2 (0.4)	16.6 (0.5)	0.6 (0.7)	8.504	
HCLM	16.0 (0.5)	16.5 (0.4)	17.0 (0.5)	17.1 (0.3)	1.1 (0.6)	0.053	***
WETTR0	17.0 (0.2)	17.5 (0.2)	18.9 (0.2)	20.2 (0.2)	3.2 (0.3)	0.000	***
WETTR1	17.0 (0.2)	17.4 (0.2)	18.7 (0.2)	20.2 (0.2)	3.2 (0.3)	0.000	***
M-Mittel	16.5 (0.6)	16.7 (0.9)	17.5 (1.5)	18.2 (2.3)	1.7 (2.4)	12.666	

Tabelle J.68: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der spätreifen Birne (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	16.6 (0.4)						
RUBA	16.6 (0.5)	17.2 (0.4)	18.8 (0.4)	20.6 (0.4)	4.0 (0.6)	0.000	***
ECLM	15.9 (0.5)	16.9 (0.4)	18.3 (0.5)	20.3 (0.6)	4.4 (0.8)	0.000	***
HCLM	15.9 (0.5)	17.4 (0.4)	19.3 (0.6)	20.9 (0.5)	4.9 (0.7)	0.000	***
WETTR0	17.0 (0.2)	18.5 (0.3)	21.3 (0.4)	24.6 (0.3)	7.6 (0.4)	0.000	***
WETTR1	17.0 (0.2)	18.4 (0.3)	21.1 (0.4)	24.7 (0.3)	7.7 (0.4)	0.000	***
M-Mittel	16.5 (0.6)	17.7 (0.9)	19.8 (1.7)	22.2 (2.8)	5.7 (2.9)	0.514	**

Tabelle J.69: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Birne (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	8.2 (3.3)						
RUBA	7.3 (3.1)	7.4 (2.5)	7.5 (2.0)	11.7 (3.2)	4.3 (4.3)	5.053	
ECLM	8.9 (2.1)	12.1 (3.3)	12.1 (3.0)	17.5 (4.7)	8.7 (5.1)	0.143	**
HCLM	10.2 (2.5)	7.5 (2.8)	13.0 (3.7)	14.2 (4.0)	3.9 (4.6)	9.564	
WETTR0	5.8 (1.8)	6.3 (1.7)	8.2 (3.8)	16.1 (3.3)	10.3 (3.7)	0.000	***
WETTR1	5.1 (1.6)	8.5 (2.4)	7.5 (3.3)	17.3 (3.6)	12.3 (3.9)	0.000	***
M-Mittel	7.5 (2.3)	8.4 (2.4)	9.6 (2.8)	15.4 (2.6)	7.9 (3.2)	0.004	***

Tabelle J.70: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Birne (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	8.2 (3.5)						
RUBA	7.4 (3.0)	1.1 (2.5)	-6.5 (2.5)	-11.5 (3.6)	-18.8 (4.6)	0.000	***
ECLM	8.9 (2.0)	6.0 (3.5)	-1.4 (3.4)	-4.0 (5.6)	-12.9 (5.9)	0.008	***
HCLM	10.3 (2.7)	1.1 (3.1)	-0.7 (3.9)	-8.7 (4.6)	-18.9 (5.3)	0.000	***
WETTR0	5.9 (1.7)	-0.2 (1.8)	-6.6 (3.8)	-7.6 (3.9)	-13.5 (4.2)	0.000	***
WETTR1	5.1 (1.5)	2.1 (2.3)	-7.2 (3.2)	-6.1 (4.4)	-11.2 (4.6)	0.002	***
M-Mittel	7.5 (2.3)	2.0 (2.5)	-4.5 (3.4)	-7.6 (2.9)	-15.1 (3.4)	0.000	***

Tabelle J.71: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Birne (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.3)						
RUBA	0.0 (2.9)	2.8 (2.0)	0.1 (2.0)	-1.5 (2.0)	-1.5 (3.4)	38.573	
ECLM	0.0 (3.4)	0.0 (2.4)	-1.3 (2.7)	-3.9 (2.9)	-3.8 (4.4)	8.504	
HCLM	0.0 (3.0)	-3.0 (2.3)	-6.4 (3.0)	-6.8 (2.2)	-6.7 (3.7)	0.053	***
WETTR0	0.0 (0.9)	-2.6 (1.2)	-10.8 (1.3)	-18.6 (1.3)	-18.6 (1.5)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.2)	-2.3 (1.2)	-10.0 (1.3)	-19.0 (1.4)	-19.0 (1.8)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.4)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-10.0 (10.3)	-9.9 (10.5)	5.868	

Tabelle J.72: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Birne (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.5)						
RUBA	0.0 (2.8)	-3.3 (2.2)	-13.5 (2.4)	-24.1 (2.5)	-24.1 (3.7)	0.000	***
ECLM	0.0 (3.4)	-6.4 (2.6)	-15.3 (3.3)	-27.6 (3.7)	-27.6 (4.9)	0.000	***
HCLM	0.0 (3.1)	-9.5 (2.5)	-20.9 (3.6)	-30.9 (3.0)	-30.9 (4.2)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.0)	-8.8 (1.7)	-25.6 (2.2)	-45.0 (2.0)	-45.0 (2.2)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.2)	-8.5 (1.7)	-24.6 (2.1)	-45.6 (2.1)	-45.6 (2.3)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.4)	-7.3 (2.8)	-20.0 (6.9)	-34.7 (12.5)	-34.6 (12.6)	0.161	**

Tabelle J.73: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Birne (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	128.2 (29.8)						
RUBA	118.8 (25.7)	103.8 (23.9)	124.7 (26.0)	182.1 (29.9)	63.3 (38.6)	0.175	**
ECLM	131.3 (25.9)	161.6 (37.1)	168.6 (39.6)	246.3 (50.7)	115.0 (56.1)	0.016	***
HCLM	146.2 (31.9)	160.3 (26.5)	229.7 (45.2)	255.0 (43.9)	108.8 (53.3)	0.014	***
WETTR0	112.9 (17.4)	137.7 (16.5)	198.6 (29.6)	299.5 (23.8)	186.6 (28.9)	0.000	***
WETTR1	108.5 (14.3)	144.3 (19.4)	189.0 (25.5)	307.9 (26.6)	199.4 (29.8)	0.000	***
M-Mittel	123.5 (17.7)	141.5 (25.2)	182.1 (44.0)	258.2 (59.1)	134.6 (60.0)	0.153	**

Tabelle J.74: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Birne (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	128.3 (29.9)						
RUBA	119.3 (25.9)	98.9 (23.1)	112.7 (24.9)	159.2 (27.1)	40.0 (36.7)	3.330	*
ECLM	131.8 (25.9)	157.4 (36.6)	158.9 (38.9)	224.0 (47.5)	92.2 (53.3)	0.113	**
HCLM	146.6 (32.1)	155.1 (26.1)	215.5 (43.1)	228.3 (42.1)	81.7 (51.9)	0.259	**
WETTR0	113.5 (17.3)	131.1 (15.9)	181.2 (27.8)	267.3 (22.1)	153.9 (27.5)	0.000	***
WETTR1	108.8 (14.1)	137.7 (18.7)	174.3 (23.9)	275.1 (24.7)	166.2 (28.0)	0.000	***
M-Mittel	124.0 (17.9)	136.0 (25.4)	168.5 (42.4)	230.8 (54.1)	106.8 (55.7)	0.335	**

Tabelle J.75: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Birne (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	360.6 (22.1)						
RUBA	361.4 (20.6)	348.2 (19.8)	372.5 (20.9)	412.4 (23.3)	51.0 (30.5)	0.144	**
ECLM	357.5 (28.4)	378.2 (31.4)	389.1 (32.7)	455.3 (38.9)	97.7 (47.2)	0.012	***
HCLM	363.3 (31.5)	385.1 (22.8)	439.5 (39.3)	473.9 (33.0)	110.6 (44.7)	0.001	***
WETTR0	347.5 (9.6)	371.5 (10.1)	436.6 (16.8)	519.6 (15.5)	172.1 (17.9)	0.000	***
WETTR1	344.2 (10.7)	372.0 (10.7)	427.5 (15.9)	524.0 (16.5)	179.8 (19.3)	0.000	***
M-Mittel	354.8 (12.4)	371.0 (13.8)	413.0 (34.4)	477.0 (58.5)	122.2 (60.8)	0.507	**

Tabelle J.76: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Birne (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	361.1 (22.1)						
RUBA	361.9 (20.6)	341.2 (19.6)	355.5 (20.5)	384.5 (22.1)	22.6 (29.6)	13.246	
ECLM	358.0 (28.4)	371.8 (31.3)	374.4 (32.4)	429.9 (37.9)	71.9 (46.5)	0.307	**
HCLM	363.8 (31.6)	377.9 (22.7)	422.2 (38.4)	446.0 (32.4)	82.2 (44.3)	0.046	***
WETTR0	348.0 (9.4)	362.9 (9.4)	416.5 (15.7)	484.0 (14.5)	135.9 (17.0)	0.000	***
WETTR1	344.8 (10.7)	363.6 (10.1)	407.4 (14.9)	488.4 (15.5)	143.6 (18.5)	0.000	***
M-Mittel	355.3 (12.5)	363.5 (13.8)	395.2 (32.9)	446.5 (49.7)	91.2 (49.6)	0.409	**

Tabelle J.77: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) bei der spätreifen Birne, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	19.3 (2.0)						
RUBA	22.7 (1.7)	19.2 (2.5)	16.9 (2.1)	14.2 (2.1)	-8.6 (2.7)	0.000	***
ECLM	22.1 (2.9)	18.8 (3.1)	16.2 (2.7)	11.7 (1.6)	-10.4 (3.2)	0.000	***
HCLM	19.1 (2.8)	17.0 (2.8)	14.9 (1.7)	14.4 (1.7)	-4.7 (3.2)	0.536	**
WETTR0	20.0 (1.4)	18.9 (1.6)	17.0 (1.6)	14.7 (1.1)	-5.4 (1.8)	0.000	***
WETTR1	21.4 (1.7)	19.2 (1.5)	18.4 (1.6)	14.8 (1.2)	-6.6 (2.0)	0.000	***
M-Mittel	21.1 (1.5)	18.6 (1.1)	16.7 (1.3)	14.0 (1.5)	-7.1 (2.0)	0.000	***

J.8 Erdbeere

Tabelle J.78: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der Erdbeere (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	9.5 (0.3)						
RUBA	9.7 (0.3)	9.4 (0.3)	9.3 (0.3)	8.6 (0.3)	-1.1 (0.4)	0.000	***
ECLM	9.2 (0.3)	9.1 (0.3)	8.9 (0.3)	8.1 (0.4)	-1.1 (0.5)	0.003	***
HCLM	9.3 (0.4)	9.1 (0.3)	8.7 (0.3)	8.2 (0.3)	-1.0 (0.5)	0.013	***
WETTR0	9.7 (0.2)	9.9 (0.2)	10.0 (0.3)	9.8 (0.4)	0.1 (0.4)	55.260	
WETTR1	9.6 (0.3)	9.8 (0.3)	9.9 (0.3)	9.8 (0.3)	0.2 (0.4)	30.603	
M-Mittel	9.5 (0.2)	9.5 (0.4)	9.4 (0.7)	8.9 (1.0)	-0.6 (1.1)	20.711	

Tabelle J.79: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der Erdbeere (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	9.5 (0.3)						
RUBA	9.6 (0.2)	10.2 (0.2)	11.1 (0.3)	11.3 (0.3)	1.7 (0.4)	0.000	***
ECLM	9.2 (0.3)	9.9 (0.3)	10.7 (0.4)	10.8 (0.5)	1.6 (0.6)	0.000	***
HCLM	9.2 (0.4)	9.9 (0.3)	10.3 (0.4)	10.9 (0.5)	1.7 (0.6)	0.000	***
WETTR0	9.6 (0.2)	10.6 (0.3)	11.7 (0.4)	12.7 (0.5)	3.1 (0.5)	0.000	***
WETTR1	9.5 (0.3)	10.5 (0.4)	11.6 (0.3)	12.6 (0.3)	3.1 (0.4)	0.000	***
M-Mittel	9.4 (0.2)	10.2 (0.4)	11.1 (0.8)	11.7 (1.2)	2.2 (1.2)	0.729	**

Tabelle J.80: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Erdbeere (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.2 (2.9)						
RUBA	0.3 (2.5)	2.4 (2.5)	3.4 (2.8)	11.0 (2.8)	10.7 (3.7)	0.000	***
ECLM	0.3 (3.1)	2.2 (3.1)	3.7 (3.2)	12.8 (3.7)	12.5 (4.7)	0.000	***
HCLM	1.6 (3.7)	2.3 (2.7)	7.6 (3.1)	11.6 (3.7)	10.0 (5.1)	0.021	***
WETTR0	0.0 (2.3)	-2.1 (2.4)	-2.9 (3.3)	-0.8 (3.4)	-0.8 (4.0)	67.711	
WETTR1	0.1 (2.6)	-2.1 (3.3)	-3.3 (2.9)	-1.6 (2.4)	-1.7 (3.5)	33.525	
M-Mittel	0.5 (1.5)	0.6 (2.5)	1.7 (5.5)	6.6 (9.0)	6.1 (9.2)	13.848	

Tabelle J.81: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Erdbeere (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.2 (3.0)						
RUBA	0.2 (2.4)	-6.1 (2.4)	-15.1 (3.4)	-17.2 (3.4)	-17.4 (4.1)	0.000	***
ECLM	0.3 (3.2)	-6.6 (3.0)	-15.4 (4.1)	-15.8 (4.6)	-16.2 (5.5)	0.000	***
HCLM	1.6 (3.8)	-6.4 (3.1)	-10.5 (3.8)	-17.8 (4.9)	-19.3 (6.1)	0.000	***
WETTR0	0.0 (2.3)	-10.5 (2.8)	-21.8 (4.2)	-31.7 (4.9)	-31.7 (5.4)	0.000	***
WETTR1	0.1 (2.8)	-10.4 (3.8)	-22.0 (3.2)	-32.2 (3.3)	-32.3 (4.3)	0.000	***
M-Mittel	0.4 (1.5)	-8.0 (2.3)	-17.0 (5.7)	-22.9 (10.4)	-23.4 (10.6)	0.362	**

Tabelle J.82: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Erdbeere (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (3.0)						
RUBA	0.0 (2.6)	2.4 (2.6)	3.4 (2.8)	10.9 (2.9)	10.9 (3.8)	0.000	***
ECLM	0.0 (3.2)	1.0 (3.5)	3.1 (3.4)	11.8 (4.2)	11.8 (5.2)	0.003	***
HCLM	0.0 (4.1)	1.4 (3.1)	6.4 (3.6)	11.1 (3.7)	11.1 (5.4)	0.013	***
WETTR0	0.0 (2.3)	-2.0 (2.4)	-3.1 (3.4)	-1.2 (3.6)	-1.3 (4.2)	55.258	
WETTR1	0.0 (2.7)	-2.1 (3.3)	-3.4 (3.0)	-1.9 (2.6)	-1.9 (3.7)	30.602	
M-Mittel	0.0 (1.6)	0.1 (2.0)	1.3 (5.0)	6.1 (8.9)	6.1 (9.2)	13.722	

Tabelle J.83: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Erdbeere (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (3.0)						
RUBA	0.0 (2.5)	-6.2 (2.4)	-15.1 (3.4)	-17.3 (3.5)	-17.3 (4.2)	0.000	***
ECLM	0.0 (3.3)	-7.9 (3.6)	-16.2 (4.3)	-17.2 (5.3)	-17.2 (6.1)	0.000	***
HCLM	0.0 (4.2)	-7.5 (3.5)	-12.1 (4.3)	-18.4 (5.0)	-18.4 (6.4)	0.000	***
WETTR0	0.0 (2.3)	-10.5 (2.8)	-22.0 (4.3)	-32.2 (5.2)	-32.2 (5.6)	0.000	***
WETTR1	0.0 (2.9)	-10.4 (3.8)	-22.1 (3.2)	-32.6 (3.7)	-32.6 (4.6)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.6)	-8.5 (1.8)	-17.5 (5.0)	-23.6 (10.3)	-23.6 (10.5)	0.342	**

Tabelle J.84: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Erdbeere (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	17.6 (6.2)						
RUBA	15.0 (6.1)	13.7 (5.7)	14.0 (5.5)	13.5 (5.8)	-1.5 (8.2)	71.633	
ECLM	19.0 (7.0)	24.3 (9.4)	19.0 (7.3)	16.5 (8.4)	-2.5 (10.7)	64.440	
HCLM	23.8 (9.2)	22.4 (7.6)	21.4 (8.4)	19.2 (7.3)	-4.7 (11.5)	42.026	
WETTR0	11.0 (4.3)	14.0 (4.8)	19.0 (6.3)	19.6 (7.1)	8.6 (8.2)	4.003	*
WETTR1	11.7 (5.5)	11.9 (5.6)	17.8 (6.0)	20.5 (6.5)	8.8 (8.3)	3.748	*
M-Mittel	16.1 (5.8)	17.3 (5.9)	18.2 (3.3)	17.9 (3.9)	1.8 (6.7)	59.305	

Tabelle J.85: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Erdbeere (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	17.6 (6.2)						
RUBA	15.0 (6.1)	13.9 (5.7)	13.9 (5.5)	13.8 (5.8)	-1.3 (8.3)	75.918	
ECLM	19.0 (7.0)	24.5 (9.5)	19.4 (7.3)	17.0 (8.6)	-2.0 (10.8)	71.479	
HCLM	23.6 (9.2)	22.6 (7.7)	22.2 (8.7)	19.8 (7.3)	-3.8 (11.5)	50.531	
WETTR0	11.0 (4.3)	14.5 (4.9)	19.1 (6.3)	20.8 (7.5)	9.8 (8.5)	2.485	*
WETTR1	11.7 (5.5)	12.0 (5.6)	17.6 (6.0)	20.8 (6.5)	9.1 (8.3)	3.232	*
M-Mittel	16.1 (5.7)	17.5 (5.9)	18.4 (3.2)	18.4 (4.0)	2.4 (6.7)	47.349	

Tabelle J.86: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Erdbeere (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	43.1 (3.7)						
RUBA	41.7 (2.9)	41.8 (3.6)	42.6 (3.1)	38.5 (3.1)	-3.2 (4.2)	13.668	
ECLM	42.7 (4.1)	44.6 (5.5)	42.5 (4.6)	38.6 (5.1)	-4.1 (6.4)	20.037	
HCLM	44.5 (5.4)	43.1 (4.6)	41.0 (4.6)	38.4 (4.0)	-6.1 (6.6)	7.163	
WETTR0	39.3 (2.6)	41.0 (2.4)	43.3 (3.6)	43.5 (4.1)	4.2 (4.8)	8.610	
WETTR1	38.4 (2.6)	39.5 (3.2)	41.3 (3.4)	42.8 (3.0)	4.3 (3.9)	2.920	*
M-Mittel	41.3 (2.7)	42.0 (1.8)	42.1 (2.0)	40.3 (3.0)	-1.0 (3.9)	61.332	

Tabelle J.87: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Erdbeere (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	43.1 (3.7)						
RUBA	41.6 (2.9)	42.7 (3.7)	44.5 (3.2)	41.2 (3.4)	-0.4 (4.4)	85.755	
ECLM	42.6 (4.1)	45.6 (5.7)	44.6 (4.9)	41.7 (5.6)	-1.0 (6.8)	77.732	
HCLM	44.4 (5.4)	44.1 (4.8)	43.0 (4.9)	41.5 (4.4)	-2.9 (6.8)	40.505	
WETTR0	39.3 (2.5)	41.6 (2.5)	44.9 (3.8)	46.1 (4.5)	6.8 (5.1)	1.052	*
WETTR1	38.4 (2.7)	40.0 (3.3)	42.6 (3.6)	45.1 (3.2)	6.7 (4.1)	0.178	**
M-Mittel	41.3 (2.6)	42.8 (2.0)	43.9 (2.1)	43.1 (2.9)	1.9 (3.8)	32.883	

Tabelle J.88: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) bei der Erdbeere, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 4 Erdbeeranbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	25.2 (2.8)						
RUBA	29.5 (2.5)	23.9 (3.3)	24.4 (2.9)	22.5 (3.5)	-7.0 (4.2)	0.173	**
ECLM	28.9 (3.4)	25.8 (3.8)	23.4 (3.3)	19.3 (2.9)	-9.6 (4.4)	0.005	***
HCLM	24.9 (3.2)	23.8 (2.8)	18.9 (2.4)	21.6 (2.6)	-3.3 (4.0)	11.108	
WETTR0	25.9 (2.3)	28.0 (2.1)	24.5 (2.7)	22.7 (2.3)	-3.2 (3.2)	5.509	
WETTR1	28.8 (2.4)	23.0 (2.5)	25.7 (2.1)	21.3 (2.2)	-7.5 (3.2)	0.002	***
M-Mittel	27.6 (2.1)	24.9 (2.3)	23.4 (2.9)	21.5 (1.5)	-6.1 (2.5)	0.002	***

J.9 Wein

Tabelle J.89: Statistik für den **Feuchtmassenertrag**^a (in t/ha/a) beim Wein (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	11.2 (0.2)						
RUBA	10.9 (0.2)	10.5 (0.2)	10.6 (0.2)	10.4 (0.2)	-0.5 (0.3)	0.045	***
ECLM	10.5 (0.3)	10.3 (0.2)	10.5 (0.2)	10.3 (0.2)	-0.3 (0.4)	20.146	
HCLM	10.7 (0.3)	10.8 (0.2)	10.8 (0.3)	10.5 (0.2)	-0.2 (0.3)	26.717	
WETTR0	11.5 (0.1)	11.7 (0.1)	12.1 (0.2)	12.6 (0.1)	1.2 (0.2)	0.000	***
WETTR1	11.5 (0.1)	11.5 (0.2)	12.2 (0.2)	12.7 (0.1)	1.3 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	11.0 (0.6)	11.0 (0.7)	11.2 (1.0)	11.3 (1.6)	0.3 (1.7)	65.448	

^a Der Ertrag an Wein in Litern wurde mit 1.33 multipliziert, um den Fruchtertrag von Wein in Kilogramm zu erhalten.

Tabelle J.90: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) beim Wein (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	11.1 (0.3)						
RUBA	10.8 (0.2)	12.0 (0.2)	13.8 (0.3)	15.5 (0.4)	4.7 (0.4)	0.000	***
ECLM	10.4 (0.3)	11.7 (0.3)	13.6 (0.4)	15.5 (0.5)	5.1 (0.5)	0.000	***
HCLM	10.6 (0.3)	12.3 (0.3)	14.0 (0.4)	15.7 (0.4)	5.2 (0.5)	0.000	***
WETTR0	11.4 (0.2)	13.2 (0.2)	15.7 (0.3)	18.7 (0.3)	7.4 (0.3)	0.000	***
WETTR1	11.4 (0.2)	13.0 (0.3)	15.7 (0.4)	18.8 (0.3)	7.5 (0.3)	0.000	***
M-Mittel	10.9 (0.6)	12.4 (0.8)	14.6 (1.3)	16.9 (2.2)	6.0 (2.2)	0.183	**

Tabelle J.91: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim Wein (**ohne Bewässerung** und **ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.5 (2.2)						
RUBA	1.6 (2.2)	4.5 (2.0)	4.3 (1.7)	8.0 (1.8)	6.3 (2.8)	0.004	***
ECLM	2.0 (2.6)	6.6 (2.6)	6.8 (2.3)	12.1 (3.5)	10.1 (4.3)	0.002	***
HCLM	4.6 (1.8)	3.0 (2.6)	7.2 (2.7)	9.3 (2.8)	4.7 (3.2)	0.552	**
WETTR0	1.6 (1.2)	0.1 (1.0)	0.3 (1.9)	2.9 (2.9)	1.3 (3.1)	39.289	
WETTR1	1.0 (1.1)	2.2 (1.4)	0.5 (2.3)	3.3 (3.6)	2.2 (3.8)	23.456	
M-Mittel	2.2 (1.4)	3.3 (2.8)	3.8 (4.0)	7.1 (4.7)	4.9 (4.7)	4.308	*

Tabelle J.92: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim Wein (**ohne Bewässerung** und **mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.5 (2.9)						
RUBA	1.6 (2.4)	-9.4 (2.2)	-25.4 (3.0)	-38.3 (3.2)	-40.0 (3.9)	0.000	***
ECLM	2.0 (2.5)	-6.9 (3.0)	-21.7 (3.6)	-32.5 (5.7)	-34.5 (6.1)	0.000	***
HCLM	4.6 (2.0)	-10.7 (3.4)	-21.1 (3.6)	-36.8 (4.6)	-41.4 (4.9)	0.000	***
WETTR0	1.6 (1.3)	-13.7 (1.6)	-29.7 (2.6)	-44.1 (4.2)	-45.8 (4.4)	0.000	***
WETTR1	1.0 (1.5)	-11.4 (2.2)	-29.2 (2.8)	-43.7 (5.6)	-44.7 (5.7)	0.000	***
M-Mittel	2.2 (1.4)	-10.4 (2.9)	-25.4 (4.8)	-39.1 (5.6)	-41.3 (5.8)	0.000	***

Tabelle J.93: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim Wein (**mit Bewässerung** und **ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.0)						
RUBA	0.0 (2.1)	3.6 (2.0)	2.8 (1.8)	5.0 (1.8)	5.0 (2.7)	0.045	***
ECLM	0.0 (2.9)	2.1 (1.9)	0.4 (2.2)	2.4 (2.4)	2.4 (3.7)	20.138	
HCLM	0.0 (2.5)	-1.7 (2.1)	-1.2 (2.5)	1.8 (2.1)	1.8 (3.1)	26.716	
WETTR0	0.0 (1.1)	-2.1 (1.2)	-5.7 (1.3)	-10.3 (1.2)	-10.3 (1.6)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.3)	-0.6 (1.4)	-6.0 (1.6)	-10.9 (1.2)	-10.9 (1.7)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.2)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-2.4 (9.4)	-2.4 (9.6)	52.270	

Tabelle J.94: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim Wein (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.6)						
RUBA	0.0 (2.2)	-10.6 (2.2)	-27.4 (3.1)	-43.1 (3.3)	-43.1 (3.9)	0.000	***
ECLM	0.0 (2.9)	-12.4 (2.7)	-30.6 (3.8)	-48.8 (4.4)	-48.8 (5.2)	0.000	***
HCLM	0.0 (2.7)	-16.1 (2.8)	-32.8 (3.9)	-48.9 (3.4)	-48.9 (4.3)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.4)	-16.3 (2.1)	-37.9 (3.0)	-64.8 (2.4)	-64.8 (2.8)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.5)	-14.6 (2.5)	-38.1 (3.5)	-65.7 (2.7)	-65.7 (3.0)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.1)	-14.0 (2.8)	-33.4 (5.9)	-54.3 (12.9)	-54.3 (12.9)	0.031	***

Tabelle J.95: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim Wein (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	74.6 (20.4)						
RUBA	59.4 (16.5)	53.5 (15.4)	62.5 (15.5)	88.7 (16.3)	29.3 (22.8)	1.262	*
ECLM	76.1 (18.9)	92.2 (24.7)	102.2 (26.3)	135.3 (28.6)	59.2 (33.7)	0.090	***
HCLM	90.9 (21.1)	101.5 (18.4)	133.8 (22.1)	133.7 (21.2)	42.8 (29.3)	0.500	**
WETTR0	69.0 (13.4)	85.5 (12.9)	111.0 (16.7)	155.6 (12.5)	86.6 (17.9)	0.000	***
WETTR1	60.6 (12.3)	84.6 (14.7)	111.3 (18.8)	157.6 (16.1)	97.0 (19.8)	0.000	***
M-Mittel	71.2 (14.5)	83.5 (20.2)	104.2 (31.0)	134.2 (32.4)	63.0 (33.7)	0.311	**

Tabelle J.96: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim Wein (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	74.2 (20.0)						
RUBA	59.4 (16.5)	53.7 (15.7)	62.9 (15.6)	90.6 (16.8)	31.1 (23.1)	0.901	**
ECLM	76.2 (18.9)	93.8 (25.0)	103.2 (26.5)	143.3 (29.8)	67.1 (34.6)	0.030	***
HCLM	91.1 (21.3)	102.0 (18.9)	136.3 (22.9)	137.7 (21.3)	46.5 (29.5)	0.249	**
WETTR0	68.9 (13.4)	86.9 (13.1)	112.1 (16.7)	157.2 (12.9)	88.2 (18.2)	0.000	***
WETTR1	60.6 (12.3)	85.0 (14.9)	111.9 (19.1)	159.7 (15.9)	99.1 (19.7)	0.000	***
M-Mittel	71.3 (14.6)	84.3 (20.6)	105.3 (31.8)	137.7 (32.6)	66.4 (34.0)	0.242	**

Tabelle J.97: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim Wein (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	150.2 (10.1)						
RUBA	143.3 (7.0)	137.8 (8.1)	142.9 (8.1)	151.4 (9.0)	8.1 (11.2)	14.988	
ECLM	145.8 (12.8)	150.9 (13.6)	159.6 (14.4)	179.8 (16.1)	34.0 (20.2)	0.137	**
HCLM	149.8 (14.7)	159.8 (10.7)	173.3 (14.1)	175.6 (12.2)	25.8 (18.7)	0.777	**
WETTR0	143.8 (5.1)	155.2 (5.2)	174.8 (7.1)	199.4 (5.5)	55.6 (7.4)	0.000	***
WETTR1	142.9 (6.3)	152.0 (6.0)	176.0 (8.9)	202.8 (7.0)	59.9 (9.2)	0.000	***
M-Mittel	145.1 (5.5)	151.2 (8.5)	165.3 (16.8)	181.8 (25.8)	36.7 (26.9)	1.924	*

Tabelle J.98: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim Wein (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	149.8 (10.0)						
RUBA	143.0 (7.1)	142.6 (8.4)	151.8 (8.9)	166.3 (10.4)	23.4 (12.4)	0.039	***
ECLM	145.5 (12.8)	156.4 (14.5)	170.4 (16.0)	201.9 (19.1)	56.4 (22.6)	0.001	***
HCLM	149.3 (14.6)	164.9 (11.2)	186.1 (16.2)	195.9 (14.2)	46.6 (20.0)	0.002	***
WETTR0	143.6 (5.2)	159.5 (5.6)	184.9 (8.1)	215.5 (6.3)	71.9 (8.0)	0.000	***
WETTR1	142.6 (6.2)	156.3 (6.5)	185.8 (9.9)	218.6 (8.1)	76.0 (10.0)	0.000	***
M-Mittel	144.8 (5.5)	155.9 (8.5)	175.8 (17.7)	199.7 (26.0)	54.9 (27.1)	0.490	**

Tabelle J.99: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) beim Wein, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	37.8 (2.1)						
RUBA	37.8 (2.1)	39.7 (2.3)	37.6 (2.1)	40.6 (1.7)	2.8 (2.6)	3.571	*
ECLM	38.0 (2.6)	40.6 (3.4)	37.5 (2.7)	42.1 (2.1)	4.1 (3.3)	1.673	*
HCLM	35.0 (2.8)	34.5 (2.7)	37.9 (2.7)	39.4 (2.3)	4.4 (3.5)	1.609	*
WETTR0	41.6 (1.6)	41.5 (1.8)	43.5 (1.7)	41.8 (1.6)	0.2 (2.2)	89.101	
WETTR1	40.3 (2.0)	41.3 (1.8)	41.9 (1.7)	41.2 (1.6)	0.9 (2.5)	46.802	
M-Mittel	38.6 (2.8)	39.5 (3.3)	39.7 (3.2)	41.0 (0.9)	2.5 (2.9)	8.506	

J.10 Pfirsich

Tabelle J.100: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) beim Pfirsich (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.8 (0.1)						
RUBA	6.7 (0.1)	6.5 (0.1)	6.5 (0.1)	6.3 (0.1)	-0.3 (0.2)	0.003	***
ECLM	6.4 (0.1)	6.3 (0.1)	6.3 (0.1)	6.2 (0.1)	-0.2 (0.2)	1.199	*
HCLM	6.5 (0.1)	6.5 (0.1)	6.4 (0.1)	6.3 (0.1)	-0.2 (0.2)	2.318	*
WETTR0	7.1 (0.1)	7.1 (0.1)	7.3 (0.1)	7.6 (0.1)	0.5 (0.1)	0.000	***
WETTR1	6.9 (0.1)	7.0 (0.1)	7.3 (0.1)	7.6 (0.1)	0.7 (0.1)	0.000	***
M-Mittel	6.7 (0.4)	6.7 (0.5)	6.7 (0.6)	6.8 (0.9)	0.1 (0.9)	81.422	

Tabelle J.101: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) beim Pfirsich (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	6.8 (0.1)						
RUBA	6.7 (0.1)	6.9 (0.1)	7.5 (0.2)	8.0 (0.1)	1.3 (0.2)	0.000	***
ECLM	6.4 (0.1)	6.7 (0.1)	7.3 (0.2)	7.8 (0.1)	1.4 (0.2)	0.000	***
HCLM	6.4 (0.1)	6.9 (0.1)	7.5 (0.2)	7.9 (0.1)	1.5 (0.2)	0.000	***
WETTR0	7.0 (0.1)	7.6 (0.1)	8.4 (0.1)	9.5 (0.2)	2.5 (0.2)	0.000	***
WETTR1	6.9 (0.1)	7.5 (0.1)	8.4 (0.1)	9.5 (0.2)	2.6 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	6.7 (0.4)	7.1 (0.5)	7.8 (0.7)	8.6 (1.1)	1.9 (1.2)	1.109	*

Tabelle J.102: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim Pfirsich (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	4.1 (2.8)						
RUBA	3.1 (2.6)	6.0 (2.2)	6.0 (2.2)	10.1 (2.1)	6.9 (3.3)	0.009	***
ECLM	4.4 (2.2)	10.7 (3.6)	10.1 (3.0)	15.2 (4.3)	10.8 (4.7)	0.004	***
HCLM	6.3 (1.9)	5.5 (2.7)	7.7 (2.9)	9.9 (3.4)	3.6 (3.9)	6.855	
WETTR0	4.5 (1.7)	5.7 (1.6)	4.6 (2.7)	10.2 (3.2)	5.7 (3.6)	0.239	**
WETTR1	2.5 (1.1)	4.4 (1.6)	4.0 (2.0)	7.7 (3.4)	5.2 (3.5)	0.548	**
M-Mittel	4.2 (1.4)	6.5 (2.7)	6.5 (2.7)	10.6 (2.9)	6.4 (3.1)	0.067	***

Tabelle J.103: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim Pfirsich (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	4.1 (3.1)						
RUBA	3.2 (2.5)	-1.4 (2.0)	-10.0 (2.7)	-15.4 (2.4)	-18.6 (3.4)	0.000	***
ECLM	4.4 (2.1)	3.6 (3.6)	-5.3 (3.4)	-9.1 (5.1)	-13.6 (5.4)	0.001	***
HCLM	6.3 (2.0)	-1.8 (2.7)	-8.0 (3.1)	-15.5 (4.0)	-21.8 (4.4)	0.000	***
WETTR0	4.6 (1.6)	-1.7 (1.7)	-11.9 (2.8)	-16.5 (3.4)	-21.1 (3.7)	0.000	***
WETTR1	2.5 (1.2)	-2.9 (1.6)	-12.7 (2.0)	-19.9 (4.1)	-22.5 (4.3)	0.000	***
M-Mittel	4.2 (1.4)	-0.9 (2.8)	-9.6 (3.4)	-15.3 (4.4)	-19.5 (4.5)	0.002	***

Tabelle J.104: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim Pfirsich (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (1.7)						
RUBA	0.0 (1.8)	3.4 (1.7)	3.1 (1.8)	5.2 (1.5)	5.2 (2.3)	0.003	***
ECLM	0.0 (2.3)	1.7 (1.6)	2.1 (2.1)	3.6 (1.6)	3.6 (2.8)	1.199	*
HCLM	0.0 (1.8)	-0.1 (1.8)	0.2 (1.8)	2.7 (1.6)	2.7 (2.3)	2.318	*
WETTR0	0.0 (1.1)	-1.0 (1.2)	-3.6 (1.0)	-7.6 (1.5)	-7.6 (1.9)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.2)	-0.8 (1.2)	-4.6 (1.1)	-9.5 (1.6)	-9.5 (1.9)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (0.9)	0.6 (2.2)	-0.6 (4.3)	-1.1 (8.5)	-1.1 (8.6)	74.109	

Tabelle J.105: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) beim Pfirsich (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (1.9)						
RUBA	0.0 (1.8)	-4.0 (1.5)	-13.0 (2.3)	-20.3 (2.0)	-20.3 (2.6)	0.000	***
ECLM	0.0 (2.3)	-5.9 (1.5)	-14.0 (2.8)	-22.3 (2.3)	-22.3 (3.2)	0.000	***
HCLM	0.0 (1.8)	-7.6 (1.8)	-16.0 (2.4)	-23.3 (2.1)	-23.3 (2.7)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.2)	-8.3 (1.7)	-20.2 (1.6)	-35.6 (2.4)	-35.6 (2.7)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.3)	-8.2 (1.5)	-21.1 (1.8)	-38.0 (2.3)	-38.0 (2.6)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (0.9)	-6.8 (2.2)	-16.9 (4.6)	-27.9 (10.3)	-27.9 (10.3)	0.170	**

Tabelle J.106: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim Pfirsich (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	82.9 (19.5)						
RUBA	69.8 (16.5)	66.9 (15.0)	70.4 (15.5)	90.2 (15.5)	20.5 (22.2)	6.991	
ECLM	80.7 (17.1)	107.5 (24.6)	97.1 (24.2)	126.6 (27.2)	45.9 (31.6)	0.530	**
HCLM	96.5 (20.1)	90.5 (19.8)	108.5 (23.0)	116.0 (20.1)	19.5 (27.8)	16.513	
WETTR0	87.5 (13.2)	104.1 (12.6)	116.7 (14.9)	161.9 (17.3)	74.4 (21.3)	0.000	***
WETTR1	72.3 (10.7)	94.6 (14.4)	117.0 (13.3)	161.7 (16.2)	89.4 (19.1)	0.000	***
M-Mittel	81.3 (12.1)	92.7 (17.0)	102.0 (21.4)	131.3 (36.2)	49.9 (37.2)	1.676	*

Tabelle J.107: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim Pfirsich (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	83.3 (19.6)						
RUBA	69.9 (16.5)	64.4 (14.7)	65.8 (14.8)	81.8 (15.4)	11.9 (22.1)	28.537	
ECLM	80.7 (17.1)	105.6 (24.4)	93.2 (23.7)	119.3 (26.8)	38.7 (31.2)	1.613	*
HCLM	96.7 (20.3)	87.6 (19.6)	102.7 (22.7)	107.2 (19.5)	10.5 (27.5)	44.835	
WETTR0	87.7 (13.2)	100.7 (12.8)	109.7 (14.5)	151.3 (16.5)	63.6 (20.7)	0.000	***
WETTR1	72.5 (10.7)	92.1 (14.1)	109.9 (12.9)	148.2 (15.8)	75.7 (18.7)	0.000	***
M-Mittel	81.5 (12.1)	90.1 (17.0)	96.2 (20.3)	121.6 (34.2)	40.1 (35.5)	3.264	*

Tabelle J.108: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim Pfirsich (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	199.4 (12.0)						
RUBA	190.3 (7.4)	186.2 (8.1)	188.7 (9.2)	195.1 (9.5)	4.8 (11.8)	41.427	
ECLM	189.8 (14.0)	201.7 (15.3)	197.7 (16.6)	217.3 (16.7)	27.6 (21.3)	1.217	*
HCLM	197.3 (15.6)	197.3 (12.7)	206.9 (17.3)	212.0 (12.0)	14.8 (19.3)	13.149	
WETTR0	199.0 (6.6)	211.1 (7.6)	224.5 (6.1)	255.1 (9.9)	56.0 (11.7)	0.000	***
WETTR1	189.3 (6.1)	202.8 (6.6)	222.2 (6.5)	255.2 (8.4)	65.9 (10.2)	0.000	***
M-Mittel	193.1 (5.8)	199.8 (9.3)	208.0 (17.9)	227.0 (33.8)	33.8 (34.7)	5.363	

Tabelle J.109: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) beim Pfirsich (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	199.6 (11.9)						
RUBA	190.5 (7.4)	183.9 (8.2)	183.1 (9.3)	186.8 (9.5)	-3.7 (11.8)	52.891	
ECLM	190.0 (14.0)	199.9 (15.6)	192.9 (16.9)	210.8 (17.3)	20.9 (21.8)	6.014	
HCLM	197.4 (15.6)	194.8 (12.9)	201.9 (17.6)	204.1 (12.5)	6.7 (19.6)	49.827	
WETTR0	199.3 (6.5)	207.7 (7.5)	217.4 (6.0)	242.4 (9.6)	43.1 (11.4)	0.000	***
WETTR1	189.5 (6.1)	199.7 (6.5)	214.8 (6.3)	242.7 (8.4)	53.2 (10.2)	0.000	***
M-Mittel	193.3 (5.8)	197.2 (8.8)	202.0 (16.8)	217.3 (30.8)	24.0 (31.8)	10.409	

Tabelle J.110: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) beim Pfirsich, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	17.9 (2.0)						
RUBA	20.7 (1.8)	18.3 (2.6)	15.8 (2.1)	13.5 (2.0)	-7.2 (2.7)	0.000	***
ECLM	20.4 (2.9)	16.9 (3.0)	15.0 (2.4)	11.2 (1.6)	-9.2 (3.2)	0.000	***
HCLM	17.7 (2.7)	15.9 (3.0)	15.1 (1.9)	14.0 (1.6)	-3.7 (3.1)	1.852	*
WETTR0	18.2 (1.5)	17.2 (1.6)	16.2 (1.6)	14.9 (1.1)	-3.3 (1.8)	0.056	***
WETTR1	19.6 (1.8)	18.3 (1.7)	17.5 (1.6)	15.4 (1.3)	-4.2 (2.2)	0.030	***
M-Mittel	19.3 (1.4)	17.3 (1.1)	15.9 (1.1)	13.8 (1.9)	-5.5 (2.2)	0.005	***

J.11 Aprikose

Tabelle J.111: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der Aprikose (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	5.3 (0.1)						
RUBA	5.2 (0.1)	5.0 (0.1)	5.2 (0.1)	5.1 (0.1)	-0.1 (0.2)	29.781	
ECLM	5.0 (0.1)	4.9 (0.1)	5.0 (0.1)	5.0 (0.1)	0.0 (0.2)	75.730	
HCLM	5.0 (0.1)	5.1 (0.1)	5.1 (0.1)	5.1 (0.1)	0.1 (0.2)	52.239	
WETTR0	5.4 (0.1)	5.6 (0.1)	5.8 (0.1)	6.2 (0.1)	0.7 (0.1)	0.000	***
WETTR1	5.4 (0.1)	5.5 (0.1)	5.8 (0.1)	6.2 (0.1)	0.8 (0.1)	0.000	***
M-Mittel	5.2 (0.3)	5.2 (0.4)	5.4 (0.5)	5.5 (0.8)	0.3 (0.8)	36.336	

Tabelle J.112: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der Aprikose (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	5.2 (0.1)						
RUBA	5.2 (0.1)	5.4 (0.1)	5.9 (0.1)	6.4 (0.1)	1.2 (0.2)	0.000	***
ECLM	5.0 (0.1)	5.3 (0.1)	5.7 (0.2)	6.2 (0.2)	1.2 (0.2)	0.000	***
HCLM	5.0 (0.1)	5.4 (0.1)	5.9 (0.2)	6.3 (0.1)	1.3 (0.2)	0.000	***
WETTR0	5.4 (0.1)	5.9 (0.1)	6.7 (0.1)	7.6 (0.1)	2.2 (0.1)	0.000	***
WETTR1	5.3 (0.1)	5.8 (0.1)	6.6 (0.1)	7.6 (0.1)	2.3 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	5.2 (0.3)	5.6 (0.4)	6.2 (0.6)	6.8 (0.9)	1.6 (0.9)	0.853	**

Tabelle J.113: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Aprikose (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	4.9 (3.2)						
RUBA	4.3 (3.0)	6.9 (2.2)	5.9 (2.5)	8.2 (2.4)	3.9 (3.8)	4.545	*
ECLM	5.6 (2.5)	12.4 (3.6)	10.2 (3.2)	13.9 (4.4)	8.3 (5.0)	0.166	**
HCLM	7.6 (2.1)	5.9 (2.9)	7.0 (2.8)	8.2 (3.5)	0.6 (4.0)	76.896	
WETTR0	5.3 (2.1)	5.4 (1.7)	2.9 (2.9)	7.6 (3.2)	2.3 (3.8)	22.845	
WETTR1	3.4 (1.3)	3.9 (1.5)	2.4 (2.1)	5.2 (3.4)	1.7 (3.7)	34.859	
M-Mittel	5.3 (1.4)	6.9 (3.7)	5.7 (3.7)	8.6 (3.5)	3.4 (3.7)	7.086	

Tabelle J.114: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Aprikose (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	4.9 (3.5)						
RUBA	4.3 (2.9)	-0.1 (2.2)	-9.5 (3.1)	-16.5 (2.8)	-20.9 (4.0)	0.000	***
ECLM	5.7 (2.5)	5.7 (3.6)	-4.5 (3.7)	-9.7 (5.1)	-15.4 (5.6)	0.000	***
HCLM	7.6 (2.2)	-1.0 (2.9)	-8.0 (2.9)	-16.4 (4.0)	-24.0 (4.5)	0.000	***
WETTR0	5.4 (2.0)	-1.7 (1.8)	-13.1 (3.0)	-18.8 (3.4)	-24.1 (3.9)	0.000	***
WETTR1	3.5 (1.4)	-3.1 (1.7)	-13.8 (2.1)	-21.9 (4.2)	-25.4 (4.3)	0.000	***
M-Mittel	5.3 (1.4)	0.0 (3.9)	-9.8 (4.4)	-16.7 (5.1)	-22.0 (5.1)	0.002	***

Tabelle J.115: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Aprikose (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.1)						
RUBA	0.0 (2.4)	3.7 (1.9)	1.4 (2.3)	1.6 (2.0)	1.6 (3.1)	29.779	
ECLM	0.0 (3.0)	1.2 (2.2)	0.7 (2.9)	0.6 (2.6)	0.6 (3.9)	75.731	
HCLM	0.0 (2.6)	-0.4 (2.0)	-1.8 (2.5)	-1.1 (2.0)	-1.0 (3.2)	52.234	
WETTR0	0.0 (1.0)	-2.6 (1.2)	-6.9 (1.0)	-13.5 (1.7)	-13.5 (1.9)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.3)	-2.1 (1.5)	-8.4 (1.3)	-14.9 (1.8)	-14.9 (2.2)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.2)	0.0 (3.0)	-3.0 (5.6)	-5.5 (10.1)	-5.4 (10.2)	21.163	

Tabelle J.116: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der Aprikose (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.4)						
RUBA	0.0 (2.4)	-3.3 (2.0)	-13.9 (2.8)	-22.8 (2.5)	-22.8 (3.4)	0.000	***
ECLM	0.0 (3.0)	-5.9 (2.3)	-14.7 (3.7)	-24.4 (3.4)	-24.4 (4.4)	0.000	***
HCLM	0.0 (2.7)	-7.5 (2.0)	-17.2 (3.1)	-26.0 (2.7)	-26.0 (3.8)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.0)	-9.5 (1.7)	-22.8 (1.8)	-40.9 (2.6)	-40.9 (2.8)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.4)	-9.0 (1.9)	-24.3 (1.8)	-42.7 (2.5)	-42.7 (2.9)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.2)	-7.0 (2.9)	-18.6 (6.0)	-31.4 (12.0)	-31.4 (12.1)	0.197	**

Tabelle J.117: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Aprikose (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	86.4 (20.2)						
RUBA	76.7 (17.5)	72.1 (15.5)	79.1 (17.9)	98.8 (17.2)	22.1 (24.1)	7.065	
ECLM	86.9 (18.9)	114.6 (28.4)	103.8 (27.0)	132.6 (30.9)	45.7 (35.6)	1.308	*
HCLM	101.6 (21.6)	92.0 (21.2)	109.8 (25.4)	121.4 (23.3)	19.8 (31.1)	20.640	
WETTR0	90.8 (13.9)	111.3 (12.1)	123.2 (15.9)	175.7 (19.3)	84.9 (23.3)	0.000	***
WETTR1	78.5 (11.0)	96.1 (14.6)	124.9 (13.1)	170.4 (18.1)	91.9 (20.9)	0.000	***
M-Mittel	86.9 (11.1)	97.2 (17.8)	108.1 (20.0)	139.8 (38.6)	52.9 (39.0)	1.613	*

Tabelle J.118: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Aprikose (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	86.4 (20.2)						
RUBA	76.9 (17.5)	69.5 (15.3)	73.7 (17.3)	87.5 (16.3)	10.6 (23.4)	36.626	
ECLM	87.2 (18.9)	112.4 (28.1)	99.1 (26.5)	123.8 (30.0)	36.6 (34.8)	3.986	*
HCLM	101.6 (21.6)	90.3 (20.9)	103.9 (24.4)	110.9 (22.1)	9.3 (30.2)	53.878	
WETTR0	90.9 (13.8)	108.0 (11.9)	115.5 (15.4)	159.7 (17.9)	68.8 (22.2)	0.000	***
WETTR1	78.7 (11.0)	92.8 (14.5)	118.3 (12.7)	156.0 (17.6)	77.3 (20.4)	0.000	***
M-Mittel	87.1 (11.1)	94.6 (17.7)	102.1 (18.9)	127.6 (36.1)	40.5 (36.8)	3.587	*

Tabelle J.119: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Aprikose (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	210.6 (13.2)						
RUBA	205.8 (9.9)	199.3 (10.9)	208.2 (12.0)	218.5 (11.8)	12.7 (15.1)	9.634	
ECLM	204.2 (16.1)	217.9 (20.3)	213.9 (19.8)	236.2 (21.5)	32.1 (26.4)	1.803	*
HCLM	211.8 (18.2)	209.7 (14.0)	222.1 (20.5)	233.9 (15.7)	22.2 (23.5)	6.425	
WETTR0	209.7 (6.2)	225.5 (8.1)	242.4 (7.5)	282.4 (11.8)	72.6 (13.1)	0.000	***
WETTR1	200.3 (6.7)	215.8 (7.8)	241.1 (6.6)	278.8 (11.1)	78.5 (12.7)	0.000	***
M-Mittel	206.3 (6.9)	213.6 (9.5)	225.5 (17.5)	250.0 (36.2)	43.6 (37.3)	3.156	*

Tabelle J.120: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der Aprikose (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	210.8 (13.2)						
RUBA	206.0 (9.9)	196.2 (11.0)	200.7 (11.8)	206.2 (11.5)	0.2 (14.8)	97.603	
ECLM	204.4 (16.1)	215.2 (20.4)	207.7 (19.9)	226.1 (21.7)	21.8 (26.5)	10.510	
HCLM	212.0 (18.2)	206.6 (14.1)	214.9 (20.5)	222.1 (15.8)	10.1 (23.6)	39.321	
WETTR0	210.0 (6.1)	221.1 (7.8)	232.7 (7.4)	264.8 (11.2)	54.8 (12.6)	0.000	***
WETTR1	200.6 (6.7)	211.6 (7.7)	231.4 (6.3)	261.7 (10.7)	61.1 (12.4)	0.000	***
M-Mittel	206.6 (6.9)	210.2 (9.0)	217.5 (15.5)	236.2 (32.5)	29.6 (33.8)	7.180	

Tabelle J.121: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) bei der Aprikose, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	13.4 (2.1)						
RUBA	13.9 (2.1)	11.6 (1.9)	10.1 (1.7)	8.1 (1.7)	-5.8 (2.6)	0.005	***
ECLM	13.5 (2.2)	10.3 (1.8)	8.5 (1.4)	7.3 (1.5)	-6.2 (2.7)	0.003	***
HCLM	10.8 (2.2)	12.6 (2.9)	9.7 (2.1)	8.8 (1.3)	-2.0 (2.5)	11.093	
WETTR0	11.5 (1.5)	10.0 (1.3)	10.3 (1.3)	8.3 (1.3)	-3.2 (1.9)	0.134	**
WETTR1	11.5 (1.1)	10.5 (1.4)	9.6 (1.0)	9.0 (1.1)	-2.5 (1.5)	0.130	**
M-Mittel	12.2 (1.4)	11.0 (1.2)	9.6 (0.9)	8.3 (0.6)	-3.9 (1.5)	0.003	***

J.12 Frühreifende Pflaume

Tabelle J.122: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der frühreifen Pflaume (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	10.4 (0.2)						
RUBA	10.2 (0.2)	9.9 (0.2)	10.0 (0.2)	9.8 (0.2)	-0.4 (0.3)	0.710	**
ECLM	9.7 (0.3)	9.6 (0.2)	9.6 (0.3)	9.5 (0.2)	-0.2 (0.3)	20.861	
HCLM	9.8 (0.2)	9.9 (0.2)	9.9 (0.2)	9.7 (0.2)	-0.1 (0.3)	36.670	
WETTR0	10.7 (0.1)	10.9 (0.1)	11.3 (0.1)	11.8 (0.2)	1.2 (0.2)	0.000	***
WETTR1	10.5 (0.1)	10.6 (0.2)	11.1 (0.1)	11.8 (0.2)	1.4 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	10.2 (0.5)	10.2 (0.7)	10.4 (1.0)	10.5 (1.5)	0.4 (1.6)	55.327	

Tabelle J.123: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der frühreifen Pflaume (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	10.3 (0.2)						
RUBA	10.2 (0.2)	10.6 (0.2)	11.5 (0.3)	12.3 (0.2)	2.1 (0.3)	0.000	***
ECLM	9.7 (0.3)	10.2 (0.2)	11.1 (0.3)	11.9 (0.3)	2.2 (0.4)	0.000	***
HCLM	9.8 (0.2)	10.5 (0.2)	11.4 (0.3)	12.1 (0.2)	2.3 (0.3)	0.000	***
WETTR0	10.6 (0.1)	11.5 (0.2)	12.9 (0.2)	14.7 (0.3)	4.0 (0.3)	0.000	***
WETTR1	10.4 (0.2)	11.3 (0.2)	12.8 (0.2)	14.7 (0.3)	4.2 (0.3)	0.000	***
M-Mittel	10.1 (0.5)	10.8 (0.7)	11.9 (1.1)	13.1 (1.8)	3.0 (1.8)	1.054	*

Tabelle J.124: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Pflaume (**ohne Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.9 (2.6)						
RUBA	2.1 (2.4)	4.8 (1.9)	4.2 (2.1)	7.2 (1.9)	5.1 (3.0)	0.104	**
ECLM	3.1 (2.3)	8.6 (3.1)	8.0 (2.5)	12.1 (3.9)	9.0 (4.4)	0.015	***
HCLM	4.5 (1.6)	3.7 (2.3)	5.3 (2.5)	7.1 (3.2)	2.5 (3.5)	15.709	
WETTR0	2.9 (1.4)	2.7 (1.2)	0.5 (2.2)	4.5 (2.9)	1.6 (3.1)	31.212	
WETTR1	1.4 (1.2)	2.1 (1.3)	-0.3 (1.6)	1.7 (3.2)	0.3 (3.4)	85.459	
M-Mittel	2.8 (1.1)	4.4 (3.0)	3.6 (4.0)	6.5 (4.5)	3.7 (4.7)	9.816	

Tabelle J.125: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Pflaume (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	2.9 (2.9)						
RUBA	2.1 (2.3)	-2.3 (1.8)	-11.3 (2.6)	-17.7 (2.2)	-19.8 (3.1)	0.000	***
ECLM	3.1 (2.2)	1.6 (3.0)	-7.3 (3.1)	-12.6 (4.5)	-15.7 (5.0)	0.000	***
HCLM	4.6 (1.7)	-3.5 (2.3)	-10.4 (2.7)	-18.2 (3.6)	-22.8 (3.9)	0.000	***
WETTR0	2.9 (1.3)	-4.5 (1.4)	-15.8 (2.2)	-23.5 (3.0)	-26.3 (3.2)	0.000	***
WETTR1	1.4 (1.2)	-5.0 (1.5)	-16.8 (1.7)	-26.9 (3.8)	-28.3 (4.0)	0.000	***
M-Mittel	2.8 (1.1)	-2.7 (3.1)	-12.3 (5.0)	-19.8 (6.9)	-22.6 (7.1)	0.089	***

Tabelle J.126: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Pflaume (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.0)						
RUBA	0.0 (2.1)	3.1 (1.8)	2.1 (2.1)	3.7 (1.7)	3.7 (2.6)	0.710	**
ECLM	0.0 (2.7)	1.2 (2.0)	1.2 (2.6)	2.1 (2.1)	2.1 (3.3)	20.863	
HCLM	0.0 (2.1)	-0.6 (2.0)	-0.8 (2.2)	1.3 (1.9)	1.3 (2.8)	36.673	
WETTR0	0.0 (1.2)	-1.8 (1.3)	-5.7 (1.1)	-10.9 (1.8)	-10.9 (2.1)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.4)	-1.4 (1.4)	-6.3 (1.2)	-12.9 (1.8)	-12.9 (2.2)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	-3.4 (9.8)	-3.4 (9.9)	40.103	

Tabelle J.127: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der frühreifen Pflaume (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.2)						
RUBA	0.0 (2.0)	-3.9 (1.7)	-13.2 (2.6)	-20.7 (2.2)	-20.7 (2.9)	0.000	***
ECLM	0.0 (2.7)	-6.0 (1.9)	-14.3 (3.3)	-23.2 (2.8)	-23.2 (3.8)	0.000	***
HCLM	0.0 (2.1)	-7.8 (2.0)	-16.5 (2.9)	-23.9 (2.6)	-23.9 (3.3)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.3)	-8.7 (1.8)	-21.5 (1.8)	-38.1 (2.7)	-38.1 (3.0)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.4)	-8.4 (1.8)	-22.2 (1.9)	-40.7 (2.6)	-40.7 (2.9)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.0)	-7.0 (2.2)	-17.5 (5.2)	-29.3 (11.6)	-29.3 (11.7)	0.224	**

Tabelle J.128: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Pflaume (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	72.4 (17.7)						
RUBA	58.7 (15.4)	57.1 (13.9)	62.4 (14.8)	81.6 (15.2)	22.9 (21.2)	3.488	*
ECLM	69.7 (15.7)	97.8 (24.1)	88.7 (23.4)	115.7 (26.8)	46.0 (30.6)	0.402	**
HCLM	86.1 (18.7)	80.3 (18.8)	96.9 (22.1)	103.9 (19.1)	17.7 (26.2)	18.021	
WETTR0	74.9 (12.9)	90.6 (12.5)	104.1 (15.0)	151.8 (17.1)	76.9 (21.0)	0.000	***
WETTR1	59.8 (10.0)	83.3 (13.6)	103.7 (12.8)	148.7 (16.9)	88.9 (19.3)	0.000	***
M-Mittel	69.8 (12.5)	81.8 (16.3)	91.2 (18.7)	120.3 (35.2)	50.5 (36.4)	1.467	*

Tabelle J.129: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Pflaume (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	72.8 (17.6)						
RUBA	58.7 (15.4)	54.8 (13.6)	56.4 (14.1)	69.5 (14.0)	10.8 (20.4)	29.266	
ECLM	70.0 (15.6)	94.7 (23.9)	83.6 (22.8)	104.3 (25.6)	34.4 (29.5)	2.343	*
HCLM	86.4 (18.8)	77.9 (18.5)	90.0 (21.2)	92.0 (18.8)	5.5 (26.0)	67.283	
WETTR0	74.8 (12.8)	86.7 (12.0)	95.3 (14.0)	134.9 (15.5)	60.1 (19.7)	0.000	***
WETTR1	60.2 (10.2)	79.9 (13.2)	95.9 (12.1)	132.4 (16.1)	72.2 (18.7)	0.000	***
M-Mittel	70.0 (12.6)	78.8 (15.4)	84.2 (17.7)	106.6 (32.5)	36.6 (32.9)	3.385	*

Tabelle J.130: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Pflaume (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	183.9 (11.8)						
RUBA	174.2 (7.8)	172.0 (8.2)	176.9 (10.0)	185.4 (9.4)	11.2 (11.9)	6.511	
ECLM	174.0 (13.6)	187.3 (15.3)	185.3 (16.9)	205.3 (17.1)	31.3 (21.4)	0.497	**
HCLM	181.1 (15.2)	183.4 (12.4)	194.0 (17.2)	200.7 (12.6)	19.7 (19.4)	4.669	*
WETTR0	182.4 (6.4)	195.3 (7.2)	211.9 (6.5)	244.7 (10.3)	62.4 (11.9)	0.000	***
WETTR1	172.8 (5.9)	186.9 (6.8)	207.9 (6.4)	244.3 (9.4)	71.6 (10.9)	0.000	***
M-Mittel	176.9 (5.7)	185.0 (8.5)	195.2 (16.6)	216.1 (33.8)	39.2 (34.7)	3.495	*

Tabelle J.131: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der frühreifen Pflaume (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	184.1 (11.8)						
RUBA	174.4 (7.8)	168.6 (8.2)	168.8 (9.8)	172.7 (9.1)	-1.8 (11.7)	76.545	
ECLM	174.2 (13.6)	184.3 (15.5)	178.3 (16.8)	194.4 (17.2)	20.2 (21.5)	6.473	
HCLM	181.3 (15.2)	179.9 (12.5)	186.3 (17.0)	188.2 (12.6)	6.9 (19.4)	47.966	
WETTR0	182.7 (6.3)	190.6 (6.9)	201.5 (6.3)	226.0 (9.5)	43.3 (11.2)	0.000	***
WETTR1	173.1 (5.9)	182.5 (6.7)	197.6 (6.1)	226.0 (8.9)	52.9 (10.5)	0.000	***
M-Mittel	177.1 (5.8)	181.2 (7.9)	186.5 (15.2)	201.4 (29.8)	24.3 (30.8)	9.368	

Tabelle J.132: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) bei der frühreifen Pflaume, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	17.9 (1.9)						
RUBA	21.0 (1.9)	18.6 (2.7)	15.3 (2.1)	12.6 (2.0)	-8.4 (2.7)	0.000	***
ECLM	20.6 (3.0)	17.2 (3.0)	14.6 (2.4)	10.8 (1.6)	-9.8 (3.3)	0.000	***
HCLM	17.4 (2.7)	15.8 (2.9)	14.2 (2.0)	13.0 (1.6)	-4.3 (3.1)	0.659	**
WETTR0	18.2 (1.5)	16.8 (1.8)	15.5 (1.6)	13.1 (1.0)	-5.1 (1.7)	0.000	***
WETTR1	19.7 (1.8)	17.9 (1.7)	16.5 (1.6)	14.0 (1.3)	-5.7 (2.2)	0.000	***
M-Mittel	19.4 (1.6)	17.3 (1.1)	15.2 (1.0)	12.7 (1.4)	-6.7 (2.0)	0.000	***

J.13 Spätreifende Pflaume

Tabelle J.133: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der spätreifen Pflaume (**mit Bewässerung** und **ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	11.5 (0.2)						
RUBA	11.2 (0.3)	11.0 (0.2)	11.3 (0.2)	11.3 (0.2)	0.1 (0.3)	74.202	
ECLM	10.7 (0.3)	10.7 (0.2)	10.9 (0.3)	11.1 (0.2)	0.3 (0.4)	9.842	
HCLM	10.9 (0.3)	11.2 (0.3)	11.4 (0.3)	11.3 (0.2)	0.4 (0.3)	0.816	**
WETTR0	11.7 (0.1)	12.1 (0.2)	12.8 (0.1)	13.7 (0.2)	2.0 (0.2)	0.000	***
WETTR1	11.6 (0.1)	11.9 (0.2)	12.6 (0.2)	13.7 (0.2)	2.1 (0.2)	0.000	***
M-Mittel	11.2 (0.6)	11.4 (0.7)	11.8 (1.1)	12.2 (1.7)	1.0 (1.8)	20.503	

Tabelle J.134: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei der spätreifen Pflaume (**mit Bewässerung** und **mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	11.4 (0.3)						
RUBA	11.2 (0.3)	11.7 (0.2)	12.9 (0.3)	14.0 (0.3)	2.9 (0.4)	0.000	***
ECLM	10.7 (0.3)	11.5 (0.2)	12.6 (0.4)	13.8 (0.3)	3.1 (0.4)	0.000	***
HCLM	10.8 (0.3)	11.9 (0.3)	13.1 (0.3)	14.1 (0.3)	3.3 (0.4)	0.000	***
WETTR0	11.7 (0.1)	12.8 (0.2)	14.7 (0.2)	16.9 (0.3)	5.3 (0.3)	0.000	***
WETTR1	11.6 (0.1)	12.7 (0.2)	14.5 (0.3)	17.0 (0.3)	5.4 (0.3)	0.000	***
M-Mittel	11.2 (0.6)	12.1 (0.8)	13.6 (1.2)	15.2 (2.0)	4.0 (2.1)	0.636	**

Tabelle J.135: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Pflaume (**ohne Bewässerung** und **ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	5.8 (2.9)						
RUBA	4.1 (3.1)	5.3 (2.6)	4.5 (2.1)	9.1 (3.0)	5.0 (4.2)	1.982	*
ECLM	5.6 (2.3)	9.4 (3.6)	10.0 (3.2)	16.1 (5.0)	10.4 (5.4)	0.036	***
HCLM	8.6 (2.5)	5.8 (3.0)	11.8 (3.7)	12.8 (3.9)	4.2 (4.5)	7.065	
WETTR0	4.2 (1.6)	4.7 (1.5)	5.5 (3.4)	12.1 (3.3)	7.9 (3.6)	0.007	***
WETTR1	2.9 (1.2)	5.5 (2.2)	4.5 (3.0)	11.6 (3.5)	8.6 (3.7)	0.003	***
M-Mittel	5.1 (2.4)	6.2 (1.9)	7.3 (3.8)	12.3 (2.5)	7.2 (3.2)	0.015	***

Tabelle J.136: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Pflaume (**ohne Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	5.8 (3.1)						
RUBA	4.1 (3.0)	-1.8 (2.5)	-11.3 (2.6)	-16.5 (3.5)	-20.6 (4.5)	0.000	***
ECLM	5.7 (2.1)	2.5 (3.7)	-5.1 (3.7)	-7.9 (5.9)	-13.6 (6.2)	0.008	***
HCLM	8.7 (2.6)	-1.4 (3.1)	-3.4 (3.8)	-12.4 (4.7)	-21.0 (5.3)	0.000	***
WETTR0	4.2 (1.5)	-2.5 (1.6)	-11.0 (3.4)	-14.7 (3.8)	-18.9 (4.1)	0.000	***
WETTR1	3.0 (1.3)	-1.7 (2.1)	-11.8 (2.8)	-15.6 (4.4)	-18.5 (4.5)	0.000	***
M-Mittel	5.1 (2.4)	-1.0 (2.0)	-8.5 (4.6)	-13.4 (3.6)	-18.5 (4.0)	0.000	***

Tabelle J.137: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Pflaume (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.1)						
RUBA	0.0 (2.5)	2.3 (1.9)	-0.3 (2.1)	-0.5 (2.0)	-0.5 (3.1)	74.186	
ECLM	0.0 (2.9)	0.0 (2.0)	-1.8 (2.6)	-3.0 (2.1)	-3.0 (3.5)	9.843	
HCLM	0.0 (2.3)	-2.7 (2.5)	-5.2 (2.4)	-4.1 (1.9)	-4.0 (2.9)	0.817	**
WETTR0	0.0 (1.0)	-2.9 (1.3)	-9.6 (1.1)	-16.7 (1.4)	-16.7 (1.7)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.1)	-2.4 (1.4)	-8.8 (1.4)	-17.9 (1.6)	-17.9 (1.9)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.1)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-8.4 (10.2)	-8.4 (10.3)	8.654	

Tabelle J.138: Statistik für den **Ertragsschaden** s_Y (in %) bei der spätreifen Pflaume (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	0.0 (2.4)						
RUBA	0.0 (2.4)	-4.8 (2.0)	-15.8 (2.7)	-25.6 (2.6)	-25.6 (3.5)	0.000	***
ECLM	0.0 (2.9)	-7.2 (2.0)	-17.5 (3.4)	-29.0 (2.9)	-29.0 (4.0)	0.000	***
HCLM	0.0 (2.4)	-10.0 (2.6)	-21.3 (3.1)	-30.3 (2.7)	-30.3 (3.5)	0.000	***
WETTR0	0.0 (1.1)	-9.9 (1.9)	-25.9 (1.9)	-45.0 (2.2)	-45.0 (2.4)	0.000	***
WETTR1	0.0 (1.1)	-9.4 (1.9)	-25.0 (2.2)	-46.6 (2.3)	-46.6 (2.5)	0.000	***
M-Mittel	0.0 (1.1)	-8.2 (2.6)	-21.1 (5.7)	-35.3 (12.2)	-35.3 (12.3)	0.133	**

Tabelle J.139: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Pflaume (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	103.5 (24.6)						
RUBA	86.4 (18.7)	79.6 (17.4)	95.5 (19.9)	137.8 (21.1)	51.4 (27.6)	0.045	***
ECLM	101.6 (20.0)	127.0 (26.9)	135.4 (31.7)	193.7 (35.7)	92.1 (40.3)	0.003	***
HCLM	117.3 (25.8)	130.2 (19.9)	183.6 (30.5)	200.1 (29.8)	82.8 (38.6)	0.007	***
WETTR0	92.4 (13.5)	119.6 (15.4)	163.2 (21.2)	237.9 (17.2)	145.6 (21.4)	0.000	***
WETTR1	86.0 (12.0)	118.4 (17.2)	153.6 (21.1)	240.0 (19.6)	154.0 (22.6)	0.000	***
M-Mittel	96.8 (14.9)	115.0 (22.9)	146.3 (39.3)	201.9 (48.6)	105.2 (49.4)	0.199	**

Tabelle J.140: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Pflaume (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	103.9 (24.7)						
RUBA	86.6 (18.7)	76.7 (17.4)	86.8 (18.7)	121.2 (19.7)	34.6 (26.6)	1.168	*
ECLM	101.9 (20.0)	123.6 (26.7)	128.6 (31.0)	177.2 (34.3)	75.3 (39.1)	0.033	***
HCLM	117.8 (25.8)	126.4 (20.0)	172.7 (29.0)	180.9 (28.2)	63.1 (37.5)	0.136	**
WETTR0	92.7 (13.4)	115.2 (14.9)	151.6 (20.1)	213.0 (16.0)	120.4 (20.4)	0.000	***
WETTR1	86.2 (12.0)	113.0 (16.8)	142.4 (19.8)	214.4 (18.7)	128.2 (21.8)	0.000	***
M-Mittel	97.0 (15.0)	111.0 (21.7)	136.4 (37.9)	181.4 (44.1)	84.3 (45.5)	0.396	**

Tabelle J.141: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Pflaume (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	237.4 (15.8)						
RUBA	225.3 (11.4)	222.5 (11.2)	238.3 (14.1)	263.8 (14.1)	38.5 (17.7)	0.006	***
ECLM	226.1 (18.1)	241.6 (18.1)	255.1 (23.9)	302.3 (23.7)	76.2 (29.3)	0.000	***
HCLM	233.3 (20.3)	250.3 (16.1)	288.2 (23.9)	307.9 (20.9)	74.6 (28.5)	0.000	***
WETTR0	228.8 (7.0)	251.8 (9.2)	295.2 (10.5)	354.0 (10.8)	125.3 (12.7)	0.000	***
WETTR1	223.2 (7.2)	247.4 (9.0)	286.1 (12.1)	354.7 (11.8)	131.5 (13.6)	0.000	***
M-Mittel	227.3 (7.8)	242.7 (12.6)	272.6 (29.1)	316.5 (48.2)	89.2 (49.3)	0.736	**

Tabelle J.142: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei der spätreifen Pflaume (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	237.7 (15.8)						
RUBA	225.6 (11.4)	218.4 (11.2)	228.1 (13.8)	247.2 (13.5)	21.6 (17.3)	1.553	*
ECLM	226.5 (18.2)	238.0 (18.3)	246.2 (23.7)	287.9 (23.6)	61.4 (29.2)	0.009	***
HCLM	233.5 (20.4)	245.9 (16.1)	278.1 (23.7)	291.6 (20.8)	58.1 (28.5)	0.014	***
WETTR0	229.1 (6.9)	246.0 (8.8)	281.7 (9.9)	328.5 (10.1)	99.3 (12.0)	0.000	***
WETTR1	223.6 (7.2)	241.9 (8.6)	272.6 (11.4)	329.2 (11.0)	105.6 (12.9)	0.000	***
M-Mittel	227.7 (7.8)	238.0 (12.2)	261.3 (27.5)	296.9 (42.6)	69.2 (43.8)	1.185	*

Tabelle J.143: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) bei der spätreifen Pflaume, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe von Klimadaten des DWD und aus den 5 RCM's, sowie Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe (jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
DWD	18.4 (1.9)						
RUBA	21.6 (1.7)	18.6 (2.5)	15.9 (2.1)	13.3 (2.0)	-8.3 (2.6)	0.000	***
ECLM	21.1 (2.9)	17.8 (3.0)	15.1 (2.4)	11.2 (1.6)	-9.9 (3.2)	0.000	***
HCLM	18.0 (2.7)	16.3 (2.8)	14.5 (1.8)	13.7 (1.6)	-4.3 (3.1)	0.746	**
WETTR0	18.9 (1.4)	17.5 (1.7)	16.1 (1.6)	13.7 (1.0)	-5.2 (1.7)	0.000	***
WETTR1	20.3 (1.7)	18.4 (1.6)	17.3 (1.6)	14.3 (1.3)	-6.1 (2.1)	0.000	***
M-Mittel	20.0 (1.5)	17.7 (1.1)	15.8 (1.1)	13.2 (1.4)	-6.8 (2.0)	0.000	***

J.14 Vergleich aller Fruchtarten

Hier sollen nun die Ergebnisse der vorangehenden Abschnitte des Anhangs **J** noch einmal in komprimierter Form dargestellt werden. D. h., dass für jede Größe die Werte aller betrachteten 13 Obstarten/-sorten in Tabellenform und als Graphik präsentiert werden. Hierbei werden nun jeweils nur noch die “Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe” (und wie bereits vorher über die entsprechenden Obstanbaugitterpunkte) betrachtet.

Eine kürzere Zusammenfassung der hier dargestellten Ergebnisse findet man im SIMWASER-Ergebniskapitel [5.6](#) auf Seite [243](#).

J.14.1 Feuchtmassenertrag

Die Veränderungen im Feuchtmassenertrag [(2071-2100)-(1971-2000)], berechnet ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung, aber mit Sommerberechnung, sind bei allen Obstarten nicht signifikant (**Tabelle J.144**). Hingegen beobachtet man bei allen Fruchtarten einen signifikanten Anstieg des Ertrags (**Tabelle J.145**), wenn man die CO₂-Düngung berücksichtigt. Der Anstieg kann dabei bis zu über 30 % betragen (beim Wein sogar über 50 %)!

Auch hier müsste man genau genommen zur Ermittlung der Signifikanzen einen Test anwenden, welcher die **Multiplizität** (Mehrfachtestung) berücksichtigt. Man vergleiche hierzu z. B. den auf Seite [293](#) beschriebenen *Test von Holm's*. Wegen der überlappenden Zeitintervalle der Reifeperioden der verschiedenen Fruchtarten und da die in den Tabellen berücksichtigten Anbaugebiete z. T. identisch sind oder sich wenigstens überlappen, liegen hier allerdings nicht 13 vollkommen unabhängige Tests pro Tabelle vor. Nimmt man aus diesem Grund nicht $n = 13$, sondern nur $n = 5$ an, so sind die Ergebnisse nur dann auf dem 95 %-Niveau signifikant, wenn die p-Werte kleiner als 1 % sind. Die in der **Tabelle J.145** als signifikant eingestuften Arten Kirsche, Pfirsich und frühreife Pflaume zeigen bei dieser exakteren Vorgehensweise keine signifikanten Veränderungen zwischen 1971-2000 und 2071-2100 mehr. — Das eben Gesagte trifft auch auf die übrigen folgenden Abbildungen und Tabellen in diesem Kapitel zu.

Tabelle J.144: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit Bewässerung** und **ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000		2002-2031		2031-2060		2071-2100		Differenz		p-Wert	Signi.
	(A)		(B)		(C)		(D)		(D-A)		[%]	
Apfel früh	30.7	(0.6)	30.6	(1.3)	31.3	(2.5)	32.0	(4.0)	1.2	(4.1)	45.093	
Apfel spät	32.9	(0.9)	33.5	(1.3)	35.3	(3.0)	37.4	(4.5)	4.5	(4.6)	5.268	
Sauerkirsche	7.9	(0.2)	7.9	(0.4)	7.8	(0.6)	7.7	(0.7)	-0.2	(0.7)	45.379	
Süßkirsche früh	5.8	(0.1)	5.7	(0.2)	5.6	(0.4)	5.4	(0.5)	-0.4	(0.5)	13.091	
Süßkirsche spät	6.1	(0.2)	6.0	(0.3)	5.9	(0.4)	5.7	(0.6)	-0.3	(0.6)	21.767	
Birne früh	15.9	(0.5)	16.0	(0.8)	16.6	(1.4)	17.0	(2.3)	1.1	(2.3)	24.482	
Birne spät	16.5	(0.6)	16.7	(0.9)	17.5	(1.5)	18.2	(2.3)	1.7	(2.4)	12.666	
Erdbeere	9.5	(0.2)	9.5	(0.4)	9.4	(0.7)	8.9	(1.0)	-0.6	(1.1)	20.711	
Wein	11.0	(0.6)	11.0	(0.7)	11.2	(1.0)	11.3	(1.6)	0.3	(1.7)	65.448	
Pfirsich	6.7	(0.4)	6.7	(0.5)	6.7	(0.6)	6.8	(0.9)	0.1	(0.9)	81.422	
Aprikose	5.2	(0.3)	5.2	(0.4)	5.4	(0.5)	5.5	(0.8)	0.3	(0.8)	36.336	
Pflaume früh	10.2	(0.5)	10.2	(0.7)	10.4	(1.0)	10.5	(1.5)	0.4	(1.6)	55.327	
Pflaume spät	11.2	(0.6)	11.4	(0.7)	11.8	(1.1)	12.2	(1.7)	1.0	(1.8)	20.503	

Tabelle J.145: Statistik für den **Feuchtmassenertrag** (in t/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit Bewässerung** und **mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000		2002-2031		2031-2060		2071-2100		Differenz		p-Wert	Signi.
	(A)		(B)		(C)		(D)		(D-A)		[%]	
Apfel früh	30.6	(0.6)	32.4	(1.3)	35.6	(2.8)	39.2	(4.9)	8.6	(4.9)	0.844	**
Apfel spät	32.8	(0.9)	35.3	(1.4)	39.7	(3.3)	45.3	(5.4)	12.5	(5.5)	0.324	**
Sauerkirsche	7.9	(0.2)	8.4	(0.4)	9.0	(0.7)	9.6	(0.9)	1.7	(0.9)	0.693	**
Süßkirsche früh	5.7	(0.1)	6.1	(0.3)	6.5	(0.4)	6.8	(0.6)	1.0	(0.6)	1.034	*
Süßkirsche spät	6.0	(0.2)	6.4	(0.3)	6.8	(0.5)	7.1	(0.7)	1.1	(0.7)	1.201	*
Birne früh	15.8	(0.5)	16.9	(0.9)	18.8	(1.6)	20.8	(2.7)	5.0	(2.8)	0.771	**
Birne spät	16.5	(0.6)	17.7	(0.9)	19.8	(1.7)	22.2	(2.8)	5.7	(2.9)	0.514	**
Erdbeere	9.4	(0.2)	10.2	(0.4)	11.1	(0.8)	11.7	(1.2)	2.2	(1.2)	0.729	**
Wein	10.9	(0.6)	12.4	(0.8)	14.6	(1.3)	16.9	(2.2)	6.0	(2.2)	0.183	**
Pfirsich	6.7	(0.4)	7.1	(0.5)	7.8	(0.7)	8.6	(1.1)	1.9	(1.2)	1.109	*
Aprikose	5.2	(0.3)	5.6	(0.4)	6.2	(0.6)	6.8	(0.9)	1.6	(0.9)	0.853	**
Pflaume früh	10.1	(0.5)	10.8	(0.7)	11.9	(1.1)	13.1	(1.8)	3.0	(1.8)	1.054	*
Pflaume spät	11.2	(0.6)	12.1	(0.8)	13.6	(1.2)	15.2	(2.0)	4.0	(2.1)	0.636	**

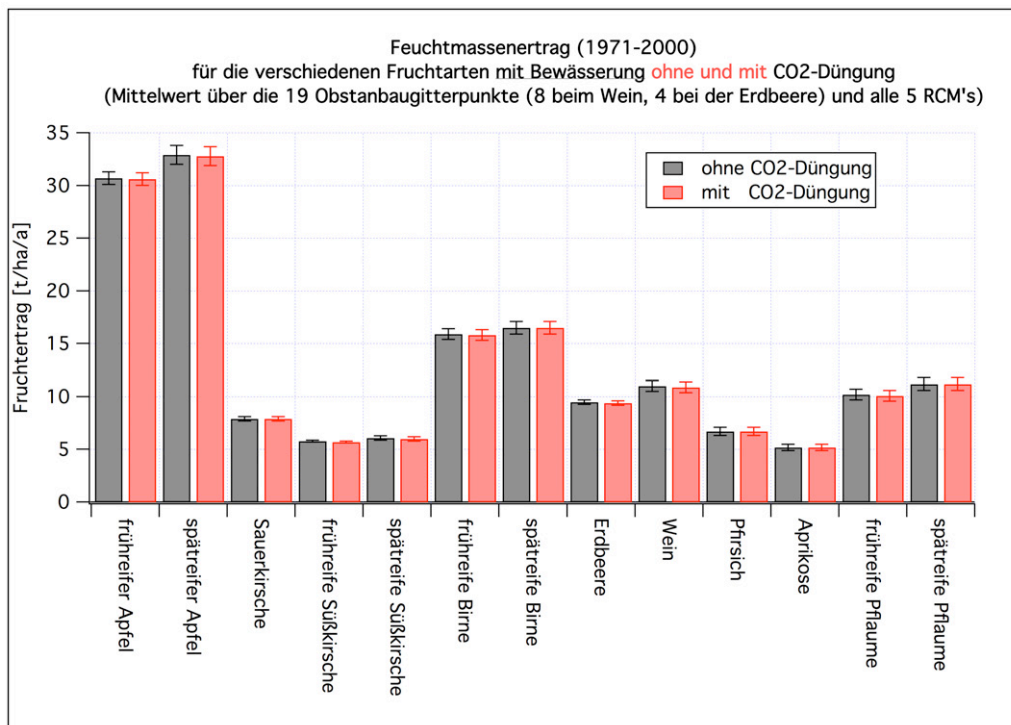


Abbildung J.1: Feuchtmassenertrag (1971-2000) mit Bewässerung für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

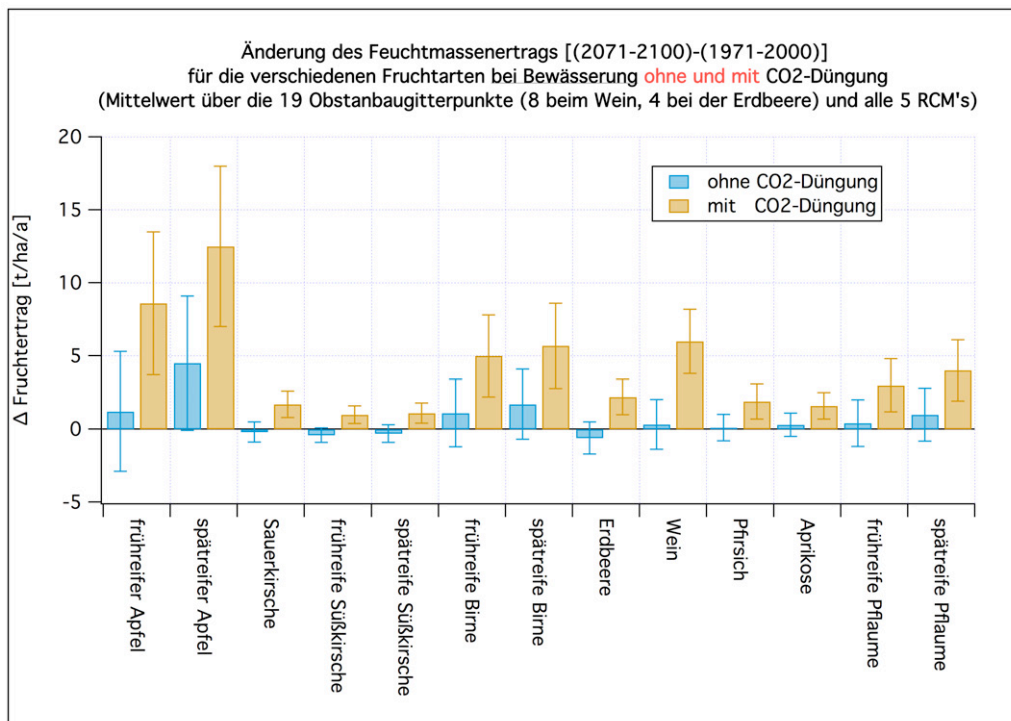


Abbildung J.2: Veränderung des Feuchtmassenertrags [(2071-2100)-(1971-2000)] mit Bewässerung für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

J.14.2 Ertragsschaden ohne Sommerberegnung

Bei den Ertragsschäden **ohne Bewässerung** und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung ergibt sich nur für den späten Apfel, die Birne, den Wein¹, den Pfirsich und die späte Pflaume eine signifikante Zunahme der Schäden (**Tabelle J.146**), wobei die Schäden in allen betrachteten 30-jährigen Zeiträumen positiv sind. Bei diesen Arten handelt es sich gerade um die besonders spät reifenden Arten (vgl. Tabelle E.1), die erst im August oder danach reif werden. Da der Niederschlag aber in Zukunft in den Sommermonaten stark abnehmen wird (Tabelle B.19), liegt die Ursache für den Ertragsrückgang bei den spätreifenden Arten vermutlich in der zunehmenden Trockenheit im Sommer.

Berücksichtigt man die CO₂-Düngung, so zeigen alle Fruchtarten eine signifikante Abnahme der Schäden (**Tabelle J.147**), wobei die (absoluten) Schäden in der fernen Zukunft alle negativ sind (Ertragszunahme). Das liegt daran, dass bereits vor den Trockenperioden im Sommer wesentlich mehr Trockenmassenzuwachs aufgetreten ist als ohne CO₂-Effekt und dass das verringerte Wachstum während der Trockenperioden dadurch überkompensiert wird. Ein Totalausfall der Ernte durch extreme Trockenperioden kann allerdings im Model SIMWASER nicht berücksichtigt werden (siehe das am Ende des Kapitels 4.10.12 auf Seite 161 Gesagte).

Tabelle J.146: Statistik für den relativen **Ertragsschaden** (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**ohne Bewässerung** und **ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	5.6 (1.4)	6.8 (4.3)	6.4 (5.0)	9.2 (4.1)	3.7 (4.2)	7.926	
Apfel spät	10.8 (2.0)	11.7 (2.2)	13.1 (2.7)	18.8 (2.4)	8.0 (2.9)	0.000	***
Sauerkirsche	2.0 (1.3)	3.0 (4.1)	3.6 (5.7)	6.6 (7.5)	4.6 (7.6)	16.902	
Süßkirsche früh	0.9 (1.1)	1.5 (3.5)	3.3 (5.2)	7.5 (7.9)	6.6 (8.0)	8.315	
Süßkirsche spät	1.6 (1.4)	3.1 (4.2)	4.2 (5.3)	7.6 (7.9)	6.0 (8.1)	11.127	
Birne früh	6.3 (2.1)	7.1 (3.3)	7.3 (3.4)	11.0 (2.6)	4.7 (3.2)	0.600	**
Birne spät	7.5 (2.3)	8.4 (2.4)	9.6 (2.8)	15.4 (2.6)	7.9 (3.2)	0.004	***
Erdbeere	0.5 (1.5)	0.6 (2.5)	1.7 (5.5)	6.6 (9.0)	6.1 (9.2)	13.848	
Wein	2.2 (1.4)	3.3 (2.8)	3.8 (4.0)	7.1 (4.7)	4.9 (4.7)	4.308	*
Pfirsich	4.2 (1.4)	6.5 (2.7)	6.5 (2.7)	10.6 (2.9)	6.4 (3.1)	0.067	***
Aprikose	5.3 (1.4)	6.9 (3.7)	5.7 (3.7)	8.6 (3.5)	3.4 (3.7)	7.086	
Pflaume früh	2.8 (1.1)	4.4 (3.0)	3.6 (4.0)	6.5 (4.5)	3.7 (4.7)	9.816	
Pflaume spät	5.1 (2.4)	6.2 (1.9)	7.3 (3.8)	12.3 (2.5)	7.2 (3.2)	0.015	***

¹ Bei dem auf Seite 429 beschriebenen, korrekteren Vorgehen sind die Veränderungen für Wein aber nicht signifikant!

Tabelle J.147: Statistik für den relativen **Ertragsschaden** (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**ohne Bewässerung** und **mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	5.6 (1.4)	0.3 (4.6)	-8.5 (6.3)	-15.8 (7.4)	-21.4 (7.6)	0.143	**
Apfel spät	10.8 (2.0)	5.6 (2.4)	-0.5 (3.3)	-3.4 (2.8)	-14.3 (3.3)	0.000	***
Sauerkirsche	2.0 (1.3)	-4.0 (3.8)	-11.5 (6.1)	-18.6 (9.1)	-20.6 (9.2)	0.348	**
Süßkirsche früh	0.9 (1.1)	-5.6 (3.2)	-12.1 (5.5)	-17.3 (9.5)	-18.2 (9.7)	0.639	**
Süßkirsche spät	1.7 (1.5)	-3.8 (4.2)	-10.7 (5.7)	-16.7 (9.6)	-18.3 (9.7)	0.641	**
Birne früh	6.3 (2.2)	0.7 (3.7)	-7.1 (4.4)	-12.8 (4.0)	-19.1 (4.3)	0.000	***
Birne spät	7.5 (2.3)	2.0 (2.5)	-4.5 (3.4)	-7.6 (2.9)	-15.1 (3.4)	0.000	***
Erdbeere	0.4 (1.5)	-8.0 (2.3)	-17.0 (5.7)	-22.9 (10.4)	-23.4 (10.6)	0.362	**
Wein	2.2 (1.4)	-10.4 (2.9)	-25.4 (4.8)	-39.1 (5.6)	-41.3 (5.8)	0.000	***
Pfirsich	4.2 (1.4)	-0.9 (2.8)	-9.6 (3.4)	-15.3 (4.4)	-19.5 (4.5)	0.002	***
Aprikose	5.3 (1.4)	0.0 (3.9)	-9.8 (4.4)	-16.7 (5.1)	-22.0 (5.1)	0.002	***
Pflaume früh	2.8 (1.1)	-2.7 (3.1)	-12.3 (5.0)	-19.8 (6.9)	-22.6 (7.1)	0.089	***
Pflaume spät	5.1 (2.4)	-1.0 (2.0)	-8.5 (4.6)	-13.4 (3.6)	-18.5 (4.0)	0.000	***

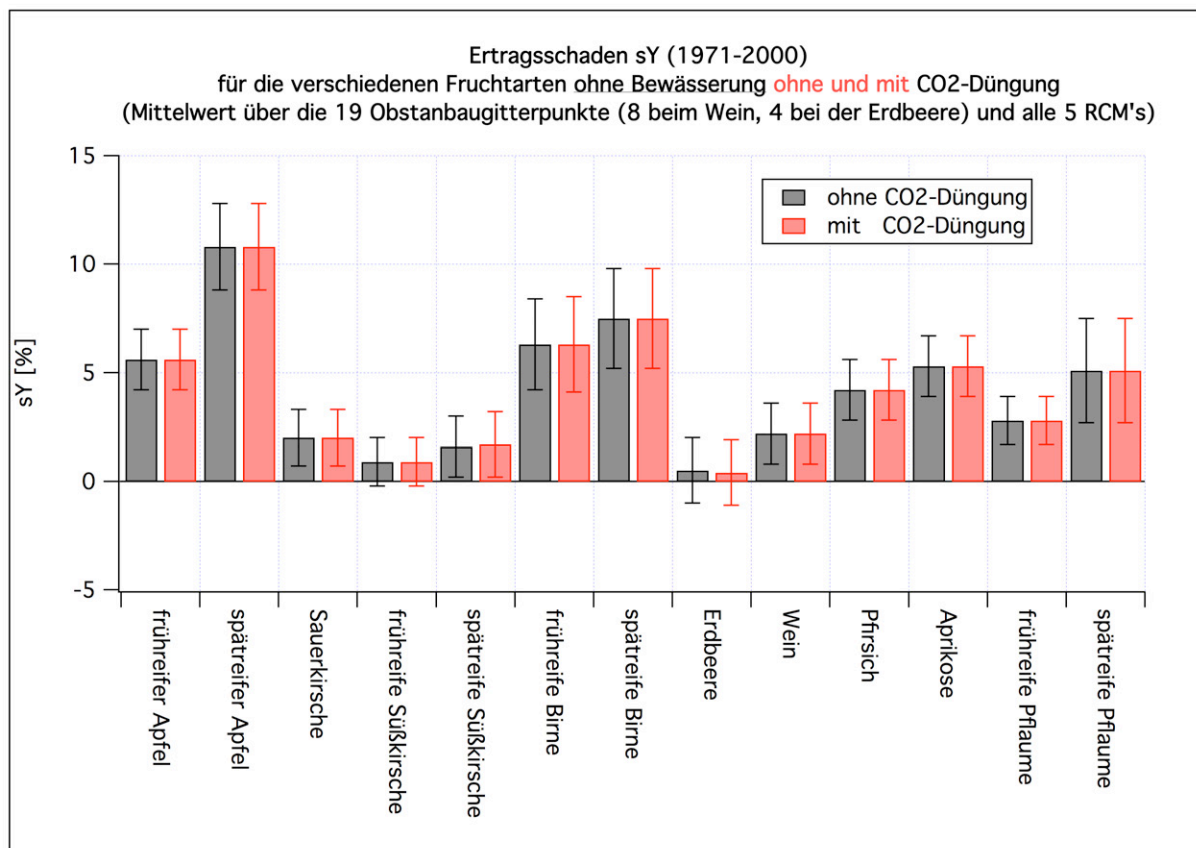


Abbildung J.3: Ertragsschäden s_Y (1971-2000) **ohne Bewässerung** für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

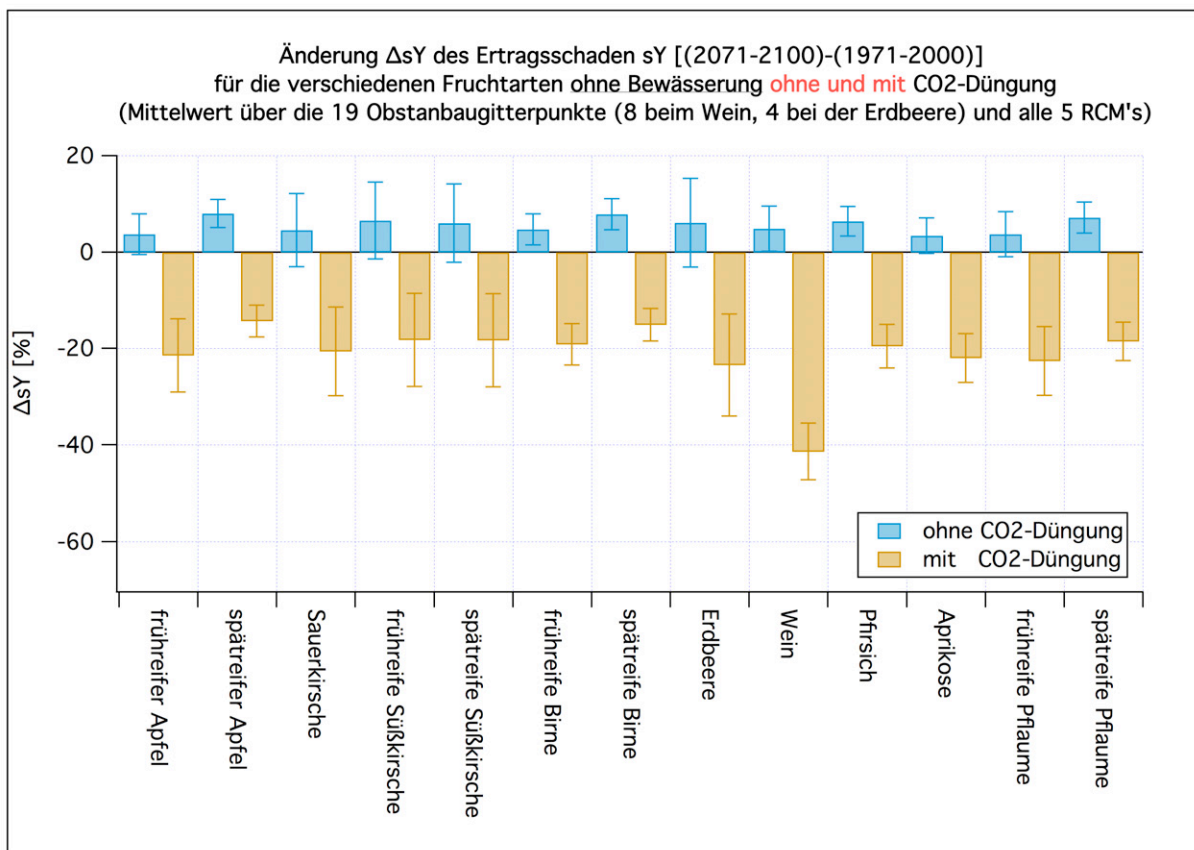


Abbildung J.4: Veränderung Δs_Y der Ertragsschäden s_Y [(2071-2100)-(1971-2000)] **ohne Bewässerung** für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

J.14.3 Ertragsschaden mit Sommerberechnung

Mit Sommerberechnung und ohne CO₂-Effekt sind alle Schadensänderungen außer beim spätreifen Apfel² nicht signifikant von null verschieden (**Tabelle J.148**). Die negativen Schäden in der Zukunft (d. h. Ertragszuwächse) beim spätreifen Apfel und auch den anderen, relativ spätenreife Arten/Sorten sind hauptsächlich auf die Verlängerung der Reifeperiode (Abbildung F.2) und die Zunahme der Globalstrahlung im Sommer (Abbildung B.9 und Tabelle B.25) zurückzuführen. Man beachte, dass die Breite der Konfidenzintervalle in der Zukunft gegenüber dem Fall ohne Bewässerung stark zunimmt. Das ist auch der Hauptgrund dafür, dass hier nur der spätreife Apfel “signifikante” Ergebnisse liefert.³ Ursächlich für die vergrößerten Konfidenzintervalle ist die Tatsache, dass sich die Modelle bezüglich der zukünftigen Entwicklung der Globalstrahlung nicht einig sind. Vor allem WETTREG2010 liefert wesentlich größere Zuwachsraten für die Globalstrahlung als die anderen Modelle (“D-A-Spalte” in Tabelle B.27). Die Globalstrahlung bestimmt aber im Sommer, wenn wegen der Bewässerung kein Trockenstress herrscht, maßgeblich das Wachstum. Durch die stark unterschiedlichen Werte der Globalstrahlung in den einzelnen Klimamodellen wird aber auch der Unsicherheitsbereich für die Ergebnisse der Impaktmodelle (hier: SIMWASER) vergrößert.

Aus diesem Grund besitzen die Veränderungen der Yieldschäden **mit** Sommerberechnung größere p-Werte (weniger signifikant) als die ohne Bewässerung. Allerdings sind trotzdem die **mit** CO₂-Düngung berechneten Veränderungen der Schäden für alle Sorten/Arten signifikant negativ (Ertragszuwachs!) (auf mindestens 99 %-Niveau) (siehe **Tabelle J.149**).

Tabelle J.148: Statistik für den relativen **Ertragsschaden** (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit Bewässerung** und **ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte “über die 5 Klimamodellläufe” und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000		2002-2031		2031-2060		2071-2100		Differenz	p-Wert	Signi.
	(A)		(B)		(C)		(D)		(D-A)	[%]	
Apfel früh	0.0	(1.3)	0.5	(3.1)	-2.0	(7.1)	-4.0	(12.0)	-3.9	(12.1)	41.802
Apfel spät	0.0	(1.5)	-1.8	(2.9)	-7.3	(7.1)	-13.7	(11.3)	-13.7	(11.5)	2.999 *
Sauerkirsche	0.0	(1.1)	0.1	(2.4)	1.3	(4.9)	3.0	(7.2)	3.0	(7.4)	32.475
Süßkirsche früh	0.0	(1.2)	0.4	(2.2)	2.5	(4.8)	6.4	(7.9)	6.4	(8.0)	9.056
Süßkirsche spät	0.0	(1.0)	0.8	(2.6)	2.5	(4.6)	5.3	(7.8)	5.3	(7.9)	13.436
Birne früh	0.0	(1.2)	-0.3	(3.3)	-4.2	(6.6)	-7.1	(11.5)	-7.1	(11.7)	16.848
Birne spät	0.0	(1.4)	-1.0	(2.7)	-5.7	(6.2)	-10.0	(10.3)	-9.9	(10.5)	5.868
Erdbeere	0.0	(1.6)	0.1	(2.0)	1.3	(5.0)	6.1	(8.9)	6.1	(9.2)	13.722
Wein	0.0	(1.2)	0.3	(3.0)	-1.9	(4.9)	-2.4	(9.4)	-2.4	(9.6)	52.270
Pfirsich	0.0	(0.9)	0.6	(2.2)	-0.6	(4.3)	-1.1	(8.5)	-1.1	(8.6)	74.109
Aprikose	0.0	(1.2)	0.0	(3.0)	-3.0	(5.6)	-5.5	(10.1)	-5.4	(10.2)	21.163
Pflaume früh	0.0	(1.0)	0.1	(2.4)	-1.9	(4.9)	-3.4	(9.8)	-3.4	(9.9)	40.103
Pflaume spät	0.0	(1.1)	-1.2	(2.5)	-5.1	(5.3)	-8.4	(10.2)	-8.4	(10.3)	8.654

² Auch bei diesem findet man keine Signifikanz, wenn man das auf Seite 429 Gesagte berücksichtigt!

³ Ein weiterer Grund ist, dass die Absolutwerte der Schäden hier etwas kleiner sind.

Tabelle J.149: Statistik für den relativen **Ertragsschaden** (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (1.3)	-5.8 (3.2)	-16.1 (7.9)	-28.1 (14.7)	-28.1 (14.8)	0.623	**
Apfel spät	0.0 (1.5)	-7.7 (3.0)	-21.0 (7.9)	-38.0 (13.7)	-38.0 (13.8)	0.159	**
Sauerkirsche	0.0 (1.1)	-6.8 (2.5)	-13.6 (5.3)	-21.6 (8.7)	-21.6 (8.8)	0.244	**
Süßkirsche früh	0.0 (1.2)	-6.7 (2.2)	-12.7 (4.8)	-18.2 (9.5)	-18.2 (9.6)	0.632	**
Süßkirsche spät	0.0 (1.0)	-5.9 (2.5)	-12.1 (5.0)	-18.5 (9.3)	-18.5 (9.4)	0.549	**
Birne früh	0.0 (1.2)	-6.6 (3.4)	-18.3 (7.3)	-31.2 (13.9)	-31.2 (14.0)	0.350	**
Birne spät	0.0 (1.4)	-7.3 (2.8)	-20.0 (6.9)	-34.7 (12.5)	-34.6 (12.6)	0.161	**
Erdbeere	0.0 (1.6)	-8.5 (1.8)	-17.5 (5.0)	-23.6 (10.3)	-23.6 (10.5)	0.342	**
Wein	0.0 (1.1)	-14.0 (2.8)	-33.4 (5.9)	-54.3 (12.9)	-54.3 (12.9)	0.031	***
Pfirsich	0.0 (0.9)	-6.8 (2.2)	-16.9 (4.6)	-27.9 (10.3)	-27.9 (10.3)	0.170	**
Aprikose	0.0 (1.2)	-7.0 (2.9)	-18.6 (6.0)	-31.4 (12.0)	-31.4 (12.1)	0.197	**
Pflaume früh	0.0 (1.0)	-7.0 (2.2)	-17.5 (5.2)	-29.3 (11.6)	-29.3 (11.7)	0.224	**
Pflaume spät	0.0 (1.1)	-8.2 (2.6)	-21.1 (5.7)	-35.3 (12.2)	-35.3 (12.3)	0.133	**

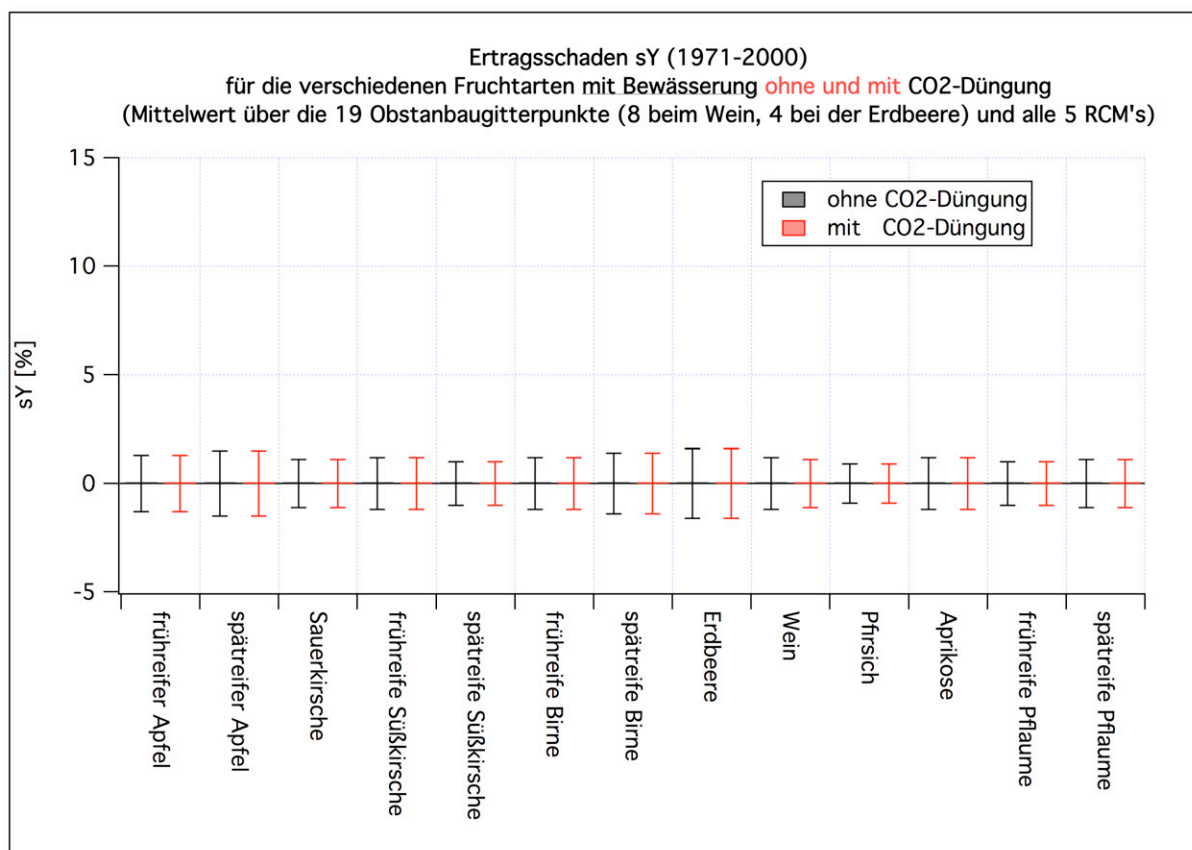


Abbildung J.5: Ertragsschäden s_Y (1971-2000) **mit Bewässerung** für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

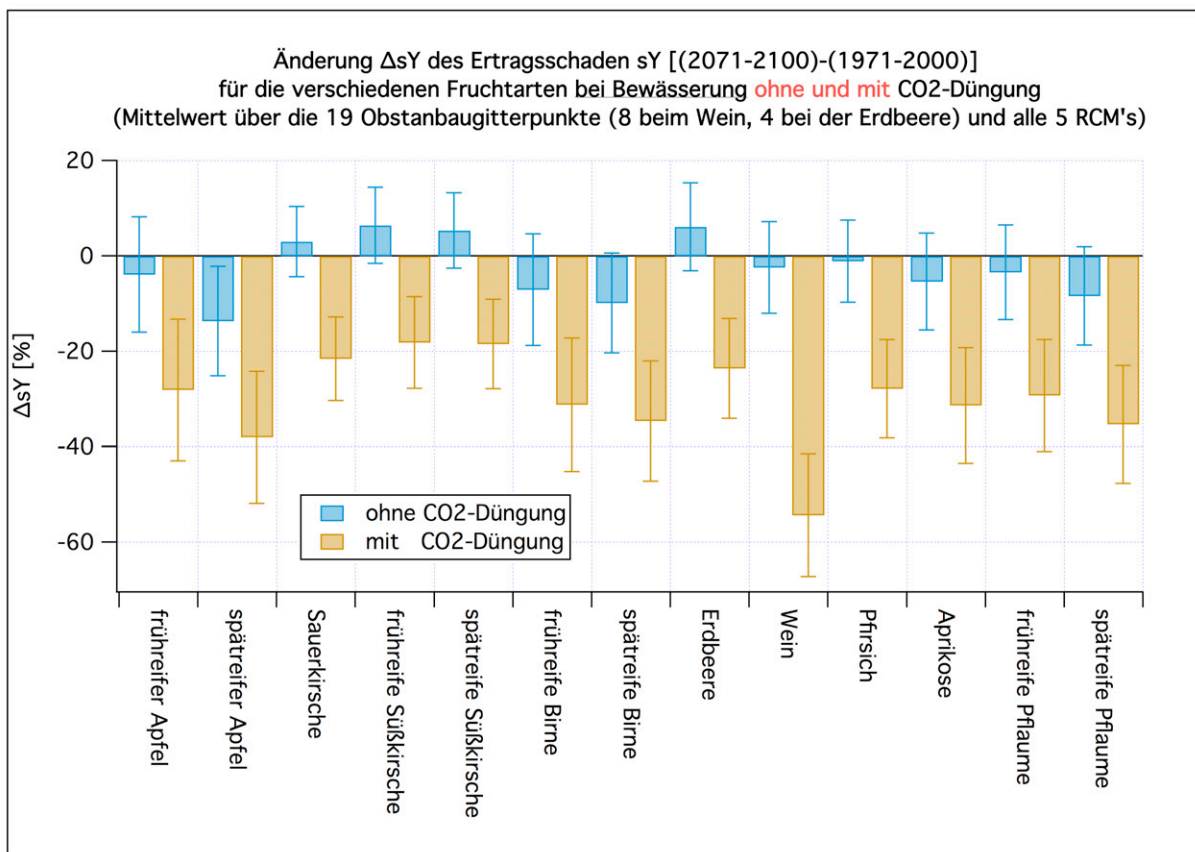


Abbildung J.6: Veränderung Δs_Y der Ertragsschäden s_Y [(2071-2100)-(1971-2000)] **mit Bewässerung** für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

J.14.4 Bewässerungsmenge

Die notwendige Sommerberegnungsmenge nimmt bis 2100 bei allen Obstarten zu, jedoch sind nur einige dieser Veränderungen, hauptsächlich bei den spätreifenden Arten/Sorten, signifikant (**Tabelle J.150**; Rechnung ohne CO₂-Effekt). Bei diesen spätreifenden Arten/Sorten kann die Zunahme über 100 % betragen. Das ist eine Folge der steigenden Temperaturen (Tabelle B.1 ff.) und der besonders im Sommer abnehmenden Niederschläge (Tabelle B.19) sowie der im Sommer etwas zurückgehenden relativen Feuchte (Tabelle B.10). Mit CO₂-Düngung (**Tabelle J.151**) ist die Zunahme der notwendigen Bewässerungsmenge etwas geringer, da mit steigender CO₂-Konzentration der Stomatawiderstand ansteigt, was die Transpiration verringert.

Tabelle J.150: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit Bewässerung** und **ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	91.2 (11.6)	98.3 (17.9)	111.8 (21.0)	143.6 (44.1)	52.3 (44.2)	2.748	*
Apfel spät	151.5 (19.0)	174.6 (26.3)	223.0 (50.2)	317.4 (64.1)	166.0 (65.1)	0.079	***
Sauerkirsche	51.3 (6.5)	58.0 (14.7)	57.9 (8.3)	71.1 (13.7)	19.8 (14.8)	1.139	*
Süßkirsche früh	32.2 (5.9)	35.1 (10.1)	34.1 (4.8)	38.3 (8.1)	6.1 (9.8)	21.314	
Süßkirsche spät	44.6 (6.1)	49.4 (14.1)	48.1 (5.7)	55.5 (9.7)	10.9 (11.2)	5.605	
Birne früh	105.6 (17.2)	116.7 (22.8)	146.1 (34.7)	196.0 (53.0)	90.4 (54.2)	0.650	**
Birne spät	123.5 (17.7)	141.5 (25.2)	182.1 (44.0)	258.2 (59.1)	134.6 (60.0)	0.153	**
Erdbeere	16.1 (5.8)	17.3 (5.9)	18.2 (3.3)	17.9 (3.9)	1.8 (6.7)	59.305	
Wein	71.2 (14.5)	83.5 (20.2)	104.2 (31.0)	134.2 (32.4)	63.0 (33.7)	0.311	**
Pfirsich	81.3 (12.1)	92.7 (17.0)	102.0 (21.4)	131.3 (36.2)	49.9 (37.2)	1.676	*
Aprikose	86.9 (11.1)	97.2 (17.8)	108.1 (20.0)	139.8 (38.6)	52.9 (39.0)	1.613	*
Pflaume früh	69.8 (12.5)	81.8 (16.3)	91.2 (18.7)	120.3 (35.2)	50.5 (36.4)	1.467	*
Pflaume spät	96.8 (14.9)	115.0 (22.9)	146.3 (39.3)	201.9 (48.6)	105.2 (49.4)	0.199	**

Tabelle J.151: Statistik für die **Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit Bewässerung** und **mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIM-WASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	91.4 (11.8)	93.1 (17.5)	99.6 (18.5)	122.4 (39.7)	31.0 (40.3)	10.891	
Apfel spät	152.1 (18.8)	166.6 (26.4)	203.4 (47.8)	278.4 (59.0)	126.3 (60.5)	0.220	**
Sauerkirsche	51.5 (6.5)	55.1 (15.3)	52.1 (7.7)	60.5 (12.6)	9.1 (13.8)	18.416	
Süßkirsche früh	32.3 (5.9)	33.1 (9.9)	30.0 (4.4)	31.8 (6.7)	-0.5 (8.7)	91.296	
Süßkirsche spät	44.8 (6.1)	46.8 (13.9)	42.7 (5.3)	46.6 (9.0)	1.9 (10.6)	72.071	
Birne früh	105.9 (17.2)	111.7 (22.5)	134.0 (33.5)	173.0 (48.2)	67.2 (48.4)	1.343	*
Birne spät	124.0 (17.9)	136.0 (25.4)	168.5 (42.4)	230.8 (54.1)	106.8 (55.7)	0.335	**
Erdbeere	16.1 (5.7)	17.5 (5.9)	18.4 (3.2)	18.4 (4.0)	2.4 (6.7)	47.349	
Wein	71.3 (14.6)	84.3 (20.6)	105.3 (31.8)	137.7 (32.6)	66.4 (34.0)	0.242	**
Pfirsich	81.5 (12.1)	90.1 (17.0)	96.2 (20.3)	121.6 (34.2)	40.1 (35.5)	3.264	*
Aprikose	87.1 (11.1)	94.6 (17.7)	102.1 (18.9)	127.6 (36.1)	40.5 (36.8)	3.587	*
Pflaume früh	70.0 (12.6)	78.8 (15.4)	84.2 (17.7)	106.6 (32.5)	36.6 (32.9)	3.385	*
Pflaume spät	97.0 (15.0)	111.0 (21.7)	136.4 (37.9)	181.4 (44.1)	84.3 (45.5)	0.396	**

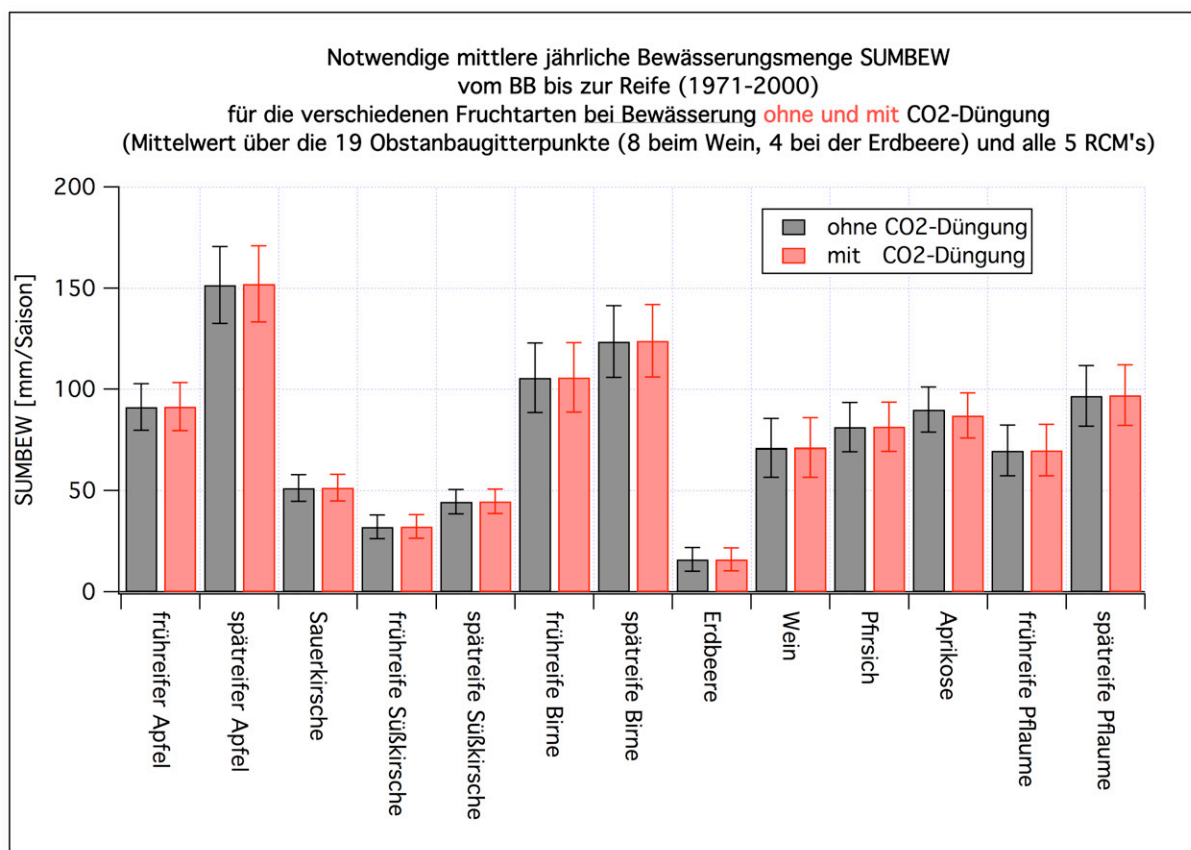


Abbildung J.7: Mittlere jährliche Bewässerungsmenge *SUMBEW* (1971-2000) vom Blühbeginn *BB* bis zur Reife für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

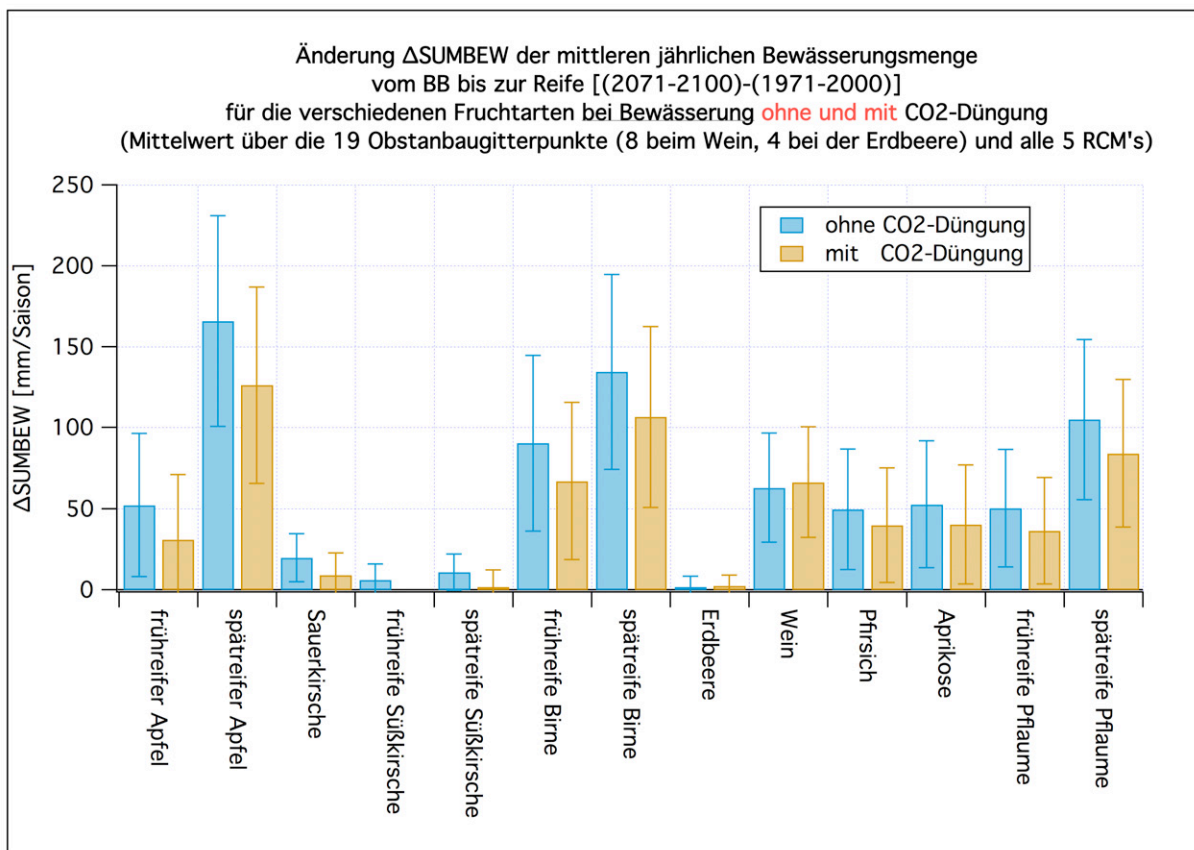


Abbildung J.8: Veränderung Δ SUMBEW der mittleren jährlichen Bewässerungsmenge [(2071-2100)-(1971-2000)] vom Blühbeginn *BB* bis zur Reife für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung.

J.14.5 Transpirationsmenge

Die Transpirationsmenge (von Blühbeginn bis Pflückreife) verhält sich ganz ähnlich wie die notwendige Bewässerungsmenge (siehe Seite 438). Für alle Obstarten außer bei der Kirsche⁴ und bei der Erdbeere ist eine kräftige Zunahme der Transpiration zu erwarten, wenn man die Rechnungen ohne CO₂-Düngung betrachtet (**Tabelle J.152**). Die statistische Signifikanz dieser Zunahme ist allerdings auf Grund der stark voneinander abweichenden Ergebnisse der Klimamodelle, die sich auch auf die von SIMWASER berechnete Transpirationsmenge auswirkt, nur beim spätreifenden Apfel, der späten Birne und der späten Pflaume signifikant⁵. Mit CO₂-Düngung (**Tabelle J.153**) findet man eine leichte, aber signifikante Abnahme der Transpirationsmenge bei der Süßkirsche und eine kräftige, signifikante Zunahme beim späten Apfel, der späten Birne und beim Wein.

Tabelle J.152: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit Bewässerung und ohne CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	263.8 (11.1)	269.2 (9.0)	284.5 (13.0)	313.6 (32.5)	49.9 (33.6)	1.102	*
Apfel spät	398.6 (15.6)	421.1 (18.6)	473.0 (39.9)	560.7 (53.2)	162.1 (53.9)	0.032	***
Sauerkirsche	134.1 (4.7)	138.8 (9.1)	137.2 (5.3)	143.1 (9.8)	8.9 (10.6)	9.241	
Süßkirsche früh	93.9 (3.7)	96.0 (5.6)	93.9 (3.3)	93.5 (5.4)	-0.4 (6.4)	90.030	
Süßkirsche spät	120.0 (4.1)	122.5 (8.5)	119.7 (3.4)	122.1 (7.0)	2.0 (7.9)	59.508	
Birne früh	306.2 (10.6)	316.4 (11.3)	346.3 (27.0)	387.1 (50.3)	80.8 (52.3)	1.273	*
Birne spät	354.8 (12.4)	371.0 (13.8)	413.0 (34.4)	477.0 (58.5)	122.2 (60.8)	0.507	**
Erdbeere	41.3 (2.7)	42.0 (1.8)	42.1 (2.0)	40.3 (3.0)	-1.0 (3.9)	61.332	
Wein	145.1 (5.5)	151.2 (8.5)	165.3 (16.8)	181.8 (25.8)	36.7 (26.9)	1.924	*
Pfirsich	193.1 (5.8)	199.8 (9.3)	208.0 (17.9)	227.0 (33.8)	33.8 (34.7)	5.363	
Aprikose	206.3 (6.9)	213.6 (9.5)	225.5 (17.5)	250.0 (36.2)	43.6 (37.3)	3.156	*
Pflaume früh	176.9 (5.7)	185.0 (8.5)	195.2 (16.6)	216.1 (33.8)	39.2 (34.7)	3.495	*
Pflaume spät	227.3 (7.8)	242.7 (12.6)	272.6 (29.1)	316.5 (48.2)	89.2 (49.3)	0.736	**

⁴ Bei der Kirsche verkürzt sich die Reifeperiode (Abbildung F.2); daher nimmt die Transpirationsmenge bei Berücksichtigung des CO₂-Effekts in diesem Zeitraum ab.

⁵ Wenn man wieder die exaktere Methode von Seite 429 anwendet.

Tabelle J.153: Statistik für die **Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife** (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit Bewässerung und mit CO₂-Düngung**), berechnet mit SIMWASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	264.3 (11.1)	262.1 (9.2)	268.0 (11.8)	286.0 (28.7)	21.7 (29.3)	12.309	
Apfel spät	399.3 (15.5)	410.4 (19.1)	447.2 (37.0)	515.8 (48.0)	116.4 (49.3)	0.118	**
Sauerkirsche	134.4 (4.7)	134.9 (9.2)	128.9 (4.7)	130.4 (9.0)	-4.0 (9.8)	39.953	
Süßkirsche früh	94.1 (3.7)	93.2 (5.8)	88.0 (3.2)	84.7 (4.5)	-9.4 (5.7)	0.178	**
Süßkirsche spät	120.3 (4.1)	118.9 (8.4)	112.0 (3.3)	110.3 (6.1)	-10.0 (7.2)	0.806	**
Birne früh	306.7 (10.6)	309.8 (11.2)	330.7 (25.7)	360.6 (46.1)	53.9 (48.3)	3.619	*
Birne spät	355.3 (12.5)	363.5 (13.8)	395.2 (32.9)	446.5 (49.7)	91.2 (49.6)	0.409	**
Erdbeere	41.3 (2.6)	42.8 (2.0)	43.9 (2.1)	43.1 (2.9)	1.9 (3.8)	32.883	
Wein	144.8 (5.5)	155.9 (8.5)	175.8 (17.7)	199.7 (26.0)	54.9 (27.1)	0.490	**
Pfirsich	193.3 (5.8)	197.2 (8.8)	202.0 (16.8)	217.3 (30.8)	24.0 (31.8)	10.409	
Aprikose	206.6 (6.9)	210.2 (9.0)	217.5 (15.5)	236.2 (32.5)	29.6 (33.8)	7.180	
Pflaume früh	177.1 (5.8)	181.2 (7.9)	186.5 (15.2)	201.4 (29.8)	24.3 (30.8)	9.368	
Pflaume spät	227.7 (7.8)	238.0 (12.2)	261.3 (27.5)	296.9 (42.6)	69.2 (43.8)	1.185	*

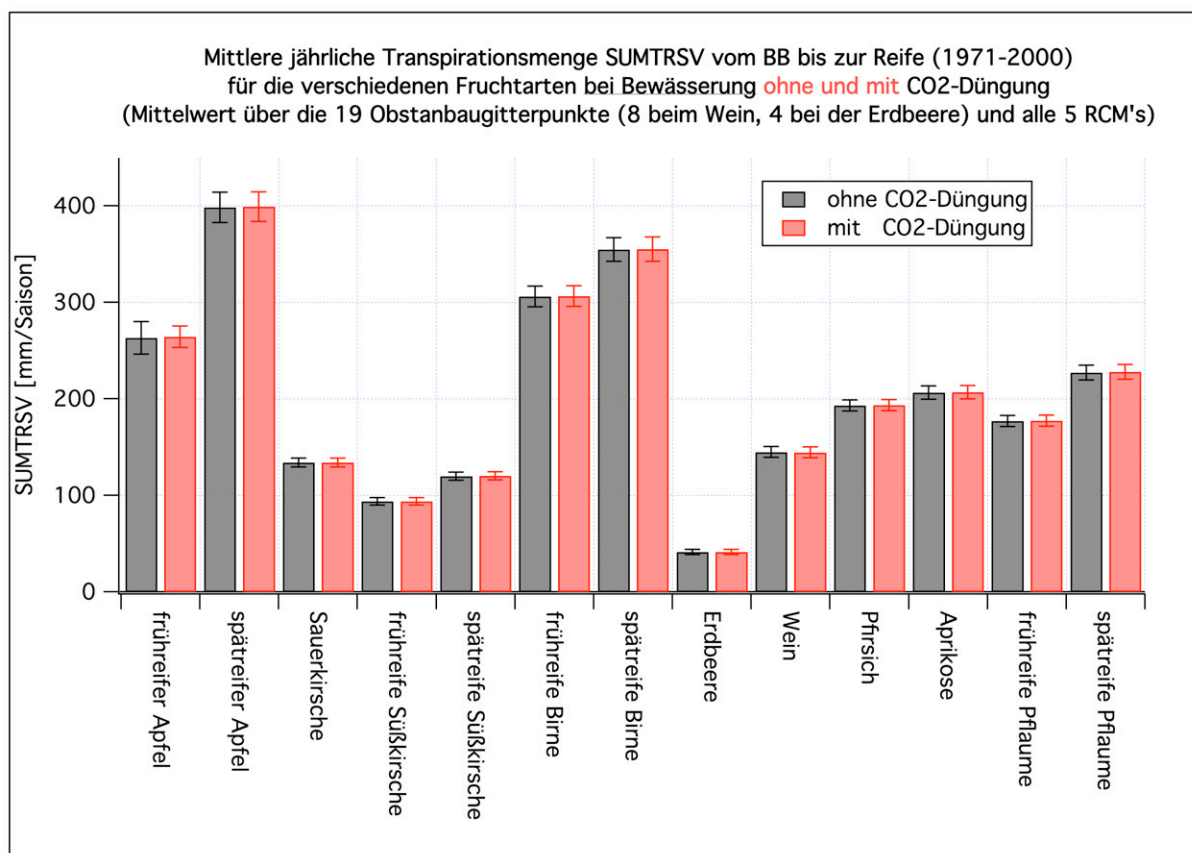


Abbildung J.9: Mittlere jährliche Transpirationsmenge *SUMTRSV* (1971-2000) vom Blühbeginn *BB* bis zur Reife für alle Fruchtarten mit Sommerberegnung, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

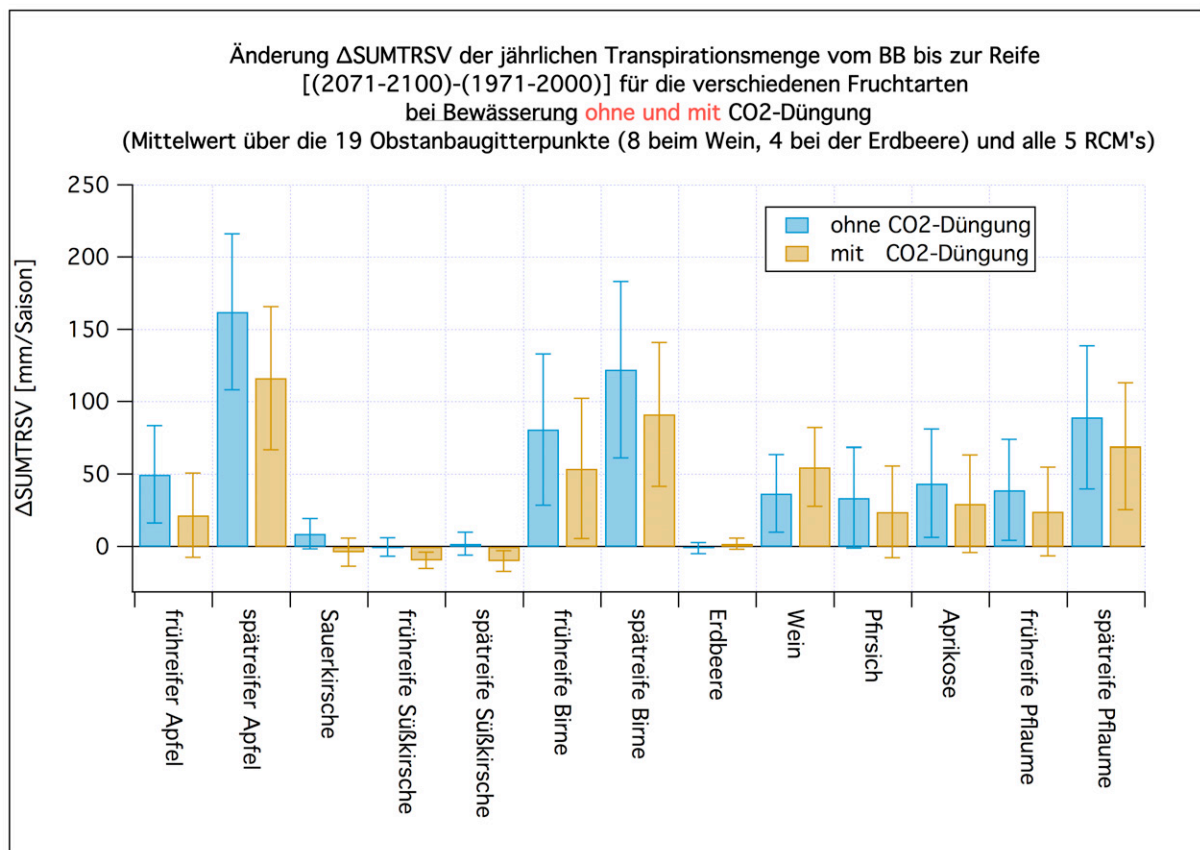


Abbildung J.10: Veränderung $\Delta SUMTRSV$ der mittleren jährlichen Transpirationsmenge [(2071-2100)-(1971-2000)] vom Blühbeginn *BB* bis zur Reife für alle Fruchtarten mit Sommerberegnung, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung.

J.14.6 Bienenflugintensität

Da das Bienenflugmodell in SIMWASER integriert wurde, und da im Gegensatz zu den Apfelwicklerergebnissen keine weiteren Konsequenzen (wie z. B. Schäden) aus diesen Ergebnissen gezogen wurden, sollen die Resultate an dieser Stelle erwähnt werden. Die mittlere relative Bienenflugintensität während der Blütezeit nimmt bei allen Fruchtarten, außer beim sehr spät blühenden Wein, in der Zukunft hoch signifikant ab (**Tabelle J.154**). Das liegt nur zu einem kleinen Teil an den verfrühten Blühterminen (Tabelle C.1 ff.), zu denen manchmal trotz Klimaerwärmung noch kältere Temperaturen herrschen als heutzutage zur Blüte. Hauptursachen sind die Globalstrahlung, welche bei früheren Terminen geringere Werte hat (Tabelle B.25), und der Niederschlag, welcher sich in Zukunft im März und April leicht erhöht (Tabelle B.19). Alle diese Änderungen bewirken gemäß Gleichung (4.169) ff. eine Verringerung der Flugintensität. Man beachte, dass diese reduzierte Bienenflugintensität nur durch die Witterung bedingt wird, da hier keine Bienenkrankheiten und kein Bienensterben, verursacht durch Pestizide und Varroa-Milben u. ä., berücksichtigt wurde.

Tabelle J.154: Statistik für die **mittlere Bienenflugintensität während der Blüte** (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten, berechnet mit SIMWASER mit Hilfe der 5 RCM's. Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und über die 19 Obstanbau- bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000		2002-2031		2031-2060		2071-2100		Differenz		p-Wert	Signi.
	(A)		(B)		(C)		(D)		(D-A)		[%]	
Apfel früh	23.4	(1.7)	21.1	(1.7)	19.2	(2.0)	16.1	(1.9)	-7.3	(2.4)	0.000	***
Apfel spät	24.1	(1.4)	22.2	(1.4)	20.5	(2.2)	17.7	(1.8)	-6.3	(2.2)	0.001	***
Sauerkirsche	21.1	(1.3)	19.4	(1.5)	17.9	(1.3)	15.5	(2.0)	-5.6	(2.2)	0.008	***
Süßkirsche früh	17.6	(1.0)	16.2	(1.0)	15.2	(1.1)	13.3	(1.9)	-4.3	(2.1)	0.042	***
Süßkirsche spät	18.1	(1.0)	16.8	(0.9)	15.6	(1.0)	13.8	(1.9)	-4.4	(2.0)	0.045	***
Birne früh	20.5	(1.7)	18.0	(1.2)	16.1	(1.1)	13.4	(1.5)	-7.1	(2.1)	0.000	***
Birne spät	21.1	(1.5)	18.6	(1.1)	16.7	(1.3)	14.0	(1.5)	-7.1	(2.0)	0.000	***
Erdbeere	27.6	(2.1)	24.9	(2.3)	23.4	(2.9)	21.5	(1.5)	-6.1	(2.5)	0.002	***
Wein	38.6	(2.8)	39.5	(3.3)	39.7	(3.2)	41.0	(0.9)	2.5	(2.9)	8.506	
Pfirsich	19.3	(1.4)	17.3	(1.1)	15.9	(1.1)	13.8	(1.9)	-5.5	(2.2)	0.005	***
Aprikose	12.2	(1.4)	11.0	(1.2)	9.6	(0.9)	8.3	(0.6)	-3.9	(1.5)	0.003	***
Pflaume früh	19.4	(1.6)	17.3	(1.1)	15.2	(1.0)	12.7	(1.4)	-6.7	(2.0)	0.000	***
Pflaume spät	20.0	(1.5)	17.7	(1.1)	15.8	(1.1)	13.2	(1.4)	-6.8	(2.0)	0.000	***

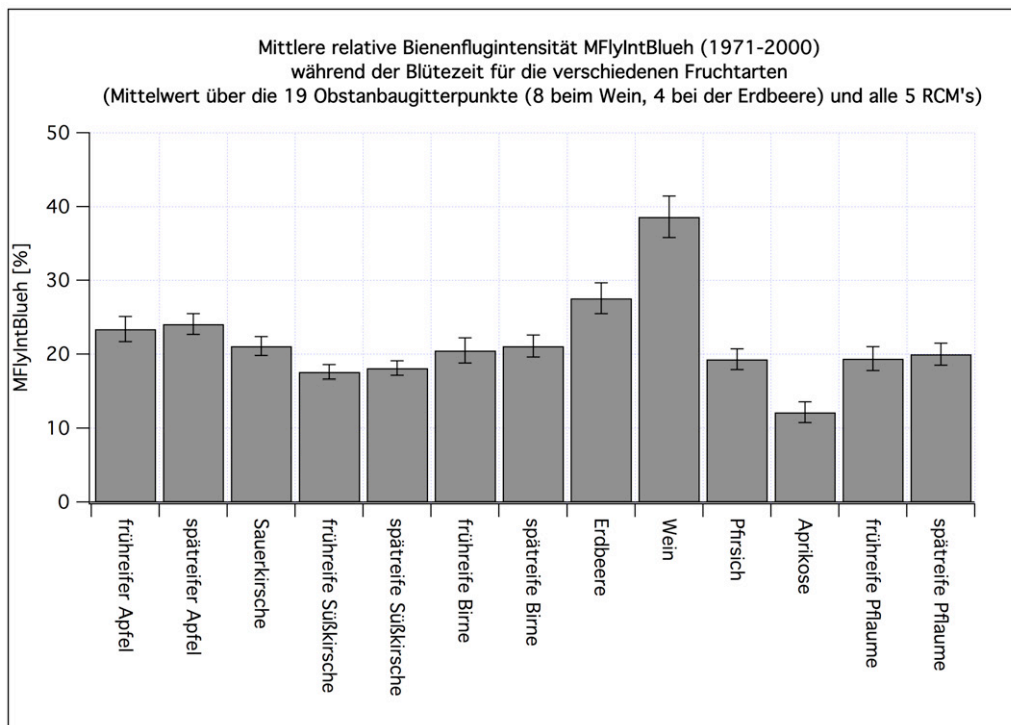


Abbildung J.11: Mittlere relative Bienenflugintensität *MFlyIntBlueh* (1971-2000) während der Blütezeit für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

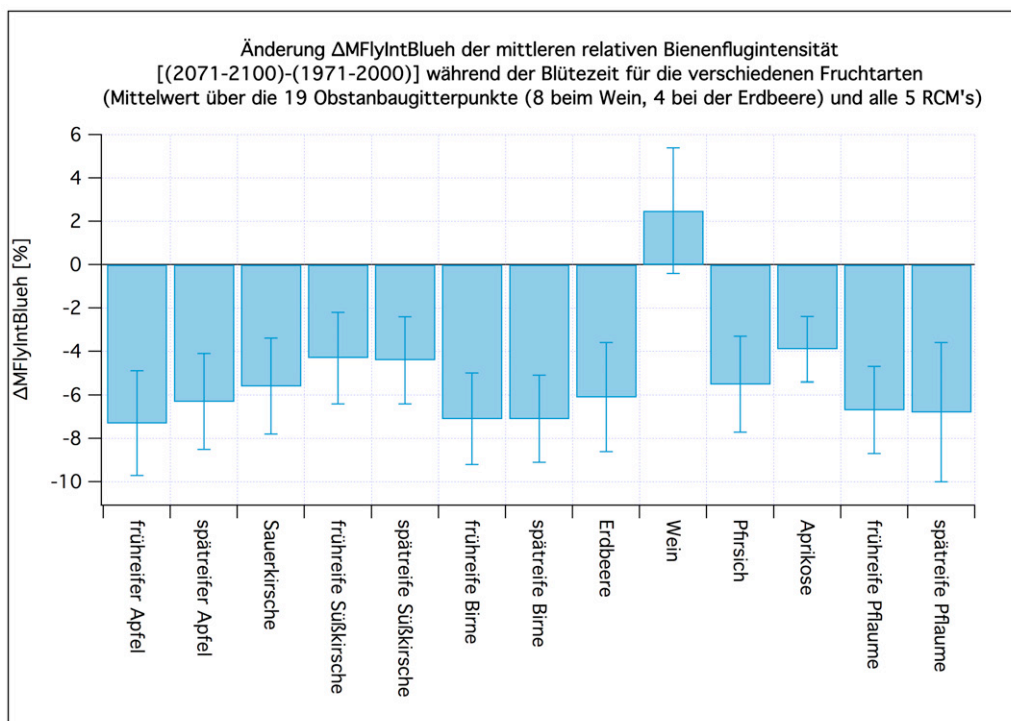


Abbildung J.12: Veränderung $\Delta MFlyIntBlueh$ der mittleren relativen Bienenflugintensität [(2071-2100)-(1971-2000)] während der Blütezeit für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

K Schäden und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen

Da die hier gelisteten Tabellen zum größten Teil automatisch erzeugt wurden, sind die Ergebnisse zum Teil nicht dem 95 %-Konfidenzintervall (welches in runden Klammern angegeben ist) entsprechend gerundet.¹ Der Leser möge das verzeihen.

Fehlerbalken in den Abbildungen sind, genauso wie die Angaben in runden Klammern in den Tabellen, immer 95 %-Konfidenzintervalle.

K.1 Gesamtschäden

Die Berechnung der Gesamtschäden s_{ges} wird in Kapitel 4.11 beschrieben. Die hierbei benötigten Dormanzschäden s_D wurden immer mit der Methode nach Gleichung (4.99) ff. mit Modell 1g bei $C^* = 89$ CP (maximales Chilling-Requirement gemäß Tabelle 4.16) berechnet.² Die Methode zur Berechnung der Frostschäden s_F wird in Abschnitt 4.8 bzw. 4.8.4 erläutert. Der Apfelwicklerschaden s_A (Abschnitt 4.9) wurde nur beim Apfel berücksichtigt. Die Ertragsschäden s_Y werden in Kapitel 4.10.12 diskutiert.

Die nachfolgenden Tabellen und Abbildungen werden zum größten Teil im Kapitel 5.7.1 diskutiert.

K.1.1 Tabellen

Tabelle K.1: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie o-o**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	16.4 (5.0)	18.2 (4.2)	19.0 (2.4)	25.5 (2.8)	9.1 (5.3)	0.294	**
Apfel spät	21.0 (5.0)	22.4 (3.2)	24.7 (2.6)	33.1 (5.1)	12.0 (6.5)	0.135	**
Sauerkirsche	4.5 (4.3)	5.6 (5.3)	5.1 (4.9)	9.0 (4.3)	4.4 (5.6)	11.120	
Süßkirsche früh	5.6 (5.8)	6.9 (5.8)	6.1 (3.9)	11.1 (3.9)	5.5 (6.5)	9.337	
Süßkirsche spät	6.4 (6.3)	8.4 (6.3)	6.9 (4.2)	11.2 (4.1)	4.8 (7.0)	16.016	
Birne früh	8.8 (4.8)	9.9 (3.4)	9.1 (3.3)	13.4 (2.9)	4.6 (5.3)	8.122	
Birne spät	9.9 (4.8)	11.1 (2.8)	11.4 (2.8)	17.6 (4.2)	7.7 (5.9)	1.363	*
Wein	3.5 (2.1)	4.5 (2.2)	4.5 (3.4)	9.1 (2.9)	5.6 (3.5)	0.220	**
Pflaume früh	6.5 (5.0)	8.2 (3.6)	6.4 (3.9)	9.5 (2.7)	3.0 (5.4)	24.248	
Pflaume spät	8.6 (6.2)	9.9 (3.5)	10.0 (4.3)	15.1 (3.5)	6.5 (6.6)	5.294	

¹ Z. B. sollte “-115829 (20539)” besser als “-120000 (21000)” gelistet werden!

² Obwohl *maximales* Chilling-Requirement verwendet wurde, sind die Dormanzschäden bei Nutzung von Modell 1g immer null (Abschnitt 5.3.10).

Tabelle K.2: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-o**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	16.4 (5.0)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-2.5 (11.7)	-18.9 (12.0)	0.982	**
Apfel spät	21.0 (5.0)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-12.1 (11.0)	-33.1 (10.9)	0.030	***
Sauerkirsche	4.5 (4.3)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	3.0 (7.2)	-1.5 (7.4)	63.797	
Süßkirsche früh	5.6 (5.8)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	6.4 (7.9)	0.8 (8.4)	83.535	
Süßkirsche spät	6.4 (6.3)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	5.3 (7.8)	-1.0 (8.6)	78.950	
Birne früh	8.8 (4.8)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-7.1 (11.5)	-15.8 (11.8)	1.831	*
Birne spät	9.9 (4.8)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-10.0 (10.3)	-19.9 (10.3)	0.323	**
Wein	3.5 (2.1)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-2.4 (9.4)	-5.9 (9.8)	16.823	
Pflaume früh	6.5 (5.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	-3.4 (9.8)	-9.9 (10.0)	5.238	
Pflaume spät	8.6 (6.2)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-8.4 (10.2)	-17.1 (10.4)	0.603	**

Tabelle K.3: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	7.0 (3.2)	3.9 (5.2)	3.4 (6.9)	-2.7 (7.4)	43.158	
Apfel spät	6.2 (3.9)	5.0 (2.4)	-1.1 (5.3)	-5.6 (5.7)	-11.8 (6.5)	0.153	**
Sauerkirsche	2.6 (2.8)	2.8 (4.7)	2.8 (3.6)	5.5 (4.3)	2.9 (4.9)	22.116	
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	5.8 (5.7)	5.3 (3.3)	10.1 (3.9)	5.3 (5.8)	7.010	
Süßkirsche spät	4.8 (4.7)	6.2 (6.2)	5.3 (3.2)	9.1 (4.1)	4.3 (5.9)	14.581	
Birne früh	2.7 (3.0)	2.6 (2.3)	-2.2 (6.3)	-4.1 (8.2)	-6.8 (8.5)	9.919	
Birne spät	2.6 (3.0)	2.0 (2.0)	-3.6 (5.9)	-7.0 (6.8)	-9.6 (7.1)	1.311	*
Wein	1.4 (1.6)	1.5 (1.5)	-1.2 (4.0)	-0.2 (7.1)	-1.6 (7.4)	60.110	
Pflaume früh	3.8 (4.0)	4.0 (2.9)	1.0 (4.3)	0.0 (6.5)	-3.8 (7.1)	25.279	
Pflaume spät	3.8 (4.1)	2.9 (2.5)	-2.1 (4.6)	-4.9 (6.7)	-8.8 (7.2)	2.251	*

Tabelle K.4: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS, **nur 3 Klimamodellläufe**); Mittelwerte über nur 3 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.5 (9.5)	8.5 (4.5)	7.1 (2.2)	7.9 (2.0)	1.4 (10.0)	67.824	
Apfel spät	6.5 (9.9)	6.0 (3.7)	1.7 (4.8)	-1.8 (2.3)	-8.3 (10.5)	8.615	
Sauerkirsche	2.9 (6.2)	4.2 (12.8)	5.1 (1.9)	8.1 (3.6)	5.2 (6.5)	9.666	
Süßkirsche früh	5.3 (11.6)	7.3 (16.6)	7.5 (2.0)	12.7 (2.4)	7.4 (12.2)	14.911	
Süßkirsche spät	5.3 (11.7)	7.8 (18.1)	7.5 (1.9)	11.6 (2.9)	6.3 (12.5)	20.602	
Birne früh	3.3 (6.1)	4.2 (2.3)	1.3 (4.0)	0.9 (1.9)	-2.4 (6.2)	38.495	
Birne spät	3.3 (5.9)	3.1 (2.4)	-0.6 (5.0)	-2.6 (2.1)	-5.9 (6.0)	5.310	
Wein	1.1 (2.3)	2.6 (1.8)	1.1 (2.8)	4.1 (1.8)	3.0 (2.9)	4.246	*
Pflaume früh	4.8 (9.4)	5.4 (4.2)	3.7 (1.9)	4.0 (1.9)	-0.7 (9.8)	82.461	
Pflaume spät	4.8 (9.5)	4.2 (3.2)	0.6 (2.3)	-0.8 (2.2)	-5.5 (10.1)	17.880	

Tabelle K.5: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie g-g, mit CO₂-Düngung**, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	1.1 (3.3)	-9.5 (5.8)	-19.0 (8.5)	-25.2 (8.9)	0.019	***
Apfel spät	6.2 (3.9)	-0.6 (2.5)	-14.1 (5.9)	-28.3 (6.9)	-34.4 (7.5)	0.000	***
Sauerkirsche	2.5 (2.8)	-3.9 (4.9)	-11.9 (3.9)	-18.5 (5.0)	-21.1 (5.5)	0.000	***
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	-0.9 (6.0)	-9.6 (3.3)	-13.5 (4.5)	-18.3 (6.2)	0.000	***
Süßkirsche spät	4.8 (4.8)	-0.2 (6.6)	-9.0 (3.4)	-13.9 (4.7)	-18.7 (6.3)	0.000	***
Birne früh	2.7 (3.0)	-3.5 (2.3)	-16.1 (6.9)	-27.6 (9.9)	-30.3 (10.0)	0.031	***
Birne spät	2.6 (3.0)	-4.1 (2.0)	-17.7 (6.5)	-31.0 (8.2)	-33.7 (8.4)	0.002	***
Wein	1.4 (1.6)	-12.7 (1.4)	-32.4 (4.8)	-51.1 (9.1)	-52.4 (9.3)	0.001	***
Pflaume früh	3.8 (4.0)	-2.8 (3.0)	-14.2 (4.6)	-25.2 (7.6)	-29.0 (8.1)	0.002	***
Pflaume spät	3.8 (4.1)	-3.9 (2.5)	-17.6 (5.0)	-31.0 (7.9)	-34.8 (8.3)	0.001	***

Tabelle K.6: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung**, Worst Case: 20 %); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	7.0 (3.2)	3.9 (5.2)	22.4 (6.2)	16.3 (7.1)	0.004	***
Apfel spät	6.2 (3.9)	5.0 (2.4)	-1.1 (5.3)	15.2 (6.6)	9.0 (7.5)	1.928	*
Sauerkirsche	2.6 (2.8)	2.8 (4.7)	2.8 (3.6)	23.9 (6.1)	21.4 (6.6)	0.000	***
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	5.8 (5.7)	5.3 (3.3)	27.8 (5.9)	23.0 (7.2)	0.000	***
Süßkirsche spät	4.8 (4.7)	6.2 (6.2)	5.3 (3.2)	26.9 (5.9)	22.1 (7.3)	0.000	***
Birne früh	2.7 (3.0)	2.6 (2.3)	-2.2 (6.3)	16.4 (6.5)	13.7 (7.0)	0.029	***
Birne spät	2.6 (3.0)	2.0 (2.0)	-3.6 (5.9)	14.1 (6.6)	11.5 (7.1)	0.237	**
Wein	1.4 (1.6)	1.5 (1.5)	-1.2 (4.0)	19.5 (6.5)	18.2 (6.6)	0.000	***
Pflaume früh	3.8 (4.0)	4.0 (2.9)	1.0 (4.3)	19.7 (6.3)	15.8 (7.2)	0.008	***
Pflaume spät	3.8 (4.1)	2.9 (2.5)	-2.1 (4.6)	15.8 (6.5)	11.9 (7.4)	0.236	**

Tabelle K.7: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung**, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-2.5 (11.7)	-8.6 (11.7)	11.590	
Apfel spät	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-12.1 (11.0)	-18.3 (11.2)	0.843	**
Sauerkirsche	2.6 (2.8)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	3.0 (7.2)	0.4 (7.1)	88.883	
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	6.4 (7.9)	1.6 (8.1)	65.565	
Süßkirsche spät	4.8 (4.7)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	5.3 (7.8)	0.5 (8.1)	88.180	
Birne früh	2.7 (3.0)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-7.1 (11.5)	-9.7 (12.2)	9.018	
Birne spät	2.6 (3.0)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-10.0 (10.3)	-12.6 (10.2)	2.489	*
Wein	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-2.4 (9.4)	-3.8 (9.7)	33.990	
Pflaume früh	3.8 (4.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	-3.4 (9.8)	-7.2 (10.1)	12.698	
Pflaume spät	3.8 (4.1)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-8.4 (10.2)	-12.3 (10.5)	2.966	*

Tabelle K.8: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	-5.1 (3.2)	-15.0 (7.6)	-26.2 (14.3)	-32.4 (15.1)	0.395	**
Apfel spät	6.2 (3.9)	-6.9 (3.0)	-19.8 (7.5)	-36.0 (13.3)	-42.2 (13.1)	0.042	***
Sauerkirsche	2.5 (2.8)	-6.8 (2.5)	-13.6 (5.3)	-21.6 (8.7)	-24.2 (8.7)	0.085	***
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	-6.7 (2.2)	-12.7 (4.8)	-18.2 (9.5)	-22.9 (9.5)	0.071	***
Süßkirsche spät	4.8 (4.8)	-5.9 (2.5)	-12.1 (5.0)	-18.5 (9.3)	-23.3 (9.4)	0.061	***
Birne früh	2.7 (3.0)	-6.6 (3.4)	-18.3 (7.3)	-31.2 (13.9)	-33.9 (14.4)	0.288	**
Birne spät	2.6 (3.0)	-7.3 (2.8)	-20.0 (6.9)	-34.7 (12.5)	-37.3 (13.1)	0.139	**
Wein	1.4 (1.6)	-14.0 (2.8)	-33.4 (5.9)	-54.3 (12.9)	-55.6 (13.0)	0.029	***
Pflaume früh	3.8 (4.0)	-7.0 (2.2)	-17.5 (5.2)	-29.3 (11.6)	-33.2 (11.7)	0.075	***
Pflaume spät	3.8 (4.1)	-8.2 (2.6)	-21.1 (5.7)	-35.3 (12.2)	-39.2 (12.1)	0.042	***

Tabelle K.9: Statistik für die **Veränderung des Gesamtschadens** Δs_{ges} (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] (**Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: NoReleaseProb variiert**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

Worst Case	20% (D-A)	10% (D-A)	7% (D-A)	5% (D-A)	4% (D-A)	3% (D-A)	0% (D-A)
Apfel früh	-2.4 (10.7)	-5.5 (11.4)	-6.3 (11.7)	-7.1 (11.4)	-7.8 (11.9)	-8.2 (11.5)	-8.6 (11.7)
Apfel spät	-11.5 (9.8)	-14.8 (11.0)	-15.7 (11.2)	-16.6 (10.9)	-17.3 (11.4)	-17.8 (10.9)	-18.3 (11.2)
Sauerkirsche	6.3 (5.8)	3.4 (7.1)	2.6 (7.0)	1.8 (7.0)	1.2 (7.8)	0.8 (7.0)	0.4 (7.1)
Süßkirsche früh	7.3 (7.0)	4.5 (7.6)	3.7 (7.8)	3.0 (7.9)	2.4 (8.2)	2.0 (7.9)	1.6 (8.1)
Süßkirsche spät	6.2 (7.1)	3.4 (7.9)	2.6 (8.1)	1.9 (7.9)	1.3 (8.2)	0.9 (7.9)	0.5 (8.1)
Birne früh	-3.2 (10.3)	-6.5 (11.9)	-7.3 (12.2)	-8.2 (11.9)	-8.9 (12.4)	-9.3 (11.9)	-9.7 (12.2)
Birne spät	-5.9 (9.4)	-9.2 (10.1)	-10.1 (10.3)	-11.0 (10.0)	-11.7 (10.5)	-12.1 (10.0)	-12.6 (10.2)
Wein	2.4 (8.1)	-0.7 (9.6)	-1.5 (9.8)	-2.3 (9.4)	-3.0 (10.0)	-3.4 (9.5)	-3.8 (9.7)
Pflaume früh	-1.0 (8.8)	-4.1 (9.4)	-4.9 (10.2)	-5.7 (9.4)	-6.4 (10.4)	-6.8 (9.5)	-7.2 (10.1)
Pflaume spät	-5.7 (9.1)	-9.0 (10.3)	-9.9 (10.6)	-10.7 (10.3)	-11.4 (10.8)	-11.8 (10.3)	-12.3 (10.5)

Tabelle K.10: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20%**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	3.7 (10.5)	-2.4 (10.7)	58.609	
Apfel spät	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-5.3 (10.0)	-11.5 (9.8)	2.874	*
Sauerkirsche	2.6 (2.8)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	8.8 (5.5)	6.3 (5.8)	3.789	*
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	12.1 (6.1)	7.3 (7.0)	4.372	*
Süßkirsche spät	4.8 (4.7)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	11.0 (6.3)	6.2 (7.1)	8.033	
Birne früh	2.7 (3.0)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-0.6 (10.5)	-3.2 (10.3)	45.547	
Birne spät	2.6 (3.0)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-3.3 (9.3)	-5.9 (9.4)	16.406	
Wein	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	3.8 (7.9)	2.4 (8.1)	48.287	
Pflaume früh	3.8 (4.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	2.9 (8.7)	-1.0 (8.8)	79.832	
Pflaume spät	3.8 (4.1)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-1.9 (9.1)	-5.7 (9.1)	17.598	

Tabelle K.11: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 10 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	0.7 (11.3)	-5.5 (11.4)	26.963	
Apfel spät	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-8.6 (10.8)	-14.8 (11.0)	1.774	*
Sauerkirsche	2.6 (2.8)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	5.9 (7.1)	3.4 (7.1)	28.661	
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	9.3 (6.9)	4.5 (7.6)	21.897	
Süßkirsche spät	4.8 (4.7)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	8.2 (7.6)	3.4 (7.9)	35.034	
Birne früh	2.7 (3.0)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-3.8 (11.2)	-6.5 (11.9)	20.492	
Birne spät	2.6 (3.0)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-6.6 (10.2)	-9.2 (10.1)	6.481	
Wein	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	0.7 (9.4)	-0.7 (9.6)	85.093	
Pflaume früh	3.8 (4.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	-0.2 (9.5)	-4.1 (9.4)	33.293	
Pflaume spät	3.8 (4.1)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-5.1 (10.0)	-9.0 (10.3)	7.587	

Tabelle K.12: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 7 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-0.2 (11.7)	-6.3 (11.7)	22.253	
Apfel spät	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-9.5 (11.1)	-15.7 (11.2)	1.544	*
Sauerkirsche	2.6 (2.8)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	5.1 (6.8)	2.6 (7.0)	41.097	
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	8.5 (7.3)	3.7 (7.8)	31.654	
Süßkirsche spät	4.8 (4.7)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	7.4 (7.8)	2.6 (8.1)	47.317	
Birne früh	2.7 (3.0)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-4.7 (11.6)	-7.3 (12.2)	17.008	
Birne spät	2.6 (3.0)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-7.5 (10.4)	-10.1 (10.3)	5.293	
Wein	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-0.1 (9.5)	-1.5 (9.8)	69.282	
Pflaume früh	3.8 (4.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	-1.1 (9.9)	-4.9 (10.2)	27.029	
Pflaume spät	3.8 (4.1)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-6.0 (10.3)	-9.9 (10.6)	6.150	

Tabelle K.13: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 5 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-1.0 (11.4)	-7.1 (11.4)	16.839	
Apfel spät	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-10.4 (10.7)	-16.6 (10.9)	1.129	*
Sauerkirsche	2.6 (2.8)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	4.4 (7.1)	1.8 (7.0)	55.065	
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	7.8 (7.6)	3.0 (7.9)	41.313	
Süßkirsche spät	4.8 (4.7)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	6.7 (7.5)	1.9 (7.9)	59.620	
Birne früh	2.7 (3.0)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-5.5 (11.3)	-8.2 (11.9)	12.870	
Birne spät	2.6 (3.0)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-8.4 (10.1)	-11.0 (10.0)	3.728	*
Wein	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-0.9 (9.2)	-2.3 (9.4)	53.572	
Pflaume früh	3.8 (4.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	-1.9 (9.5)	-5.7 (9.4)	18.686	
Pflaume spät	3.8 (4.1)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-6.9 (10.0)	-10.7 (10.3)	4.351	*

Tabelle K.14: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 4 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-1.6 (11.9)	-7.8 (11.9)	15.206	
Apfel spät	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-11.2 (11.3)	-17.3 (11.4)	1.136	*
Sauerkirsche	2.6 (2.8)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	3.7 (7.6)	1.2 (7.8)	71.301	
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	7.2 (8.0)	2.4 (8.2)	52.356	
Süßkirsche spät	4.8 (4.7)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	6.1 (8.0)	1.3 (8.2)	72.855	
Birne früh	2.7 (3.0)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-6.2 (11.8)	-8.9 (12.4)	11.750	
Birne spät	2.6 (3.0)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-9.1 (10.6)	-11.7 (10.5)	3.508	*
Wein	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-1.6 (9.7)	-3.0 (10.0)	45.715	
Pflaume früh	3.8 (4.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	-2.5 (10.1)	-6.4 (10.4)	17.450	
Pflaume spät	3.8 (4.1)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-7.6 (10.6)	-11.4 (10.8)	4.150	*

Tabelle K.15: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 3 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	6.1 (3.8)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-2.0 (11.4)	-8.2 (11.5)	12.536	
Apfel spät	6.2 (3.9)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-11.6 (10.7)	-17.8 (10.9)	0.869	**
Sauerkirsche	2.6 (2.8)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	3.4 (7.1)	0.8 (7.0)	78.341	
Süßkirsche früh	4.8 (4.7)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	6.8 (7.6)	2.0 (7.9)	57.125	
Süßkirsche spät	4.8 (4.7)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	5.7 (7.6)	0.9 (7.9)	79.249	
Birne früh	2.7 (3.0)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-6.6 (11.3)	-9.3 (11.9)	9.636	
Birne spät	2.6 (3.0)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-9.5 (10.1)	-12.1 (10.0)	2.647	*
Wein	1.4 (1.6)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-2.0 (9.2)	-3.4 (9.5)	38.222	
Pflaume früh	3.8 (4.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	-2.9 (9.6)	-6.8 (9.5)	12.983	
Pflaume spät	3.8 (4.1)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-8.0 (10.0)	-11.8 (10.3)	3.178	*

Tabelle K.16: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-m**, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.6 (1.3)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	-2.5 (11.7)	-3.1 (11.8)	50.970	
Apfel spät	0.6 (1.5)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-12.1 (11.0)	-12.7 (11.2)	3.464	*
Sauerkirsche	0.0 (1.1)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	3.0 (7.2)	3.0 (7.4)	32.475	
Süßkirsche früh	0.0 (1.2)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	6.4 (7.9)	6.4 (8.0)	9.056	
Süßkirsche spät	0.0 (1.0)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	5.3 (7.8)	5.3 (7.9)	13.436	
Birne früh	0.0 (1.2)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-7.1 (11.5)	-7.1 (11.7)	16.848	
Birne spät	0.0 (1.4)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-10.0 (10.3)	-9.9 (10.5)	5.868	
Wein	0.0 (1.2)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	-2.4 (9.4)	-2.4 (9.6)	52.270	
Pflaume früh	0.0 (1.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	-3.4 (9.8)	-3.4 (9.9)	40.103	
Pflaume spät	0.0 (1.1)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-8.4 (10.2)	-8.4 (10.3)	8.654	

Tabelle K.17: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-m, mit CO₂-Düngung**, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.6 (1.3)	-5.1 (3.2)	-15.0 (7.6)	-26.2 (14.3)	-26.9 (14.4)	0.661	**
Apfel spät	0.6 (1.5)	-6.9 (3.0)	-19.8 (7.5)	-36.0 (13.3)	-36.6 (13.4)	0.163	**
Sauerkirsche	0.0 (1.1)	-6.8 (2.5)	-13.6 (5.3)	-21.6 (8.7)	-21.6 (8.8)	0.244	**
Süßkirsche früh	0.0 (1.2)	-6.7 (2.2)	-12.7 (4.8)	-18.2 (9.5)	-18.2 (9.6)	0.632	**
Süßkirsche spät	0.0 (1.0)	-5.9 (2.5)	-12.1 (5.0)	-18.5 (9.3)	-18.5 (9.4)	0.549	**
Birne früh	0.0 (1.2)	-6.6 (3.4)	-18.3 (7.3)	-31.2 (13.9)	-31.2 (14.0)	0.350	**
Birne spät	0.0 (1.4)	-7.3 (2.8)	-20.0 (6.9)	-34.7 (12.5)	-34.6 (12.6)	0.161	**
Wein	0.0 (1.1)	-14.0 (2.8)	-33.4 (5.9)	-54.3 (12.9)	-54.3 (12.9)	0.031	***
Pflaume früh	0.0 (1.0)	-7.0 (2.2)	-17.5 (5.2)	-29.3 (11.6)	-29.3 (11.7)	0.224	**
Pflaume spät	0.0 (1.1)	-8.2 (2.6)	-21.1 (5.7)	-35.3 (12.2)	-35.3 (12.3)	0.133	**

Tabelle K.18: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie m-m, ohne CO₂-Düngung**, Worst Case: 20 %); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: $p < 5\%$; **: $p < 1\%$; ***: $p < 0.1\%$.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.6 (1.3)	1.1 (3.0)	-1.0 (6.8)	3.7 (10.5)	3.1 (10.6)	45.886	
Apfel spät	0.6 (1.5)	-1.0 (2.8)	-6.2 (6.8)	-5.3 (10.0)	-5.9 (10.2)	18.440	
Sauerkirsche	0.0 (1.1)	0.1 (2.4)	1.3 (4.9)	8.8 (5.5)	8.8 (5.7)	0.900	**
Süßkirsche früh	0.0 (1.2)	0.4 (2.2)	2.5 (4.8)	12.1 (6.1)	12.1 (6.3)	0.334	**
Süßkirsche spät	0.0 (1.0)	0.8 (2.6)	2.5 (4.6)	11.0 (6.3)	11.0 (6.5)	0.710	**
Birne früh	0.0 (1.2)	-0.3 (3.3)	-4.2 (6.6)	-0.6 (10.5)	-0.6 (10.6)	89.156	
Birne spät	0.0 (1.4)	-1.0 (2.7)	-5.7 (6.2)	-3.3 (9.3)	-3.3 (9.5)	39.623	
Wein	0.0 (1.2)	0.3 (3.0)	-1.9 (4.9)	3.8 (7.9)	3.8 (8.0)	28.125	
Pflaume früh	0.0 (1.0)	0.1 (2.4)	-1.9 (4.9)	2.9 (8.7)	2.9 (8.8)	41.322	
Pflaume spät	0.0 (1.1)	-1.2 (2.5)	-5.1 (5.3)	-1.9 (9.1)	-1.8 (9.2)	60.978	

K.1.2 Bilder

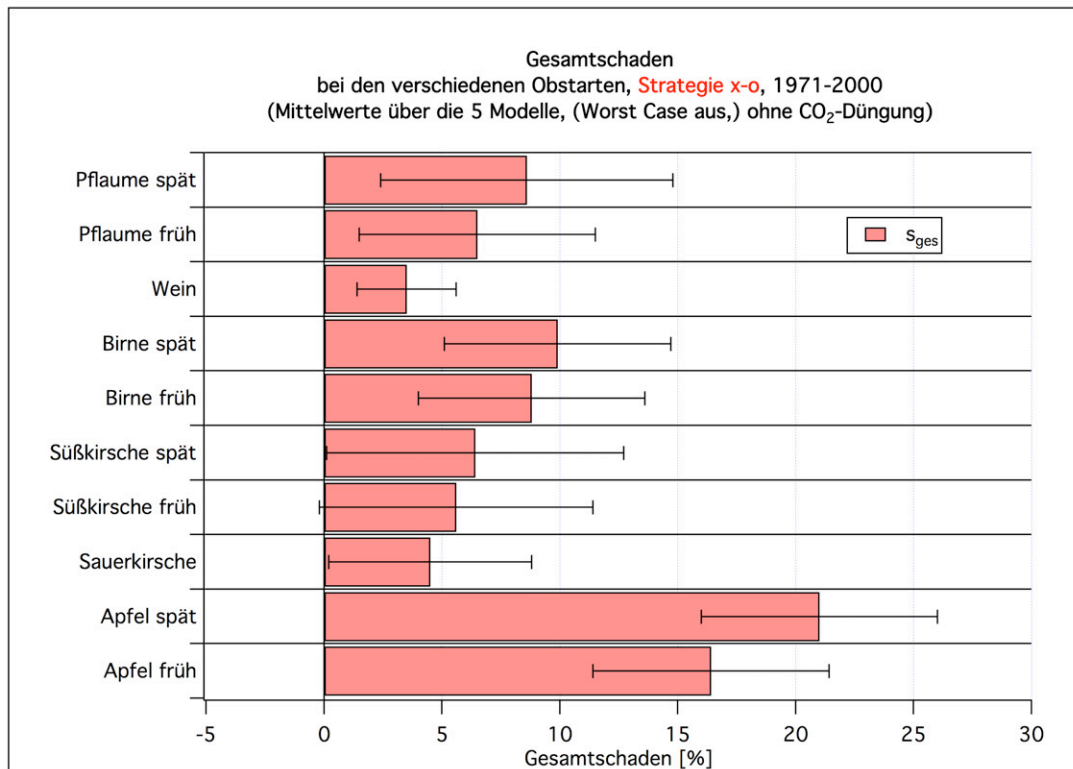


Abbildung K.1: Gesamtschaden s_{ges} (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie x-o**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS (ist aber im Zeitraum 1971-2000 ohne Relevanz!))

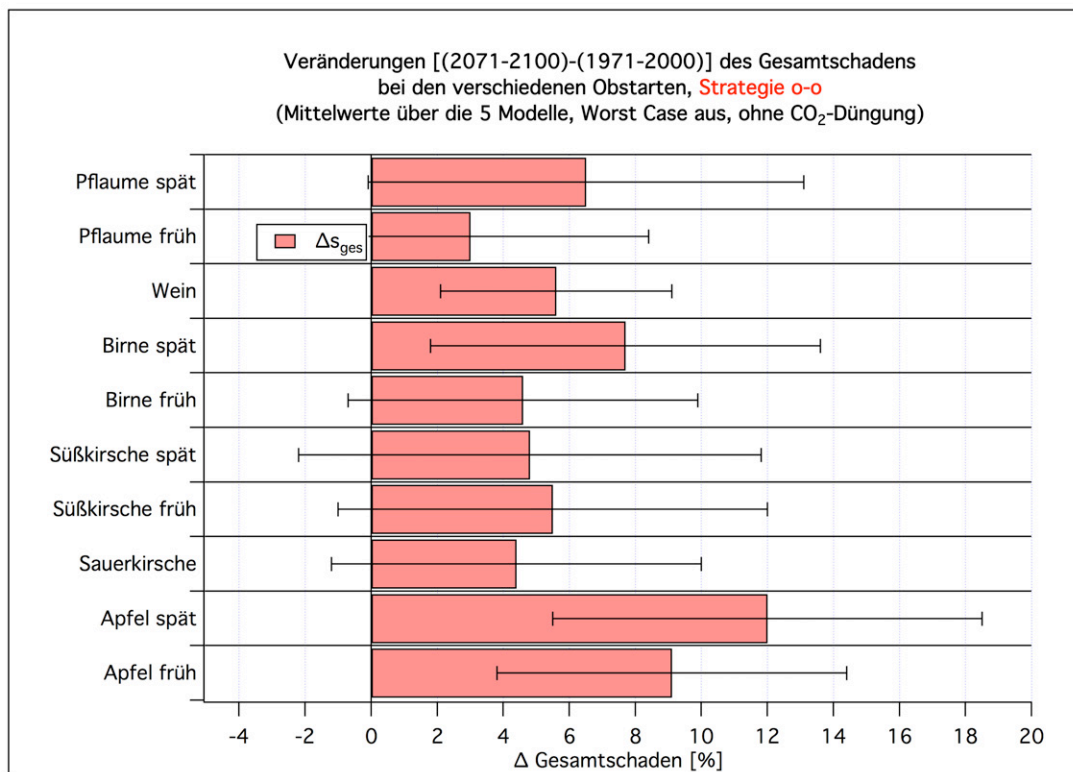


Abbildung K.2: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie o-o, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

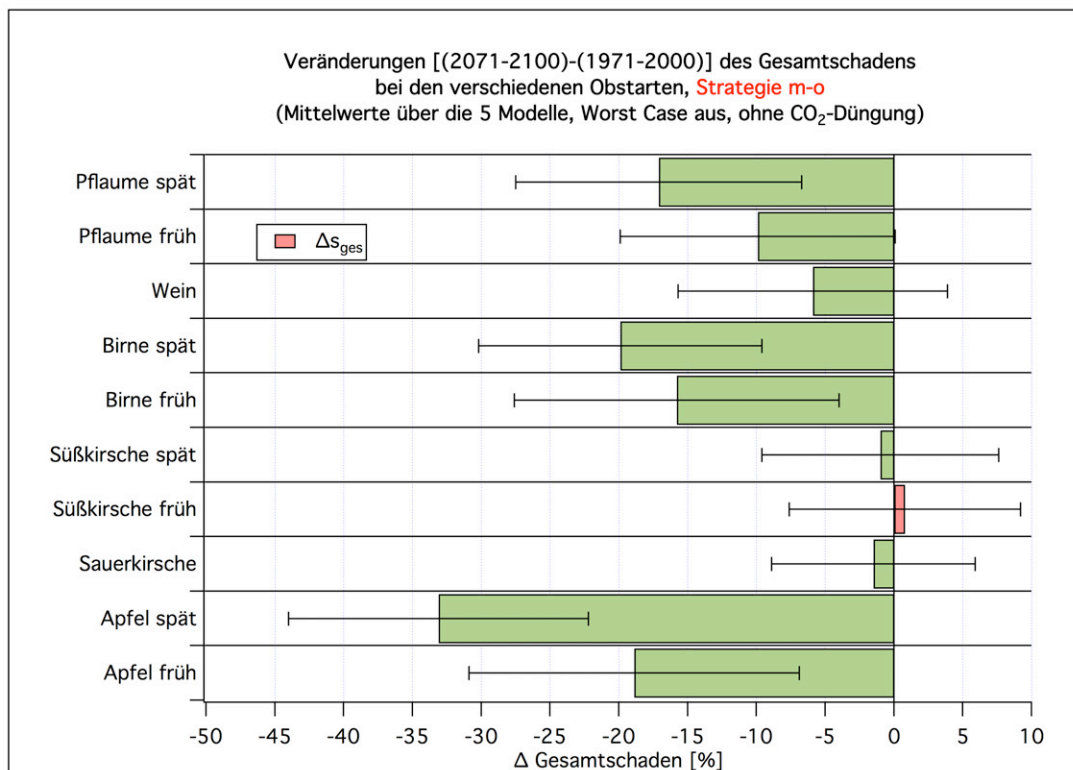


Abbildung K.3: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-o, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

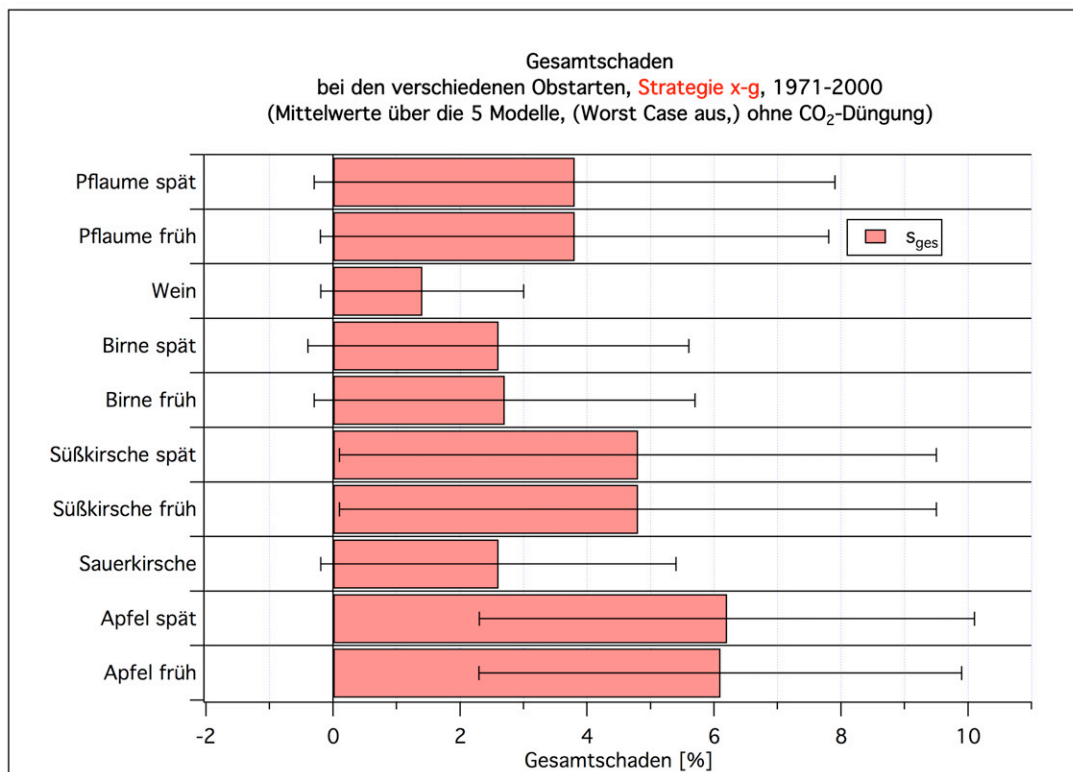


Abbildung K.4: Gesamtschaden s_{ges} (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie x-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS (ist aber im Zeitraum 1971-2000 ohne Relevanz!))

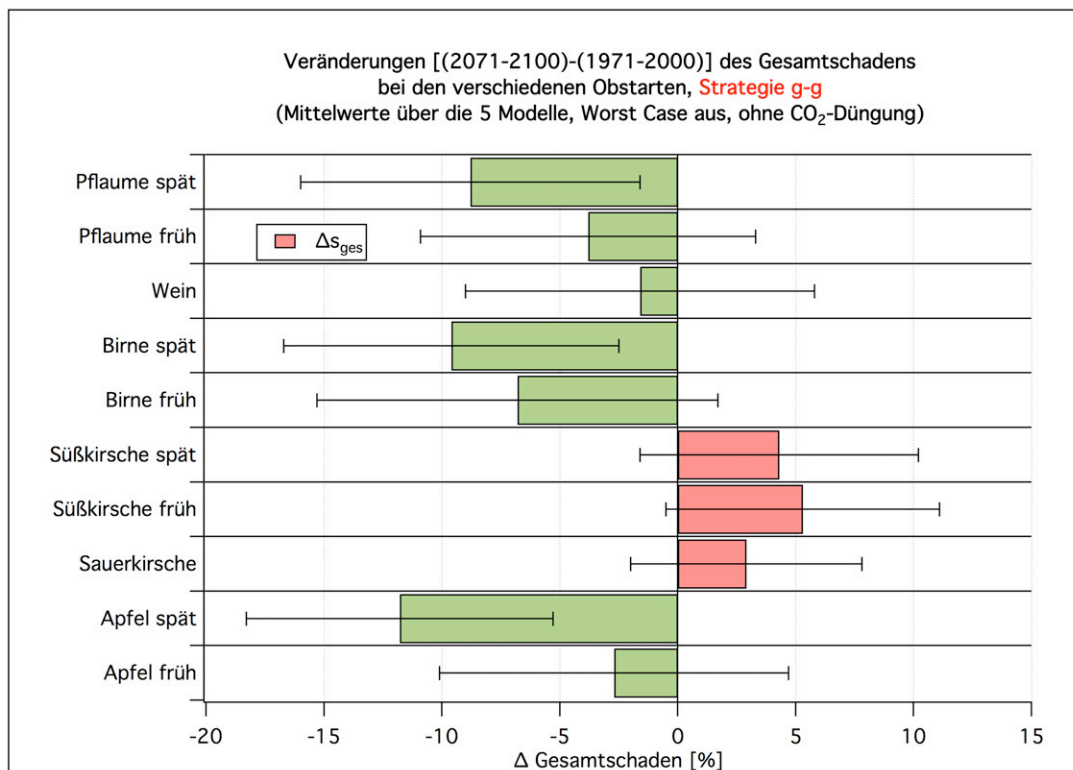


Abbildung K.5: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

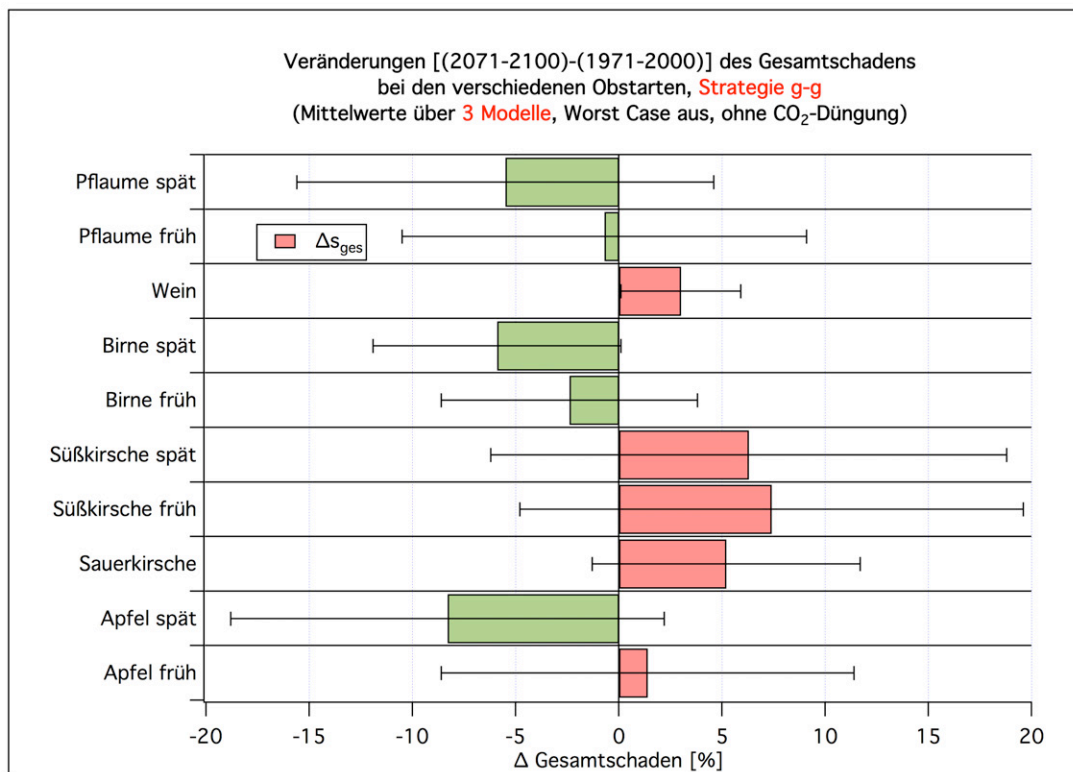


Abbildung K.6: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe (ohne WETTREG), ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

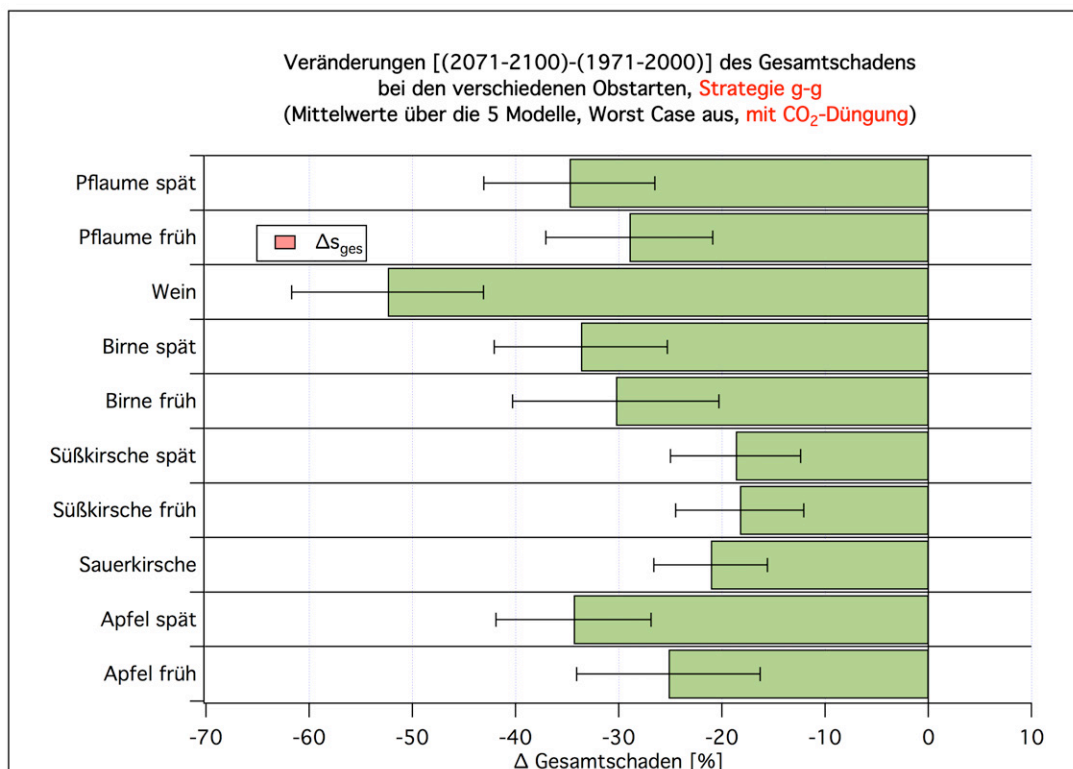


Abbildung K.7: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

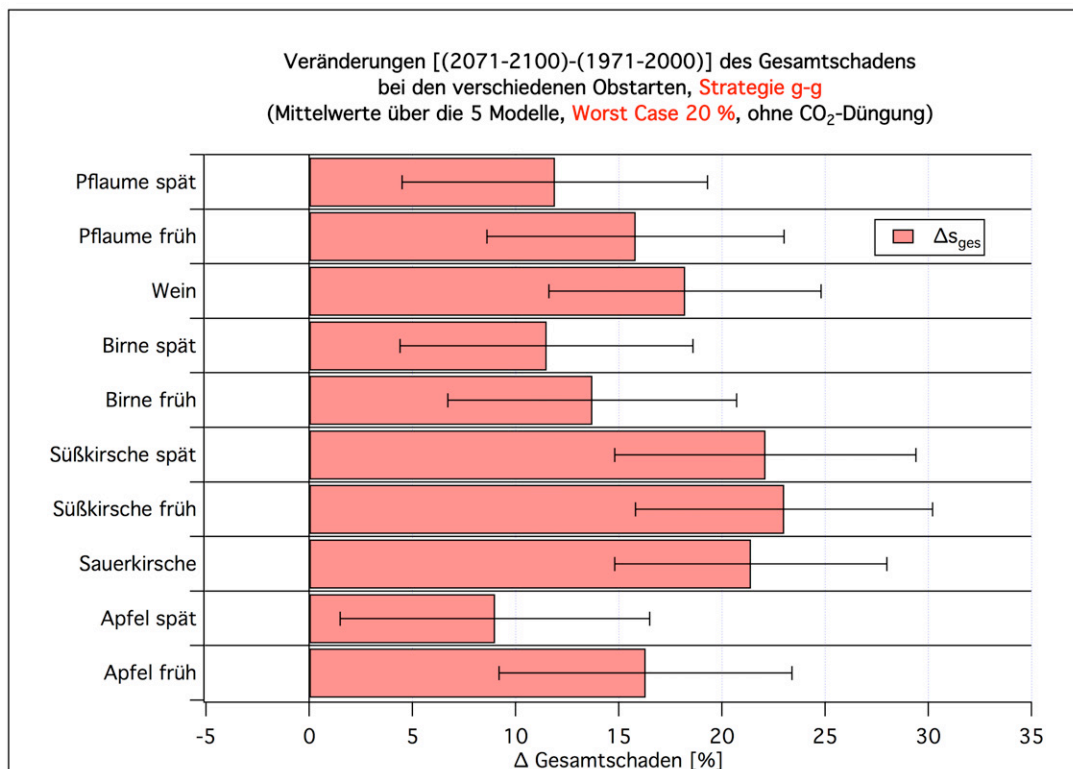


Abbildung K.8: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 20 %**)

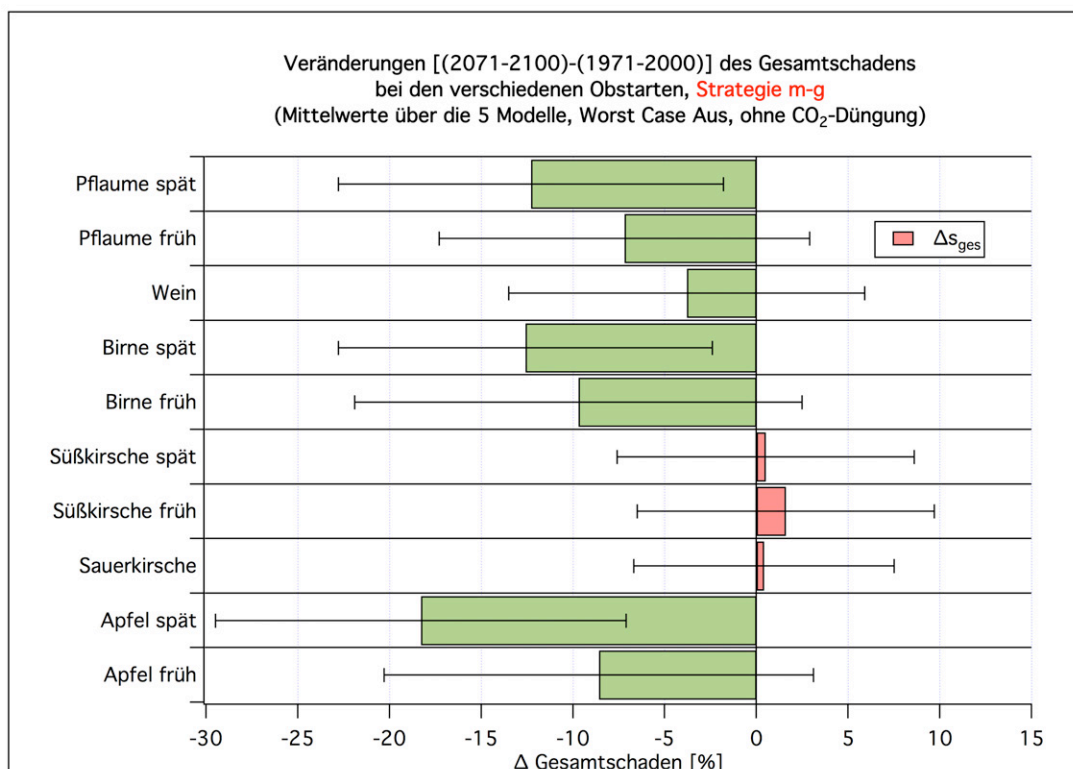


Abbildung K.9: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: AUS**)

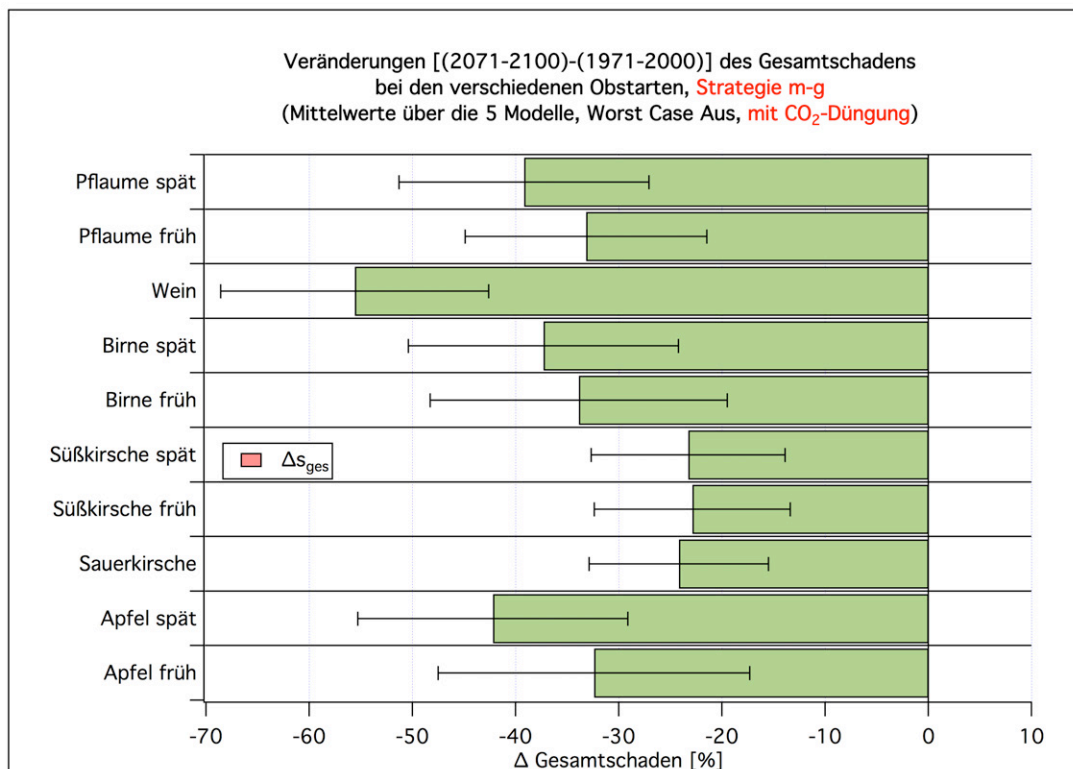


Abbildung K.10: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

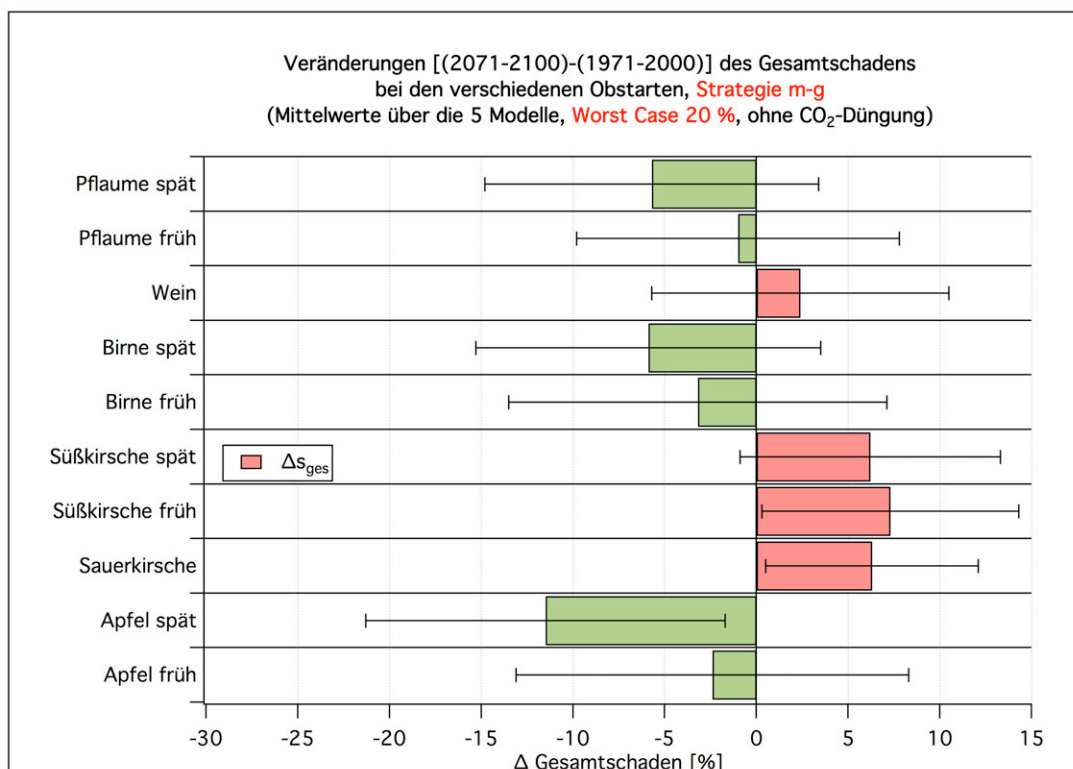


Abbildung K.11: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20 %)

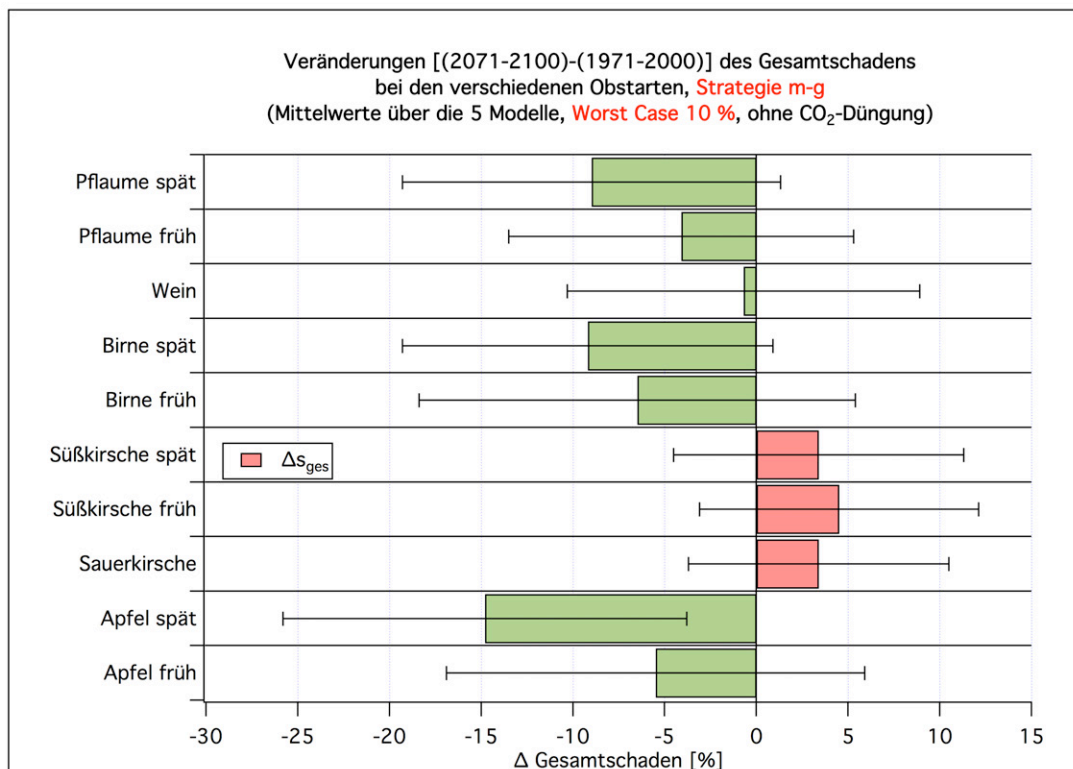


Abbildung K.12: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 10 %)

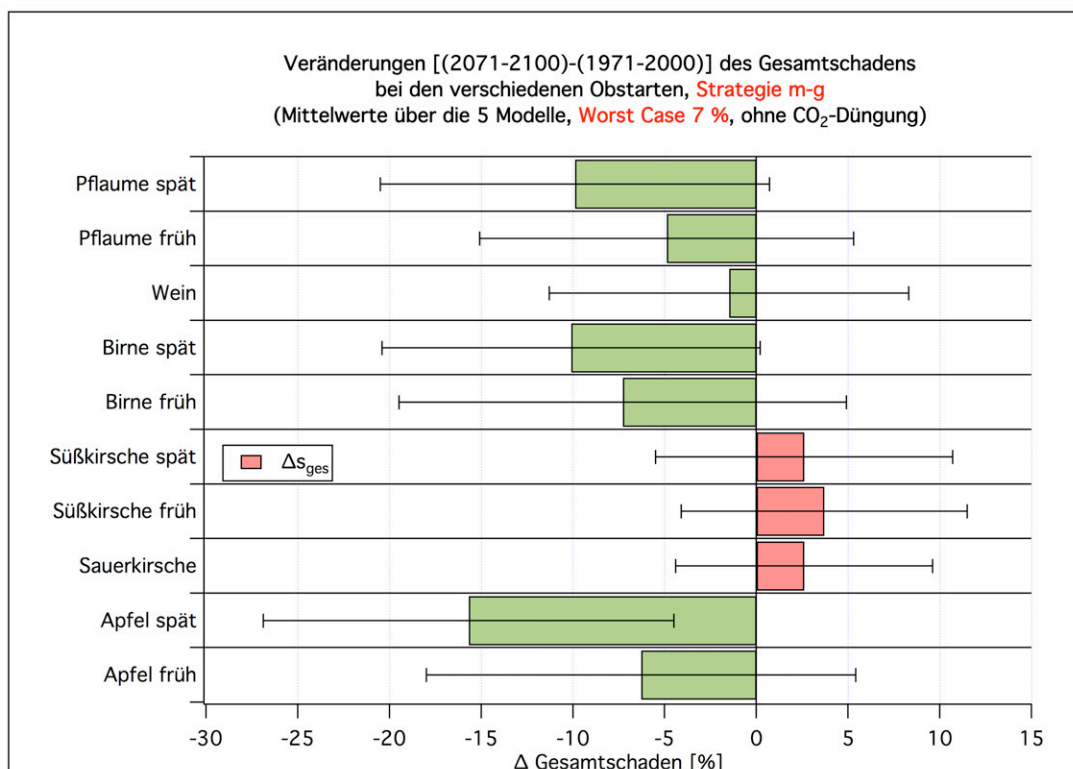


Abbildung K.13: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 7 %)

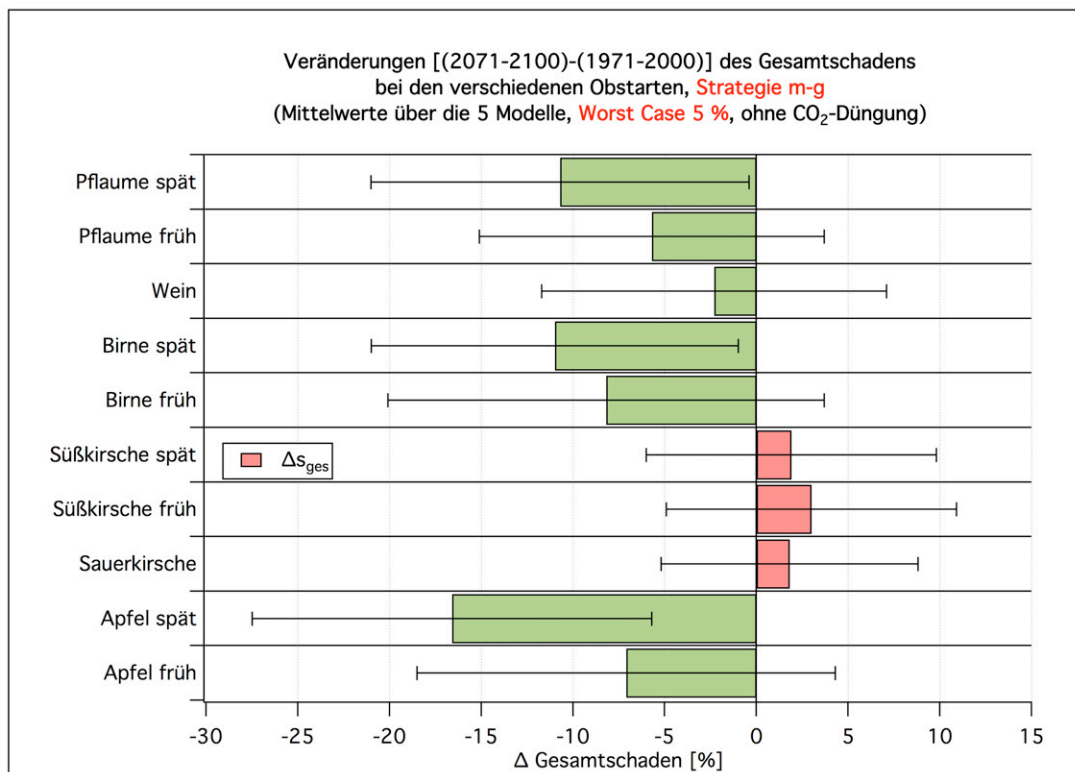


Abbildung K.14: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 5 %)

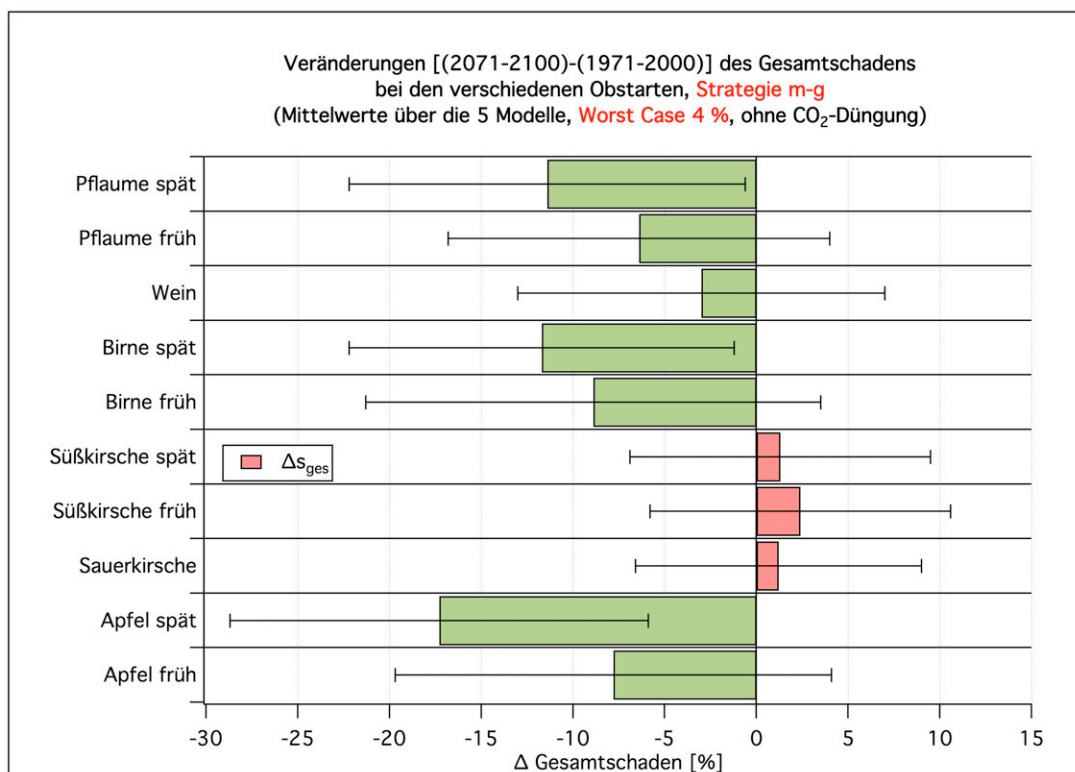


Abbildung K.15: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 4 %)

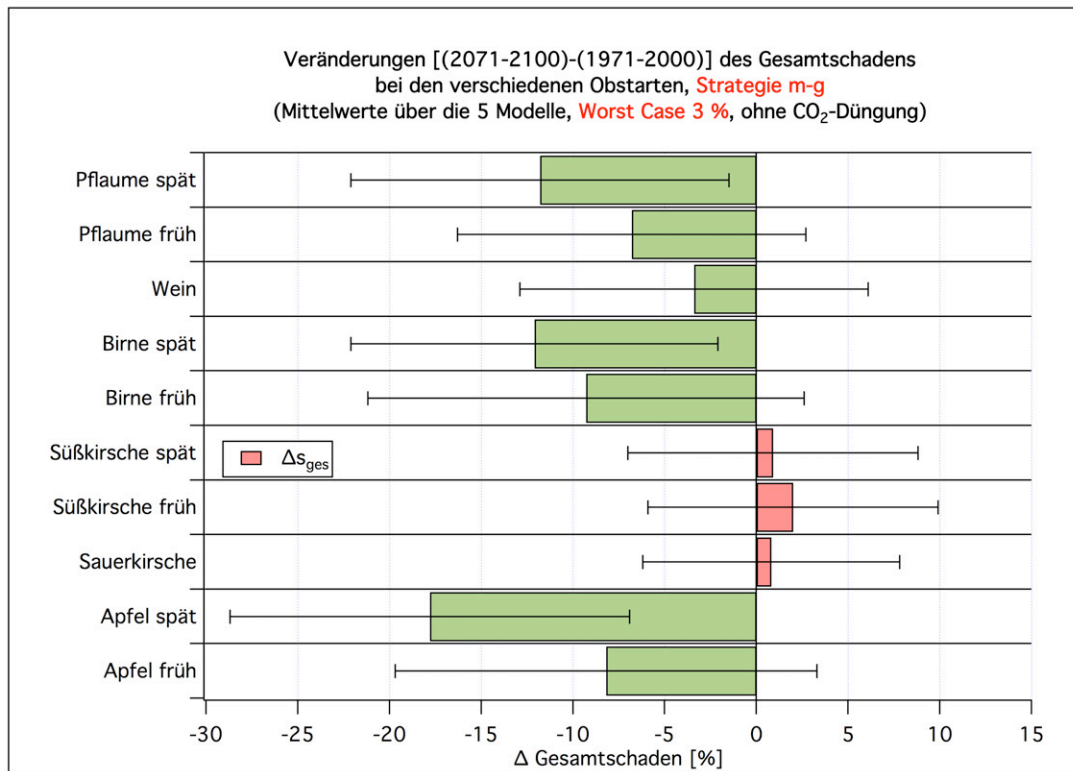


Abbildung K.16: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 3 %**)

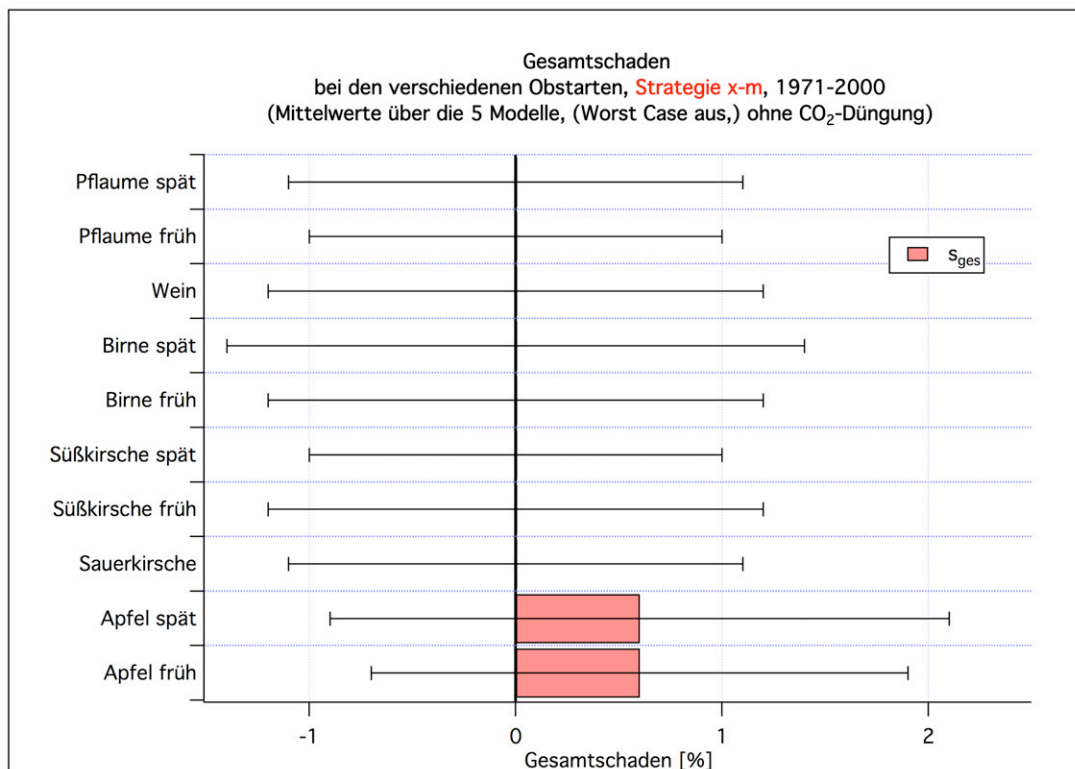


Abbildung K.17: Gesamtschaden s_{ges} (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie x-m**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS (ist aber im Zeitraum 1971-2000 ohne Relevanz!))

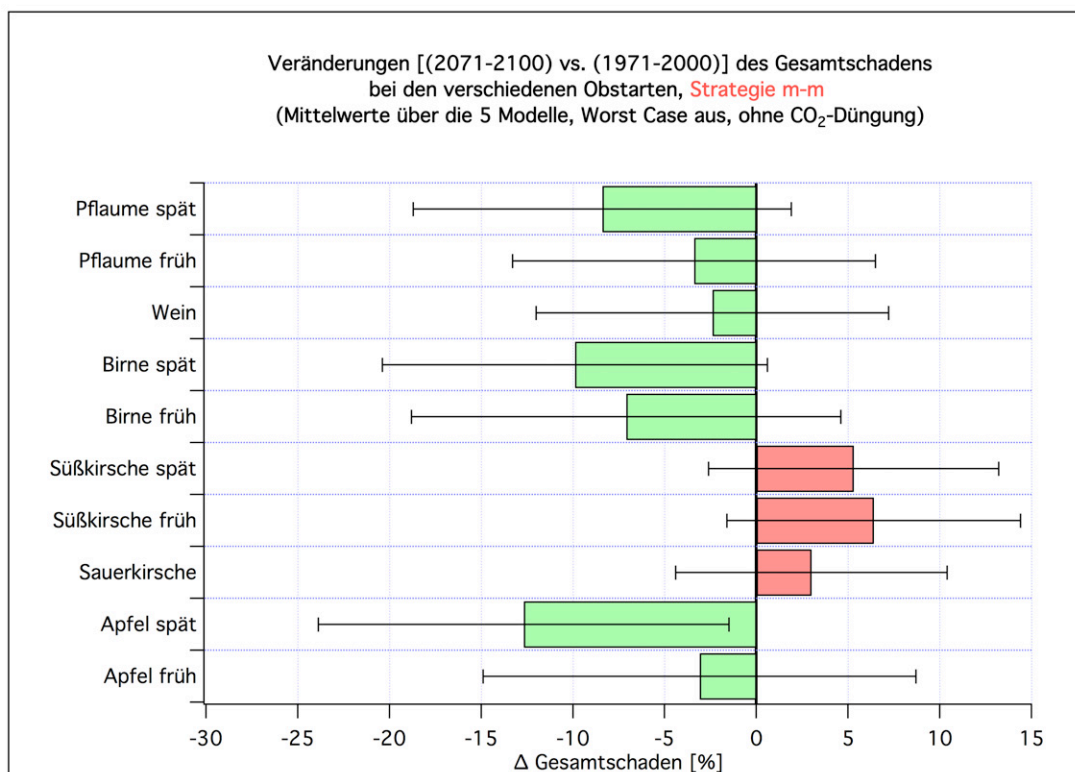


Abbildung K.18: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

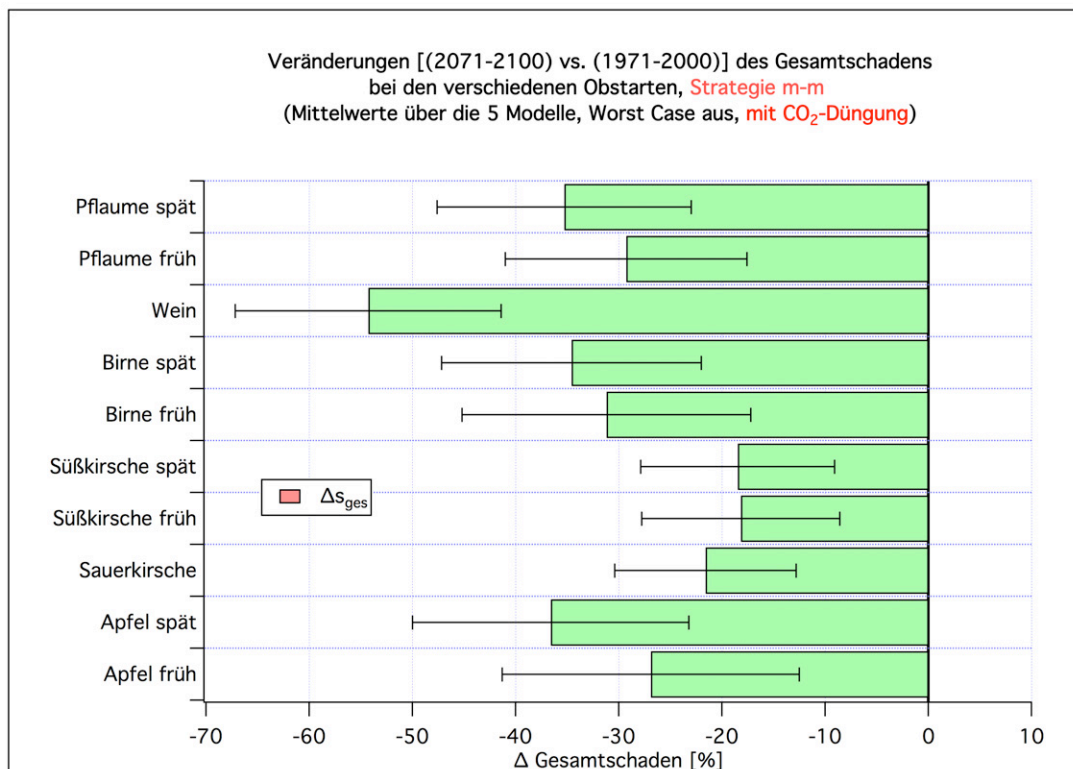


Abbildung K.19: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-m, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

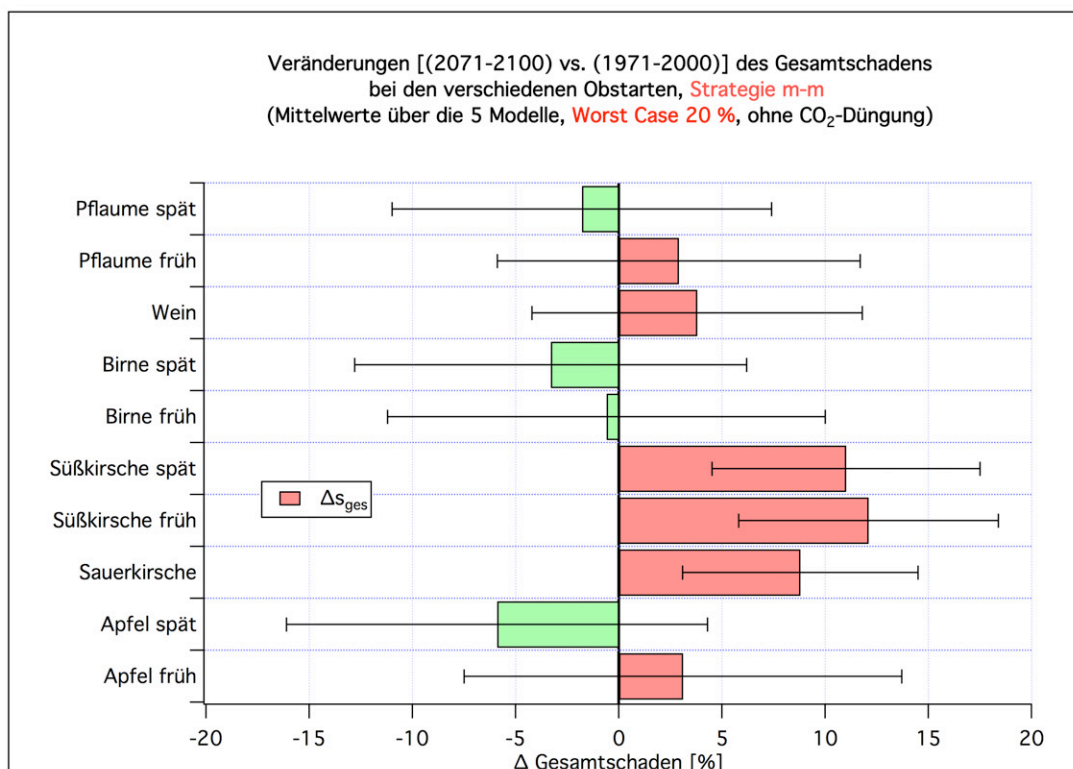


Abbildung K.20: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-m, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20 %)

K.2 Gesamtkosten des Klimawandels

K.2.1 Rentabilität der Maßnahmen bzw. Strategien

Der zu erzielende Nettogewinn durch Anwendung der Strategie y anstelle der Strategie x wurde ausführlich in Kapitel 4.12.3 erklärt [siehe auch Gleichungen (4.205) und (4.206)]. Ein Teil der Ergebnisse wurde bereits in Kapitel 5.7.2.1 diskutiert. Eine Zusammenfassung der Einträge in den folgenden Tabellen bezüglich unterschiedlicher Strategie- und Impaktmodellvariationen jeweils für den früh- und spätreifen Apfel, die Sauerkirsche und den Wein findet man dort in den Tabellen 5.16 ff.

Man beachte, dass beim Nettogewinn bereits der Eintrag in den Spalten (A) bis (D) darüber entscheidet, ob eine Strategie y bezüglich einer anderen Strategie x im entsprechenden Zeitraum im Mittel rentabel ist bzw. Einsparungen bringt. Die Differenzspalte, auf der sich der p-Wert und die Signifikanzspalte beziehen, gibt bei dieser Größe nur an, ob sich die Rentabilität im Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Zeitraum 1971-2000 vergrößert oder verkleinert. Ein negativer Wert in der (D-A)-Spalte bedeutet nicht, dass die Strategie y schlechter ist als die Strategie x. In z. B. Tabelle K.23 ist die m-Strategie der g-Strategie bei der frühreifen Süßkirsche in jedem der 30-Jahreszeiträume überlegen (wenn auch nicht signifikant), und trotzdem ist der Eintrag in der Differenzspalte negativ. Das bedeutet nur, dass der Gewinn durch Nutzung der m- anstelle der g-Strategie im Zeitraum 2071-2100 etwas geringer ausfällt als 1971-2000. Er ist aber trotzdem in beiden Zeiträumen positiv.

Tabelle K.19: Statistik für den **Nettogewinn** bei der Anwendung der **Strategie w** anstelle der **Strategie o** (in €/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, WorstCase: AUS; Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	457. (39.)	476. (26.)	708. (160.)	1002. (111.)	545. (115.)	0.000	***
Apfel spät	468. (34.)	488. (27.)	691. (124.)	942. (62.)	474. (70.)	0.000	***
alle anderen	0. (0.)	0. (0.)	0. (0.)	0. (0.)	0. (0.)	100.000	

Tabelle K.20: Statistik für den **Nettogewinn** bei der Anwendung der **Strategie g** anstelle der **Strategie o** (in €/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS; Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	914. (182.)	1008. (305.)	1448. (392.)	2199. (1022.)	1285. (1052.)	2.747	*
Apfel spät	1499. (254.)	1788. (380.)	2782. (877.)	4271. (1462.)	2771. (1503.)	0.688	**
Sauerkirsche	-18. (45.)	9. (118.)	-17. (54.)	9. (79.)	27. (86.)	49.841	
Süßkirsche früh	43. (125.)	73. (192.)	34. (60.)	53. (76.)	10. (137.)	88.336	
Süßkirsche spät	127. (180.)	199. (355.)	120. (114.)	177. (167.)	50. (230.)	65.129	
Birne früh	337. (147.)	422. (213.)	728. (318.)	1195. (834.)	858. (857.)	4.980	*
Birne spät	438. (167.)	579. (239.)	1060. (441.)	1814. (1011.)	1376. (1035.)	2.097	*
Wein	58. (120.)	115. (115.)	331. (206.)	624. (436.)	565. (456.)	2.431	*
Pflaume früh	-20. (27.)	25. (75.)	63. (60.)	202. (219.)	222. (221.)	4.949	*
Pflaume spät	49. (71.)	125. (84.)	329. (191.)	629. (421.)	581. (431.)	2.008	*

Tabelle K.21: Statistik für den **Nettogewinn** bei der Anwendung der **Strategie v** anstelle der **Strategie o** (in €/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, WorstCase: AUS; Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	1228. (491.)	1347. (463.)	1642. (506.)	2557. (1429.)	1330. (1432.)	6.267	
Apfel spät	1855. (532.)	2186. (628.)	3026. (988.)	4717. (1967.)	2862. (2073.)	1.856	*
Sauerkirsche	-115. (96.)	-95. (95.)	-169. (53.)	-43. (83.)	72. (119.)	22.513	
Süßkirsche früh	320. (679.)	396. (497.)	47. (106.)	309. (361.)	-10. (724.)	97.546	
Süßkirsche spät	434. (803.)	554. (548.)	147. (134.)	462. (406.)	28. (837.)	94.214	
Birne früh	289. (291.)	365. (244.)	561. (356.)	1204. (993.)	915. (977.)	6.094	
Birne spät	399. (309.)	539. (281.)	904. (498.)	1840. (1186.)	1441. (1245.)	3.251	*
Wein	116. (171.)	172. (190.)	338. (212.)	755. (567.)	639. (571.)	3.375	*
Pflaume früh	-191. (102.)	-177. (79.)	-205. (91.)	69. (251.)	260. (259.)	4.955	*
Pflaume spät	-103. (162.)	-51. (93.)	81. (225.)	521. (445.)	624. (457.)	1.567	*

Tabelle K.22: Statistik für den **Nettogewinn** bei der Anwendung der **Strategie m** anstelle der **Strategie o** (in €/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS; Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	1262. (491.)	1383. (468.)	1689. (522.)	2614. (1455.)	1352. (1454.)	6.238	
Apfel spät	1908. (532.)	2246. (637.)	3104. (1007.)	4814. (1992.)	2906. (2097.)	1.833	*
Sauerkirsche	-115. (96.)	-95. (95.)	-169. (53.)	-43. (83.)	72. (119.)	22.513	
Süßkirsche früh	320. (679.)	396. (497.)	47. (106.)	309. (361.)	-10. (724.)	97.546	
Süßkirsche spät	434. (803.)	554. (548.)	147. (134.)	462. (406.)	28. (837.)	94.214	
Birne früh	289. (291.)	365. (244.)	561. (356.)	1204. (993.)	915. (977.)	6.094	
Birne spät	399. (309.)	539. (281.)	904. (498.)	1840. (1186.)	1441. (1245.)	3.251	*
Wein	116. (171.)	172. (190.)	338. (212.)	755. (567.)	639. (571.)	3.375	*
Pflaume früh	-191. (102.)	-177. (79.)	-205. (91.)	69. (251.)	260. (259.)	4.955	*
Pflaume spät	-103. (162.)	-51. (93.)	81. (225.)	521. (445.)	624. (457.)	1.567	*

Tabelle K.23: Statistik für den **Nettogewinn** bei der Anwendung der **Strategie m** anstelle der **Strategie g** (in €/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS; Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	347. (398.)	374. (344.)	241. (107.)	414. (409.)	67. (534.)	79.857	
Apfel spät	408. (443.)	458. (419.)	322. (122.)	543. (492.)	135. (621.)	65.861	
Sauerkirsche	-97. (58.)	-104. (63.)	-152. (44.)	-52. (76.)	44. (93.)	34.130	
Süßkirsche früh	277. (563.)	324. (494.)	13. (91.)	257. (355.)	-20. (627.)	94.689	
Süßkirsche spät	307. (596.)	355. (520.)	27. (95.)	284. (383.)	-23. (668.)	94.348	
Birne früh	-49. (169.)	-56. (122.)	-166. (69.)	9. (186.)	58. (241.)	62.927	
Birne spät	-38. (179.)	-41. (134.)	-156. (71.)	26. (201.)	64. (257.)	61.450	
Wein	57. (84.)	57. (122.)	6. (43.)	132. (179.)	74. (196.)	44.921	
Pflaume früh	-171. (85.)	-201. (73.)	-268. (66.)	-133. (90.)	38. (120.)	52.646	
Pflaume spät	-152. (99.)	-176. (82.)	-248. (71.)	-109. (103.)	43. (137.)	53.008	

Tabelle K.24: Statistik für den **Nettogewinn** bei der Anwendung der **Strategie m anstelle der Strategie g** (in €/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (**nur 3 Klimamodellläufe**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS; Mittelwerte über nur 3 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	366. (955.)	346. (875.)	171. (122.)	179. (368.)	-187. (932.)	60.732	
Apfel spät	432. (1065.)	443. (1067.)	252. (150.)	267. (494.)	-165. (1071.)	69.028	
Sauerkirsche	-98. (138.)	-108. (95.)	-166. (61.)	-64. (62.)	35. (138.)	56.997	
Süßkirsche früh	321. (1333.)	339. (1259.)	-42. (80.)	60. (289.)	-261. (1397.)	59.345	
Süßkirsche spät	357. (1412.)	371. (1323.)	-28. (86.)	73. (321.)	-284. (1485.)	58.617	
Birne früh	-20. (375.)	-36. (220.)	-157. (152.)	-77. (118.)	-57. (377.)	71.618	
Birne spät	-8. (395.)	-17. (259.)	-146. (178.)	-67. (127.)	-60. (399.)	71.641	
Wein	25. (208.)	62. (166.)	-10. (27.)	49. (134.)	24. (205.)	78.808	
Pflaume früh	-165. (184.)	-179. (106.)	-248. (124.)	-156. (93.)	10. (192.)	91.004	
Pflaume spät	-141. (225.)	-151. (120.)	-227. (144.)	-143. (95.)	-2. (229.)	98.228	

Tabelle K.25: Statistik für den **Nettogewinn** bei der Anwendung der **Strategie m anstelle der Strategie g** (in €/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS; Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	347. (398.)	417. (371.)	321. (120.)	578. (521.)	231. (618.)	44.755	
Apfel spät	408. (443.)	502. (450.)	406. (139.)	721. (611.)	313. (714.)	37.472	
Sauerkirsche	-97. (58.)	-97. (65.)	-142. (42.)	-25. (95.)	72. (109.)	18.866	
Süßkirsche früh	276. (564.)	371. (543.)	68. (108.)	381. (472.)	105. (689.)	75.332	
Süßkirsche spät	306. (597.)	402. (569.)	82. (112.)	410. (501.)	104. (731.)	77.032	
Birne früh	-49. (169.)	-41. (129.)	-142. (71.)	68. (231.)	117. (275.)	39.516	
Birne spät	-39. (181.)	-24. (148.)	-131. (73.)	88. (250.)	127. (296.)	38.885	
Wein	57. (85.)	69. (133.)	27. (56.)	231. (272.)	173. (284.)	22.204	
Pflaume früh	-171. (85.)	-189. (76.)	-247. (67.)	-94. (110.)	77. (135.)	25.660	
Pflaume spät	-152. (99.)	-162. (86.)	-225. (74.)	-65. (128.)	87. (156.)	26.549	

Tabelle K.26: Statistik für den **Nettogewinn** bei der Anwendung der **Strategie m anstelle der Strategie g** (in €/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20 %**; Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	347. (398.)	374. (344.)	241. (107.)	1949. (533.)	1601. (631.)	0.001	***
Apfel spät	408. (443.)	458. (419.)	322. (122.)	2367. (636.)	1959. (737.)	0.001	***
Sauerkirsche	-97. (58.)	-104. (63.)	-152. (44.)	482. (187.)	578. (194.)	0.000	***
Süßkirsche früh	277. (563.)	324. (494.)	13. (91.)	1827. (542.)	1550. (734.)	0.020	***
Süßkirsche spät	307. (596.)	355. (520.)	27. (95.)	1939. (574.)	1632. (776.)	0.021	***
Birne früh	-49. (169.)	-56. (122.)	-166. (69.)	1255. (412.)	1304. (437.)	0.000	***
Birne spät	-38. (179.)	-41. (134.)	-156. (71.)	1363. (440.)	1401. (466.)	0.000	***
Wein	57. (84.)	57. (122.)	6. (43.)	1401. (425.)	1344. (432.)	0.000	***
Pflaume früh	-171. (85.)	-201. (73.)	-268. (66.)	464. (204.)	635. (217.)	0.000	***
Pflaume spät	-152. (99.)	-176. (82.)	-248. (71.)	590. (235.)	741. (250.)	0.000	***

K.2.2 Kosten *KK* des Klimawandels (flächenspezifisch)

Die Methodik zur Berechnung der Gesamtkosten *KK* des Klimawandels und die hierbei verwendeten Strategien wurden ausführlich im Abschnitt 4.12.4 erläutert. Im Abschnitt K.2.2.1.1 werden zunächst die auf die Fläche bezogenen, über 30 Jahre gemittelten Kosten (in €/ha/a) und danach in Abschnitt K.2.2.1.2 die akkumulierten Kosten $\sum_{2002}^j KK$ (in €/ha) in Tabellenform gelistet. Danach werden in Abschnitt K.2.2.2.1 zuerst die 30-jährigen Mittelwerte der *KK* (2071-2100 vs. 1971-2000) und anschließend in Abschnitt K.2.2.2.2 der jährliche Verlauf bis zum Jahr 2100 graphisch veranschaulicht. Im Abschnitt K.2.2.2.3 werden schließlich auch noch die aufsummierten Kosten $\sum_{2002}^j KK$ für alle Obstarten visualisiert.

K.2.2.1 Tabellen

K.2.2.1.1 30-jährige Mittelwerte und Differenzen

Eine kurze Diskussion zu *KK* findet man auf Seite 272 in Kapitel 5.7.2.2. Die Besonderheiten der Konfidenzintervalle der Gesamtkosten des Klimawandels (*KK* und *KKA*) wurden bereits auf Seite 176 diskutiert.

Tabelle K.27: Statistik für die Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie o-o**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (248.)	215. (271.)	322. (519.)	1118. (594.)	1118. (628.)	0.188	**
Apfel spät	0. (261.)	183. (343.)	488. (412.)	1605. (1055.)	1605. (1063.)	0.911	**
Sauerkirsche	0. (80.)	51. (121.)	28. (191.)	204. (208.)	204. (217.)	6.302	
Süßkirsche früh	0. (334.)	168. (344.)	62. (784.)	737. (726.)	737. (778.)	6.156	
Süßkirsche spät	0. (330.)	280. (349.)	70. (863.)	672. (749.)	672. (796.)	9.121	
Birne früh	0. (179.)	103. (209.)	33. (316.)	424. (507.)	424. (527.)	10.362	
Birne spät	0. (179.)	113. (206.)	144. (210.)	739. (716.)	739. (722.)	4.606	*
Wein	0. (134.)	96. (273.)	99. (315.)	544. (269.)	544. (297.)	0.065	***
Pflaume früh	0. (92.)	80. (101.)	-7. (239.)	145. (228.)	145. (240.)	21.363	
Pflaume spät	0. (108.)	66. (111.)	70. (126.)	341. (329.)	341. (336.)	4.752	*

Tabelle K.28: Statistik für die Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-o**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (248.)	-1167. (674.)	-1367. (932.)	-1495. (1229.)	-1495. (1274.)	3.112	*
Apfel spät	0. (261.)	-2063. (792.)	-2616. (1020.)	-3209. (1167.)	-3209. (1219.)	0.187	**
Sauerkirsche	0. (80.)	146. (56.)	197. (191.)	247. (167.)	247. (175.)	1.057	*
Süßkirsche früh	0. (334.)	-228. (668.)	16. (891.)	428. (1134.)	428. (1131.)	37.578	
Süßkirsche spät	0. (330.)	-275. (690.)	-77. (957.)	211. (1159.)	211. (1150.)	65.761	
Birne früh	0. (179.)	-262. (408.)	-528. (643.)	-780. (735.)	-780. (774.)	4.886	*
Birne spät	0. (179.)	-425. (443.)	-760. (643.)	-1101. (641.)	-1101. (635.)	0.665	**
Wein	0. (134.)	-76. (420.)	-239. (481.)	-211. (797.)	-211. (817.)	51.324	
Pflaume früh	0. (92.)	256. (114.)	198. (290.)	76. (227.)	76. (234.)	48.038	
Pflaume spät	0. (108.)	116. (205.)	-10. (368.)	-180. (267.)	-180. (275.)	16.672	

Tabelle K.29: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	121. (236.)	-211. (868.)	-167. (791.)	-167. (813.)	65.276	
Apfel spät	0. (298.)	-106. (267.)	-795. (1001.)	-1167. (708.)	-1167. (750.)	0.490	**
Sauerkirsche	0. (85.)	24. (77.)	27. (153.)	176. (171.)	176. (185.)	6.062	
Süßkirsche früh	0. (348.)	139. (345.)	72. (733.)	727. (651.)	727. (714.)	4.626	*
Süßkirsche spät	0. (354.)	208. (345.)	78. (767.)	622. (633.)	622. (702.)	7.931	
Birne früh	0. (177.)	19. (183.)	-357. (598.)	-434. (618.)	-434. (631.)	14.786	
Birne spät	0. (192.)	-29. (163.)	-478. (596.)	-637. (528.)	-637. (548.)	2.736	*
Wein	0. (146.)	40. (237.)	-174. (462.)	-21. (667.)	-21. (691.)	94.098	
Pflaume früh	0. (95.)	35. (80.)	-91. (252.)	-77. (230.)	-77. (243.)	49.786	
Pflaume spät	0. (106.)	-11. (89.)	-210. (270.)	-240. (233.)	-240. (250.)	5.889	

Tabelle K.30: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, nur 3 Klimamodellläufe, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über nur 3 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (375.)	261. (298.)	113. (1893.)	278. (1290.)	278. (1119.)	48.701	
Apfel spät	0. (435.)	-39. (363.)	-501. (2400.)	-797. (1088.)	-797. (1035.)	10.480	
Sauerkirsche	0. (116.)	72. (101.)	99. (316.)	269. (251.)	269. (238.)	3.253	*
Süßkirsche früh	0. (481.)	278. (427.)	295. (1830.)	992. (1680.)	992. (1450.)	11.771	
Süßkirsche spät	0. (493.)	350. (429.)	298. (1924.)	896. (1594.)	896. (1406.)	13.576	
Birne früh	0. (271.)	90. (292.)	-136. (1322.)	-104. (1025.)	-104. (867.)	72.696	
Birne spät	0. (297.)	6. (272.)	-280. (1394.)	-367. (990.)	-367. (866.)	27.083	
Wein	0. (196.)	165. (280.)	53. (649.)	380. (173.)	380. (255.)	0.427	**
Pflaume früh	0. (145.)	44. (118.)	-27. (649.)	25. (515.)	25. (443.)	86.720	
Pflaume spät	0. (164.)	-12. (125.)	-143. (692.)	-133. (396.)	-133. (380.)	40.958	

Tabelle K.31: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, mit CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	-613. (246.)	-1886. (943.)	-2986. (963.)	-2986. (987.)	0.012	***
Apfel spät	0. (299.)	-862. (277.)	-2562. (1093.)	-4268. (867.)	-4268. (902.)	0.000	***
Sauerkirsche	0. (85.)	-290. (80.)	-662. (164.)	-950. (204.)	-950. (216.)	0.000	***
Süßkirsche früh	0. (349.)	-765. (365.)	-1929. (702.)	-2456. (707.)	-2456. (772.)	0.000	***
Süßkirsche spät	0. (354.)	-697. (363.)	-1931. (735.)	-2610. (688.)	-2610. (758.)	0.000	***
Birne früh	0. (177.)	-551. (180.)	-1662. (660.)	-2644. (765.)	-2644. (794.)	0.018	***
Birne spät	0. (192.)	-627. (162.)	-1855. (660.)	-3005. (656.)	-3005. (676.)	0.001	***
Wein	0. (146.)	-1329. (217.)	-3194. (508.)	-4931. (860.)	-4931. (878.)	0.001	***
Pflaume früh	0. (96.)	-298. (84.)	-835. (265.)	-1314. (265.)	-1314. (278.)	0.000	***
Pflaume spät	0. (107.)	-380. (93.)	-1050. (295.)	-1658. (288.)	-1658. (301.)	0.000	***

Tabelle K.32: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	121. (236.)	-211. (868.)	2180. (764.)	2180. (803.)	0.000	***
Apfel spät	0. (298.)	-106. (267.)	-795. (1001.)	1610. (880.)	1610. (923.)	0.115	**
Sauerkirsche	0. (85.)	24. (77.)	27. (153.)	1025. (282.)	1025. (292.)	0.000	***
Süßkirsche früh	0. (348.)	139. (345.)	72. (733.)	3101. (791.)	3101. (855.)	0.000	***
Süßkirsche spät	0. (354.)	208. (345.)	78. (767.)	3120. (831.)	3120. (893.)	0.000	***
Birne früh	0. (177.)	19. (183.)	-357. (598.)	1456. (587.)	1456. (609.)	0.003	***
Birne spät	0. (192.)	-29. (163.)	-478. (596.)	1386. (628.)	1386. (653.)	0.013	***
Wein	0. (146.)	40. (237.)	-174. (462.)	1892. (619.)	1892. (633.)	0.000	***
Pflaume früh	0. (95.)	35. (80.)	-91. (252.)	866. (299.)	866. (311.)	0.000	***
Pflaume spät	0. (106.)	-11. (89.)	-210. (270.)	852. (340.)	852. (354.)	0.002	***

Tabelle K.33: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-581. (1335.)	-581. (1384.)	30.850	
Apfel spät	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1710. (1349.)	-1710. (1408.)	2.803	*
Sauerkirsche	0. (85.)	128. (71.)	179. (185.)	229. (184.)	229. (191.)	2.436	*
Süßkirsche früh	0. (348.)	-185. (584.)	59. (838.)	471. (1109.)	471. (1116.)	32.782	
Süßkirsche spät	0. (354.)	-147. (562.)	50. (868.)	338. (1121.)	338. (1129.)	47.676	
Birne früh	0. (177.)	75. (359.)	-191. (652.)	-443. (815.)	-443. (849.)	22.119	
Birne spät	0. (192.)	12. (333.)	-322. (653.)	-663. (738.)	-663. (724.)	6.530	
Wein	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	-152. (843.)	-152. (866.)	65.061	
Pflaume früh	0. (95.)	236. (105.)	177. (284.)	56. (251.)	56. (256.)	62.225	
Pflaume spät	0. (106.)	165. (137.)	38. (328.)	-131. (278.)	-131. (284.)	31.076	

Tabelle K.34: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g, mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	-1029. (683.)	-2207. (1084.)	-3564. (1654.)	-3564. (1694.)	0.429	**
Apfel spät	0. (299.)	-1364. (800.)	-2968. (1230.)	-4989. (1654.)	-4989. (1703.)	0.124	**
Sauerkirsche	0. (85.)	-193. (73.)	-520. (200.)	-925. (248.)	-925. (257.)	0.012	***
Süßkirsche früh	0. (349.)	-1136. (588.)	-1996. (876.)	-2837. (1323.)	-2837. (1301.)	0.250	**
Süßkirsche spät	0. (354.)	-1099. (560.)	-2013. (905.)	-3020. (1328.)	-3020. (1307.)	0.193	**
Birne früh	0. (177.)	-511. (371.)	-1520. (714.)	-2711. (1040.)	-2711. (1067.)	0.213	**
Birne spät	0. (192.)	-602. (346.)	-1724. (716.)	-3093. (949.)	-3093. (984.)	0.095	***
Wein	0. (146.)	-1397. (356.)	-3221. (580.)	-5162. (1177.)	-5162. (1193.)	0.028	***
Pflaume früh	0. (96.)	-109. (106.)	-587. (295.)	-1220. (354.)	-1220. (349.)	0.028	***
Pflaume spät	0. (107.)	-218. (146.)	-824. (351.)	-1594. (406.)	-1594. (399.)	0.015	***

Tabelle K.35: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten [(2071-2100) vs. (1971-2000)] (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: NoReleaseProb variiert**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

Worst Case	20% (D-A)	10% (D-A)	7% (D-A)	5% (D-A)	4% (D-A)	3% (D-A)	0% (D-A)
Apfel früh	232. (1312.)	-171. (1325.)	-281. (1367.)	-388. (1337.)	-473. (1378.)	-526. (1338.)	-581. (1384.)
Apfel spät	-757. (1362.)	-1228. (1356.)	-1356. (1389.)	-1481. (1359.)	-1581. (1399.)	-1644. (1355.)	-1710. (1408.)
Sauerkirsche	543. (159.)	388. (161.)	346. (173.)	303. (166.)	270. (188.)	250. (168.)	229. (191.)
Süßkirsche früh	1275. (1058.)	876. (1032.)	767. (996.)	660. (1061.)	576. (1078.)	527. (1058.)	471. (1116.)
Süßkirsche spät	1182. (1073.)	763. (1056.)	650. (1099.)	538. (1074.)	448. (1102.)	396. (1072.)	338. (1129.)
Birne früh	202. (705.)	-119. (798.)	-205. (834.)	-289. (805.)	-356. (843.)	-399. (810.)	-443. (849.)
Birne spät	23. (660.)	-317. (651.)	-409. (679.)	-498. (685.)	-570. (719.)	-616. (687.)	-663. (724.)
Wein	490. (729.)	169. (853.)	85. (870.)	1. (836.)	-67. (890.)	-108. (842.)	-152. (866.)
Pflaume früh	402. (222.)	230. (208.)	184. (225.)	138. (215.)	101. (239.)	79. (226.)	56. (256.)
Pflaume spät	262. (245.)	67. (239.)	14. (254.)	-38. (249.)	-79. (280.)	-105. (252.)	-131. (284.)

Tabelle K.36: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	232. (1261.)	232. (1312.)	64.933	
Apfel spät	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-757. (1301.)	-757. (1362.)	19.780	
Sauerkirsche	0. (85.)	128. (71.)	179. (185.)	543. (138.)	543. (159.)	0.000	***
Süßkirsche früh	0. (348.)	-185. (584.)	59. (838.)	1275. (1021.)	1275. (1058.)	2.567	*
Süßkirsche spät	0. (354.)	-147. (562.)	50. (868.)	1182. (1035.)	1182. (1073.)	3.575	*
Birne früh	0. (177.)	75. (359.)	-191. (652.)	202. (706.)	202. (705.)	51.050	
Birne spät	0. (192.)	12. (333.)	-322. (653.)	23. (650.)	23. (660.)	93.440	
Wein	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	490. (705.)	490. (729.)	14.414	
Pflaume früh	0. (95.)	236. (105.)	177. (284.)	402. (206.)	402. (222.)	0.144	**
Pflaume spät	0. (106.)	165. (137.)	38. (328.)	262. (228.)	262. (245.)	3.729	*

Tabelle K.37: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 10 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-171. (1274.)	-171. (1325.)	73.774	
Apfel spät	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1228. (1294.)	-1228. (1356.)	6.572	
Sauerkirsche	0. (85.)	128. (71.)	179. (185.)	388. (145.)	388. (161.)	0.010	***
Süßkirsche früh	0. (348.)	-185. (584.)	59. (838.)	876. (1009.)	876. (1032.)	8.089	
Süßkirsche spät	0. (354.)	-147. (562.)	50. (868.)	763. (1034.)	763. (1056.)	12.233	
Birne früh	0. (177.)	75. (359.)	-191. (652.)	-119. (761.)	-119. (798.)	70.119	
Birne spät	0. (192.)	12. (333.)	-322. (653.)	-317. (640.)	-317. (651.)	27.843	
Wein	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	169. (830.)	169. (853.)	61.238	
Pflaume früh	0. (95.)	236. (105.)	177. (284.)	230. (193.)	230. (208.)	3.230	*
Pflaume spät	0. (106.)	165. (137.)	38. (328.)	67. (223.)	67. (239.)	55.905	

Tabelle K.38: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 7 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-281. (1317.)	-281. (1367.)	59.862	
Apfel spät	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1356. (1329.)	-1356. (1389.)	5.359	
Sauerkirsche	0. (85.)	128. (71.)	179. (185.)	346. (158.)	346. (173.)	0.069	***
Süßkirsche früh	0. (348.)	-185. (584.)	59. (838.)	767. (990.)	767. (996.)	11.143	
Süßkirsche spät	0. (354.)	-147. (562.)	50. (868.)	650. (1085.)	650. (1099.)	18.874	
Birne früh	0. (177.)	75. (359.)	-191. (652.)	-205. (798.)	-205. (834.)	53.281	
Birne spät	0. (192.)	12. (333.)	-322. (653.)	-409. (671.)	-409. (679.)	19.097	
Wein	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	85. (847.)	85. (870.)	79.979	
Pflaume früh	0. (95.)	236. (105.)	177. (284.)	184. (210.)	184. (225.)	10.114	
Pflaume spät	0. (106.)	165. (137.)	38. (328.)	14. (241.)	14. (254.)	90.534	

Tabelle K.39: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 5 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-388. (1286.)	-388. (1337.)	46.600	
Apfel spät	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1481. (1298.)	-1481. (1359.)	3.897	*
Sauerkirsche	0. (85.)	128. (71.)	179. (185.)	303. (153.)	303. (166.)	0.169	**
Süßkirsche früh	0. (348.)	-185. (584.)	59. (838.)	660. (1044.)	660. (1061.)	17.064	
Süßkirsche spät	0. (354.)	-147. (562.)	50. (868.)	538. (1056.)	538. (1074.)	25.389	
Birne früh	0. (177.)	75. (359.)	-191. (652.)	-289. (769.)	-289. (805.)	37.551	
Birne spät	0. (192.)	12. (333.)	-322. (653.)	-498. (693.)	-498. (685.)	12.052	
Wein	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	1. (812.)	1. (836.)	99.793	
Pflaume früh	0. (95.)	236. (105.)	177. (284.)	138. (204.)	138. (215.)	18.644	
Pflaume spät	0. (106.)	165. (137.)	38. (328.)	-38. (237.)	-38. (249.)	73.754	

Tabelle K.40: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 4 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-473. (1329.)	-473. (1378.)	39.434	
Apfel spät	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1581. (1340.)	-1581. (1399.)	3.498	*
Sauerkirsche	0. (85.)	128. (71.)	179. (185.)	270. (180.)	270. (188.)	0.952	**
Süßkirsche früh	0. (348.)	-185. (584.)	59. (838.)	576. (1064.)	576. (1078.)	22.808	
Süßkirsche spät	0. (354.)	-147. (562.)	50. (868.)	448. (1089.)	448. (1102.)	34.329	
Birne früh	0. (177.)	75. (359.)	-191. (652.)	-356. (808.)	-356. (843.)	30.549	
Birne spät	0. (192.)	12. (333.)	-322. (653.)	-570. (731.)	-570. (719.)	9.715	
Wein	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	-67. (868.)	-67. (890.)	84.442	
Pflaume früh	0. (95.)	236. (105.)	177. (284.)	101. (232.)	101. (239.)	36.310	
Pflaume spät	0. (106.)	165. (137.)	38. (328.)	-79. (273.)	-79. (280.)	52.566	

Tabelle K.41: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 3 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (269.)	-253. (667.)	-452. (994.)	-526. (1287.)	-526. (1338.)	33.645	
Apfel spät	0. (298.)	-564. (780.)	-1117. (1126.)	-1644. (1293.)	-1644. (1355.)	2.805	*
Sauerkirsche	0. (85.)	128. (71.)	179. (185.)	250. (157.)	250. (168.)	0.733	**
Süßkirsche früh	0. (348.)	-185. (584.)	59. (838.)	527. (1040.)	527. (1058.)	25.643	
Süßkirsche spät	0. (354.)	-147. (562.)	50. (868.)	396. (1054.)	396. (1072.)	38.547	
Birne früh	0. (177.)	75. (359.)	-191. (652.)	-399. (774.)	-399. (810.)	24.373	
Birne spät	0. (192.)	12. (333.)	-322. (653.)	-616. (694.)	-616. (687.)	6.935	
Wein	0. (146.)	-18. (357.)	-181. (481.)	-108. (818.)	-108. (842.)	73.867	
Pflaume früh	0. (95.)	236. (105.)	177. (284.)	79. (216.)	79. (226.)	45.030	
Pflaume spät	0. (106.)	165. (137.)	38. (328.)	-105. (241.)	-105. (252.)	37.209	

Tabelle K.42: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (150.)	94. (355.)	-105. (760.)	-234. (1210.)	-234. (1227.)	62.484	
Apfel spät	0. (179.)	-156. (303.)	-708. (794.)	-1301. (1182.)	-1301. (1207.)	4.017	*
Sauerkirsche	0. (73.)	31. (122.)	82. (159.)	132. (188.)	132. (193.)	14.982	
Süßkirsche früh	0. (166.)	92. (287.)	336. (522.)	747. (900.)	747. (928.)	8.905	
Süßkirsche spät	0. (149.)	159. (333.)	357. (572.)	645. (947.)	645. (968.)	13.824	
Birne früh	0. (123.)	26. (188.)	-239. (537.)	-492. (789.)	-492. (806.)	16.560	
Birne spät	0. (138.)	-26. (168.)	-361. (523.)	-702. (708.)	-702. (733.)	5.647	
Wein	0. (104.)	40. (256.)	-123. (369.)	-95. (779.)	-95. (792.)	75.581	
Pflaume früh	0. (83.)	65. (94.)	6. (210.)	-115. (246.)	-115. (254.)	30.946	
Pflaume spät	0. (87.)	14. (99.)	-113. (225.)	-283. (274.)	-283. (281.)	4.893	*

Tabelle K.43: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m, mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (151.)	-682. (371.)	-1860. (862.)	-3217. (1545.)	-3217. (1559.)	0.459	**
Apfel spät	0. (178.)	-956. (321.)	-2560. (902.)	-4581. (1503.)	-4581. (1523.)	0.112	**
Sauerkirsche	0. (74.)	-291. (127.)	-617. (177.)	-1022. (255.)	-1022. (258.)	0.007	***
Süßkirsche früh	0. (166.)	-860. (283.)	-1720. (574.)	-2561. (1123.)	-2561. (1145.)	0.343	**
Süßkirsche spät	0. (150.)	-793. (341.)	-1707. (628.)	-2714. (1165.)	-2714. (1183.)	0.311	**
Birne früh	0. (123.)	-560. (198.)	-1569. (604.)	-2761. (1020.)	-2761. (1034.)	0.177	**
Birne spät	0. (138.)	-641. (179.)	-1763. (591.)	-3132. (929.)	-3132. (947.)	0.078	***
Wein	0. (105.)	-1340. (238.)	-3164. (461.)	-5104. (1114.)	-5104. (1123.)	0.023	***
Pflaume früh	0. (83.)	-280. (96.)	-758. (222.)	-1391. (353.)	-1391. (371.)	0.048	***
Pflaume spät	0. (88.)	-369. (104.)	-976. (248.)	-1746. (405.)	-1746. (422.)	0.033	***

Tabelle K.44: Statistik für die **Gesamtkosten *KK* des Klimawandels** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20 %**; Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %).

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0. (150.)	94. (355.)	-105. (760.)	579. (1069.)	579. (1089.)	21.354	
Apfel spät	0. (179.)	-156. (303.)	-708. (794.)	-349. (972.)	-349. (998.)	41.018	
Sauerkirsche	0. (73.)	31. (122.)	82. (159.)	446. (134.)	446. (150.)	0.000	***
Süßkirsche früh	0. (166.)	92. (287.)	336. (522.)	1551. (672.)	1551. (681.)	0.077	***
Süßkirsche spät	0. (149.)	159. (333.)	357. (572.)	1489. (727.)	1489. (748.)	0.280	**
Birne früh	0. (123.)	26. (188.)	-239. (537.)	153. (645.)	153. (663.)	57.966	
Birne spät	0. (138.)	-26. (168.)	-361. (523.)	-15. (550.)	-15. (555.)	94.990	
Wein	0. (104.)	40. (256.)	-123. (369.)	548. (631.)	548. (644.)	8.049	
Pflaume früh	0. (83.)	65. (94.)	6. (210.)	231. (181.)	231. (195.)	2.213	*
Pflaume spät	0. (87.)	14. (99.)	-113. (225.)	111. (195.)	111. (209.)	28.256	

K.2.2.1.2 Aufsummierte (akkumulierte) Kosten

Eine kurze Diskussion zu $\sum KK$ findet man auf Seite 278 in Kapitel 5.7.2.2.

Tabelle K.45: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	3637.	(9181.)	-3041.	(35497.)	-8035.	(71500.)
Apfel spät	-3168.	(8773.)	-26673.	(38348.)	-70060.	(68915.)
Sauerkirsche	710.	(2742.)	1313.	(7072.)	7756.	(15436.)
Süßkirsche früh	4155.	(8103.)	5856.	(26333.)	32953.	(59547.)
Süßkirsche spät	6225.	(8647.)	7909.	(25511.)	31563.	(58341.)
Birne früh	569.	(7413.)	-9954.	(24977.)	-25498.	(50795.)
Birne spät	-855.	(6538.)	-14843.	(23669.)	-38367.	(45802.)
Wein	1192.	(8443.)	-4148.	(21398.)	-4790.	(47093.)
Pflaume früh	1039.	(3084.)	-1744.	(10337.)	-3781.	(20859.)
Pflaume spät	-332.	(3182.)	-6583.	(10745.)	-14822.	(21274.)

Tabelle K.46: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g, mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	-18381.	(9170.)	-74156.	(37815.)	-186636.	(80858.)
Apfel spät	-25857.	(8565.)	-101177.	(40828.)	-262559.	(76549.)
Sauerkirsche	-8707.	(2970.)	-28284.	(7536.)	-65048.	(17450.)
Süßkirsche früh	-22955.	(8739.)	-79842.	(26678.)	-174802.	(63318.)
Süßkirsche spät	-20899.	(9741.)	-78075.	(25870.)	-178259.	(61838.)
Birne früh	-16543.	(7399.)	-65288.	(26734.)	-165119.	(58004.)
Birne spät	-18797.	(6494.)	-73104.	(25327.)	-186953.	(51957.)
Wein	-39859.	(8078.)	-133662.	(23570.)	-322643.	(57213.)
Pflaume früh	-8932.	(2827.)	-33519.	(10400.)	-82844.	(22010.)
Pflaume spät	-11392.	(3052.)	-42253.	(11176.)	-104685.	(23204.)

Tabelle K.47: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	3637.	(9181.)	-3041.	(35497.)	62392.	(73976.)
Apfel spät	-3168.	(8773.)	-26673.	(38348.)	13241.	(77709.)
Sauerkirsche	710.	(2742.)	1313.	(7072.)	33209.	(16524.)
Süßkirsche früh	4155.	(8103.)	5856.	(26333.)	104177.	(64601.)
Süßkirsche spät	6225.	(8647.)	7909.	(25511.)	106518.	(64648.)
Birne früh	569.	(7413.)	-9954.	(24977.)	31211.	(54508.)
Birne spät	-855.	(6538.)	-14843.	(23669.)	22330.	(51777.)
Wein	1192.	(8443.)	-4148.	(21398.)	52586.	(46985.)
Pflaume früh	1039.	(3084.)	-1744.	(10337.)	24526.	(24789.)
Pflaume spät	-332.	(3182.)	-6583.	(10745.)	17934.	(26345.)

Tabelle K.48: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	-7597.	(20233.)	-20882.	(49483.)	-44070.	(100715.)
Apfel spät	-16918.	(23474.)	-49345.	(55753.)	-116285.	(104160.)
Sauerkirsche	3832.	(2933.)	8934.	(8076.)	17263.	(16481.)
Süßkirsche früh	-5549.	(17639.)	-3754.	(42759.)	11595.	(88737.)
Süßkirsche spät	-4423.	(16934.)	-3060.	(42804.)	7725.	(89402.)
Birne früh	2257.	(10820.)	-3385.	(30044.)	-19525.	(58722.)
Birne spät	365.	(10789.)	-9035.	(29732.)	-33927.	(54833.)
Wein	-527.	(10905.)	-6019.	(23698.)	-12213.	(55230.)
Pflaume früh	7076.	(4051.)	12060.	(12713.)	15511.	(20982.)
Pflaume spät	4954.	(5002.)	5913.	(14236.)	2065.	(23059.)

Tabelle K.49: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g, mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	-30883.	(20721.)	-95562.	(52535.)	-232922.	(115080.)
Apfel spät	-40917.	(24066.)	-127562.	(59208.)	-319725.	(117321.)
Sauerkirsche	-5804.	(3031.)	-21157.	(8682.)	-57222.	(19847.)
Süßkirsche früh	-34081.	(17785.)	-92413.	(43949.)	-204392.	(98243.)
Süßkirsche spät	-32969.	(16887.)	-92005.	(43852.)	-210354.	(98403.)
Birne früh	-15327.	(11196.)	-59888.	(32106.)	-162789.	(68452.)
Birne spät	-18072.	(11177.)	-68525.	(31758.)	-186363.	(63611.)
Wein	-41919.	(10906.)	-136459.	(26444.)	-335030.	(69777.)
Pflaume früh	-3272.	(4116.)	-20673.	(13094.)	-66171.	(23640.)
Pflaume spät	-6526.	(5204.)	-30831.	(15032.)	-90760.	(26701.)

Tabelle K.50: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	-7597.	(20233.)	-20882.	(49483.)	-19676.	(99703.)
Apfel spät	-16918.	(23474.)	-49345.	(55753.)	-87702.	(104894.)
Sauerkirsche	3832.	(2933.)	8934.	(8076.)	26694.	(15975.)
Süßkirsche früh	-5549.	(17639.)	-3754.	(42759.)	35715.	(89206.)
Süßkirsche spät	-4423.	(16934.)	-3060.	(42804.)	33049.	(90140.)
Birne früh	2257.	(10820.)	-3385.	(30044.)	-193.	(58916.)
Birne spät	365.	(10789.)	-9035.	(29732.)	-13338.	(55779.)
Wein	-527.	(10905.)	-6019.	(23698.)	7072.	(54068.)
Pflaume früh	7076.	(4051.)	12060.	(12713.)	25900.	(22108.)
Pflaume spät	4954.	(5002.)	5913.	(14236.)	13868.	(24526.)

Tabelle K.51: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	2825.	(10809.)	-384.	(33371.)	-9675.	(81127.)
Apfel spät	-4670.	(10106.)	-25256.	(32849.)	-75865.	(76089.)
Sauerkirsche	925.	(4374.)	3218.	(8366.)	7671.	(17112.)
Süßkirsche früh	2751.	(10159.)	12571.	(25886.)	38989.	(64112.)
Süßkirsche spät	4780.	(11341.)	15041.	(26609.)	38100.	(66320.)
Birne früh	793.	(6643.)	-6265.	(22406.)	-24357.	(51268.)
Birne spät	-787.	(6083.)	-11303.	(21004.)	-37732.	(46159.)
Wein	1195.	(7890.)	-2632.	(18121.)	-6530.	(47006.)
Pflaume früh	1949.	(3688.)	1975.	(9376.)	-1409.	(17614.)
Pflaume spät	408.	(3909.)	-3026.	(9753.)	-12935.	(18427.)

Tabelle K.52: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m, mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	-20473.	(11307.)	-75089.	(36921.)	-198569.	(97163.)
Apfel spät	-28678.	(10688.)	-103493.	(36483.)	-279339.	(90904.)
Sauerkirsche	-8715.	(4557.)	-26884.	(9142.)	-66831.	(20701.)
Süßkirsche früh	-25799.	(10283.)	-76124.	(27579.)	-177060.	(74628.)
Süßkirsche spät	-23785.	(11620.)	-73943.	(28390.)	-180046.	(76800.)
Birne früh	-16803.	(6989.)	-62792.	(24676.)	-167661.	(61867.)
Birne spät	-19237.	(6436.)	-70816.	(23213.)	-190207.	(55983.)
Wein	-40203.	(7972.)	-133083.	(20939.)	-329364.	(61857.)
Pflaume früh	-8408.	(3786.)	-30774.	(9807.)	-83119.	(20862.)
Pflaume spät	-11080.	(4087.)	-39786.	(10533.)	-105787.	(22628.)

Tabelle K.53: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	2825.	(10809.)	-384.	(33371.)	14718.	(77430.)
Apfel spät	-4670.	(10106.)	-25256.	(32849.)	-47282.	(73730.)
Sauerkirsche	925.	(4374.)	3218.	(8366.)	17102.	(16285.)
Süßkirsche früh	2751.	(10159.)	12571.	(25886.)	63109.	(60505.)
Süßkirsche spät	4780.	(11341.)	15041.	(26609.)	63424.	(62438.)
Birne früh	793.	(6643.)	-6265.	(22406.)	-5024.	(49838.)
Birne spät	-787.	(6083.)	-11303.	(21004.)	-17143.	(45270.)
Wein	1195.	(7890.)	-2632.	(18121.)	12755.	(45210.)
Pflaume früh	1949.	(3688.)	1975.	(9376.)	8979.	(18189.)
Pflaume spät	408.	(3909.)	-3026.	(9753.)	-1132.	(19118.)

K.2.2.2 Bilder

K.2.2.2.1 30-jährige Mittelwerte bzw. Differenzen

Eine kurze Beschreibung und Diskussion der folgenden Graphiken findet sich auf Seite 272 in Kapitel 5.7.2.2.

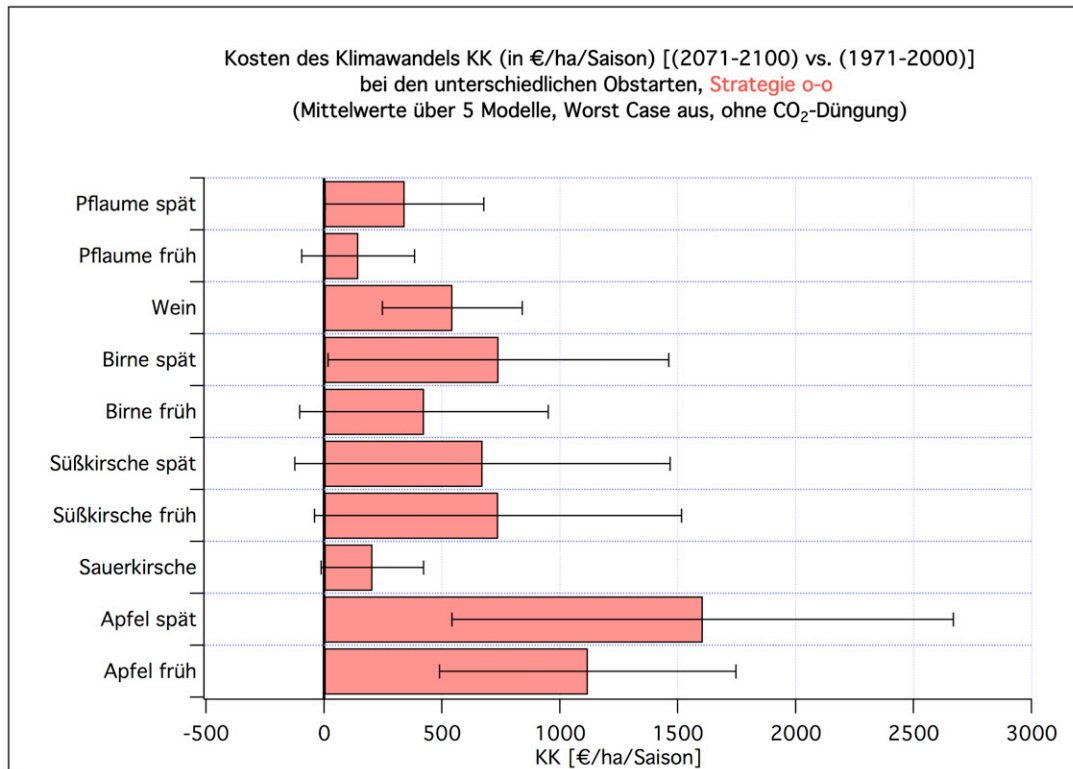


Abbildung K.21: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie o-o, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

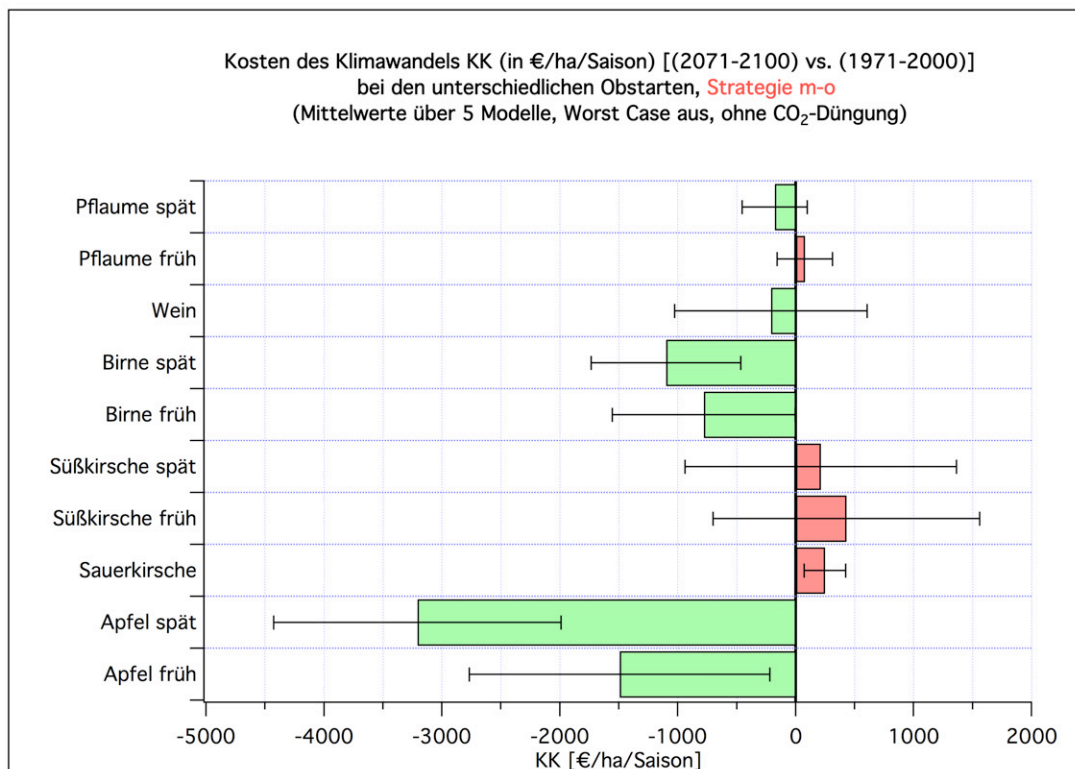


Abbildung K.22: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-o, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

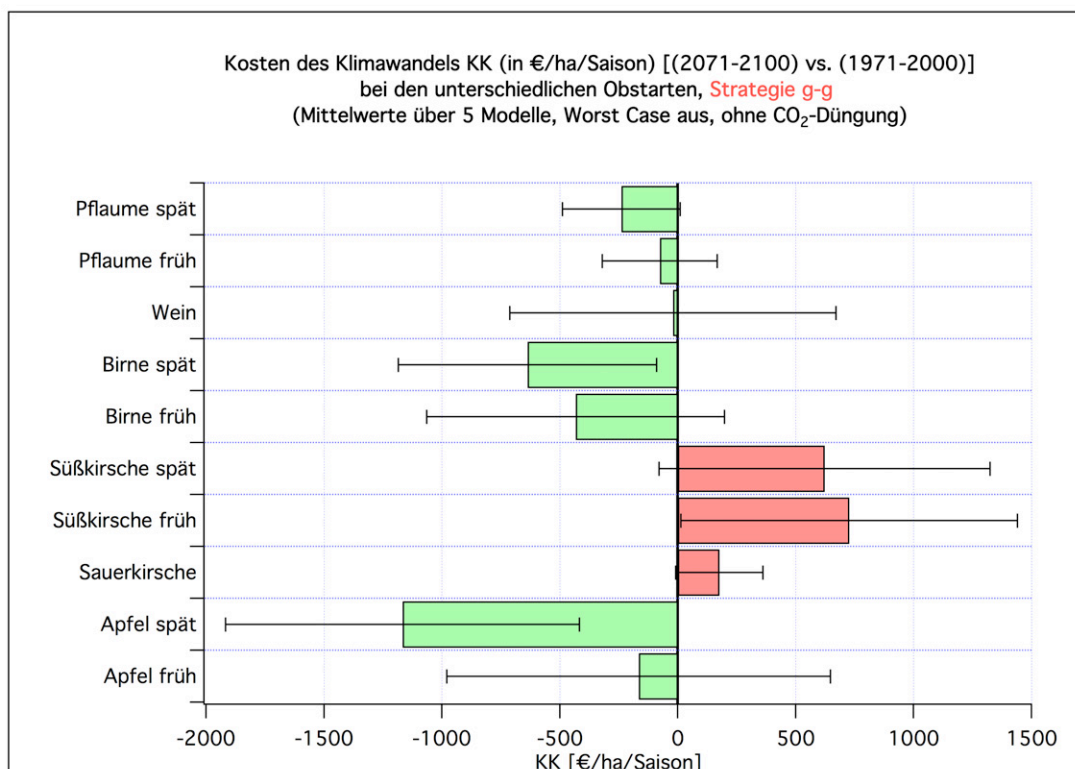


Abbildung K.23: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

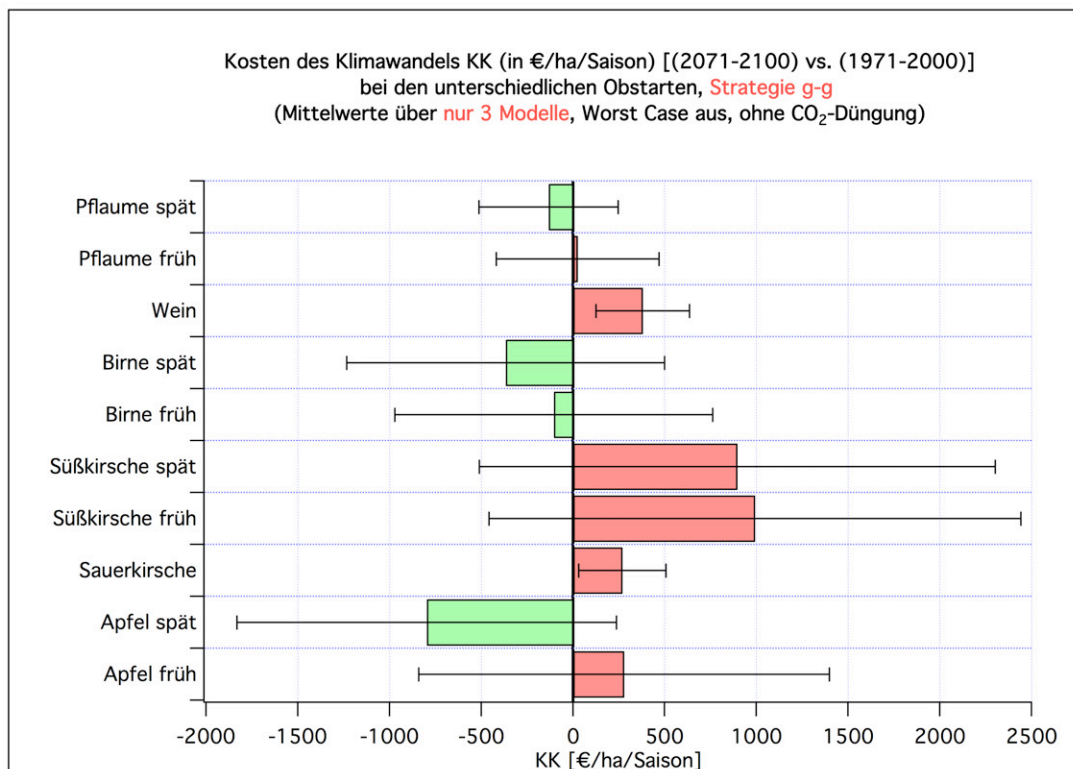


Abbildung K.24: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über nur 3 Klimamodellläufe)

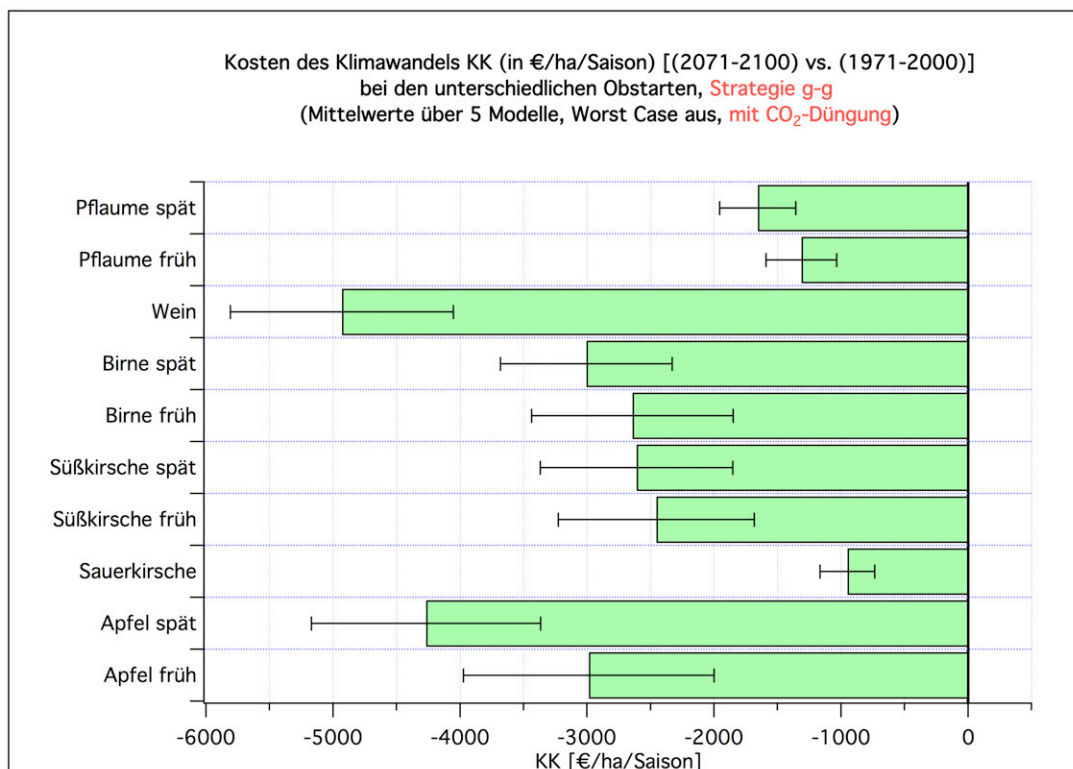


Abbildung K.25: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

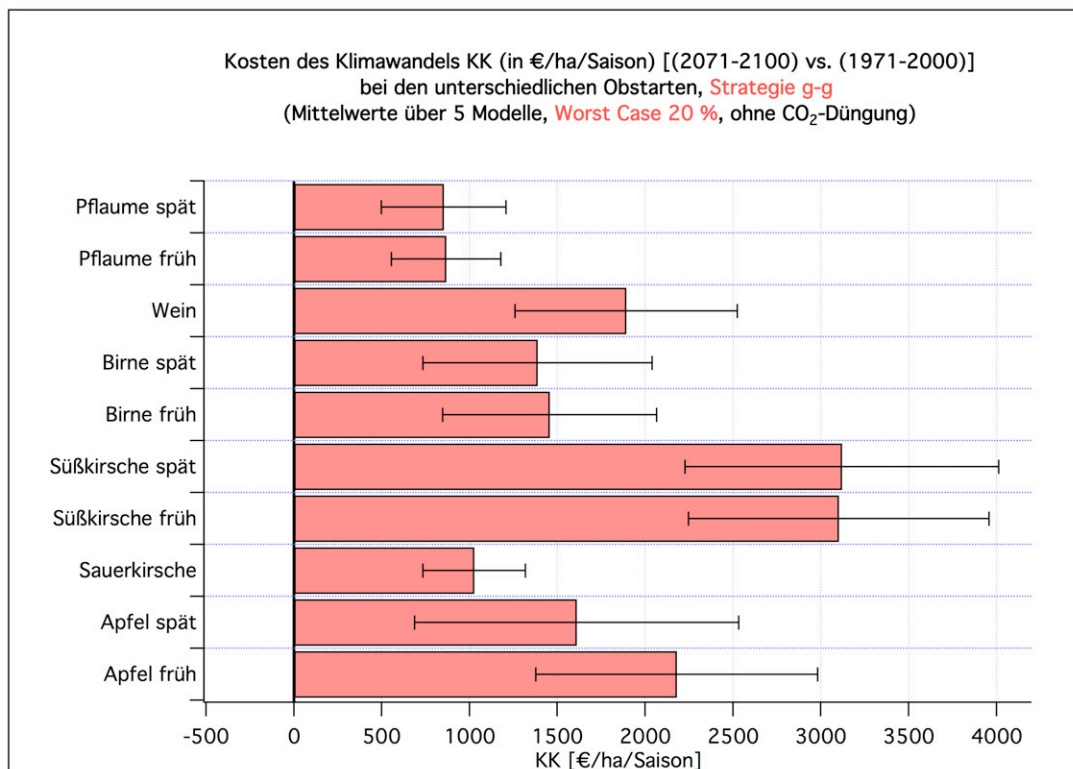


Abbildung K.26: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20 %; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

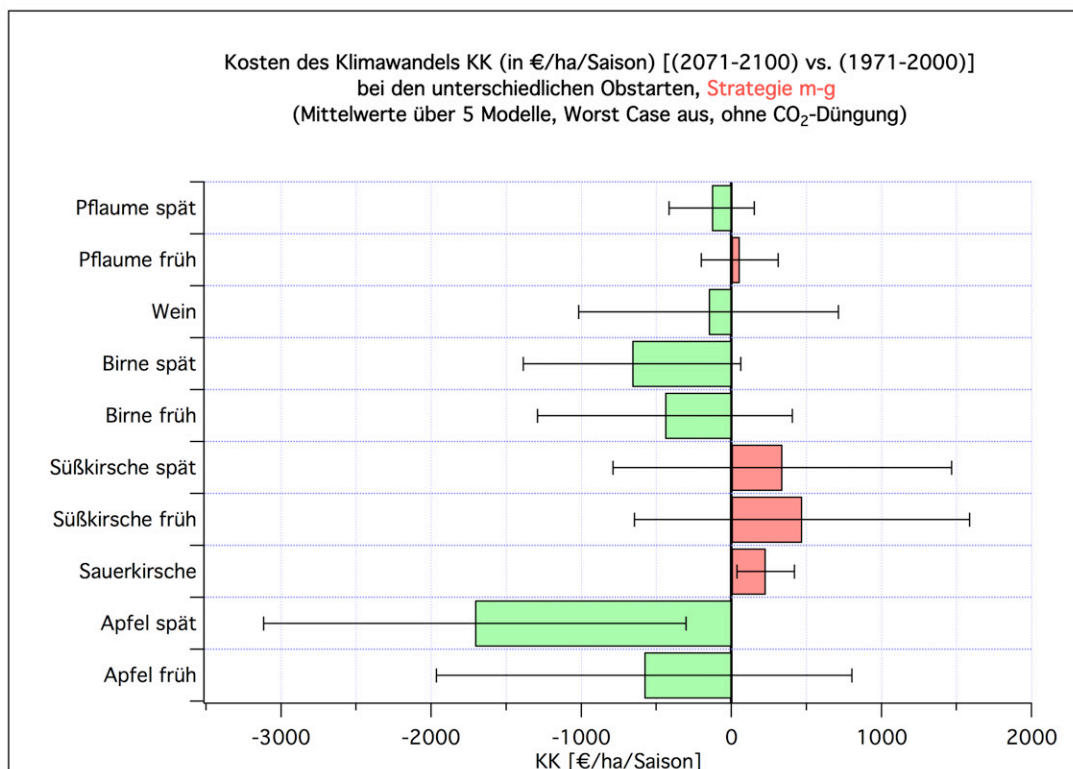


Abbildung K.27: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

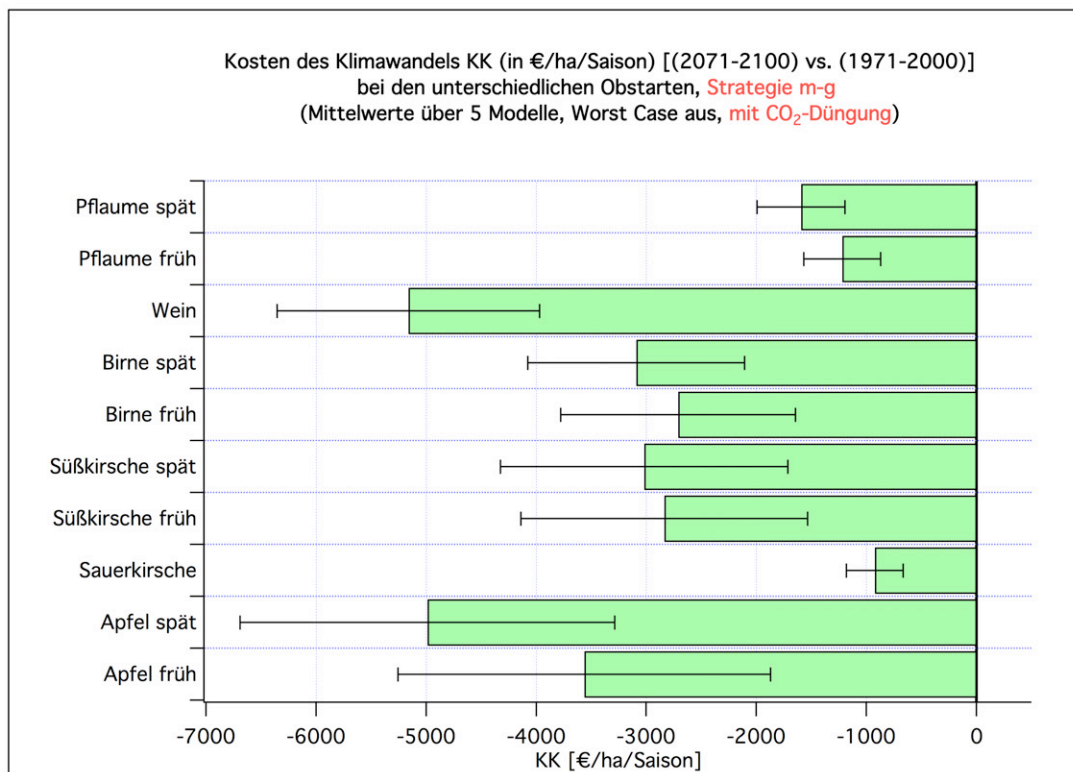


Abbildung K.28: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 “Modelle”)

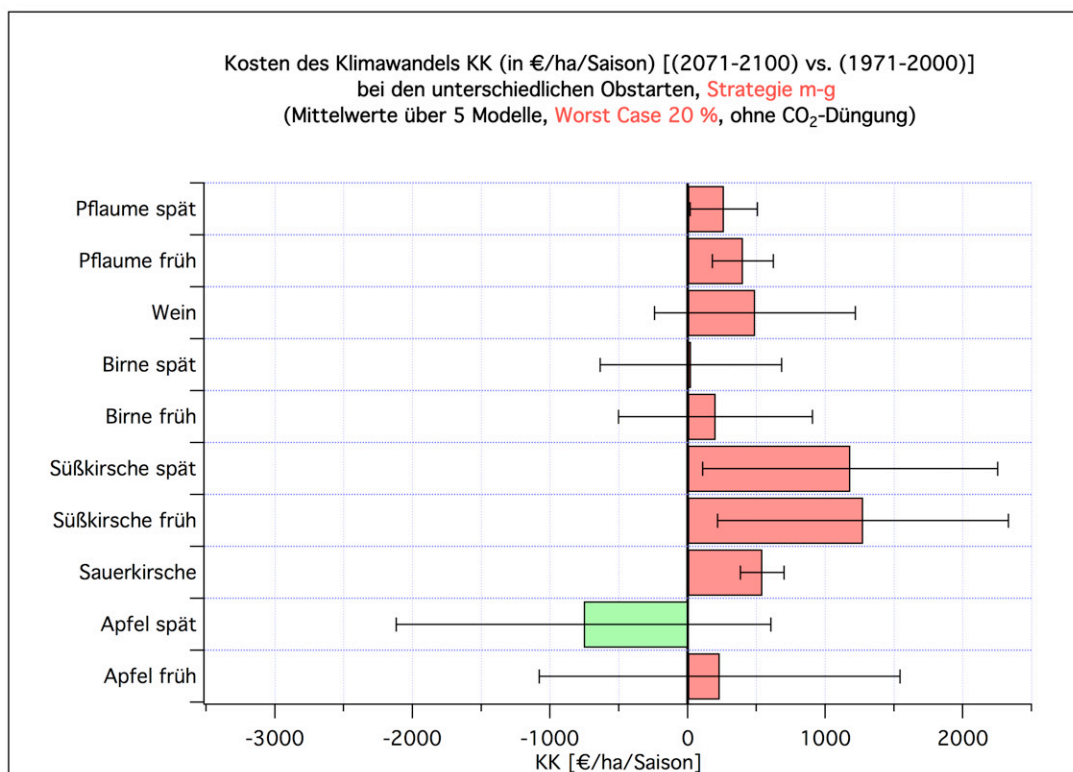


Abbildung K.29: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20%; Mittelwert über 5 “Modelle”)

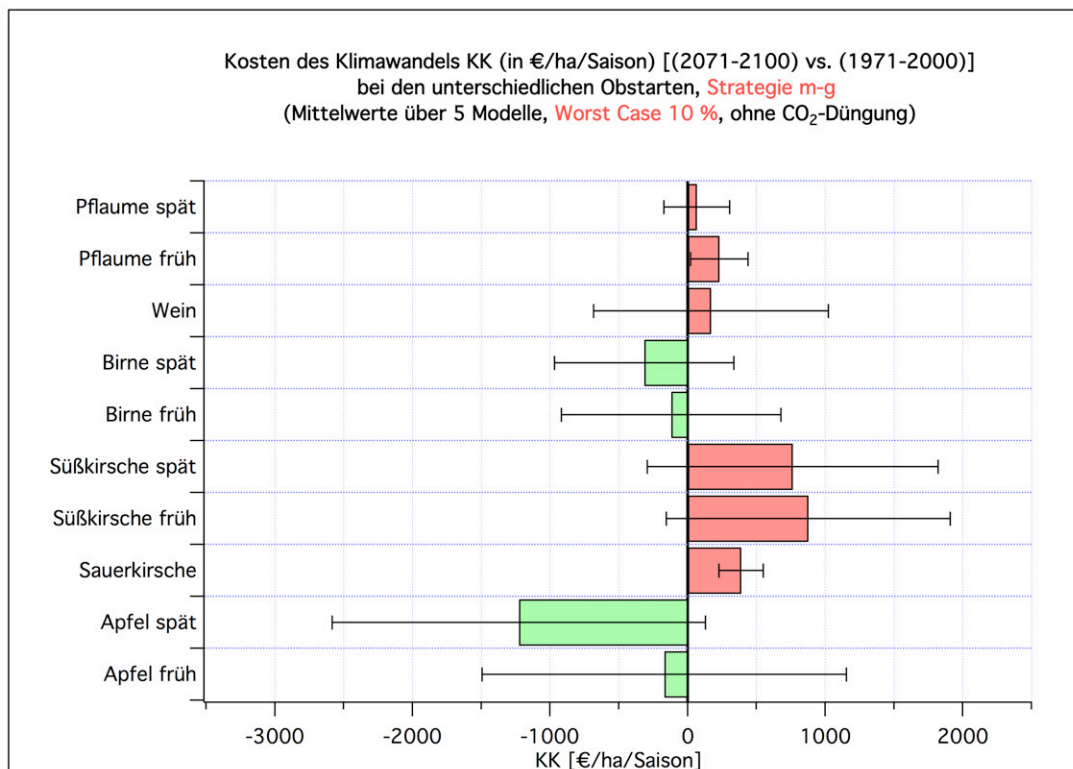


Abbildung K.30: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 10 %; Mittelwert über 5 “Modelle”)

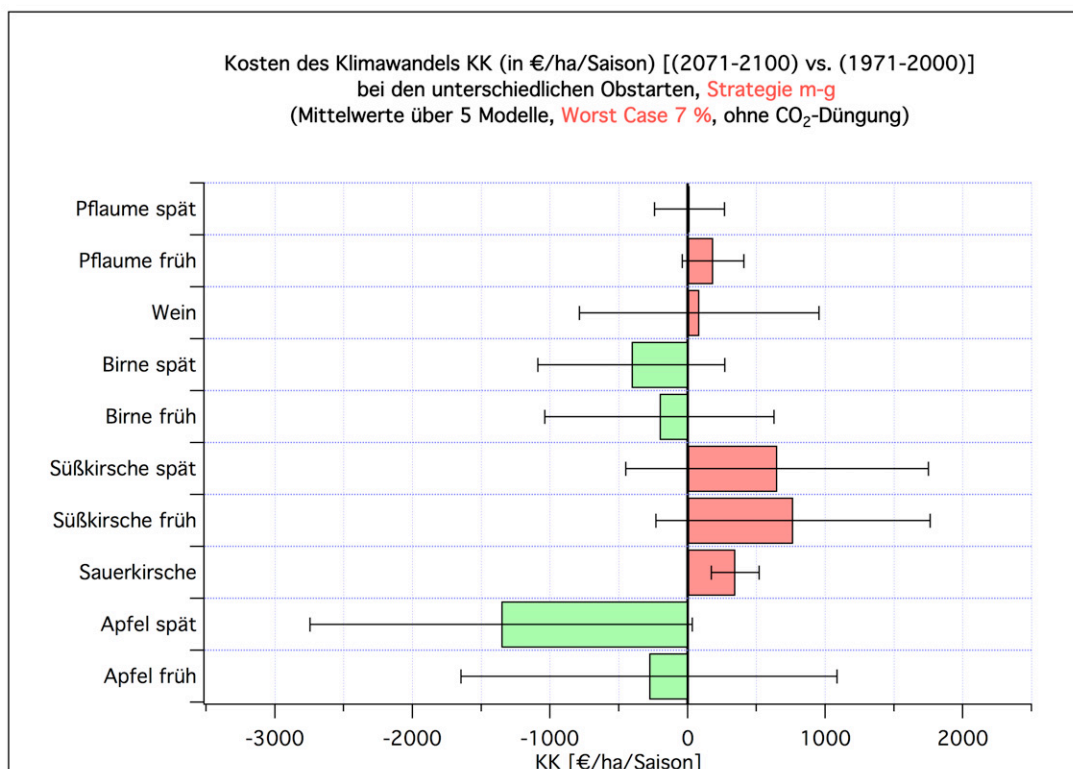


Abbildung K.31: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 7 %; Mittelwert über 5 “Modelle”)

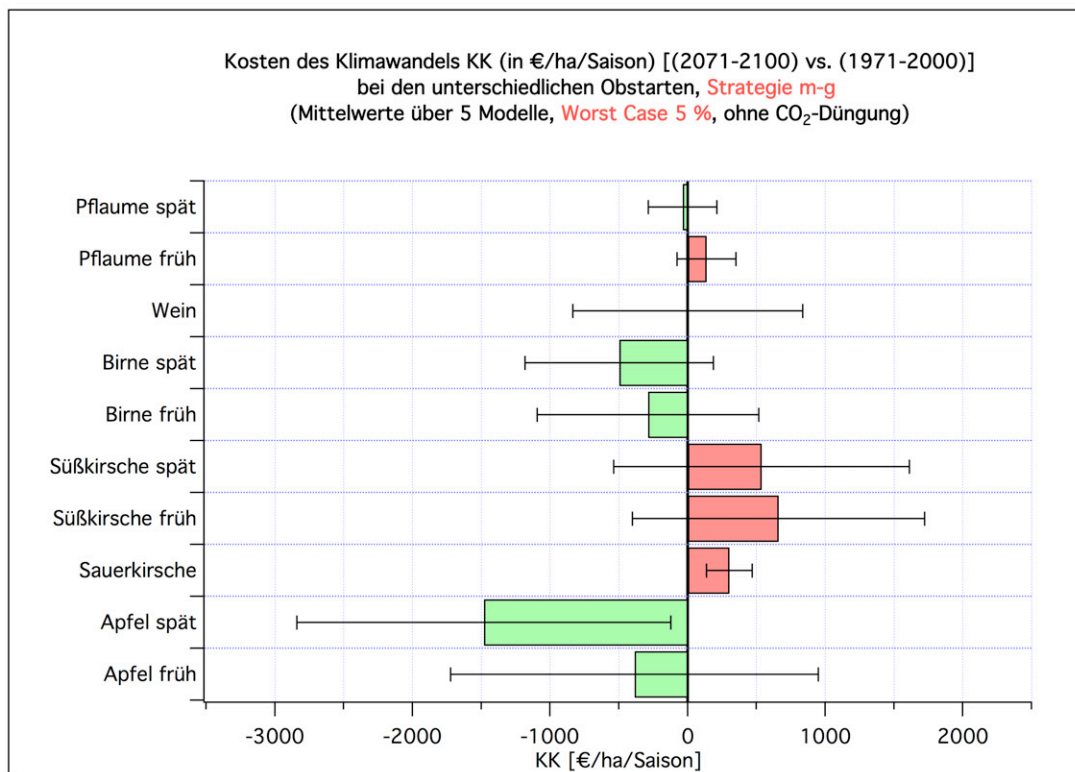


Abbildung K.32: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 5 %; Mittelwert über 5 “Modelle”)

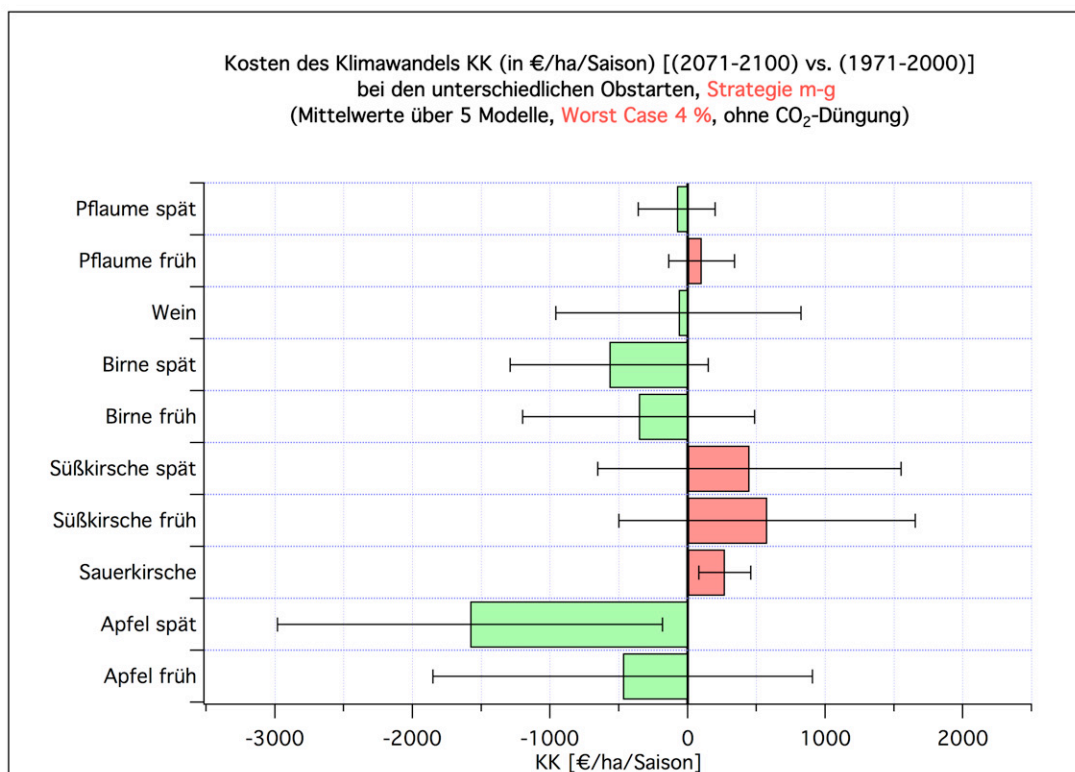


Abbildung K.33: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 4 %; Mittelwert über 5 “Modelle”)

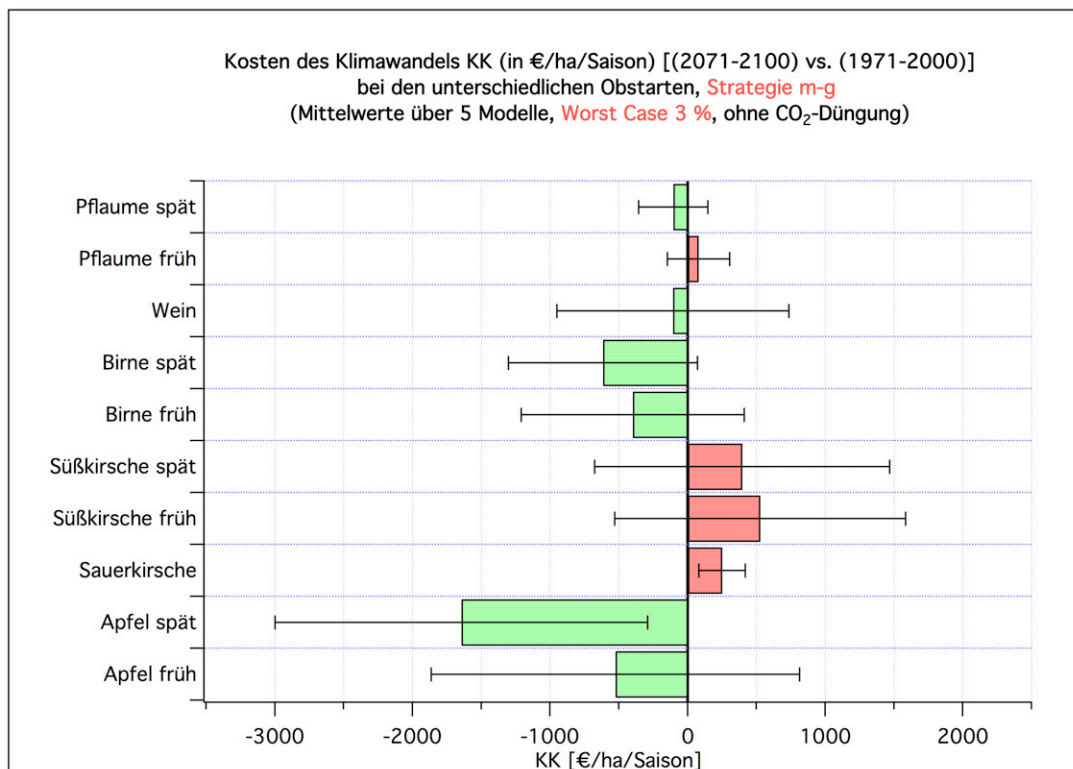


Abbildung K.34: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 3 %**; Mittelwert über 5 “Modelle”)

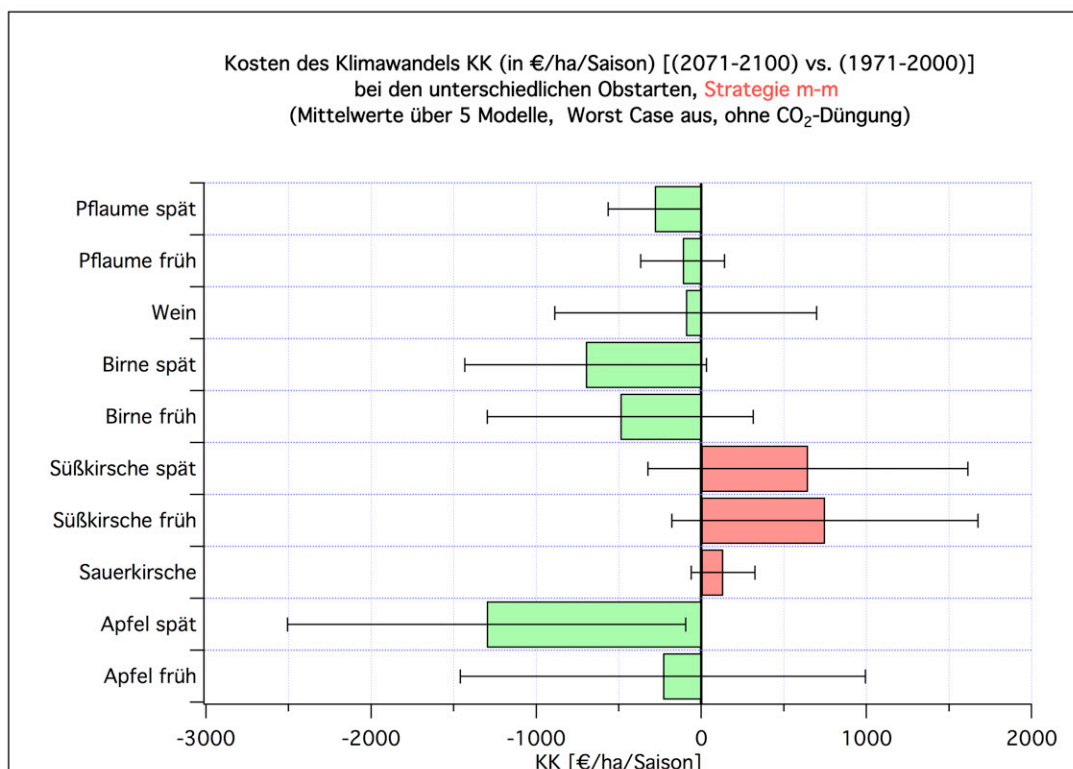


Abbildung K.35: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m**, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: AUS**; Mittelwert über 5 “Modelle”)

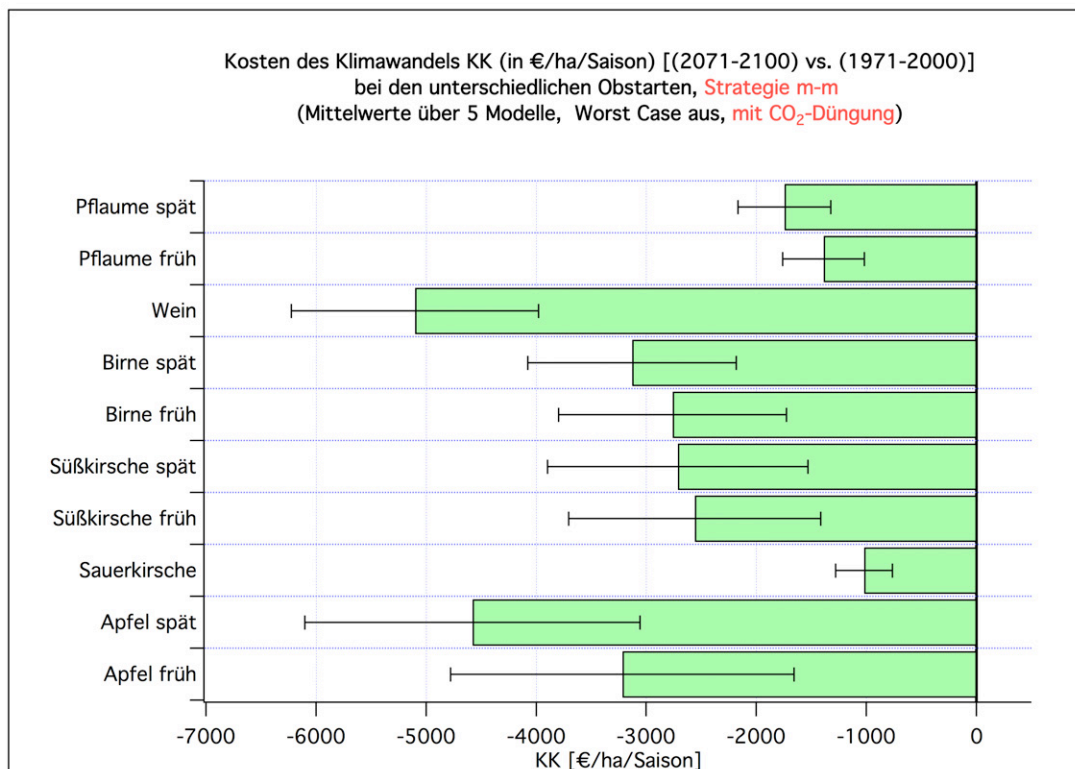


Abbildung K.36: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-m, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 “Modelle”)

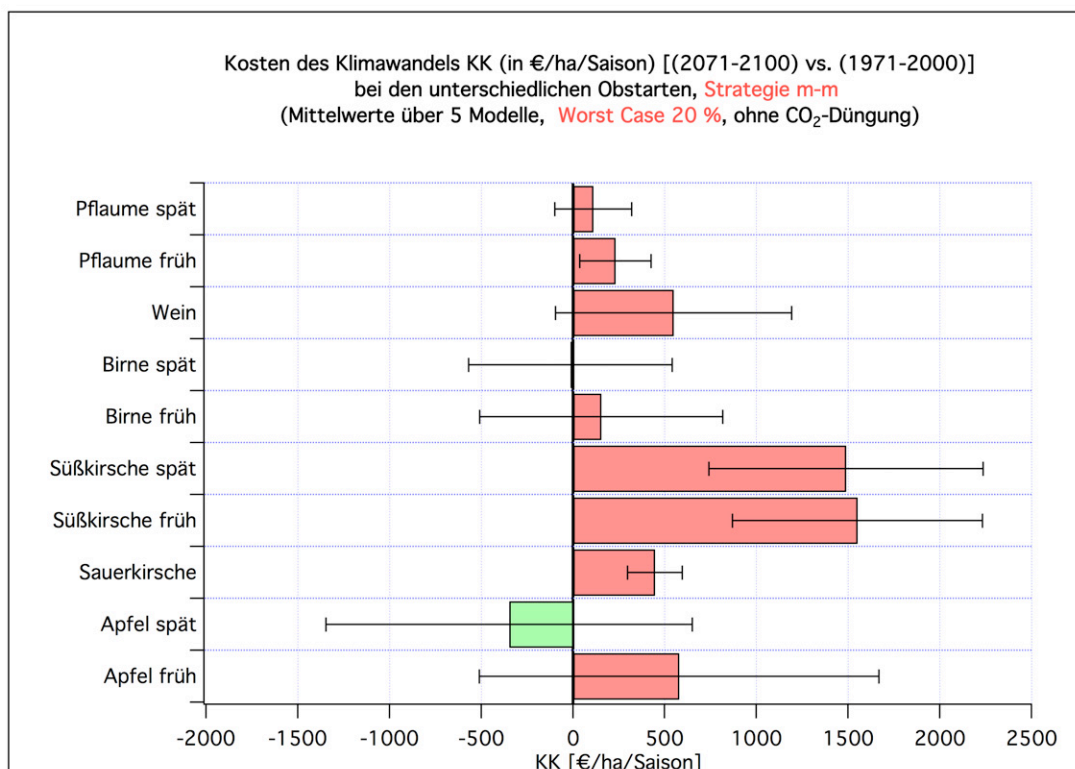


Abbildung K.37: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-m, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20 %; Mittelwert über 5 “Modelle”)

K.2.2.2.2 Jährlicher Verlauf der Kosten

Eine Diskussion der im Folgenden dargestellten Bilder findet man ab Seite 276 am Ende von Kapitel 5.7.2.2.

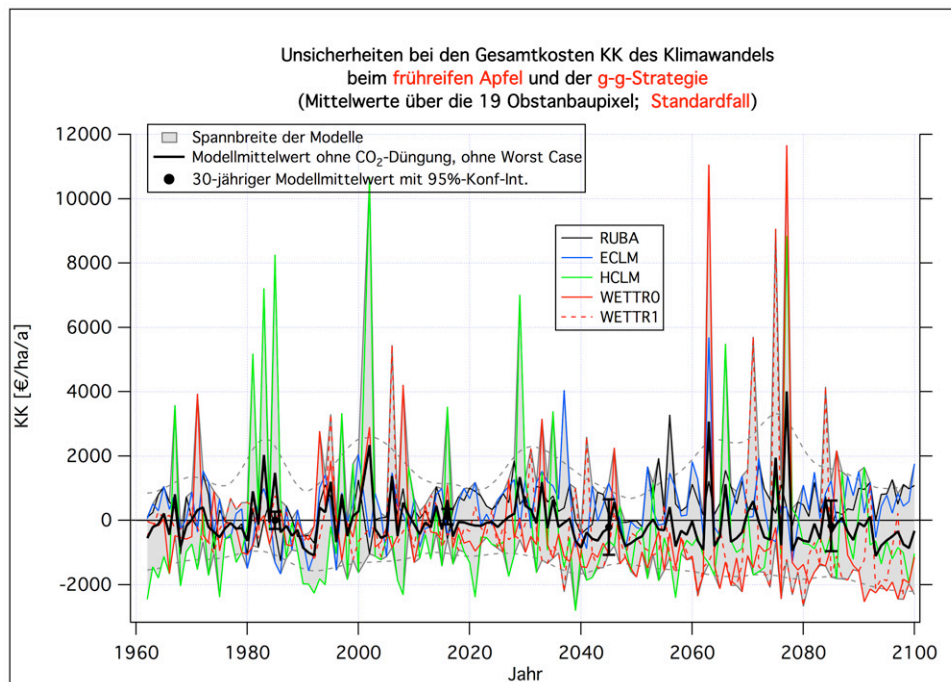


Abbildung K.38: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim frühreifen Apfel, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

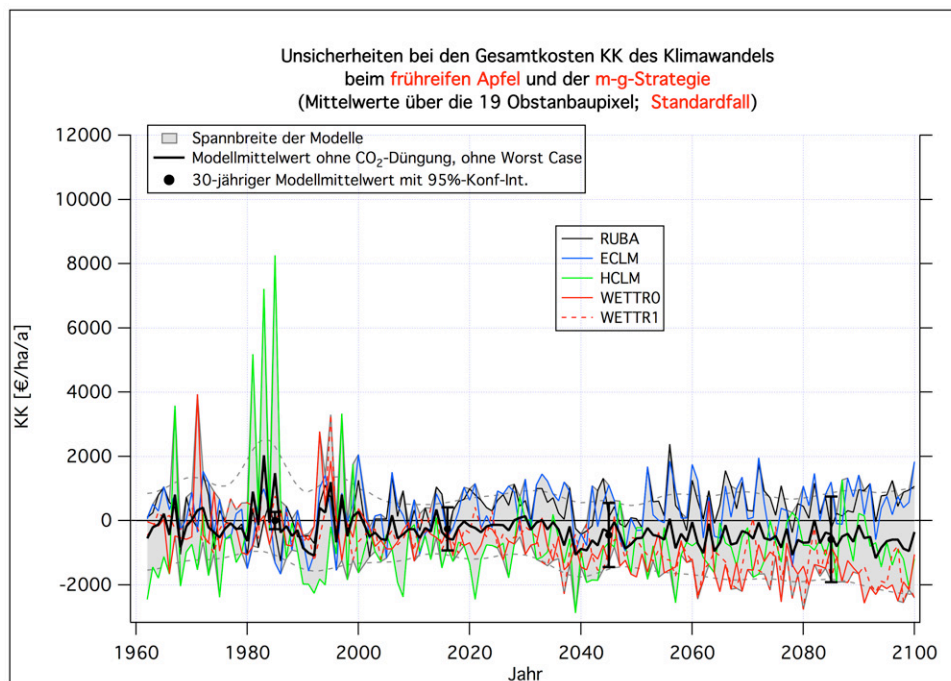


Abbildung K.39: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim frühreifen Apfel, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

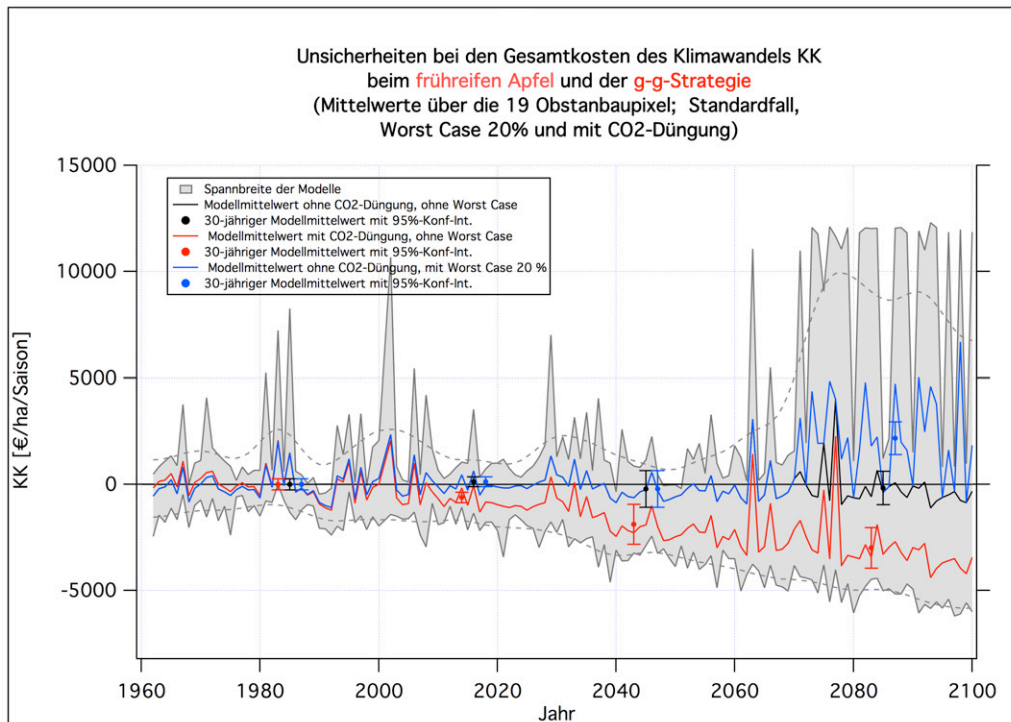


Abbildung K.40: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **frühreifen Apfel**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

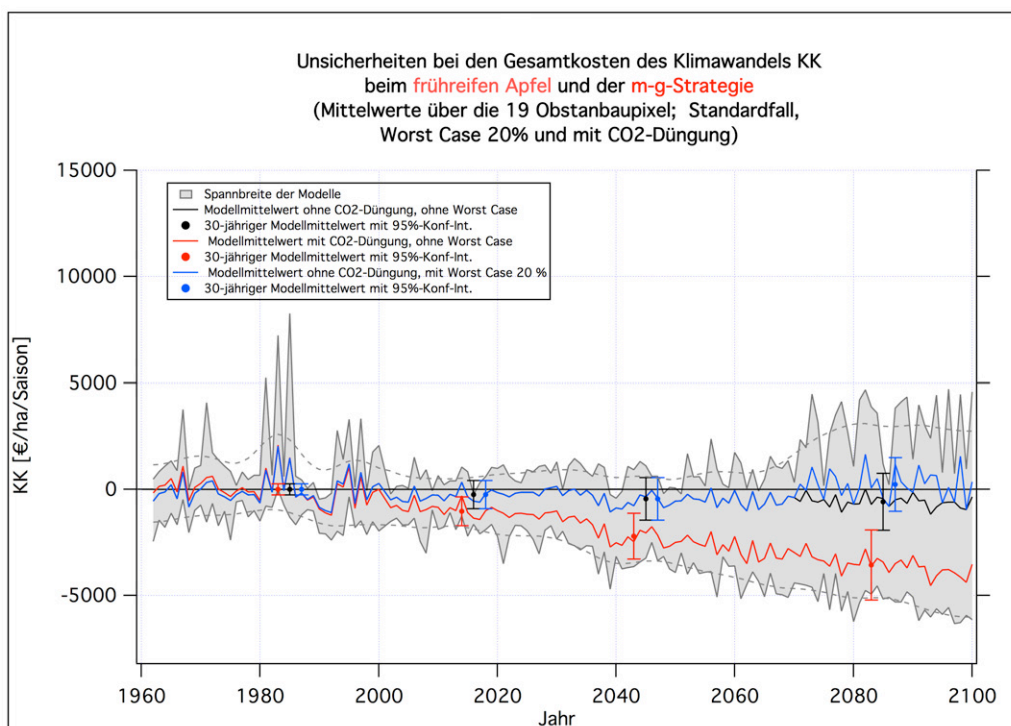


Abbildung K.41: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **frühreifen Apfel**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

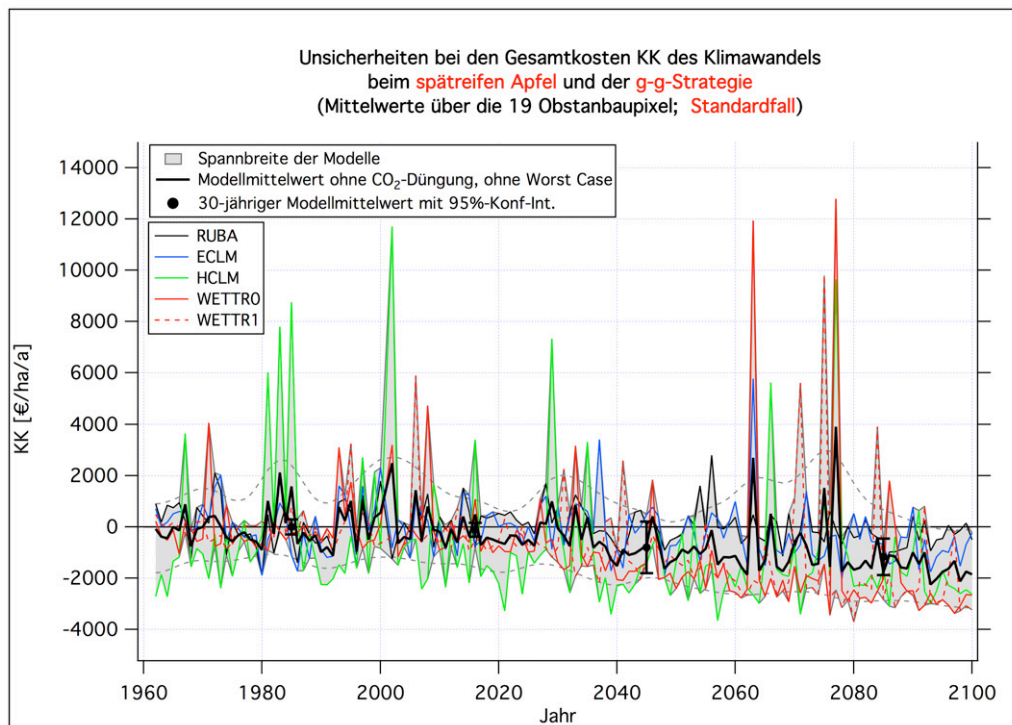


Abbildung K.42: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **spätreifen Apfel**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g**, ohne CO_2 -Düngung, Worst Case: AUS)

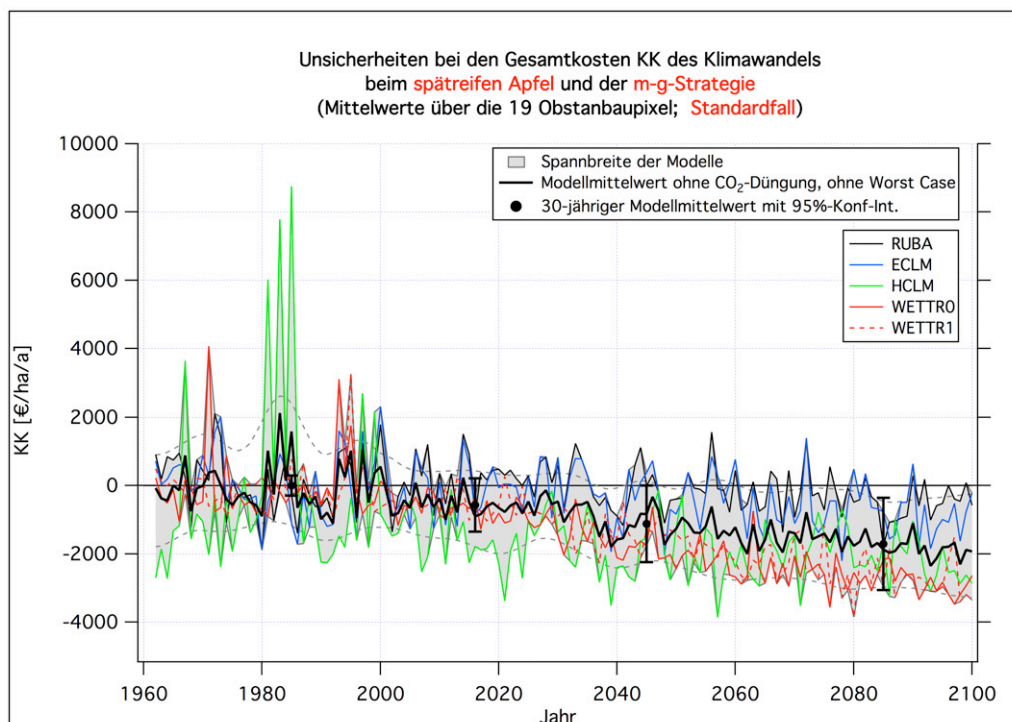


Abbildung K.43: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **spätreifen Apfel**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO_2 -Düngung, Worst Case: AUS)

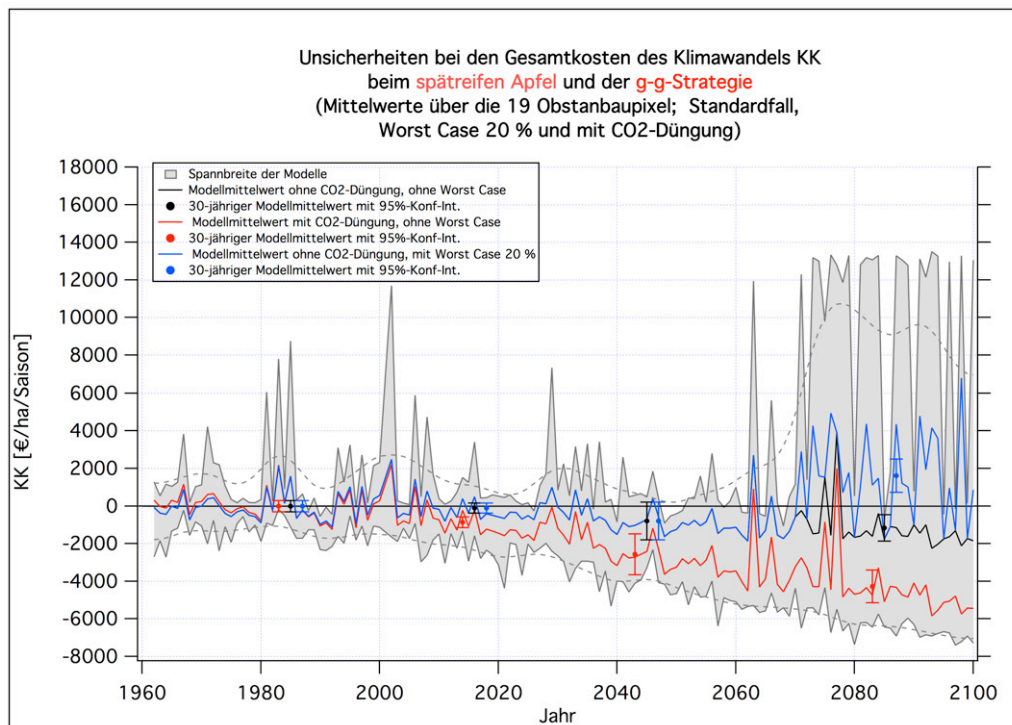


Abbildung K.44: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim spätreifen Apfel, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20 %”)

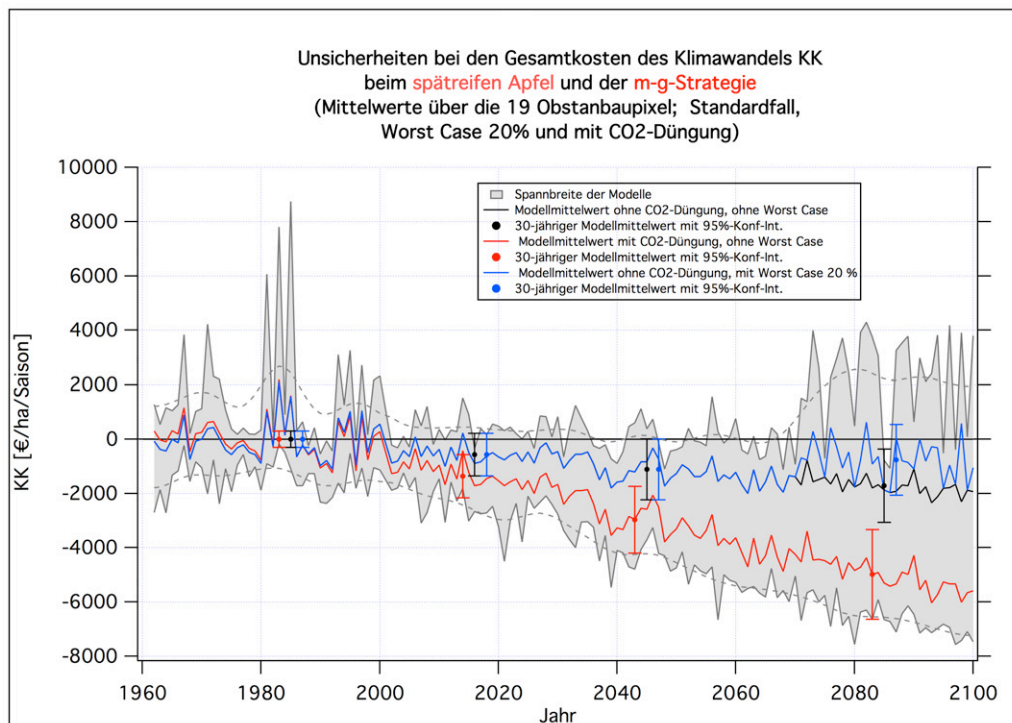


Abbildung K.45: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim spätreifen Apfel, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20 %”)

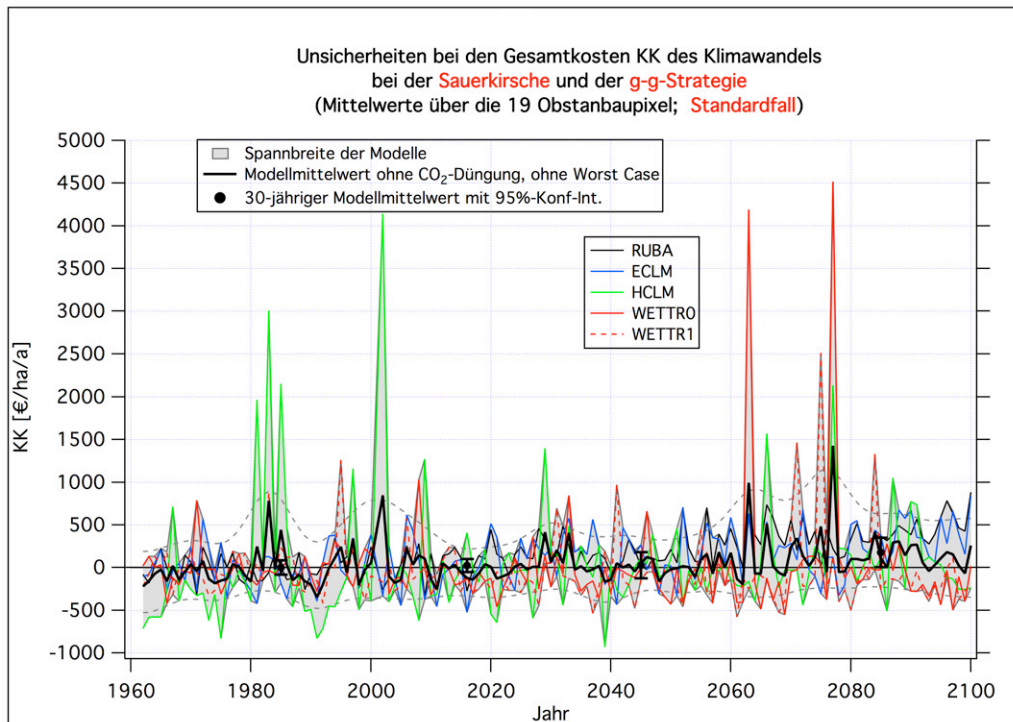


Abbildung K.46: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei der **Sauerkirsche**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

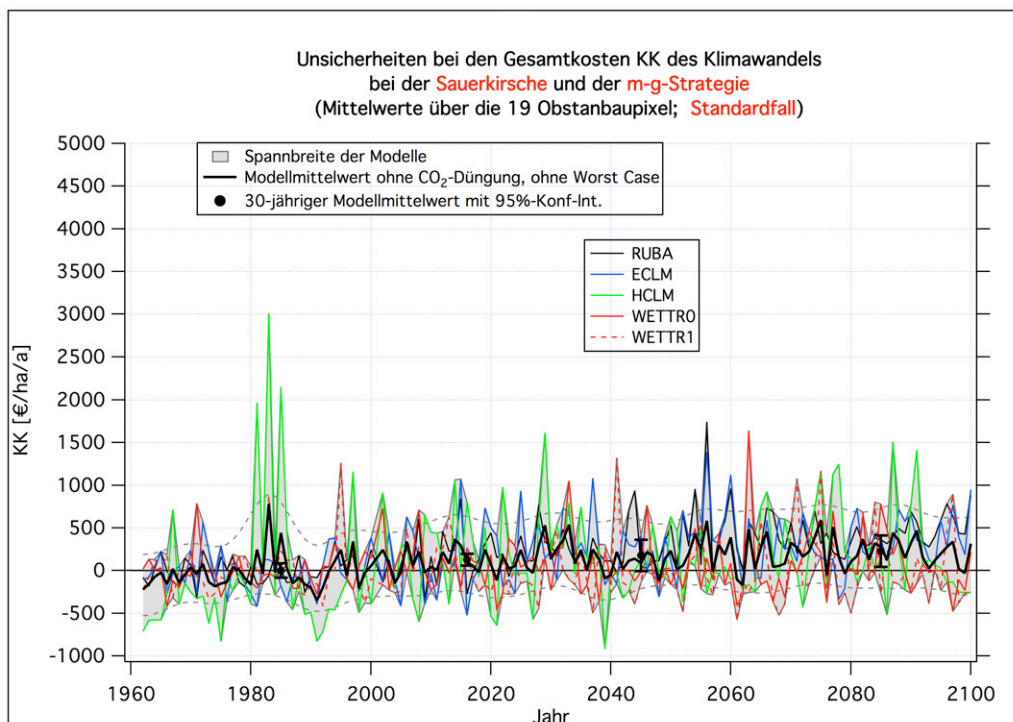


Abbildung K.47: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei der **Sauerkirsche**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

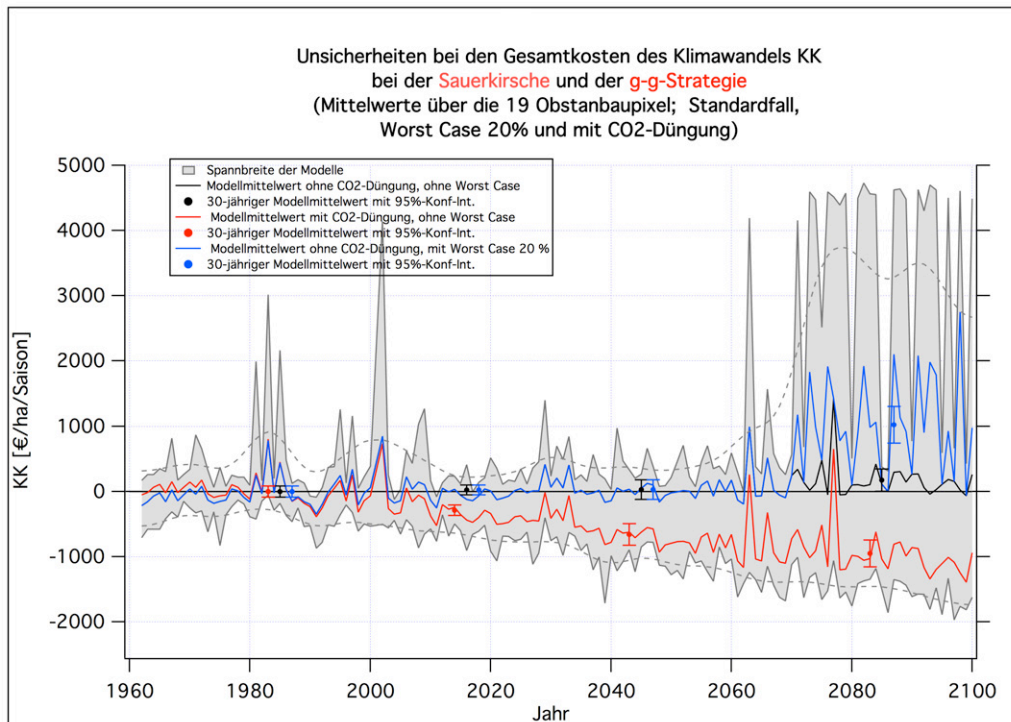


Abbildung K.48: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei der **Sauerkirsche**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

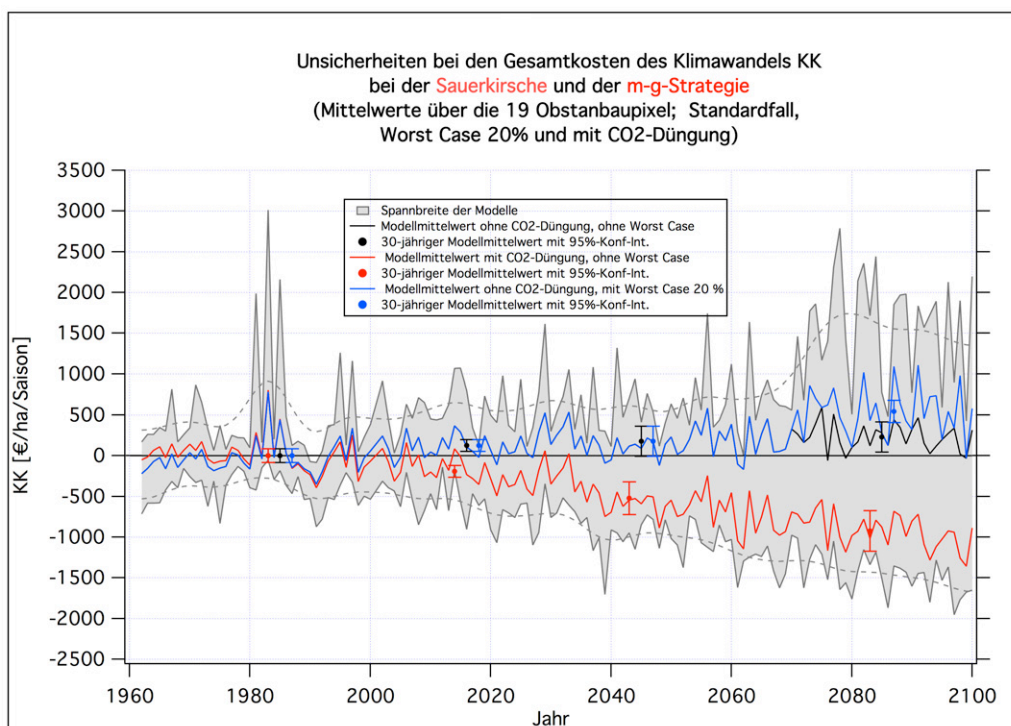


Abbildung K.49: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei der **Sauerkirsche**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

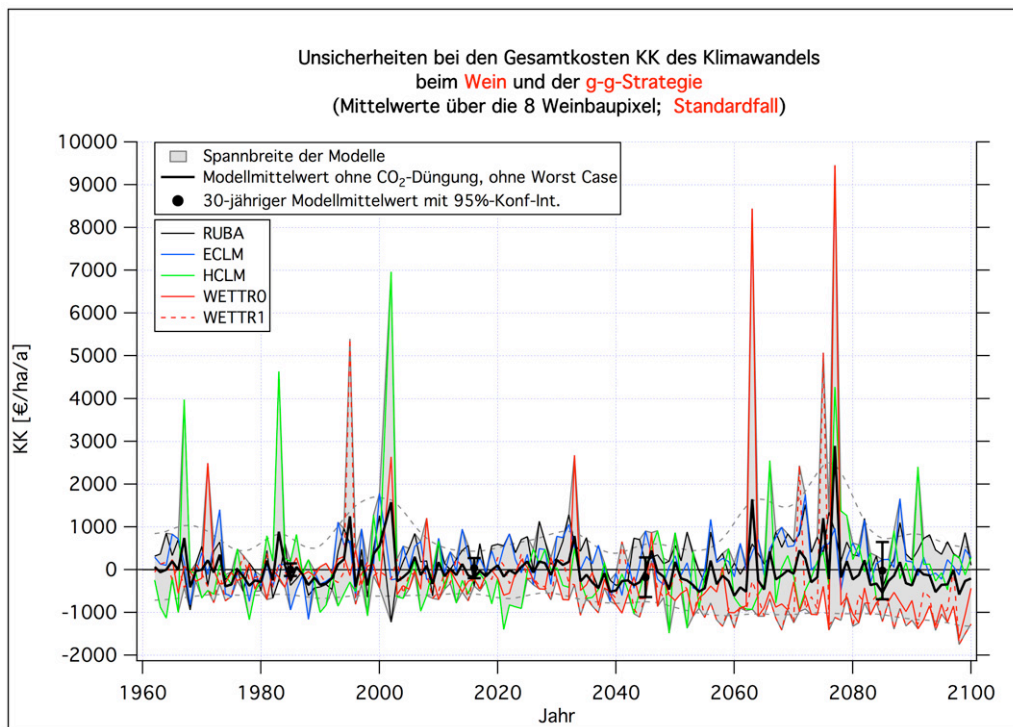


Abbildung K.50: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **Wein**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

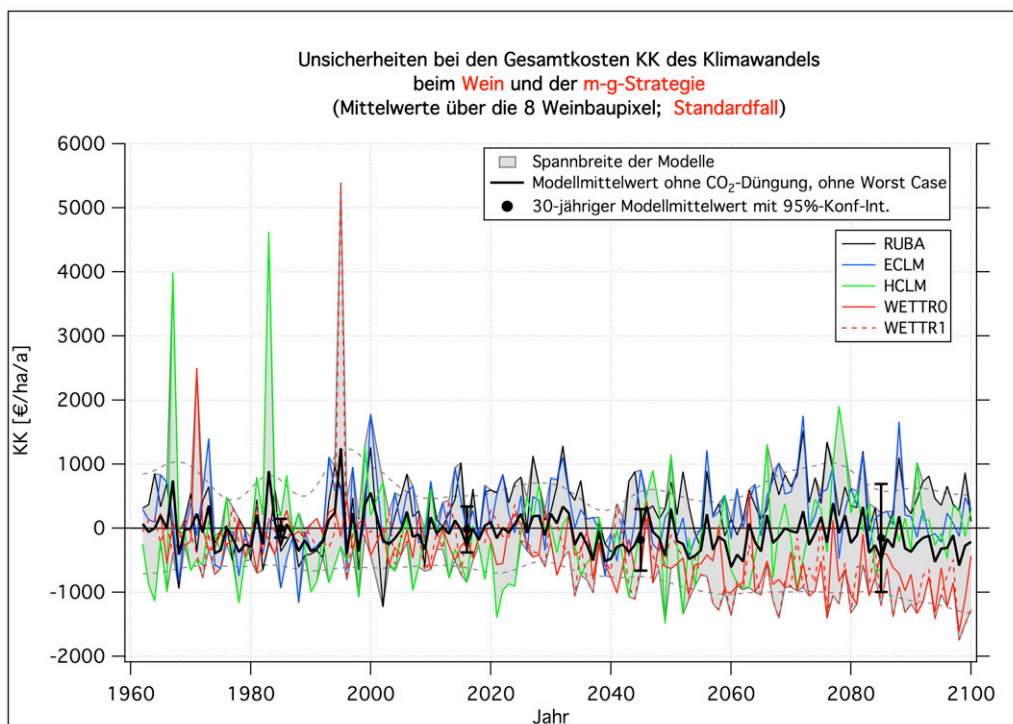


Abbildung K.51: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **Wein**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

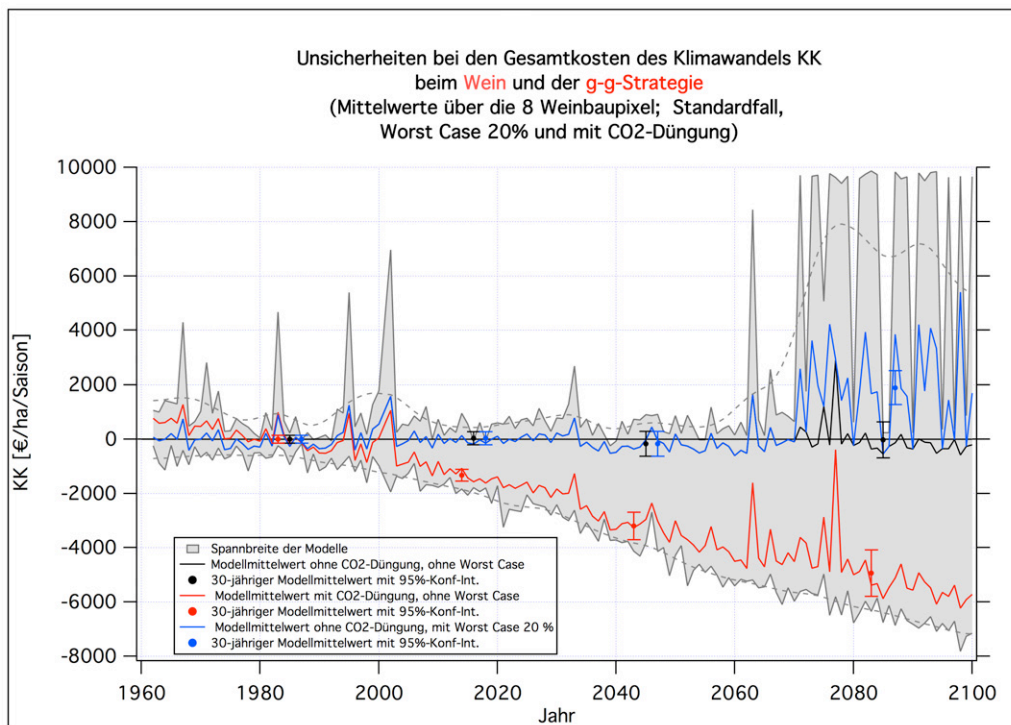


Abbildung K.52: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **Wein**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

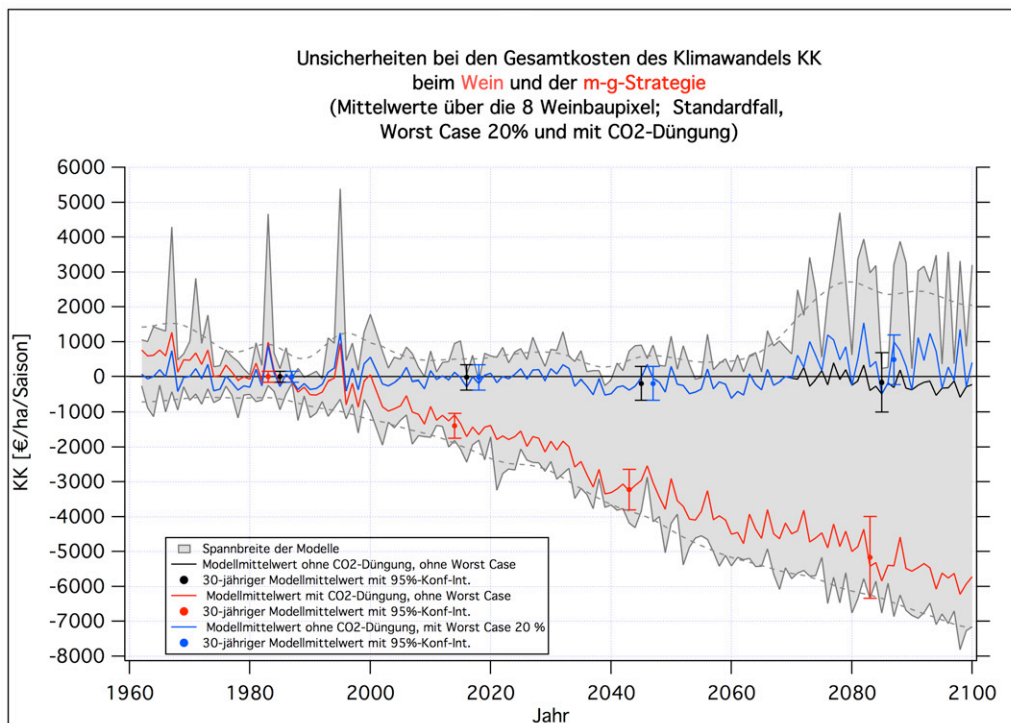


Abbildung K.53: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **Wein**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

K.2.2.2.3 Aufsummierte (akkumulierte) Kosten

Die folgenden Abbildungen werden am Ende von Kapitel 5.7.2.2 ab Seite 276 diskutiert.

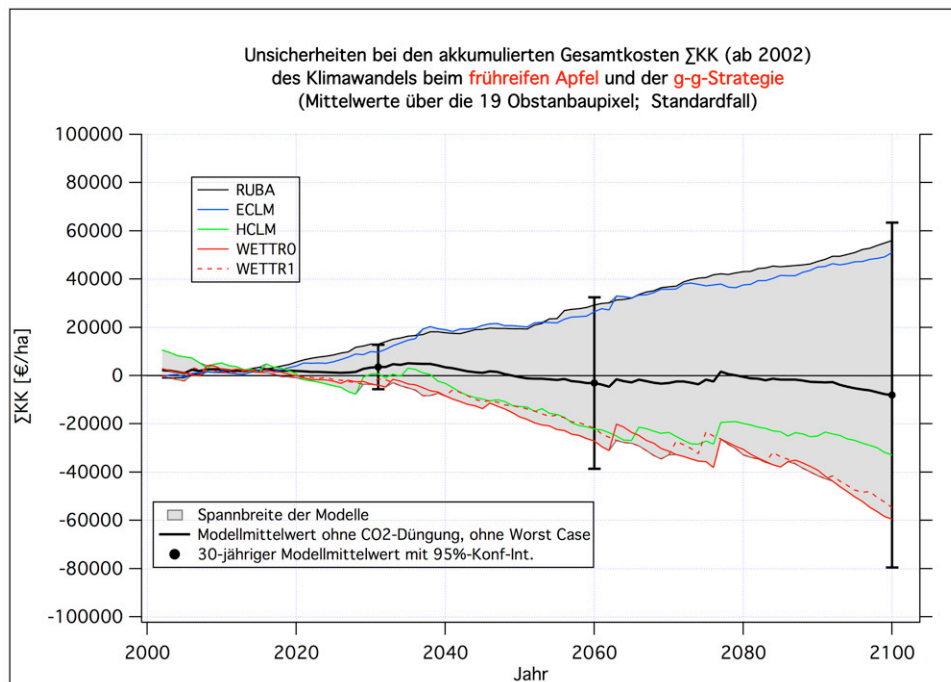


Abbildung K.54: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **frühreifen Apfel**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

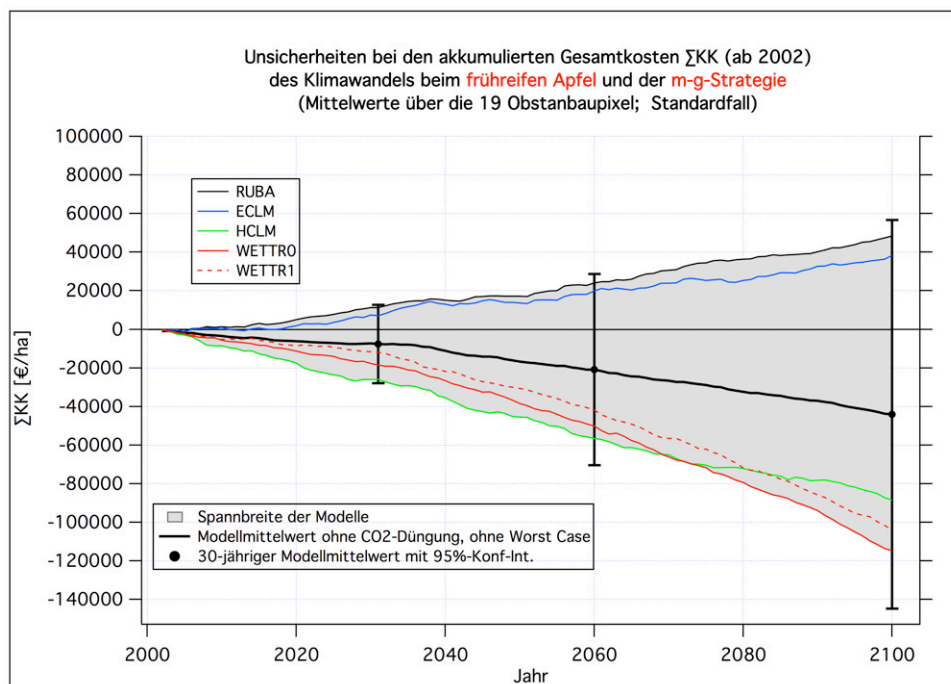


Abbildung K.55: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **frühreifen Apfel**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

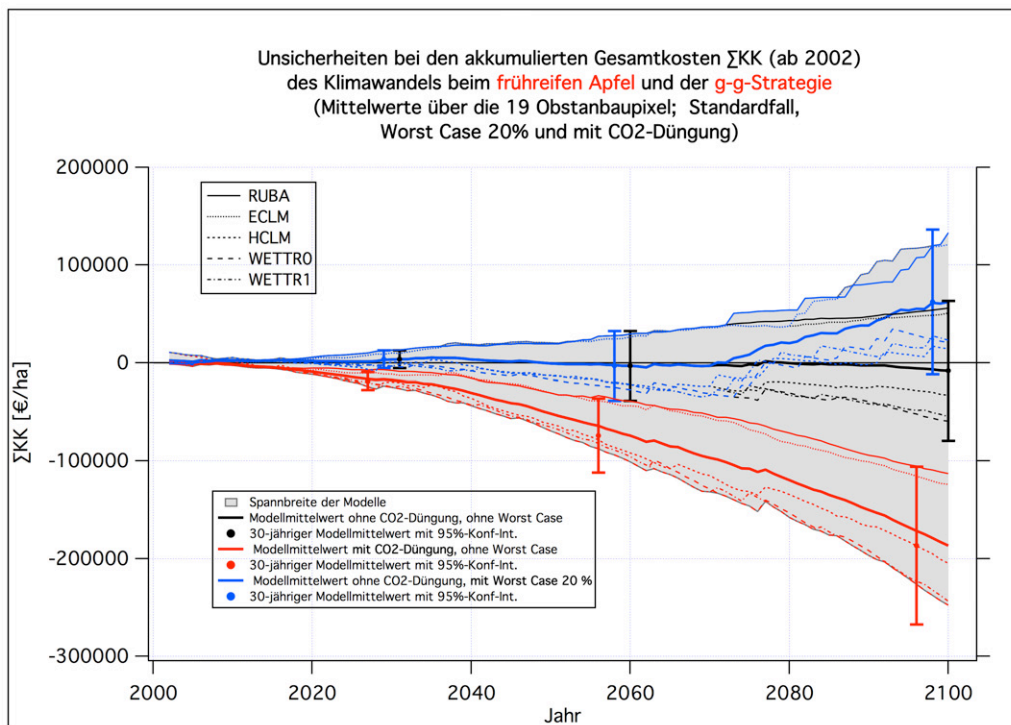


Abbildung K.56: Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **frühreifen Apfel**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

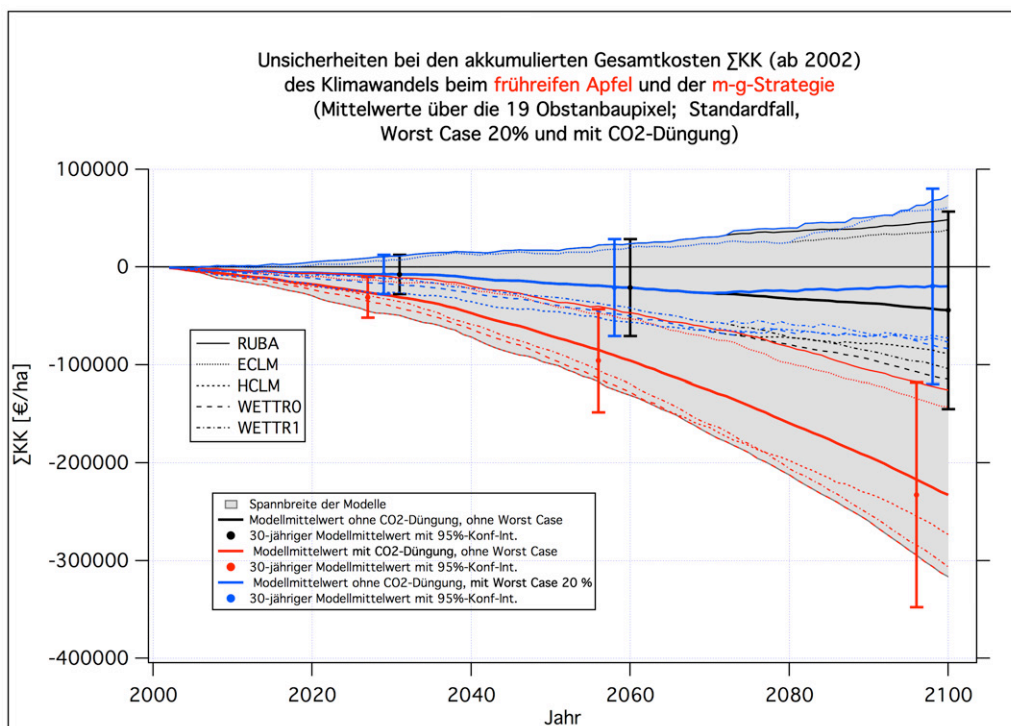


Abbildung K.57: Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **frühreifen Apfel**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

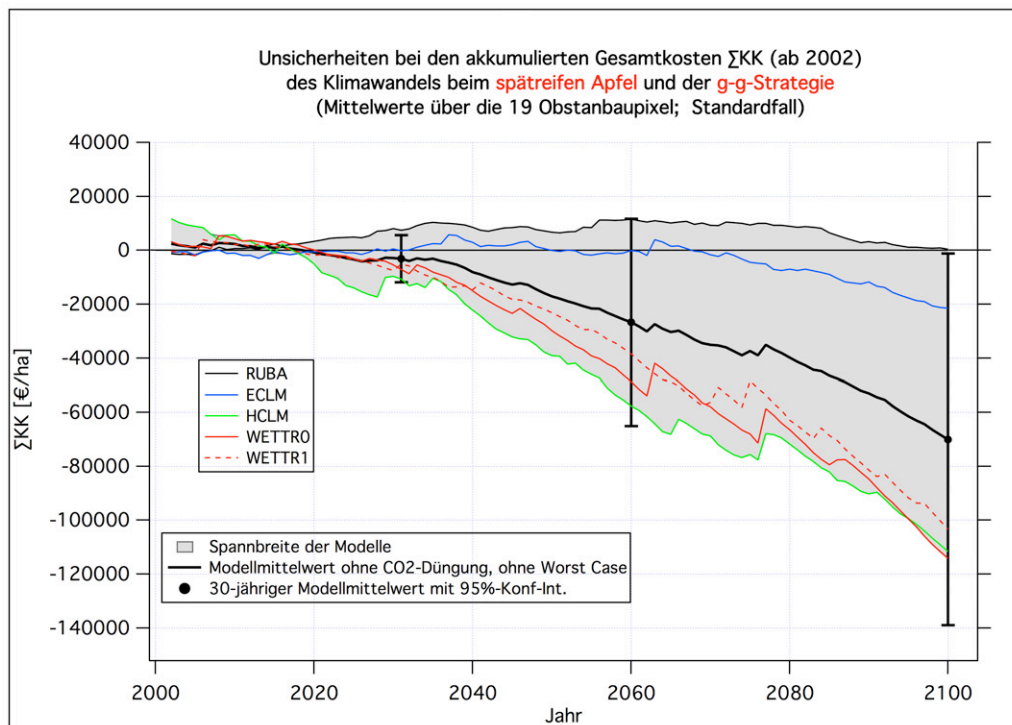


Abbildung K.58: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **spätreifen Apfel**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

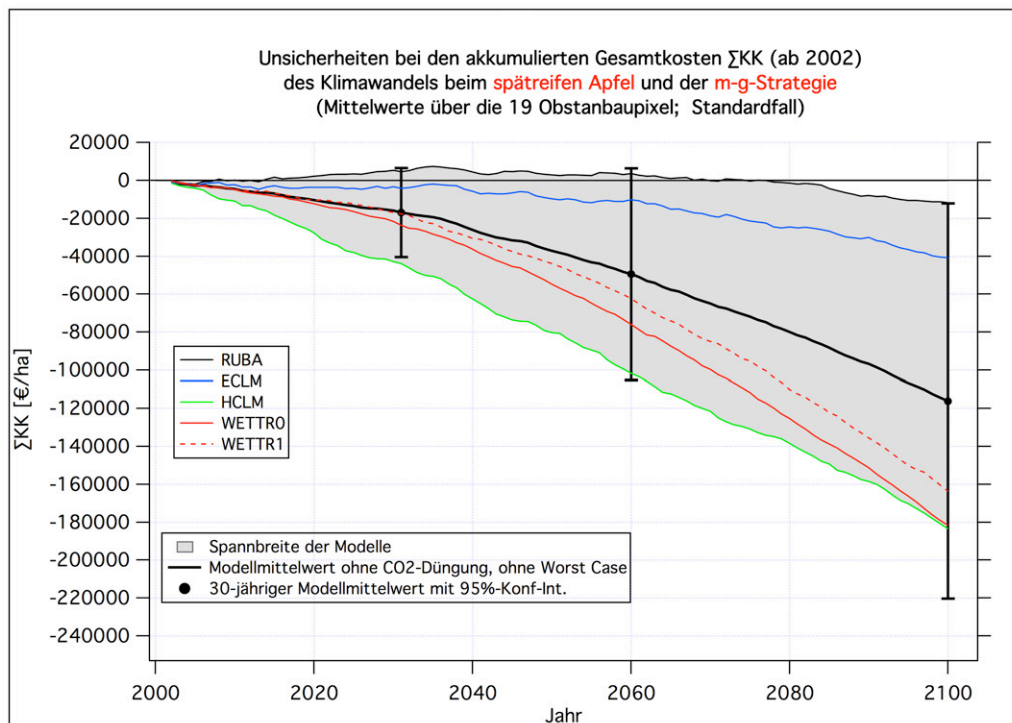


Abbildung K.59: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **spätreifen Apfel**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

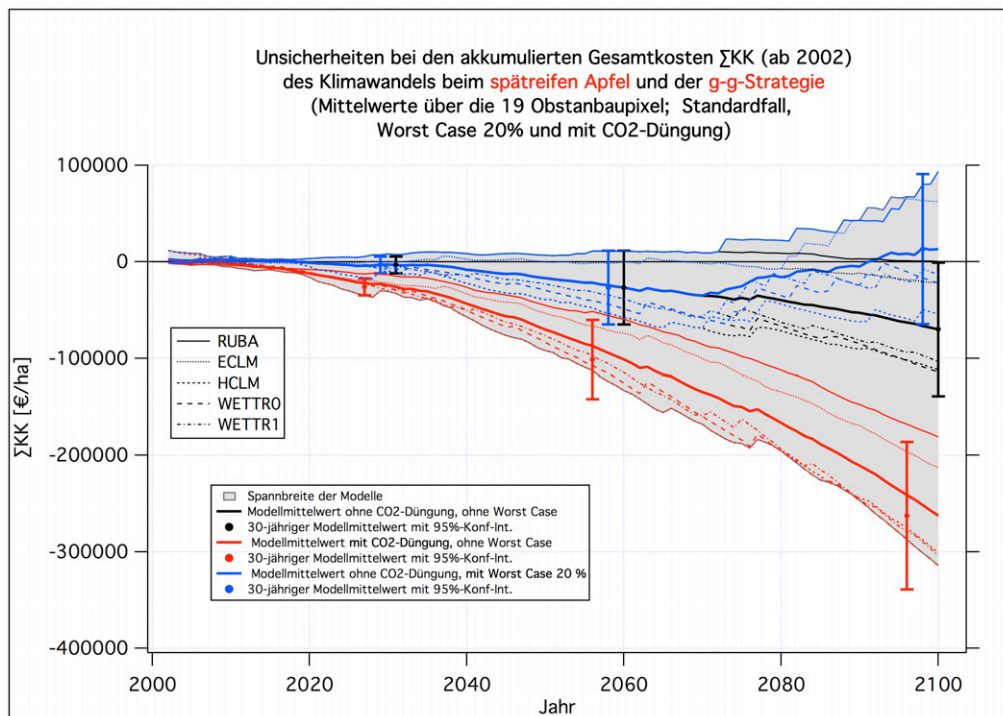


Abbildung K.60: Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **spätreifen Apfel**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (Strategie g-g mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20 %”)

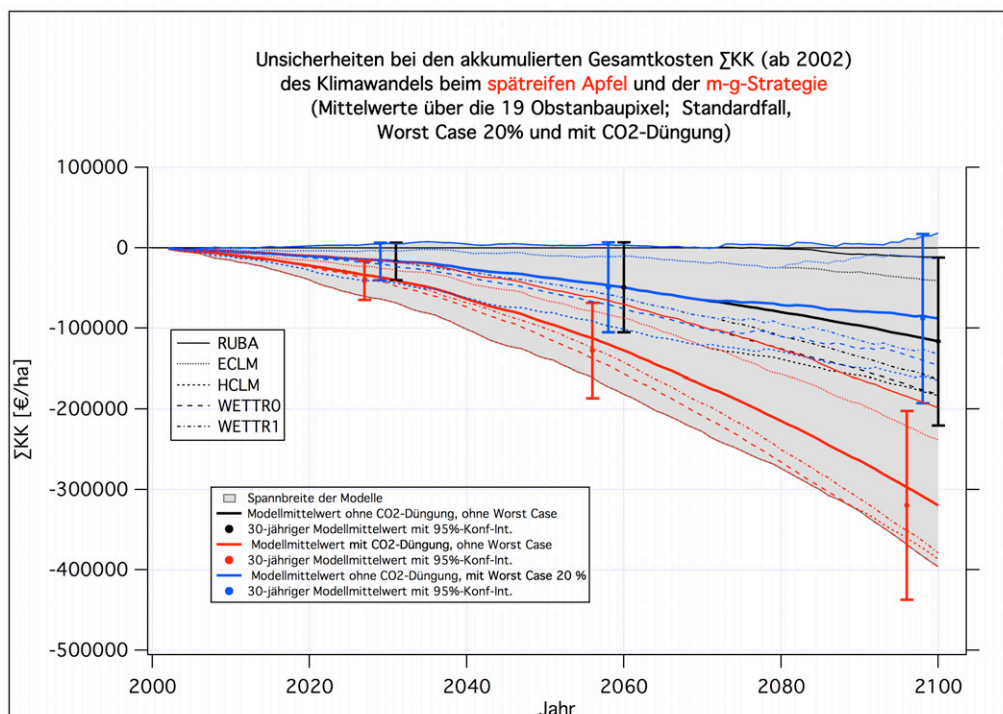


Abbildung K.61: Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **spätreifen Apfel**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (Strategie m-g mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20 %”)

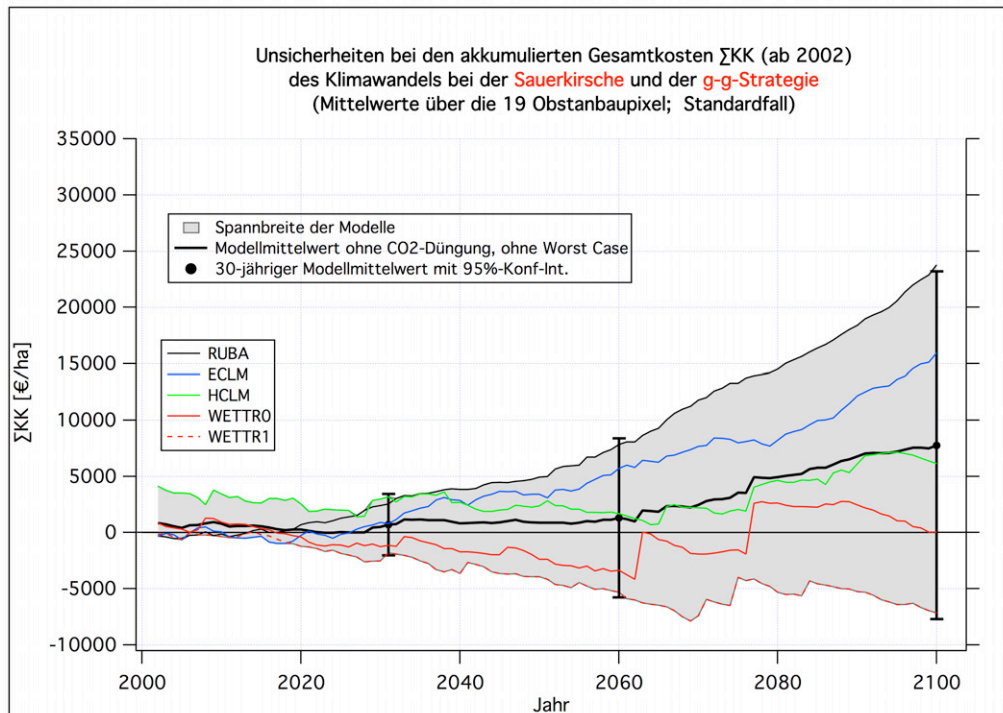


Abbildung K.62: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) bei der **Sauerkirsche**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

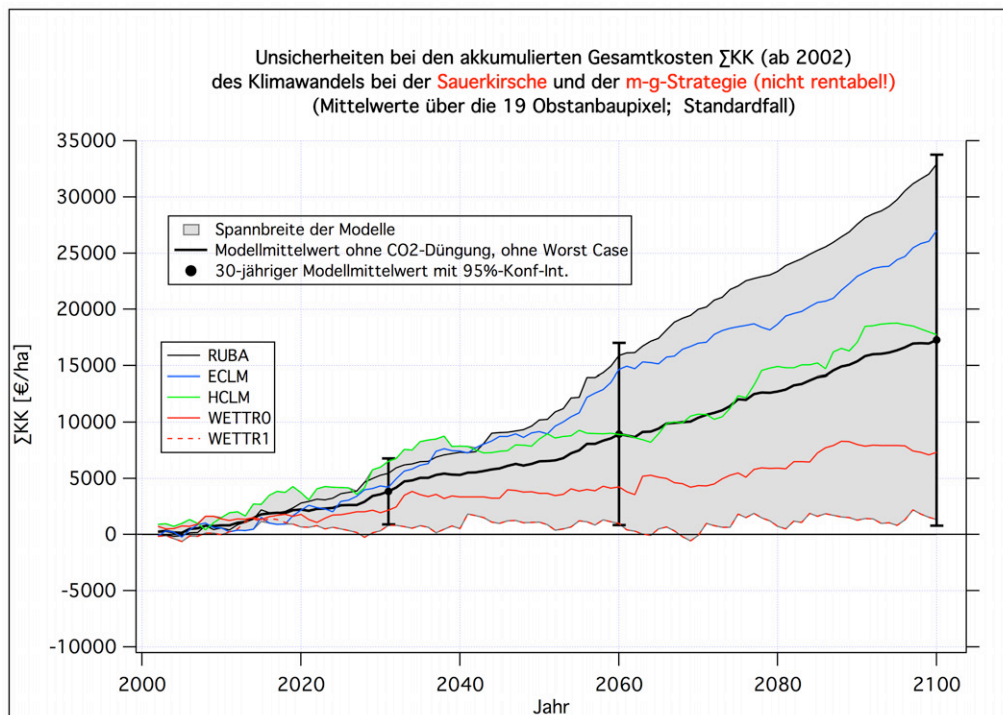


Abbildung K.63: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) bei der **Sauerkirsche**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

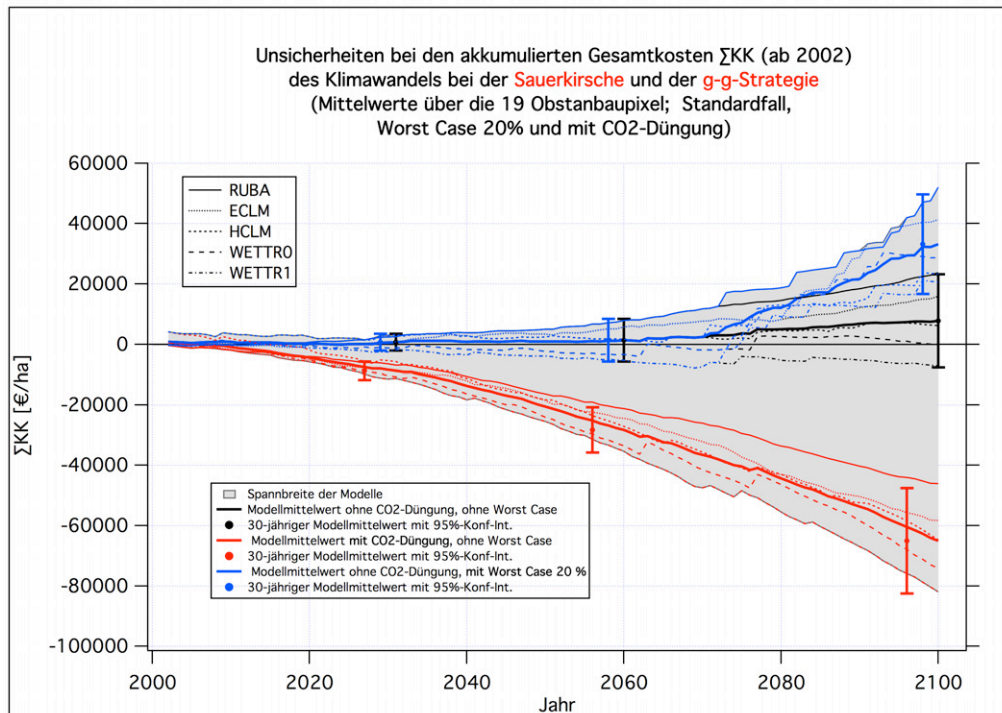


Abbildung K.64: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) bei der **Sauerkirsche**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

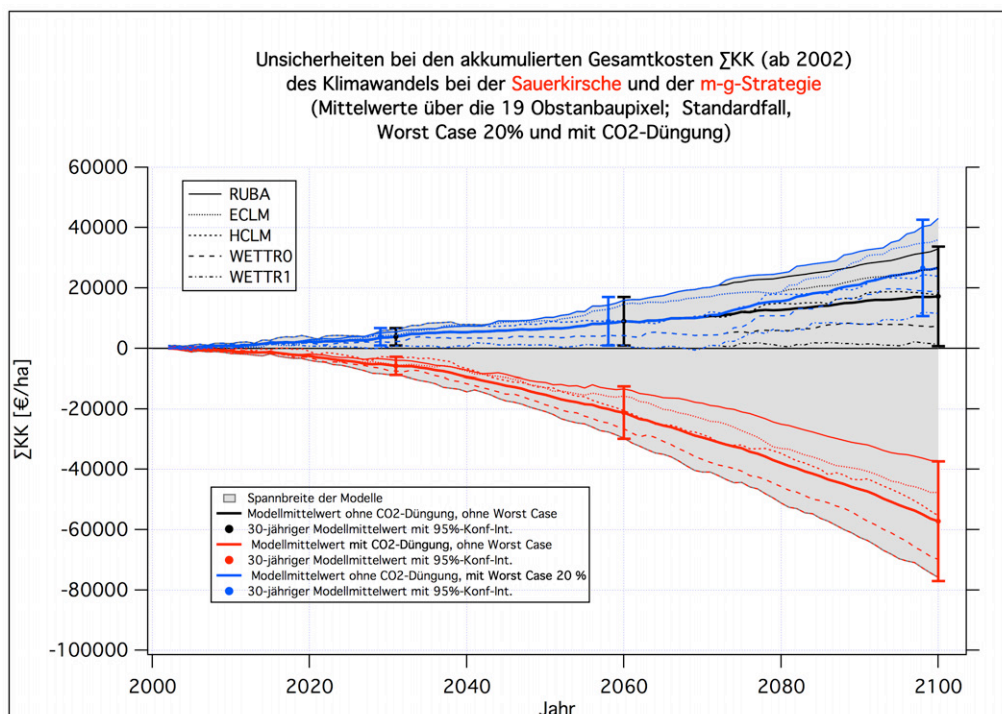


Abbildung K.65: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) bei der **Sauerkirsche**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

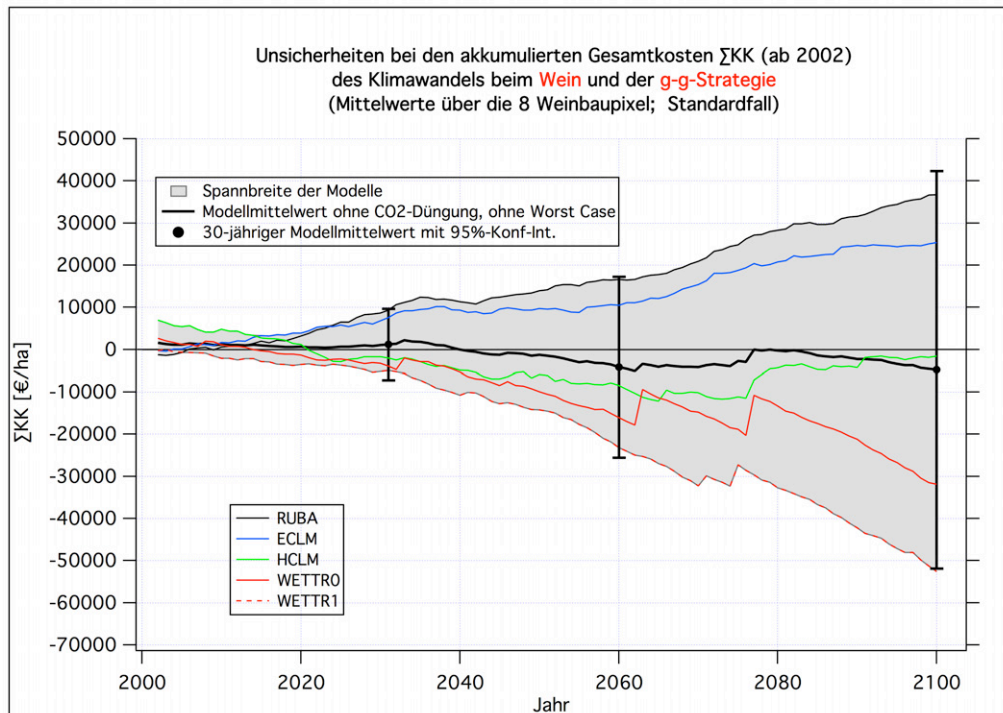


Abbildung K.66: Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **Wein**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

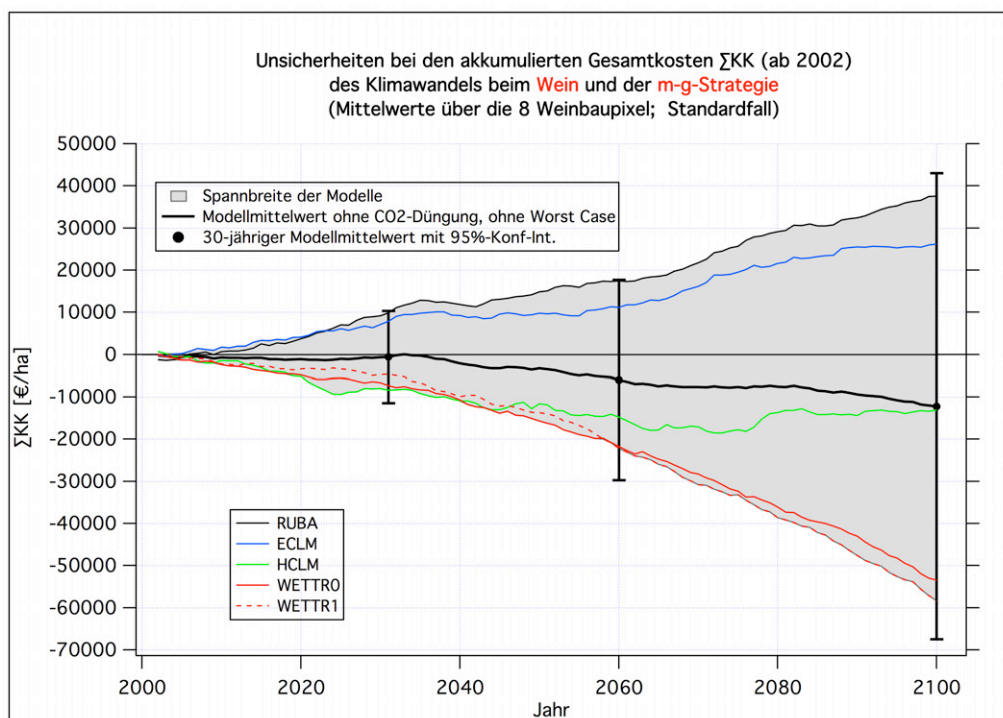


Abbildung K.67: Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **Wein**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

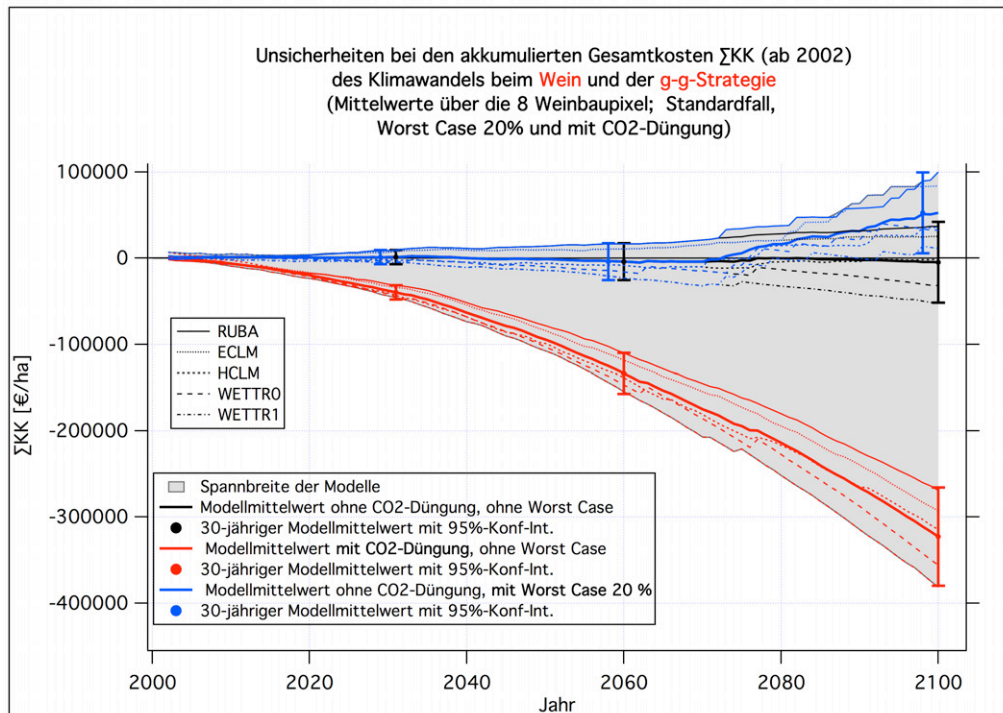


Abbildung K.68: Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **Wein**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

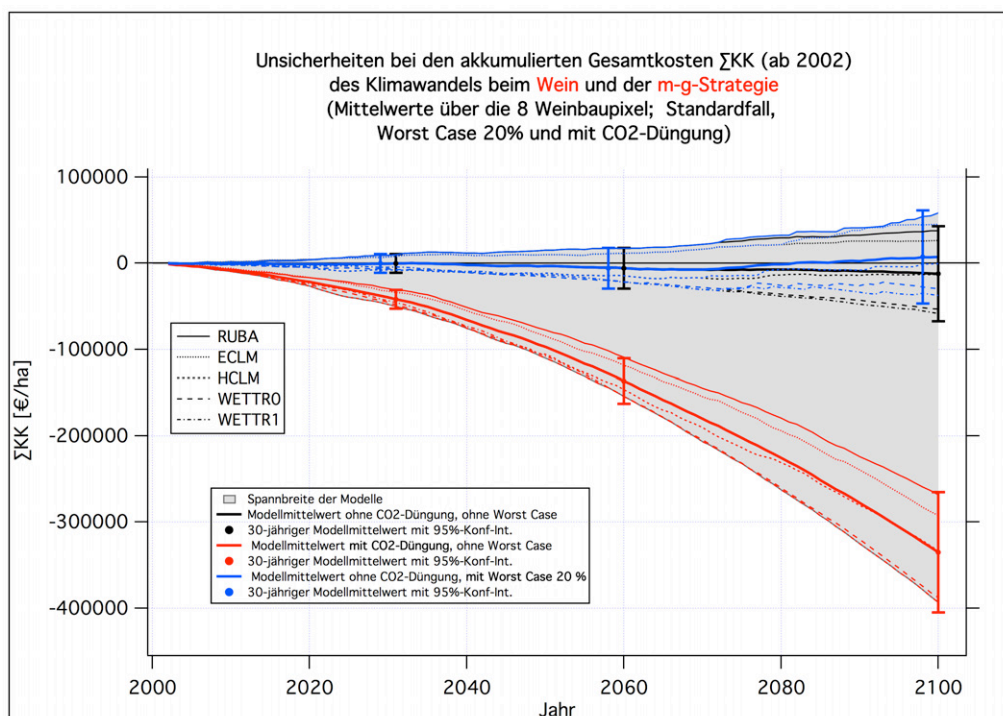


Abbildung K.69: Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels (in €/ha) (ab 2002 bis zum Jahr auf der Abszisse) beim **Wein**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

Abschließend sollen noch für alle 10 Obstarten die von 2002 bis 2100 akkumulierten Gesamtkosten pro Hektar für die m-g-Strategie verglichen werden. Werte für die g-g- und m-m-Strategie findet man in den Tabellen im Abschnitt K.2.2.1.2. Eine kurze Diskussion der folgenden Bilder findet man auf Seite 278 im Kapitel 5.7.2.2.

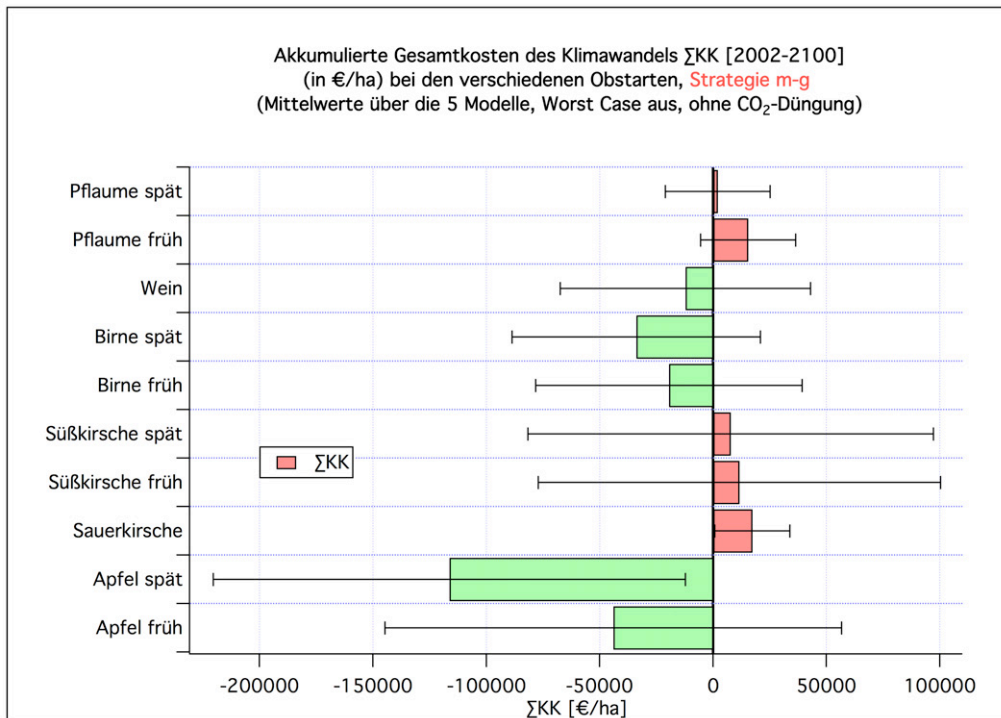


Abbildung K.70: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (von 2002 bis 2100) bei den verschiedenen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe)

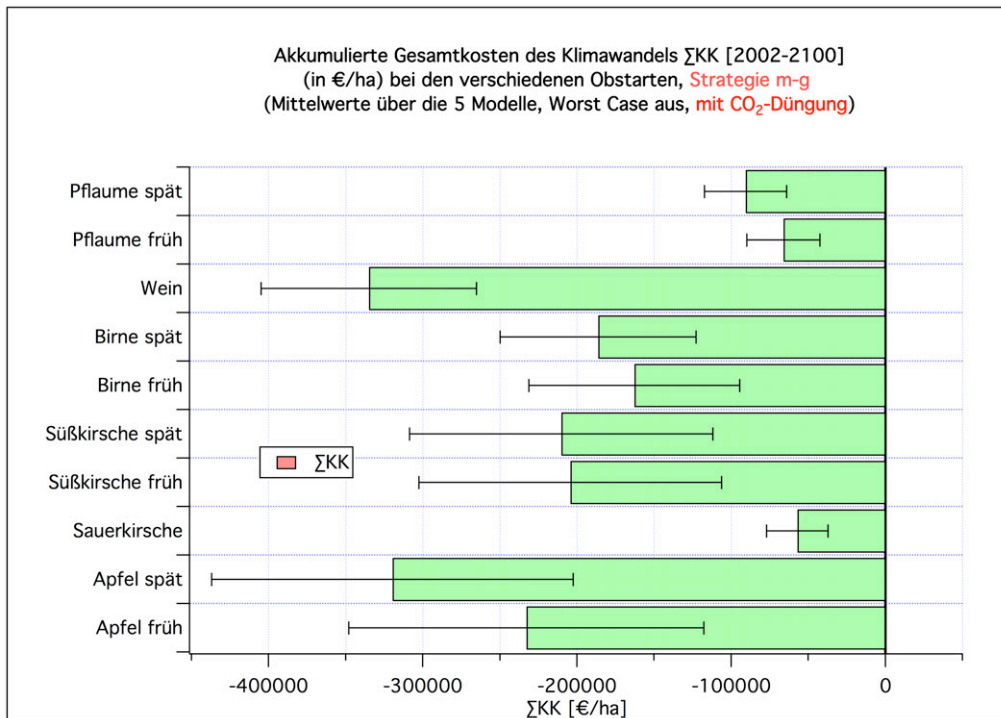


Abbildung K.71: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (von 2002 bis 2100) bei den verschiedenen Obstarten (**Strategie m-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS**; Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe)

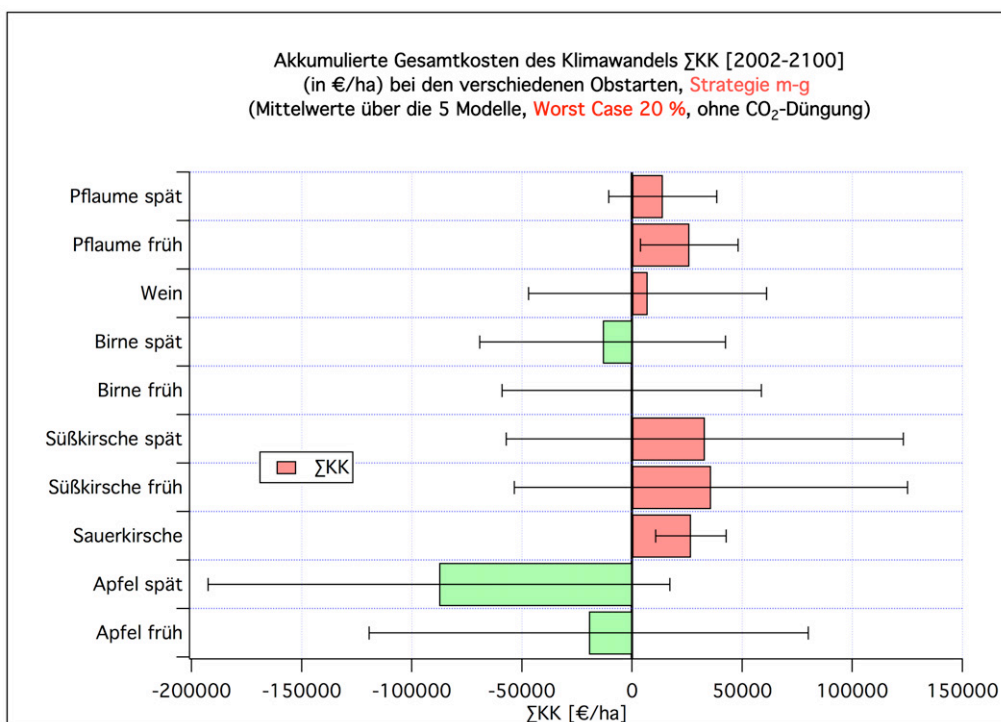


Abbildung K.72: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (von 2002 bis 2100) bei den verschiedenen Obstarten (**Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20 %**; Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe)

K.2.3 Kosten *KKA* des Klimawandels (für ganz Hessen)

Die hier dargestellten Kosten *KKA* des Klimawandels für ganz Hessen entsprechen den im vorangegangenen Kapitel [K.2.2](#) angegebenen Kosten *KK* pro Flächeneinheit und pro Jahr, nur wurden diese *KK*-Werte hier jeweils mit der Gesamtanbaufläche (rechte Spalte der Tabelle [4.26](#)) multipliziert, um die Kosten für die Gesamtanbaufläche in Hessen (in €/Saison bzw. €/a) zu erhalten.³

Da die Weinanbaufläche um mindestens eine Zehnerpotenz größer ist die Anbauflächen bei den anderen Obstarten, wurden als Einheit für *KKA* beim Wein in den Tabellen 10 000 €/Saison gewählt. Für die anderen Obstarten wurde 1000 €/Saison verwendet.

Zuerst werden wieder die *normalen* 30-jährigen Mittelwerte von *KKA* dargestellt, danach die ab 2002 aufsummierten Kosten $\sum_{2002}^j KKA$ (Abschnitt [K.2.3.1.2](#)).

K.2.3.1 Tabellen

K.2.3.1.1 30-jährige Mittelwerte und Differenzen

Eine kurze Diskussion zu *KKA* findet man in Kapitel [5.7.2.2](#) auf Seite [278](#).

Tabelle K.54: Statistik für die **Gesamtkosten *KKA* des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie o-o**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (61.6)	53.4 (67.1)	79.9 (128.2)	277.3 (147.1)	277.3 (155.7)	0.187	**
Apfel spät	0.0 (26.6)	18.7 (33.3)	49.8 (41.3)	163.7 (107.5)	163.7 (108.3)	0.906	**
Sauerkirsche	0.0 (4.7)	3.0 (7.0)	1.7 (11.2)	12.0 (12.2)	12.0 (12.7)	6.200	
Süßkirsche früh	0.0 (18.4)	9.2 (18.9)	3.4 (42.9)	40.5 (39.7)	40.5 (42.3)	5.904	
Süßkirsche spät	0.0 (29.7)	25.2 (31.4)	6.3 (77.5)	60.5 (67.1)	60.5 (71.3)	8.999	
Birne früh	0.0 (2.7)	1.5 (2.9)	0.5 (4.7)	6.4 (7.5)	6.4 (7.8)	10.113	
Birne spät	0.0 (3.6)	2.3 (3.9)	2.9 (4.1)	14.8 (14.2)	14.8 (14.4)	4.516	*
Wein	0.0 (48.2)	34.5 (97.3)	35.4 (113.1)	195.3 (96.5)	195.3 (106.4)	0.064	***
Pflaume früh	0.0 (1.8)	1.6 (1.9)	-0.1 (4.8)	2.9 (4.5)	2.9 (4.8)	21.038	
Pflaume spät	0.0 (4.3)	2.6 (4.2)	2.8 (5.0)	13.6 (13.0)	13.6 (13.4)	4.614	*

³ Da sich die *KKA*-Werte nur um einen festen, von der Obstart abhängigen Faktor von den *KK* unterscheiden, wurden nur einige Fälle graphisch dargestellt (Abschnitt [K.2.3.2](#)).

Tabelle K.55: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-o**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (61.6)	-289.5 (166.8)	-338.9 (230.9)	-370.8 (304.5)	-370.8 (315.7)	3.105	*
Apfel spät	0.0 (26.6)	-210.5 (80.7)	-266.8 (103.9)	-327.3 (118.9)	-327.3 (124.3)	0.186	**
Sauerkirsche	0.0 (4.7)	8.6 (3.3)	11.6 (11.2)	14.6 (9.8)	14.6 (10.3)	1.046	*
Süßkirsche früh	0.0 (18.4)	-12.5 (36.5)	0.9 (48.8)	23.5 (62.4)	23.5 (62.2)	37.561	
Süßkirsche spät	0.0 (29.7)	-24.7 (61.9)	-6.9 (85.9)	19.0 (104.2)	19.0 (103.5)	65.751	
Birne früh	0.0 (2.7)	-3.9 (6.1)	-7.9 (9.6)	-11.7 (11.0)	-11.7 (11.6)	4.872	*
Birne spät	0.0 (3.6)	-8.5 (8.8)	-15.2 (12.8)	-22.0 (12.8)	-22.0 (12.7)	0.661	**
Wein	0.0 (48.2)	-27.3 (150.3)	-85.8 (172.6)	-75.7 (285.9)	-75.7 (293.3)	51.313	
Pflaume früh	0.0 (1.8)	5.1 (2.2)	4.0 (5.8)	1.5 (4.5)	1.5 (4.7)	47.948	
Pflaume spät	0.0 (4.3)	4.7 (8.1)	-0.4 (14.7)	-7.2 (10.6)	-7.2 (11.0)	16.591	

Tabelle K.56: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (66.6)	30.1 (58.6)	-52.4 (215.1)	-41.4 (195.9)	-41.4 (201.3)	65.248	
Apfel spät	0.0 (30.4)	-10.8 (27.2)	-81.1 (101.8)	-119.0 (71.6)	-119.0 (75.9)	0.466	**
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	1.4 (4.5)	1.6 (9.0)	10.4 (9.9)	10.4 (10.8)	5.763	
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	7.6 (19.0)	3.9 (40.0)	40.0 (35.0)	40.0 (38.7)	4.323	*
Süßkirsche spät	0.0 (31.8)	18.7 (31.0)	7.0 (68.6)	56.0 (55.7)	56.0 (62.2)	7.548	
Birne früh	0.0 (2.7)	0.3 (2.6)	-5.4 (9.0)	-6.5 (9.2)	-6.5 (9.4)	14.700	
Birne spät	0.0 (3.8)	-0.6 (3.1)	-9.6 (11.9)	-12.7 (10.5)	-12.7 (10.9)	2.709	*
Wein	0.0 (52.3)	14.3 (85.0)	-62.6 (165.9)	-7.5 (238.9)	-7.5 (247.8)	94.089	
Pflaume früh	0.0 (1.9)	0.7 (1.6)	-1.8 (5.0)	-1.5 (4.6)	-1.5 (4.8)	49.538	
Pflaume spät	0.0 (4.3)	-0.4 (3.5)	-8.4 (10.8)	-9.6 (9.3)	-9.6 (9.9)	5.777	

Tabelle K.57: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über nur 3 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (93.1)	64.7 (74.0)	28.1 (469.5)	68.9 (319.9)	68.9 (277.4)	48.701	
Apfel spät	0.0 (44.4)	-3.9 (35.2)	-51.1 (244.8)	-81.3 (110.6)	-81.3 (105.3)	10.410	
Sauerkirsche	0.0 (6.8)	4.3 (6.0)	5.9 (18.5)	15.9 (14.7)	15.9 (13.9)	3.165	*
Süßkirsche früh	0.0 (26.5)	15.3 (23.5)	16.2 (100.4)	54.6 (91.8)	54.6 (79.4)	11.670	
Süßkirsche spät	0.0 (44.3)	31.5 (38.6)	26.8 (173.0)	80.6 (142.5)	80.6 (109.9)	11.136	
Birne früh	0.0 (4.1)	1.4 (3.7)	-2.0 (19.8)	-1.6 (15.3)	-1.6 (13.0)	72.659	
Birne spät	0.0 (5.9)	0.1 (4.6)	-5.6 (27.9)	-7.3 (19.8)	-7.3 (17.3)	27.083	
Wein	0.0 (70.4)	59.3 (100.6)	18.8 (233.1)	136.6 (60.3)	136.6 (90.7)	0.386	**
Pflaume früh	0.0 (2.9)	0.9 (2.3)	-0.5 (13.0)	0.5 (10.3)	0.5 (8.9)	86.720	
Pflaume spät	0.0 (6.6)	-0.5 (5.0)	-5.7 (27.7)	-5.3 (15.8)	-5.3 (15.2)	40.958	

Tabelle K.58: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g, mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (66.9)	-152.0 (61.1)	-467.8 (233.8)	-740.4 (238.7)	-740.4 (244.6)	0.011	***
Apfel spät	0.0 (30.5)	-87.9 (28.3)	-261.4 (111.1)	-435.3 (86.2)	-435.3 (89.5)	0.000	***
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	-17.1 (4.7)	-39.0 (9.6)	-56.1 (11.8)	-56.1 (12.5)	0.000	***
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	-42.1 (20.1)	-106.1 (38.2)	-135.1 (38.2)	-135.1 (41.8)	0.000	***
Süßkirsche spät	0.0 (31.9)	-62.7 (32.7)	-173.8 (65.6)	-234.9 (60.7)	-234.9 (67.2)	0.000	***
Birne früh	0.0 (2.7)	-8.3 (2.5)	-24.9 (9.9)	-39.7 (11.4)	-39.7 (11.9)	0.018	***
Birne spät	0.0 (3.8)	-12.5 (3.2)	-37.1 (13.2)	-60.1 (13.1)	-60.1 (13.5)	0.001	***
Wein	0.0 (52.6)	-477.0 (77.8)	-1146.6 (182.3)	-1770.2 (308.7)	-1770.2 (315.0)	0.001	***
Pflaume früh	0.0 (1.9)	-6.0 (1.7)	-16.7 (5.3)	-26.3 (5.3)	-26.3 (5.5)	0.000	***
Pflaume spät	0.0 (4.3)	-15.2 (3.7)	-42.0 (11.8)	-66.3 (11.5)	-66.3 (12.0)	0.000	***

Tabelle K.59: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: 20 %); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (66.6)	30.1 (58.6)	-52.4 (215.1)	540.8 (189.5)	540.8 (199.2)	0.000	***
Apfel spät	0.0 (30.4)	-10.8 (27.2)	-81.1 (101.8)	164.2 (89.8)	164.2 (94.1)	0.115	**
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	1.4 (4.5)	1.6 (9.0)	60.5 (16.6)	60.5 (17.2)	0.000	***
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	7.6 (19.0)	3.9 (40.0)	170.6 (43.5)	170.6 (47.0)	0.000	***
Süßkirsche spät	0.0 (31.8)	18.7 (31.0)	7.0 (68.6)	280.8 (74.8)	280.8 (80.4)	0.000	***
Birne früh	0.0 (2.7)	0.3 (2.6)	-5.4 (9.0)	21.8 (8.8)	21.8 (9.1)	0.003	***
Birne spät	0.0 (3.8)	-0.6 (3.1)	-9.6 (11.9)	27.7 (12.6)	27.7 (13.1)	0.014	***
Wein	0.0 (52.3)	14.3 (85.0)	-62.6 (165.9)	679.1 (222.2)	679.1 (227.3)	0.000	***
Pflaume früh	0.0 (1.9)	0.7 (1.6)	-1.8 (5.0)	17.3 (6.0)	17.3 (6.2)	0.000	***
Pflaume spät	0.0 (4.3)	-0.4 (3.5)	-8.4 (10.8)	34.1 (13.6)	34.1 (14.2)	0.002	***

Tabelle K.60: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-144.1 (331.0)	-144.1 (343.1)	30.824	
Apfel spät	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-174.4 (137.5)	-174.4 (143.6)	2.799	*
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	7.5 (4.0)	10.5 (10.3)	13.5 (10.8)	13.5 (11.2)	2.418	*
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	-10.2 (31.9)	3.2 (45.9)	25.9 (60.9)	25.9 (61.3)	32.764	
Süßkirsche spät	0.0 (31.8)	-13.3 (50.3)	4.5 (77.9)	30.4 (100.9)	30.4 (101.6)	47.662	
Birne früh	0.0 (2.7)	1.1 (4.9)	-2.9 (9.8)	-6.6 (12.2)	-6.6 (12.7)	22.087	
Birne spät	0.0 (3.8)	0.2 (6.6)	-6.4 (13.0)	-13.3 (14.7)	-13.3 (14.5)	6.510	
Wein	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	-54.7 (302.6)	-54.7 (310.8)	65.053	
Pflaume früh	0.0 (1.9)	4.7 (2.0)	3.5 (5.7)	1.1 (5.0)	1.1 (5.1)	62.159	
Pflaume spät	0.0 (4.3)	6.6 (5.4)	1.5 (13.1)	-5.2 (11.1)	-5.2 (11.3)	30.983	

Tabelle K.61: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g, mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (66.9)	-255.3 (169.0)	-547.3 (268.7)	-883.8 (410.2)	-883.8 (420.1)	0.428	**
Apfel spät	0.0 (30.5)	-139.1 (81.5)	-302.7 (125.3)	-508.9 (168.7)	-508.9 (173.7)	0.124	**
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	-11.4 (4.1)	-30.7 (11.7)	-54.6 (14.6)	-54.6 (14.6)	0.005	***
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	-62.5 (29.7)	-109.8 (47.9)	-156.0 (72.7)	-156.0 (71.5)	0.250	**
Süßkirsche spät	0.0 (31.9)	-98.9 (50.1)	-181.2 (81.1)	-271.8 (119.4)	-271.8 (117.6)	0.193	**
Birne früh	0.0 (2.7)	-7.7 (5.1)	-22.8 (10.7)	-40.7 (15.6)	-40.7 (16.0)	0.213	**
Birne spät	0.0 (3.8)	-12.0 (6.9)	-34.5 (14.3)	-61.9 (19.0)	-61.9 (19.7)	0.095	***
Wein	0.0 (52.6)	-501.6 (127.3)	-1156.3 (208.1)	-1853.0 (422.4)	-1853.0 (428.4)	0.028	***
Pflaume früh	0.0 (1.9)	-2.2 (2.0)	-11.7 (5.9)	-24.4 (7.1)	-24.4 (7.0)	0.028	***
Pflaume spät	0.0 (4.3)	-8.7 (5.6)	-33.0 (14.0)	-63.8 (16.2)	-63.8 (15.9)	0.015	***

Tabelle K.62: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten [(2071-2100) vs. (1971-2000)] (**Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: NoReleaseProb variiert**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

Worst Case	20 % (D-A)	10 % (D-A)	7 % (D-A)	5 % (D-A)	4 % (D-A)	3 % (D-A)	0 % (D-A)
Apfel früh	57.5 (325.4)	-42.5 (328.5)	-69.7 (338.8)	-96.1 (331.4)	-117.3 (341.5)	-130.4 (331.7)	-144.1 (343.1)
Apfel spät	-77.2 (138.5)	-125.3 (137.9)	-138.3 (141.5)	-151.1 (138.4)	-161.2 (142.6)	-167.7 (138.0)	-174.4 (143.6)
Sauerkirsche	32.1 (9.1)	22.9 (9.4)	20.4 (10.1)	17.9 (9.7)	15.9 (11.0)	14.8 (9.8)	13.5 (11.2)
Süßkirsche früh	70.1 (58.0)	48.2 (56.6)	42.2 (54.8)	36.3 (58.3)	31.7 (59.2)	29.0 (58.1)	25.9 (61.3)
Süßkirsche spät	106.4 (96.2)	68.7 (94.8)	58.5 (98.8)	48.5 (96.5)	40.4 (99.0)	35.7 (96.3)	30.4 (101.6)
Birne früh	3.0 (10.5)	-1.8 (11.9)	-3.1 (12.5)	-4.3 (12.1)	-5.3 (12.6)	-6.0 (12.1)	-6.6 (12.7)
Birne spät	0.5 (13.1)	-6.3 (13.0)	-8.2 (13.5)	-10.0 (13.7)	-11.4 (14.3)	-12.3 (13.7)	-13.3 (14.5)
Wein	176.1 (261.5)	60.5 (306.3)	30.5 (312.3)	0.3 (300.0)	-24.1 (319.3)	-38.9 (302.0)	-54.7 (310.8)
Pflaume früh	8.0 (4.3)	4.6 (4.1)	3.7 (4.5)	2.8 (4.3)	2.0 (4.8)	1.6 (4.5)	1.1 (5.1)
Pflaume spät	10.5 (9.5)	2.7 (9.5)	0.6 (10.1)	-1.5 (9.9)	-3.2 (11.2)	-4.2 (10.0)	-5.2 (11.3)

Tabelle K.63: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	57.5 (312.6)	57.5 (325.4)	64.928	
Apfel spät	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-77.2 (132.2)	-77.2 (138.5)	19.654	
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	7.5 (4.0)	10.5 (10.3)	32.1 (7.9)	32.1 (9.1)	0.000	***
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	-10.2 (31.9)	3.2 (45.9)	70.1 (56.0)	70.1 (58.0)	2.540	*
Süßkirsche spät	0.0 (31.8)	-13.3 (50.3)	4.5 (77.9)	106.4 (92.8)	106.4 (96.2)	3.533	*
Birne früh	0.0 (2.7)	1.1 (4.9)	-2.9 (9.8)	3.0 (10.5)	3.0 (10.5)	50.759	
Birne spät	0.0 (3.8)	0.2 (6.6)	-6.4 (13.0)	0.5 (12.9)	0.5 (13.1)	93.379	
Wein	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	176.1 (253.1)	176.1 (261.5)	14.409	
Pflaume früh	0.0 (1.9)	4.7 (2.0)	3.5 (5.7)	8.0 (4.0)	8.0 (4.3)	0.102	**
Pflaume spät	0.0 (4.3)	6.6 (5.4)	1.5 (13.1)	10.5 (8.8)	10.5 (9.5)	3.259	*

Tabelle K.64: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 10 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.	
Apfel früh	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-42.5 (315.8)	-42.5 (328.5)	73.772	***	
Apfel spät	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-125.3 (131.6)	-125.3 (137.9)	6.523		
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	7.5 (4.0)	10.5 (10.3)	22.9 (8.4)	22.9 (9.4)	0.008		
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	-10.2 (31.9)	3.2 (45.9)	48.2 (55.4)	48.2 (56.6)	8.047		
Süßkirsche spät	0.0 (31.8)	-13.3 (50.3)	4.5 (77.9)	68.7 (92.8)	68.7 (94.8)	12.161		
Birne früh	0.0 (2.7)	1.1 (4.9)	-2.9 (9.8)	-1.8 (11.4)	-1.8 (11.9)	70.002		
Birne spät	0.0 (3.8)	0.2 (6.6)	-6.4 (13.0)	-6.3 (12.7)	-6.3 (13.0)	27.607		
Wein	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	60.5 (297.9)	60.5 (306.3)	61.238		
Pflaume früh	0.0 (1.9)	4.7 (2.0)	3.5 (5.7)	4.6 (3.8)	4.6 (4.1)	2.993		*
Pflaume spät	0.0 (4.3)	6.6 (5.4)	1.5 (13.1)	2.7 (8.8)	2.7 (9.5)	55.469		

Tabelle K.65: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 7 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-69.7 (326.5)	-69.7 (338.8)	59.853	***
Apfel spät	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-138.3 (135.3)	-138.3 (141.5)	5.334	
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	7.5 (4.0)	10.5 (10.3)	20.4 (9.2)	20.4 (10.1)	0.057	
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	-10.2 (31.9)	3.2 (45.9)	42.2 (54.4)	42.2 (54.8)	11.139	
Süßkirsche spät	0.0 (31.8)	-13.3 (50.3)	4.5 (77.9)	58.5 (97.6)	58.5 (98.8)	18.854	
Birne früh	0.0 (2.7)	1.1 (4.9)	-2.9 (9.8)	-3.1 (11.9)	-3.1 (12.5)	53.187	
Birne spät	0.0 (3.8)	0.2 (6.6)	-6.4 (13.0)	-8.2 (13.4)	-8.2 (13.5)	18.972	
Wein	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	30.5 (304.1)	30.5 (312.3)	79.979	
Pflaume früh	0.0 (1.9)	4.7 (2.0)	3.5 (5.7)	3.7 (4.2)	3.7 (4.5)	9.922	
Pflaume spät	0.0 (4.3)	6.6 (5.4)	1.5 (13.1)	0.6 (9.5)	0.6 (10.1)	90.456	

Tabelle K.66: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 5 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.	
Apfel früh	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-96.1 (318.9)	-96.1 (331.4)	46.583	*	
Apfel spät	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-151.1 (132.1)	-151.1 (138.4)	3.878		
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	7.5 (4.0)	10.5 (10.3)	17.9 (8.9)	17.9 (9.7)	0.159		**
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	-10.2 (31.9)	3.2 (45.9)	36.3 (57.4)	36.3 (58.3)	17.039		
Süßkirsche spät	0.0 (31.8)	-13.3 (50.3)	4.5 (77.9)	48.5 (94.9)	48.5 (96.5)	25.346		
Birne früh	0.0 (2.7)	1.1 (4.9)	-2.9 (9.8)	-4.3 (11.5)	-4.3 (12.1)	37.466		
Birne spät	0.0 (3.8)	0.2 (6.6)	-6.4 (13.0)	-10.0 (13.8)	-10.0 (13.7)	11.973		
Wein	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	0.3 (291.5)	0.3 (300.0)	99.793		
Pflaume früh	0.0 (1.9)	4.7 (2.0)	3.5 (5.7)	2.8 (4.0)	2.8 (4.3)	18.386		
Pflaume spät	0.0 (4.3)	6.6 (5.4)	1.5 (13.1)	-1.5 (9.4)	-1.5 (9.9)	73.612		

Tabelle K.67: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 4 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-117.3 (329.3)	-117.3 (341.5)	39.413	
Apfel spät	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-161.2 (136.5)	-161.2 (142.6)	3.489	*
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	7.5 (4.0)	10.5 (10.3)	15.9 (10.5)	15.9 (11.0)	0.926	**
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	-10.2 (31.9)	3.2 (45.9)	31.7 (58.5)	31.7 (59.2)	22.764	
Süßkirsche spät	0.0 (31.8)	-13.3 (50.3)	4.5 (77.9)	40.4 (97.8)	40.4 (99.0)	34.272	
Birne früh	0.0 (2.7)	1.1 (4.9)	-2.9 (9.8)	-5.3 (12.1)	-5.3 (12.6)	30.509	
Birne spät	0.0 (3.8)	0.2 (6.6)	-6.4 (13.0)	-11.4 (14.6)	-11.4 (14.3)	9.676	
Wein	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	-24.1 (311.3)	-24.1 (319.3)	84.431	
Pflaume früh	0.0 (1.9)	4.7 (2.0)	3.5 (5.7)	2.0 (4.6)	2.0 (4.8)	36.140	
Pflaume spät	0.0 (4.3)	6.6 (5.4)	1.5 (13.1)	-3.2 (10.9)	-3.2 (11.2)	52.452	

Tabelle K.68: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 3 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5 %; **: p<1 %; ***: p<0.1 %.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (66.6)	-62.8 (165.1)	-112.2 (246.5)	-130.4 (319.1)	-130.4 (331.7)	33.630	
Apfel spät	0.0 (30.4)	-57.5 (79.4)	-113.9 (114.8)	-167.7 (131.7)	-167.7 (138.0)	2.797	*
Sauerkirsche	0.0 (5.0)	7.5 (4.0)	10.5 (10.3)	14.8 (9.1)	14.8 (9.8)	0.703	**
Süßkirsche früh	0.0 (19.2)	-10.2 (31.9)	3.2 (45.9)	29.0 (57.1)	29.0 (58.1)	25.592	
Süßkirsche spät	0.0 (31.8)	-13.3 (50.3)	4.5 (77.9)	35.7 (94.6)	35.7 (96.3)	38.477	
Birne früh	0.0 (2.7)	1.1 (4.9)	-2.9 (9.8)	-6.0 (11.6)	-6.0 (12.1)	24.316	
Birne spät	0.0 (3.8)	0.2 (6.6)	-6.4 (13.0)	-12.3 (13.9)	-12.3 (13.7)	6.898	
Wein	0.0 (52.3)	-6.3 (127.3)	-64.8 (172.5)	-38.9 (293.6)	-38.9 (302.0)	73.854	
Pflaume früh	0.0 (1.9)	4.7 (2.0)	3.5 (5.7)	1.6 (4.3)	1.6 (4.5)	44.862	
Pflaume spät	0.0 (4.3)	6.6 (5.4)	1.5 (13.1)	-4.2 (9.6)	-4.2 (10.0)	37.046	

Tabelle K.69: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (37.3)	23.4 (87.1)	-26.0 (188.2)	-58.0 (299.9)	-58.0 (304.1)	62.458	
Apfel spät	0.0 (18.2)	-15.9 (30.6)	-72.3 (80.9)	-132.7 (120.5)	-132.7 (123.0)	4.009	*
Sauerkirsche	0.0 (4.3)	1.8 (7.1)	4.8 (9.3)	7.8 (11.1)	7.8 (11.4)	14.919	
Süßkirsche früh	0.0 (9.1)	5.0 (15.5)	18.5 (28.5)	41.1 (49.5)	41.1 (51.0)	8.889	
Süßkirsche spät	0.0 (13.4)	14.3 (29.6)	32.1 (51.1)	58.0 (85.2)	58.0 (87.1)	13.810	
Birne früh	0.0 (1.8)	0.4 (2.8)	-3.6 (8.0)	-7.4 (11.8)	-7.4 (12.1)	16.529	
Birne spät	0.0 (2.8)	-0.5 (3.3)	-7.2 (10.4)	-14.0 (14.1)	-14.0 (14.6)	5.628	
Wein	0.0 (37.5)	14.3 (90.7)	-44.2 (132.5)	-34.1 (279.7)	-34.1 (284.3)	75.573	
Pflaume früh	0.0 (1.7)	1.3 (1.8)	0.1 (4.2)	-2.3 (4.9)	-2.3 (5.1)	30.853	
Pflaume spät	0.0 (3.5)	0.5 (3.8)	-4.5 (9.0)	-11.3 (10.9)	-11.3 (11.2)	4.856	*

Tabelle K.70: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m, mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (37.3)	-169.2 (91.1)	-461.3 (213.6)	-797.8 (383.2)	-797.8 (386.5)	0.459	**
Apfel spät	0.0 (18.2)	-97.5 (32.5)	-261.1 (91.8)	-467.3 (153.2)	-467.3 (155.2)	0.112	**
Sauerkirsche	0.0 (4.4)	-17.1 (7.3)	-36.4 (10.3)	-60.3 (15.0)	-60.3 (15.2)	0.007	***
Süßkirsche früh	0.0 (9.1)	-47.3 (15.2)	-94.6 (31.3)	-140.9 (61.7)	-140.9 (63.0)	0.342	**
Süßkirsche spät	0.0 (13.5)	-71.4 (30.3)	-153.6 (56.1)	-244.3 (104.8)	-244.3 (106.4)	0.311	**
Birne früh	0.0 (1.9)	-8.4 (2.9)	-23.5 (9.0)	-41.4 (15.3)	-41.4 (15.5)	0.176	**
Birne spät	0.0 (2.8)	-12.8 (3.5)	-35.3 (11.8)	-62.6 (18.6)	-62.6 (18.9)	0.078	***
Wein	0.0 (37.6)	-481.1 (84.9)	-1135.8 (165.4)	-1832.5 (399.9)	-1832.5 (403.2)	0.023	***
Pflaume früh	0.0 (1.7)	-5.6 (1.8)	-15.2 (4.4)	-27.8 (7.1)	-27.8 (7.4)	0.048	***
Pflaume spät	0.0 (3.5)	-14.8 (4.0)	-39.0 (9.9)	-69.8 (16.2)	-69.8 (16.9)	0.033	***

Tabelle K.71: Statistik für die **Gesamtkosten KKA des Klimawandels** (in 1000 €/Saison; in 10000 €/Saison beim Wein) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20%**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte. Signifikanz: *: p<5%; **: p<1%; ***: p<0.1%.

	1971-2000 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
Apfel früh	0.0 (37.3)	23.4 (87.1)	-26.0 (188.2)	143.7 (265.1)	143.7 (269.9)	21.346	
Apfel spät	0.0 (18.2)	-15.9 (30.6)	-72.3 (80.9)	-35.6 (98.6)	-35.6 (101.2)	40.773	
Sauerkirsche	0.0 (4.3)	1.8 (7.1)	4.8 (9.3)	26.3 (7.6)	26.3 (8.6)	0.000	***
Süßkirsche früh	0.0 (9.1)	5.0 (15.5)	18.5 (28.5)	85.3 (36.7)	85.3 (37.3)	0.075	***
Süßkirsche spät	0.0 (13.4)	14.3 (29.6)	32.1 (51.1)	134.0 (64.9)	134.0 (66.9)	0.271	**
Birne früh	0.0 (1.8)	0.4 (2.8)	-3.6 (8.0)	2.3 (9.6)	2.3 (9.9)	57.639	
Birne spät	0.0 (2.8)	-0.5 (3.3)	-7.2 (10.4)	-0.3 (10.8)	-0.3 (11.0)	94.928	
Wein	0.0 (37.5)	14.3 (90.7)	-44.2 (132.5)	196.7 (226.4)	196.7 (231.2)	8.044	
Pflaume früh	0.0 (1.7)	1.3 (1.8)	0.1 (4.2)	4.6 (3.5)	4.6 (3.8)	1.916	*
Pflaume spät	0.0 (3.5)	0.5 (3.8)	-4.5 (9.0)	4.4 (7.5)	4.4 (8.1)	27.023	

K.2.3.1.2 Aufsummierte (akkumulierte) Kosten

Eine kurze Diskussion zu $\sum KKA$ findet man in Kapitel 5.7.2.2 auf Seite 278.

Tabelle K.72: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein)** (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	902.	(2277.)	-754.	(8803.)	-1992.	(17732.)
Apfel spät	-323.	(894.)	-2720.	(3911.)	-7146.	(7029.)
Sauerkirsche	41.	(161.)	77.	(417.)	457.	(910.)
Süßkirsche früh	228.	(445.)	322.	(1448.)	1812.	(3275.)
Süßkirsche spät	560.	(778.)	711.	(2296.)	2840.	(5250.)
Birne früh	8.	(111.)	-149.	(374.)	-382.	(761.)
Birne spät	-17.	(130.)	-296.	(473.)	-767.	(916.)
Wein	428.	(3031.)	-1489.	(7682.)	-1719.	(16906.)
Pflaume früh	20.	(61.)	-34.	(206.)	-75.	(417.)
Pflaume spät	-13.	(127.)	-263.	(429.)	-592.	(850.)

Tabelle K.73: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein)** (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g, mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	-4558.	(2274.)	-18390.	(9378.)	-46285.	(20052.)
Apfel spät	-2637.	(873.)	-10320.	(4164.)	-26781.	(7808.)
Sauerkirsche	-513.	(175.)	-1668.	(444.)	-3837.	(1029.)
Süßkirsche früh	-1262.	(480.)	-4391.	(1467.)	-9614.	(3482.)
Süßkirsche spät	-1880.	(876.)	-7026.	(2328.)	-16043.	(5565.)
Birne früh	-248.	(110.)	-979.	(401.)	-2476.	(870.)
Birne spät	-375.	(129.)	-1462.	(506.)	-3739.	(1039.)
Wein	-14309.	(2900.)	-47984.	(8461.)	-115829.	(20539.)
Pflaume früh	-178.	(56.)	-670.	(208.)	-1656.	(440.)
Pflaume spät	-455.	(122.)	-1690.	(447.)	-4187.	(928.)

Tabelle K.74: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein)** (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	902.	(2277.)	-754.	(8803.)	15473.	(18346.)
Apfel spät	-323.	(894.)	-2720.	(3911.)	1350.	(7926.)
Sauerkirsche	41.	(161.)	77.	(417.)	1959.	(974.)
Süßkirsche früh	228.	(445.)	322.	(1448.)	5729.	(3553.)
Süßkirsche spät	560.	(778.)	711.	(2296.)	9586.	(5818.)
Birne früh	8.	(111.)	-149.	(374.)	468.	(817.)
Birne spät	-17.	(130.)	-296.	(473.)	446.	(1035.)
Wein	428.	(3031.)	-1489.	(7682.)	18878.	(16867.)
Pflaume früh	20.	(61.)	-34.	(206.)	490.	(495.)
Pflaume spät	-13.	(127.)	-263.	(429.)	717.	(1053.)

Tabelle K.75: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein)** (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	-1884.	(5017.)	-5178.	(12271.)	-10929.	(24977.)
Apfel spät	-1725.	(2394.)	-5033.	(5686.)	-11861.	(10624.)
Sauerkirsche	226.	(173.)	527.	(476.)	1018.	(972.)
Süßkirsche früh	-305.	(970.)	-206.	(2351.)	637.	(4880.)
Süßkirsche spät	-398.	(1524.)	-275.	(3852.)	695.	(8046.)
Birne früh	33.	(162.)	-50.	(450.)	-292.	(880.)
Birne spät	7.	(215.)	-180.	(594.)	-678.	(1096.)
Wein	-189.	(3915.)	-2160.	(8507.)	-4384.	(19827.)
Pflaume früh	141.	(81.)	241.	(254.)	310.	(419.)
Pflaume spät	198.	(200.)	236.	(569.)	82.	(922.)

Tabelle K.76: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten $\sum KKA$ des Klimawandels (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein)** (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g, mit CO₂-Düngung**, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: AUS**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	-7659.	(5138.)	-23699.	(13028.)	-57764.	(28540.)
Apfel spät	-4173.	(2454.)	-13011.	(6039.)	-32611.	(11966.)
Sauerkirsche	-342.	(178.)	-1248.	(512.)	-3376.	(1170.)
Süßkirsche früh	-1874.	(978.)	-5082.	(2417.)	-11241.	(5403.)
Süßkirsche spät	-2967.	(1519.)	-8280.	(3946.)	-18931.	(8856.)
Birne früh	-229.	(167.)	-898.	(481.)	-2441.	(1026.)
Birne spät	-361.	(223.)	-1370.	(635.)	-3727.	(1272.)
Wein	-15049.	(3915.)	-48989.	(9493.)	-120275.	(25050.)
Pflaume früh	-65.	(82.)	-413.	(261.)	-1323.	(472.)
Pflaume spät	-261.	(208.)	-1233.	(601.)	-3630.	(1068.)

Tabelle K.77: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KKA$ des Klimawandels (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: 20 %); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	-1884.	(5017.)	-5178.	(12271.)	-4879.	(24726.)
Apfel spät	-1725.	(2394.)	-5033.	(5686.)	-8945.	(10699.)
Sauerkirsche	226.	(173.)	527.	(476.)	1574.	(942.)
Süßkirsche früh	-305.	(970.)	-206.	(2351.)	1964.	(4906.)
Süßkirsche spät	-398.	(1524.)	-275.	(3852.)	2974.	(8112.)
Birne früh	33.	(162.)	-50.	(450.)	-2.	(883.)
Birne spät	7.	(215.)	-180.	(594.)	-266.	(1115.)
Wein	-189.	(3915.)	-2160.	(8507.)	2538.	(19410.)
Pflaume früh	141.	(81.)	241.	(254.)	518.	(442.)
Pflaume spät	198.	(200.)	236.	(569.)	554.	(981.)

Tabelle K.78: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KKA$ des Klimawandels (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-m, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	700.	(2680.)	-95.	(8276.)	-2399.	(20119.)
Apfel spät	-476.	(1030.)	-2576.	(3350.)	-7738.	(7761.)
Sauerkirsche	54.	(258.)	189.	(493.)	452.	(1009.)
Süßkirsche früh	151.	(558.)	691.	(1423.)	2144.	(3526.)
Süßkirsche spät	430.	(1020.)	1353.	(2394.)	3429.	(5968.)
Birne früh	11.	(99.)	-93.	(336.)	-365.	(769.)
Birne spät	-15.	(121.)	-226.	(420.)	-754.	(923.)
Wein	429.	(2832.)	-945.	(6505.)	-2344.	(16875.)
Pflaume früh	38.	(73.)	39.	(187.)	-28.	(352.)
Pflaume spät	16.	(156.)	-121.	(390.)	-517.	(737.)

Tabelle K.79: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KKA$ des Klimawandels (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-m, mit CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, Worst Case: AUS); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	-5077.	(2804.)	-18622.	(9156.)	-49245.	(24096.)
Apfel spät	-2925.	(1090.)	-10556.	(3721.)	-28492.	(9272.)
Sauerkirsche	-514.	(268.)	-1586.	(539.)	-3943.	(1221.)
Süßkirsche früh	-1418.	(565.)	-4186.	(1516.)	-9738.	(4104.)
Süßkirsche spät	-2140.	(1045.)	-6654.	(2555.)	-16204.	(6912.)
Birne früh	-252.	(104.)	-941.	(370.)	-2514.	(928.)
Birne spät	-384.	(128.)	-1416.	(464.)	-3804.	(1119.)
Wein	-14432.	(2862.)	-47776.	(7517.)	-118241.	(22207.)
Pflaume früh	-168.	(75.)	-615.	(196.)	-1662.	(417.)
Pflaume spät	-443.	(163.)	-1591.	(421.)	-4231.	(905.)

Tabelle K.80: Statistik für die **akkumulierten Gesamtkosten** $\sum KKA$ des Klimawandels (**in 1000 €; in 10 000 € beim Wein**) (ab 2002 bis zum Jahr j) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-m**, ohne CO₂-Düngung, inkl. Apfelwicklerschaden beim Apfel, **Worst Case: 20 %**); Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe und über die 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. 8 Weinbaugitterpunkte.

j	2031		2060		2100	
Apfel früh	700.	(2680.)	-95.	(8276.)	3650.	(19202.)
Apfel spät	-476.	(1030.)	-2576.	(3350.)	-4822.	(7520.)
Sauerkirsche	54.	(258.)	189.	(493.)	1009.	(960.)
Süßkirsche früh	151.	(558.)	691.	(1423.)	3471.	(3327.)
Süßkirsche spät	430.	(1020.)	1353.	(2394.)	5708.	(5619.)
Birne früh	11.	(99.)	-93.	(336.)	-75.	(747.)
Birne spät	-15.	(121.)	-226.	(420.)	-342.	(905.)
Wein	429.	(2832.)	-945.	(6505.)	4579.	(16230.)
Pflaume früh	38.	(73.)	39.	(187.)	179.	(363.)
Pflaume spät	16.	(156.)	-121.	(390.)	-45.	(764.)

K.2.3.2 Bilder

K.2.3.2.1 30-jährige Mittelwerte

Eine kurze Diskussion zu den folgenden Graphiken findet man auf Seite 272 in Kapitel 5.7.2.2.

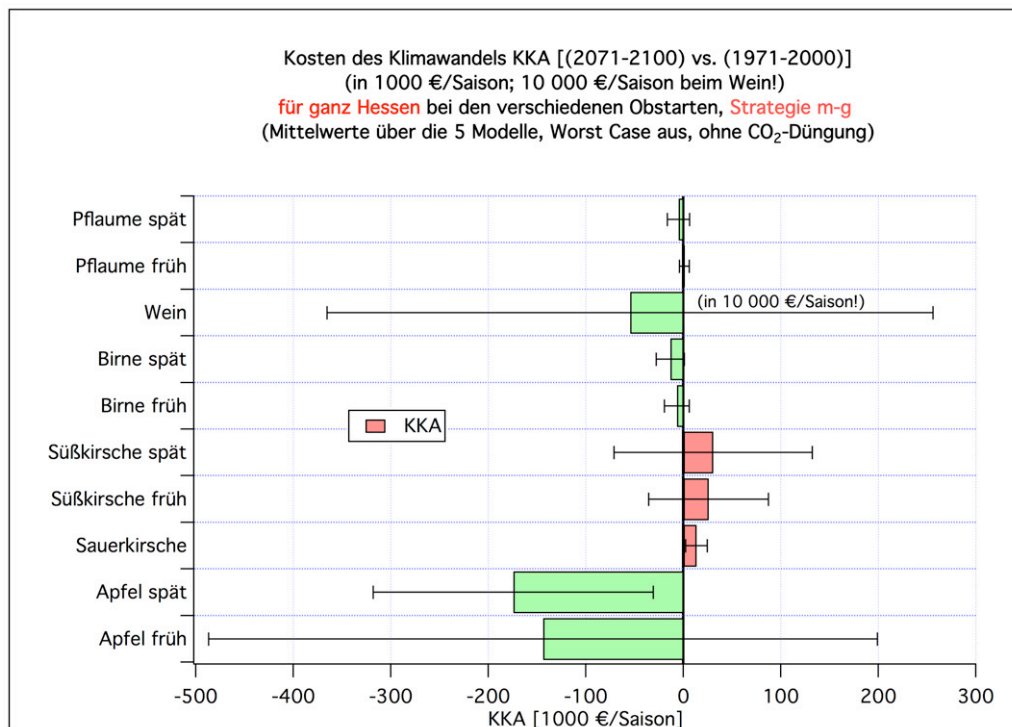


Abbildung K.73: Gesamtkosten KKA des Klimawandels für ganz Hessen (in 1000 €/Saison; in 10 000 €/Saison beim Wein!) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

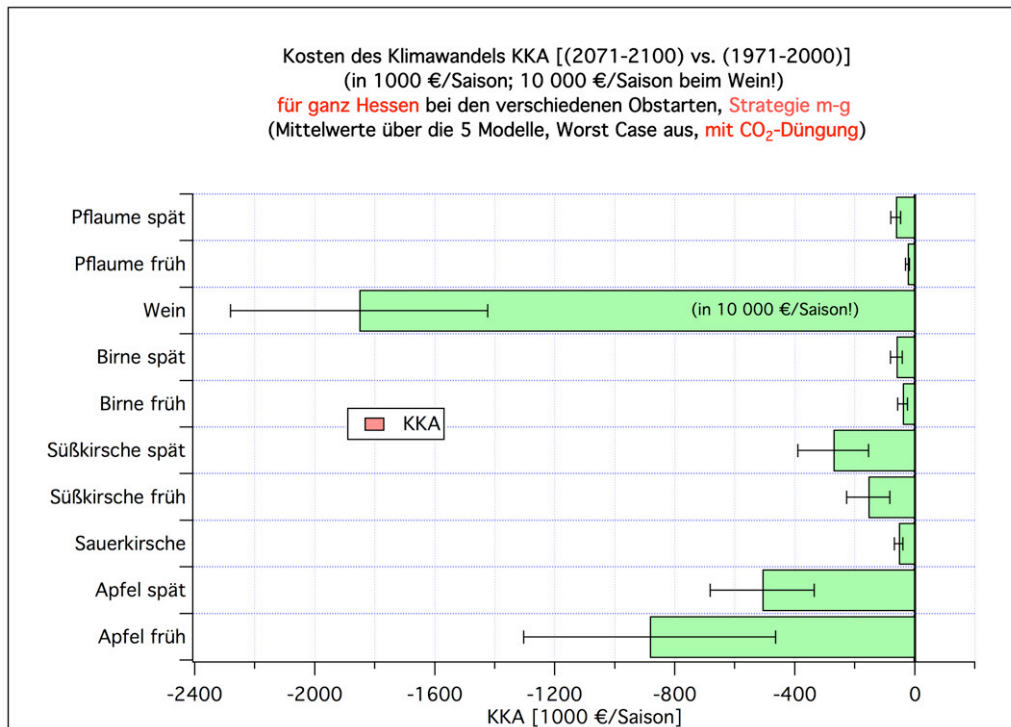


Abbildung K.74: Gesamtkosten KKA des Klimawandels für ganz Hessen (in 1000 €/Saison; in 10 000 €/Saison beim Wein!) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

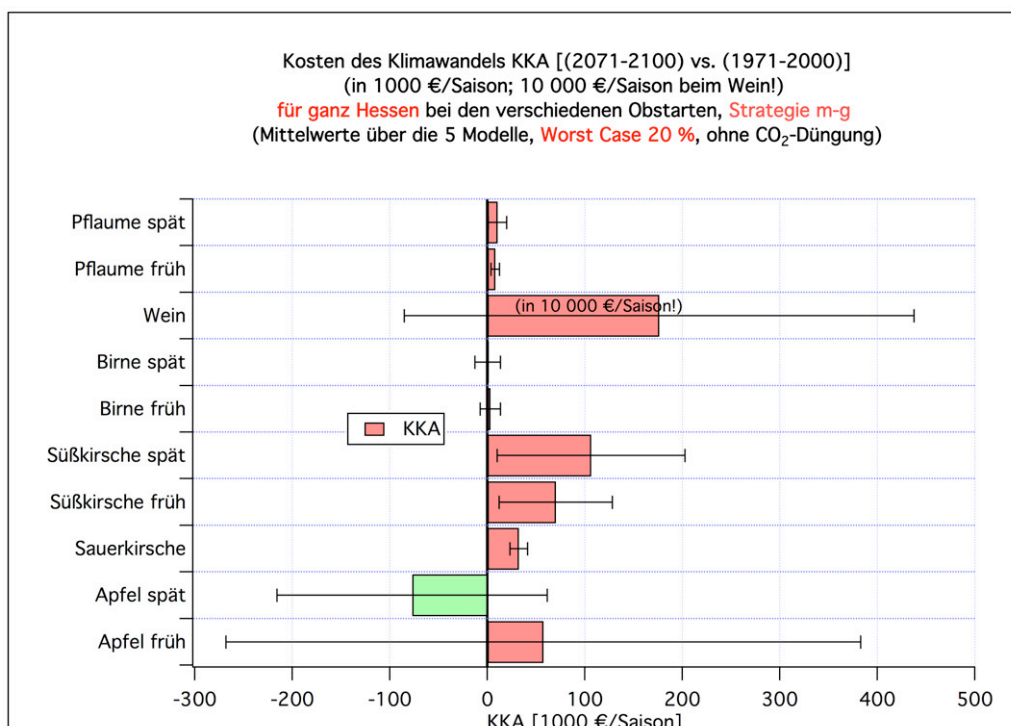


Abbildung K.75: Gesamtkosten KKA des Klimawandels für ganz Hessen (in 1000 €/Saison; in 10 000 €/Saison beim Wein!) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20 %; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

K.2.3.2.2 Aufsummierte (akkumulierte) Kosten

Eine kurze Diskussion zu den folgenden Graphiken findet man auf Seite 278 in Kapitel 5.7.2.2.

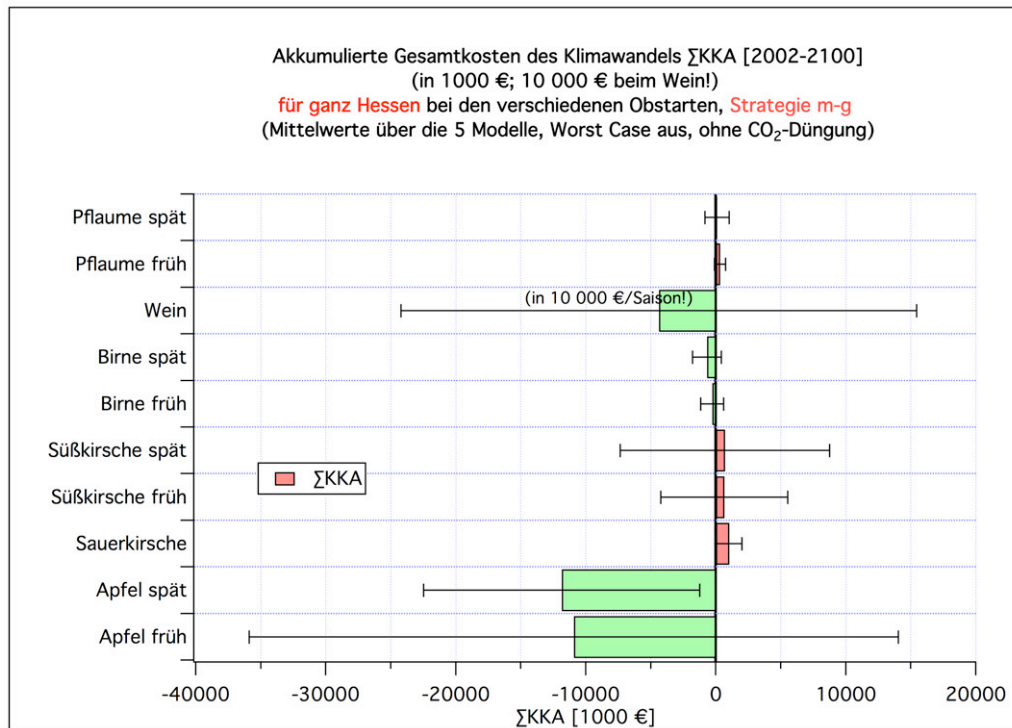


Abbildung K.76: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKKA des Klimawandels (von 2002-2100) für ganz Hessen (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein!) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

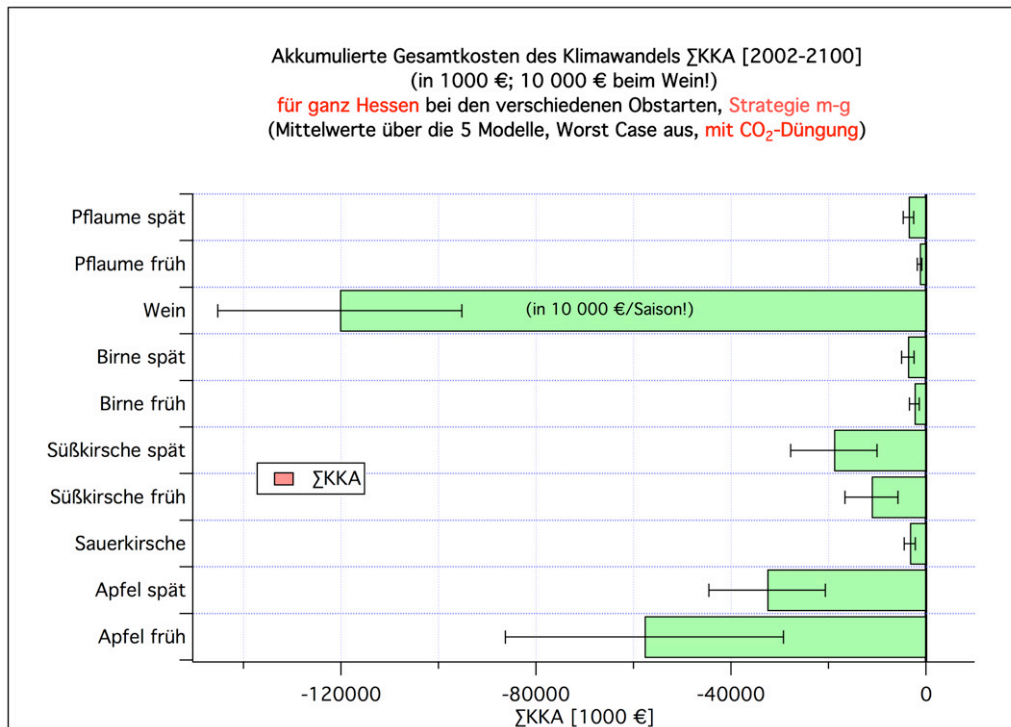


Abbildung K.77: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKKA des Klimawandels (von 2002-2100) für ganz Hessen (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein!) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g, mit CO₂-Düngung**, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

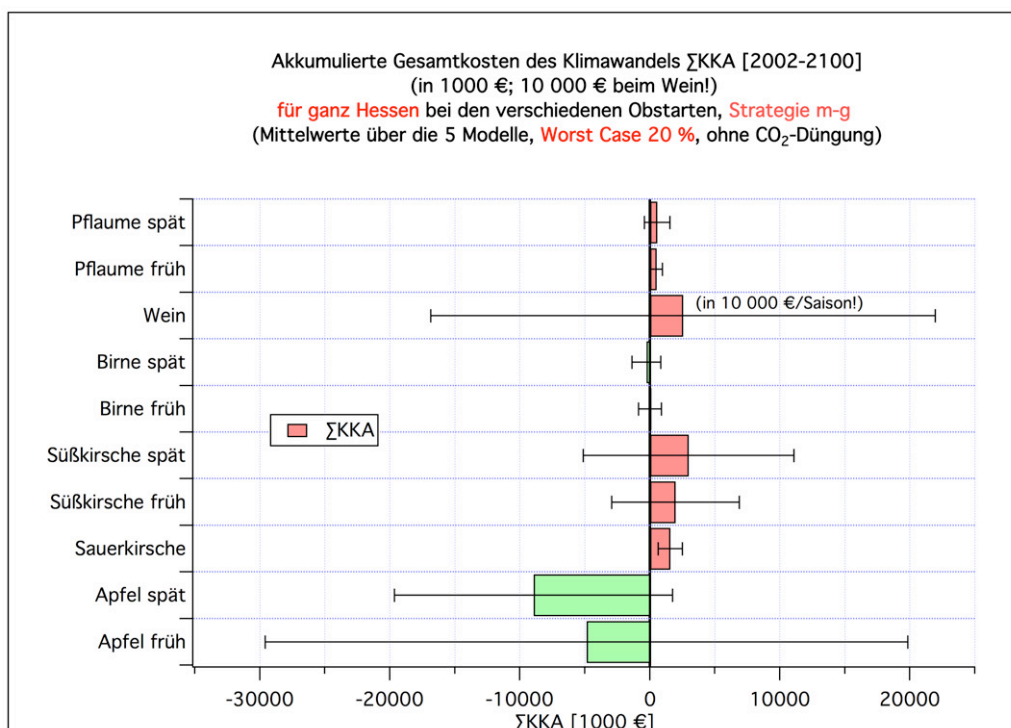


Abbildung K.78: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKKA des Klimawandels (von 2002-2100) für ganz Hessen (in 1000 €; in 10 000 € beim Wein!) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20 %**; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

L Eine alternative Methode zur Berechnung von Frostwahrscheinlichkeiten und -schäden (Monte-Carlo-Simulationen)

L.1 Problemstellung

Die im Kapitel 4.8 beschriebene Methode zur Bestimmung von Frostschäden und -häufigkeiten hat den Nachteil, dass für die 30-Jahresabschnitte, für die mittlere Schäden und Verteilungen berechnet werden sollen, immer nur 30 (jährliche) Schäden zur Verfügung stehen. Die daraus geschätzten mittleren Schäden und Schadenshäufigkeitsverteilungen sind auf Grund des bei diesem kleinen N ($N = 30$) sehr großen Sampling-Fehlers sehr unsicher. Daher muss man sehr breite Schadensintervalle wählen, um einigermaßen verlässliche Aussagen über Häufigkeiten in bestimmten Schadensklassen machen zu können. **Abbildung L.1** zeigt ein Beispiel für den Gitterpunkt 136 in Hessen (in der Nähe von Frankfurt am Main) und Schäden, die aus vom DWD beobachteten Temperaturen berechnet wurden. Alle Häufigkeiten in den Klassen $Schaden > 0.1$ sind nicht signifikant von 0 verschieden. Und auch die großen Balken bei 0 und für die Klasse " $0 < Schaden < 0.1$ " sind sehr unsicher [95%-Konfidenzintervalle (Score-Intervalle) von ca. $\pm 17\%$] [vgl. auch die Abbildungen 5.38; dort sind die kleinen Fehlerbalken aber zu kurz, da keine Score-Intervalle oder *adjusted Wald*-Intervalle eingezeichnet wurden; eine genaue Beschreibung der Score- und Wald-Konfidenzintervalle und deren Herleitung findet man in Held (2008)].

Im Folgenden wird ein alternative Methode dargestellt, welche die Simulation beliebig vieler *Jahre* erlaubt. Die Konfidenzbereiche für die gesuchten Erwartungswerte μ der betrachteten Frostgrößen können daher (fast) beliebig verringert werden. Die Methode wird hier im Gegensatz zu Kapitel 4.4.1 der Einfachheit halber nur auf die Ergebnisse eines einzelnen Modells bzw. die Beobachtungswerte des DWD angewendet.

Man beachte aber, dass sogar dann, wenn der Erwartungswert μ des 30-jährigen ($N = 30$) Mittelwerts \bar{x} der Größe x exakt bekannt ist, der 95%-Zufallsbereich von \bar{x} immer noch dieselbe Breite hat wie das *alte, normale* 95%-Konfidenzintervall von μ , denn es gilt (wenigstens im Fall von unabhängigen, normalverteilten x):

$$\begin{aligned}
 \text{Prob} \left(\frac{|\bar{x} - \mu|}{s_x / \sqrt{N}} \leq t_{N-1, 97.5\%} \right) &= 95 \% \Leftrightarrow \\
 \text{Prob} \left(\underbrace{\bar{x} - t_{N-1, 97.5\%} \frac{s_x}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{N-1, 97.5\%} \frac{s_x}{\sqrt{N}}}_{\text{Konfidenzintervall für } \mu} \right) &= 95 \% \Leftrightarrow \\
 \text{Prob} \left(\underbrace{\mu - t_{N-1, 97.5\%} \frac{s_x}{\sqrt{N}} \leq \bar{x} \leq \mu + t_{N-1, 97.5\%} \frac{s_x}{\sqrt{N}}}_{\text{Zufallsbereich für } \bar{x}} \right) &= 95 \%
 \end{aligned} \tag{L.1}$$

(*Prob* = Probability (Wahrscheinlichkeit); zur weiteren Notation siehe die Diskussion auf Seite 48.) Die Kenntnis des Erwartungswerts μ fixiert zwar den vorher unsicheren

Mittelpunkt des Zufallsbereichs von \bar{x} . Trotzdem kann der 30-jährige Mittelwert \bar{x} , der von den Obstbauern *erlebt* wird, noch stark schwanken. Denn anders als z. B. bei medizinischen Erhebungen, bei denen das Ergebnis einer Erhebung an wenigen Patienten auf die gesamte Bevölkerung ausgedehnt werden kann¹, kann die 30-jährige Zeitspanne (z. B. 2071-2100) nicht um beliebig viele Stichprobenelemente (Jahre) erweitert werden, sondern behält stets ihre Länge von 30 Jahren.²

Mit Hilfe dieser alternativen Methode kann auch die wahre Form der Schadenshäufigkeitsverteilung ermittelt werden. Als Nebenprodukt werden außerdem noch einige Erkenntnisse abfallen, welche die Abschätzung der Änderung von Frostschäden mit dem zukünftigen Temperaturanstieg aus einfachen Grundgrößen gestatten und die zeigen, dass die Verfrühung des Blühbeginns, den herkömmliche GDD-Modells im Mittel vorhersagen, gerade KEINE Frostschadensänderung bewirkt (vorausgesetzt, dass der Startzeitpunkt der Forcing-Akkumulation früh genug angesetzt wird). Die Vorhersagen der verbesserten phänologischen Modelle werden hingegen bewirken, dass für die Zukunft (beim zukünftigen Temperaturanstieg) etwas weniger Frostschäden prognostiziert werden.

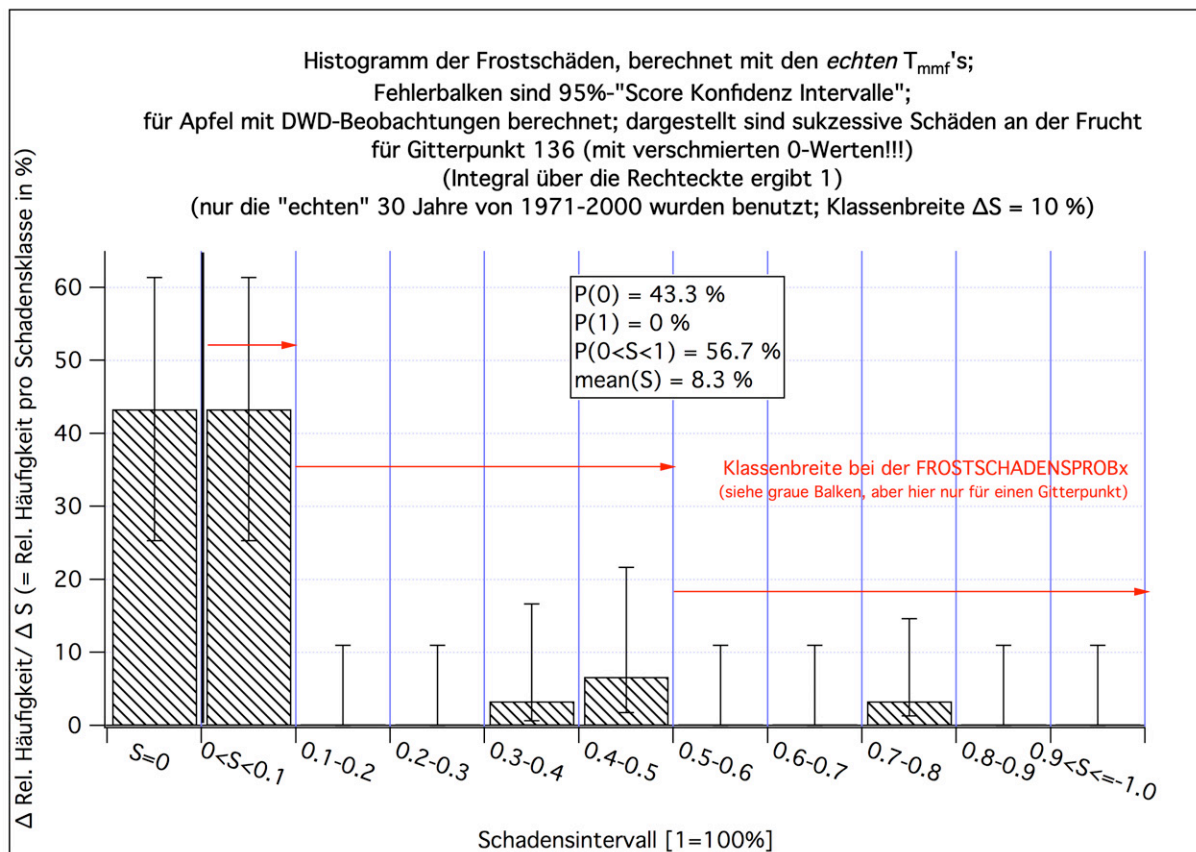


Abbildung L.1: Histogramm (relative Häufigkeit pro Schadensklasse) für die Frostschäden S ($\equiv s_F$) am Apfel, berechnet mit der alten Methode aus Kapitel 4.8 für Apfel im Zeitraum 1971-2000 und einer Schadensklassenbreite $\Delta S = 0.1$ (berechnet mit DWD-Temperaturen am Gitterpunkt 136). Die Werte $S = 0$ besitzen einen eigenen Balken. Dieser müsste eigentlich bei $S = 0$ konzentriert sein und dort unendliche Werte annehmen (Dirac'sche Deltafunktion; siehe Abschnitt L.4).

¹ Der Zufallsbereich des Mittelwerts wird dann wegen des großen N bei bekanntem μ sehr klein.

² Siehe hierzu auch die Diskussion auf Seite 49.

L.2 Alternative neue Methode

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie man realistische Tagesminimumtemperaturen $\hat{T}_n(j, t)$ für den Tag t im Frühling des Jahres j simulieren kann. Dabei sollen sich alle simulierten “Jahre” bezüglich der statistischen Parameter auf einen bestimmten 30-jährigen Zeitabschnitt (z. B. 1971-2000 oder 2071-2100) eines bestimmten Modells oder auf beobachtete Werte beziehen. Gleichzeitig sollen auch die Blühbeginnstermine $\widehat{BB}(j)$ ³ des Jahres j simuliert werden. (Größen mit einem Dach bezeichnen hier immer Zufallsvariablen; dieselbe Größe ohne Dach soll i. Allg. den Erwartungswert der Größe repräsentieren.)

Die Tagesminimumtemperaturen werden als Summe eines Frühjahrstrends $at + b(j)$ und eines AR(1)-Prozesses $\hat{x}(j, t)$ angesetzt:

$$\hat{T}_n(j, t) = a \cdot t + b(j) + \hat{x}(j, t). \quad (\text{L.2})$$

Dabei darf der Offset b des Trends (das *Temperaturniveau*) noch vom Jahr j abhängen und z. B. ebenfalls einen zeitlichen Trend aufweisen (nun aber nicht mit den Tagen, sondern mit den Jahren). Diese Abhängigkeit wird allerdings erst im Kapitel L.5 verwendet. Zunächst soll bezüglich der Jahre Stationarität gelten, da hier erst einmal nur 30-Jahreszeiträume betrachtet werden sollen.

t steht für den Tag im Jahr (in DOY) und j ist das betrachtete “Jahr”.⁴ Der AR(1)-Prozess hat folgende Form:

$$\hat{x}(j, t) = c \cdot \hat{x}(j, t - 1) + \hat{\varepsilon}(j, t) \cdot \sigma_\varepsilon. \quad (\text{L.3})$$

Dabei ist σ_ε die Standardabweichung des letzten Terms in Gleichung (L.3) (d. h. des Terms, in dem σ_ε vorkommt. Auf die Beziehung zur Varianz von \hat{x} wird weiter unten eingegangen.) Als Startwert für \hat{x} kann man in jedem Jahr j den Wert 0 wählen.

$$\hat{x}(j, 0) = 0 \quad (\text{L.4})$$

Die $\hat{\varepsilon}(j, t)$ seien standardnormalverteilt

$$\hat{\varepsilon}(j, t) \propto N(0, 1) \quad (\text{L.5})$$

und $\hat{\varepsilon}(j_1, t_1)$ und $\hat{\varepsilon}(j_2, t_2)$ seien für $j_1 \neq j_2$ oder $t_1 \neq t_2$ unabhängig voneinander. Aus Formel (L.2) folgt durch Bildung des Erwartungswerts:

$$E[\hat{T}_n(j, t)] =: T_n(j, t) = a \cdot t + b(j). \quad (\text{L.6})$$

Quadrieren von Gleichung (L.3) und Bildung des Erwartungswertes ergibt folgende Beziehung zwischen der Standardabweichung von \hat{x} (bzw. \hat{T}_n) und $\hat{\varepsilon}$:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{1 - c^2} \cdot \sigma_x. \quad (\text{L.7})$$

³ Diese wurden bisher mit t_2 bezeichnet. Um auch in diesem Kapitel Eindeutigkeit der Bezeichnungen zu gewährleisten, wird hier anstelle von t_2 die Bezeichnung \widehat{BB} verwendet.

⁴ Auch wenn j keine stetige Größe ist, wird es hier so verwendet, als ob es eine wäre. In diesem Fall kann man nämlich nach j differenzieren. Dies macht die Schreibweise wesentlich einfacher. Der Leser möge sich die entsprechende diskrete Differenz anstelle des Differentialquotienten vorstellen. Im lineare Fall ergibt sich aber dasselbe Ergebnis: $y = a * j + b \rightarrow dy/dj = a; (y(j = 2) - y(j = 1)) / (2 - 1) = a. \rightarrow$ q.e.d.

Wie man leicht durch Multiplikation von (L.3) mit $\hat{x}(j, t - 1)$ und nachfolgender Bildung des Erwartungswerts zeigt [wenn man noch beachtet, dass $\hat{x}(j, t - 1)$ unabhängig von $\hat{\varepsilon}(j, t)$ ist], gilt

$$c = \rho(1), \quad (\text{L.8})$$

wobei $\rho(1)$ der Autokorrelationskoeffizient von \hat{x} zum $Lag = 1$ ist. Weiterhin folgt durch Multiplikation von (L.3) mit $\hat{x}(j, t - k)$ und anschließender Erwartungswertbildung, dass der Autokorrelationskoeffizient $\rho(k)$ von \hat{x} (bzw. \hat{T}_n) zum $Lag = k$ wie folgt aus c berechnet werden kann:

$$\rho(k) = c^k. \quad (\text{L.9})$$

Weitere Informationen zu AR(1)-Prozessen findet man in allen Büchern über Zeitreihen und auch bei Wikipedia; siehe z. B.:

http://en.wikipedia.org/wiki/Autoregressive_model.

Für den Blühbeginn $\widehat{BB}(j)$ im Jahr j wird folgender einfacher Ansatz gemacht:

$$\widehat{BB}(j) = BB(j) + \hat{\varepsilon}(j) \cdot \sigma_{BB}. \quad (\text{L.10})$$

Darin ist $BB(j)$ der Erwartungswert des Blühbeginns im Jahr j , und σ_{BB} ist die Standardabweichung von \widehat{BB} . $\hat{\varepsilon}(j)$ ist wieder, ähnlich wie in (L.3), eine standardnormalverteilte Zufallsvariable, wobei $\hat{\varepsilon}(j_1)$ und $\hat{\varepsilon}(j_2)$ für $j_1 \neq j_2$ unabhängig sein sollen:

$$\hat{\varepsilon}(j) \propto N(0, 1). \quad (\text{L.11})$$

Korrekt wäre es natürlich, den Blühbeginn nicht mit (L.10), sondern mit Hilfe von Tagesmitteltemperaturen $T(j, t)$, die ähnlich wie die T_n mit Monte-Carlo-Methoden simuliert werden, und einem phänologischen Modell zu berechnen. Hierbei ergibt sich aber das Problem, dass man dann nicht nur die T_n , sondern auch die T gleichzeitig simulieren müsste. Da beide Größen aber nicht unabhängig voneinander sind, ist das wesentlich schwieriger als die Simulation der T_n allein. Die Versuche, die zu Abbildung L.6 führten, werden aber zeigen, dass die genaue Bestimmung der $\widehat{BB}(j)$ nicht wichtig ist, solange nur der Erwartungswert $BB(j)$ für den betrachteten Zeitbereich $j = \text{Startjahr} + k; k \in \{0 \dots 29\}$ korrekt ist (innerhalb dieses Bereichs soll $BB(j)$ nicht von j abhängen, d. h. es soll Stationarität gelten). Für den Erwartungswert von $\widehat{BB}(j)$ gilt:

$$E[\widehat{BB}(j)] = BB(j). \quad (\text{L.12})$$

Für den Termin des Blühendes $\widehat{BE}(j)$ wird folgender einfacher Ansatz gemacht:

$$\widehat{BE}(j) = \widehat{BB}(j) + 10 \text{ d.} \quad (\text{L.13})$$

Zunächst wird die zweifach modifizierte Feuchttemperatur T_{mmf} [Gleichung (4.116)], die in Kapitel 4.8.2 zur Frostschadensberechnung benutzt wurde, vereinfacht approximativ wie folgt abgeschätzt:

$$\hat{T}_{mmf}(j, t) = \hat{T}_n(j, t) - 1 \text{ K.} \quad (\text{L.14})$$

Besser wäre es, die oben eingeführte Regression (L.6) und den AR(1)-Prozess anstelle für \hat{T}_n direkt an \hat{T}_{mmf} anzupassen und die so erzeugten $\hat{T}_{mmf}(j, t)$ für die Frostschadensberechnung zu verwenden! Im Folgenden wird aber der Einfachheit halber die Beziehung L.14 verwendet.

Für jedes “Jahr” j wird nun eine Zeitreihe für $\hat{T}_n(j, t)$ für die Tage $t = 1 \dots 150$ erzeugt. Sodann wird mit der im Kapitel 4.8.4 beschriebenen Methode aus $\hat{T}_n(j, t)$ und $\widehat{BB}(j)$ der Frostschaden an der Frucht im Jahr j , welcher hier mit $\hat{S}(j)$ ⁵ bezeichnet wird, berechnet:

$$\hat{S}(j) = f_{S1} \left(\hat{T}_n(j, t); t = (\widehat{BB}(j) - t_{Vor}) \dots 150 \right). \quad (\text{L.15})$$

$f_{S1}(\dots)$ beschreibt hier die Abhängigkeit des Schadens von den Tagesminimumtemperaturen und dem Blühbeginn. Natürlich hängt der Frostschaden auch noch von der Zeitspanne t_{Vor} , die den Zeitraum vor dem Blühbeginn definiert, in dem ebenfalls Schäden berücksichtigt werden, und den hier nicht explizit aufgeführten (da für jede Fruchtart konstant gehaltenen) kritischen Temperaturen ab (vgl. Tabelle 4.17).

Bei der hier verwendeten Monte-Carlo-Methode braucht man sich nun aber nicht auf 30 Jahre pro betrachtetem, als quasi-stationär anzunehmenden Zeitbereich zu beschränken, sondern kann problemlos 100 000 Jahre simulieren ($j = 1 \dots 100\,000$)!

Für die Betrachtungen, die in Kapitel L.5 angestellt werden sollen, wird hier die Beziehung (L.15) noch etwas umformuliert. Obwohl das Ergebnis (L.20) auch rein intuitiv richtig erscheint, wird hier der etwas beschwerliche, mathematisch exakte Weg gewählt. Nur damit erkennt man, welche Voraussetzungen für die Gültigkeit von (L.20) erfüllt sein müssen.

Falls für \hat{T}_n die Gleichung (L.2) gilt und wenn man die Transformation $t = \widehat{BB}(j) + k$ verwendet⁶, kann man für die $\hat{T}_n(j, t)$ in (L.15) mit Hilfe von (L.2) schreiben:

$$\begin{aligned} \hat{T}_n(j, t) &= b(j) + a \cdot (\widehat{BB}(j) + k) + \hat{x}(j, t) \\ &= b(j) + a \cdot (BB(j) + \hat{\varepsilon}(j) \cdot \sigma_{BB} + k) + \hat{x}(j, t) \\ \text{für } k &= -t_{Vor} \dots (150 - \widehat{BB}(j)). \end{aligned} \quad (\text{L.16})$$

Beim zweiten Gleichheitszeichen wurde Gleichung (L.10) verwendet. Wenn man die Klammern etwas anders setzt, so erhält man:

$$\begin{aligned} \hat{T}_n(j, t) &= (b(j) + a \cdot BB(j)) + a (\hat{\varepsilon}(j) \cdot \sigma_{BB} + k) + \hat{x}(j, t) \\ &= T_n(j, BB(j)) + a (\hat{\varepsilon}(j) \cdot \sigma_{BB} + k) + \hat{x}(j, t) \\ \text{für } k &= -t_{Vor} \dots (150 - \widehat{BB}(j)). \end{aligned} \quad (\text{L.17})$$

Beim zweiten Gleichheitszeichen wurde (L.6) verwendet, da die ersten beiden Terme auf der rechten Seite der ersten Zeile gerade den Erwartungswert $T_n(j, t)$ von $\hat{T}_n(j, t)$ zur Zeit $t = BB(j)$ darstellen. Hiermit kann man Formel (L.15) als

$$\hat{S}(j) = f_{S2} \left(T_n(j, BB(j)) + a (\hat{\varepsilon}(j) \cdot \sigma_{BB} + k) + \hat{x}(j, t); k = -t_{Vor} \dots (150 - \widehat{BB}(j)) \right) \quad (\text{L.18})$$

schreiben. Dass $\hat{x}(j, t)$ von t und nicht von k abhängt, ist hier bedeutungslos, da $\hat{x}(j, t)$ gemäß (L.3) nur einen stationären AR(1)-Prozess darstellt, bei dem t nur als Laufindex und nicht als *Tag im Jahr* interpretiert werden kann. Die Abhängigkeit der oberen Grenze von k von $\widehat{BB}(j)$ kann vernachlässigt werden, da $(150 - \widehat{BB}(j))$ Tage nach dem Blühbeginn praktisch kein Frost mehr auftritt [man könnte die 150 in den Berechnungen auch durch

⁵ $\hat{S}(j)$ entspricht dem s_F aus Kapitel 4.8.4.

⁶ k stellt dann den Tag nach dem Blühbeginn dar.

einen größeren Wert ersetzen (z. B. wie bei den alten Berechnungen durch den 31. Juli (212 DOY)!]. Der Erwartungswert $S(j)$ von $\hat{S}(j)$ hängt folglich nur von $T_n(j, BB(j))$ und den übrigen Parametern, die in Gleichung (L.18) auftreten, ab:

$$E[\hat{S}(j)] = S(j) = f_{S3}(T_n(j, BB(j)); a, \sigma_x, c, \sigma_{BB}, t_{Vor}). \quad (\text{L.19})$$

Dieser Erwartungswert kann natürlich nicht mehr von den beiden Zufallsvariablen $\hat{x}(j, t)$ und $\hat{\varepsilon}(j)$ abhängen, sondern nur noch von den sie bestimmenden Parametern σ_x und c (wichtig nur für \hat{x}) abhängen [$\hat{\varepsilon}(j)$ ist *i. i. d.*⁷ $N(0,1)$ verteilt und hängt daher von keinen weiteren Parametern mehr ab].

Falls sich a , c , σ_x und σ_{BB} nicht mit dem „Jahr“ j verändern, sondern fest bleiben, so hängt der Erwartungswert $S(j)$ nur vom Erwartungswert $T_n(j, t = BB(j))$ ab. Es gilt daher

$$S(j) = f_{S4}(T_n(j, BB(j))) =: S(T_n(j, BB(j))). \quad (\text{L.20})$$

In dieser Gleichung wird $T_n(j, t)$ nach Gleichung (L.6) berechnet. Alle Folgegrößen von $S(j)$, z. B. die *FrostSchadensProbx* oder die Verteilungsfunktion von \hat{S} , hängen in derselben Form wie $S(j)$ in Formel (L.20) von $T_n(j, BB(j))$ ab, vorausgesetzt die oben genannten Parameter a , c , σ_x und σ_{BB} hängen nicht vom Jahr j ab.

Im Folgenden wird exemplarisch gezeigt, wie man die noch unbekannt Parameter, die für die oben beschriebenen Monte-Carlo-Ansätze benötigt werden, an den Zeitraum 1971-2000 und die DWD-Beobachtungen anpassen kann. Die Abhängigkeit von „ BB von j “ und die von „ b von j “ soll im Kapitel L.3 zunächst vernachlässigt werden.

⁷ independent and identically distributed

L.3 Bestimmung der unbekannt Parameter

Die Verteilung der T_n der Tage 61 bis 150 (bzw. '120' in Abbildung L.2) lässt sich sehr gut durch eine Normalverteilung approximieren, wenn man vorher den 'Trend mit t ', der bei dieser Zeitspanne nicht mehr zu vernachlässigen ist, abzieht (**Abbildung L.2**). Die rote Kurve (eine an die grüne Kurve angepasste Gaußfunktion) stimmt (zwangsläufig dank der Konstruktionsvorschrift) fast genau mit der grünen Kurve überein. Diese stellt das Histogramm der synthetisierten Temperaturen dar und stimmt ziemlich gut mit der schwarzen Kurve (aus den echten 30-jährigen Beobachtungen berechnet) überein.

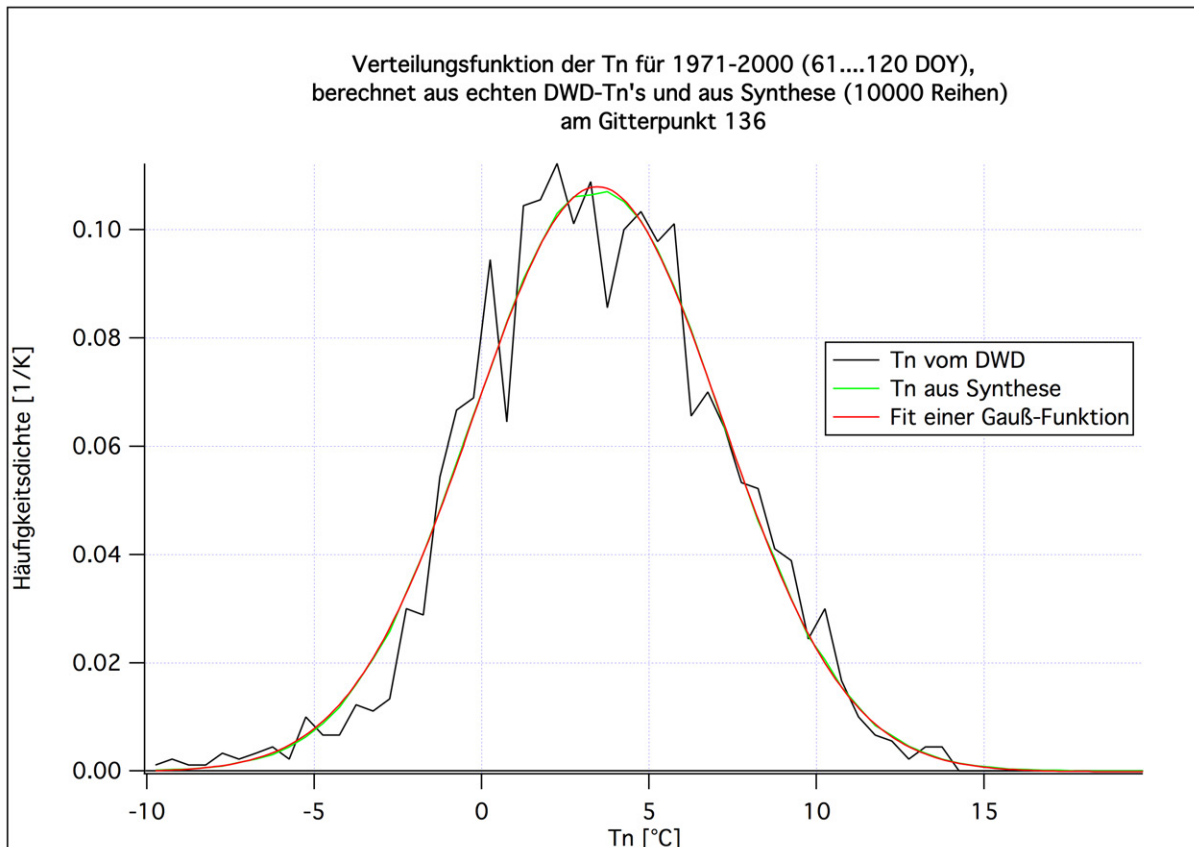


Abbildung L.2: Verteilungsfunktion der T_n der Tage 61...120 DOY für 1971-2000, berechnet aus echten DWD- T_n 's und aus Gleichung (L.2) (abzüglich Trend in t) nach Anpassung der Parameter (siehe Text).

Der Parameter c aus Gleichung (L.3) ergibt sich als Autokorrelationskoeffizient zum $Lag = 1$ als $c = 0.654$. Hierfür wurden die T_n 's der Jahre 1971-2000 vom DWD für die Tage 61-120 (man hätte auch die Tage 61-150 benutzen können) mit den gewöhnlichen Formeln für die Autokorrelation ausgewertet (nach Trendbereinigung!). Die schwarze Kurve in **Abbildung L.3** wurde aus den originalen Beobachtungen berechnet. Die grüne Kurve in **Abbildung L.3** stellt die aus den simulierten Daten geschätzte Autokorrelationsfunktion dar. Diese Kurve hat fast denselben Verlauf wie es die theoretische (rote) Kurve gemäß Gleichung (L.9) vorgibt und stimmt sehr gut mit der aus den Beobachtungen berechneten, schwarzen Kurve überein.

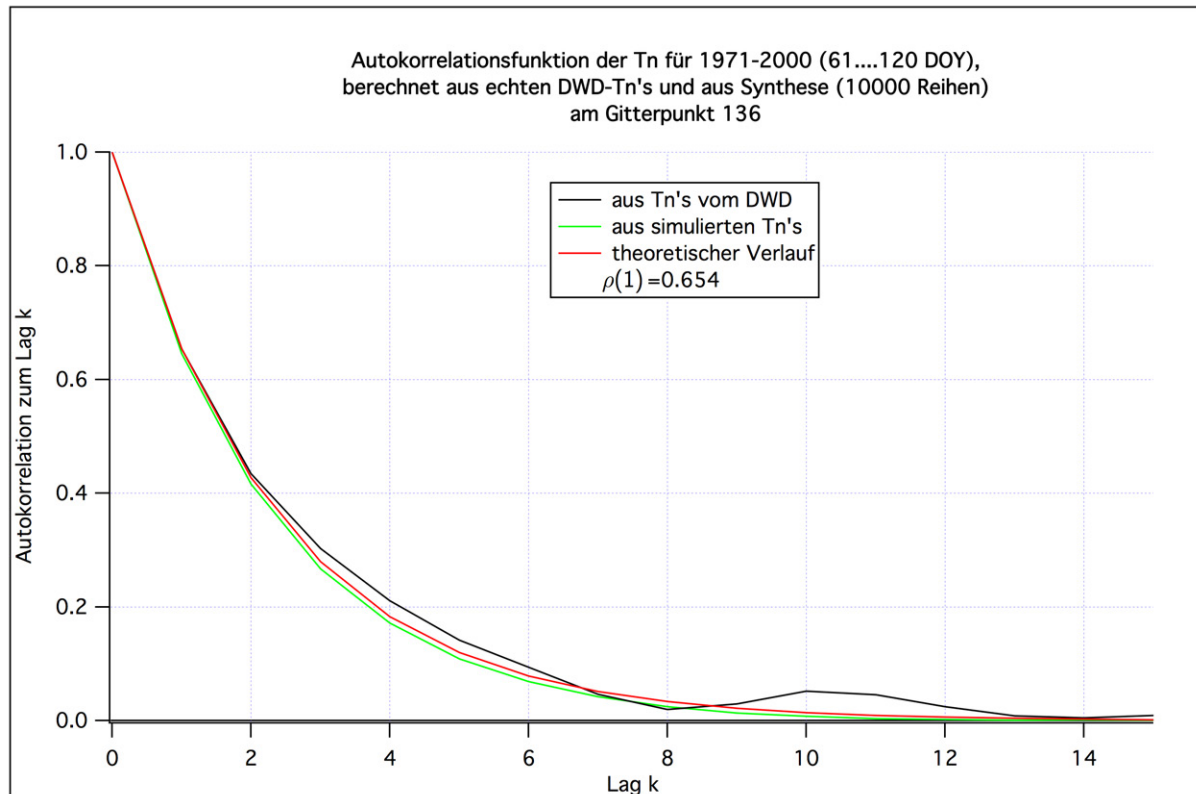


Abbildung L.3: Autokorrelationsfunktion der T_n aus Beobachtungen (DWD), aus Monte-Carlo-Simulation und theoretischer Verlauf [Gleichung (L.9)].

Die lineare Regression durch die \hat{T}_n -Werte der Tage $t = 60 \dots 150$ DOY aller Jahre von 1961-2000⁸ (**Abbildung L.4**) ergibt die Koeffizienten $a = 0.1103$ K/d und $b = -6.495$ °C. Nach Trendbereinigung der \hat{T}_n -Reihe erhält man eine Standardabweichung $\sigma_x = 3.39$ K. Dass die Folge der \hat{T}_n für einzelne Jahre einen realistischen Verlauf zeigt, kann man der **Abbildung L.5** entnehmen, in welcher jeweils 2 Jahre (Frühlinge) der DWD-Beobachtungen und der synthetischen \hat{T}_n -Werte verglichen werden. Sowohl das Gedächtnis der Folgen als auch die Varianzen und der (kaum sichtbare) Trend sehen bei den simulierten Daten genauso aus wie bei der beobachteten Folge.

⁸ 1971-2000 wäre sinnvoller gewesen!

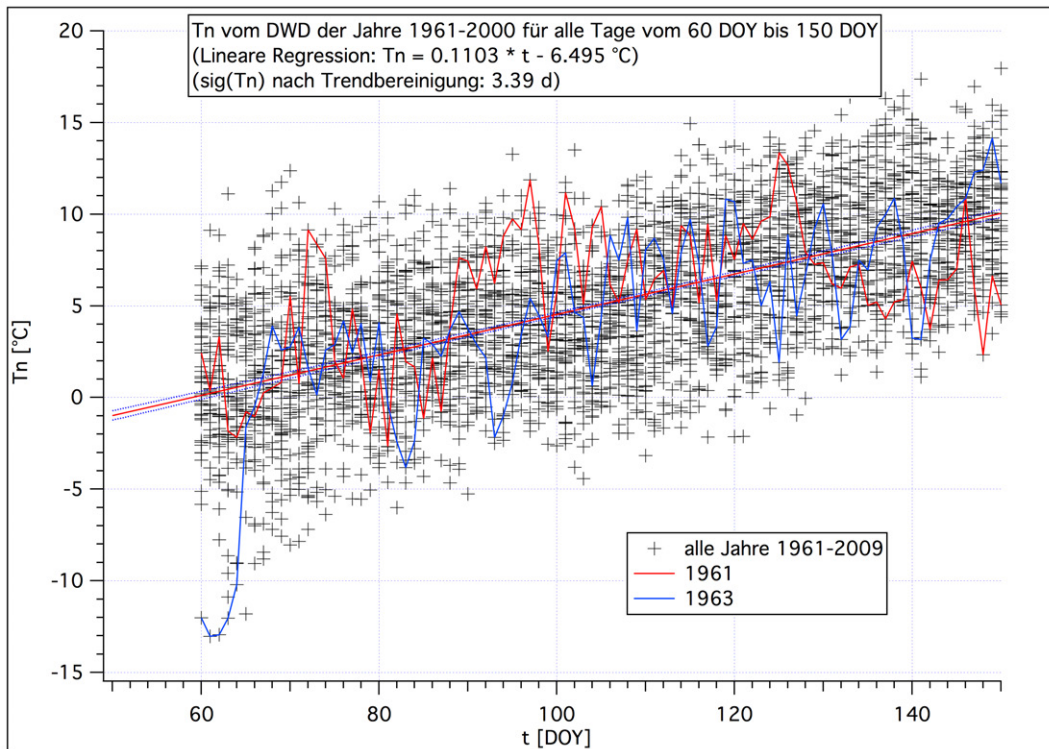


Abbildung L.4: Alle T_n der Tage 60 bis 150 und der Jahre 1961 bis 2000 (regionalisierte DWD-Beobachtungen am Gitterpunkt 136)

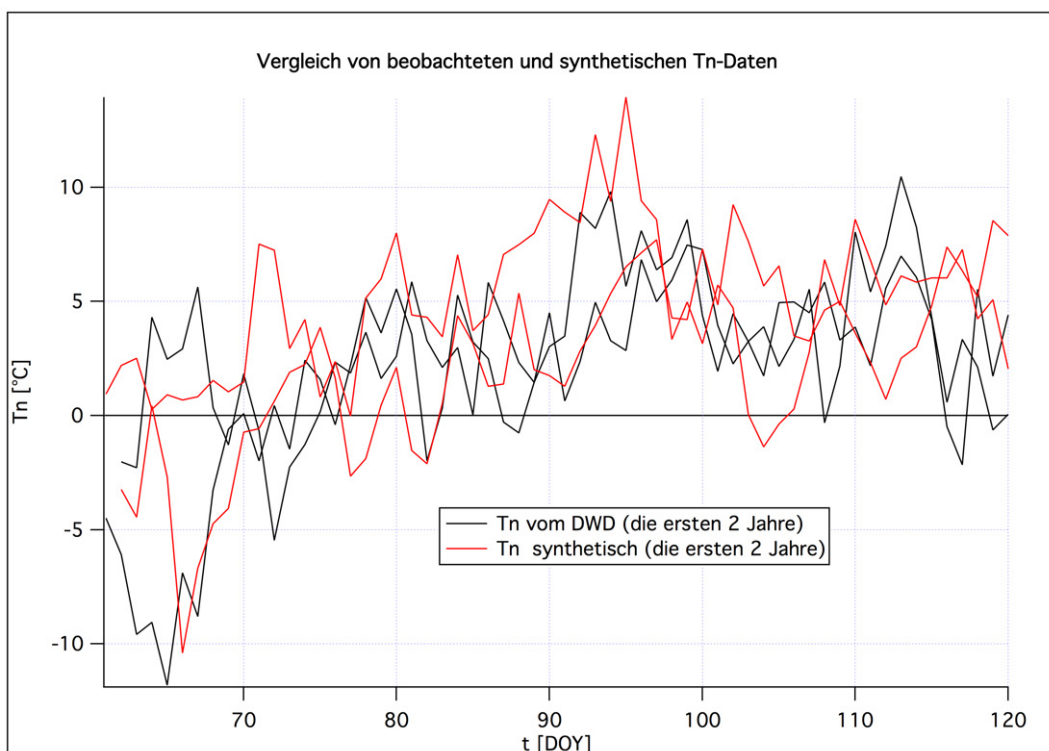


Abbildung L.5: Der Frühjahrsverlauf von T_n in den Jahren 1961 und 1962 am Gitterpunkt 136

Der mittlere Blühbeginn BB und die Standardabweichung von \widehat{BB} für die Periode 1971-2000 wurden für das letzte der 19 Obstanbau-Gitterpunkte (9.4 °N, 51.6 °E, 244.5 m über NHN) und über die Jahre 1962-2009 geschätzt⁹. Es ergab sich $BB = 123.8$ DOY und $\sigma_{BB} = 8.36$ d. [Für das Pixel 136 bei Frankfurt am Main (8.8 °N, 50.2 °E, 148.8 m über NHN) erhält man $BB = 114.8$ DOY und $\sigma_{BB} = 8.22$ d. Dieser gegenüber den hier benutzten 123.8 DOY um 9 Tage frühere mittlere Blühbeginn führt zu einer Verdoppelung des mittleren Schadens (siehe Kapitel L.4).]

L.4 Ergebnisse für den mittleren Frostschaden und die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Frostschäden

Da die (relativen) Schäden \hat{S} alle reellen Zahlenwerte s aus dem Intervall $[0,1]$ annehmen können, wird sich die gesamte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_{FS}(s)$ aus einer stetigen Funktion $g(s)$ und zwei Peaks am Rand (bei $s = 0$ und $s = 1$) zusammen setzen:

$$f_{FS}(s) = P(0)\delta(s) + P(1)\delta(s - 1) + (1 - P(0) - P(1))g(s). \quad (\text{L.21})$$

f_{FS} bezeichnet hier im Gegensatz zu f_{Sx} in den vorhergehenden Gleichungen nicht die Umrechnung der Erwartungswerte T_n in mittlere Schäden, sondern stellt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von \hat{S} dar. $P(0)$ und $P(1)$ sind die Wahrscheinlichkeiten für einen Wert $\hat{S} = 0$ bzw. $\hat{S} = 1$ und $\delta(x)$ ist die Dirac'sche Deltafunktion ($\delta(x) = 0$ für $x \neq 0$, $\delta(x) = \infty$ für $x = 0$ und $\int \delta(x)dx = 1$). Da $(1 - P(0) - P(1))$ hier explizit aufgeführt wird und nicht als Faktor in $g(s)$ integriert wurde, ist $g(s)$ so normiert, dass $\int g(s)ds = 1$ gilt. Denn es muss ja $\int f_{FS}(s)ds = 1$ gelten.

Abbildung L.6 zeigt $g(s)$ für die im vorherigen Kapitel besprochene Standardparameterwahl (schwarze Kurve). Die hier nicht dargestellten Randwahrscheinlichkeiten betragen $P(0) = 57.9\%$ und $P(1) = 3.7\%$ (für $P(0)$ wurden alle Schäden gezählt, die kleiner als 0.1 % sind; für $P(1)$ alle, die größer als 99.9 % sind¹⁰). Die Wahrscheinlichkeit $P(0 < \hat{S} < 1) = 1 - P(0) - P(1)$ beträgt 38.4 %. Der Knick bei $s = 0.1$ kommt durch die nicht stetig differenzierbare Umrechnung vom Blüten- in den Fruchtschaden zu Stande [vgl. Gleichung (4.119)].

Interessant ist, dass das Ergebnis kaum von der Standardabweichung σ_{BB} (den Variationen) des Blühbeginns abhängt. Berechnet man die Schäden mit $\sigma_{BB} = \mathbf{0}$ neu [d. h., dass in jedem Jahr derselbe Blühbeginn (nämlich der Erwartungswert BB) verwendet wird], so erhält man für den Bereich $0 < \hat{S} < 1$ die rote Kurve in **Abbildung L.6**, die sich fast nicht von der schwarzen unterscheidet. Der mittlere Schaden sinkt allerdings etwas von 7.5 % auf 5.9 % ab (bei der realistischeren Wahl von $BB = 114.8$ DOY und $\sigma_{BB} = 8.22$ d erhält man $S = 15.3\%$ und bei $BB = 114.8$ DOY und $\sigma_{BB} = \mathbf{0}$ d erhält man $S = 13.4\%$).

Die (kumulative) Verteilungsfunktion (wiederum ist nur der Anteil $g(s)$ dargestellt) für beide Fälle ist in **Abbildung L.7** eingezeichnet. An dieser Darstellung kann man leicht die Frostschadenswahrscheinlichkeiten $P(0 < \hat{S} \leq 0.1)$ und $P(0.1 < \hat{S} \leq 0.5)$ ablesen.

⁹ Konsistenter wäre es natürlich gewesen, diese Schätzung für das Pixel 136 und die Jahre 1971-2000 vorzunehmen! Die hier durchgeführten Rechnungen sollen aber nur exemplarischen Character haben.

¹⁰ Besser wäre es gewesen, diese kritischen Werte noch kleiner bzw. größer anzusetzen. Für z. B. 0.01 % (und alle anderen kritischen Werte, die kleiner als dieser Wert, aber größer als null sind) erhielte man $P(0) = 45.1\%$ anstelle von $P(0) = 57.9\%$

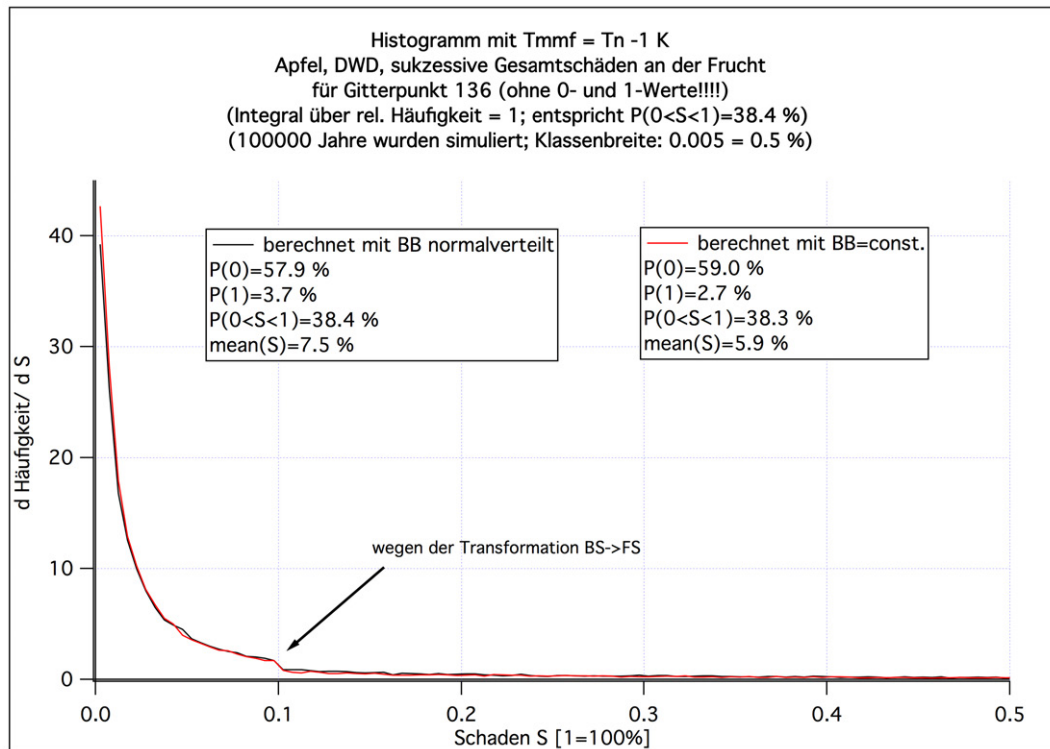


Abbildung L.6: Mit Monte-Carlo-Methode berechnetes Histogramm (Verteilungsfunktion) ohne Randwerte

Wegen der Normierung von $g(s)$ muss man die an der Ordinate abgelesenen Werte noch mit $(1 - P(0) - P(1))$ multiplizieren. Ein Vergleich mit dem grauen Balken in Abbildung 5.38 [oben links: FROSTSCHADENSROB0 = $P(0 < \hat{S} \leq 0.1)$ und oben rechts: FROSTSCHADENSROB1 = $P(0.1 < \hat{S} \leq 0.5)$] zeigt relativ gute Übereinstimmung der Werte.

Um eine anschauliche Vorstellung von der gesamten Verteilung inklusive der Randwahrscheinlichkeiten zu erhalten, sind in **Abbildung L.8** sowohl $g(s)$ [diesmal aber so normiert, dass $\int g(s)ds = 0.384$ gilt (d. h. inklusive Faktor $1 - P(0) - P(1)$)] als auch die (für die graphische Darstellung etwas *breitgeschmierten*) Randwahrscheinlichkeiten eingezeichnet.

Die zugehörige (kumulative) Verteilungsfunktion ist in **Abbildung L.9** eingetragen.

Die Abbildungen 5.36 und 5.38, die mit der alten Methode berechnet wurden, zeigen die Ergebnisse für den Frostschaden [vergleichbar mit dem Schätzwert für den Erwartungswert S (bzw. $mean(S)$ in den Abbildungen) des Frostschadens] und die verschiedenen FROSTSCHADENSROBx für Apfel und alle 19 Obstanbaugitterpunkte. Diese Abbildungen sind dazu geeignet, die neuen Ergebnisse mit den alten zu vergleichen. Dank der großen Fehlerbalken ist die *Übereinstimmung* (Konsistenz) mit der neuen Methode recht gut. Die neuen Ergebnisse sind allerdings wegen der bereits oben erwähnten Verbesserungsmöglichkeiten hier nur exemplarisch zu bewerten und gelten auch nur für einen Gitterpunkt (den Gitterpunkt 136). Die entscheidenden Vorteile bei der neuen Methode sind allerdings die im Prinzip beliebig feine Auflösung der Schadensintervalle und die Möglichkeit, die Randwahrscheinlichkeiten ziemlich genau bestimmen zu können.

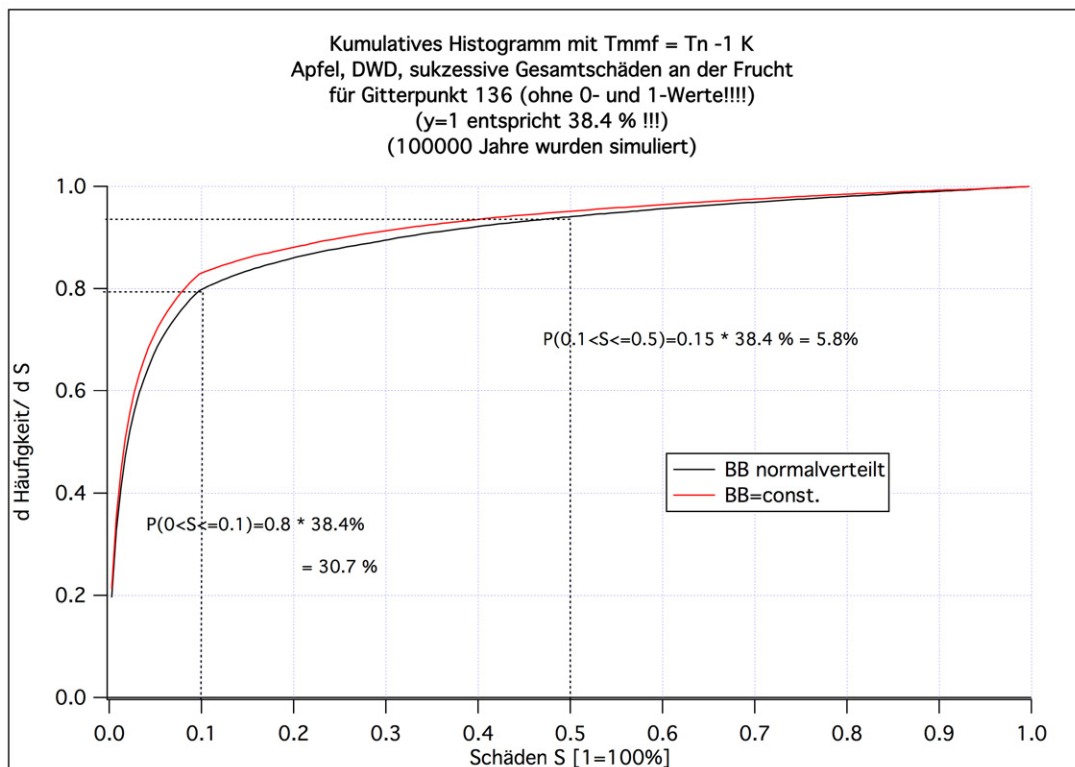


Abbildung L.7: Mit Monte-Carlo-Methode berechnete kumulative Verteilungsfunktion ohne Randwerte

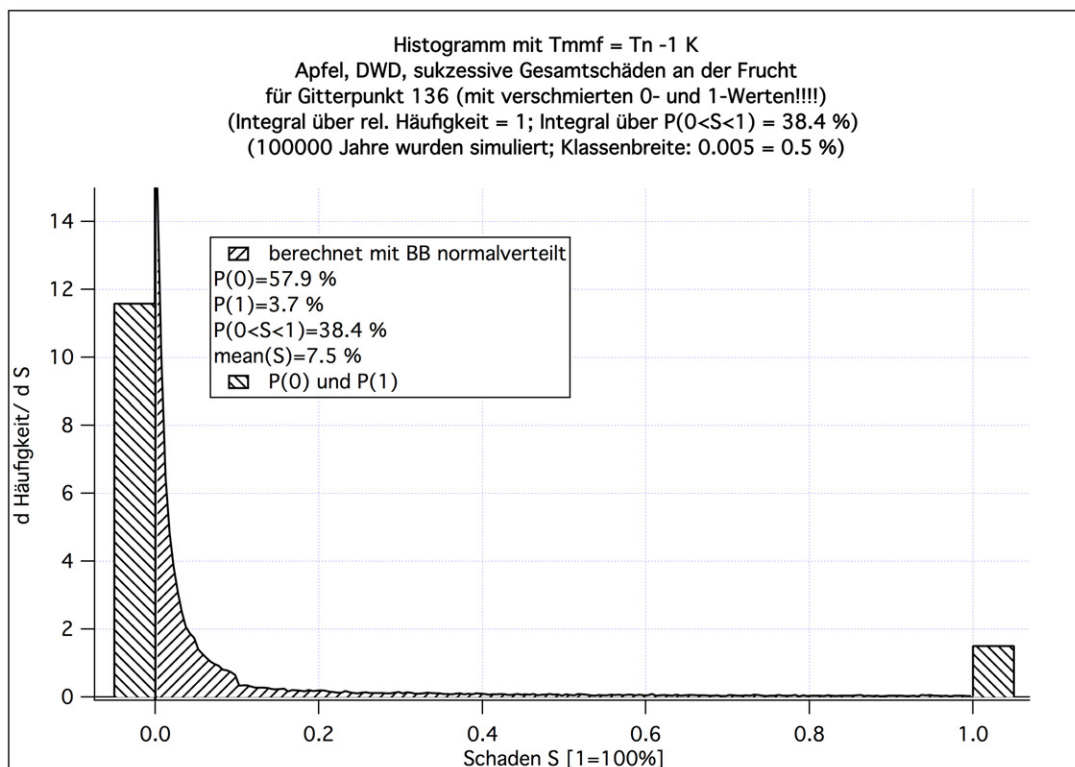


Abbildung L.8: Mit Monte-Carlo-Methode berechnete Verteilungsfunktion mit Rand-Peaks

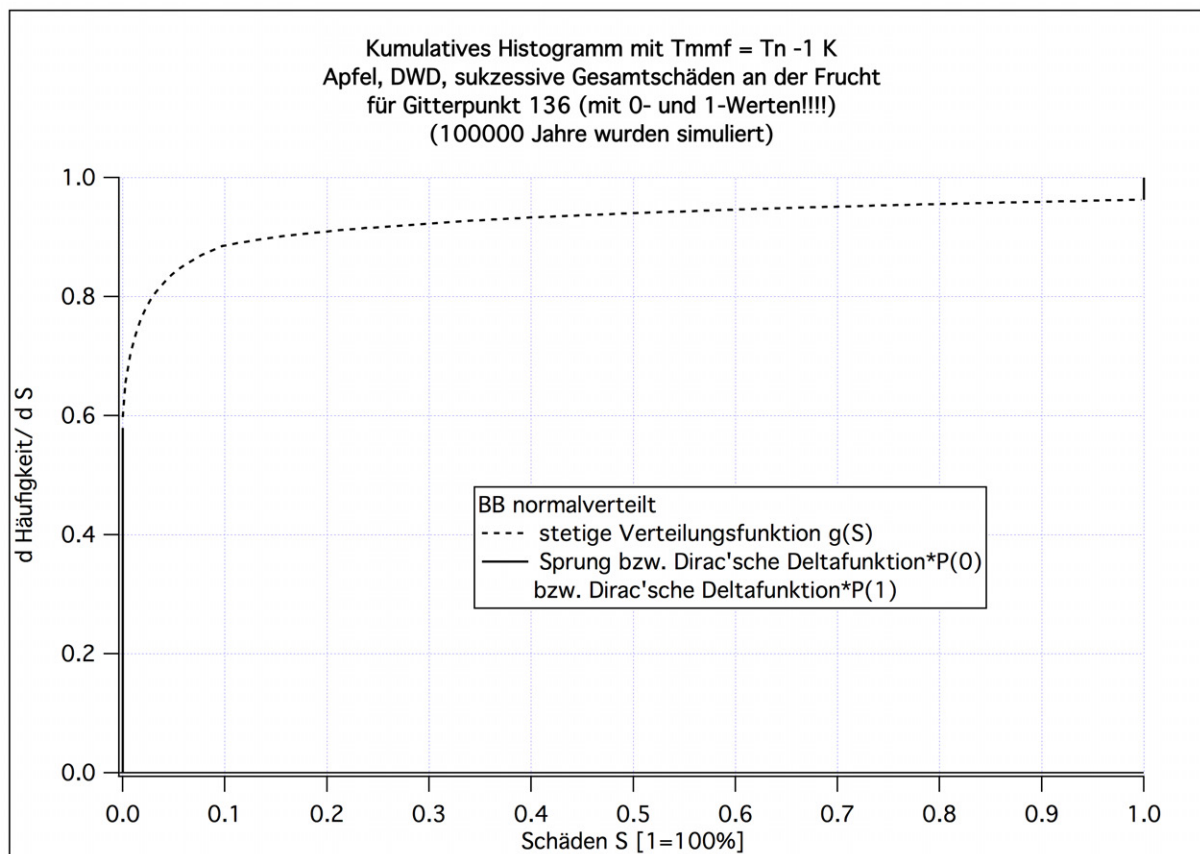


Abbildung L.9: Mit Monte-Carlo-Methode berechnete kumulative Verteilungsfunktion mit Rand-Peaks

L.4.1 Sensitivitätsanalyse

Verkleinert man die Standardabweichung σ_x um 10% (d. h. $\sigma_x \rightarrow \sigma_x * 0.9$) und behält den mittleren Blühbeginn von $BB = 123.8$ DOY bei, so sinkt der mittlere Schaden von **7.5%** auf **3.5%**. Die Wahrscheinlichkeit für keinen Schaden beträgt nun 69.4%, die für einen Totalschaden 1.4% und die für einen Schaden größer als 0 und kleiner als 1 beträgt 29.2%.

Setzt man die Autokorrelation c auf 0 (bei ansonsten unveränderten Originalparametern), so erhält man einen mittleren Schaden von **8.8%**. Die Wahrscheinlichkeit für keinen Schaden beträgt nun 45.2%, die für einen Totalschaden 4.3% und die für einen Schaden größer als 0 und kleiner als 1 beträgt 50.5%.

Legt man anstelle der linearen Regression ein Polynom 2. Ordnung durch die T_n der Tage 1 ... 180 (bei ansonsten unveränderten Originalparametern), so erhält man einen mittleren Schaden von **10.1%**, wenn man die alte Standardabweichung σ_x beibehält. Berechnet man diese aus den neuen Residuen (bzgl. des Polynoms 2. Ordnung) neu, so beträgt der mittlere Schaden **6.7%**, was wieder ganz gut mit den zuerst gefundenen Werten übereinstimmt.

Mit den sinnvolleren $BB = 114.8$ DOY (für Pixel 136) und $\sigma_x = 8.22$ d erhält man $S = 15.5\%$ anstelle von $S = 7.5\%$ bei den in den Rechnungen für die Abbildungen gewählten $BB = 123.8$ DOY und $\sigma_x = 8.36$ d (für das letzte der 19 Obstanbaupixel). Bei der alten Methode aus Kapitel 4.8 errechnete man mit DWD-Temperaturen für 1971-2000 einen Schaden $S = 9.2\% \pm 7.1\%$ als Mittelwert für die 19 Obstanbaupixel in Hessen (Abbildung 5.36 oben links, grauer Balken). Das extrem große Vertrauensintervall enthält alle hier zunächst rein exemplarisch berechneten mittleren Schäden. Eine Zusammenstellung der gerade diskutierten Werte findet man in **Tabelle L.1**.

Tabelle L.1: Sensitivität der Schäden bzgl. Parameteränderungen: S = Erwartungswert des Schadens in % (mittlerer Schaden); $P(0)$ = Wahrscheinlichkeiten für keinen Schaden in %; $P(1)$ = Wahrscheinlichkeit für Totalschaden in %; $P(0 < \hat{S} < 1)$ = Wahrscheinlichkeit für einen Schaden zwischen "0 und 1" in %; $Konf95$ = 95%-Konfidenzintervall von S in %; BB (Blühbeginn) und σ_{BB} (Standardabweichung des Blühbeginns) in Tagen; σ_x (Standardabweichung von \hat{T}_n) in K.

	S	$P(0)$	$P(1)$	$P(0 < \hat{S} < 1)$	$Konf95$
$BB = 123.8$ und $\sigma_{BB} = 8.36$	7.5	57.9	3.7	38.4	
$BB = 123.8$ und $\sigma_{BB} = 0$	6.1				
$\sigma_x \rightarrow \sigma_x * 0.9$	3.5	69.4	1.4	29.2	
$c = 0$	8.8	45.2	4.3	50.5	
Polynom 2. Ord.	10.1 (6.7) ^a				
$BB = 114.8$ und $\sigma_{BB} = 8.22$	15.5				
$BB = 114.8$ und $\sigma_{BB} = 0$	13.4				
alte Methode ^b	9.2				± 7.1

^a mit angepasstem σ_x

^b Mittelwert über die 19 Obstanbau-Gitterpunkte

L.5 Abschätzung der Änderungen im mittleren Frostscha- den (1971-2000 vs. 2071-2000 bzw. allgemeine Schätzformel)

Nun sollen noch einige Konsequenzen aus Gleichung (L.20) abgeleitet werden. Wir nehmen hierfür noch an, dass der Erwartungswert des Blühbeginns hauptsächlich von der März-April-Mitteltemperatur \bar{T}^{34} abhängt:

$$BB = BB(\bar{T}^{34}). \quad (\text{L.22})$$

Die März-April-Mitteltemperatur \bar{T}^{34} hängt natürlich vom betrachteten Jahr j ab:

$$\bar{T}^{34} = \bar{T}^{34}(j). \quad (\text{L.23})$$

Setzt man (L.23) in (L.22) ein, so erhält man

$$BB = BB(\bar{T}^{34}(j)). \quad (\text{L.24})$$

Dass BB von j abhängt, wurde bereits in (L.10) und den folgenden Formeln verwendet. Die Ableitung von BB nach j ergibt gemäß Kettenregel

$$\frac{dBB}{dj} = \frac{dBB}{d\bar{T}^{34}} \cdot \frac{d\bar{T}^{34}}{dj} \quad (\text{L.25})$$

und die Ableitung des Erwartungswert des Schadens $S(j)$ gemäß (L.20) nach j ergibt

$$\frac{dS}{dj} \stackrel{(\text{L.20})}{=} \frac{dS}{dT_n} \frac{dT_n}{dj}. \quad (\text{L.26})$$

Da $T_n = T_n(j, t = BB(j))$ gilt, folgt

$$\frac{dT_n}{dj} = \frac{\partial T_n}{\partial j} + \frac{\partial T_n}{\partial t} \cdot \frac{dBB}{dj}. \quad (\text{L.27})$$

Aus (L.26) und (L.27) ergibt sich

$$\frac{dS}{dj} = \frac{dS}{dT_n} \left(\frac{\partial T_n}{\partial j} + \frac{\partial T_n}{\partial t} \cdot \frac{dBB}{dj} \right). \quad (\text{L.28})$$

Nimmt man nun noch an, dass

$$\frac{\partial T_n}{\partial j} \approx \frac{d\bar{T}^{34}}{dj} \quad (\text{L.29})$$

(d. h. wir nehmen an, dass sich das Temperaturniveau $b(j)$ von T_n [vgl. Gleichung (L.6)] ähnlich verändert wie das der Tagesmitteltemperaturen), so erhält man aus (L.28) mit (L.25) und (L.29)

$$\frac{dS}{dj} \approx \frac{dS}{dT_n} \cdot \left[\frac{d\bar{T}^{34}}{dj} \left(1 + \frac{\partial T_n}{\partial t} \cdot \frac{dBB}{d\bar{T}^{34}} \right) \right]. \quad (\text{L.30})$$

Die eckige Klammer ist hierbei eine Approximation für dT_n/dj [vgl. (L.26)]. Hängen \bar{T}^{34} linear von j und BB linear von \bar{T}^{34} ab, so besteht, da T_n wegen (L.6) auch linear von t abhängt, die eckige Klammer nur aus den als konstant angenommenen Anstiegen dieser

linearen Beziehungen (aus den Regressionskoeffizienten), und es gilt nicht nur für infinitesimale Zuwächse dj , sondern für beliebig große Zuwächse Δj bzw. $\Delta \bar{T}^{34}$

$$\Delta T_n(j, BB(j)) = \left[\frac{d\bar{T}^{34}}{dj} \left(1 + \frac{\partial T_n}{\partial t} \cdot \frac{dBB}{d\bar{T}^{34}} \right) \right] \Delta j = \left(1 + \frac{\partial T_n}{\partial t} \cdot \frac{dBB}{d\bar{T}^{34}} \right) \Delta \bar{T}^{34}. \quad (\text{L.31})$$

Dividiert man nun noch (L.30) durch $d\bar{T}^{34}/dj$, so erhält man

$$\frac{dS}{d\bar{T}^{34}} \approx \frac{dS}{dT_n} \cdot \left(1 + \frac{\partial T_n}{\partial t} \cdot \frac{dBB}{d\bar{T}^{34}} \right). \quad (\text{L.32})$$

Dabei gilt, dass $dS/dT_n < 0$ ist (die Schäden nehmen ab, wenn die mittlere Minimumtemperatur ansteigt). *Bereits das Vorzeichen der runden Klammer in der obigen Gleichung erlaubt daher die Abschätzung, ob der Schaden mit zunehmenden Temperaturen größer oder kleiner wird.* Ist die Klammer positiv, so wird der Schaden mit steigender Temperatur abnehmen und umgekehrt. Da die runde Klammer immer kleiner als 1 ist, ist die Änderung des Frostschadens mit steigenden Temperaturen immer positiver (bzw. weniger negativ) als sie es ohne die runde Klammer wäre. Interessant ist auch, dass das Vorzeichen der Schadensänderung dS bzw. ΔS im Prinzip nur von $dBB/d\bar{T}^{34}$ abhängt (wenn man $\partial T_n/\partial t \approx \text{const.} \stackrel{(\text{L.6})}{=} a$ annimmt). Die Größe der Schadensänderung dS bzw. ΔS selbst hängt nur von der Größe der Änderung von \bar{T}^{34} , d. h. von $\Delta \bar{T}^{34}$, die das Klimamodell vorhersagt, und vom gewählten phänologischen Modell (d. h. von $dBB/d\bar{T}^{34}$) ab, nicht aber von weiteren Features des benutzten Klimamodells¹¹.

Die Gleichungen (L.30) und (L.32) ermöglichen eine Abschätzung der Veränderung des Erwartungswerts des Schadens S mit den Jahren j bzw. mit der Veränderung der März-April-Mitteltemperatur \bar{T}^{34} , wenn man in diesen Gleichungen für S eine Linearisierung vornimmt, indem man z. B. dS/dj durch $\Delta S/\Delta j$ ersetzt (das entspricht dann einer Taylor-Entwicklung erster Ordnung). Möchte man ein genaueres Ergebnis und die Nichtlinearität von $S(j)$ bzw. $S(\bar{T}^{34})$ berücksichtigen, so kann man ΔT_n ¹² zunächst aus (L.31) abschätzen. Berechnet man dann S mit der Methode aus Kapitel L.2 einmal für das T_n der Gegenwart und danach für $T_n + \Delta T_n$, so erhält man eine genauere Abschätzung der Änderung des Schadens, welche auch die Nichtlinearität von $S(\dots)$ berücksichtigt. Im Monte-Carlo-Modell aus Kapitel L.2 muss dazu nur das Temperaturlevel $b(j)$ um ΔT_n angehoben werden. Der Blühbeginn $BB(j)$ aus (L.10) muss in diesem Fall konstant gehalten werden, da seine Verschiebung bereits in ΔT_n enthalten ist [vgl. auch Gleichung (L.16)].

Die Terme in den Gleichungen (L.30) bis (L.32) haben folgende Bedeutung:

1. $\frac{d\bar{T}^{34}}{dj}$: Das ist die Veränderung des Temperaturniveaus (der März-April-Mitteltemperatur bzw. Frühjahrsmitteltemperatur) mit den Jahren. Dieser Wert ist mit $\partial T/\partial b \cdot db/dj$ [mit $T = T(t, b)$] aus Gleichung (5) in Blümel & Chmielewski (2012) identisch. Berücksichtigt man (L.29), so entspricht dieser Wert auch ungefähr der Änderung der Tagesminimumtemperatur mit den Jahren. Diese Größe wird von den Klimamodellen geliefert. Für das HCLM (A1B) ergibt sich für die 19 Obstanbau-gitterpunkte in Hessen ein mittlerer Wert von ca. $2.7 \text{ K}/(100 \text{ a})=0.027 \text{ K a}^{-1}$.

¹¹ Wiederum wird die Konstanz der Parameter a , c , σ_x und σ_{BB} vorausgesetzt!

¹² Dieses ΔT_n enthält nicht nur die Veränderung von T_n für einen festgehaltenen Tag im Jahr, sondern auch schon die Veränderung von T_n durch die Verschiebung des Blühbeginns BB .

2. $\frac{\partial T_n}{\partial t}$: Das ist der Anstieg der Minimumtemperatur T_n im Frühjahr (mit den Tagen im Jahr). Er entspricht dem a aus Gleichung (5) in Blümel & Chmielewski (2012). Entweder wird dieser Wert als konstant angenommen (ca. 0.11 K d⁻¹ aus DWD-Beobachtungen für Hessen), oder er wird aus den Ergebnissen der Klimamodelle berechnet.
3. $\frac{dBB}{dT^{34}}$: Dieser Wert kann leicht aus Formel (L.25) berechnet werden. Wenn man dBB/dj aus einer Regression der Ergebnisse eines Phänomodells bestimmt hat, und $d\bar{T}^{34}/dj$ aus einer Regression von Klimamodellergebnissen, so folgt aus (L.25):

$$\frac{dBB}{dT^{34}} = \left(\frac{dBB}{dj} \right) \div \left(\frac{d\bar{T}^{34}}{dj} \right). \quad (\text{L.33})$$

Für das HCLM (A1B) ergibt sich ein ungefährender Wert von -5.6 d K^{-1} ($dBB/dj \approx -0.15 \text{ d a}^{-1}$; $d\bar{T}^{34}/dj \approx 0.027 \text{ K a}^{-1}$).

4. $\frac{dS}{dT_n}$: Dieser Term ist die (*absolute*) Ableitung des Fruchtschadens nach T_n . Diese (totale) Ableitung ist nur möglich (sinnvoll), wenn die Voraussetzungen, die zu (L.20) führten, gültig sind. Im Allgemeinen wird man diesen Ausdruck durch $\Delta S/\Delta T_n$ approximieren, um Aussagen für endliche Änderungen von T_n vornehmen zu können. Mit dem Monte-Carlo-Modell wurde mit den Anpassungen an DWD-Beobachtungen aus Kapitel L.3 ein Wert von $-0.0143 \text{ K}^{-1} = -1.43 \% \text{ K}^{-1}$ bestimmt. Man beachte, dass der Wert dieses Term sehr stark von der Varianz der T_n ($= \sigma_x^2$) im betrachteten Zeitabschnitt abhängt. Leider wird diese Varianz aber von den meisten RCM's sehr unzureichend wiedergegeben. Es ist daher vermutlich besser, für die Gegenwart und die Zukunft diese Varianz aus den Beobachtungen der Gegenwart abzuschätzen.

Mit den eben approximierten Zahlenwerten berechnet sich die runde Klammer von (L.32) zu +0.384. Das bedeutet, dass die Schäden abnehmen (der Vorfaktor dS/dT_n ist negativ!). Setzt man diesen Zahlenwert und die oben angegebenen Abschätzungen in (L.34) ein [diese Gleichung ist nur eine leicht umformulierte Formel (L.32)],

$$\Delta S \approx \frac{dS}{dT_n} \cdot \left(1 + \frac{\partial T_n}{\partial t} \cdot \frac{dBB}{dT^{34}} \right) \cdot \Delta \bar{T}^{34}, \quad (\text{L.34})$$

und nimmt noch für $\Delta \bar{T}^{34}$ z. B. 2.7 K an, so erhält man $\Delta S = -1.5 \%$. Man beachte, dass die Abschätzung nur dann korrekt ist, wenn die Varianzen von T_n auch in der Zukunft ähnliche Werte haben werden wie bei den Beobachtungen in der Gegenwart. Auch die Steigung $\partial T_n/\partial t$ des als relativ linear vorausgesetzten Verlaufs der Frühjahrs-(Tagesminimum-)Temperaturen muss relativ konstant bleiben. Bei z. B. WETTREG ist das nicht der Fall. Im alten WETTREG2006 verändern sich die Varianzen mit der Zeit; im neuen WETTREG2010 steigt die Februar-Temperatur wesentlich stärker an (um ca. 4 K) als die März- und April-Temperatur (um ca. 2 K ... 2.5 K) [vgl. Abbildung 5.40 rechts]. Daher ergibt sich eine so starke Verfrühung des Blühbeginns, dass die Frostschäden in WETTREG2010 zunehmen [vgl. Abbildung 5.36 oben rechts].

Dieses Verhalten lässt sich auch an der **Abbildung L.10** ablesen: Der schwarze Pfeil markiert die Verschiebung ΔBB (< 0) des mittleren Blühbeginns zwischen den 30-jährigen Zeiträumen 1971-2000 (Szenario C20 aus WETTREG2010) und 2071-2100 (Szenario A1B aus WETTREG2010). Die rote Linie ist die Regressionsgerade $T_n(t)$

durch die Frühlingswerte von $\hat{T}_n(t)$ aller Jahre des Zeitraums 1971-2000, und die blaue Linie ist die Regressionsgerade $T_n(t)$ durch die Frühlingswerte von $\hat{T}_n(t)$ aller Jahre des Zeitraums 2071-2100. Die Steigung dieser beiden Linien beträgt jeweils ungefähr $\Delta T_n/\Delta t = a$. Nimmt man wieder an, dass $\Delta T_n \approx \Delta \bar{T}^{34}$ gilt, so wird der Term $(\Delta T_n/\Delta t) \cdot (\Delta BB/\Delta \bar{T}^{34}) \approx \Delta BB/\Delta t = \Delta BB/(\Delta T_n/a)$ in Gleichung (L.32) kleiner als “-1”, woraus eine Schadenszunahme in der Zukunft folgt, wenn man die Vorhersage mit WETTREG-Temperaturen tätigt.

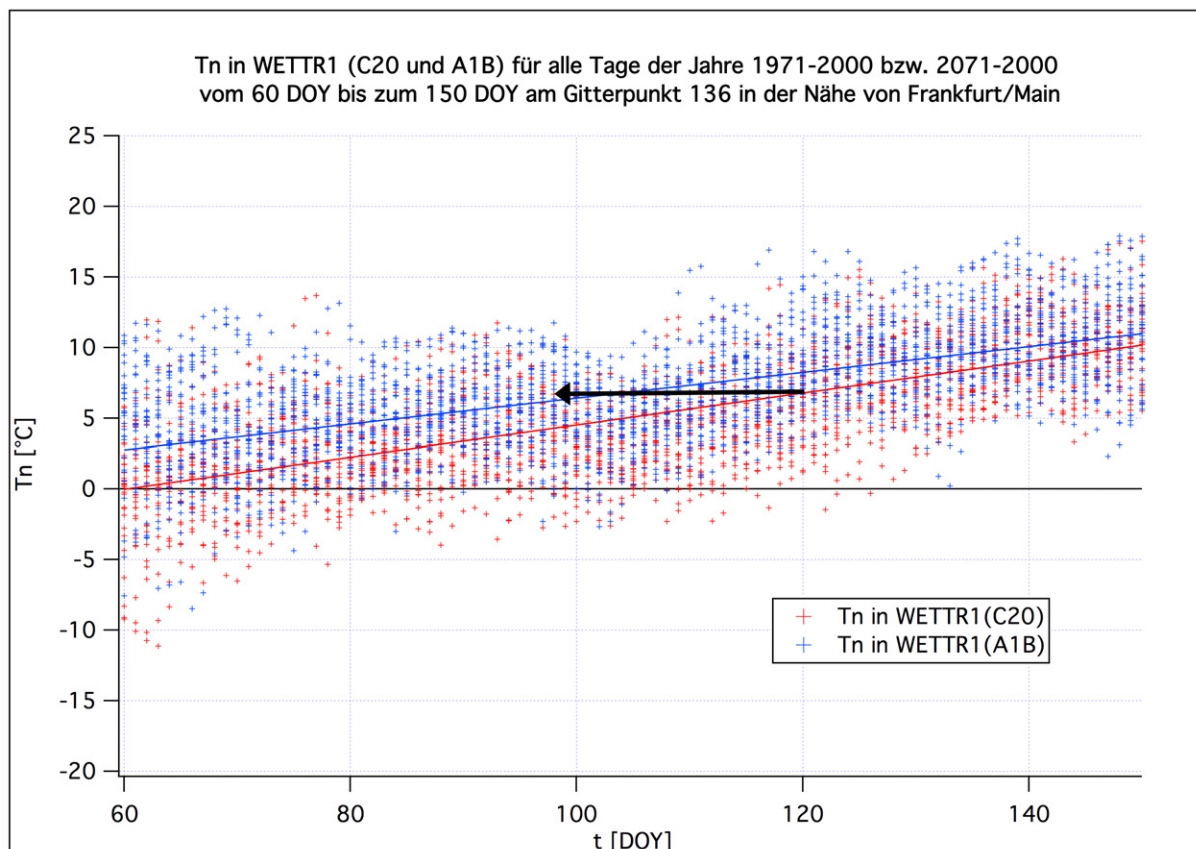


Abbildung L.10: T_n in WETTREG2010-Lauf1 im Kontrolllauf C20 und Szenario A1B für die Tage 60-150

L.6 Die Frostschäden bei Nutzung der “konventionellen Phänomodelle ohne DAYLENGTH-Term und mit relativ frühem t_1 ”

In Kapitel 4.6.4 [Gleichung (4.90)] [siehe auch Blümel & Chmielewski (2012)] wurde gezeigt, dass für die konventionellen GDD-Modelle $\partial t_2/\partial b = -1/a$ gilt, sofern das Forcing vom Zeitpunkt t_s einsetzt, d. h., solange $t_1 \leq t_s$ gilt. $\partial t_2/\partial b$ wurde hier (d. h. im Anhang L) mit $dBB/d\bar{T}^{34}$ bezeichnet, um eine bessere Abgrenzung von t_2 zu t zu gewährleisten. Das a entspricht in dieser Arbeit dem Frühlingstemperaturanstieg $\partial T_n/\partial t$. Es gilt daher $\partial T_n/\partial t = a$ und $dBB/d\bar{T}^{34} = -1/a$. Setzt man diese Werte in (L.30) bis (L.32) ein, so erhält man das Ergebnis, dass alle Schadensänderungen identisch null sind. Das

bedeutet: *Die herkömmlichen GDD-Modelle mit frühem Startzeitpunkt für das Forcing verschieben den Blühbeginn mit ansteigenden Temperaturen genau so weit zu früheren Terminen, dass sich im Mittel keine Änderung des Fruchtschadens durch Spätfröste ergibt!* Dieses Ergebnis ist gültig unter den Annahmen, die zu Gleichung (L.20) führten. — Dieses Ergebnis wäre natürlich vom *pflanzenphysiologischen Standpunkt* aus gesehen sehr befriedigend. Es ist aber nur dann gültig, wenn sich die Phänologie des Blühbeginns tatsächlich derart verhalten würde. Das scheint aber nicht der Fall zu sein, da die mit dem DAYLENGTH-Term modifizierten und die alten GDD-Modelle mit großem t_1 realistischer zu sein scheinen als die alten Modelle mit dem kleinem t_1 .

Bei den neuen Phänomodellen mit DAYLENGTH-Term und den alten mit optimiertem t_1 , welches größer als $t_s := (T_{BF} - b)/a$ ist, gilt $dBB/d\bar{T}^{34} > -1/a$ (siehe Abbildung 4.28). Die runde Klammer in Gleichung (L.34) ist dann positiv, und die Veränderung der Schäden mit steigender Temperatur wird dann negativ (da $dS/dT_n < 0$ ist), d. h. es treten in Zukunft weniger Frostschäden auf. Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Abschätzung ist wieder, dass der Frühjahrstemperaturanstieg a und die Varianz σ_x^2 der \hat{T}_n (bzw. von \hat{T}_{mmf} bzw. von \hat{x} [siehe Gleichung (L.2)]) auch in Zukunft ungefähr die Werte von heute behalten.

Beim HadCM3-CLM sind diese Voraussetzungen approximativ erfüllt. **Abbildung L.11** verdeutlicht den \hat{T}_n -Verlauf im Szenario C20 und A1B bei diesem Modell. Wenn man beachtet, dass hier der schwarze Pfeil im Gegensatz zum Fall der Abbildung L.10 nicht über die blaue Linie hinausragt, und wenn man weiterhin das in der Diskussion zu Abbildung L.10 auf Seite 535 Gesagte berücksichtigt, erkennt man leicht, dass hier eine Abnahme der Schäden vorliegen muss.

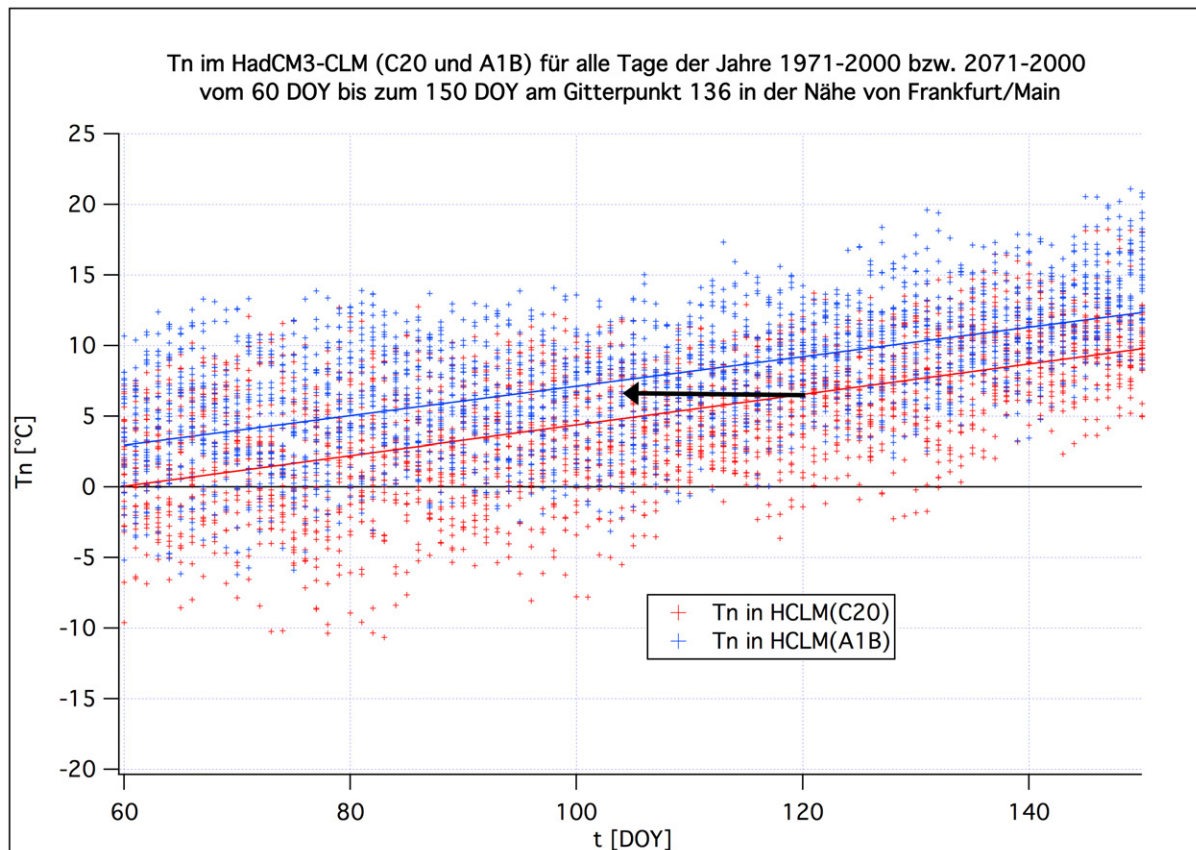


Abbildung L.11: T_n im HadCM3-CLM im Kontrolllauf C20 und Szenario A1B für die Tage 60-150.

L.7 Mögliche Verbesserungen

Um mit der hier vorgestellten Monte-Carlo-Methode nicht nur exemplarische Ergebnisse, sondern echte quantitative Aussagen treffen zu können, sollten in Zukunft noch die folgenden Feinheiten berücksichtigt werden:

- Die Monte-Carlo-Parameter aus Kapitel (L.2) sollten nicht an die \hat{T}_n , sondern direkt an die \hat{T}_{mmf} (für alle Tage des untersuchten 30-Jahreszeitraums für das betrachtete Modell) angepasst werden. Dann müsste man die \hat{T}_{mmf} nicht wie in Gleichung (L.14) approximieren. Die direkte Schätzung der Parameter aus den \hat{T}_{mmf} hätte den Vorteil, dass man nicht \hat{T}_n , \hat{T} , \hat{V}_{10} usw. parallel simulieren müsste, um dann daraus nachträglich \hat{T}_{mmf} zu berechnen.
- Die in Kapitel (L.3) beschriebene Parameterbestimmung sollte konsistenter durchgeführt werden (30 Jahresintervalle, BB geschätzt für den betrachteten Gitterpunkt und nicht für den letzten der 19 Obstanbaupixel usw.).
- Eventuell könnte man auch für den Erwartungswertverlauf von $\hat{T}_n(j, t)$ bezüglich t eine nichtlineare Anpassung vornehmen, und $c = \rho(1)$ und σ_x als Funktion von t ansetzen (falls diese Werte mit den Monaten variieren sollten), so dass die langjährigen Monatsmittelwerte auch von den simulierten \hat{T}_n wiedergegeben werden.

- Auch das Blühende bzw. die Differenz ‘Blühende-Blühbeginn’ sollte man für die betrachtete Fruchtart korrekt ansetzen. (Wenigstens im Mittel sollte diese Differenz zur Fruchtart passen!)
- Um Mittelwerte und mittlere Verteilungen der Schäden über mehrere (z. B. K) Gitterpunkte zu erstellen (bei festem RCM), muss man die oben beschriebene Methode für jeden Gitterpunkt getrennt durchführen und alle jährlichen Schäden (z. B. für 100 000 Jahre) berechnen. Danach kann man alle $K \cdot 100\,000$ -Schäden *zusammenwerfen* und darüber den Mittelwert und die Verteilungsfunktion bestimmen.
- Der Sampling-Fehler der Schäden geht bei der Simulation von 100 000 Jahren und der Betrachtung von Mittelwerten praktisch gegen null. Jedoch ergibt sich die Unsicherheit nun aus der Unsicherheit der Bestimmung der Monte-Carlo-Parameter (σ_x , a , b , BB usw.). Man müsste zuerst die Fehler dieser Parameter abschätzen und dann die Fehlerfortpflanzung auf die Schäden und deren Folgegrößen abschätzen. Das kann ganz einfach durch Variieren der Parameter und Neuberechnung der Schäden mit einer Art Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden.
- Möchte man auch den Fehler (die Unsicherheit), der durch Nutzung unterschiedlicher RCM’s entsteht, abschätzen, so kann man ähnliche Abschätzungen wie im Kapitel 4.4 vornehmen. Es ist allerdings fraglich, ob man für die Schadensabschätzungen bei einem bestimmten RCM tatsächlich alle Monte-Carlo-Parameter an die Modellergebnisse anpassen sollte, oder ob man z. B. nur das Temperaturniveau b in einem 30 Jahresabschnitt vom RCM übernimmt. Die Standardabweichungen σ_x (bei allen in INKLIM-A benutzten RCM’s) und auch die Frühjahrestrends und Autokorrelationen (besonders bei WETTREG2010) sind nämlich bereits im Kontrolllauf sehr unrealistisch. Besonders von σ_x hängen die Frostschäden aber in sehr sensibler Weise ab.

L.8 Fazit

Mit Hilfe der in Kapitel (L.2) vorgestellten Monte-Carlo-Simulation kann man den Sampling-Fehler bei der Bestimmung der mittleren Schäden und der Häufigkeitsverteilung der Schäden bestimmter Stärke fast vollständig eliminieren. Daher kann man genaue Angaben über den Verlauf der Schadenshäufigkeit ($0 < S < 1$) im stetigen Bereich und für die Randwahrscheinlichkeiten $P(0)$ und $P(1)$ machen. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt nur noch von der Genauigkeit der Parameterbestimmung bzw. deren Schätzung für die Zukunft ab. Besonders wichtig ist hierbei die Standardabweichung σ_x (das ist gleichzeitig die Standardabweichung von \hat{T}_n)¹³. Aber auch der mittlere Blühbeginn BB und natürlich das Temperaturniveau b spielen eine gewichtige Rolle.

Ist der Anstieg der Tagesminimumtemperatur T_n im Frühjahr linear [Gleichung (L.6)] und bleiben die Koeffizienten a , σ_x , c und σ_{BB} auch in der Zukunft annähernd konstant, so kann man den funktionalen Zusammenhang zwischen dem Erwartungswert $S(j)$ des Schadens \hat{S} im Jahr j und dem Erwartungswert $T_n(j, t)$ wie in Gleichung (L.20) schreiben. Aus dieser Beziehung folgt (siehe Kapitel L.5) unter anderem die Beziehung (L.34). Mit dieser kann man das Vorzeichen der Schadensänderung mit den Jahren bereits aus dem

¹³ Bei Schätzung dieser Größe muss man vorher den Trend entfernen.

mittleren Frühjahrsanstieg der Tagesminimumtemperatur und der *Verfrühung des Blühbeginns mit der mittleren Frühjahrstemperatur* abschätzen. Wenn die erste Größe auch in Zukunft einigermaßen konstant bleibt, so hängt das Vorzeichen hauptsächlich von den Ergebnissen der Phänomodelle (bzw. der real auftretenden Verfrühungsrate des Blühbeginns) ab, und fast überhaupt nicht von speziellen Ergebnissen der Klimamodelle. Deren Ergebnisse bestimmen nur über den Term $\Delta\bar{T}^{34}$ die absolute Größe des Schadens mit.

Die konventionellen GDD-Modelle mit *frühem* Start der Forcing-Akkumulation sind derart beschaffen, dass sich bei einem Temperaturanstieg keine Änderung der Frostschäden ergibt (vorausgesetzt, die relativ schwachen Annahmen, die zu Gleichung (L.30) bzw. (L.31) führten, werden erfüllt) (siehe Kapitel L.6).

Bei den neuen, verbesserten Phänomodellen mit DAYLENGTH-Term und den alten mit optimiertem t_1 , welches größer als $t_s := (T_{BF} - b)/a$ ist, treten in Zukunft weniger Frostschäden auf, wenn die obigen Voraussetzungen erfüllt sind (siehe Seite 537).

Literaturverzeichnis

- Adam, N.R.; Wall, G.W.; Kimball, B.A.; Idso, S.B.; Webber, A.N. (2004): Photosynthetic down-regulation over long-term CO₂ enrichment in leaves of sour orange (*Citrus aurantium*) trees. *New Phytol.* 163, 341-347. (Seite 148).
- Agresti, A.; Coull, B. A. (1998): Approximate is Better than “Exact” for Interval Estimation of Binomial Proportions. *The American Statistician*, Vol. 52, No. 2, 119-126. (Seite 105 und 221).
- Ainsworth, E. A.; Long, S. P. (2005): What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytol.* 165, 351-372. (Seite 148).
- Anda, A.; Kocsis, T. (2008): Impact of Atmospheric CO₂ Enrichment on some Elements of Microclimate and Physiology of Locally Grown Maize. *Applied Ecology and Environmental Research* 6(1): 85-94. (Seite 147).
- Ballard, J. K.; Proebsting, E. L. (1972): Frost and frost control in Washington orchards. Extension Bulletin No. 634. Washington State University, 27 S. (Seite 115).
- Blümel, K. (1999): A Simple Formula for Estimation of the Roughness Length for Heat Transfer over Partly Vegetated Surfaces. *J. Appl. Meteor.* 38, No. 6, 814-829. (Seite 130).
- Blümel, K.; Schneider, G.; Günter, T. (2002): *Bereitstellung von operativ nutzbaren Vorhersagen zur Schmelz- und Niederschlagswasserabgabe aus der Schneedecke für das Beratungsgebiet Rheinland-Pfalz, Saarland, für Teile von Nordrhein-Westfalen und Hessen sowie das französische Moselgebiet, Luxembourg und Baden-Württemberg (SNOW-BW2001)*, Band 1 und 2. Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Hydrometeorologie, Referat Hydrometeorologische Entwicklungen und Anwendungen, Lindenberger Weg 24, D-13125 Berlin, Germany, 185 S. (Seite 27).
- Blümel, K.; Schneider, G.; Günter, T. (2004): *Bereitstellung von operativ nutzbaren Vorhersagen zur Schmelz- und Niederschlagswasserabgabe aus der Schneedecke für das Beratungsgebiet Rheinland-Pfalz, Saarland, für Teile von Nordrhein-Westfalen und Hessen sowie das französische Moselgebiet, Luxembourg und Baden-Württemberg (SNOW-BW2003)*, Band 1 und 2. Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Hydrometeorologie, Referat Hydrometeorologische Entwicklungen und Anwendungen, Lindenberger Weg 24, D-13125 Berlin, Germany, 153 S. (Seite 28 und 35).
- Blümel, K.; Chmielewski, F.-M. (2010): *CHARIKO, Klimawandel in Hessen, 2. Zwischenbericht*, Forschungsvorhaben INKLIM-A, Fachzentrum Klimawandel Hessen, 19 S. (Seite 41).

- Blümel, K.; Chmielewski, F.-M. (2012): Shortcomings of classical phenological forcing models and a way to overcome them. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164, 10–19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.001> (Seite 90, 93, 534, 535 und 536).
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2011): Anbau, Ertrag und Ernte von Obst. <http://berichte.bmelv-statistik.de/SJT-3081400-0000.pdf> (Seite 159).
- Brunt, D. (1939): Physical and Dynamical Meteorology, 2nd Ed., *Cambridge University Press*, New York, 428 S. (Seite 110).
- Brutsaert, W. (1982): *Evaporation into the Atmosphere*, D. Reidel, 299 S. (Seite 130).
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2011), BLE-Marktbericht Obst und Gemüse 30 vom 2. August 2011: http://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/01_Markt/09_Marktbeobachtung/05_ObstGemuese/Wochenbericht_2011_30.html (Seite 180).
- Caffarra, A.; Donnelly, A.; Chuine, I. (2011): Modelling the timing of *Betula pubescens* budburst. II. Integrating complex effects of photoperiod into process-based models. *Climate Research*, Vol. 46, 159-170. (Seite 71 und 85).
- Caffarra, A.; Zottele, F.; O'Neill, B.; Gleeson, E.; Donnelly, A. (2012): *Spatial heterogeneity in the timing of birch bud burst in response to future climate warming in Ireland*. Phenology 2012, Milwaukee, Wisconsin, USA 10-13 September. Book of abstracts, 20. (Seite 85).
- Cannell, M. G. R.; Smith, R. I. (1983): Thermal Time, Chill Days and Prediction of Budburst in *Picea sitchensis*. In: *Journal of Applied Ecology* vol. 20, Nr. 3, 951-963. (Seite 58).
- CENTURY 4.0, 1993: <http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/> (Seite 146).
- Chmielewski, F.-M.; Blümel, K.; Henniges, Y.; Müller, A.; Weber, R.W.S. (2009 a): *Klimawandel und Obstbau in Deutschland (KliO)*, Abschlussbericht, BMBF-Verbundprojekt unter Koordination der Humboldt-Universität Berlin, Förderkennzeichen 01LS05024, 239 S. <http://www.agrar.hu-berlin.de/fakultaet/departments/dntw/agrarmet/forschung/fp/AB-HU.pdf> (Seite 15, 27, 29, 52, 56, 61, 89, 120, 122, 124, 125, 128, 128, 133, 133, 143, 143, 145 und 155).
- Chmielewski, F.-M.; Blümel, K.; Henniges, Y.; Müller, A.; Weber, R.W.S. (2009 b): *Klimawandel: Chancen, Risiken und Kosten für den deutschen Obstbau*. In: Mahammadzadeh, M.; Biebeler, H.; Bardt, H. (Hrsg.): *Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen - Strategien, Maßnahmen und Anwendungsbeispiele*, Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Medien GmbH, 279-286. (Seite 12).
- Chmielewski, F.-M.; Blümel, K.; Scherbaum-Heberer, C.; Koppmann-Rumpf, B.; Schmidt; K-H. (2013): A model approach to project the start of egg laying of great tit (*Parus major*) due to climate change. *Int. J. Biometeorol.*, Volume 57, Issue 2, pp 287-297. DOI: 10.1007/s00484-012-0553-7 (<http://dx.doi.org/10.1007/s00484-012-0553-7>) (Seite 90).

- Chmielewski, F.-M.; Blümel, K.; Ivana Páleošvá (2013): Climate change and timing of dormancy release for fruit crops in Germany. *Climate Research*. In press. DOI: 10.3354/cr01115 (Seite 199 und 200).
- Chmielewski, F. M.; Blümel, K. (2013): Klimawandel und Obstbau. *promet* 38, 1/2, Deutscher Wetterdienst (Selbstverlag) Offenbach, 32-41. (Seite 11 und 287).
- Chuine, I.; Cour, P.; Rousseau, D. D. (1998): Fitting models predicting dates of flowering of temperate-zone trees using simulated annealing *Plant, Cell and Environment* 21, 455-466. (Seite 89).
- CORINE Land Cover 2000: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database> (Seite 55).
- CORINE Land Cover 2006: <http://sia.eionet.europa.eu/CLC2006/> (Seite 55).
- Darbyshire, R.; Webb, L.; Goodwin, I.; Barlowa, S. (2011): Winter chilling trends for deciduous fruit trees in Australia. *Agric. for Meteorol.* 151, 1074-1085. (Seite 199).
- Davis, R. L. (1978): A topoclimatic classification to map spring frost risk for six deciduous tree fruit varieties. *Atmosphere-Ocean*, 16:2, 169-176. (Seite 115).
- Deardorff, J. W. (1977): A Parameterization of Ground-Surface Moisture Content for Use in Atmospheric Prediction Models. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 16, 1182-1185. (Seite 129).
- Deardorff, J. W. (1978): Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture, With Inclusion of a Layer of Vegetation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, No. C4, 1889-1903. (Seite 129).
- Dennis, F. G. (2003): Problems in standardizing methods for evaluating the chilling requirements for the breaking of dormancy in buds of woody plants. *HortScience*, 38: 347-350. (Seite 199).
- Deutscher Wetterdienst (2003): GAW Brief des Deutschen Wetterdienstes, Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg 19, 1-2. (Seite 146).
- Donnelly, A.; Caffarra, A.; Kelleher, C. T.; O'Neill, B. F.; Diskin, E.; Pletsers, A.; Proctor, H.; Stirnemann, R.; O'Halloran, J.; Peñuelas, J.; Hodkinson, T. R.; Sparks, T. H. (2012): Surviving in a warmer world: environmental and genetic responses. *Clim. Res.* 53, 245-262. (Seite 87).
- Eggert, F.P. (1951): A study of rest varieties of apple and in other fruit species grown in New York State. *Proceeding Journal of the American Society for Horticultural Science* 51, 169-178. (Seite 60).
- Ehret, U.; Zehe, E.; Wulfmeyer, V.; Warrach-Sagi, K.; Liebert, J. (2012): HESS Opinions "Should we apply bias correction to global and regional climate model data?" *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9, 5355-5387 (Seite 35).
- Eimern, v. J.; Häckel, H. (1979): Wetter- und Klimakunde für Landwirte, Gärtner, Winzer und Landschaftspfleger. Ein Lehrbuch der Agrarmeteorologie, 3. Aufl., Eugen Ulmer, Stuttgart, 269 S. (Seite 115).

- Fishman, S.; Erez, A.; Couvillon, G.A. (1987): The Temperature Dependence of Dormancy Breaking in Plants: Mathematical Analysis of a Two-Step Model Involving a Cooperative Transition, *J. theor. Biol.* 124, 473-483. (Seite 60 und 199).
- Friesland, H. (1998): BIENE. Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Forschung, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig (persönlicher Austausch). (Seite 143).
- Fyfe, J. C.; Gillett, P.; Zwiers, F. W. (2013): *Overestimated global warming over the past 20 years*. *Nature Climate Change*, Vol. 3, 767–769. doi:10.1038/nclimate1972. <http://www.nature.com/nclimate/journal/v3/n9/full/nclimate1972.html> und <http://www.see.ed.ac.uk/~shs/Climate%20change/Climate%20model%20results/over%20estimate.pdf> und <http://www.foxnews.com/science/2013/09/12/climate-models-wildly-overestimated-global-warming-study-finds/> (Seite 286).
- Galletta, G. J.; Himelrick, D. G. (1990): *Small Fruit Crop Management*, Prentice Hall. (Seite 116 und 116).
- Garratt, J. R.; Hicks, B. B. (1973): Momentum, heat, and water vapour transfer to and from natural and artificial surfaces. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 99, 680–687. (Seite 130).
- Görgens, M.; Weber R.W.S. (2009): *Klimawandel und Obstbau in Deutschland*. Projekt KliO. Abschlussbericht des Teilprojektes der OVA Jork, Selbstverlag, 52 S. (Seite 120).
- Häkkinen, R.; Linkosalo, T.; Hari, P. (1998): Effects of dormancy and environmental factors on timing of bud burst in *Betula pendula*. *Tree Physiology* vol. 18, Nr. 10, 707–712. (Seite 84).
- Harrington, C. A.; Gould, P. J.; St. Clair, J. B (2010): Modeling the effects of winter environment on dormancy release of Douglas-fir *Forest Ecology and Management* 259, 798–808. (Seite 89 und 89).
- Harzer, U. (2006): *Apfelwickler: neue Erkenntnisse zur Phänologie, Populationsdynamik und Bekämpfung*. Handbuch zum Seminar, DLR Rheinland-Pfalz 20. Nov. 2006. (Seite 121).
- Held, L. (2008): *Methoden der statistischen Inferenz, Likelihood and Bayes*, Spektrum Akademischer Verlag, 304 S. (Seite 81, 105 und 519).
- Hessischer Bauernverband (2010): http://www.agrar-presseportal.de/web/agrar_presseportal_nachricht.php?id_S=5996&S_SF=1 (Seite 57).
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2009), Jahresagrarbericht 2009, S. 71 und folgende Jahresberichte: http://www.hmuenv.hessen.de/irj/HMULV_Internet?cid=8527e1d18ef246c2c1d4d79017bb47ec (Seite 56 und 57).
- Hessisches Statistisches Landesamt (2011): <http://www.statistik-hessen.de/themenauswahl/landwirtschaft/landesdaten/pflanzliche-produktion/baumobstanbauende-betriebe-mit-verkaufsanbau-in-hessen/index.html> (Seite 56).

- Hessisches Statistisches Landesamt (2012), Baumobstanbauerhebung: <http://www.statistik-hessen.de/publikationen/download/160/index.html> (Seite 57, 180 und 180).
- Hessisches Statistisches Landesamt (2013): Ertrag und Ernte ausgewählter Obstarten im Marktoftbau in Hessen 2007 bis 2011. <http://www.statistik-hessen.de/themenauswahl/landwirtschaft/landesdaten/pflanzliche-produktion/ertrag-und-ernte-ausgewaehlter-obstarten-im-marktoftbau/index.html> (Seite 159).
- Hunter, A. F.; Lechowicz, M. J. (1992): Predicting the timing of budburst in temperate trees. *Journal of Applied Ecology* vol. 29, 597-604. (Seite 85).
- IPCC (2007): *IPCC Fourth Assessment Report (AR4), Climate Change 2007, WG I*. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. <http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC2007-WG1.pdf> (Seite 4 und 284).
- Jacob, H. B.; Koch, M. (2005): *Folgen, Maßnahmen und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen*. Forschungsanstalt Geisenheim - Fachgebiet Obstbau. Abschlussbericht im Rahmen des Integrierten Klimaschutzprogramms Hessen 2012 Baustein II Klimawandel und Klimafolgen in Hessen - Bereich Landwirtschaft, Sonderkultur Obstbau, 128 S <http://klimawandel.hlug.de/fileadmin/dokumente/klima/inklim/endberichte/obstbau.pdf> (Seite 180 und 180).
- Kimball, B. A. (1983): Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agronomy Journal* 75:779-788. (Seite 146).
- Kirkham, M. B. (2011): *Elevated Carbon Dioxide Impacts on Soil and Plant Water Relations*, CRC Press 2011, p. 147–174, Print ISBN: 978-1-4398-5504-1. (Seite 147).
- Klimafakten.de (2012): *Die Folgen des Klimawandels sind nicht (so) schlimm*. Weitere Referenzen findet man auch folgender Webseite: <http://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-co2-ist-ein-pflanzenduenger-und-kein-schadstoff> (Seite 148).
- Körner, C. (2006): Significance of Temperature in Plant Life. *Plant growth and climate change* Blackwell Publishing Ltd, 48-69. (Seite 84).
- Körner, C.; Basler, D. (2010): Phenology Under Global Warming. *Science* vol. 327, Nr. 5972, 1461 -1462. (Seite 85).
- Kosaka, Y.; Xie, S.-P. (2013): Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature* 2013/08/28/online. <http://dx.doi.org/10.1038/nature12534> (Seite 286).
- Kreienkamp, F.; Spekat, A.; Enke, W. (2010): *Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010*, Bericht, Fassung vom 24. August 2010, CEC Potsdam: http://www.anpassung.net/cln_110/nn_1472172/SharedDocs/Downloads/DE/Transwetterlagen___Abschlussbericht,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Transwetterlagen___Abschlussbericht.pdf (Seite 43).

- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Fachbereich 3: Immissionsschutz, Klimaschutz (2008): Klimagas Kohlendioxid; CO₂-Konzentration an der Landesmessstation auf dem Brocken 2000–2008 2, 1-13. (Seite 146).
- Lange, H.-J. (2010): *Die Physik des Wetters und des Klimas. Ein Grundkurs zur Theorie des Systems Atmosphäre*. Ehemals Reimer-Verlag, nun freies E-Book, 625 S. http://hajolange.de/_Kap.08%20Klima%20und%20Klimatheorien.pdf oder <http://hajolange.de/index.html#Linksammlungen> (Seite 285, 285 und 286).
- Lange, H.-J. (2012): Zur Bedeutung der theoretischen Meteorologie und Klimatologie bei der Erforschung der Atmosphäre und bei der Beurteilung von Geoengineering-Maßnahmen. Linksammlung “*Meine Essays (Betrachtungen, Abhandlungen, Erläuterungen)*” http://hajolange.de/Essay_Was%20ist%20TM.html (Seite 286).
- Laube, J.; Sparks, T. H.; Menzel, A. (2012): *Does life-strategy matter in springtime? Phenology 2012*, Milwaukee, Wisconsin, USA 10-13 September. Book of abstracts, 55. (Seite 85).
- Linkosalo, T.; Häkkinen, R.; Hänninen, Heikki (2006): Models of the spring phenology of boreal and temperate trees: is there something missing? *Tree Physiology*, Vol. 26, Nr. 9, 1165 -1172. (Seite 84).
- Linsley-Noakes, G.; Louw, M; Allan, P. (1995): Estimating daily positive Utah chill units using daily maximum and minimum temperatures. *J. S. Afr. Soc. Hortic. Sci.* 5, 19-22. (Seite 59, 60, 98 und 144).
- Linville, D. E. (1990): Calculating chilling hours and chill units from daily maximum and minimum temperature observations. *Hortscience* 25(1):14–16. (Seite 59, 98, 122 und 144).
- Luedeling, E.; Zhang, M.; Luedeling, V.; Girvetz, E. H. (2009): Sensitivity of winter chill models for fruit and nut trees to climatic changes expected in California’s Central Valley. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133, 23–31. (Seite 60).
- Luedeling, E.; Kunz, A.; Blanke, M. M. (2012): Identification of chilling and heat requirements of cherry trees - a statistical approach. *Int. J. Biometeorol.*, Open Access. DOI 10.1007/s00484-012-0594-y (<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00484-012-0594-y>) (Seite 62).
- Lüers, J.; Smaczny, J.; Kies, A.; Bareiss, J. (2006): Dynamik der Austauschprozesse von CO₂ und Radon zwischen Waldboden, Waldbestand und Atmosphäre. *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg* 16, 147-152. (Seite 146).
- Mahfouf, J. F.; Noilhan, J. (1991): Comparative Study of Various Formulations of Evaporation from Bare Soil Using In Situ Data. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 30, 1354-1365. (Seite 129).
- Maraun, D.; Wetterhall, F.; Ireson, A. M.; Chandler, R. E.; Kendon, E. J.; Widmann, M.; Brienen, S.; Rust, H. W.; Sauter, T.; Themeßl, M.; Venema, V. K. C.; Chun, K. P.; Goodess, C. M.; Jones, R. G.; Onof, C.; Vrac, M.; Thiele-Eich, I. (2010): Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between

- dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48, RG3003, 34pp. (Seite 35).
- Matzneller, P.; Chmielewski, F.-M.; Blümel, K.; Hilsendegen, P. (2011): *EMS Annual Meeting Abstracts* Vol. 8, EMS2011-363, 2011 11th EMS / 10th ECAM. (Seite 90).
- Matzneller, P.; Blümel, K.; Chmielewski, F.-M. (2013): Models for the beginning of sour cherry blossom. *Int. J. Biometeorol.*, in press. DOI 10.1007/s00484-013-0651-1. (<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00484-013-0651-1>) (Seite 90).
- Moutinho-Pereira, J.; Gonçalves, B.; Bacelar, E.; Boaventura Cunha, J.; Coutinho, J.; Correia, C. M. (2009): Effects of elevated CO₂ on grapevine (*Vitis vinifera* L.): Physiological and yield attributes *Vitis* 48 (4), 159–165. <http://www.co2science.org/articles/V14/N7/B3.php> (Seite 147).
- Motulsky, H.; Christopoulos, A. (2003): *Fitting Models to Biological Data Using Linear and Nonlinear Regression: A Practical Guide to Curve Fitting*. 1. ed.: Oxford University Press, USA, 351 S. ISBN 9780195171808. (Seite 93).
- Murray, M. B.; Cannell, G. R.; Smith, R. I. (1989): Date of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming. *J. Appl. Ecol.* 26, 693-700. (Seite 89).
- Nakicenovic, N.; Alcamo, J.; Davis, G.; de Vries, B.; Fenham, J.; Gaffin, S.; Gregory, K.; Grübler, A.; Jung, T. Y.; Kram, T.; La Rovere, E. L.; Michaelis, L.; Mori, S.; Morita, T.; Pepper, W.; Pitcher, H.; Price, L.; Raihi, K.; Roehrl, A.; Rogner, H. H.; Sankovski, A.; Schlesinger, M.; Shukla, P.; Smith, S.; Swart, R.; van Rooijen, S.; Victor, N.; Dadi, Z. (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm> (Seite 4).
- Palm, G.; Hauschildt, H. (2006): Integrierte Bekämpfung des Apfelwicklers (*Cydia pomonella*). *Mitteilungen des Obstbauversuchsringes des Alten Landes* 61: 167-173. (Seite 121).
- Pérez, F. J.; Ormeño, N. J.; Reynaert, B.; Rubio, S. (2008): Use of the dynamic model for the assessment of winter chilling in a temperate and subtropical climatic zone of Chile. *Chil. J. Agr. Res.* 68, 198-206. (Seite 199).
- Perry, K. B.; Poling, E. B. (1986): Field observation of frost injury in strawberry buds and blossoms. *Adv. Strawberry Prod.* 5, 31-38. (Seite 116).
- Poling, E.B.; Krewer, G.; Smith, J. P. (2005): Southeast Regional Strawberry Plasticulture Production Guide. <http://www.smallfruits.org/SmallFruitsRegGuide/index.htm> (Seite 115).
- Proebsting Jr., E. L.; Mills, H. H. (1978): Low Temperature Resistance of Developing Flower Buds of Six Deciduous Fruit Species. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 103(2), 192-198. (Seite 115).
- Reichstein, M.; Luo, Y.; Moreno, J. M.; Rustad, L.; Williams, C.; Bahn, M. (2013): Climate extremes and biogeochemical cycles in the terrestrial biosphere: impacts and feedbacks across scales. *Biogeosciences – Special Issues*, in press. <http://www.biogeosciences->

- discuss.net/special_issue120.html (siehe auch <http://www.carbo-extreme.eu/index.php/Main/HomePage>) (Seite 282 und 286).
- Richardson, A. D., et al. (2012): Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: Results from the North American Carbon Program Site Synthesis, *Global Change Biol.* 18(2), 566–584. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02562.x. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2011.02562.x/abstract> (Seite 283).
- Richardson, A. D., et al. (2013): Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system, *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 156–173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012> (Seite 283).
- Roeckner, E.; Bäuml, G.; Bonaventura, L.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kirchner, I.; Kornblueh, L.; Manzini, E.; Rhodin, A.; Schlese, U.; Schulzweida, U.; Tompkins, A. (2003): *The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description*. MPI-Report No. 349, 127 S. http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/max_scirep_349.pdf (Seite 19).
- Roeckner, E.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kornblueh, L.; Manzini, E.; Schlese, U.; Schulzweida, U. (2004): *The atmospheric general circulation model ECHAM5 Part II: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution*. MPI-Report No. 354, 56 S. http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/max_scirep_354.pdf (Seite 19).
- Sachs, L.; Hedderich, J. (2006): *Angewandte Statistik, Methodensammlung mit R*, 12. Auflage, Springer, 702 S. ISBN 13: 978-3-540-32160-6. (Seite 48).
- Schaber, J.; Badeck, F.-W. (2002): Evaluation of methods for the combination of phenological time series and outlier detection. *Tree Physiology* vol. 22, Nr. 14, 973-982. (Seite 84).
- Schuchardt, . B; Wittig, S. (2010): *Projizierte Klimaänderungen für die Bremer Region. Studie im Rahmen des Fachkonzepts Klimaanpassung*. BIOCONSULT, Schuchardt & Scholle GbR, Reeder-Bischoff-Str. 54, 28757 Bremen, (Auftraggeber: Der Senator für Umwelt, Verkehr, Bau und Europa (SUBVE) Bremen), 45 S. http://www.umwelt.bremen.de/sixcms/media.php/13/Klimaprojektionen_Bremer_Region.pdf (Seite 4, 5, 20 und 146).
- Shaffer, J. P. (1995): Multiple Hypothesis Testing. *Annu. Rev. Psychol.* vol. 46, 561-584. (Seite 293).
- Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (2012): Land- Forstwirtschaft, Fischerei; Wachstum und Ernte -Obst-, 2011. DESTATIS “wissen.nutzen”. Fachserie 3, Reihe 3.2.1. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/ErnteObst/ObstJahr2030321117144.pdf?__blob=publicationFile (Seite 159).
- Statistisches Landesamt Freistaat Sachsen (2011): Statistischer Bericht; Bodennutzung und Ernte im Freistaat Sachsen. CII2-j/11. http://www.statistik.sachsen.de/download/100_Berichte-C/C_II_2_j11.pdf (Seite 159).

- Steeneveld, G. J.; van de Wiel, B. J. H.; Holtslag, A. A. M. (2006): Modeling the Evolution of the Atmospheric Boundary Layer Coupled to the Land Surface for Three Contrasting Nights in CASES-99. *J. Atmos. Sci.* 63, 920-935. (Seite 109 und 111).
- Stenitzer, E. (1988): *SIMWASER - Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes*, Mitteilungen aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen, Nummer 31, 203 S. (Seite 123, 125 und 137).
- von Storch, H.; Zwiers, F. W. (2008): *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, 484 S. (Seite 81 und 283).
- Streitfert, A. (2005): *Einfluss steigender Temperaturen und CO₂-Konzentrationen auf Pflanzenphänologie und -anatomie*. Diplomarbeit im Fachbereich Biologie, Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen, 88 S. <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2006/2828/> (Seite 148).
- Taubenheim, J. (1969): *Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten*, Geophysikalische Monographien, Band 5, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., 384 S. (Seite 25).
- Utah Pests fact sheet (2010), published by Utah state University Extension and Utah Plant Pest Diagnostic Laboratory, ENT-13-06, June 2010, 7 p. <http://extension.usu.edu/files/publications/factsheet/codling-moths06.pdf> (Seite 120).
- Verhoef, A.; De Bruin, H. A. R.; Van Den Hurk, B. J. J. M. (1997): Some Practical Notes on the Parameter kB^{-1} for Sparse Vegetation. *J. Appl. Meteor.* 36, 560–572. (Seite 130 und 131).
- Wackernagel, H. (1998): *Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 291 pp. (Seite 27).
- Wechsung, F.; Gerstengarbe, F.-W.; Lasch, P.; Lüttger, A. (2008): *Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel*, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK), 95 S. http://www.glowa-elbe.de/pdf/bvvg/od_klima_ertraege.pdf (Seite 148).
- Weinberger, J. H. (1950): Chilling requirements of peach varieties, *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 56, 122–128. (Seite 60).
- Welch, B. L. (1947): The generalization of “Student’s” problem when several different population variances are involved, *Biometrika* 34 (1–2), 28–35. (Seite 48).
- Wilks, D. S (2006): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 2nd Edition, Elsevier, Academic Press, 627 S. ISBN 13: 978-0-12-751966-1. (Seite 105, 106, 118 und 283).
- Yang, K.; Koike, T.; Ishikawa, H.; Kim, J.; Li, X.; Liu, H.; Liu, S.; Ma, Y.; Wang, J. (2008): Turbulent Flux Transfer over Bare-Soil Surfaces: Characteristics and Parameterization. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 47, 276–290. (Seite 131).

Stichwortverzeichnis

Hier folgt ein kurzes, unvollständiges Stichwortverzeichnis, welches nur einige Begriffe enthält, die wahrscheinlich nicht jedem Leser geläufig sind. Leser der elektronischen Form dieses Berichts können auch die Suchfunktion ihres pdf-Readers benutzen.

- ΔTM , 160
- β -Formulierung, 131
- γ -Methode, 131
- kB^{-1} , 130
- 1 h-Werte, *siehe* Stundenwerte
- A1B, 4, 20
- AICc, 86
- ArcView, 155
- ASEVAP, 131
- ATRANS, 132
- Autokorrelationsfunktion, 24, 26, 526
- Bartel'sche äquivalente Erhaltungszahl, 25
- BATS, 19
- BEDECK, 156
- BIAS-Korrektur, 35
- Biosphären-Modelle, 283
- BN_ID, 155
- Bonferroni Methode, 293
- C20, 4, 20
- Chilling, 58
- Chilling-Forcing-Modelle, 59
- Chilling-Requirement, 7
- CLM, 19
- C^* =Chilling-Requirement, 59
- DAYLENGTH-Term, 81
- Dormanzschäden, 7
- DOY, 59
- d_{rel} =relatives Chilling-Defizit, 99
- ECHAM5, 19
- ECLM, 12
- ELCM, 24
- Erwartungsbereich, 49
- Evidence Ratio, 86
- Exposition, 140
- Feldkapazität ($FC \equiv FK$), 123, 141, 151
- Feldkapazität, nutzbare ($(FC - WP) \equiv nFK$), 151
- Feldkapazität, relative nutzbare ($WREL \equiv \%nFK$), 123, 141
- Forcing, 58
- FROSTSCHADENSROBx, 118
- g-g-Strategie, 175
- g-Strategie, 173
- GCM, 12
- GDD-Modell, 58
- GEP, 283
- Gesamtporenvolumen (GPV), 125
- HadCM3-CLM, 19
- Hangneigung, 140
- HCLM, 12
- Hessenrechteck, 15
- HLUG (Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie), 123
- HLUG-Rasterpunkte, 155
- Holm's Sequentially-Rejective Bonferroni Method, 293
- hydraulische Konduktivität, 126, 157
- Impaktmodelle, 4
- K_{ges} , 170
- K_j , 170
- KK, 175
- KKA, 177
- KliO, 56
- Kohlmeise, 90
- Konfidenzintervall, 44–49, 282
- Kontrolllauf, 4
- Korrelation, 50–55

- Kriging, *siehe* Universal Kriging
 Ku-Kurve, 126, 157
- LAI, 283
 Land Surface Scheme (LSS), 19
 Leaf Area Index, 283
 Linsley, *siehe* Stundenwerte
 Linvill, *siehe* Stundenwerte
 LSS, *siehe* Land Surface Scheme
- m-g-Strategie, 175
 m-m-Strategie, 175
 m-o-Strategie, 175
 m-Strategie, 174
MaxWert, 171
 Messwerte, 14
 Glob=Globalstrahlung, 21
 R=Tagessumme Niederschlag, 14
 Sd=Sonnenscheindauer, 14
 T=Tagesmitteltemperatur, 14
 Tn=Tagesminimumtemperatur, 14
 Tx=Tagesmaximumtemperatur, 14
 *V*₁₀=Windgeschwindigkeit, 14, 28, 186
 CLCT=Gesamtbedeckungsgrad, 21
 DPREC=Drifted Total Precipitation, 21
 PRECIPTOT=Tagessumme Niederschlag, 14
 Rel2=Relative Luftfeuchte, 18
 Tdew=Taupunkttemperatur, 21
 Vmax=Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit, 14
 e=Dampfdruck, 14
 ps=Tagesmittelwert des Luftdrucks am Boden, 14
- Mutungsbereich, 49
- NCAR, 19
 Nesting, 19
 NHN, 21
 NoReleaseProbx, 98
 nutzbare Feldkapazität, *siehe* Feldkapazität
- o-o-Strategie, 175
 o-Strategie, 173
 odd-even-Methode, 61
- OVA, 114
- p-Wert, 282
P_D, 98
 Penetrometerwiderstand, 126
 pF-Kurve, 126, 157
 phänologische Gärten, 288
 Porenvolumen, *siehe* Gesamtporenvolumen, 125
- PSEVAP, 131
 PTRANS, 131
- Quantile Mapping, 35
- RCM, 12
 relative Feuchte, 18
 Relative Likelihood, 86
 relative nutzbare Feldkapazität, *siehe* Feldkapazität
- REMO-UBA, 19
 Rentabilität, 172
 RUBA, 12, 24
- S-Zeitraum, 103
 Sättigungsdampfdruck, 17
s_A, 163
S_c(t_s)=Chilling-Summe, 59
 Scaling, 35
 Score-Intervall, 105, 519
s_D, 163
 Sea Ice, 19
 Sea Surface Temperature, 19
 SEVAP, 131
s_F, 163
s_{ges}, 166
 signifikant, 282
 SRES, 4
ss_j, 166
 Stundenwerte, 98, 122, 144
s_Y, 160, 163
- Tafelobst, 171
 TERRA, 19
TM, 137, 160
- Universal Kriging, 27, 31, 34
- VEG3D, 19
 Verwertungsobst, 171

Wassergehalt (W), [126](#)
Wasserleitung, [126](#)
Wasserleitungsgleichung, [157](#)
Wasserpotential, [126](#), [157](#)
Welkepunkt (WP), [141](#), [151](#)

WETTR, [12](#)
WETTR0, [22](#)
WETTR9, [22](#)
WETTREG2010, [21–27](#)
Zufallsbereich, [49](#)