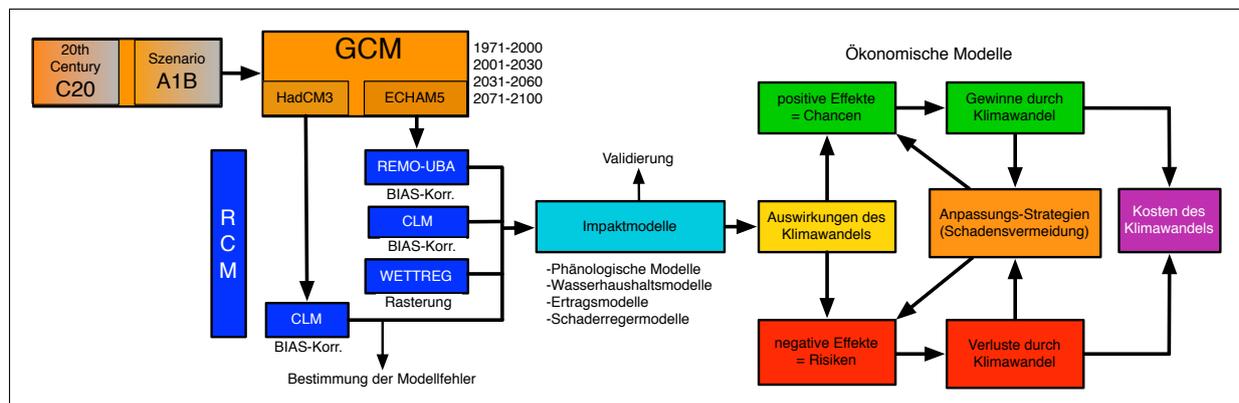


Klimawandel in Hessen

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

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

Inhaltsverzeichnis

Gliederung	iii
Abkürzungsverzeichnis	vi
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xiv
1 Vorwort	1
2 Zusammenfassung	3
3 Einleitung und Zielstellung	8
4 Methodischer Ansatz	11
4.1 Daten	12
4.2 Konfidenzintervalle für die Mittelwerte über verschiedene Klimamodelle	16
4.3 Bestimmung der Obstanbaugebiete in Hessen	17
4.4 Verbesserungen der phänologischen Modelle	17
4.5 Brechung der Dormanz	20
4.6 Bestimmung von Frostschäden im Obstbau	21
4.7 Schädlinge und Nützlinge im Obstbau	22
4.7.1 Berechnung des Apfelwicklergenerationsindizes und der Apfelwicklerschäden	22
4.7.2 Berechnung der mittleren Bienenflugintensität	24
4.8 Ertragberechnungen mit SIMWASER	24
4.9 Berechnung des klimabedingten Gesamtschadens	27
4.10 Berechnung der Kosten des Klimawandels für den Obstbau	28
4.11 Worst Case Szenarios	31
5 Wesentliche Ergebnisse	33
5.1 Mögliche klimatische Veränderungen in Hessen	33
5.2 Veränderungen in der Phänologie	39
5.2.1 Veränderungen im Blühbeginn, der Blühdauer und im Ende der Winterruhe	39
5.2.2 Veränderungen im Beginn der Pflückreife und Reifeperiodenlänge	44
5.2.3 Phänotypische Plastizität	48
5.3 Gefahr für unvollständige Brechung der Dormanz und Dormanzschaden	50
5.3.1 Chillingsumme $S_c(t_s)$ bis zum Stichtag t_s	51
5.3.2 Dormanzbrechungstermin t_1	52
5.3.3 Dormanzschaden s_D^o ohne und s_D^m mit Gegenmaßnahmen	53
5.3.4 Zusammenfassung	54

5.4	Veränderungen in der Gefahr von Spätfrost	55
5.4.1	Frostschäden	55
5.4.2	Wahrscheinlichkeiten für Frostschäden	58
5.4.3	Zusammenfassung	58
5.5	Veränderungen in der Aktivität der Schädlinge und Nützlinge im Obstbau	60
5.5.1	Veränderungen bei den durch den Apfelwickler hervorgerufenen Schäden	60
5.5.2	Veränderungen in der Bienenflugintensität	62
5.6	Veränderungen im Wasserhaushalt und bei den Fruchterträgen	65
5.7	Schäden und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen	72
5.7.1	Geordnete Schäden und Gesamtschäden	72
5.7.2	Rentabilität und Kosten	84
5.7.2.1	Rentabilität der Maßnahmen bzw. Strategien	84
5.7.2.2	Die Kosten des Klimawandels	90
6	Diskussion	100
6.1	Unsicherheiten bei den phänologischen Modellen	102
6.2	Unsicherheiten bei den Klimamodellen	102
6.3	Unsicherheiten bei den Impaktmodellen	103
6.4	Konsequenzen	104
7	Offene Fragen und Ausblick	106
	Anhang	108
	Anhang A Modellübersicht	109
	Anhang B Mögliche klimatische Veränderungen in Hessen	110
	Anhang C Ergebnisse für den Blühbeginn	115
	Anhang D Ergebnisse für die Blühdauer	118
	Anhang E Ergebnisse für den Beginn der Pflückreife	121
	Anhang F Ergebnisse für die Länge der Reifeperiode	126
	Anhang G Frostergebnisse	129
	G.1 FROSTSCHADEN	129
	G.2 FROSTSCHADENSPROB0	130
	Anhang H Ergebnisse für Schädlinge und Nützlinge im Obstbau	132
	H.1 Apfelwicklerergebnisse	132
	H.2 Ergebnisse für die Bienenflugintensität	136
	Anhang I Ergebnisse des Modells SIMWASER	138
	I.1 Feuchtmassenertrag	138
	I.2 Ertragsschaden ohne Sommerberegung	141
	I.3 Ertragsschaden mit Sommerberegung	144

I.4	Bewässerungsmenge	147
I.5	Transpirationsmenge	150
Anhang J Schäden und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen		153
J.1	Gesamtschäden	153
J.1.1	Tabellen	153
J.1.2	Bilder	157
J.2	Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels (flächenspezifisch)	161
J.2.1	Tabellen	161
J.2.1.1	30-jährige Mittelwerte und Differenzen	161
J.2.2	Bilder	165
J.2.2.1	30-jährige Mittelwerte bzw. Differenzen	165
J.2.2.2	Jährlicher Verlauf der Kosten	169
J.2.2.3	Aufsummierte (akkumulierte) Kosten	173
Literaturverzeichnis		175
Stichwortverzeichnis		179

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 179, in dem auch ausführlichere “Seitenverweise” zu finden sind.

ΔTM	Jährlicher oberirdischer Trockenmassenzuwachs	26
A1B	SRES Szenario A1B (2001–2100)	12
C*	Chilling-Requirement	20
C20	Kontrolllauf C20 (1960–2000)	12
DAYLENGTH-Term	Term in der Forcing-Funktion der verbesserten phänologischen Modelle, welcher den Einfluss der Tageslänge berücksichtigt	4
DOY	Day Of Year	20
d_{rel}	Relatives Chilling-Defizit	20
e	Dampfdruck des Wasserdampfs	12
ECLM	Regionales dynamisches Klimamodell ECHAM5-CLM	9
GCM	Global Climate Model oder General Circulation Model	9
<i>Glob</i>	Globalstrahlung	12
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	29
g-g-Strategie	Schadensvermeidungsstrategie: g-Strategie heute (1971–2000) und in der Zukunft (2001–2100)	6
HCLM	Regionales Klimamodell HadCM3-CLM	9
Hessenrechteck	Rechteckiger Ausschnitt, der Hessen enthält, und für den die meisten Rechnungen durchgeführt wurden (siehe Abb. 4.2)	12
HLUG	Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie	
K_{ges}	Gesamtkosten für Gegenmaßnahmen (ohne die Kosten durch die Schäden)	28

K_j	Kosten der Maßnahmen gegen Schadensursache j ; $j \in \{\text{Dormanz, Frost, Apfelwickler, Yield}\}$	28
KK	Flächenspezifische Gesamtkosten des Klimawandels für den Obstbau (in € pro Hektar und Jahr; siehe Formel (4.8)).....	31
KKa	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).....	97
LB	Langbericht (im Internet erhältlich).....	1
Max Wert	Maximaler Verkaufswert eines Produkts (der Jahresproduktion) (in € pro Hektar und Jahr).....	28
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.....	29
m-g-Strategie	Schadensvermeidungsstrategie: g-Strategie heute (1971–2000) und m-Strategie in der Zukunft (2001–2100).....	6
m-m-Strategie	Schadensvermeidungsstrategie: m-Strategie heute (1971–2000) und in der Zukunft (2001–2100).....	82
m-o-Strategie	Schadensvermeidungsstrategie: o-Strategie heute (1971–2000) und m-Strategie in der Zukunft (2001–2100).....	82
NoReleaseProbx	Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Dormanz bis zu einem Stichtag x (in DOY) im Jahr noch nicht gebrochen ist.....	20
o-Strategie	Keine (ohne) Schadensvermeidung: Es wird keinerlei Schadensbekämpfung durchgeführt, weder heute noch in der Zukunft.....	29
o-o-Strategie	Schadensvermeidungsstrategie: o-Strategie heute (1971–2000) und in der Zukunft (2001–2100).....	82
OVA	Obstbauversuchsanstalt der LWK Niedersachsen.....	22
P_D	Identisch mit NoReleaseProbx.....	20
ps	Luftdruck am Boden.....	12
R	Niederschlagssumme.....	12
RCM	Regional Climate Model.....	9
Rel2	Relative Luftfeuchte.....	12
RUBA	Regionales Klimamodell REMO-UBA.....	9

$S_c(t_s)$	Chilling-Summe bis zum Stichtag t_s	20
Sd	Sonnenscheindauer.....	12
SRES	S pecial R eport on E missions S cenarios.....	3
s_A	Schaden durch den Apfelwickler.....	27
s_D	Schaden durch Nichtbrechung der Dormanz.....	27
s_F	Frostschaden.....	27
s_{ges}	Gesamtschaden durch Nichtbrechung der Dormanz, Frost, Apfelwickler und Trockenheit etc.....	27
ss_j	“Geordneter” Yieldschaden.....	27
s_Y	Yieldschaden.....	27
T	Tagesmitteltemperatur.....	12
<i>Tdew</i>	Taupunkttemperatur.....	12
<i>TM</i>	Oberirdische Trockenmasse.....	26
Tn	Tagesminimumtemperatur.....	12
Tx	Tagesmaximumtemperatur.....	12
V_{10}	10 m-Windgeschwindigkeit.....	12
WETTR	Regionales statistisches Klimamodell WETTREG-2010.....	9
WETTR0	Lauf 0 des Regionalen Klimamodells WETTREG-2010.....	17
WETTR1	Lauf 1 des Regionalen Klimamodells WETTREG-2010.....	17

Abbildungsverzeichnis

3.1	Ablauf der in INKLIM-A geplanten Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels im Obst- und Weinbau	9
3.2	Chancen und Risiken des Klimawandels im Obst- und Weinbau	10
4.1	Arbeitsschritte und sich daraus ergebende Ergebnisse im Projekt CHARIKO.	11
4.2	Gitterzellen und deren Höhen im “Hessenrechteck” in 0.1°- und 0.2°-Auflösung	13
4.3	Korrekturfaktoren für die Sonnenscheindauer S_d für die WETTREG2010-Läufe 0 und 1.	14
4.4	Jahres- und Gebietsmittelwerte der Lufttemperatur in Hessen (Szenario A1B)	15
4.5	Anzahl der Frosttage im Zeitraum 2001-2100, berechnet mit unkorrigierten und korrigierten RUBA Tagesminimum-Temperaturen	16
4.6	Jahresmittelwerte der Tagesmitteltemperatur T (über 10 Jahre gleitend gemittelt) in den 10 WETTREG2010-Läufen	17
4.7	Obst- und Weinbaugebiete gemäß der CORINE Land Cover-Daten (links) und signifikante Obstanbaupixel (Baumobst und Beerenobstbestände) im Hessenrechteck	18
4.8	Signifikante Weinbaupixel (links) und Erdbeeranbaupixel (rechts) im Hessenrechteck	19
5.1	Änderung des monatlichen Gesamtniederschlags	34
5.2	Differenz der langjährigen Mittelwerte der Monatsmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur T	35
5.3	Differenz der langjährigen Mittelwerte der saisonalen Mittelwerte der 2 m-Lufttemperatur T	35
5.4	Langjährige Mittelwerte (1971-2000) der Monatsmittelwerte der 10 m-Windgeschwindigkeit V_{10}	36
5.5	Langjährige Mittelwerte (2071-2100) der Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte $Rel2$	37
5.6	“ Release of Dormancy t_1 ” (links) und Blühbeginn t_2 (rechts) beim frühreifen Apfel, berechnet mit Modell 29ba mit DAYLENGTH-Term.	39
5.7	“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.	40
5.8	Mittelwerte der Termine des Blühbeginns und Differenz der Blühbeginnstermine sowie Trend für die 5 Klimamodelle für den Apfel	41
5.9	Mittelwerte der Termine des Blühbeginns und Differenz der Blühbeginnstermine sowie Trend für die 5 Klimamodelle für die Aprikose	42
5.10	Beginn der Pflückreife t_3 von frühreifem Apfel, berechnet mit Modell 12a-R	44
5.11	Mittelwerte, Differenzen und Trend für die Pflückreife	45

5.12	Differenz der Länge der Reifeperiode “(2071-2100)-(1971-2000)” beim spätreifen Apfel gemäß Modell-12a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM’s.	46
5.13	Differenz der Länge der Reifeperiode (2071-2100)-(1971-2000) bei der frühreifen Süßkirsche gemäß Modell-10a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM’s.	46
5.14	Differenz der Länge der Reifeperiode (2071-2100)-(1971-2000) beim Wein gemäß Modell-10a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM’s.	47
5.15	Mögliche Verschiebung der phänologischen Phasen für früh- und spätreifen Apfel, 2071-2100 vs. 1971-2000, Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe	48
5.16	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.	49
5.17	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.	50
5.18	Späteste Dormanzbrechungstermine t_1 beim Chilling-Modell 1g und $C^* = 89$ CP bei Nutzung der Temperaturen der 5 Klimamodellläufe im Szenario A1B.	53
5.19	Mittelwerte, Differenzen und Trend für den Frostschaden s_F (an den Früchten!)	57
5.20	Jährlicher Verlauf des Gebietsmittelwerts der Frostschäden in den 5 Modellen für Apfel	57
5.21	Wahrscheinlichkeit s_F^{0-10} (= FROSTSCHADENSPROB0) für Frostschäden (an den Früchten!) der “Stärke 0” und Wahrscheinlichkeit s_F^{10-50} (= FROSTSCHADENSPROB1) für Frostschäden der “Stärke 1” für den Apfel	58
5.22	Apfelwicklergenerationsindex I_A als Funktion der Zeit, gemittelt über die 19 Obstanbaugitterpunkte, berechnet mit den Temperaturen der 5 regionalen Klimamodelle.	60
5.23	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).	61
5.24	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).	62
5.25	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.	63
5.26	Mittlere relative Bienenflugintensität (1971-2000) während der Blütezeit beim frühreifen Apfel	64
5.27	Veränderung der mittleren relativen Bienenflugintensität (2071-2100)-(1971-2000) während der Blütezeit beim frühreifen Apfel	64
5.28	Relativer Ertragsschaden s_Y (1971-2000) beim frühreifen Apfel ohne Bewässerung	65

5.29	Veränderung (2071-2100)-(1971-2000) des relativen Ertragsschadens s_Y beim frühreifen Apfel ohne Bewässerung	66
5.30	Veränderung (2071-2100)-(1971-2000) des relativen Ertragsschadens s_Y beim frühreifen Apfel mit Bewässerung	67
5.31	“Notwendige Bewässerungsmenge $SUMBEW$ (1971-2000) vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel	68
5.32	Veränderung (2071-2100)-(1971-2000) der “notwendigen Bewässerungsmenge $SUMBEW$ vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel	69
5.33	“ Transirationsmenge $SUMTRSV$ (1971-2000) vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel	70
5.34	Veränderung (2071-2100)-(1971-2000) der “Transirationsmenge $SUMTRSV$ vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel	70
5.35	Geordnete Schäden bei der Strategie g-g	73
5.36	Veränderung der geordneten Schäden bei Strategie g-g	73
5.37	Veränderung der geordneten Schäden bei Strategie g-g und nur 3 Klimamodellläufen	74
5.38	Veränderung der geordneten Schäden bei Strategie g-g mit CO ₂ -Düngung	75
5.39	Geordnete Schäden bei der Strategie g-g, RUBA und Modellmittel	76
5.40	Veränderung der geordneten Schäden bei Strategie g-g und Worst Case 20 %	76
5.41	Veränderung der geordneten Schäden bei Strategie m-g	77
5.42	Gesamtschäden bei der Strategie m-g beim frühreifen Apfel	78
5.43	Verlauf der Gesamtschäden bei der Strategie m-g beim frühreifen Apfel	79
5.44	Unsicherheiten beim Gesamtschaden bei der Strategie m-g beim frühreifen Apfel, 3 Fälle	80
5.45	Verlauf der Gesamtschäden bei der Strategie g-g beim frühreifen Apfel	81
5.46	Unsicherheiten beim Gesamtschaden bei der Strategie g-g beim frühreifen Apfel (3 Fälle)	82
5.47	Mittlerer Nettogewinn 1971-2000 und 2071-2100, Strategie g anstelle von Strategie o	84
5.48	Mittlerer Nettogewinn 1971-2000 und 2071-2100, Strategie m anstelle von Strategie o	85
5.49	Mittlerer Nettogewinn 1971-2000 und 2071-2100, Strategie m anstelle von Strategie g	86
5.50	Anteil der Schäden und Maßnahmen am Nettogewinn, 2071-2100, Strategie m anstelle von Strategie g	86
5.51	Akkumulierter Nettogewinn (ab 2002) beim frühreifen Apfel, Strategie m anstelle von Strategie g	87
5.52	Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an KK bei den verschiedenen Obstarten, Strategie g-g	91
5.53	Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an KK bei den verschiedenen Obstarten, Strategie m-g	92
5.54	Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an KK bei den verschiedenen Obstarten, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	93
5.55	Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an KK bei den verschiedenen Obstarten, Strategie m-g, mit Worst Case 20 %	93
5.56	Kosten KK des Klimawandels beim frühreifen Apfel; Vergleich der 5 Modelle, Strategie m-g	94

B.1	Tagesmitteltemperatur T (jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe)	113
B.2	Tagesmaximumtemperatur T_x	113
B.3	Tagesminimumtemperatur T_n	113
B.4	Relative Luftfeuchte $Rel2$	113
B.5	Taupunkttemperatur T_{dew}	114
B.6	10 m-Windgeschwindigkeit V_{10}	114
B.7	Gesamtniederschlag $PRECIPTOT$	114
B.8	Gesamtbedeckungsgrad $CLCT$	114
B.9	Globalstrahlung $Glob$	114
B.10	Luftdruck p_s am Boden	114
C.1	Termin des mittleren Blühbeginns t_2 für verschiedene Obstarten	117
C.2	Veränderung des Termins des mittleren Blühbeginns t_2 für verschiedene Obstarten	117
D.1	Mittlere Blühdauer für verschiedene Obstarten	120
D.2	Veränderung der mittleren Blühdauer für verschiedene Obstarten	120
E.1	Termin des mittleren Beginns der Pflückreife t_3 für verschiedene Obstarten (aus Beobachtungen)	124
E.2	Termin des mittleren Beginns der Pflückreife t_3 für verschiedene Obstarten (modelliert)	124
E.3	Veränderungen des Termins des mittleren Beginns der Pflückreife t_3 für verschiedene Obstarten (modelliert)	125
F.1	Mittlere Länge der Reifeperiode ($t_3 - t_2$) für verschiedene Obstarten (modelliert)	128
F.2	Veränderungen der mittleren Länge der Reifeperiode ($\Delta(t_3 - t_2)$) für verschiedene Obstarten (modelliert)	128
G.1	Mittelwert (1971-2000) des FROSTSCHADENS	129
G.2	Veränderung des FROSTSCHADENS	130
G.3	Mittelwert (1971-2000) der FROSTSCHADENSPROB0	131
G.4	Veränderung der FROSTSCHADENSPROB0	131
H.1	Mittlere Bienenflugintensität $MFLyIntBlueh$ (1971-2000)	137
H.2	Veränderung $\Delta MFLyIntBlueh$ der mittleren Bienenflugintensität (2071-2100)-(1971-2000)	137
I.1	Feuchtmassenertrag (1971-2000) mit Bewässerung für alle Fruchtarten	140
I.2	Veränderung des Feuchtmassenertrags (2071-2100)-(1971-2000) mit Bewässerung für alle Fruchtarten	140
I.3	Ertragsschäden s_Y (1971-2000) für alle Fruchtarten ohne Bewässerung	142
I.4	Veränderung Δs_Y der Ertragsschäden s_Y (2071-2100)-(1971-2000) ohne Bewässerung	143
I.5	Ertragsschäden s_Y (1971-2000) für alle Fruchtarten mit Bewässerung	145
I.6	Veränderung Δs_Y der Ertragsschäden s_Y (2071-2100)-(1971-2000) mit Bewässerung	146
I.7	Mittlere jährliche Bewässerungsmenge $SUMBEW$ (1971-2000)	148

I.8	Veränderung $\Delta SUMBEW$ der mittleren jährlichen Bewässerungsmenge (2071-2100)-(1971-2000)	149
I.9	Mittlere jährliche Transpirationsmenge $SUMTRSV$ (1971-2000)	151
I.10	Veränderung $\Delta SUMTRSV$ der mittleren jährlichen Transpirationsmenge (2071-2100)-(1971-2000)	152
J.1	Gesamtschaden 1971-2000, Strategie x-g	157
J.2	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie g-g	157
J.3	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe	158
J.4	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie g-g, mit CO ₂ -Düngung	158
J.5	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie g-g, Worst Case 20 %	159
J.6	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g	159
J.7	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	160
J.8	Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, Worst Case 20 %	160
J.9	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie g-g	165
J.10	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe	166
J.11	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie g-g, mit CO ₂ -Düngung	166
J.12	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie g-g, Worst Case 20 %	167
J.13	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g	167
J.14	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	168
J.15	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 20 %	168
J.16	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie g-g, beim spätreifen Apfel	169
J.17	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, beim spätreifen Apfel	169
J.18	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie g-g mit 3 Modell-Variationen, beim spätreifen Apfel	170
J.19	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g mit 3 Modell-Variationen, beim spätreifen Apfel	170
J.20	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie g-g, beim Wein	171
J.21	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g, beim Wein	171
J.22	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie g-g mit 3 Modell-Variationen, beim Wein	172
J.23	Gesamtkosten KK des Klimawandels, Strategie m-g mit 3 Modell-Variationen, beim Wein	172
J.24	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g, alle Obstarten	173
J.25	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung, alle Obstarten	174
J.26	Akkumulierte Gesamtkosten $\sum KK$ des Klimawandels, Strategie m-g, mit Worst Case 20 %, alle Obstarten	174

Tabellenverzeichnis

4.1	Apfelwicklergenerationsindex I_A , Schäden s_A und Bekämpfungskosten K_A bei intensiver und extensiver Behandlung. Die Angaben zu Schäden und Kosten beziehen sich auf den Apfel.	23
4.2	Schäden bei unterschiedlichen Strategien	30
4.3	Kosten bei unterschiedlichen Strategien	30
5.1	Änderung des monatlichen Gesamtniederschlags	34
5.2	Differenz der langjährigen Mittelwerte der Monatsmittelwerte der 2 m-Lufttemperatur T	35
5.3	Statistik für die Chillingsumme $S_c(t_s)$ (in CH) bis zum Stichtag t_s beim Apfel (Modell 1b)	52
5.4	Statistik für die Chillingsumme $S_c(t_s)$ (in CH) bis zum Stichtag t_s bei den unterschiedlichen Obstarten (Modell 1b)	52
5.5	Statistik für den Nettogewinn (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim frühreifen Apfel	89
5.6	Statistik für den Nettogewinn (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim spätreifen Apfel	89
5.7	Statistik für den Nettogewinn (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen bei der Sauerkirsche	89
5.8	Statistik für den Nettogewinn (in €/ha/a) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim Wein	90
5.9	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim frühreifen Apfel	95
5.10	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim spätreifen Apfel	96
5.11	Statistik für die Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei der Anwendung verschiedener Strategien B-A und unterschiedlicher Modellvariationen beim Wein	96
A.1	Modellansätze zur Modellierung der phänologischen Phasen, die im Rahmen von INKLIM-A verwendet wurden.	109
B.1	Statistik für die Tagesmitteltemperatur T (Monatsmittelwerte in °C)	111
B.2	Statistik für die Tagesmitteltemperatur T (saisonale Mittelwerte in °C)	111
B.3	Statistik für die Tagesmitteltemperatur T (Jahresmittelwerte in °C)	112
B.4	Statistik für den Gesamtniederschlag PRECIPTOT (monatliche Summen in mm)	112

B.5	Statistik für den Gesamtniederschlag PRECIPTOT (saisonale Summen in mm)	112
B.6	Statistik für den Gesamtniederschlag PRECIPTOT (Jahressumme mm)	113
C.1	Blühbeginn beim Apfel, berechnet mit Modell 29ga (DL=1)	116
C.2	Blühbeginn bei der Aprikose, berechnet mit Modell 29ga (DL=1)	116
D.1	Blühdauer beim Apfel	119
D.2	Blühdauer bei der Sauerkirsche	119
D.3	Blühdauer bei der Süßkirsche	119
E.1	Termin des mittleren Beginns der Pflückreife t_3 für verschiedene Obstarten	122
E.2	Beginn der Pflückreife beim spätreifen Apfel	123
E.3	Beginn der Pflückreife beim Wein	123
F.1	Länge der Reifeperiode beim spätreifen Apfel	127
F.2	Länge der Reifeperiode bei der frühreifen Süßkirsche	127
F.3	Länge der Reifeperiode beim Wein	127
H.1	Statistik für den Generationsindex I_A des Apfelwicklers	133
H.2	Statistik für den Schaden durch den Apfelwickler ohne Maßnahmen (in %)	133
H.3	Statistik für den Schaden durch den Apfelwickler bei extensiven Maßnahmen (in %)	133
H.4	Statistik für den Schaden durch den Apfelwickler bei extensiven Maßnahmen im Zeitraum 1971-2000 und intensiven danach (in %)	134
H.5	Statistik für die Kosten der Bekämpfung des Apfelwicklers mit extensiven Maßnahmen (in €/ha/a)	134
H.6	Statistik für die Kosten der Bekämpfung des Apfelwicklers mit extensiven Maßnahmen im Zeitraum 1971-2000 und mit intensiven Maßnahmen danach (in €/ha/a)	134
H.7	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Apfelwicklergenerationsindex $I_A = 2$ (d. h. für zwei vollständige Generationen) (in %)	135
H.8	Statistik für die mittlere Bienenflugintensität während der Blüte (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten	136
I.1	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und ohne CO ₂ -Düngung)	139
I.2	Statistik für den Feuchtmassenertrag (in t/ha/a) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und mit CO ₂ -Düngung)	139
I.3	Statistik für den relativen Ertragsschaden (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne Bewässerung und ohne CO ₂ -Düngung)	141
I.4	Statistik für den relativen Ertragsschaden (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne Bewässerung und mit CO ₂ -Düngung)	142
I.5	Statistik für den relativen Ertragsschaden (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und ohne CO ₂ -Düngung)	144
I.6	Statistik für den relativen Ertragsschaden (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und mit CO ₂ -Düngung)	145

I.7	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und ohne CO ₂ -Düngung)	147
I.8	Statistik für die Bewässerungsmenge von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und mit CO ₂ -Düngung)	148
I.9	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und ohne CO ₂ -Düngung)	150
I.10	Statistik für die Summe der Transpiration von Blühbeginn bis Reife (in mm/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (mit Bewässerung und mit CO ₂ -Düngung)	151
J.1	Statistik für den Gesamtschaden , Strategie g-g	154
J.2	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe	154
J.3	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie g-g, mit CO ₂ -Düngung	154
J.4	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie g-g, Worst Case 20 %	155
J.5	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g	155
J.6	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	155
J.7	Statistik für die Veränderung des Gesamtschadens, Strategie m-g, Worst Case variiert	156
J.8	Statistik für den Gesamtschaden, Strategie m-g, Worst Case 20 %	156
J.9	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g	161
J.10	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe	162
J.11	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, mit CO ₂ -Düngung	162
J.12	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie g-g, Worst Case: 20 %	162
J.13	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g	163
J.14	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, mit CO ₂ -Düngung	163
J.15	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case variiert	163
J.16	Statistik für die Gesamtkosten <i>KK</i> des Klimawandels, Strategie m-g, Worst Case 20 %	164

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. 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.

In dem Ihnen vorliegenden Abschlussbericht informieren wir Sie hauptsächlich über die wesentlichen Forschungsergebnisse und gehen auf die methodischen Aspekte der Arbeit nur in sehr knapper Form ein. Für viele Leser mag dies nicht ausreichend sein, so dass wir uns entschieden haben, zusätzlich einen ausführlichen Bericht zu verfassen, der umfassend und gut nachvollziehbar sowohl alle methodischen Aspekte der Arbeit als auch detailliert alle Projektergebnisse beinhaltet (Blümel & Chmielewski, 2013). Dieser Bericht ist ausschließlich in elektronischer Form verfügbar und wird unter http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/CHARIKO_html bereitgestellt. In der elektronischen Form können beide Berichte mit den üblichen pdf-Readern¹ sehr komfortabel gelesen werden. Hierzu wurden in beiden Versionen alle Kapitel, Formeln und Abbildungen sowie die Literaturhinweise und Verweise ins Web mit *blauen Hyperlinks* verlinkt. Darüber hinaus wurden alle Verweise, die in diesem Abschlussbericht auf den ausführlichen Bericht zielen [nachfolgend Langbericht (LB) genannt], zusätzlich mit *magenta-farbenen Hyperlinks* versehen, so dass, wenn sich beide Versionen des Berichts nach dem Download im gleichen Verzeichnis befinden, sich die entsprechende Stelle in der “Langversion” öffnet. Voraussetzung dafür ist, dass der Dateiname der Langversion “Endbericht_2013_HU_Berlin_lang.pdf” lautet. Gegebenenfalls muss man die Datei auf diesen Namen umbenennen.

Abschließend 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

¹ Der ADOBE ACROBAT[®] und ACROBAT-Reader[®] zeigen leider einige Schwächen in der Darstellung (siehe auch Kapitel 1.1 im Langbericht). Daher sollte man, wenn möglich, alternative pdf-Reader benutzen [wie z. B. *PDF-XCHANGE-Viewer*[®] (<http://www.pdf-xchange.ch/download-xchange-viewer.htm>; gratis) unter Windows, *Skim*[®] (<http://skim-app.sourceforge.net>; gratis) unter MAC OS oder *PDF-Expert*[®] (erhältlich im Apple[®] App-Store) unter iOS].

Anbauflächen und Erlösen im Obstbau, welche für die ökonomischen Berechnungen von grundlegender Bedeutung waren. Auch möchten wir nicht vergessen, Frau Dr. Cornelia Fooker zu danken, die uns stets eine verlässliche Ansprechpartnerin am FZK war.

2 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Modellergebnisse (Outputs) von vier verschiedenen Klimamodellen als Input für verschiedene Impaktmodelle verwendet, um Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklung, den Ertrag und die möglichen Schäden verschiedener Obstarten machen zu können. Von den drei¹ rein dynamischen Klimamodellen wurde jeweils nur ein fester Modelllauf verwendet. Vom vierten Modell (WETTREG2010), das ein rein statistisches Modell ist, standen insgesamt 10 unterschiedliche Modellläufe (Realisierungen) zur Verfügung, von denen allerdings wegen verschiedener Unzulänglichkeiten (Abschnitt 4.1.5.1 im LB) und wegen der starken Korrelation zwischen diesen 10 Modellläufen (Abschnitt 4.4.3 im LB) nur zwei Läufe in CHARIKO verwendet wurden. Die auf Stationen bezogenen Daten von WETTREG wurden, ebenso wie die ebenfalls verwendeten meteorologischen und phänologischen Messwerte des DWD, auf ein einheitliches 0.2°-Rechengitter gerastert. 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 SRES²-Emissionsszenario A1B festgelegt sind.

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 im LB) entwickelt, die nicht nur die statistischen Schwankungen der Größen innerhalb eines RCM, sondern auch die Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Modellen berücksichtigt.

Nach einer sogenannten “BIAS”-Korrektur der Modelldaten der drei dynamischen Modelle, die dazu führte, dass die in bestimmten Regionen auftretenden, systematischen Fehler der Modelle reduziert wurden und die langjährigen Mittelwerte (1971-2000) aller wichtigen Modelloutputgrößen gut mit den Beobachtungen übereinstimmten, kann man folgende Aussagen treffen: Die **klimatischen Verhältnisse** in den Obstbauregionen Hessens (Mittel über 5 Klimamodelle³, Szenario A1B und 19 Obstbaugitterpunkte⁴) werden sich zum Ende dieses Jahrhunderts zum Teil deutlich ändern (2071-2100 vs. 1971-2000). In erster Linie kann man von einer signifikanten Zunahme der Lufttemperatur in allen Monaten und Jahreszeiten ausgehen. Das Jahresmittel der Lufttemperatur nimmt nach diesem Szenario um 3.4 K zu (Tagesmaximum: 3.7 K und Tagesminimum: 3.1 K). Jahreszeitlich treten die stärksten Temperaturänderungen im Winter: 4.0 K, gefolgt vom Sommer: 3.8 K,

¹ Genau genommen handelt es sich um nur zwei unterschiedliche, dynamische *Regionale Klimamodelle* (RCM), von denen aber die beiden verwendeten Läufe des einen Modells von verschiedenen *Globalen Klimamodellen* (GCM) angetrieben wurden. Siehe Abb. 3.1.

² SRES = Special Report on Emissions Scenarios (Nakicenovic et al., 2000)

³ 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.

⁴ Die “signifikanten” Obst- und Weinbau-Gitterpunkte innerhalb Hessens wurden u. a. mit Hilfe der CORINE-Datenbank bestimmt.

Herbst: 3.5 K und Frühling: 2.3 K auf. Der Gesamtniederschlag nimmt im Sommer hoch signifikant ab (-47 mm) und im Winter ($+31$ mm), besonders im Januar ($+12$ mm), signifikant zu. Der Jahresmittelwert verändert sich jedoch nicht signifikant. Die relative Luftfeuchte nimmt im Sommer und Herbst, besonders im Juli (-6%) und August (-8%), sowie im Jahresmittel (-2%) signifikant ab, obwohl die Taupunkttemperatur hoch signifikant zunimmt ($+2.8$ K im Jahresmittel). Die Veränderungen der anderen untersuchten Größen (Windgeschwindigkeit, Gesamtbedeckungsgrad, Globalstrahlung, Luftdruck) ist zum Teil nur geringfügig bzw. nicht statistisch gesichert oder betrifft nur eines der Klimamodelle, wie beispielsweise die signifikante Zunahme der Globalstrahlung im Sommer in WETTREG.

Zu den gesicherten Folgen des Temperaturanstiegs zählt die bereits in Hessen beobachtete Verschiebung in den Eintrittsterminen phänologischer Stadien. Die steigenden Temperaturen — vor allem im Spätherbst und Winter — haben auch einen Einfluss auf das Ende der Gehölzruhe. Aus diesem Grund war es zunächst wichtig zu wissen, ob der deutliche Temperaturanstieg zum Ende dieses Jahrhunderts bereits zu einer Nichterfüllung des sorten- und artenspezifischen Kältebedürfnisses (Chilling) der Obstgehölze führt und damit sogenannte “**Dormanzschäden**” verursacht. Die Unsicherheiten bei diesen Untersuchungen liegen hauptsächlich in der Wahl eines geeigneten Chilling-Modells, das den Dormanzbrechungstermin korrekt vorhersagt. Unsere Untersuchungen haben ergeben, dass die Temperaturänderungen in den fünf betrachteten regionalen Klimamodellläufen nicht groß genug sind, 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. Die Chillingsummen bis zu einem bestimmten Stichtag im Frühjahr nehmen allerdings infolge steigender Temperaturen signifikant ab.

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. Durch die Einführung eines Tageslängenterms (DAYLENGTH-Term) konnten diese Defizite behoben werden. Leider ergab sich auch bei der *Pflückreife*, dass die bisher verwendeten phänologischen Modelle für Vorhersagen dieser Größe bis 2100 nicht geeignet waren. Nach entsprechender Modifikation der Modelle konnten dann aber doch relativ verlässliche Reifetermine berechnet werden. Die mit diesen verbesserten Modellen durchgeführten Berechnungen zu den Veränderungen im **Blühbeginn** (2071-2100 vs. 1971-2000) der Obstgehölze (Apfel, Birne, Süß-, Sauerkirsche, Pflaume, Pfirsich, Erdbeere, Wein) ergaben eine signifikante Verfrühung dieses Termins zwischen 15.0 (Kirsche, Wein) und 22.0 Tagen (Pfirsich). Markante Änderungen in der **Blühdauer** wurden nicht gefunden (< 1 d). Der **Beginn der Pflückreife** verfrüht sich ebenfalls bei allen Fruchtarten hoch signifikant zwischen 11.5 Tagen beim spätreifen Apfel und 19.0 Tagen bei der spätreifen Pflaume. Die Weinlese verschiebt sich sogar um 21.1 Tage zu früheren Terminen hin. Die **Länge der Reifeperiode** vergrößert sich signifikant um 3.4 Tage beim frühreifen und 6.5 Tage beim spätreifen Apfel bis zu 6.8 Tage bei der frühreifen Birne (5.3 Tage bei der spätreifen Birne). Beim Wein jedoch verkürzt sich die Reifeperiode bis zur Pflückreife um 3.0 Tage und bis zur Weinlese um 6.0 Tage. Alle anderen Obstarten zeigen keine signifikante Verschiebung beim Reifezeitpunkt.

Basierend auf den Veränderungen im Blühbeginn der Obstgehölze und dem bezüglich Bias korrigierten Output der Klimamodelle konnten Abschätzungen für die Wahr-

scheinlichkeit von **Spätfrostschäden** vorgenommen werden, die zu den gefürchtetsten Witterungsschäden im Obstbau gehören. Die Ergebnisse zeigen keine signifikante bzw. obstbaulich relevante Änderung der Schäden, so dass das heute existierende Spätfrostisiko wahrscheinlich annähernd erhalten bleibt.⁵ Dieses Ergebnis ist nicht verwunderlich, da der prognostizierte *klimatische* Temperaturanstieg die durch die Verfrühung des Blühzeitraums hervorgerufene *jahreszeitliche* Temperaturabnahme zum großen Teil kompensieren kann.

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. Im Rahmen dieser Studie wurden mögliche Veränderungen im Auftreten des **Apfelwicklers** für Hessen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der Generationsindex des Apfelwicklers signifikant von einer oder einer partiellen 2. Generation im Zeitraum 1971-2000 auf fast zwei vollständige Generationen im Zeitraum 2071-2100 ansteigt. Der hierdurch verursachte Apfelwicklerschaden steigt dementsprechend um 6.6 % von 8.0 % auf 14.6 % an, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Durch extensive Bekämpfungsstrategien kann der Anstieg des Schadens auf 0.7 % beschränkt werden.

Für eine ausreichende Bestäubung der Obstgehölze ist die Honigbiene das wichtigste Insekt. Untersuchungen zur **Bienenflugintensität** haben ergeben, dass während der Blütezeit die mittlere Bienenflugintensität für alle Fruchtarten, außer beim sehr spät blühenden Wein [+2.5 % (± 2.9 %)], um 4 % bis 7 % signifikant abnimmt.

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt war auf Veränderungen im **Bodenwasserhaushalt** und im **Obstertrag** ausgerichtet. Hierzu wurde das an der HU genutzte Wasserhaushalts- und Ertragsmodell SIMWASER verwendet, das für die Ertragsberechnung von Obstgehölzen modifiziert wurde. Zudem wurden die neu entwickelten phänologischen Modelle in dieses Modell implementiert und der CO₂-Düngeeffekt ansatzweise berücksichtigt. Es sei hier bereits vorweg genommen, dass die Berechnungen zu den Veränderungen im Obstertrag gewiss noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind, was vor allem die Ertragssteigerung durch die CO₂-Düngung betrifft.

Nach Bestimmung der Bodenarten bzw. Horizonte in den hessischen Obst- und Weinanbaugebieten, die von SIMWASER für die Bodenwasserbestimmung benötigt werden, ergaben die durchgeführten Berechnungen, dass die mittleren **Ertragsschäden** beim spätreifen Apfel, der Birne, beim Pfirsich und der spätreifen Pflaume ohne künstliche Sommerberechnung und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung leicht um 4 % bis 8 % signifikant zunehmen (2071-2100 vs. 1971-2000, 19 Obstbaupixel, Mittelwert über die Ergebnisse, welche mit SIMWASER mit den Klimadaten aus 5 Klimamodellläufen erzielt wurden). Durch die Einführung von Berechnungsmaßnahmen zwischen Blühbeginn und Fruchtreife traten keine signifikanten Ertragsänderungen mehr auf, so dass diese Maßnahme allein schon wirksam war, um den Ertrag auch künftig zu stabilisieren. Die hierzu erforderlichen zusätzlichen **Berechnungsmengen** pro Saison betragen beim spätreifen Apfel 166 mm, bei der frühreifen Birne 90 mm, bei der spätreifen Birne 135 mm, beim Wein 63 mm und bei der spätreifen Pflaume 105 mm.

Unter Berücksichtigung der CO₂-Düngung, aber ohne Sommerberechnung, ist für alle

⁵ Wie die Abbildungen G.1 und G.2 zeigen, sind die Unsicherheiten aber sehr groß und die mittleren Schäden können sich u. U. auch verdoppeln oder fast vollständig verschwinden.

Fruchtarten eine signifikante Abnahme der Schäden, d. h. ein Ertragszuwachs von ca. 14 % bis 41 % zu erwarten, der bei zusätzlicher Sommerberegnung auf 18 % bis 54 % zunimmt. Durch die bessere Wassernutzungseffizienz unter höheren atmosphärischen CO₂-Gehalten (verringerte Transpiration) war die erforderliche Sommerberegnung um 20 mm bis 40 mm geringer als im Fall ohne CO₂-Düngung.

Im Rahmen der ökonomischen Bewertung konnte schließlich aus den analysierten Einzelschäden (Dormanzschaden, Spätfrostschaden, Apfelwicklerschaden (nur beim Apfel), Ertragsschaden) ein **Gesamtschaden** berechnet werden, der zusammen mit den **Kosten für Gegenmaßnahmen** in die Bilanzierung der Gesamtkosten des Klimawandels eingeht. Hierzu mussten bestimmte Annahmen über den Umfang der Anpassungsmaßnahmen gemacht werden. Bei der Berücksichtigung einer gemäßigten [g-g-Strategie: extensive Apfelwicklerbekämpfung und Sommerberegnung heute (1971-2000) und in Zukunft (2001-2100)] oder einer maximalen Strategie [m-g-Strategie: intensive Apfelwicklerbekämpfung, Sommerberegnung, Frostschutzberegnung, Mittel zur Dormanzbrechung falls erforderlich in Zukunft, davor g-Strategie] tritt nur beim spätreifen Apfel eine leicht signifikante Verringerung des Gesamtschadens von -8 % bis -18 % auf (ohne CO₂-Düngung). Erst unter Berücksichtigung der CO₂-Düngung ergeben sich für alle Fruchtarten und in beiden Strategien hoch signifikante Gewinne von 18 % bis 56 % (d. h. negative Schäden von -18 % bis -56 %).

Die **Rentabilität** der Anpassungsstrategie ist fruchtartenspezifisch, da sie außer von den artenspezifischen Gesamtschäden und Maßnahmekosten noch vom maximalen Verkaufswert des Produkts abhängt. Deshalb sollte man bei der Pflaume und der Sauerkirsche auch in Zukunft nur eine gemäßigte Schadenbekämpfungs-Strategie (g-Strategie) anwenden. Bei alle anderen Fruchtarten ist die Anwendung der m-Strategie durchaus rentabel und einer Nichtanpassung vorzuziehen. Dieses Ergebnis belegt abermals, dass Anpassung an den Klimawandel rentabel sein kann.

Bei der Berechnung der **Gesamtkosten des Klimawandels** (ohne CO₂-Effekt) zeigt nur der spätreife Apfel für beide Strategien eine signifikante, negative Veränderung der Kosten (Gewinn), die jedoch nicht sehr sicher ist. Wenn man hierbei wiederum die CO₂-Düngung berücksichtigt, errechnet man erwartungsgemäß für alle Obstarten hoch signifikante Kostenabnahmen durch die Ertragszuwächse. Die größten Einsparungen gegenüber 1971-2000 erzielt man in diesem Fall beim Wein mit der m-g-Strategie. Diese Einsparungen belaufen sich für die Hessischen Bergstraße und den Rheingau auf ca. 19 000 000 €/Jahr ($\pm 4\,300\,000$ €/Jahr).

Zusätzlich zu den oben dargestellten Kostenrechnungen, die auf den Ergebnissen der Impaktmodelle basieren, wurden noch "**Worst Case Szenarien**" bezüglich der Dormanzbrechung berücksichtigt, da diese Rechnungen mit gewisser Unsicherheit behaftet sind. Hierbei wurde angenommen, dass die Dormanz der Gehölze im Zeitraum 2071-2100 mit einer vorgegebenen Häufigkeit zufällig nicht mehr gebrochen wird. Beim "Worst Case 20 %" -Szenario (20 % der Jahre sind hiervon betroffen) ergeben sich bei der g-g-Strategie ohne CO₂-Düngung (außer beim spätreifen Apfel) signifikant positive Schadenszuwächse von 12 % bis 23 %, wodurch die Kosten des Klimawandels ansteigen. Bei der Anwendung der m-g-Strategie (künstliche Dormanzbrechung) treten keine signifikanten Schadensänderungen mehr auf. Jedoch ist zu beachten, dass bei dieser Strategie eine signifikante Zunahme der Kosten bei der Pflaume und Kirsche zu verzeichnen ist. Die absolut höchsten Zusatzkosten (2071-2100 vs. 1971-2000) aller in Hessen analysierten Obstanbauflächen liegen bei 7 000 000 €/Jahr ($\pm 2\,300\,000$ €/Jahr) beim Wein im "Worst Case

Szenario 20%” bei der gemäßigten Strategie.

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) bezüglich auftretender systematischer Fehler (BIAS) korrigiert und dienen danach als Input für verschiedene Impaktmodelle. Die Outputs dieser Modelle werden (mit Ausnahme von WETTREG; die auf Stationen bezogenen Daten von WETTREG werden nur auf das 0.2°-Raster der anderen Modelle gerastert) 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 im LB (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.

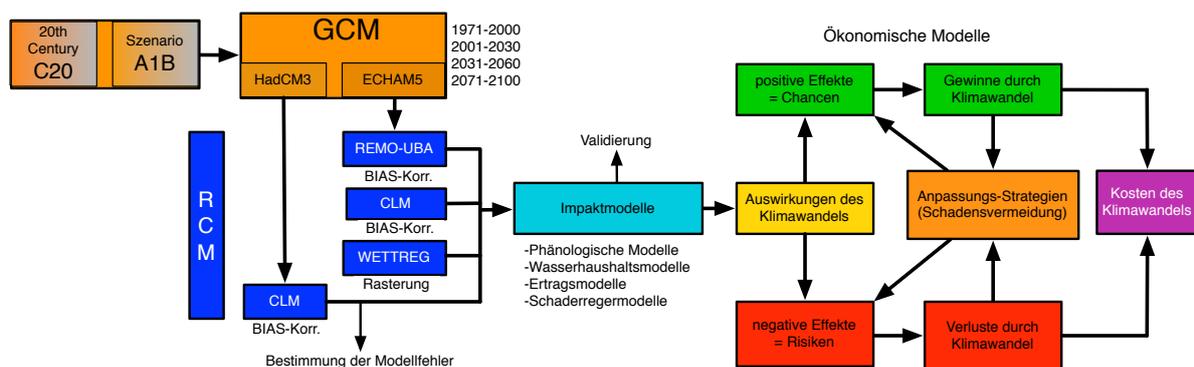


Abbildung 3.1: Ablauf der in INKLIM-A geplanten Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels im Obst- und Weinbau

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.

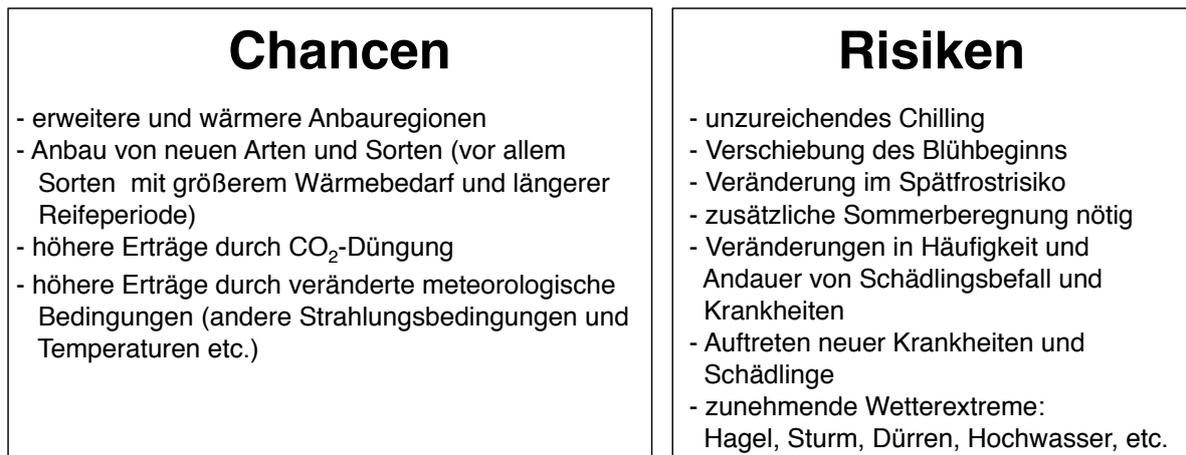


Abbildung 3.2: Chancen und Risiken des Klimawandels im Obst- und Weinbau

4 Methodischer Ansatz

In diesem Abschnitt folgt eine kurze Übersicht über die im Projekt CHARIKO verwendeten methodischen Ansätze. Da viele dieser Methoden an der HU-Berlin speziell für CHARIKO und z. T. auch für das vorhergehende Projekt KliO (Chmielewski et al., 2009a) entwickelt wurden, kann leider in vielen Fällen nicht auf Sekundärliteratur verwiesen werden. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik findet sich in der Langversion des Abschlussberichts (Kapitel 4), auf die in diesem Bericht öfters verwiesen wird.

Abbildung 4.1 skizziert beispielhaft die im Folgenden 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).

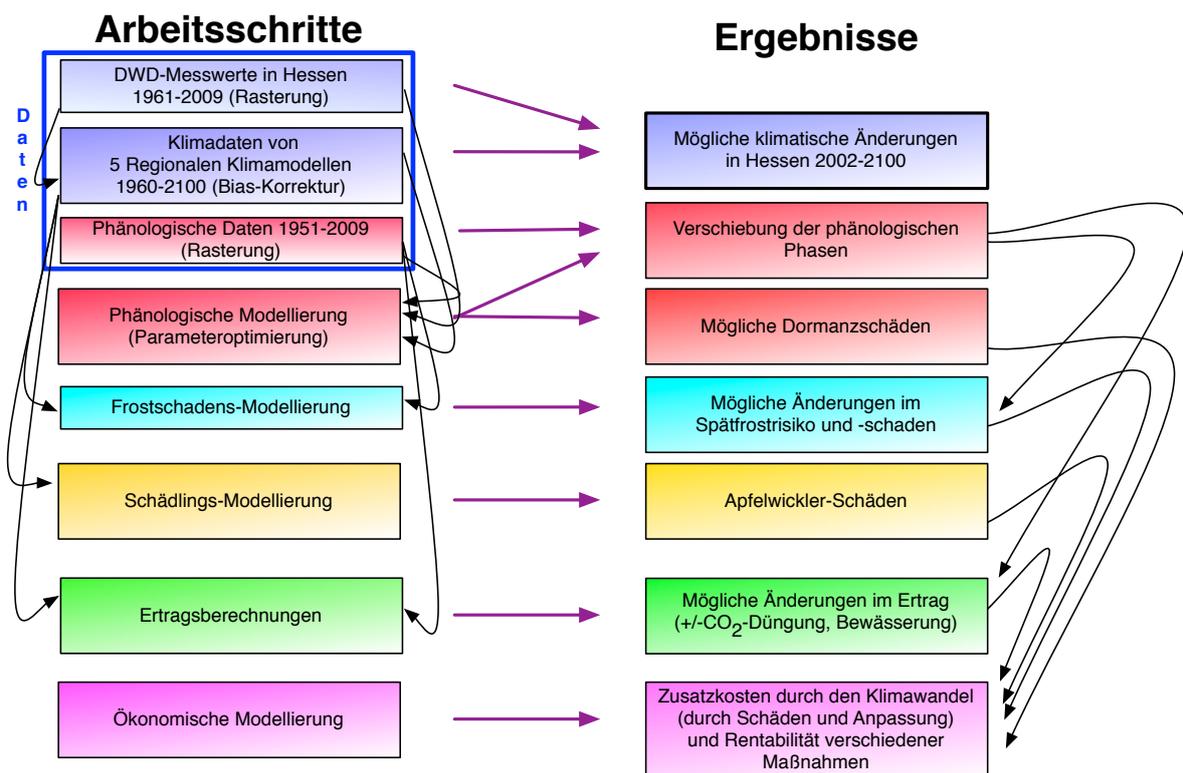


Abbildung 4.1: Arbeitsschritte und sich daraus ergebende Ergebnisse im Projekt CHARIKO.

4.1 Daten

Die Messwerte der wichtigsten **meteorologischen Größen** (u. a. Tagesmittel- T , Tagesmaximum- Tx , Tagesminimumtemperatur Tn , Dampfdruck des Wasserdampfs e , 10 m-Windgeschwindigkeit V_{10} , Sonnenscheindauer Sd , Niederschlagssumme R und Luftdruck am Boden ps) von den Klima- und Niederschlagsstationen des DWD in Hessen und Umgebung standen als Tageswerte von 1961-2009 zur Verfügung (Abschnitt 4.1.1 im LB). Ebenso lagen an der HU-Berlin **phänologische Beobachtungen** verschiedener phänologischer Phasen für die wichtigsten Fruchtarten für verschiedene Zeiträume vor (Abschnitt 4.1.3 im LB).

Diese Messwerte wurden geprüft und gegebenenfalls korrigiert bzw. fehlerhafte Werte wurden auf undefiniert gesetzt. Sodann wurden weitere Sekundärgrößen wie z. B. die relative Luftfeuchte ($Rel2$), die Taupunkttemperatur ($Tdew$) etc. berechnet. Die Globalstrahlung ($Glob$) wurde aus der Sonnenscheindauer und geographischen Breite geschätzt [Gleichung (4.6) im LB]. Auch der Gesamtbedeckungsgrad ($CLCT$) wurde aus Sd berechnet [Gleichung (4.7) im LB]. Alle Stationsdaten, auch die des Klimamodells WETTREG, deren Ergebnisse ebenfalls nur an Stationen vorlagen (siehe unten), wurden sodann mit *Universal Kriging* (mit impliziter Höhenabhängigkeit) (siehe Abschnitt 4.2.1 im LB) auf ein längen-breiten-paralleles Raster in 0.1°- und 0.2°-Auflösung überführt. Die Gitterzellen dieses Rasters, welches im Folgenden auch *Hessenrechteck* genannt wird, und auf das auch die Modellwerte der regionalen Klimamodelle (RCM's) interpoliert wurden, sind in **Abbildung 4.2** dargestellt.

Weiterhin wurden die **Outputdaten von drei¹ dynamischen, regionalen Klimamodellen** (REMO-UBA, ECHAM5-CLM und HCLM) verwendet. REMO-UBA (später im Text auch kurz als RUBA bezeichnet) und das CLM im ECHAM5-CLM-Lauf (kurz: ECLM) wurden dabei vom selben Lauf des globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OM angetrieben. Die Klimadaten dieser beiden Modelle sind daher nicht vollkommen unabhängig. Das CLM im HadCM3-CLM-Lauf (kurz: HCLM) wurde jedoch von einem anderen globalen Klimamodell (HadCM3) angetrieben. Von allen Modellen standen Tageswerte von (mindestens) 1960-2000 (Kontrolllauf C20) und 2001-2100 (SRES-Szenario A1B) zur Verfügung. Weitere Beschreibungen und Literaturverweise bezüglich der dynamischen RCM's findet man im Kapitel 4.1.4 im LB.

Zusätzlich standen auch die Ergebnisse des **statistischen regionalen Klimamodells WETTREG2010** zur Verfügung (Abschnitt 4.1.5 im LB). Auch dieses Modell wurde vom Lauf 1 des ECHAM5/MPI-OM angetrieben. Von diesem Modell lagen insgesamt 10 transiente Läufe von jeweils 1961-2100 vor. Leider zeigten sich bereits bei den ersten Auswertungen der WETTREG2010-Daten viele Besonderheiten im Vergleich zu den dynamischen Regionalmodellen:

Die Sonnenscheindauer Sd ist in WETTREG2010 im Zeitraum 1971-2000 im November und Dezember im Flächenmittel über Hessen um ca. 30% - 40% größer als die entsprechend aggregierten Messwerte. Die Korrekturfaktoren, die im Winter angebracht werden müssten², sind mit 0.7 bis 0.8 meistens hoch signifikant von eins verschieden

¹ 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.

² Diese Korrektur wurde aber nicht durchgeführt, da die WETTREG2010-Daten nicht bezüglich BIAS korrigiert wurden!

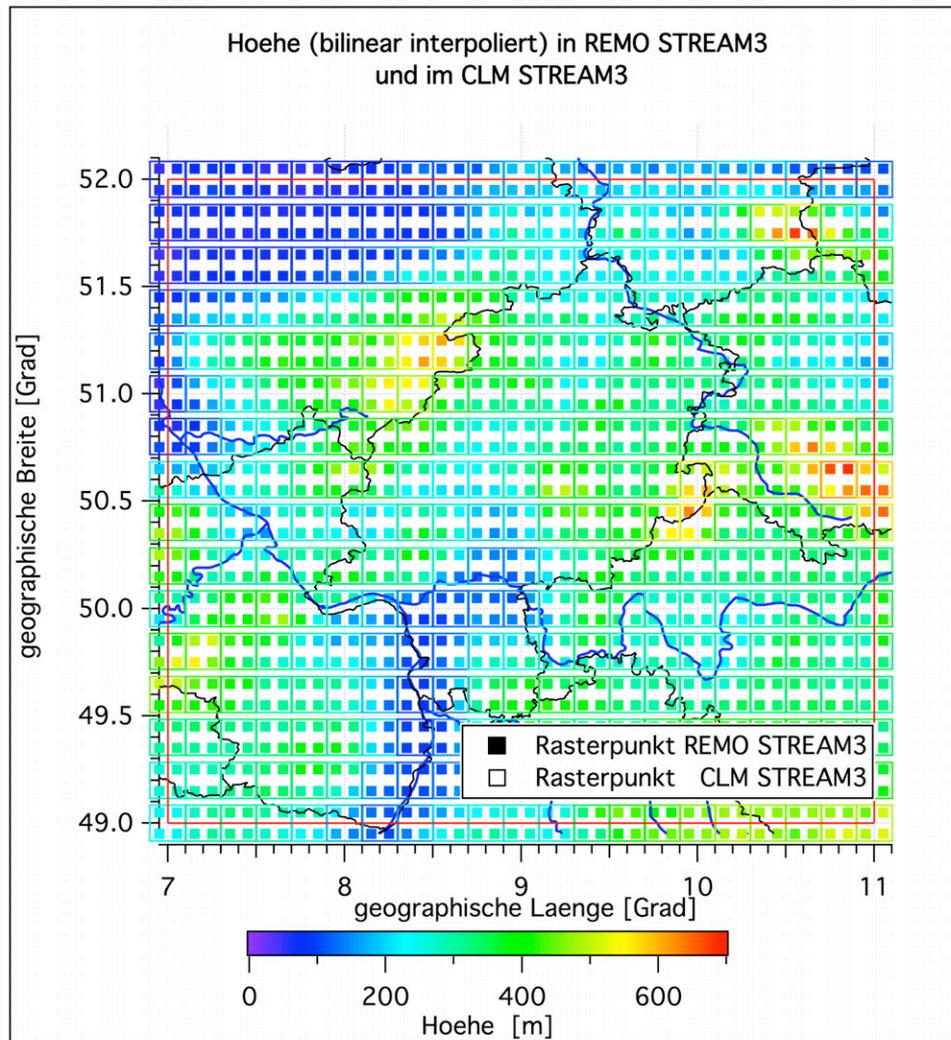


Abbildung 4.2: Gitterzellen und deren Höhen im “Hessenrechteck” in 0.1°- und 0.2°-Auflösung

(Abbildung 4.3, oben links)! WETTREG2010 berechnet für den Zeitraum 2071-2100 im Sommer eine Zunahme der Sonnenscheindauer gegenüber dem Zeitraum 1971-2000 von ca. 3 Stunden (3 h) (Abbildung 4.3, unten links). Das entspricht einer Zunahme von 50 %, da die Mittelwerte von S_d im Sommer im Zeitraum 1971-2000 ca. 6 h betragen (Abbildung 4.3, oben rechts). Während die dynamischen Modelle keine signifikante Zunahme der Globalstrahlung prognostizieren (Abbildung 4.3, unten rechts), berechnet³ WETTREG2010 eine signifikante Zunahme um über 30 %!

Abbildung 4.4 zeigt, dass die Jahresmittelwerte (gemittelt über Hessen) der Lufttemperatur T in WETTREG2010 (Szenario A1B) viel kleinere Schwankungen als in den 3 dynamischen Modellen aufweisen. Im Prinzip sind alle nichtlinearen Impaktmodelle von diesen zu kleinen Varianzen der Lufttemperatur betroffen. Zum Beispiel wird das *Dynamic Model* zur Berechnung von Chilling Portions fehlerhafte Resultate ergeben, da die Ergebnisse von der Dauer der “Kalt- und Warmperioden” abhängig sind. Auch die Schwankungsbreite der *Dormanzbrechungstermine* (vgl. Abbildung 5.22 im LB) wird auf Grund der zu kleinen Autokorrelationen der Temperaturen viel zu klein.

³ Wenn man die Globalstrahlung aus der Sonnenscheindauer abschätzt [vgl. Gleichung (4.6 im LB)].

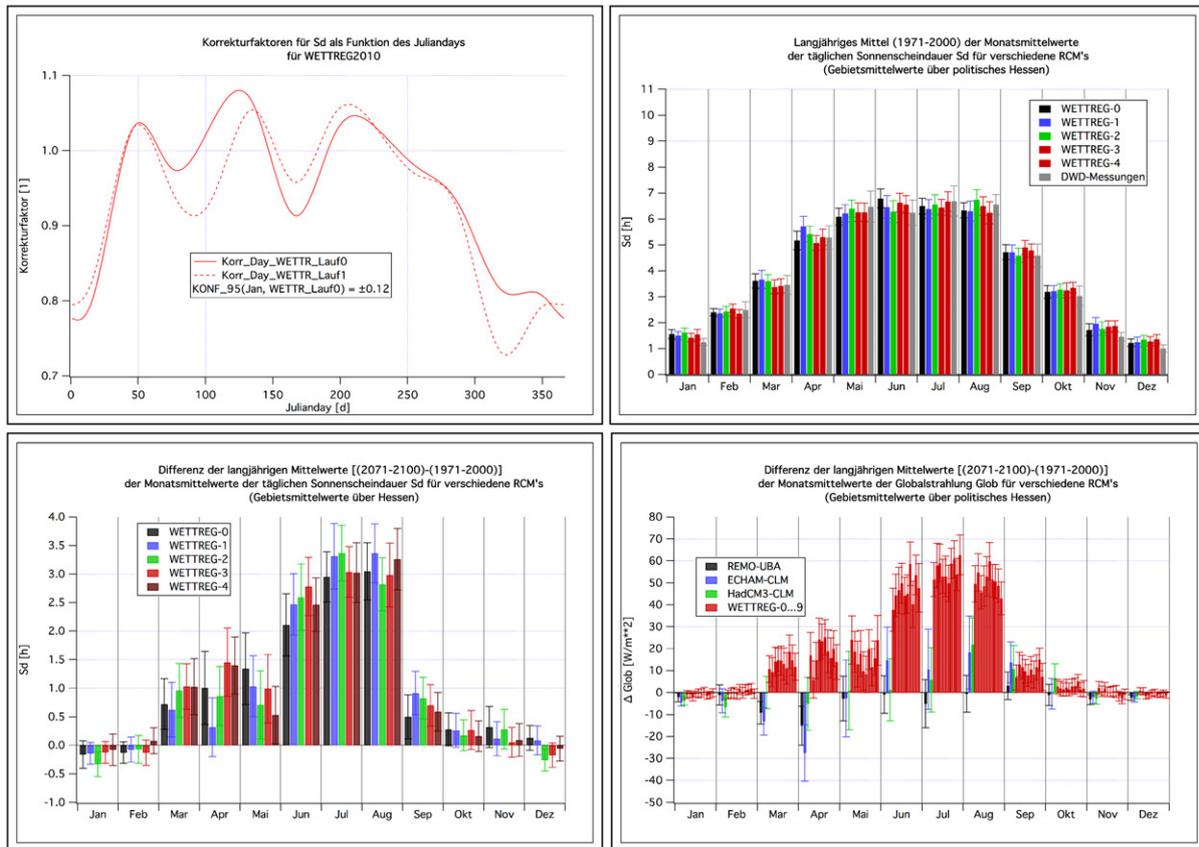


Abbildung 4.3: Korrekturfaktoren für die Sonnenscheindauer S_d für die WETTREG2010-Läufe 0 und 1 an einem Gitterpunkt in der Nähe von Frankfurt/Main (oben links; ohne Einheit bzw. Einheit=1); Sonnenscheindauer (in Stunden) im Mittel über 1971-2000 (Gebietsmittelwert über das politische Hessen aus WETTREG-Lauf 0-4 und aus DWD-Messungen) (oben rechts); Zunahme der Sonnenscheindauer (2071-2100 vs. 1971-2000) (in Stunden) für WETTREG-Lauf 0-4 (unten links); Zunahme der Globalstrahlung $Glob$ (2071-2100 vs. 1971-2000) (in $W\ m^{-2}$) in RUBA, ECLM, HCLM und den WETTREG-Läufen 0-9 (für WETTREG wurde $Glob$ aus S_d berechnet) (unten rechts)

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 T_x , T_n und e um ca. 50 % zu kleine (gegenüber DWD-Messungen) und bei ps , S_d und $Rel2$ um ca. 30 % zu kleine $SDEV$'s von Monats-⁴ und Jahresmittelwerten berechnet.

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 S_d konsistent und T passt nicht zu T_n und T_x .

Eine genauere Analyse der Unzulänglichkeiten von WETTREG2010 findet man im Kapitel 4.1.5.1 im LB.

⁴ Die Prozentsätze bei den Monatsmittelwerten sind etwas kleiner als bei den Jahresmittelwerten!

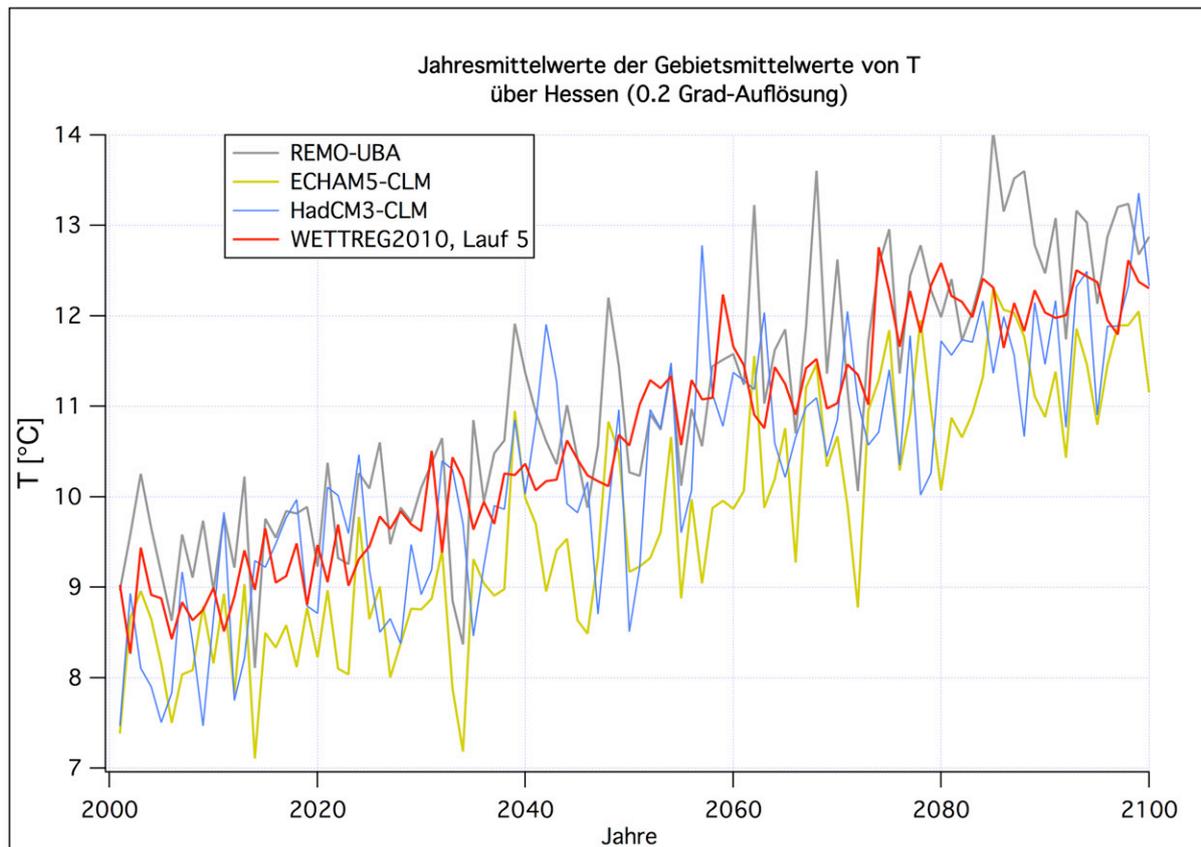


Abbildung 4.4: Jahres- und Gebietsmittelwerte der Lufttemperatur in Hessen (Szenario A1B)

Alle Modelldaten wurden in einem einheitlichen Format auf das Hessenraster interpoliert. Dabei wurden beim HCLM jedes Jahr 5 Tage durch Verdoppelung jedes 72. Tages (und des 58. Tages in einem Schaltjahr) ergänzt, um aus dem *HCLM-Jahr*, welches nur 360 Tage beinhaltet, ein normales gregorianisches Jahr zu erzeugen. Danach wurden die Daten der drei dynamischen Modelle einer sogenannten BIAS-Korrektur (*Scaling*) unterworfen (Kapitel 4.3.2 im LB), um wenigstens im Zeitraum 1971-2000 langjährige Monatsmittelwerte aller drei Modelle zu erhalten, die den Beobachtungen stark ähneln. Die WETTREG-Daten wurden nicht korrigiert, da diese aus Messwerten abgeleitet wurden.

Abbildung 4.5 zeigt die Anzahl der Frosttage (mit $T_n < 0\text{ °C}$), die im Szenario A1B von RUBA 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. Man erkennt, dass die Unterschiede groß 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. Hier soll noch erwähnt 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.

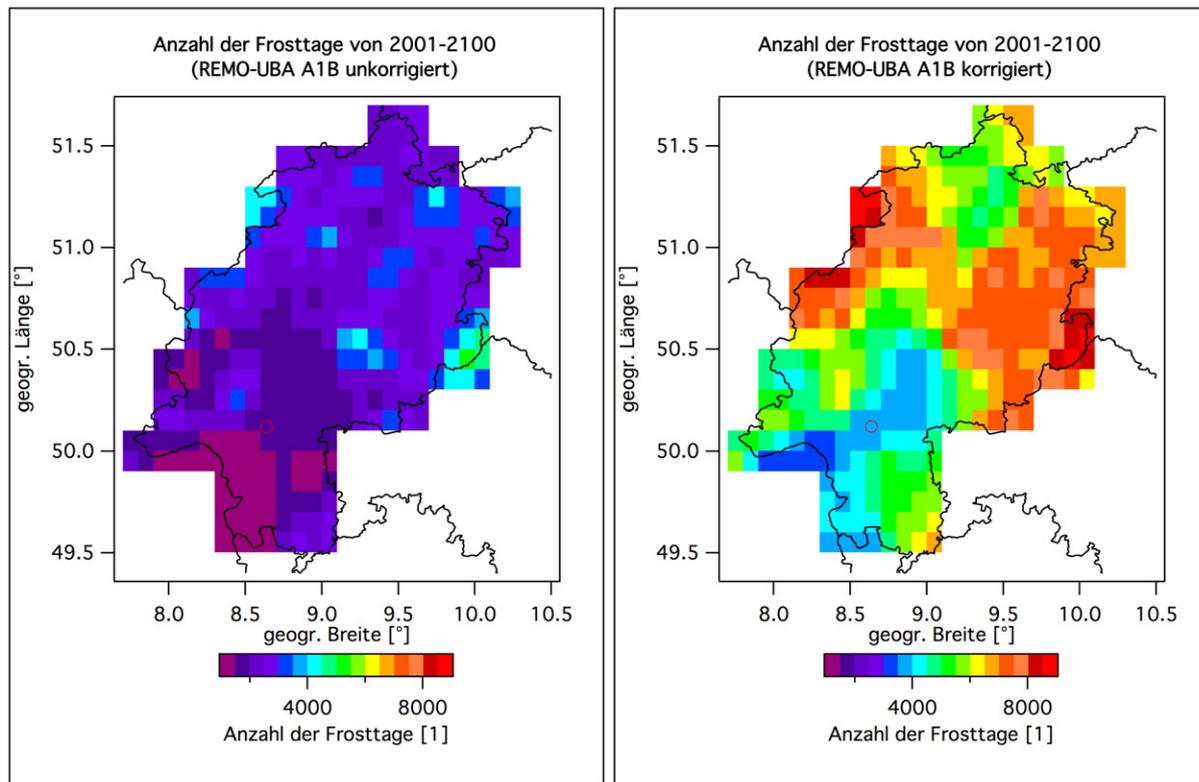


Abbildung 4.5: Anzahl der Frosttage im Zeitraum 2001-2100, berechnet mit unkorrigierten und korrigierten RUBA Tagesminimum-Temperaturen

4.2 Berechnung von Konfidenzintervallen für die Mittelwerte über verschiedene Klimamodelle

In den Ergebniskapiteln werden zu jedem 30-jährigen Mittelwert 95 %-Konfidenzintervalle angegeben. Da hier nicht nur Mittelwerte über 30 Jahreswerte, sondern zusätzlich Mittelwerte über die unterschiedlichen Ergebnisse, die zu Stande kommen, wenn man als Input für die Impaktmodelle Outputdaten unterschiedlicher RCM's verwendet, betrachtet werden müssen, wird die Berechnung entsprechend komplizierter. Um diese 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 RUBA und ECLM stark korreliert sind. Die Berücksichtigung derartiger Korrelationen machte die Berechnung der Konfidenzintervalle noch komplizierter (Kapitel 4.4.1 im LB).

Im Gegensatz zu RUBA und ECLM waren zwischen den 10 WETT-REG2010-Läufen nicht die einzelnen Jahreswerte, sondern die Mittelwerte über längere Zeiträume miteinander korreliert (Kapitel 4.4.2 und 4.4.3 im LB). **Abbildung 4.6** zeigt Jahresmittelwerte der Tagesmitteltemperatur T (über 10 Jahre gleitend gemittelt; Mittelwert über Hessen) in den 10 WETTREG2010-Läufen. Man erkennt ganz klar, dass die 10 WETTREG-Läufe keine unabhängigen Realisierungen des Klimageschehens darstellen. Es ist daher nicht sinnvoll, alle 10 WETTREG-Läufe mit in die Mittelung einzubeziehen, da die Ergebnisse ansonsten viel zu stark von den 10, zueinander sehr ähnlichen WETTREG-Ergebnissen

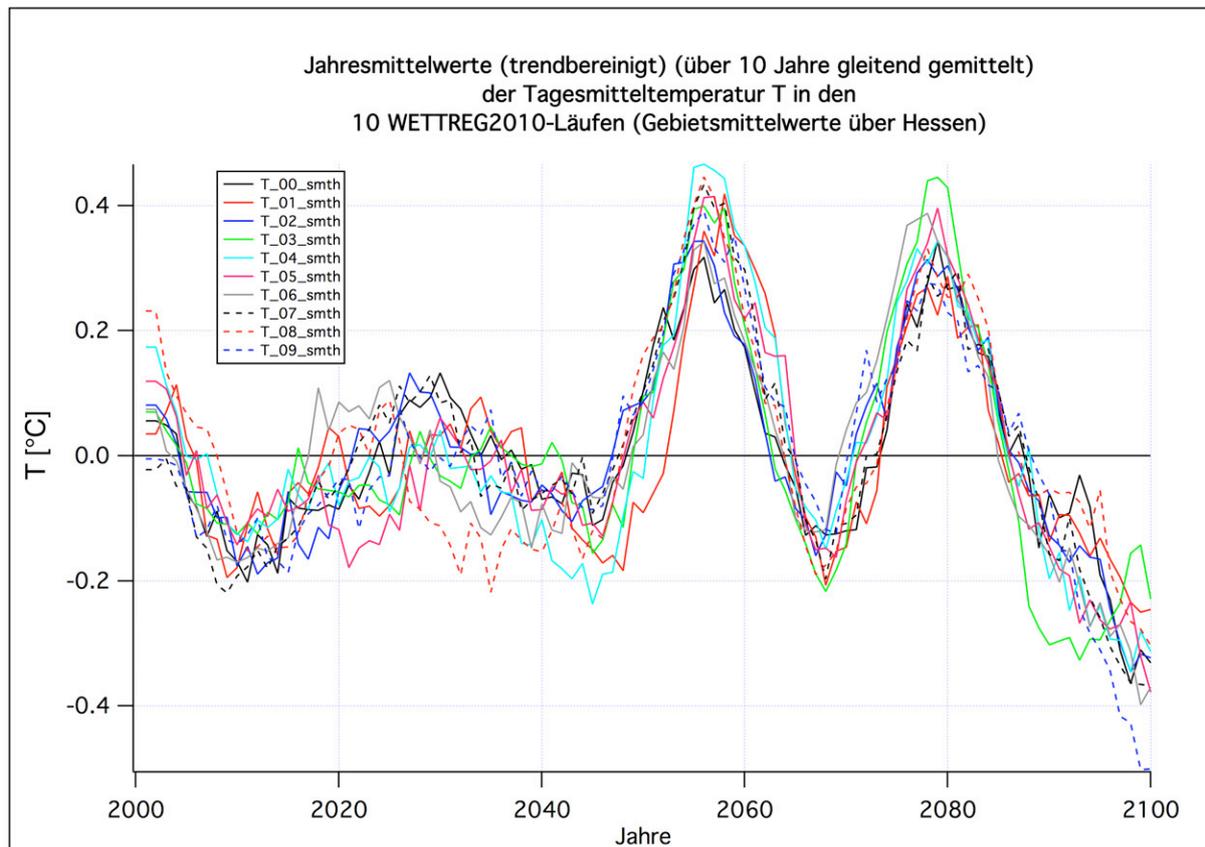


Abbildung 4.6: Jahresmittelwerte der Tagesmitteltemperatur T (über 10 Jahre gleitend gemittelt) in den 10 WETTREG2010-Läufen

beeinflusst würden. Man sollte besser nur ein oder zwei⁵ dieser Läufe für die Mittelwertbildung verwenden.

4.3 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](#)) genutzt.

Mit Hilfe der beiden im Projekt CHARIKO interessierenden CLC-Klassen 221 (Weinbauflächen) und 222 (Obst- und Beerenobstbestände) (siehe [Abbildung 4.7](#) links) und unter Verwendung weiterer in Kapitel 4.5 im LB angegebener Quellen wurden die für das Projekt CHARIKO signifikanten 19 Obst-, 8 Weinbau- und 4 Erdbeeranbaugitterpunkte bestimmt ([Abbildungen 4.7](#) rechts und [4.8](#)).

4.4 Verbesserungen der phänologischen Modelle

Die originalen phänologischen Modelle *für den Blühbeginn* [z. B. das Spring-Warming Modell ([Modell 11a](#)) ([Cannell & Smith, 1983](#)); siehe die Modellübersicht im Anhang [A](#)]

⁵ In CHARIKO wurden nur die Läufe 0 und 1 (WETTR0 und WETTR1) verwendet!

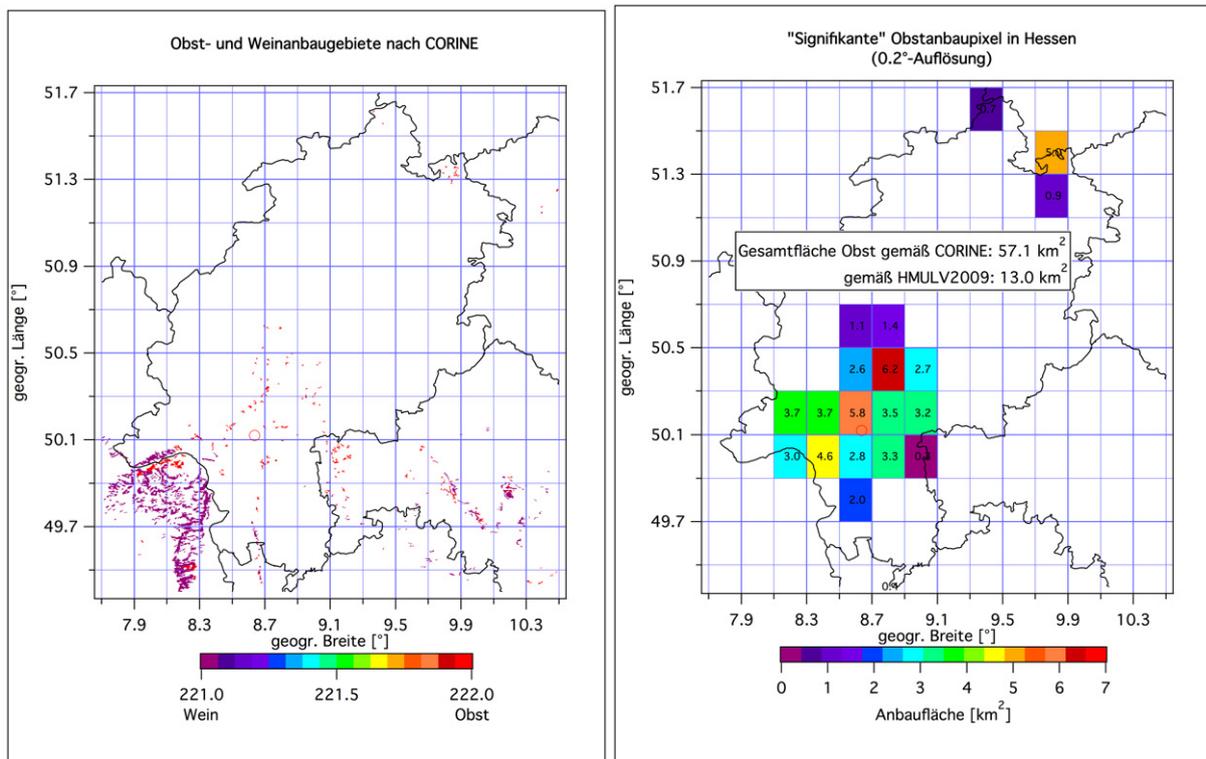


Abbildung 4.7: Obst- und Weinbaugebiete gemäß der CORINE Land Cover-Daten (links) und signifikante Obstanbaupixel (Baumobst und Beerenobstbestände) im Hessenrechteck. Informationen zu den Zahlenangaben in den Gitterpunkten findet man in Abschnitt 4.5 im LB.

weisen mehrere systematische Defizite auf (Blümel & Chmielewski, 2012): Wenn man physiologisch sinnvolle Parameterwerte für t_1 (Startwert der Wärmesumme) und T_{BF} (Temperaturschwellenwert) verwendet [siehe z. B. Formel (4.35) im LB], 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 (Abschnitt 4.6.1.2 im LB) führte in vielen Fällen auf viel zu hohe Werte für das Chilling-Requirement C^* . Die Einführung eines Terms, der von der Tageslänge (DAYLENGTH-Term) abhängt, in die Forcing-Funktion beseitigte alle diese Probleme fast vollständig und führte zu erheblich kleineren RMSE bei der Verifikation (Chmielewski et al., 2013 und Kapitel 4.6.5 im LB).

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 Sauerkirchse auch anhand von externen Validierungen bestätigt. 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).

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,

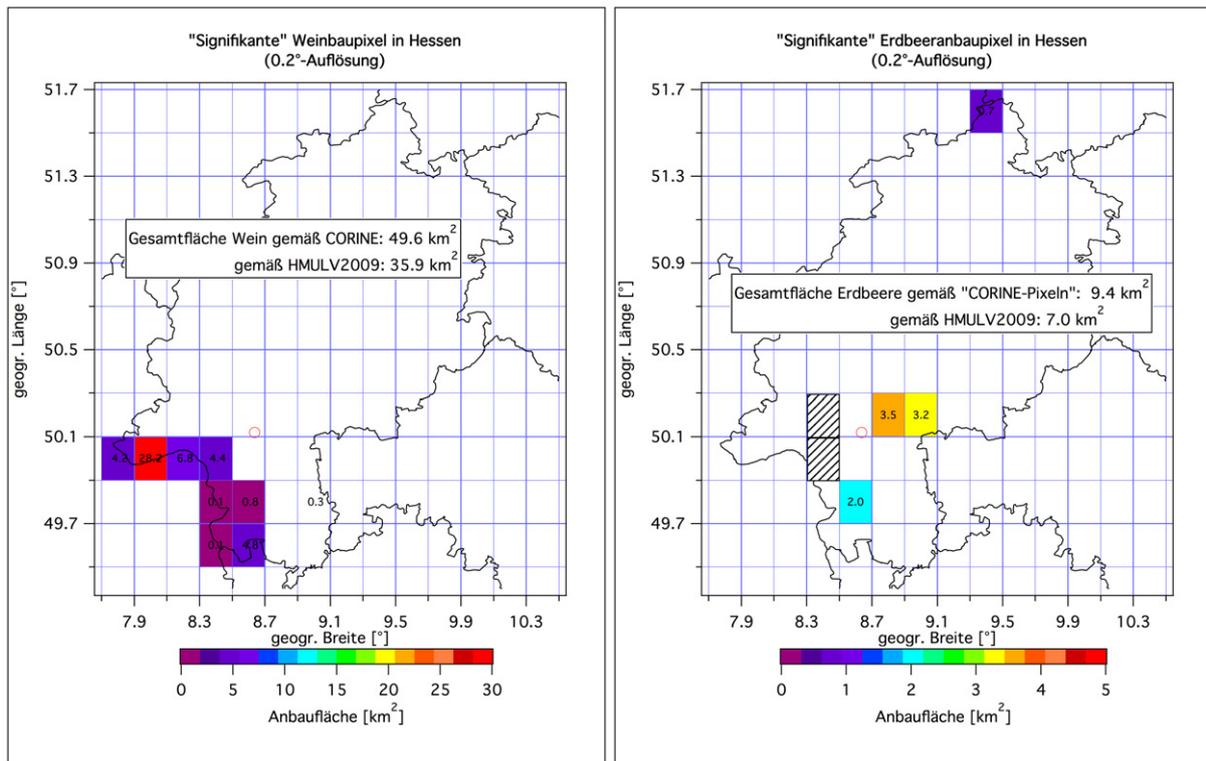


Abbildung 4.8: Signifikante Weinbaupixel (links) und Erdbeeranbaupixel (rechts) im Hessenrechteck

besonders im Modell 29ba (siehe Tabelle A.1), 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.

Eine ausführliche Diskussion, welche auch die Schwierigkeiten bei der Eichung des Chilling-Anteils in den Chilling-Forcing-Modellen berücksichtigt, findet man in Abschnitt 4.6 im LB.

Die Modelle zur Berechnung des Termins t_1 der Dormanzbrechung bzw. der Chillingsumme $S_c(t_s)$ bis zu einem bestimmten Stichtag t_s sind im Abschnitt 4.6.1.2 im LB beschrieben. Es wurden die *Weinberger-Eggert Methode* (Modell 1b) (Weinberger, 1950 und Eggert, 1951), das *Positive Utah Model* (Modell 1f) (Linsley-Noakes et al., 1995) und das *Dynamic Model* (Modell 1g) (Fishman et al., 1987) verwendet. Für die Chillingmodelle werden Temperaturen in stündlicher Auflösung benötigt. Diese wurden mit der Methode von Linsley-Noakes et al. (1995) (siehe auch Linvill, 1990) geschätzt.

Der Termin des Blühendes wurde mit einem einfachen phänologischen Modell (hier jedoch ohne DAYLENGTH-Term), welches Wärmesummen vom Blühbeginn an aufsummiert, berechnet. Der Tag, an dem die Summe einen bestimmten Schwellenwert erreicht, ist der Termin des Blühendes (siehe Kapitel 4.6.2 im LB und "Modell 10a" in Tabelle A.1).

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 Reifetermins viel zu groß ist (Abschnitt 4.6.3 im LB). Erst wenn man extrem negative Schwellenwerttemperaturen T_{BF} zulässt und/oder noch einen Exponenten $EXPO3$ einführt und ggf. den Reifetermin vom Blühbeginn entkoppelt (d. h. wenn man Modell 12a-R [Gleichung (4.49)

im LB] anstelle von Modell 10a-R [Gleichung (4.48) im LB] verwendet), erhält man realistische Trends für den Reifetermin. Die Schwellenwerttemperatur T_{BF} ist in diesem Fall nicht mehr als physiologische Größe zu verstehen, sondern stellt nun nur noch eine Eichkonstante dar. 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 Reifetermine ziemlich unsicher sind.

Die optimalen Parameter der verbesserten phänologischen Modelle wurden so bestimmt, dass der über alle 81 Gitterpunkte in Hessen gebildete *Root Mean Square Error* (RMSE) zwischen modellierten und beobachteten Werten minimal wurde. Tabellen für die so gewonnenen Parameter für die Chilling-Forcing-Modelle 29ba, 29fa, 29ga sowie das reine Forcing-Modell 12a (jeweils mit DAYLENGTH-Term) zur Berechnung des Blühbeginns findet man in Kapitel 4.6.6 im LB. Dort sind auch Tabellen für das Modell 10a (Berechnung des Blühendes) und 10a-R bzw. 12a-R (für die Pflückreife) angegeben.

4.5 Brechung der Dormanz

Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit für unvollständige Brechung der Dormanz werden alle Jahre gezählt, in denen der Termin t_1 der Dormanzbrechung (Release of Dormancy) 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 die gesuchte Wahrscheinlichkeit. Diese wird im Folgenden als NoRelease-Probx (mit $x = t_s$) oder auch kürzer als P_D abgekürzt. Zur Berechnung von t_1 wurden die drei in Kapitel 4.4 erwähnten Chilling-Modelle verwendet.

Um den Schaden, der durch unvollständige Brechung der Dormanz entsteht, abzuschätzen, wird das relative Chilling-Defizit $d_{rel} = (C^* - S_c(t_s))/C^*$ berechnet. C^* ist das von der Pflanzenart und -sorte abhängige Chilling-Requirement, und $S_c(t_s)$ die mit einem bestimmten Chilling-Modell berechnete Chillingsumme bis zum Stichtag t_s . Als Stichtag wurde der mittlere Blühbeginn der betrachteten Fruchtart im Zeitraum 1971-2000, zuzüglich der doppelten Standardabweichung der jährlichen Blühtermine und nach Abzug der kürzest möglichen ontogenetischen Entwicklungszeit (28 Tage; 21 Tage bei der Kirsche), angesetzt. Abhängig vom Wert von d_{rel} wird der Schaden s_D^o , der ohne Gegenmaßnahmen am Fruchtertrag entsteht, und der Schaden s_D^m , der trotz Maßnahmen (z. B. Einsatz von Chemikalien wie Dormex etc.) entsteht, bestimmt (Kapitel 4.7 im LB). s_D^o ist für $d_{rel} < 5.9\%$ null und für $d_{rel} > 35.3\%$ eins (100%). s_D^m hat für $d_{rel} < 35.3\%$ den Wert Null und für $d_{rel} > 58.8\%$ den Wert Eins. Die für t_s (101 bis 107 DOY⁶) und C^* (89 CP im Maximalfall; wird benutzt, wenn nichts anderes angegeben wird) bei den unterschiedlichen Fruchtarten verwendeten Werte sind in Tabelle 4.16 im LB gelistet.

Die Bekämpfungskosten (Material und Personal pro ha) in einem Jahr, in dem Gefahr besteht, dass die Dormanz nicht gebrochen wird ($d_{rel} > 0$), wurden grob mit 232 €/ha/a geschätzt.

⁶ Day Of Year = fortlaufend nummerierter Tag im Jahr (1...365).

4.6 Bestimmung von Frostschäden im Obstbau

Um das Risiko von Spätfrost⁷ 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. Juli⁸. 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.⁹ 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 DAYLENGTH-Term) bestimmt.

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.

Die Bestandstemperatur T_{veg} kann sich leider stark von der Lufttemperatur und auch von der häufig zur Einleitung von Frostschutzmaßnahmen benutzten Feuchttemperatur T_f unterscheiden. Um T_{veg} näherungsweise zu bestimmen, wird eine approximative Bestandstemperatur T_{mmf} berechnet, die von der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit sowie vom Gesamtbedeckungsgrad abhängt (Kapitel 4.8.3 im LB). Abhängig von dieser Temperatur wird dann zunächst mit einem exponentiellen Ansatz der Schaden, der an den Blüten entsteht, berechnet (Abschnitt 4.8.4 im LB). Diese Schaden ist aber nicht identisch mit dem Schaden s_F am gesuchten Obstertrag, da sich ein Blütenschaden relativ zum ungeschädigten Fall (bei dem vermehrt Ausdünnung, Fruchtfall etc. auftreten) im Laufe der Saison reduziert. Der Blütenschaden wird daher noch stückweise linear auf einen Schaden an der Frucht umgerechnet [Gleichung (4.119) im LB]. Diese von der Pflanzenart abhängige Umrechnung führt z. B. beim Apfel dazu, dass ein Blütenschaden von 25 % nur zu einem Fruchtschaden von 10 % führt. Ein Blütenschaden von 75 % entspricht hingegen einem Fruchtschaden von 70 %. Die Parameter für die exponentielle Blütenschadensfunktion hängen nicht nur von der Fruchtart, sondern auch noch davon ab, ob sich die Pflanze in dem Stadium vor dem Blühbeginn, zwischen Blühbeginn und Blühende, oder danach befindet.¹⁰ Die verwendeten Parameter und Angaben zu Quellen findet in Tabelle 4.17 im LB und im dazugehörigen Text.

Die bisher beschriebene Berechnungsmethode berücksichtigt allerdings noch nicht, dass mehrere, aufeinander folgende Schäden an verschiedenen Tagen innerhalb eines Winters auftreten können. Die so approximierten Schäden sind daher zu klein. Berücksichtigt man

⁷ Frühfrost- und Winterfrostschäden spielen in Hessen eine untergeordnete Rolle.

⁸ Nach diesem Termin ist bzgl. des vorhergehenden Winters kein Frost mehr zu erwarten.

⁹ Die Modelle können ohne diese Beobachtungsdaten nicht geeicht werden.

¹⁰ Bei Wein wird der Blühbeginn durch den Austriebsbeginn ersetzt!

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 [Gleichung (4.120) im LB].

Zusätzlich zu den Schäden wurden auch relative Häufigkeiten bzw. “Wahrscheinlichkeiten”, mit der Schäden bestimmter Stärke auftreten, berechnet. 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. 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.

Die Frostschutzberechnung wird von den Obstbauern im Allgemeinen nur dann durchgeführt, wenn der nächtliche Minimalwert der Feuchttemperatur T_f im Zeitraum vor dem Blühbeginn (ab t_{vor} -Tage vor 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. Für jede Nacht, in der Frostschutz betrieben werden muss, fallen nämlich Wasser, Personal und Maschinenkosten an. Folgende Angaben stammen von der OVA Jork (Obstbauversuchsanstalt der LWK Niedersachsen): Kosten für Frostschutzberechnung pro Nacht und Hektar [Personalkosten + (Maschinen + Wasserkosten)] in Gebieten ohne Gräben/Rückhaltenmöglichkeiten (d. h., dass Pumpen des Wassers aus Brunnen u. ä. nötig ist): $32\text{ €/Nacht/ha} + 180\text{ €/Nacht/ha} = \mathbf{212\text{ €/Nacht/ha}}$ (wird für alle Obstanbau-Gitterpunkte in Hessen verwendet). Es wird ferner angenommen, dass bei Frostschutzberechnung alle Ertragsschäden durch Frost vollkommen verhindert werden können, so dass dann $s_F = 0$ gilt.

Für Pfirsich, Aprikose und Erdbeere konnten aus verschiedenen Gründen keine Frostrechnungen durchgeführt werden (siehe Seite 105 im LB). Daher konnten für diese Obstarten auch keine Gesamtschäden und Gesamtkosten des Klimawandels bestimmt werden!

4.7 Schädlinge und Nützlinge im Obstbau

4.7.1 Berechnung des Apfelwicklergenerationsindizes I_A und der Apfelwicklerschäden s_A

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. Für biologische Feinheiten sei auf Görgens & Weber (2009) verwiesen. Dieses Modell wurde noch durch Einführung einer oberen Grenztemperatur verbessert (siehe unten), da diese in der Zukunft bei wärmeren Temperaturen wichtig werden kann.

In diesem einfachen Modell wird zunächst die Summe $GTSUM8$ über die effektiven Gradtage GT^{eff} nach (4.123) im LB berechnet. 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 der dann kürzer werdenden Tageslichtlänge nicht mehr verpuppen können. Die effektiven Gradtage (oberhalb von 10 °C) bestimmt man dadurch, dass man alle “Temperaturen oberhalb von 10 °C” (nach Abzug von 10 K) über alle Stunden des Tages aufsummiert und danach durch 24 dividiert. Zur Berechnung der Stundenwerte aus Tageswerten wurde wieder die Methode von [Linville \(1990\)](#) verwendet. Da die Entwicklung des Apfelwicklers bei Temperaturen oberhalb von 31 °C nicht weiter mit steigenden Temperaturen anwächst, wird für noch höhere Temperaturen immer der Wert 31 °C als Temperatur verwendet. Je nach dem Wert von *GTSUM8* wird nun entschieden, wie viele Generationen des Apfelwicklers im betrachteten Jahr auftreten (Tabelle 4.1). 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

Tabelle 4.1 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 4.1 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 Drittel¹¹ des Preises als Mostobst verkauft werden können. Weiterhin wer-

Tabelle 4.1: Apfelwicklergenerationsindex I_A , Schäden s_A und Bekämpfungskosten K_A 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

den Schäden s_A^{ext} und s_A^{int} angegeben, die auftreten, wenn man den Apfelwickler mit einer extensiven¹² bzw. einer intensiven Methode bekämpft. Die Kosten K_A^{ext} und K_A^{int} , die für

¹¹ Dieser Anteil schwankt stark. Der hier gewählte Werte ist ein von der OVA Jork grob geschätzter mittlerer Wert.

¹² Diese extensive Methode ist billiger in der Anwendung als die extensive Methode, jedoch nicht so wirkungsvoll.

diese extensiven bzw. intensiven Maßnahmen anfallen, hängen genauso wie die Schäden s_A^x (mit $x \in \{o, \text{ext}, \text{int}\}$) vom Generationsindex I_A ab und sind ebenfalls in der Tabelle 4.1 eingetragen.

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 4.1 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.

4.7.2 Berechnung der mittleren Bienenflugintensität

Neben zahlreichen Schädlingen gibt es aber auch Nützlinge im Obstbau. So werden z. B. ca. 90 % der Blüten beim Apfel von *Bienen* bestäubt. Bei der Kirsche sind es ca. 80 % und bei der Pflaume 65 %. Um Prognosen aufstellen zu können, ob sich das Flugverhalten der zur Befruchtung der Obstbäume notwendigen Bienen durch den Klimawandel verändert, wurde das **Bienenmodell** des DWD in SIMWASER integriert. Der DWD stellte freundlicherweise sein Bienenflugmodell BIENE.EXE (Friesland, 1998) zur Verfügung. Da die Rechnungen mit der bereits kompilierten Version zu umständlich geworden wären, wurde das Modell nachprogrammiert und in SIMWASER integriert. Es berechnet die mittlere Flugintensität [Werte zwischen 0 (kein Flug) und 1 (optimale Flugbedingungen)] an einem Tag als Tagesmittelwert aus stündlichen Werten des Produkts aus Gewichtsfunktionen F_K , die von der Temperatur T (in °C), der Windgeschwindigkeit V (in m/s), der Niederschlagsintensität R (in mm/h) und der Globalstrahlung G (W/m^2) abhängen [Gleichung (4.169) in Kapitel 4.10.6 im LB].

Dieses 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 (Kapitel 5.5.2) dargestellt, aber nicht weiter in den Schadens- und Kostenrechnungen berücksichtigt.

4.8 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 vorgenommen werden. Ferner wurden auch allgemeine Verbesserungen und viele Erweiterungen implementiert. Ein kurzer Überblick über das Modell wird in Kapitel 4.10.1 im LB gegeben.

Zunächst wurden die verbesserten phänologischen Modelle für Blühbeginn und Reife anstelle der originalen SIMWASER-**Phänologie** implementiert (Kapitel 4.10.3 im LB).

Sodann wurden Teile von SIMWASER so modifiziert, dass auch die **verschiedenen Obstarten** realistisch simuliert werden können (Abschnitt 4.10.4 im LB).

Dass SIMWASER plausible Werte errechnet, konnte für den Bodenwassergehalt am Standort Berlin-Dahlem über Dauerbrache, Sommergerste (jeweils Messwerte von 1953-2003) und Süßkirsche (2010 bis 2011) **verifiziert** werden (Kapitel 4.10.8 im LB).

Zusätzlich wurden verschiedene Methoden zur **Sommerberechnung** eingebaut. Wenn die Sommerberechnung in SIMWASER eingeschaltet ist, wird sie immer dann gestartet, wenn der Mittelwert der relativ nutzbaren Feldkapazität *WREL* [siehe (4.166) im LB] über die obersten 60 cm (30 cm bei der Erdbeere) des Bodens kleiner als 0.5 wird. In CHARIKO wurde folgende Bewässerungsstrategie gewählt, da diese von allen anderen im Kapitel 3.8.6 in [Chmielewski et al. \(2009a\)](#) am besten abgeschnitten hatte: Die theoretisch notwendige Bewässerungsmenge *BEW* (siehe unten) 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. *BEW* ist die Wassermenge, die (theoretisch) notwendig wäre, das aktuelle *WREL* (direkt vor der Sommerberechnung) auf ein $WREL = 0.8$ in allen Bodenschichten bis 60 cm Tiefe anzuheben.

Die durch die optionale Sommerberechnung zusätzlich anfallenden, mittleren **Maßnahmekosten** kann man dadurch abschätzen, dass man die über einen bestimmten Zeitraum gemittelte Bewässerungsmenge *BEW* mit den Bewässerungskosten *BEWKosten* [in €/mm/ha bzw. €/(10 000 l)] multipliziert. Für Hessen wurde der Wert $BEWKosten = 2.12$ €/ha/mm verwendet.

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-Gehaltes 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.¹³ 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*)

¹³ Eine gute Beschreibung der SRES-Szenarien und der damit zusammenhängenden IPCC-Storylines findet man in [Schuchardt & Wittig \(2010\)](#), S. 12 ff.

im Jahr t ist abhängig vom CO_2 -Gehalt $[\text{CO}_2]_t$ der Luft und nimmt mit steigendem CO_2 -Gehalt zu [Gleichung (4.171) im LB]. Der verwendete Ansatz wurde aus der Beschreibung des Pflanzen-Boden-Nährstoff-Modells CENTURY (CENTURY, 1993, Kapitel 3.14) entnommen. Für den die Steigung charakterisierenden Parameter β wurde für alle Fruchtarten außer für Wein folgender Wert gewählt: $\beta = 0.5$. Beim Wein wurde $\beta = 0.9$ verwendet. Auch der *minimale Stomatawiderstand* $r_{s,min}$ [genauer: minimale Blattwiderstand für Wasserdampfleitung (inkl. Kutikularwiderstand)] hängt vom CO_2 -Gehalt ab und nimmt mit steigendem CO_2 -Gehalt zu (d. h., dass die Leitfähigkeit abnimmt). Für $r_{s,min}$ wurde ein ähnlicher Ansatz wie für $PHOTSR(t)$ gewählt [Gleichung (4.172) im LB]. Der Steigungsparameter wurde hier aber für alle betrachteten Fruchtarten auf 0.9 gesetzt. Die *Photorespiration*, die in SIMWASER nur indirekt berücksichtigt wird und daher nicht weiter angepasst werden muss, nimmt hingegen ab.

In Bezug auf diese sogenannte CO_2 -Düngung besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf: Im Allgemeinen wird, in Übereinstimmung mit den oben erwähnten Formeln, erwartet, dass höhere CO_2 -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. 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. Weitere widersprüchliche Ergebnisse zur CO_2 -Düngung und Beispiele für die Auswirkungen dieses Effekts findet man ab Seite 147 im LB.

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 am häufigsten vorkommt. Daher wurde für jeden 0.2° -RCM-Rasterpunkt diejenige Horizontabfolge gewählt, die innerhalb dieses RCM-Gitterpunktes und zusätzlich innerhalb der als Wein, Obst und Beerenobst klassifizierten 0.001° -CORINE-Rasterpunkte (siehe z. B. die Punkte im linken Bild der Abbildung 4.7) am häufigsten vorkommt. Eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise findet man in Kapitel 4.10.9 im LB. Die Landnutzungs- und Bodendaten für die 24 Obst- und Weinbaugitterpunkte¹⁴ wurden dankenswerter Weise vom HLUg zur Verfügung gestellt.

Die für die Kosten- und Schadensberechnungen wichtigste SIMWASER-Outputgröße ist der *jährliche oberirdische Trockenmassenzuwachs* ΔTM . Dieser kann mit Hilfe einer artenspezifischen Erntekonstante c_{Ernte} , in die der sogenannte Ernteindex und die mittlere Standdichte der Obstbäume eingeht, in den **Feuchtmassen-Fruchtertrag** (in t/ha/a) umgerechnet werden (Kapitel 4.10.11 im LB). Werte für c_{Ernte} findet man in Tabelle 4.23 im LB.

¹⁴ Drei der 8 Weinbaugitterpunkte fallen in die 19 Obstanbaugitterpunkte (vgl. Kapitel 4.3)

Mit Hilfe von ΔTM kann auch der reine (relative) Ertragsschaden (**Yieldschaden** s_Y) für ein bestimmtes Gebiet definiert werden, der allein durch veränderte meteorologische Bedingungen und ggf. durch Wasserstress entsteht. 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:

$$s_Y(j, i) = 1 - \frac{\Delta TM_{j,i}}{\Delta TM_{(\text{opt. Bewässerung})}^{1971-2000;g}}. \quad (4.1)$$

$\Delta TM_{j,i}$ ist hierbei die gesamte Trockenmassenproduktion (in t/ha/a) im Jahr j am Gitterpunkt i und der Ausdruck $\overline{\Delta TM}_{(\text{opt. Bewässerung})}^{1971-2000;g}$ ist der Mittelwert über die Trockenmassenproduktion bei optimaler Bewässerung über die Jahre 1971-2000 und über die Gitterpunkte des Gebiets g . Eine ausführliche Diskussion dieser Größe, die bei Ertragszuwächsen auch negativ werden kann, findet man in Kapitel 4.10.12 im LB.

In fast allen Fällen wurde die betrachtete Größe x_{mjg} (z. B. $x = \text{Ertrag}$ oder *Yieldschaden* usw.) zunächst für alle Modelle m , alle Jahre j und alle Gitterpunkte g getrennt berechnet. Erst dann wurde für jedes Jahr und Modell der Mittelwert über die betrachteten Obstanbaugitterpunkte berechnet.¹⁵ Die genaue Vorgehensweise bei den SIMWASER-Auswertungen wird in Kapitel 4.10.10 im LB beschrieben.

4.9 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 dargestellt, wie man aus den bereits zuvor beschriebenen Einzelschäden s_j [$j \in \{D, F, A, Y\} = \{\text{Dormanz, Frost, Apfelwickler, Yield}\} = \{1, 2, 3, 4\}$] einen *Gesamtschaden* s_{ges} bestimmen kann. Weitere Schadensursachen, die hier nicht berücksichtigt werden, sind am Ende von Abschnitt 7 gelistet.

Die zuvor definierten Einzelschäden s_j sind leider nicht additiv. Es gilt daher nicht, dass die Summe über alle unterschiedlichen Schäden den Gesamtschaden s_{ges} ergibt. Man muss hingegen den Gesamtschaden mit der rechten Gleichung in Formel (4.2) berechnen. Ist in dieser Gleichung nur ein einziges s_j gleich eins (100 %; z. B. Totalschaden durch Frost), so ist natürlich auch der Gesamtschaden gleich 100 %. Man kann nun aus den s_i sogenannte *geordnete Schäden* ss_i konstruieren, für die dann tatsächlich die linke Gleichung der Formel (4.2) gilt.

$$\sum_j ss_j = s_{ges} = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - s_j) \quad \left(\neq \sum_j s_j \right) \quad (4.2)$$

Damit diese Gleichung 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

¹⁵ Wegen der Nichtlinearität der Impaktmodelle ergibt sich ein anderes Ergebnis als wenn man die Eingabegrößen zuerst über die Gitterpunkte oder Modelle mittelt und erst dann an die Impaktmodelle verfüttert.

Apfelwicklerschaden s_A eintritt. Zum Schluss entsteht dann noch ein Schaden durch Wassermangel oder dadurch, dass sich die Ernte verfrüht (s_Y). Die geordneten Schäden ss_i unter Berücksichtigung der Vorschäden berechnen sich dann aus den normalen Schäden s_i nach folgender Gleichung:

$$ss_i = s_i \cdot \prod_{j=1}^{i-1} (1 - s_j) \quad i \in \{1 \dots 4\}. \quad (4.3)$$

Bei $i = 1$ ist das Produkt von $j = 1$ bis 0 auf den Wert eins zu setzen. Eine ausführlichere Diskussion zur Bestimmung der Gesamtschäden findet man in Kapitel 4.11 im LB.

4.10 Berechnung der Kosten des Klimawandels für den Obstbau

Auch wenn man bei der Berechnung des Gesamtschadens nach (4.2) 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} der Gegenmaßnahmen** berechnen sich daher additiv als Summe über alle Schadensursachen i (siehe auch Kapitel 4.12 im LB):

$$K_{ges} := \sum_i K_i \equiv \overline{K_{ges}}^x = \sum_i \overline{K_i}^x \quad (4.4)$$

K_i sind die bereits in den Kapiteln 4.5 ff. beschriebenen Kosten, welche durch die Maßnahmen zur Vermeidung der verschiedenen Schäden anfallen. Der Mittelungsstrich mit x in (4.4) bezeichnet z. B. das Mittel über eine bestimmte 30 Jahresperiode (0=1971-2000, 1=2002-2031, 2=2031-2060, 3=2071-2100).

Die Kosten K_i zur Vermeidung von Schäden sind etwas ganz anderes als der **finanzielle Schaden am Produkt**. Zunächst kann man den “maximalen Verkaufswert” *MaxWert* des Produkts (der Jahresproduktion) (in € pro ha und a) als

$$MaxWert = Fruchtpreis \text{ [in €/t]} \cdot Fruchtertrag \text{ [in t/ha/a]} \quad (4.5)$$

ansetzen. *Fruchtertrag* ist hierbei der “Feuchtmassen-Fruchtertrag (Obstertrag) ohne irgendwelche Schäden”^{16, 17}. Der *Fruchtpreis* ist der vom Erzeuger (vom Obstbauern) erzielte Nettopreis. Dieser beträgt häufig nur zwischen 25 % und 40 % des Endverbraucherpreises im Einzelhandel. Eine ausführliche Diskussion dieser Größe findet man in Kapitel 4.12.2 im LB. Konkrete Zahlenangaben für die Größen *Fruchtpreis*, *Fruchtertrag* und *MaxWert* für alle hier betrachteten Fruchtarten und -sorten findet man in Tabelle 4.26 im LB.

Der **finanzielle Schaden *Ertragsausfall am Produkt*** bei einem Gesamtschaden s_{ges} berechnet sich aus *MaxWert* als

$$Ertragsausfall = MaxWert \cdot s_{ges}. \quad (4.6)$$

¹⁶ Siehe Kapitel 4.8 und Gleichung (4.173) im LB, beachte aber das am Ende von Abschnitt 4.10.11 im LB auf Seite 159 im LB Gesagte!

¹⁷ Beim Yieldschaden s_Y bedeutet “kein Schaden”, dass gerade der mittlere Ertrag des Zeitraums 1971-2000 bei optimaler Bewässerung erwirtschaftet wird [Gleichung (4.1)].

Ist der Gesamtschaden $s_{ges} = 1$, so hat man einen Schaden von *MaxWert* (das gesamte Produkt ist dann zerstört) (für Feinheiten siehe wieder Kapitel 4.12.2 im LB).

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 Schadensvermeidungs-**Strategien** 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 **wenigen** 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 **gemäßigten** Maßnahmen) wird der Apfelwickler wie bei der “w”-Strategie extensiv bekämpft. Zusätzlich wird aber bei Bedarf auch Sommerberegnung durchgeföhrt. 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 Sommerberegnung wird bei Bedarf angewendet. Zusätzlich wird aber, wenn nötig, auch Frostschutzberegnung durchgeföhrt. 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 4.2** 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 durchföhrt. 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 durchgeföhrtten Maßnahmen vollständig verhindert wird. s_Y^o und s_D^o bezeichnen den Yieldschaden und den Dormanzschaden, der **ohne** Sommerberegnung bzw. ohne Einsatz von Dormanz brechenden Mitteln auftritt. s_Y^m und s_D^m kennzeichnen die kleineren Restschäden (oder sogar Gewinne), die **mit** Sommerberegnung bzw. mit Einsatz von Dormanz brechenden

Tabelle 4.2: 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

Mitteln auftreten. Zusätzlich muss man bei *Yield* noch unterscheiden, ob mit oder ohne CO₂-Düngung gerechnet wurde.

Die “Kosten zur Minimierung der Schäden” in den unterschiedlichen Strategien sind in **Tabelle 4.3** gelistet.

Tabelle 4.3: Kosten zur 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}

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 4.11) wieder spürbar, da sich dann die Dormanzschäden und -Kosten in beiden Strategien stark¹⁸ unterscheiden¹⁹.

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-w” bedeutet z. B., dass vor 2001 die “w”-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.

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 (4.2) und die Gesamtkosten K_{ges} mit Hilfe von Gleichung (4.4), indem man die in den Tabellen gelisteten Werte für s_j bzw. K_i dort einsetzt.²⁰

¹⁸ Zumindest dann, wenn die Nichtbrechungswahrscheinlichkeit *NoReleaseProb* größere Werte (z. B. 20%) annimmt.

¹⁹ Bei der m-Strategie werden die Dormanzschäden bekämpft, bei der v-Strategie nicht.

²⁰ 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!

Die **Rentabilität** der Strategie B gegenüber der Strategie A kann man durch den *Nettogewinn* quantifizieren, den man erwirtschaftet, wenn man die Strategie B anstelle der Strategie A verwendet (siehe auch Kapitel 4.12.3 im LB):

$$\text{Nettogewinn(durch B gegenüber A)} = \underbrace{(s_{ges}^A - s_{ges}^B)}_{\text{Schadensanteil}} \cdot \text{MaxWert} + \underbrace{(K_{ges}^A - K_{ges}^B)}_{\text{Maßnahmeanteil}}. \quad (4.7)$$

Der Gewinn ergibt sich gemäß der Formel ganz einfach als Differenz der Ertragsausfälle beider Strategien plus der Differenz der Maßnahmekosten, die bei der jeweiligen Strategie anfällt. Mittelt man diese Gleichung über einen bestimmten Zeitraum und ein bestimmtes Gebiet, so erhält man die mittleren Einsparungen (in €/ha/a) für diesen Zeitraum und das betrachtete Gebiet. Ist der *Nettogewinn* positiv, so ist die Strategie B gegenüber Strategie A rentabel.

Ähnlich wie in Formel (4.7) 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 im Mittel über die Zeitspanne x gegenüber dem Mittelwert im Zeitraum 1971-2000 (Zeitraum "0") pro Jahr und Hektar mehr aufbringen muss, gilt

$$KK_g^{B-A}(x) := \underbrace{\left(\overline{s_{ges,g}^B}^x - \overline{s_{ges,g}^A}^0\right)}_{\text{Schadensanteil}} \cdot \text{MaxWert} + \underbrace{\left(\overline{K_{ges,g}^B}^x - \overline{K_{ges,g}^A}^0\right)}_{\text{Maßnahmeanteil}}. \quad (4.8)$$

Im Gegensatz zu (4.7) 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). Das wird durch die entsprechenden Mittelungsbalken ausgedrückt. Der Hochindex "B" bzw. "A" bezeichnet die bei der Schadensbekämpfung verwendete Strategie 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.

Genauere Informationen zu den verwendeten Strategien, zur Rentabilität und den Gesamtkosten findet man in Kapitel 4.12.4 im LB.

4.11 Worst Case Szenarios

Da die Berechnung des Dormanzbrechungstermins und des Dormanzschadens (Kapitel 4.5) sehr unsicher ist und für eine zuverlässige Vorhersage dieser Größen noch weitere Forschung geleistet werden muss, wurde in Absprache mit dem HLUG 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 im LB annimmt.

Für diese sogenannten *Worst Case Szenarien* wurde angenommen, dass die Dormanz im Zeitraum 2071-2100 im Durchschnitt 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 Methode aus Kapitel 4.5 berechnet. Das relative Chilling-Defizit wurde dabei auf $d_{rel} = 42.3\%$ gesetzt, so dass der Dormanzschaden s_D^0 ohne Gegenmaßnahmen 100% und der mit Maßnahmen $s_D^m = 30\%$ beträgt. Für die zwischen diesen Jahren liegenden Jahre

wurde angenommen, dass die Dormanz immer gebrochen wurde.²¹

Die Jahre, in denen die Dormanz nicht gebrochen wird, wurden rein zufällig mit einer Wahrscheinlichkeit $1/x \cdot 100\%$ ausgewählt, so dass die NoRelease-Jahre, welche den unterschiedlichen Modellen zugeordnet sind, statistisch unabhängig sind. Würde man die Jahre nicht zufällig wählen, sondern z. B. bei $x = 5$ fordern, dass in allen Modellen die Dormanz in den Jahren 2075, 2080, ..., 2100 nicht gebrochen wird, so erhielte man wegen der nun großen Korrelation "der Modelle" untereinander unrealistisch große Standardabweichungen für den *über die Modelle gemittelten* Mittelwert der betrachteten Dormanzschadensgrößen (siehe Kapitel 4.13 im LB).

Man muss bei dieser Vorgehensweise, die realistische Konfidenzintervalle liefert, 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.²² 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 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.

²¹ Das war bei den *normalen* Rechnungen mit Modell 1g 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.

²² 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.

5 Wesentliche 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 **J**, auf die in den folgenden Abschnitten verwiesen wird.

5.1 Mögliche klimatische Veränderungen in Hessen

Für die Klimagrößen 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 im LB berechnet wurden.

Obwohl es, wie in Kapitel 4.4 im LB 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 einige ausgewählte Beispiele. Ausführliche Tabellen mit monatlichen, saisonalen und Jahresmittelwerten für die Zeiträume 1971-2000, 2002-2031, 2031-2060 und 2071-2100 sowie die Differenzen 2071-2100 vs. 1971-2000 (als Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte) sind im **Anhang B** für ausgewählte Größen und im **Anhang B im LB** für alle 10 Klimagrößen in tabellarischer Form und für die Differenzen auch in graphischer Form dargestellt.

Abbildung 5.1 (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 Klimamodellläufen, obwohl hier für die 3 dynamischen Modelle BIAS korrigierte Werte verwendet wurden.

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!

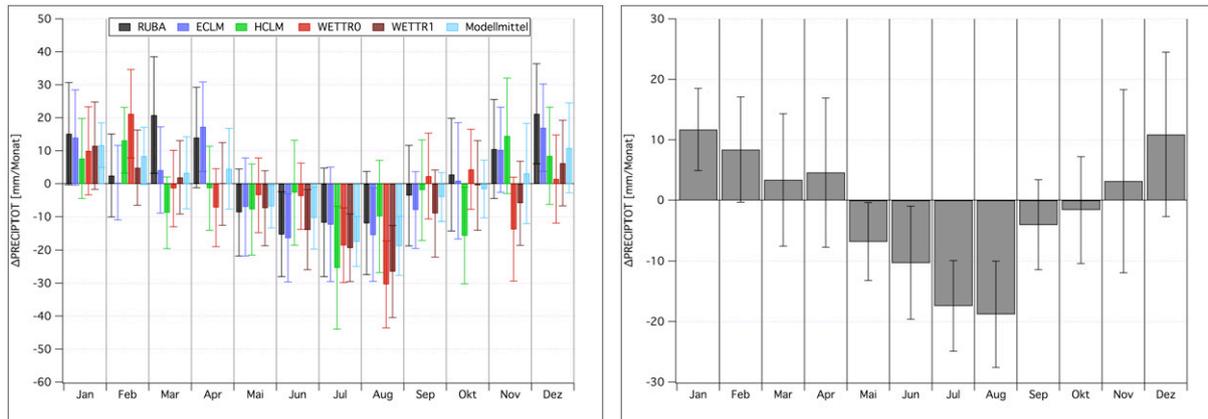


Abbildung 5.1: Differenz der langjährigen Mittelwerte der **Monatssummen des Gesamtniederschlags** (PRECIPOT; in mm/Monat) für verschiedene RCM's (2071-2100 vs. 1971-2000) (Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Links: Für die 3 dynamischen Modelle und 2 WETTREG-Läufe; rechts: Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe.

Tabelle 5.1: Differenz (2071-2100 vs. 1971-2000) der langjährigen Mittelwerte der **Monatssummen des Gesamtniederschlags** (PRECIPOT; in mm/Monat); Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte und über die 5 Klimamodellläufe. 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

Daher ist es sinnvoll, Mittelwerte über die Klimamodellläufe 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 Klimamodellläufe nicht wesentlich kleiner werden als die der Einzelmodellläufe, da außer der Varianz innerhalb eines Modelllaufs noch die Varianz zwischen den Modellläufen berücksichtigt werden muss. Im Januar ist (im Klimamodelllaufmittel) 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.

Abbildung 5.2 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 Klimamodellläufe. Alle Änderungen, auch die der Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe, sind signifikant von null verschieden. Die Änderungen von T liegen zwischen +1.9 °C im April und +4.4 °C im August.

Als Beispiel für die Auswertung von saisonalen Daten sind in **Abbildung 5.3** die Differenzen der saisonalen Mittelwerte der Lufttemperatur aufgetragen. Im rechten Bild findet man die Mittelwerte dieser Differenzen über die jeweils 5 Klimamodellläufe (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 Klimamodellläufe (+3.4 K). Alle Differenzen sind hoch signifikant von null verschieden.

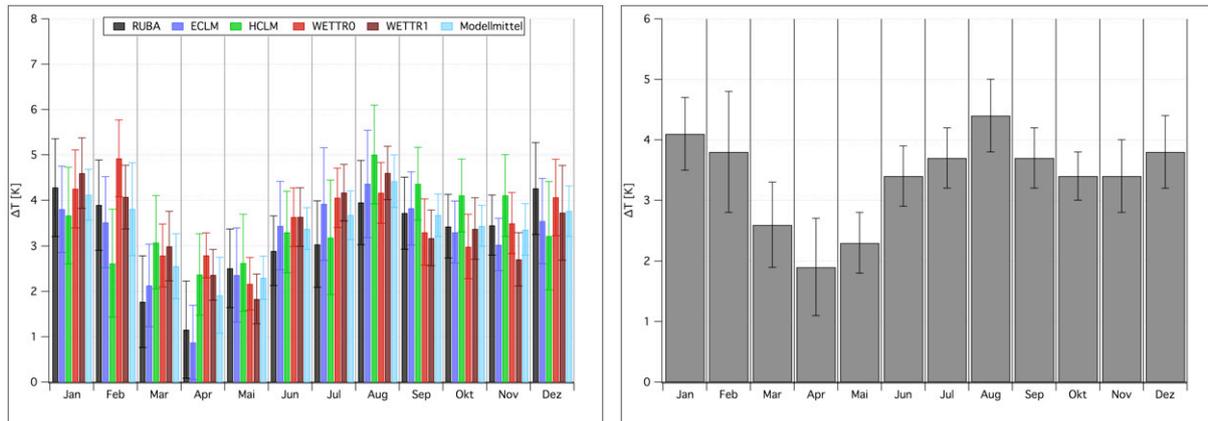


Abbildung 5.2: Differenz der langjährigen Mittelwerte der **Monatsmittelwerte der 2m-Lufttemperatur T** für verschiedene RCM's (2071-2100 vs. 1971-2000) (Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte). Links: Für die 3 dynamischen Modelle und 2 WETTREG-Läufe; rechts: Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe.

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

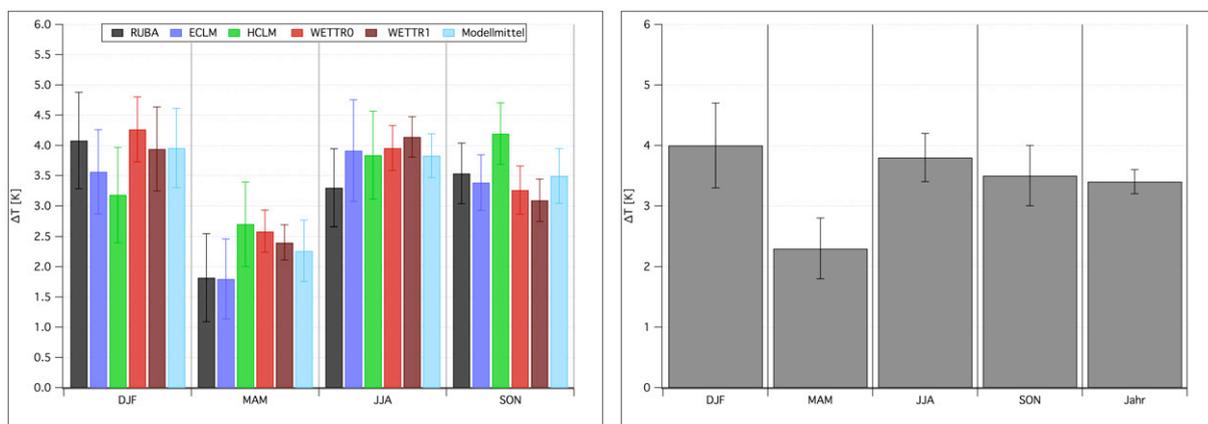


Abbildung 5.3: Differenz der langjährigen Mittelwerte der **saisonalen Mittelwerte der 2m-Lufttemperatur T** für verschiedene RCM's (2071-2100 vs. 1971-2000). Links: Für die 3 dynamischen Klimamodelle und 2 WETTREG-Läufe; rechts: Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe. Jeweils Mittelwerte über die 19 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 5.4** 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 Ab-

bildung 5.4. Alle Änderungen sind scheinbar signifikant. [Die Fehlerbalken wurden hier ohne die Modifikation (4.34) im LB, 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 4.2 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 110), so ist streng genommen nur die Abnahme von -0.2 m/s im September signifikant.

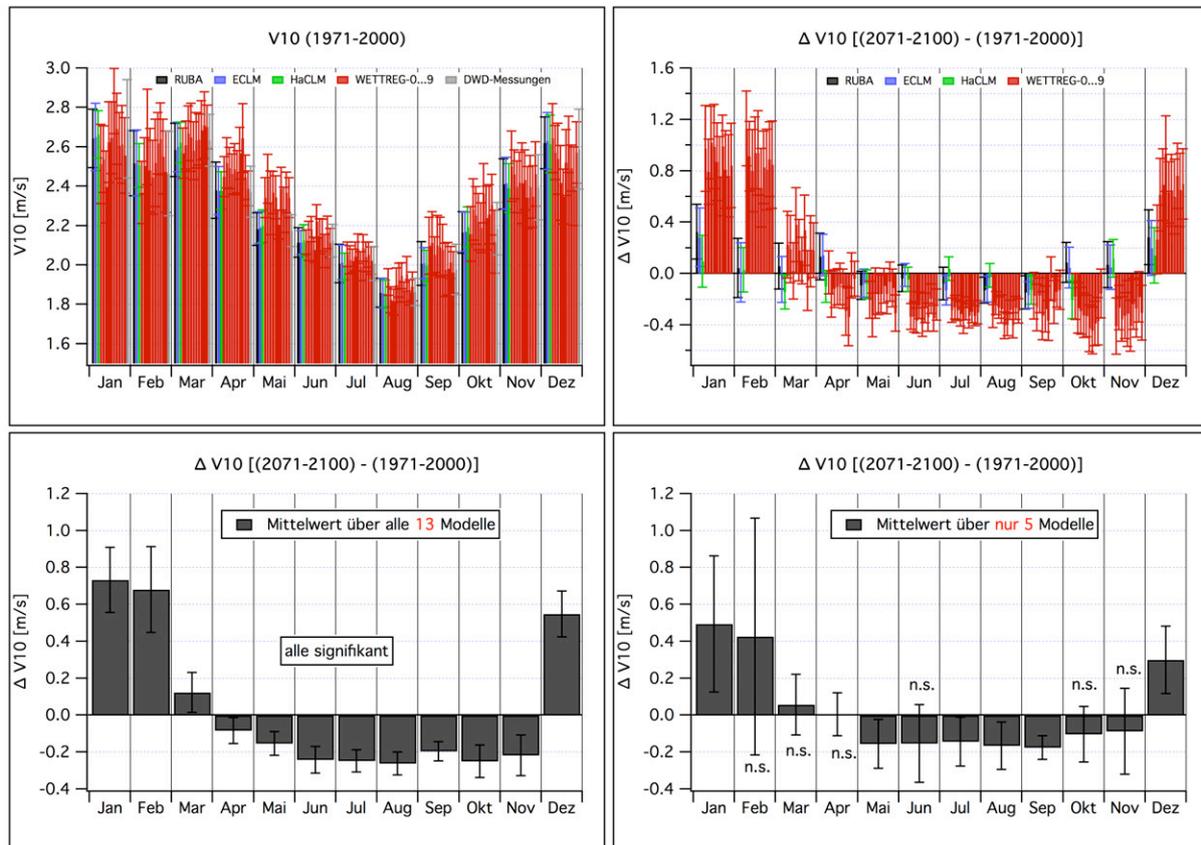


Abbildung 5.4: Langjährige Mittelwerte (1971-2000) der Monatsmittelwerte der 10 m-Windgeschwindigkeit V_{10} für jedes der 3 dynamischen Klimamodelle und der 10 WETTREG-Läufe (links oben); Differenz der Mittelwerte (2071-2100 vs. 1971-2000) für jeden der 13 Klimamodellläufe (oben rechts); Differenz der “Mittelwerte über die 13 Klimamodellläufe” (unten links); Differenz der Mittelwerte über nur 5 Klimamodellläufe (unten rechts). Jeweils Mittelwerte über alle Gitterpunkte im (politischen) Hessen.

Abbildung 5.5 entspricht im Prinzip der Abbildung 5.4, 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 wieder wegen der Nichtberücksichtigung der “Korrelation ρ zwischen den Klimamodelllaufmittelwerten” (Kapitel 4.4.3 im LB) viel zu kurz. [Die Korrelation kann nicht angewendet werden, da nicht genügend Klimamodellläufe zur Bestimmung von ρ zur Verfügung stehen.] Mittelt man nur über 5 Klimamodellläufe, so werden die Konfidenzintervalle wesentlich größer

(rechtes Bild der Abbildung 5.5) und die relative Luftfeuchte nimmt im Sommer und Herbst [besonders im Juli (-6%) und August (-8%)] und im Jahresmittel (-2%) signifikant ab.

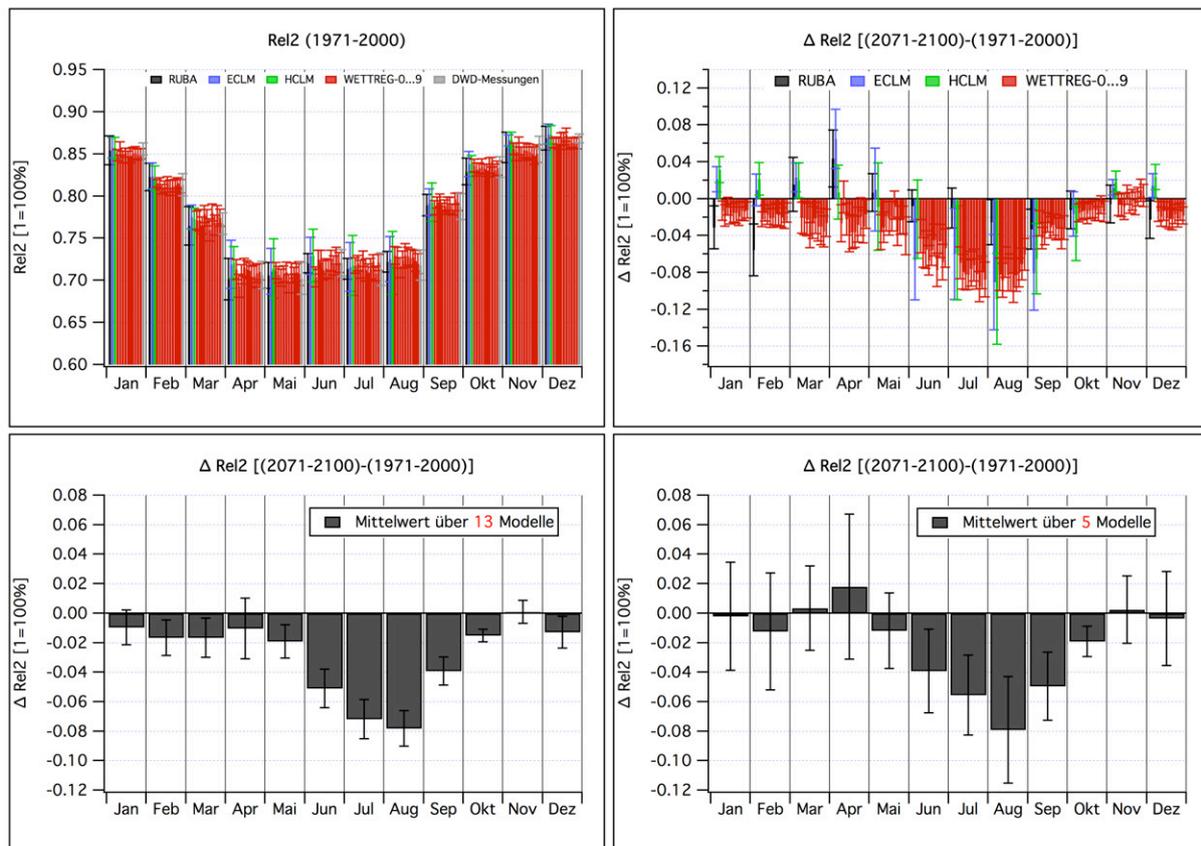


Abbildung 5.5: Langjährige Mittelwerte (2071-2100) der Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte Rel_2 für die 3 dynamischen Klimamodelle und die 10 WETTREG-Läufe (links oben); Differenz der Mittelwerte (2071-2100 vs. 1971-2000) für jeden der 13 Klimamodellläufe (oben rechts); Differenz der “Mittelwerte über die 13 Klimamodellläufe” (unten links); Differenz der Mittelwerte über nur 5 Klimamodellläufe (unten rechts). Jeweils Mittelwerte über alle Gitterpunkte im (politischen) Hessen.

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 Klimamodellläufe wird aus den oben genannten Gründen immer nur ein Mittelwert aus den Ergebnissen mit Rechnungen aus den Outputwerten von RUBA, ECLM, HCLM und den ersten beiden WETTREG-Läufen 0 und 1 angegeben. Räumlich wurde immer über die 19 signifikanten Obstanbaugitterpunkte (vgl. Abschnitt 4.3 und Abbildung 4.7 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: Das Jahresmittel der Lufttemperatur nimmt nach diesem Szenario um 3.4 K zu (Tagesmaximum: 3.7 K und Tagesminimum: 3.1 K). Jahreszeitlich treten die stärksten Temperaturänderungen im Winter: 4.0 K,

gefolgt vom Sommer: 3.8 K, Herbst: 3.5 K und Frühling: 2.3 K auf. Der Gesamtniederschlag nimmt im Sommer hoch signifikant ab (-47 mm) und im Winter ($+31$ mm), besonders im Januar ($+12$ mm), signifikant zu. Der Jahresmittelwert verändert sich jedoch nicht signifikant. Die relative Luftfeuchte nimmt im Sommer und Herbst, besonders im Juli (-6%) und August (-8%), sowie 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 Veränderungen der anderen untersuchten Größen (Windgeschwindigkeit, Gesamtbedeckungsgrad, Globalstrahlung, Luftdruck) ist zum Teil nur geringfügig bzw. nicht statistisch gesichert oder betrifft nur eines der Klimamodelle, wie beispielsweise die signifikante Zunahme der Globalstrahlung im Sommer in WETTREG.

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*), gegeben. Zur Berechnung wurden die im Kapitel 4.6.6 im LB beschriebenen, “optimierten” phänologischen Modelle verwendet. Weitere Ergebnisse, auch für die anderen Fruchtarten, findet man im **Anhang C** und **D**.

Abbildung 5.6 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 [mit DAYLENGTH-Term (4.93) im LB; siehe auch siehe Anhang A] 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.

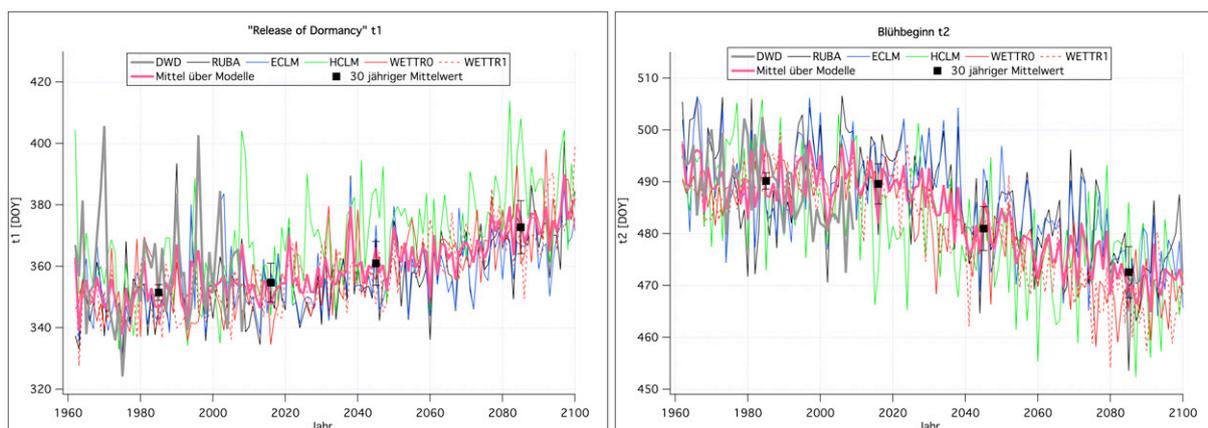


Abbildung 5.6: “Release of Dormancy t_1 ” (links) und **Blühbeginn t_2** (rechts) beim frühreifen **Apfel**, berechnet mit dem phänologischen Modell 29ba mit DAYLENGTH-Term. Jede der dünnen Kurven bezieht sich auf eines der 5 Klimamodellläufe, von denen die Temperaturen im phänologischen Modell 29ba benutzt wurden. Dargestellt sind Mittelwerte über die 81 Gitterpunkte in Hessen.

Das rechte Bild der **Abbildung 5.6** 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

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 einsetzte, folgt.

Mittelt man die 5 Kurven der Abbildung 5.6, welche sich auf die regionalen Klimamodelle beziehen, so erhält man die schwarzen Kurven der **Abbildung 5.7** unten (identisch mit den magenta-farbenen Kurven aus Abbildung 5.6). 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.

Die oberen beiden Bilder der Abbildung 5.7 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 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.

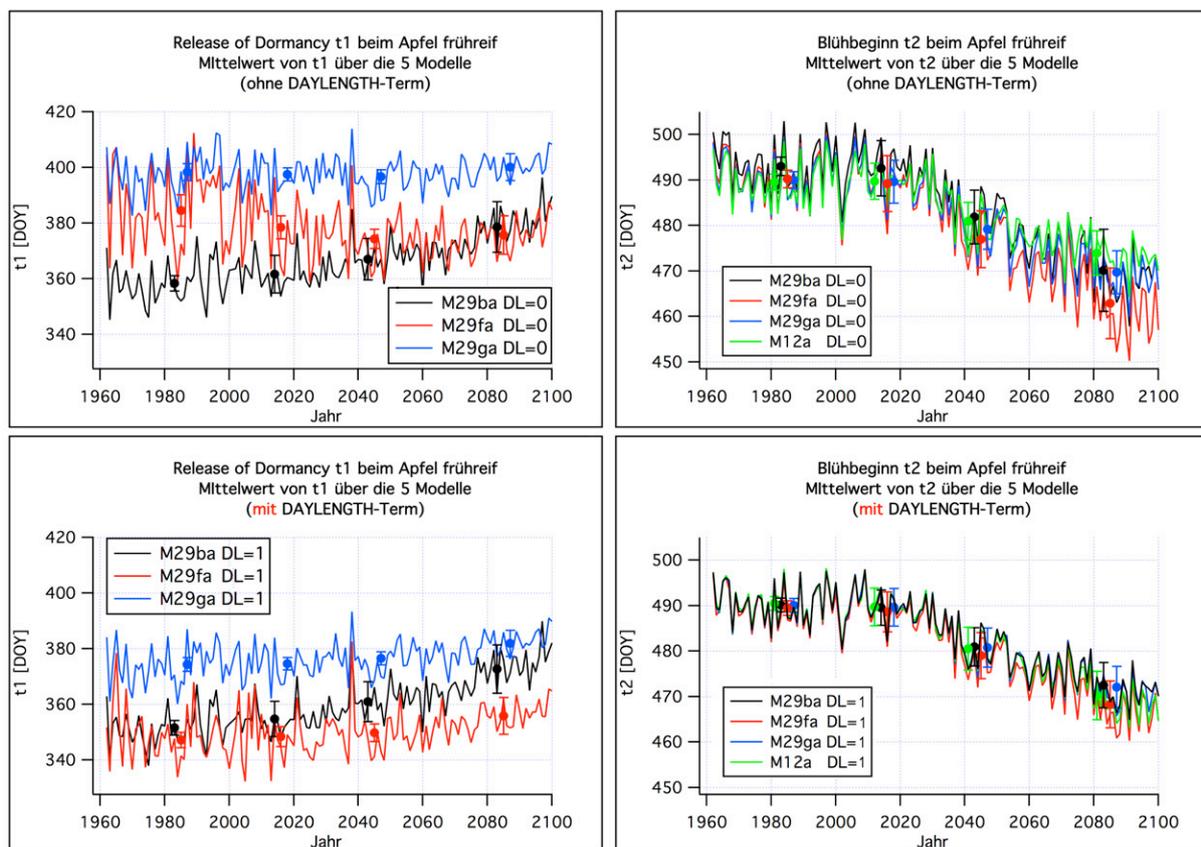


Abbildung 5.7: “Release of Dormancy t_1 ” (links) und Blühbeginn t_2 (rechts) beim frühreifen Apfel, berechnet mit verschiedenen phänologischen Modellen ohne (oben) und mit (unten) DAYLENGTH-Term. Dargestellt sind Mittelwerte der Ergebnisse, die mit den Temperaturen der 3 dynamischen Modelle und der WETTREG-Läufe 0 und 1 berechnet wurden. Die Punkte markieren Mittelwerte über 30-Jahresabschnitte, die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

In **Abbildung 5.8** 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.

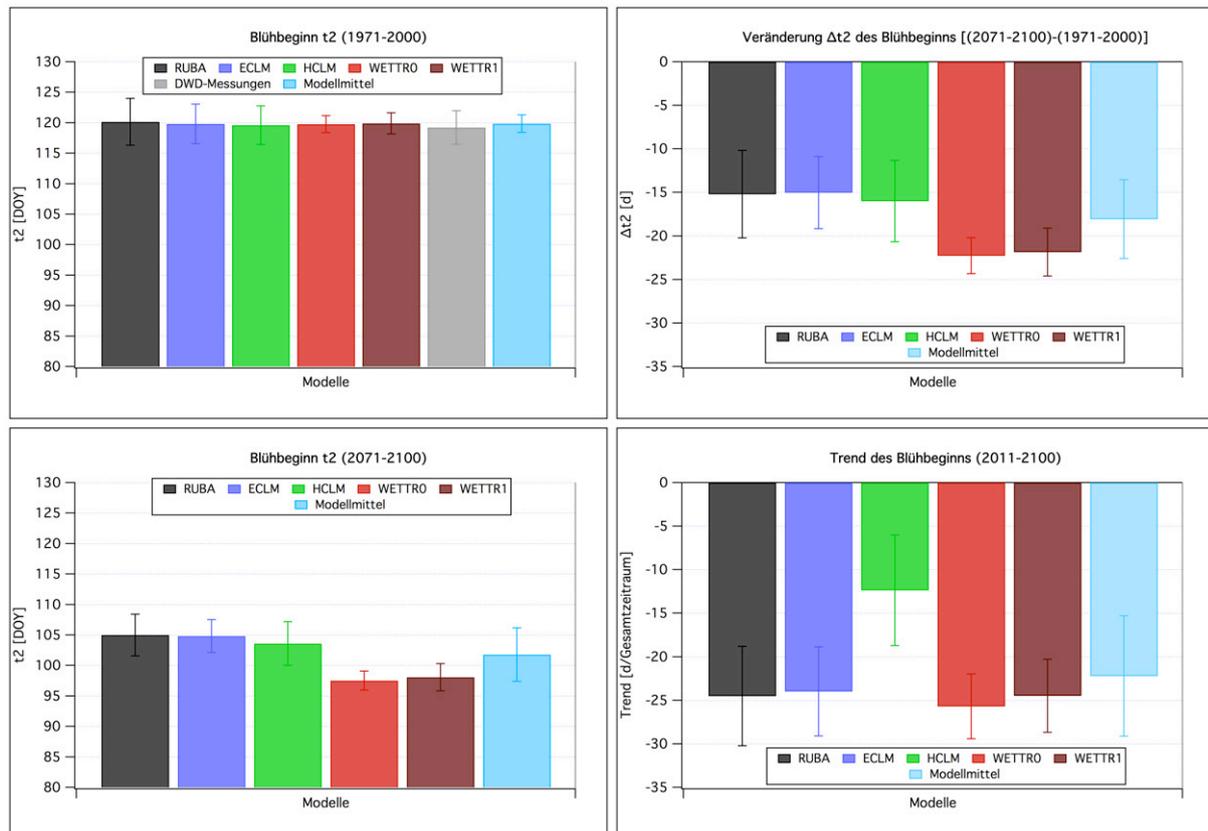


Abbildung 5.8: links: Mittelwerte der Termine des **Blühbeginns** (oben: 1971-2000; unten: 2071-2100); rechts: Differenz der Blühbeginnstermine (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 Klimamodelle und das Mittel über diese 5 Klimamodelle. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term 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 5.7** 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 5.9**) findet der Blühbeginn mehr als 3 Wochen früher statt. Im Zeitraum 2071-2100 fällt er bei WETTREG auf einen Termin Mitte März. Die Verfrüherung von im Mittel über die Modelle -20 d (± 5 d) ist noch etwas extremer als beim Apfel. Beim Trend (2011-2100) beträgt die Verfrüherung sogar -22 d (± 8 d) und wäre betragsmäßig noch größer, wenn man mit den Temperaturen aus dem HCLM nicht eine außergewöhnlich kleine Verfrüherung berechnen würde (grüner Balken in **Abbildung 5.9** rechts unten).

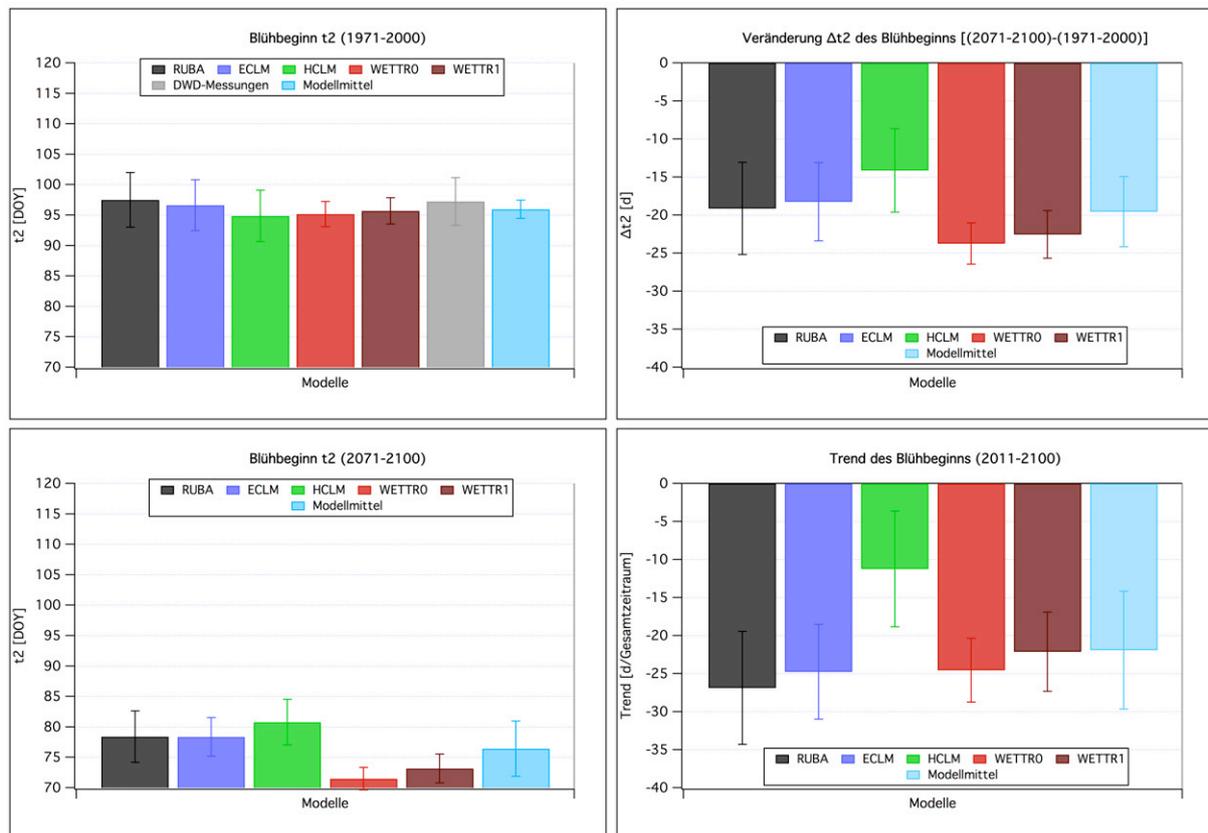


Abbildung 5.9: links: Mittelwerte der Termine des **Blühbeginns** (oben: 1971-2000; unten: 2071-2100); rechts: Differenz der Blühbeginnstermine (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 Klimamodelle und das Mittel über diese 5 Klimamodelle. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ga mit DAYLENGTH-Term berechnet. Dargestellt sind Gebietsmittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen bei der **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** für den Apfel und die Aprikose und **Anhang C im LB** für alle 7 Fruchtarten). 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 im LB**).

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 Verfrüfung 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 im LB**).

5.2.2 Mögliche Veränderungen im Beginn der Pflückreife und der Reifeperiodenlänge

Abbildung 5.10 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 5.6** 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.

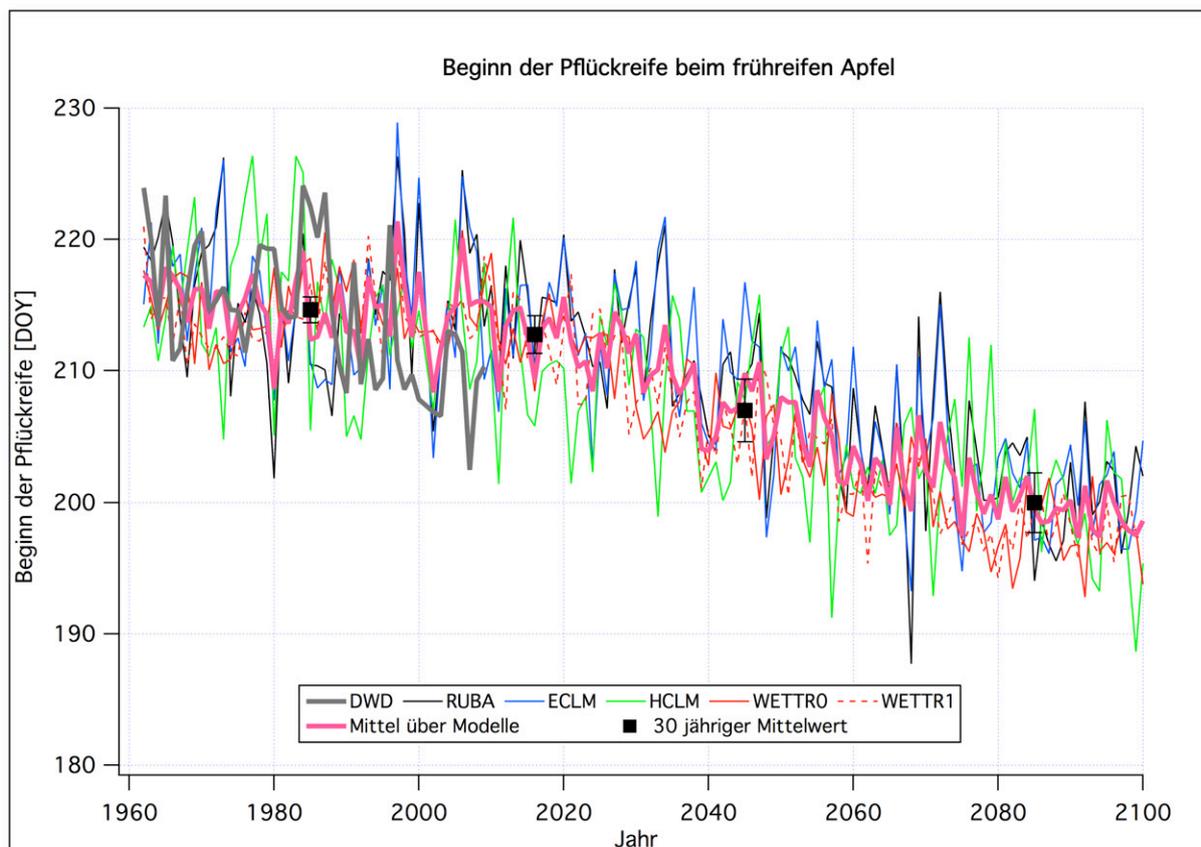


Abbildung 5.10: Beginn der **Pflückreife** t_3 von **frühreifem Apfel**, berechnet mit Modell 12a-R. Jede der dünnen Kurven bezieht sich auf eines der 5 Klimamodelle, von denen die Temperaturen im phänologischen Modell 12a-R benutzt wurden. Dargestellt sind Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte. 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 5.11** 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 5.10**).

Weitere umfangreiche Tabellen für den Beginn der Pflückreife für verschiedene Frucht-arten und dessen zukünftige Veränderungen findet man im **Anhang E**.

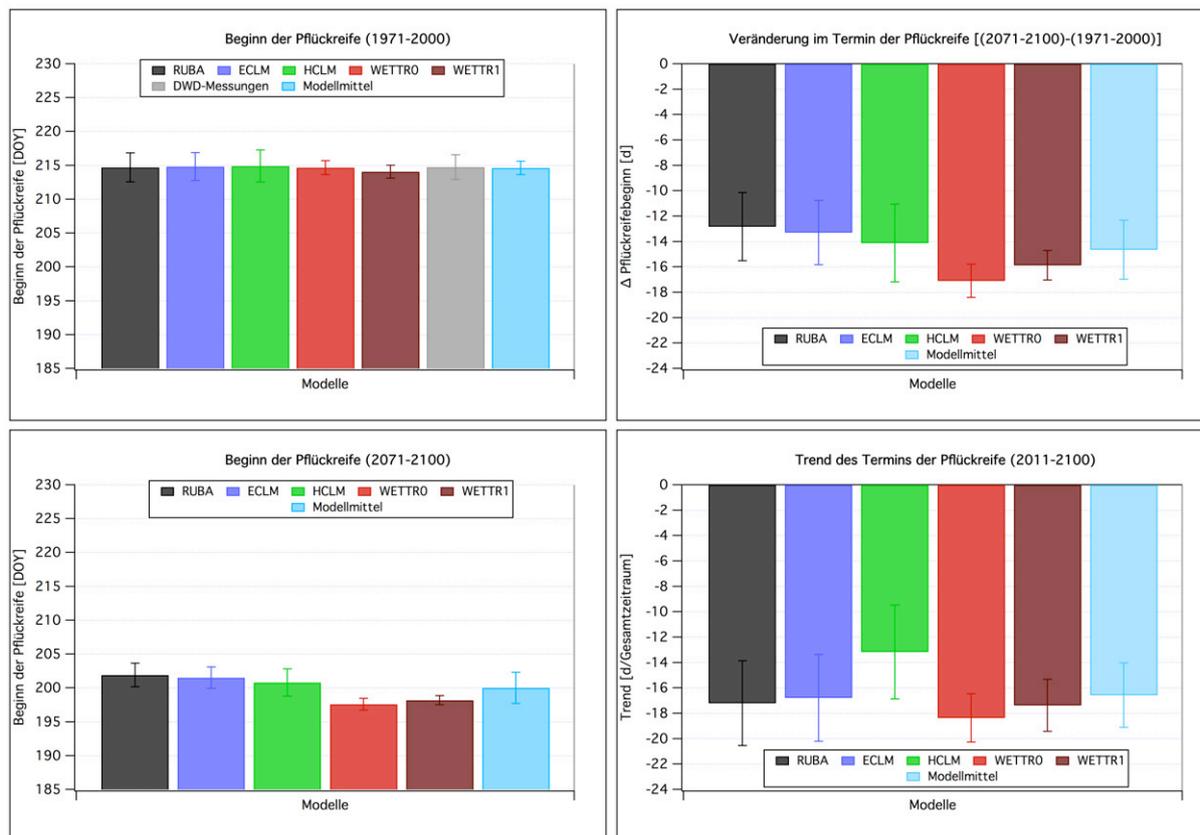


Abbildung 5.11: links: Mittelwerte der Termine des Beginns der **Pflückreife** (oben: 1971-2000; unten: 2071-2100); rechts: Differenz der Reifetermine (oben) und Trend (2011-2100) (unten) für die 5 Klimamodelle und das Mittel über diese 5 Klimamodelle. Der Reifebeginn wurde mit Modell 12a-R berechnet. Dargestellt sind Gebietsmittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen für den **frühreifen Apfel**.

Die **Abbildung 5.12** 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 5.13** 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.

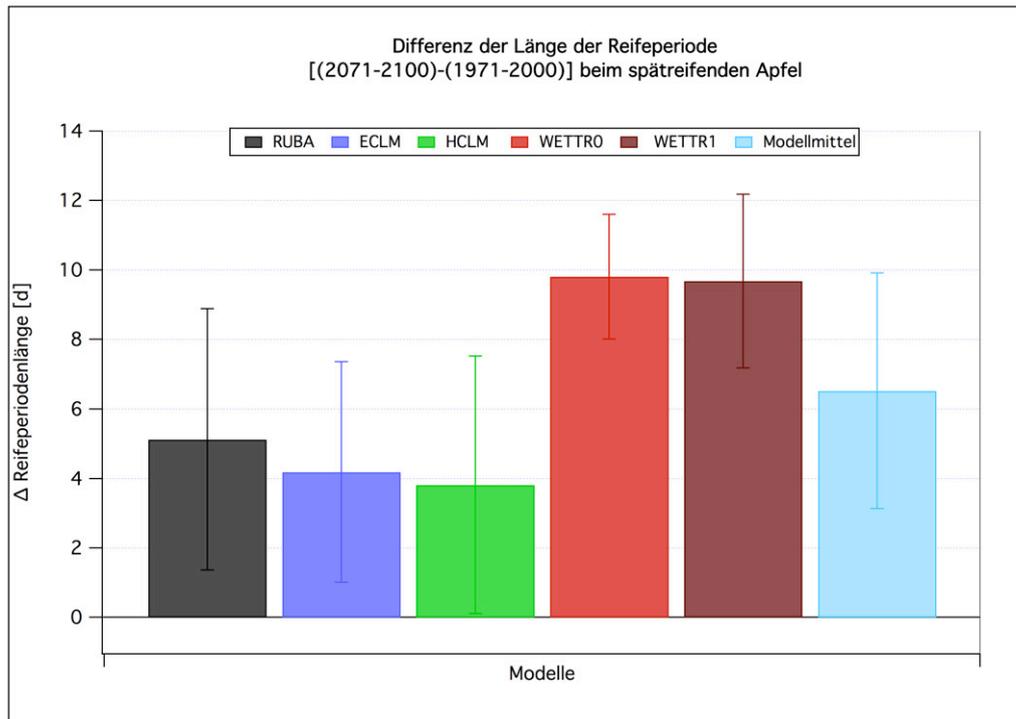


Abbildung 5.12: Differenz der **Länge der Reifeperiode** [(2071-2100)-(1971-2000)] beim **spätreifen Apfel** gemäß Modell-12a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM's. Gebietsmittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

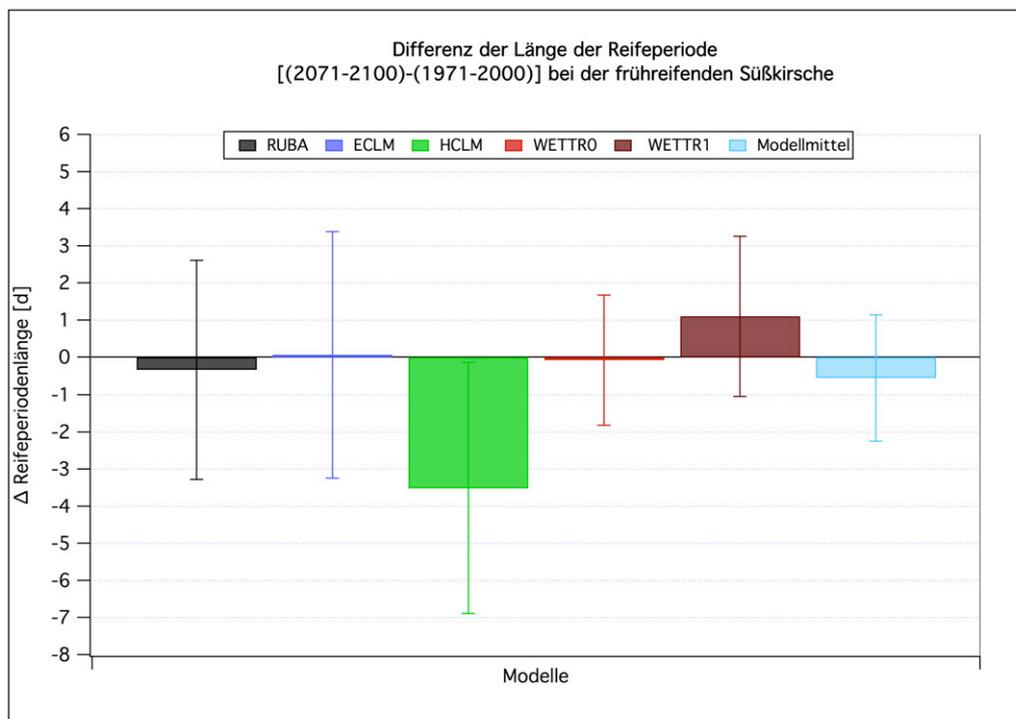


Abbildung 5.13: Differenz der **Länge der Reifeperiode** [(2071-2100)-(1971-2000)] bei der **frühreifen Süßkirsche** gemäß Modell-10a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM's. Gebietsmittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

Abbildung 5.14 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](#)).

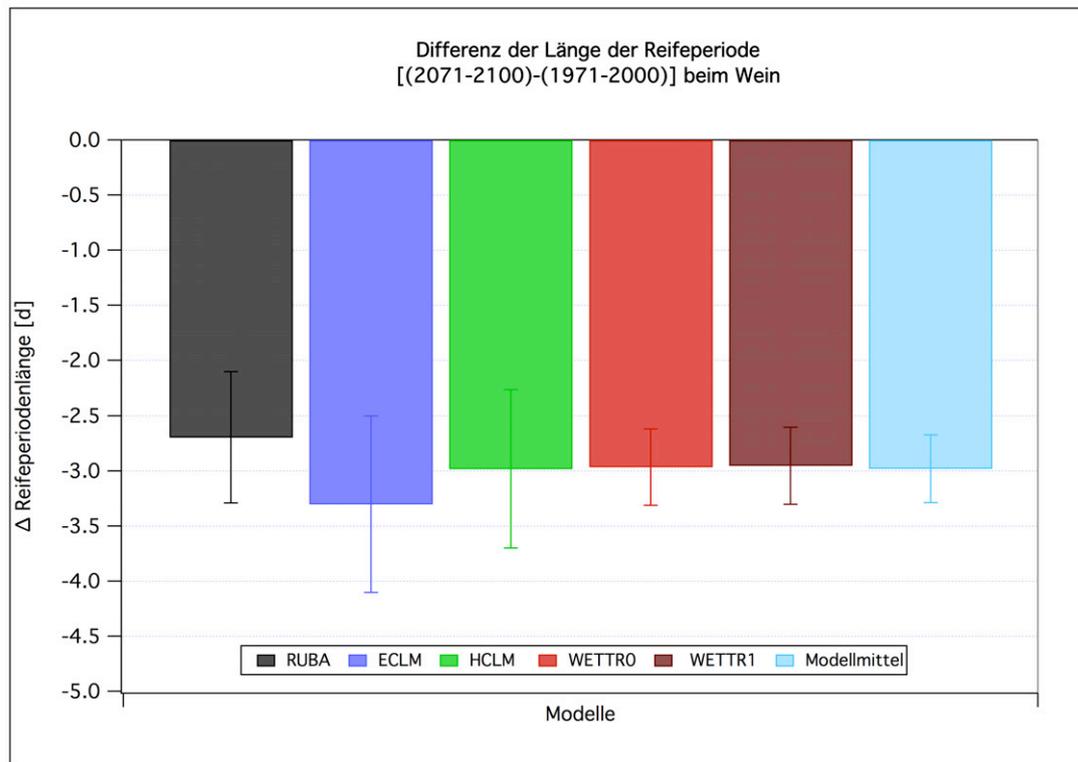


Abbildung 5.14: Differenz der **Länge der Reifeperiode** [(2071-2100)-(1971-2000)] beim **Wein** gemäß Modell-10a-R, berechnet mit Temperaturen verschiedener RCM's. Gebietsmittelwerte über die 8 Weinbaugitterpunkte.

Abbildung 5.15 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.

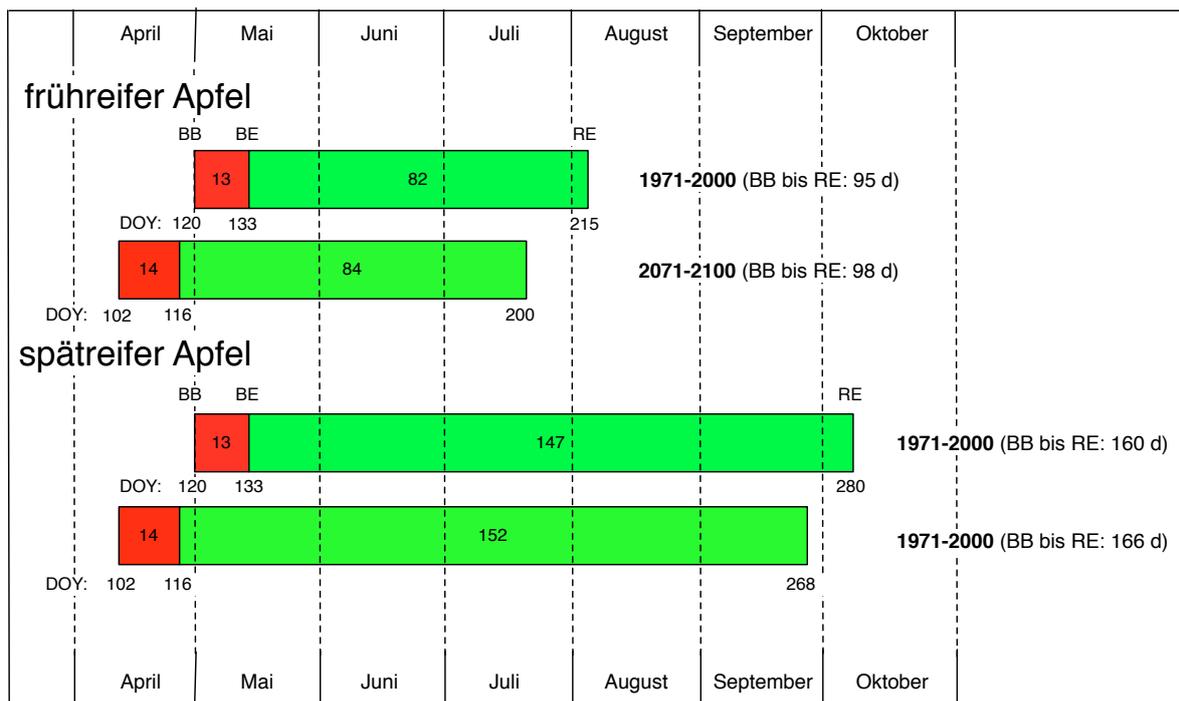


Abbildung 5.15: Mögliche Verschiebung der phänologischen Phasen [BB=Blühbeginn (BBCH60); BE=Blühende (BBCH69); RE=Pflückreife (BBCH87)] für früh- und spätreifende Äpfel, 2071-2100 vs. 1971-2000, Mittelwerte über die mit den 5 regionalen Klimamodellläufen berechneten Ergebnisse.

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.

5.2.3 Phänotypische Plastizität

Welche Veränderungen unter noch extremen als den von den RCM's im Szenario A1B vorhergesagten Bedingungen beim Blühbeginn und dem Termin der Dormanzbrechung zu erwarten sind, zeigt die **Abbildung 5.16**. Für diese Abbildung wurde der Blühbeginn t_2 und der Termin der Dormanzbrechung t_1 mit Hilfe des kombinierten Chilling-Forcing-Modells mit DAYLENGTH-Term (Modells 29ga) (mit für *Apfel* optimierten Parametern; vgl. Tabelle 4.12 im LB) 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 50 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.

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 $\Delta T > 6 \text{ K}$ sind aber alle undefinierten t_2 -Werte auf die Nichtbrechung der Dormanz zurückzuführen (die grau gestrichelte Kurve ist mit der grün gestrichelten identisch).

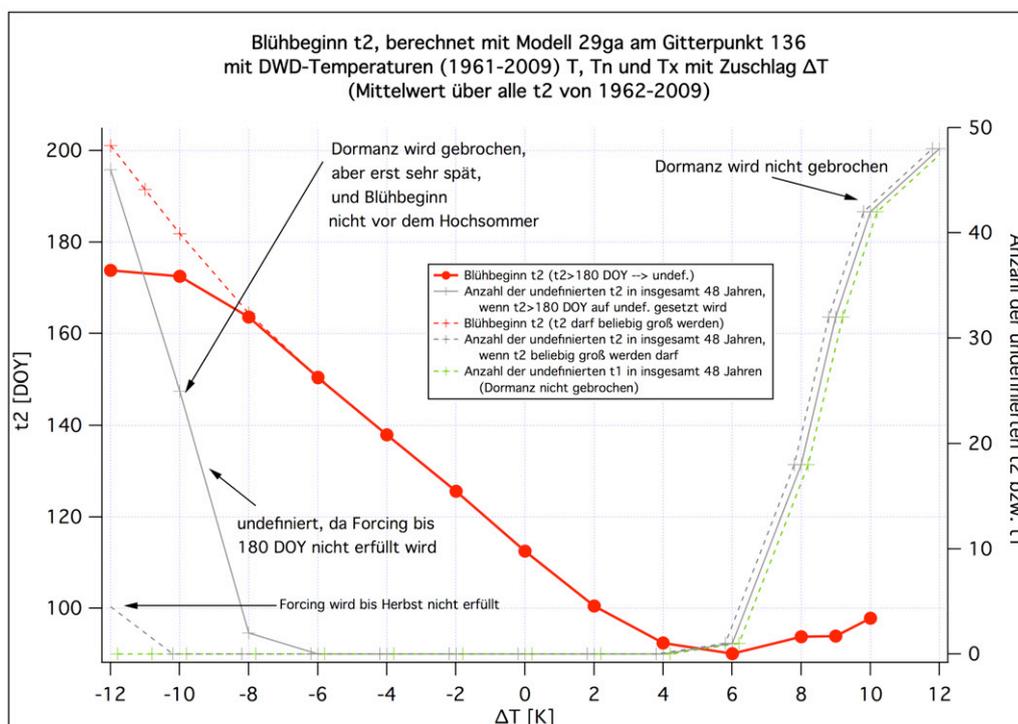


Abbildung 5.16: Blühbeginn t_2 , berechnet mit Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term) für den Apfel am Gitterpunkt 136 mit DWD-Temperaturen und *Temperaturzuschlag* ΔT zu T , T_n und T_x . Mittelwert über alle Jahre von 1962-2009.

Die zu Abbildung 5.16 gehörigen Dormanzbrechungstermine t_1 sind in **Abbildung 5.17**

dargestellt. In der Gegenwart ($\Delta T \approx 0$ K) liegen diese Termine am Jahresbeginn (10 bis 20 DOY) 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 $4 \text{ K} > \Delta T \geq -12 \text{ K}$ in allen Jahren gebrochen. Erhöhte Temperaturen erzeugen zwar eine weniger starke Verspätung. Dann treten aber auf Grund der hohen Temperaturen bereits für $\Delta T \geq 6 \text{ K}$ viele Jahre ganz ohne Dormanzbrechung auf (grün gestrichelte Kurve).

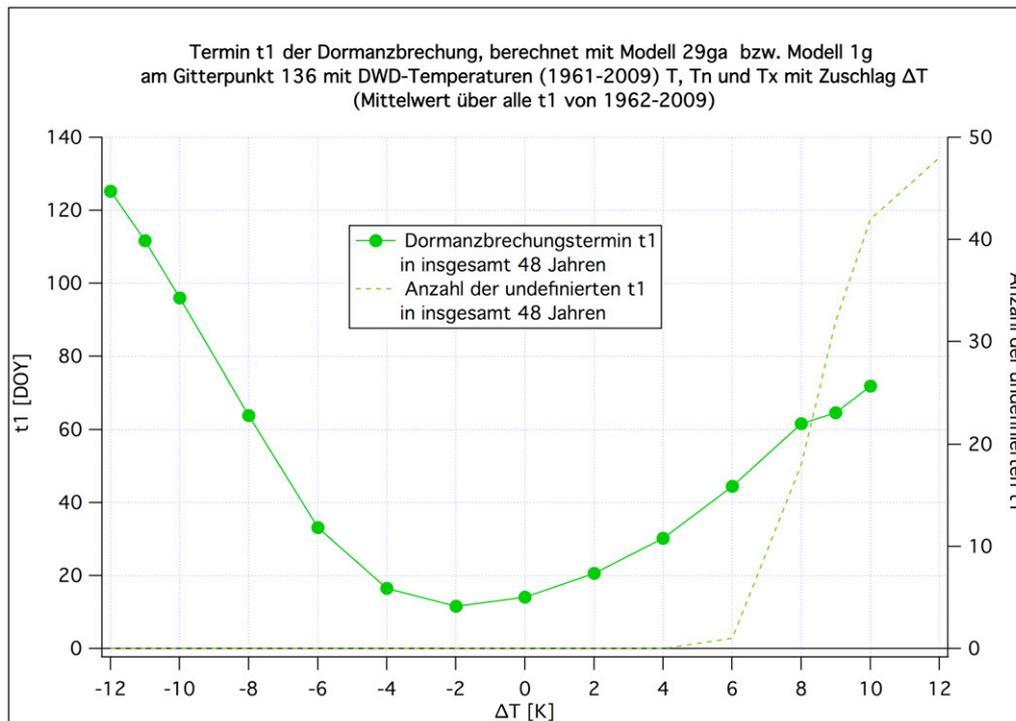


Abbildung 5.17: Termin der **Dormanzbrechung** t_1 , berechnet mit Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term) für den Apfel am Gitterpunkt 136 mit DWD-Temperaturen und *Temperaturzuschlag* ΔT zu T , T_n und T_x . Mittelwert über alle Jahre von 1962-2009.

5.3 Veränderungen in der Gefahr für unvollständige Brechung der Dormanz und beim Dormanzschaden s_D

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 Chilling-Modell 1b (Weinberger-Eggert-Modell; siehe Tabelle A.1 im Anhang A) in wärmeren Klimaten bzw. in Zukunft bei wärmeren Wintern unzuverlässigere Ergebnisse liefert als die Chilling-Modelle 1f (Positive Utah Model) und 1g (Dynamic Model), wobei Modell 1g wahrscheinlich die besten Resultate berechnet, da es stärker physiologisch-basiert ist.

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 durch eigene Untersuchungen bestätigt, in denen die Wahrscheinlichkeit einer unvollständigen Brechung der Dormanz berechnet wurde (siehe z. B. Abschnitt 5.3.1 im LB).

Da die meisten Ergebnisse der Chilling- und Dormanzbrechungs-Modellierung für die Schäden und Kosten des Klimawandels in Hessen nicht relevant sind, werden hier nur einige wenige der vielen durchgeführten Untersuchungen zu diesem Themenkomplex vorgestellt. Die ausführliche Darstellung aller Ergebnisse aller drei untersuchten Chilling-Modelle findet man im Kapitel 5.3 und im Anhang G im LB.

Weiterführende, interessante Ergebnisse zum Dormanzbrechungstermin und seiner möglichen, zukünftigen Verschiebung sowie zu seiner Abhängigkeit von C^* und der geographischen Lage findet man auch in [Chmielewski et al. \(2013\)](#).

5.3.1 Chillingsumme $S_c(t_s)$ bis zum Stichtag t_s

Die **Tabellen 5.3** und **5.4** zeigen die Chillingsummen [Formel (4.36) im LB] vom 1. September des Vorjahres bis zum von der Obstart abhängigen Stichtag t_s (vgl. Tabelle 4.16 im LB).

Tabelle 5.3 wurde für den Stichtag $t_s = 106$ 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 CH⁵, 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) im LB]. Das bedeutet aber, dass z. B. beim HCLM im Zeitraum 2071-2100 in ca. 2.5 % der Fälle (Jahre) $S_c(t_s) < 1370$ CH⁶ 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). Tatsächlich beträgt die Dormanznichtbrechungswahrscheinlichkeit P_D beim Apfel (2071-2100 im Modellmittel) und Modell 1b 5.4 %. Die Schäden betragen aber trotzdem (ohne Worst Case Szenario) nur 0.4 % (Tabelle 5.10 im LB).

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.

Bei **Modell 1g** (auf Tabellen und Abbildungen wurde hier verzichtet) ist nur beim HCLM und bei WETTREG eine signifikante Abnahme der Chillingsumme bis zum sortenabhängigen Stichtag t_s zu beobachten. Bei RUBA und dem ECLM wird sogar eine Zunahme beobachtet. In allen Fällen stehen aber auch im Zeitraum 2071-2100 im Mittel über

⁵ CH = Chilling Hours

⁶ Denn es gilt [Spalte (D) und Zeile HCLM in Tabelle 5.3]: $1909 - 5.5 \cdot 98 = 1370$.

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	**

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	**

125 CP⁷ zum Chilling zur Verfügung. Die Veränderung der Chillingsumme (2071-2100 vs. 1971-2000) ist bei allen Obstarten im Modell 1g nicht signifikant von null verschieden.

5.3.2 Dormanzbrechungstermin t_1

Abbildung 5.18 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.

⁷ CP = Chilling Portions

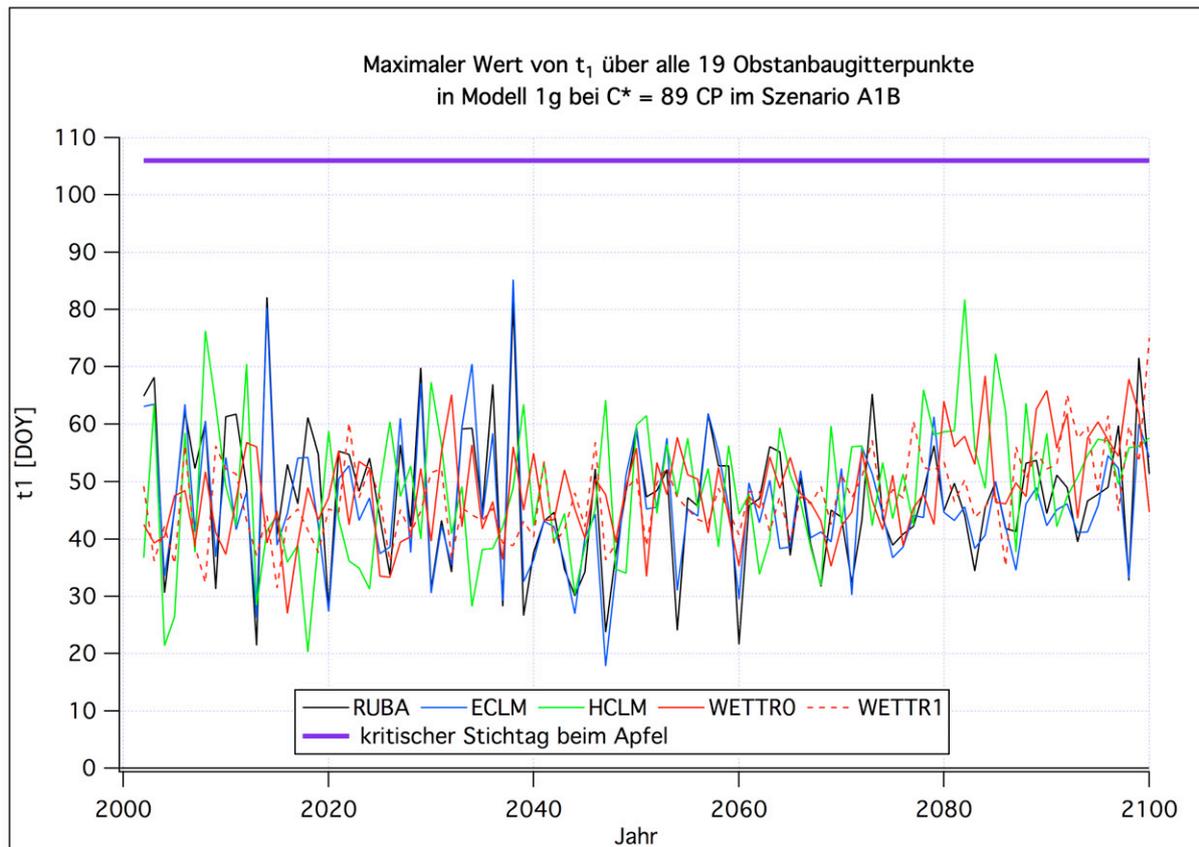


Abbildung 5.18: Späteste Dormanzbrechungstermine t_1 beim Chilling-Modell 1g und $C^* = 89$ CP bei Nutzung der Temperaturen der 5 Klimamodellläufe im Szenario A1B.

5.3.3 Dormanzschaden s_D^o ohne und s_D^m mit Gegenmaßnahmen

Bei Verwendung von Modell 1b⁸ ohne Ergreifung von Gegenmaßnahmen treten im Mittel über die 5 Klimamodellläufe nur im Zeitraum 2071-2100 geringfügige Schäden auf, die aber nicht einmal signifikant von null verschieden sind (Tabelle 5.10 im LB). 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.

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 im LB). 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 im LB), und die Dormanznichtbrechungswahrscheinlichkeit im Worst Case hier

⁸ Bei Verwendung von Modell 1g sind alle Dormanzschäden identisch null!

20 % beträgt, ergeben sich im Mittel für 2071-2100 Dormanzschäden von 6 % (Tabelle 5.12 im LB).

Modell 1g zeigt für s_D^m beim “Worst Case 20 %” exakt die gleichen Schäden wie 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 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) im LB]. 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.

5.3.4 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 im LB) und 9.5% ($\pm 11.5\%$) für die 19 Obstanbaugitterpunkte (Tabelle G.2 im LB)] 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 im LB). Beim *Dynamic Model* (Modell 1g), welches heutzutage als zuverlässigstes Chilling-Modell angesehen wird (vgl. das in Kapitel 5.3 auf Seite 50 Gesagte), ändert sich praktisch nichts [Differenz = -0.3% ($\pm 0.6\%$) in Hessen (Tabelle G.9 im LB) und = 0.0% für die 19 Obstanbaugitterpunkte bei 89 CP (Tabelle G.10 im LB)]. Beim *Positive Utah Model* (Modell 1f) ist eine sehr kleine Abnahme zu verzeichnen [-1.2% ($\pm 1.6\%$) in ganz Hessen (Tabelle G.12 im LB) und -0.3% ($\pm 0.5\%$) für die 19 Obstanbaugitterpunkte (Tabelle G.13 im LB) bei $C^* = 1632$ CU⁹]. 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 im LB). Bei Verwendung von Modell 1g

⁹ CU = Chilling Units

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 NoReleaseProb für verschiedene Stichtage und Chillingmodelle findet man im **Anhang G im LB**.

5.4 Mögliche Veränderungen in der Gefahr von Spätfrost während der Obstblüte

Im Folgenden werden einige Beispiele für Frostberechnungen, vorwiegend für den Apfel, diskutiert. Ergebnisse für den Frostschaden und die “Wahrscheinlichkeit für Schäden zwischen 0 % und 10 %” (FROSTSCHADENSPROB0) findet man im **Anhang G**. Die vollständigen Ergebnisse für alle Forstgrößen findet man im **Anhang H im LB**. Die zu Grunde liegende Theorie wurde bereits in **Abschnitt 4.6** 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) im LB) 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 Frostschäden

Die mittleren Frostschäden, berechnet mit T_{mmf} , an den Äpfeln werden in **Abbildung 5.19** 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 (ohne DAYLENGTH-Term) 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.

Erstaunlich ist, dass der FROSTSCHADEN s_F (**Abbildung 5.19** oben links) und auch die FROSTPROB0 $P_{F,0}$ (“Wahrscheinlichkeit für $T_n < 0^\circ\text{C}$ im S-Zeitraum”; hier nicht gezeigt) 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 Tn (hieraus wird T_{mmf} und daraus die Frostschäden berechnet) der Blühbeginn in RUBA besonders spät liegt und die kleinen Tn bereits vor Blühbeginn auftraten, so dass die Schäden gering bleiben. Beim DWD bzw. in der Realität sind die Tn dagegen unabhängiger vom vorhergehenden T -Verlauf bzw. vom aktuellen Blühbeginn. Betrachtet man nur die Tage mit Temperaturen $Tn < 0^\circ\text{C}$, so streuen die Temperaturen T für festes Tn beim DWD auch wesentlich stärker als bei RUBA. Weitere Ursachen für das oben beschriebene Verhalten sind: Negative Tn werden beim DWD viel häufiger angenommen als bei RUBA. Beim DWD treten auch sehr oft um über 3K kältere Tn -Werte auf als bei RUBA, und die zeitliche Standardabweichung der Tn (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 Tn entscheidend ist (diese stimmen bei RUBA auf Grund der BIAS-Korrektur gut mit den Beobachtungen überein), sondern die gesamte zweidimensionale Verteilungsfunktion von T und Tn spielt eine gewichtige Rolle.

Bei der früher als der Apfel blühenden Aprikose¹⁰ treten zwar mittlere Schäden von bis zu 28 % (1971-2000; mit HCLM-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 HCLM 1971-2000), dass nur die Veränderung [2071-2100 vs. 1971-2000] beim HCLM signifikant von null verschieden ist (Tabelle H.31 im LB).

Warum die Unsicherheiten der Schätzwerte für den Schaden so groß sind, zeigt **Abbildung 5.20**. Dort sind die jährlichen, über die 19 Obstanbaugitterpunkte (links) und die 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 5.20** 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 4.7** rechts und **4.8** 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".

Abbildungen für den mittleren Frostschaden und seine voraussichtliche Veränderung für alle 6¹¹ Fruchtarten findet man im **Anhang G.1** in **Abbildung G.1** und **G.2**. Zusätzliche Bilder und umfangreiche Tabellen, auch für alle anderen Frostgrößen, findet man im **Anhang H.5 im LB**.

¹⁰ 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. Da das "wahre Blühende" nicht bekannt war, wurden keine weiteren Auswertungen bezüglich Frost für die Aprikose vorgenommen.

¹¹ 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.

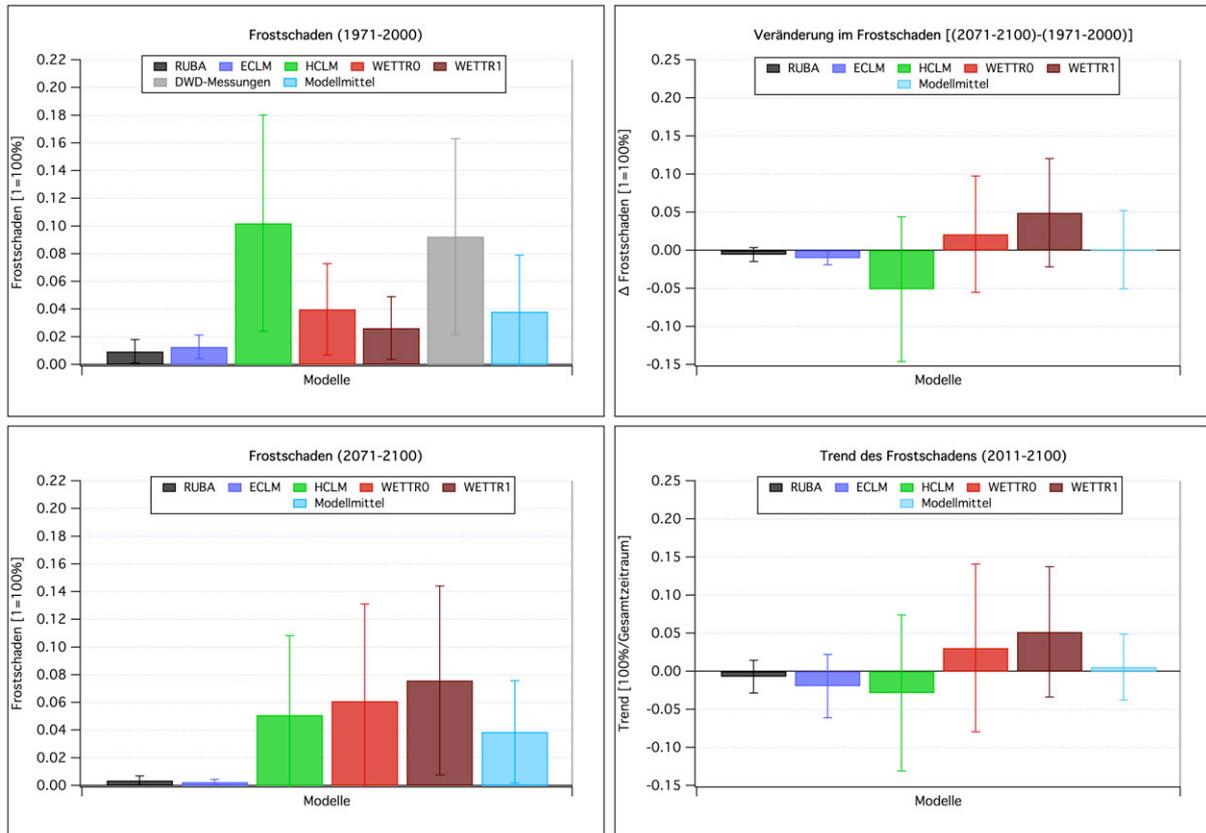


Abbildung 5.19: links: **Frostschaden** s_F (an den Früchten!) [1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten)] bezogen auf den Zeitraum t_{Vor} Tage vorm Blühbeginn des Apfels bis 31. Juli in den 5 Modellen und als Modellmittel für den **Apfel**; rechts: Differenz der Frostschäden s_F (2071-2100 vs. 1971-2000) (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.

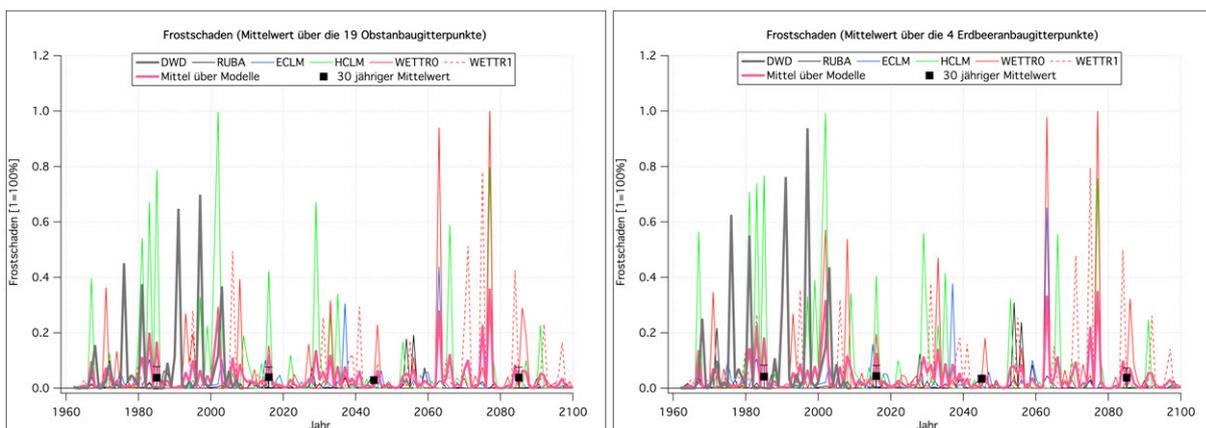


Abbildung 5.20: Jährlicher Verlauf des Gebietsmittelwerts der **Frostschäden** in den 5 Modellen für **Apfel**. Links: Mittelwert über die 19 Obstanbaugitterpunkte in Hessen. Rechts: Mittelwert nur über die 4 Erdbeeraanbaugitterpunkte. Der Blühbeginn wurde mit Modell 29ga (mit DAYLENGTH-Term), das Blühende mit Modell 10a und der Frostschaden mit T_{mmf} berechnet.

5.4.2 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 5.21** 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 %.

Abbildungen für die FROSTSCHADENS-PROB0 und ihre voraussichtliche Veränderung für alle 6 Fruchtarten findet man im Anhang G.2 in **Abbildung G.3** und **G.4**. Weiterführende Informationen findet man im Anhang H.6 ff. im LB.

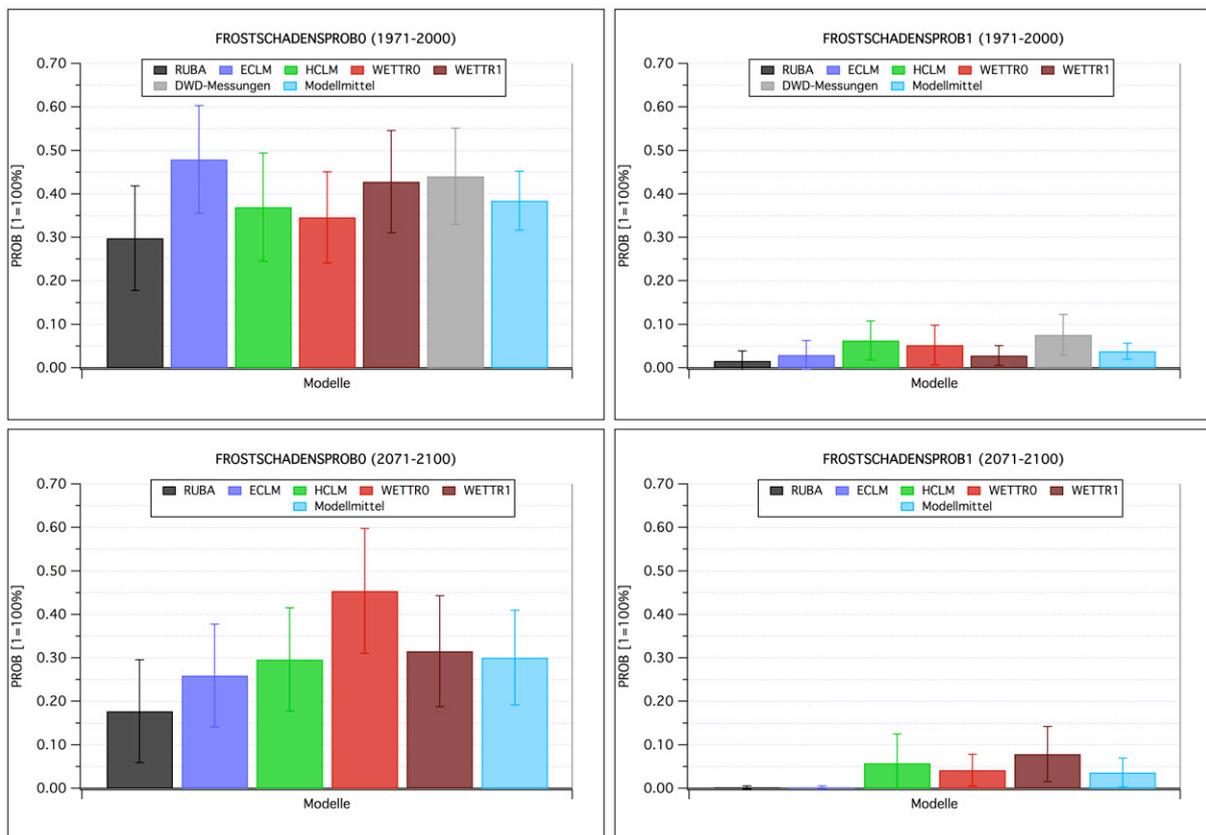


Abbildung 5.21: links: Wahrscheinlichkeit s_F^{0-10} (= **FROSTSCHADENS-PROB0**) für Frostschäden (an den Früchten!) der “Stärke 0” (1971-2000 (oben) und 2071-2100 (unten)) bezogen auf den Zeitraum t_{Vor} Tage vorm Blühbeginn des Apfels bis 31. Juli in den 5 Modellen und als Modellmittel für den **Apfel**; 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.

5.4.3 Zusammenfassung

Bezieht man auch die Ergebnisse für die anderen Fruchtarten in die Diskussion mit ein, so kann man bezüglich “Spätfrost” Folgendes feststellen: Trotz der signifikanten Verfrüherung 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, weil der Großteil der in diese Klasse fallenden Schäden sehr klein ist, für den Obstbauern kaum von Bedeutung ist. Bei den Süßkirschen verringert sich auch die *FROSTPROB0* ($P_{F,0}$ = Wahrscheinlichkeit, dass die Tagesminimumtemperatur T_n im S-Zeitraum kleiner 0°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 G.2 (bzw. sogar innerhalb der verdoppelten Konfidenzintervalle; vgl. Bemerkung auf Seite 50 im LB) ist nicht unwahrscheinlich.

Die theoretischen Überlegungen in Anhang L im LB 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 Blühbeginntermins 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 in der Aktivität der Schädlinge und Nützlinge im Obstbau

5.5.1 Veränderungen bei den durch den Apfelwickler hervorgerufenen Schäden

Abbildung 5.22 stellt den Apfelwicklergenerationsindex I_A als Funktion der Zeit dar, der mit dem in Kapitel 4.7.1 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 4.4) führen dazu, dass auch die Schwankungen der Anzahl der Apfelwicklergenerationen bei Nutzung der Temperaturen dieses Modells vollkommen unterschätzt werden (magenta farbene Kurven).

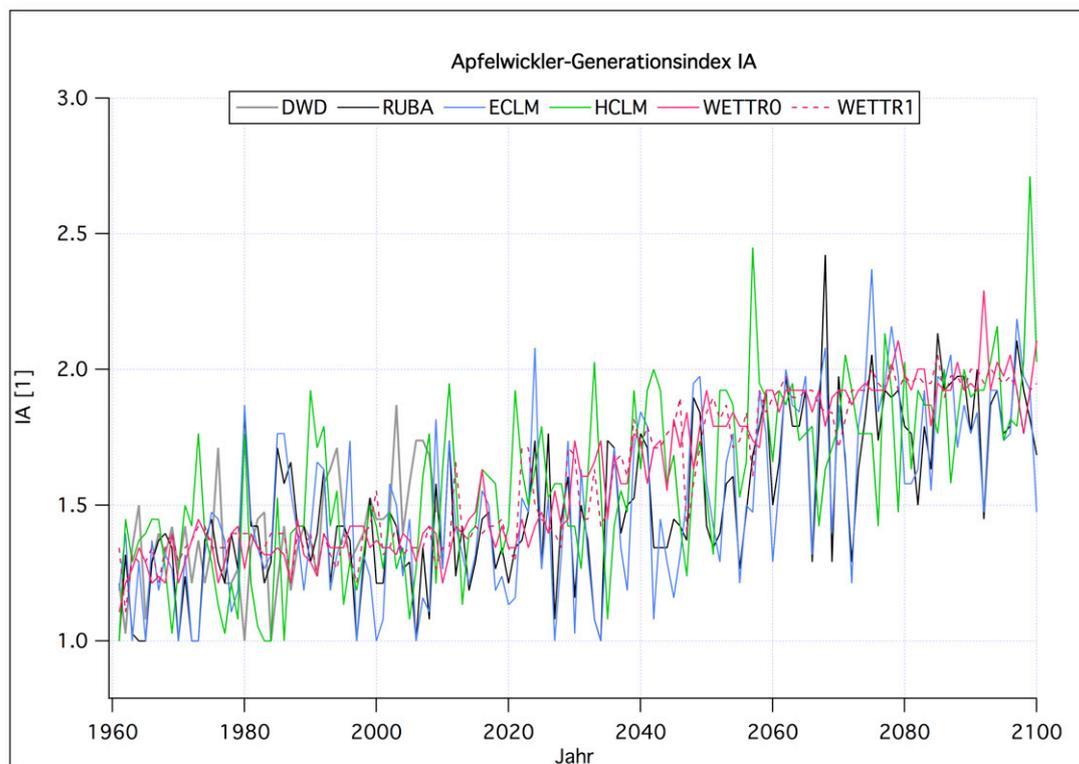


Abbildung 5.22: Apfelwicklergenerationsindex I_A als Funktion der Zeit, gemittelt über die 19 Obstanbaugitterpunkte, berechnet mit den Temperaturen der 5 regionalen Klimamodelle.

Aus den jährlichen Werten des Apfelwickler-Generationsindex I_A können nun für 30-jährige Zeitabschnitte für ein bestimmtes Gebiet Wahrscheinlichkeiten¹² $Prob(k)$ ($\equiv Prob_k$) für das Auftreten der möglichen 5 Fälle ($I_A = k \in \{1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\}$) berechnet werden. **Abbildung 5.23** 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.

¹² Bzw. relative Häufigkeiten als Schätzwert dieser Wahrscheinlichkeiten.

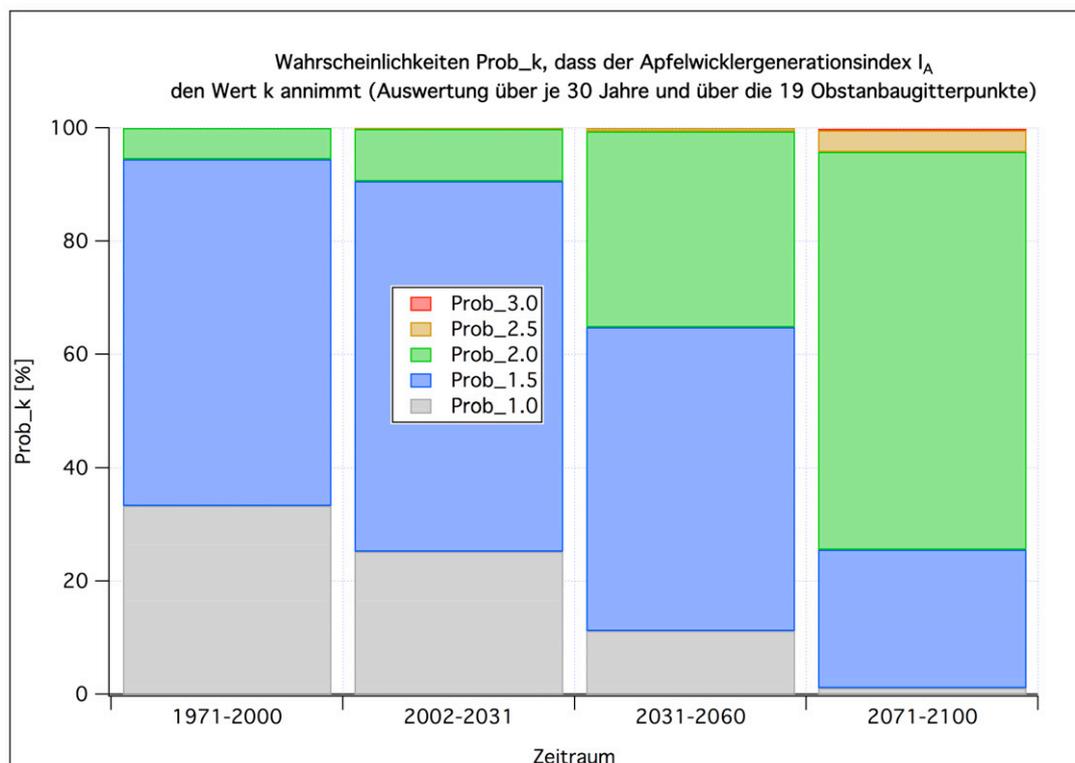


Abbildung 5.23: Wahrscheinlichkeit $Prob_k$, dass der Apfelwicklergenerationsindex I_A den Wert k annimmt (Mittelwerte über je 30 Jahre, über die 19 Obstanbaugitterpunkte und die 5 Klimamodelle).

Abbildung 5.24 zeigt ein Beispiel für mittlere¹³ 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 %-Konfidenzintervalle¹⁴. 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.

¹³ Man unterscheide diese Schäden von denen in der Tabelle 4.1 gelisteten Schäden. Die hier dargestellten Schäden sind Mittelwerte über viele Jahre und Pixel, in denen verschiedene Generationsindizes I_A auftraten. Die Werte in Tabelle 4.1 beziehen sich immer auf feste I_A -Werte!

¹⁴ Diese beziehen sich nur auf die statistischen Schwankungen der 30-jährigen Mittelwerte über das betrachtete Gebiet. Die Unsicherheiten im Modellansatz sind hierin nicht enthalten!

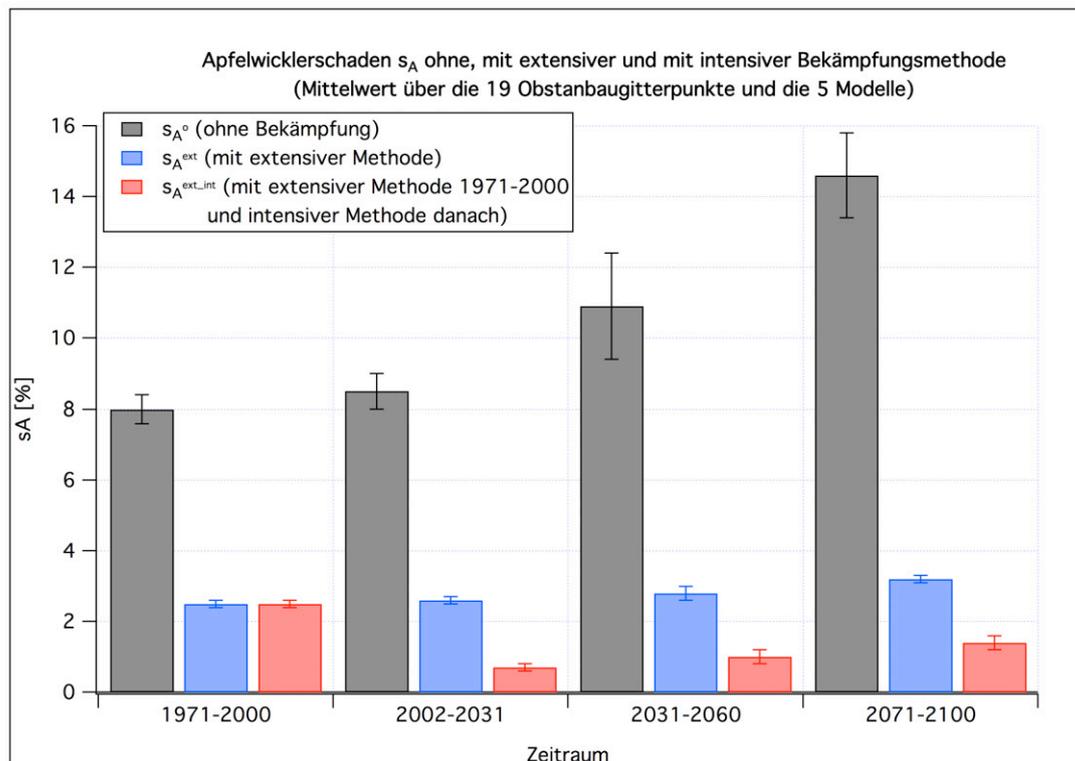


Abbildung 5.24: Apfelwicklerschaden s_A ohne, mit extensiver Bekämpfungsmethode und 'mit extensiver im Zeitraum 1971-2000 und danach mit intensiver Bekämpfungsmethode' (Mittelwerte über je 30 Jahre, über die 19 Obstanbaugitterpunkte und die 5 Klimamodelle).

Eine quantitative Aufschlüsselung der Ergebnisse für verschiedene Apfelwickler-Größen in Tabellenform findet man im **Anhang H.1**. 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.

5.5.2 Veränderungen in der Bienenflugintensität

Nun soll noch gezeigt werden, wie sich die mittlere Bienenflugintensität (von Blühbeginn bis Blühende¹⁵) beim frühreifen Apfel in der Zukunft verändern kann.

¹⁵ Da der Blühbeginn und das Blühende von der Obststart abhängen, hängen die Bienenflugintensitäten ebenfalls von der Obststart ab.

Abbildung 5.25 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.¹⁶ Man erkennt große *Jahr zu Jahr*-Schwankungen und einen Trend zu etwas geringerer Bienenflugintensität in der Zukunft. Die über den Zeitraum

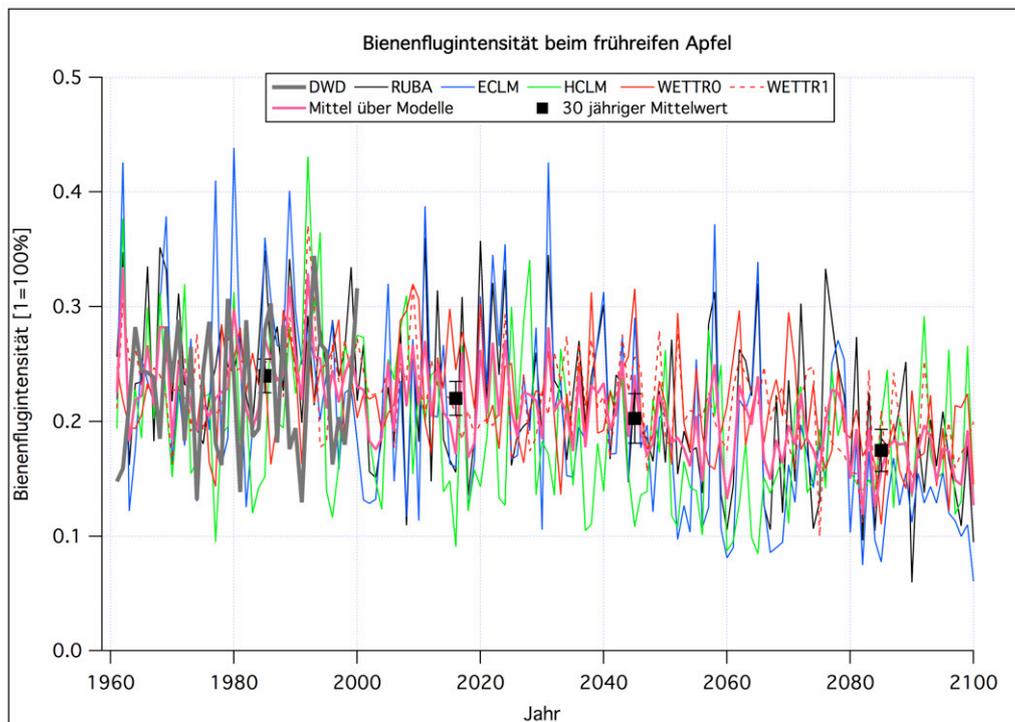


Abbildung 5.25: Relative Bienenflugintensität während der Blüte beim frühreifen Apfel, berechnet mit den Klimawerten der 5 RCM's und mit DWD-Werten. Jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

1971-2000 gemittelten Intensitäten, berechnet mit den Outputdaten der 5 Klimamodelle und mit den DWD-Beobachtungen, sowie die "Modellmittelwerte" sind in **Abbildung 5.26** aufgetragen. Die Veränderungen bis zum Zeitraum 2071-2100 findet man in der **Grafik 5.27**. Insgesamt nimmt die Intensität im "Modellmittel" signifikant um ca. 7.3 % ($\pm 2.4\%$) ab (Tabelle **J.11** im LB).

Ergebnisse für die anderen Fruchtarten findet man im **Anhang H.2**.

¹⁶ D. h., dass zuerst für jeden Gitterpunkt getrennt die Intensitäten berechnet wurden. Erst danach wurden die Ergebnisse gemittelt.

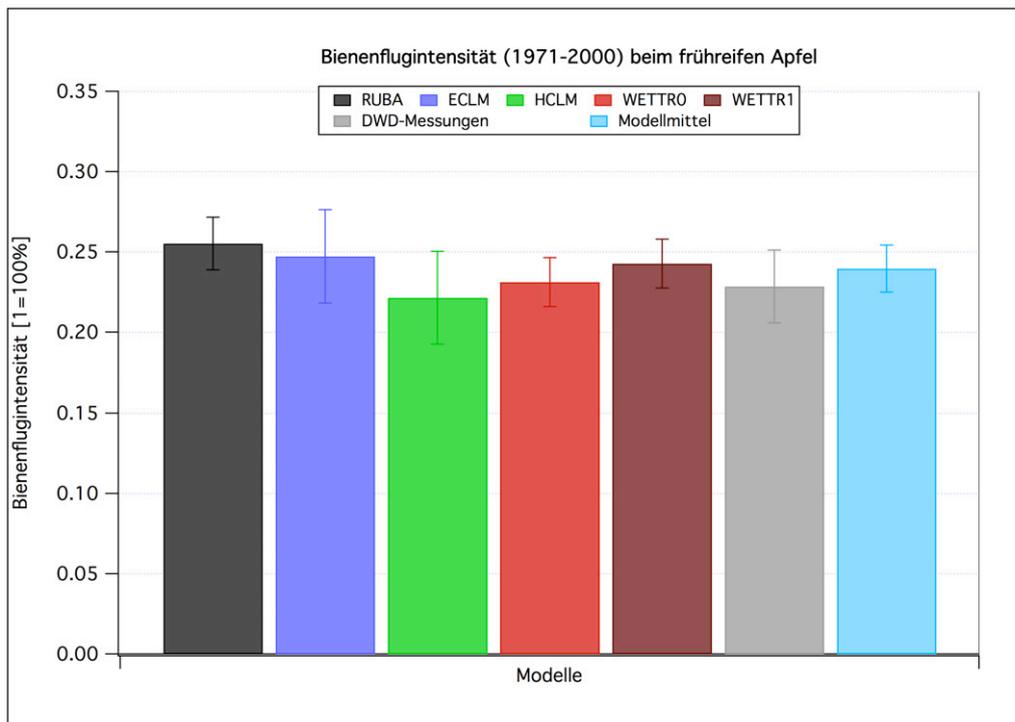


Abbildung 5.26: Mittlere relative **Bienenflugintensität** während der Blütezeit beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte und den Zeitraum 1971-2000.

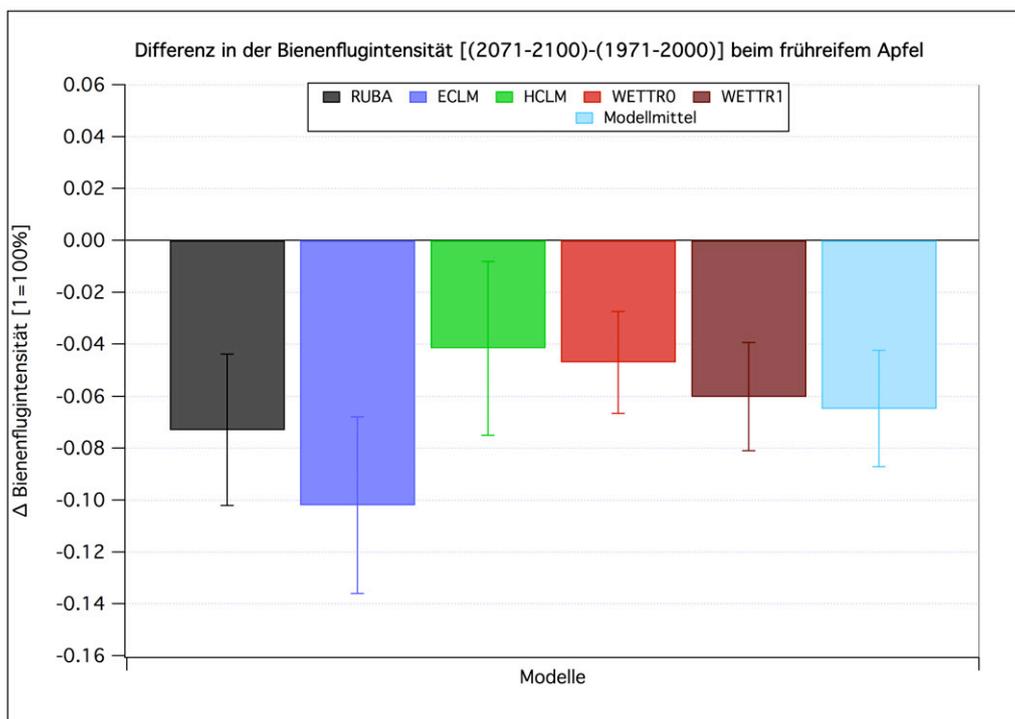


Abbildung 5.27: Veränderung [(2071-2100)-(1971-2000)] der mittleren relativen **Bienenflugintensität** während der Blütezeit beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte.

5.6 Veränderungen im Wasserhaushalt und bei den Fruchterträgen

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 5.28 zeigt die nach Gleichung (4.1) berechneten (relativen) Ertragsschäden für den frühreifen Apfel **ohne** Sommerberegnung mit und ohne CO₂-Düngung (vgl. Kapitel 4.8) 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 im Anhang I und in den Tabellen J.3 und J.4 im LB. Dass sich die Schäden “in den einzelnen” Modellen nicht stärker unterscheiden, ist vor allem auf die BIAS-Korrektur der Niederschlagsdaten der RCM’s zurückzuführen.

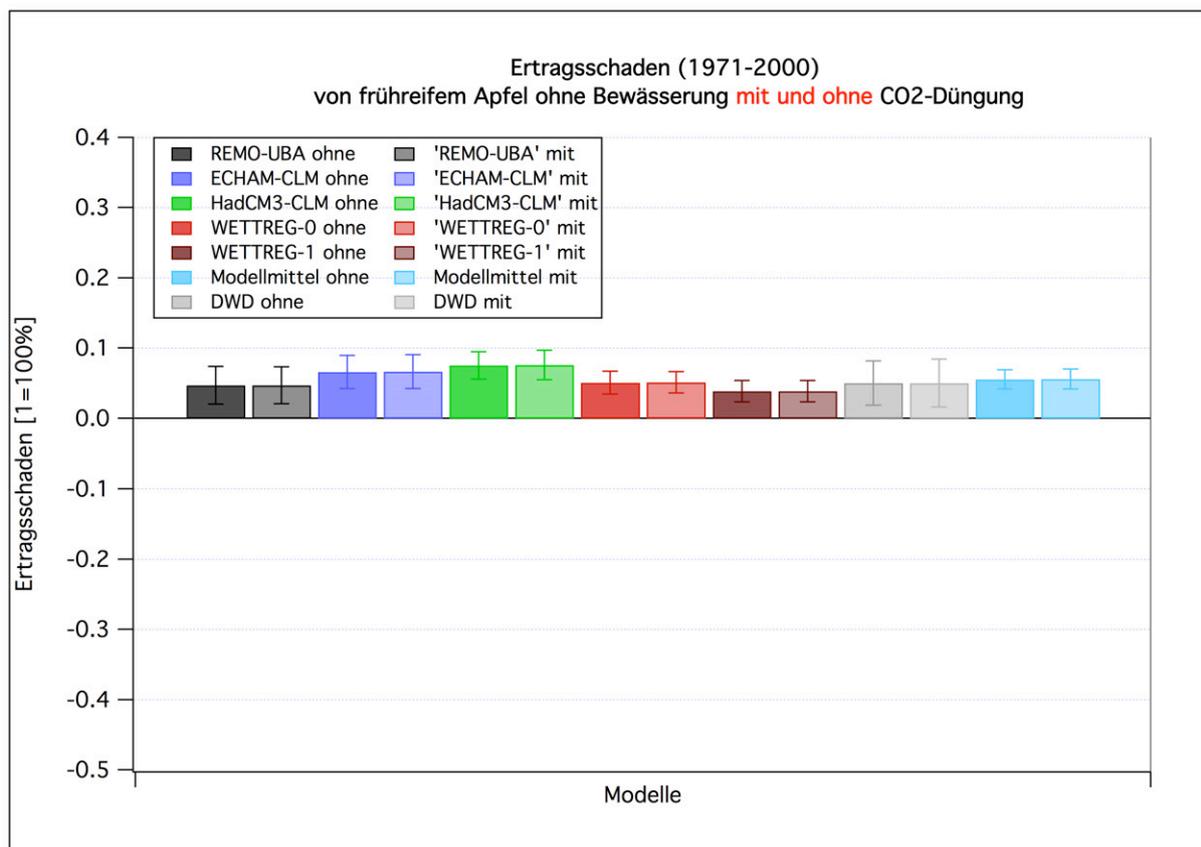


Abbildung 5.28: Relativer Ertragsschaden s_Y beim frühreifen Apfel **ohne Bewässerung**. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte und den Zeitraum 1971-2000 “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

In **Abbildung 5.29** 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 im LB) 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.

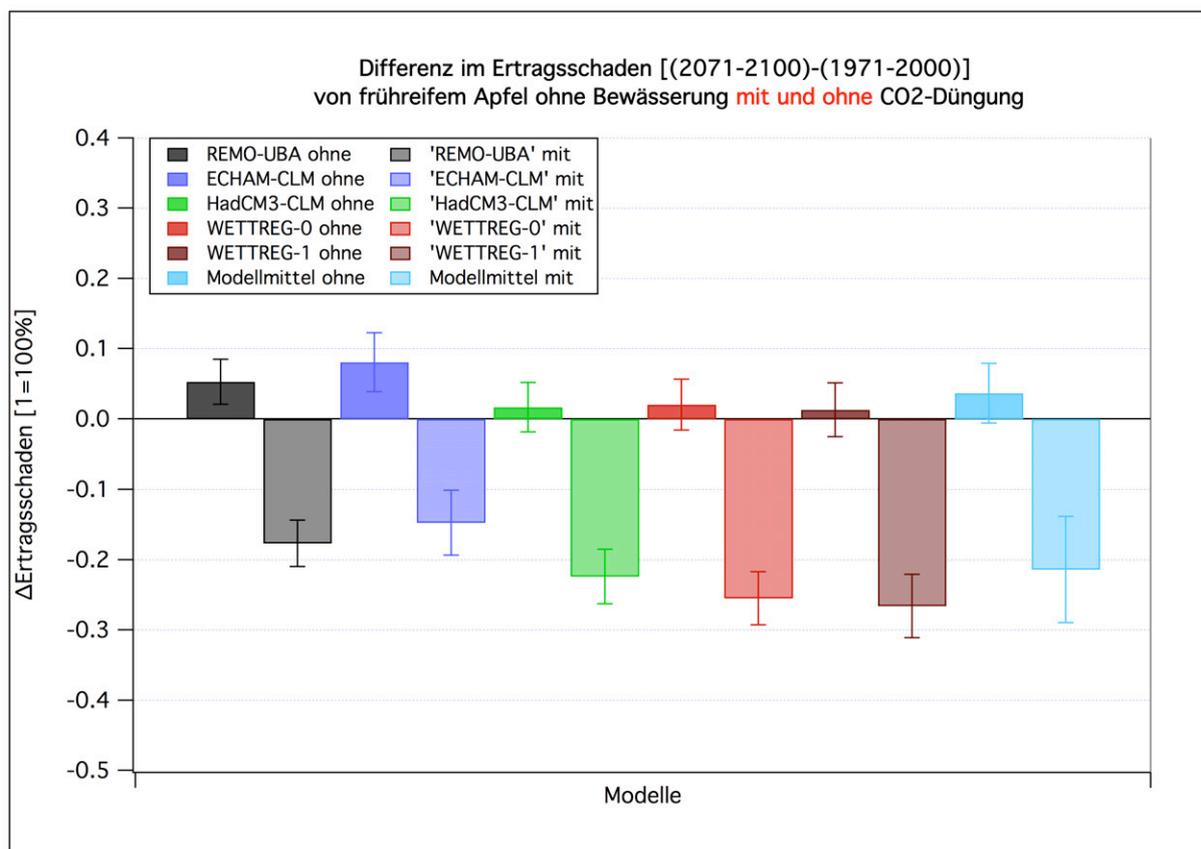


Abbildung 5.29: Veränderung [(2071-2100)-(1971-2000)] des relativen **Ertragsschadens** s_Y beim frühreifen Apfel **ohne Bewässerung**. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstbaugitterpunkte “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

Im Gegensatz zur Abbildung 5.28 sind die (absoluten) Ertragsschäden **mit Sommerberechnung** im Zeitraum 1971-2000 gemäß der Definition des relativen Ertragsschadens [Gleichung (4.1)] im Mittel gleich null (hier nicht gezeigt). Ob mit oder ohne CO₂-Düngung gerechnet wird, spielt 1971-2000 keine Rolle, da die CO₂-Konzentration in diesem Zeitraum im Mittel gerade den Ausgangswert [CO₂]₀ aufweist und der CO₂-“Verstärkungsfaktor” daher den Wert eins hat [Gleichungen (4.171) und (4.172) im LB]. Die Veränderung der Ertragsschäden (**Abbildung 5.30**) **mit Sommerberechnung** ist nun negativer (d. h. weniger Verluste bzw. größere Ertragszuwächse) als in Abbildung 5.29, bei der die Rechnungen ohne Sommerberechnung durchgeführt wurden.

Die Veränderungen der Schäden bis 2071-2100 sind **mit Sommerberechnung** negativer als ohne. D. h., dass die Erträge zum Ende des 21. Jahrhunderts größer werden als ohne Sommerberechnung. Die Rechnungen mit RUBA und ECLM ohne CO₂-Düngung ergeben zwar einen leichten Anstieg der Schäden, und das HCLM 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 % (±15 %) zu erwarten.

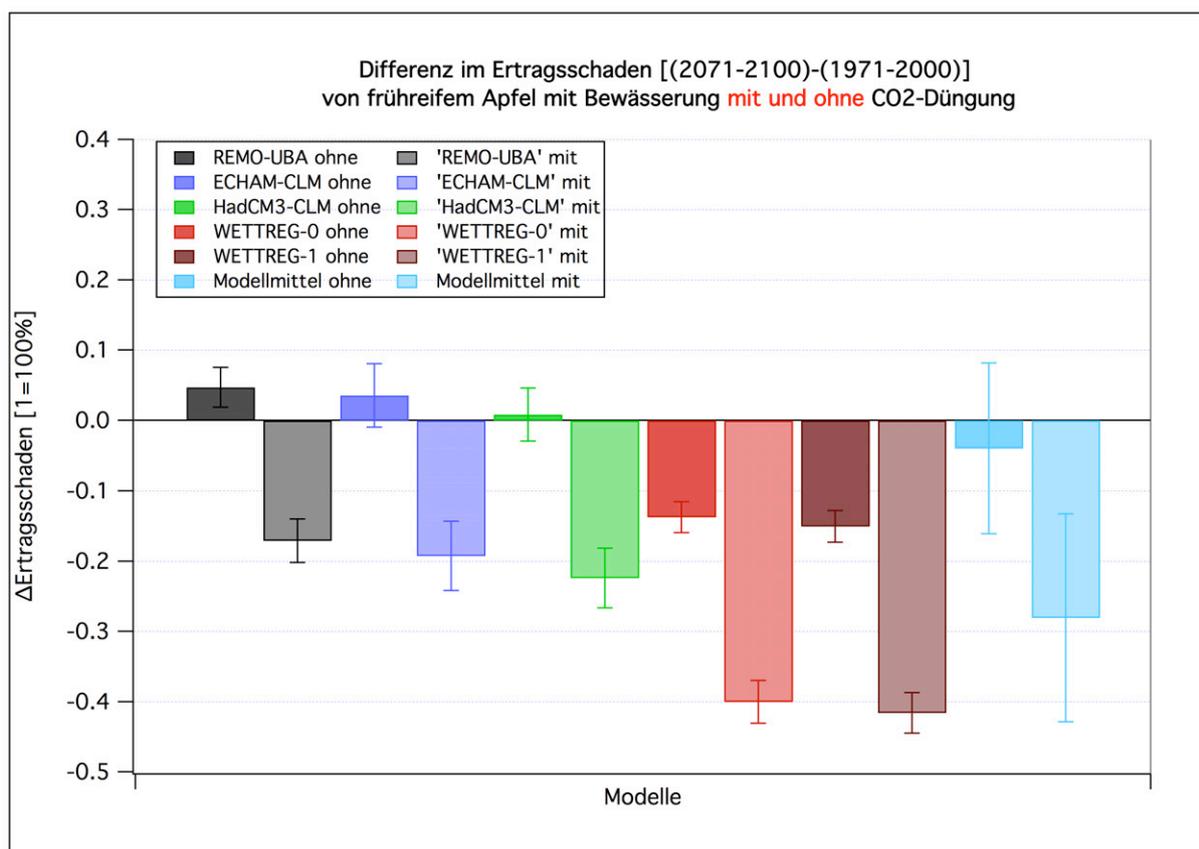


Abbildung 5.30: Veränderung [(2071-2100)-(1971-2000)] des relativen **Ertragsschadens** s_Y beim frühreifen Apfel **mit Bewässerung**. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

In **Abbildung 5.31** ist die (absolute) 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 gewählten Berechnungsmethode (vgl. Kapitel 4.8) 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.

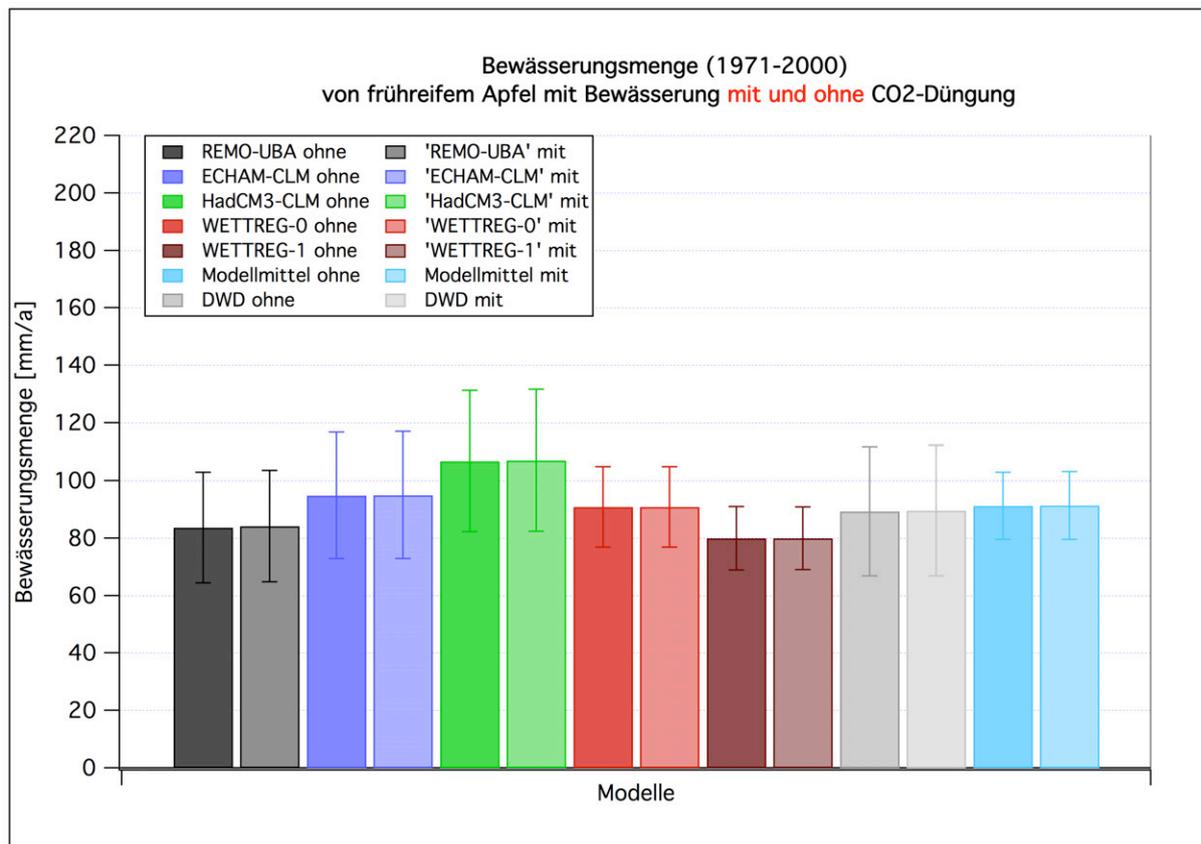


Abbildung 5.31: “Notwendige **Bewässerungsmenge** *SUMBEW* vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte und den Zeitraum 1971-2000 “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

Die Veränderung der notwendigen Beregnungsmenge zwischen 1971-2000 und 2071-2100 kann man der **Abbildung 5.32** 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 LB]. Im “Modellmittel” beträgt die Veränderung ohne CO₂-Düngung 52 mm/a (± 44 mm/a) und mit CO₂-Düngung 31 mm/a (± 40 mm/a; nicht signifikant!) (vgl. Tabellen J.7 und J.8 im LB).

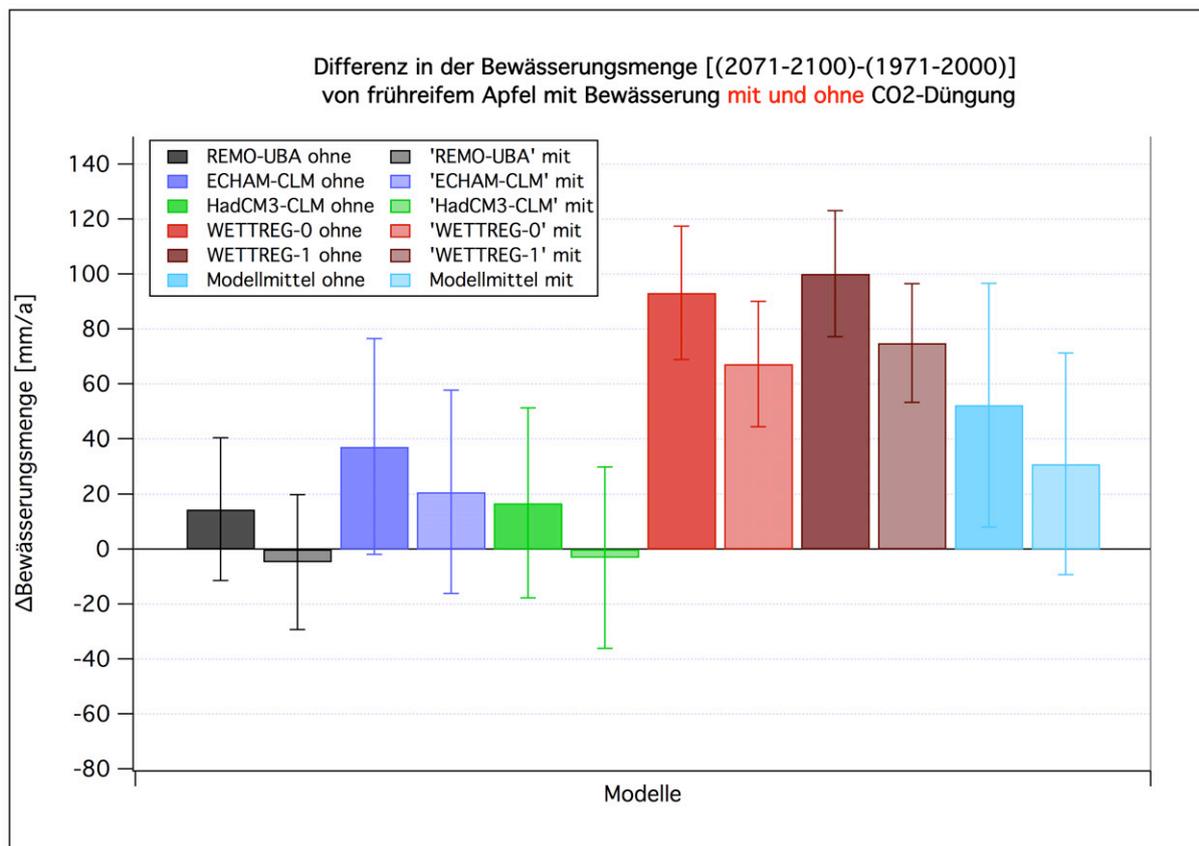


Abbildung 5.32: Veränderung [(2071-2100)-(1971-2000)] der “notwendigen Bewässerungsmenge *SUMBEW* vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

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 5.33** und **5.34**).

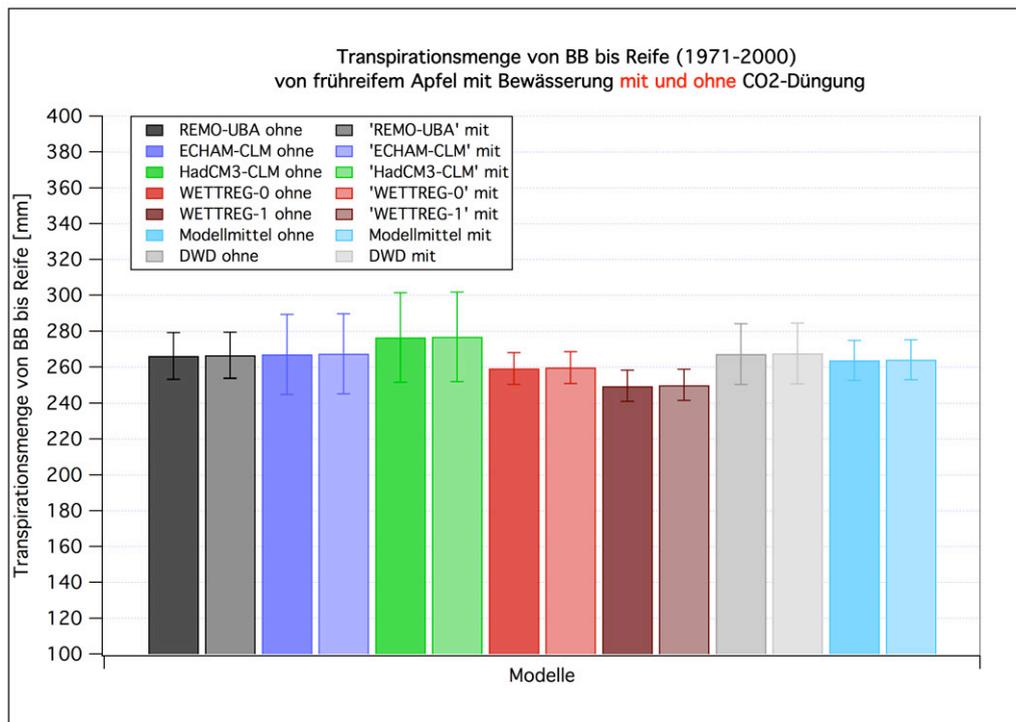


Abbildung 5.33: “Transpirationsmenge *SUMTRSV* vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte und den Zeitraum 1971-2000 “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

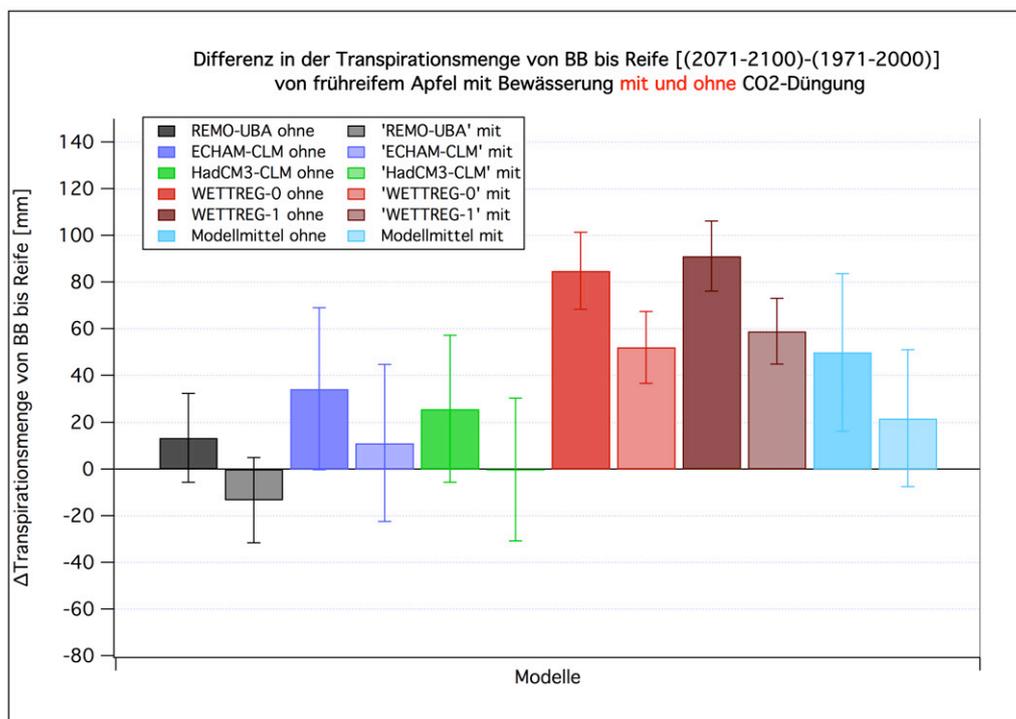


Abbildung 5.34: Veränderung [(2071-2100)-(1971-2000)] der “Transpirationsmenge *SUMTRSV* vom Blühbeginn bis zur Reife” beim frühreifen Apfel. Mittelwerte der Ergebnisse aus SIMWASER über die 19 Obstanbaugitterpunkte “mit und ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung”.

Eine vergleichende Darstellung aller 13 Fruchtarten/-sorten in Form von Tabellen und Abbildungen 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 I. Tabellen mit Ergebnissen aus allen fünf verwendeten RCM's für alle diese Größen und alle Fruchtarten sind in Anhang J im LB zu finden.

Zusammenfassung: Über die Veränderungen zwischen den beiden 30-Jahreszeiträumen 1971-2000 und 2071-2100 für die Mittelwerte "über die 5 Klimamodellläufe" und 19 Obstanbaugitterpunkte¹⁷ kann man Folgendes konstatieren: Die **Ertragsschäden** ohne künstliche Sommerberegnung nehmen ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung leicht um 4 % bis 8 % zu (**Abbildung I.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.¹⁸

Mit Sommerberegnung (**Abbildung I.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 138 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 mm¹⁹ geringer als ohne (**Abbildung I.8**). Ein ganz ähnliches Ergebnis ergibt sich auch für die **Gesamttranspirationsmenge** von Blühbeginn bis zur Reife (**Abbildung I.10**).

Die mittlere Bienenflugintensität während der Blütezeit nimmt für alle Fruchtarten (außer beim Wein) um 4 % bis 7 % signifikant ab (**Abbildung H.2**). Beim sehr spät blühenden Wein ist eine nicht signifikante Zunahme um 2.5 % ($\pm 2.9\%$) zu beobachten (Tabelle J.99 im LB).

¹⁷ bzw. 8 Weinbau- bzw. 4 Erdbeeranbaugitterpunkte beim Wein und bei der Erdbeere.

¹⁸ Man beachte aber die auf Seite 26 erwähnten Unsicherheiten in Bezug auf den CO₂-Düungeeffekt.

¹⁹ 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 im LB)!

5.7.1 Geordnete Schäden und Gesamtschäden

In diesem Abschnitt werden die in den vorhergehenden Kapiteln (Kapitel 5.3 ff.)²⁰ diskutierten Einzelschäden in geordnete Schäden ss_i [Gleichung (4.188) im LB] und Gesamtschäden s_{ges} [Gleichung (4.187) im LB] umgerechnet und die entsprechenden Ergebnisse dargestellt.

Zur Bestimmung des Dormanzschadens muss man das Chilling-Requirement C^* der betrachteten Obstart und -sorte kennen. Dann kann man mit den Chilling-Modellen (siehe z. B. Kapitel 4.6.1.2 im LB) 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 im LB 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 zwischen 101 DOY und 107 DOY, 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 5.35 zeigt die mittleren geordneten Schäden ss_i und den Gesamtschaden s_{ges} für die Strategie g-g (Abschnitt 4.10) 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 signifikante²¹ Schadensabnahme (2071-2100 vs. 1971-2000) auftritt (siehe Tabelle J.1). Die Veränderungen der Schäden sind auch in **Abbildung 5.36** 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.

²⁰ Die Methodik wurde bereits in den Kapiteln 4.5 ff. beschrieben.

²¹ Vergleiche die Bemerkungen zur Multiplizität auf Seite 110!

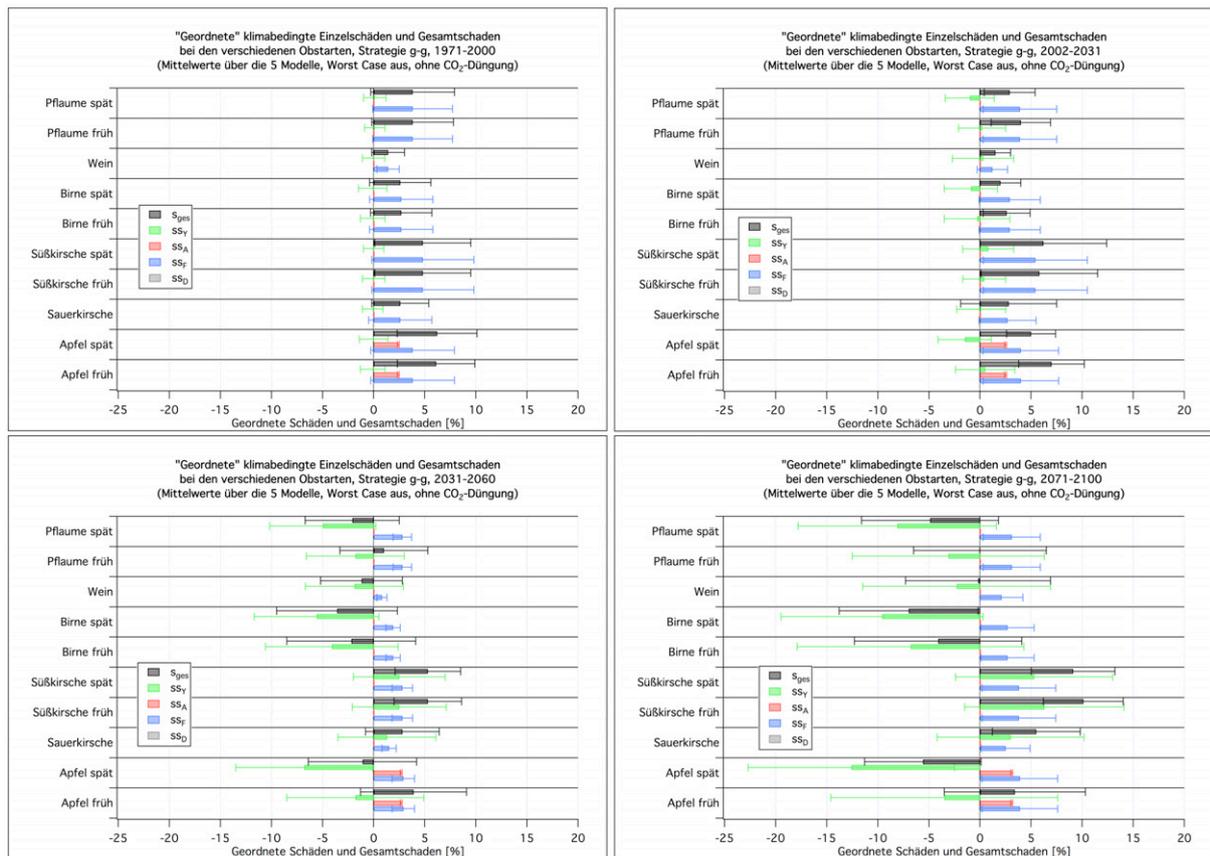


Abbildung 5.35: Geordnete Schäden ss_i und Gesamtschaden s_{ges} bei der **Strategie g-g** (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS); links oben: 1971-2000, rechts oben: 2002-2031; links unten: 2031-2060, rechts unten: 2071-2100.

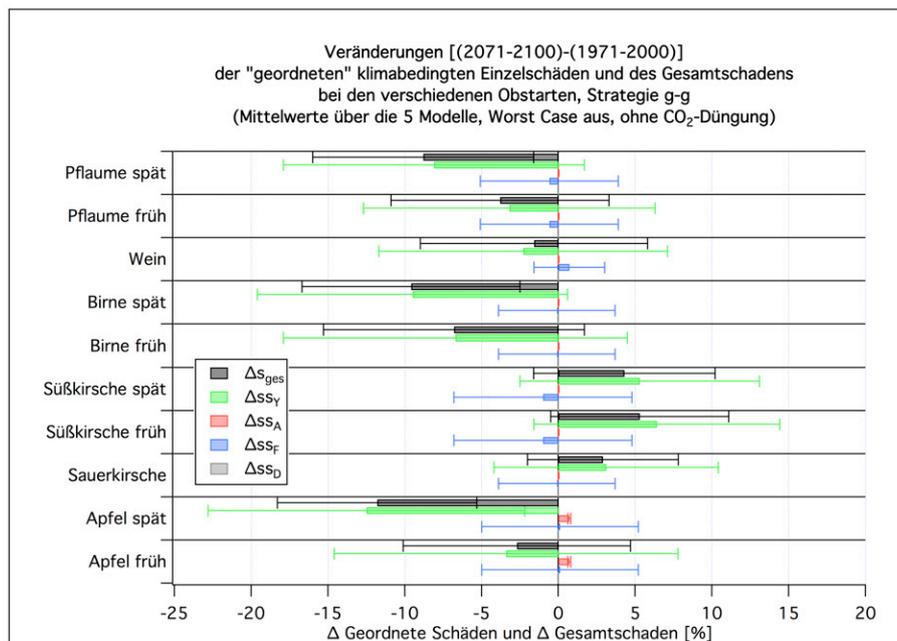


Abbildung 5.36: Veränderung Δss_i der geordneten Schäden und Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] bei **Strategie g-g** bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS).

Wie groß der Einfluss der beiden hier benutzten WETTREG-Läufe ist, zeigt die **Abbildung 5.37**. 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 J.2 und Abbildung J.3). Die großen Unterschiede im Yieldschaden s_Y (bzw. ss_Y) zwischen WETTREG und den 3 dynamischen Modellen kann man gut in Tabelle J.5 im LB beim frühreifen Apfel erkennen. Dass bei Berücksichtigung der WETTREG-Läufe in Abbildung 5.36 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.

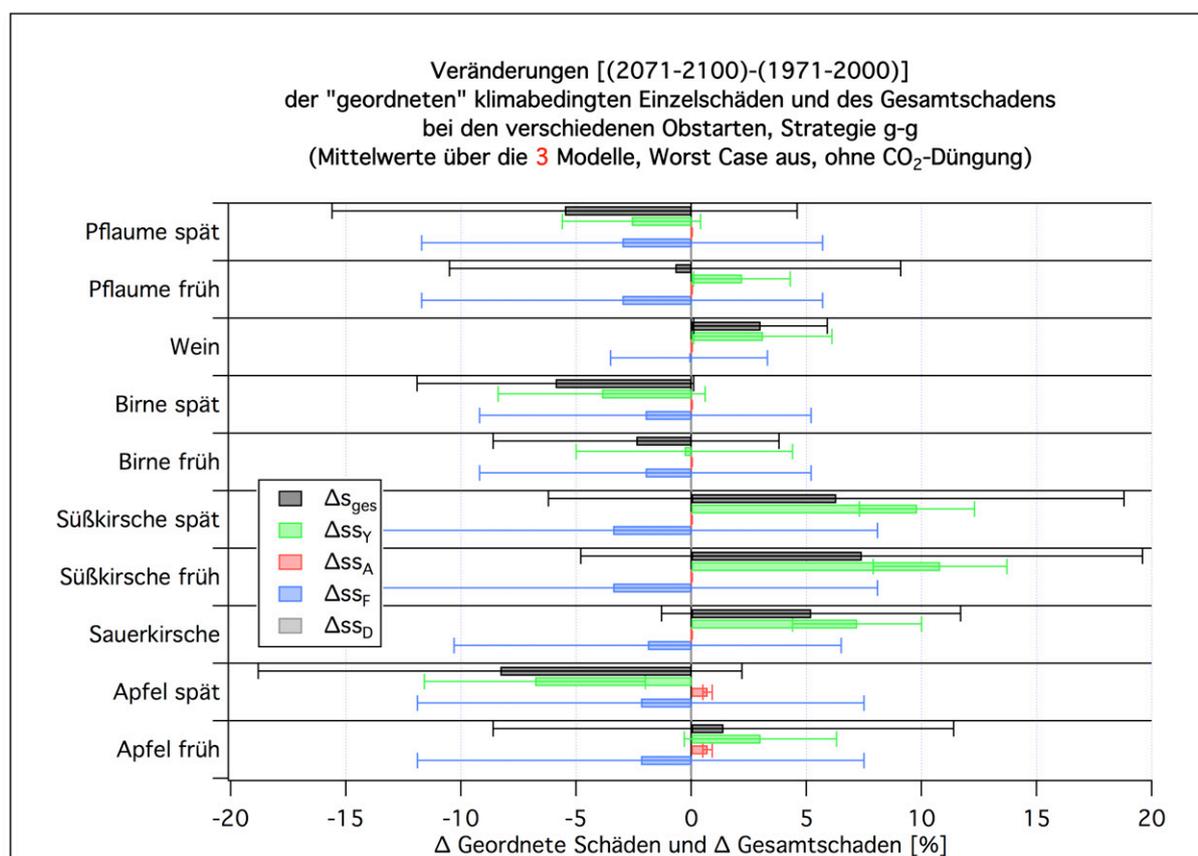


Abbildung 5.37: Veränderung Δss_i der geordneten Schäden und Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] bei **Strategie g-g** und Verwendung von **nur 3 Klimamodellläufen** bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS).

Mit CO₂-Düngung sind die Schäden im Zeitraum 1971-2000 bei der g-g-Strategie fast identisch mit denen der Abbildung 5.35. Danach werden die Yieldschäden s_Y aber sukzessive immer negativer (Ertragsgewinn), so dass bereits 2031-2060 alle Gesamtschäden signifikant negativ sind (Abbildung 5.58 im LB). Auch die Veränderungen (2071-2100 vs. 1971-2000) der Yield- und Gesamtschäden in **Abbildung 5.38** sind signifikant negativ (vgl. auch Tabelle J.3).

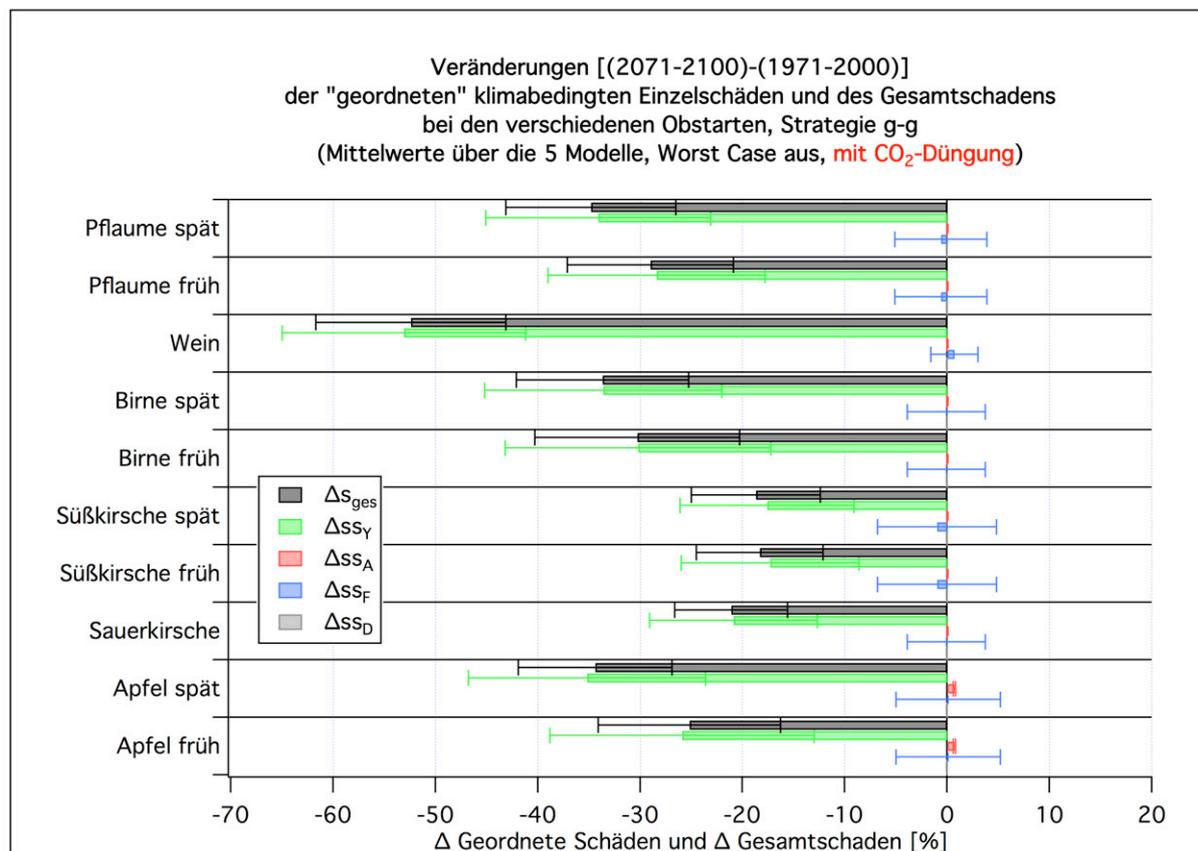


Abbildung 5.38: Veränderung Δs_{s_i} der geordneten Schäden und Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] bei **Strategie g-g** bei den unterschiedlichen Obstarten (**mit CO₂-Düngung**, Worst Case: AUS).

Abbildung 5.39 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 4.3](#)). Hätte man alle 10 WETTREG-Läufe in die Modellmittelwerte einbezogen, so wären die Endergebnisse hauptsächlich durch die WETTREG-Ergebnisse geprägt und mit großer Wahrscheinlichkeit zwar signifikant, aber trotzdem nicht realistisch.

Die Schäden bei Anwendung des Worst Case Szenarios (mit *NoReleaseProb* = 20%), aber ohne CO₂-Düngung, für die Strategie g-g sind vor 2071 mit denen der [Abbildung 5.35](#) identisch. Danach macht sich aber das nun eingeschaltete Worst Case Szenario bemerkbar, welches Dormanzschäden von 20% verursacht (hellgraue Balken in [Abbildung 5.61](#) im LB) und zusammen mit den anderen Schäden zu Gesamtschäden von 14%²² ... 28% führt

²² Das ist möglich, da negative Yieldschäden auftreten.

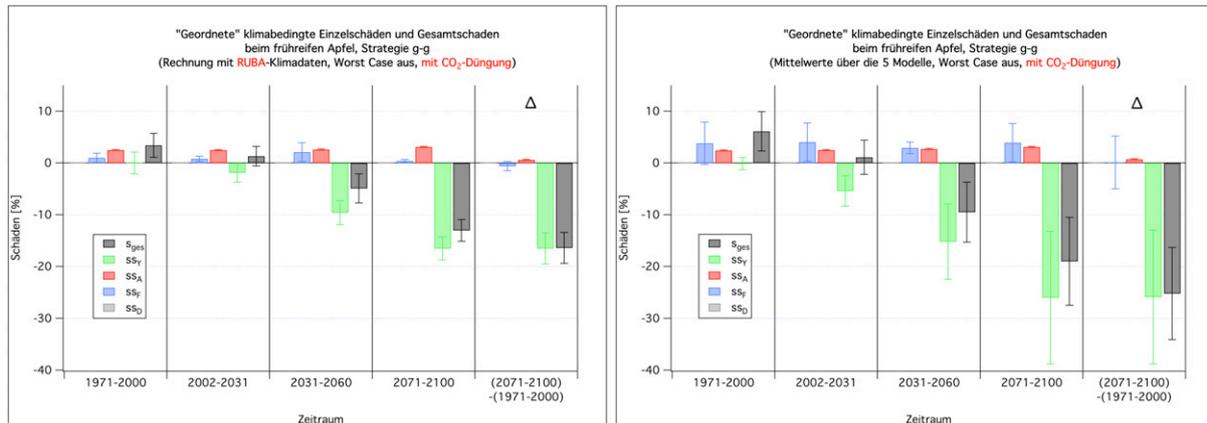


Abbildung 5.39: Geordnete Schäden ss_i und Gesamtschaden s_{ges} bei der **Strategie g-g (mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)**; links: berechnet mit RUBA, rechts: "Mittelwert über alle 5 Modelle".

(schwarze Balken; vgl. auch Tabelle J.4). Die zugehörigen Veränderungen der Schäden sind in **Abbildung 5.40** verdeutlicht.

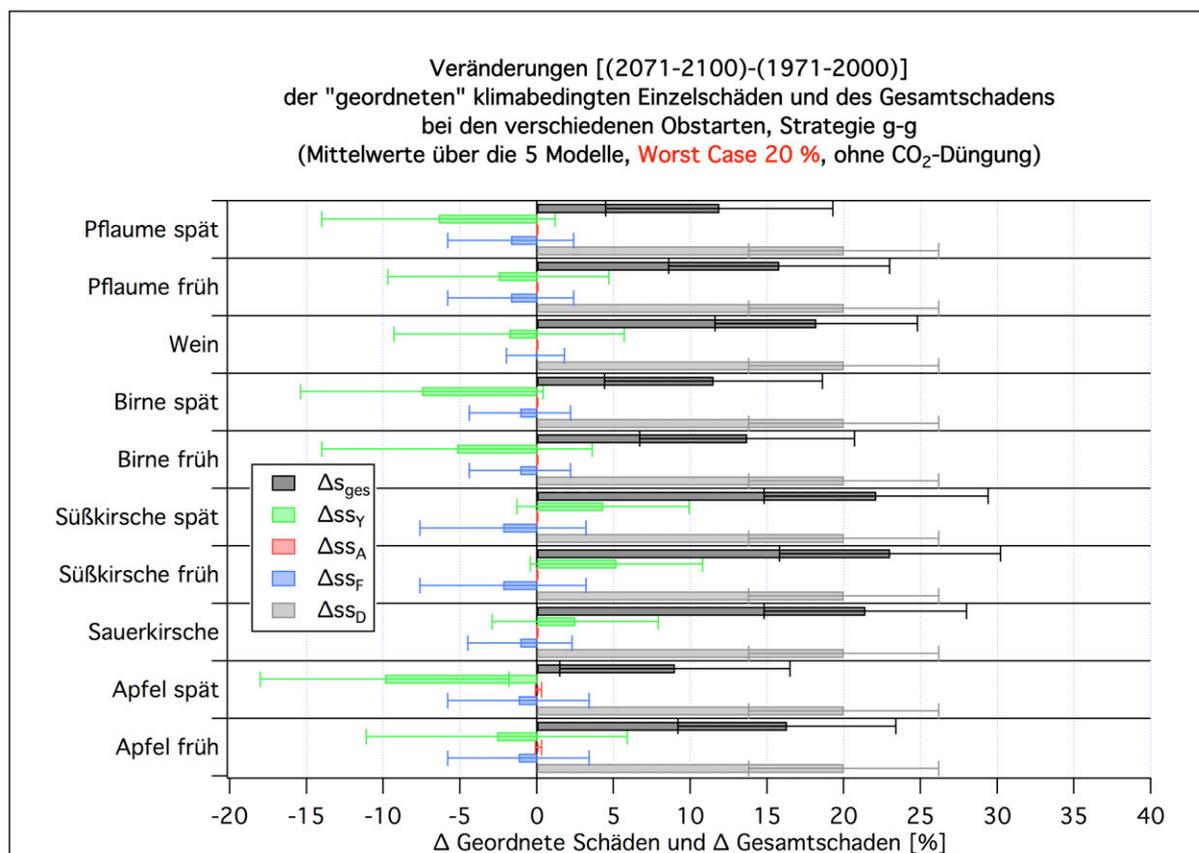


Abbildung 5.40: Veränderung Δss_i der geordneten Schäden und Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] bei **Strategie g-g** bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 20 %**).

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 J.1.1** (Tabellen J.1 ff.) bzw. **Anhang J.1.2**

(Abbildungen J.1 ff.).

Bei der m-g-Strategie (Abbildung 5.63 im LB), 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 in Abbildung 5.63 im LB) entfallen ganz. Die Gesamtschäden und die Veränderungen der Schäden (Abbildung 5.41) sind daher insgesamt *negativer*.

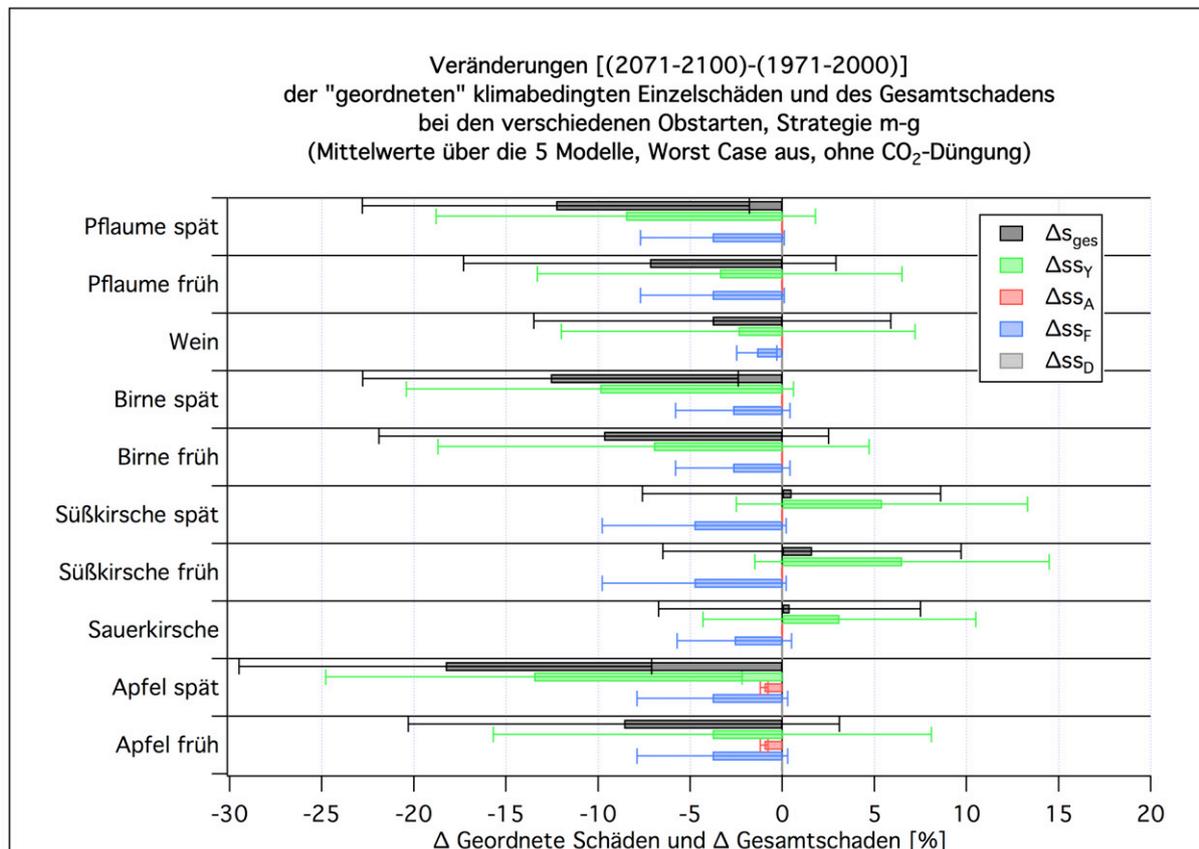


Abbildung 5.41: Veränderung Δss_i der geordneten Schäden und Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) [(2071-2100)-(1971-2000)] bei **Strategie m-g** bei den unterschiedlichen Obstarten (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS).

Tabellen und Abbildungen für den Gesamtschaden und seine Veränderung für die m-g-Strategie (ohne und mit CO₂-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 J.1.1** (Tabellen J.5 ff.) bzw. **Anhang J.1.2** (Abbildungen J.1 und J.6 ff.).

Die Unterschiede im Gesamtschaden zwischen "Worst Case 3%" und "Worst Case AUS" betragen nur ungefähr 0.5%.²³ Verglichen mit den breiten Konfidenzintervallen sind die

²³ 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 (4.2)]. Weiterhin ist die Anzahl der NoRelease-Jahre hier eine Zufallsvariable, so dass der Dormanzschaden s_D beim Mitteln 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.

zusätzlichen Schäden im Worst Case Szenario bei geringer *NoReleaseProb* ($\lesssim 5\%$) daher vernachlässigbar.

Wenn man die Gesamtschäden und deren Veränderungen beim frühreifen Apfel für die 5 Klimamodelle getrennt aufträgt, so erhält man die **Abbildung 5.42**. 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.

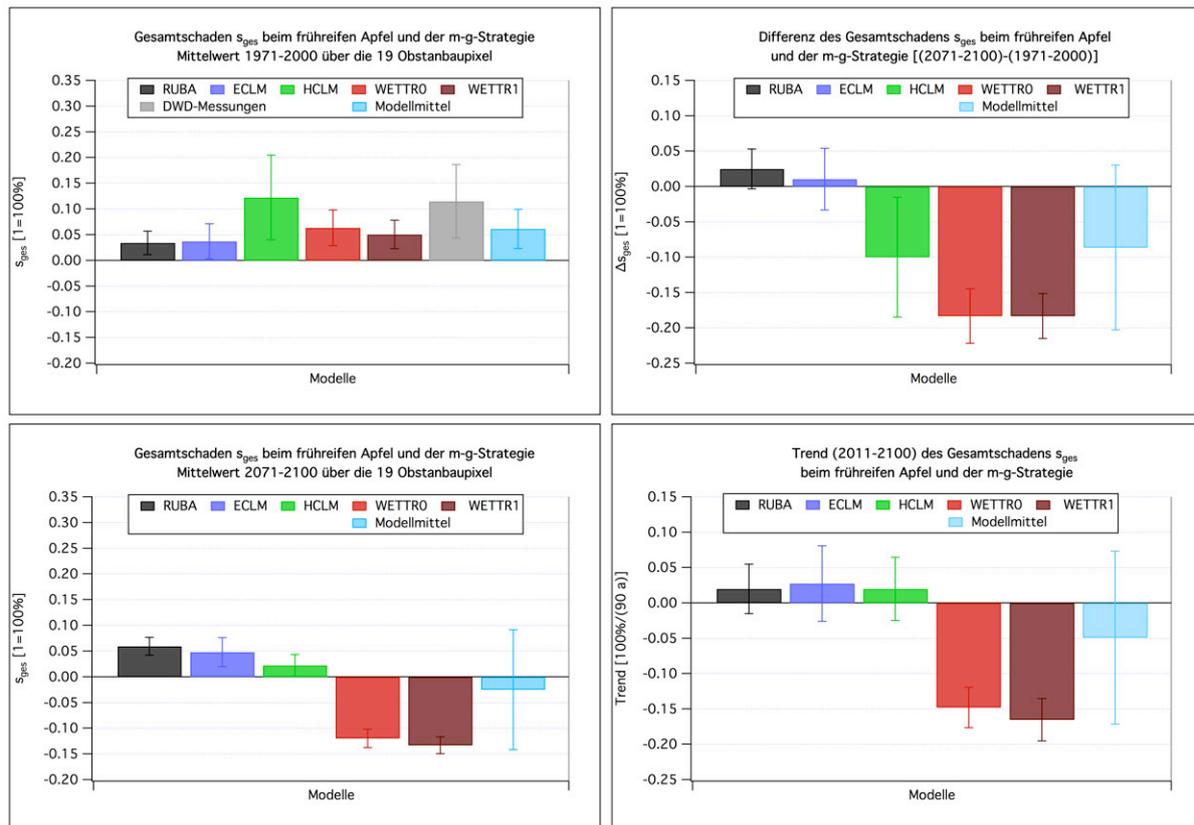


Abbildung 5.42: Gesamtschäden s_{ges} (in %) bei der **Strategie m-g** beim frühreifen Apfel (ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; inkl. Apfelwicklerschaden); links: Mittelwerte 1971-2000 und 2071-2100, rechts: Differenzen und Trend.

Stellt man den jährlichen Verlauf der Gesamtschäden für alle 5 Modelle dar, so ergibt sich die **Abbildung 5.43**. 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

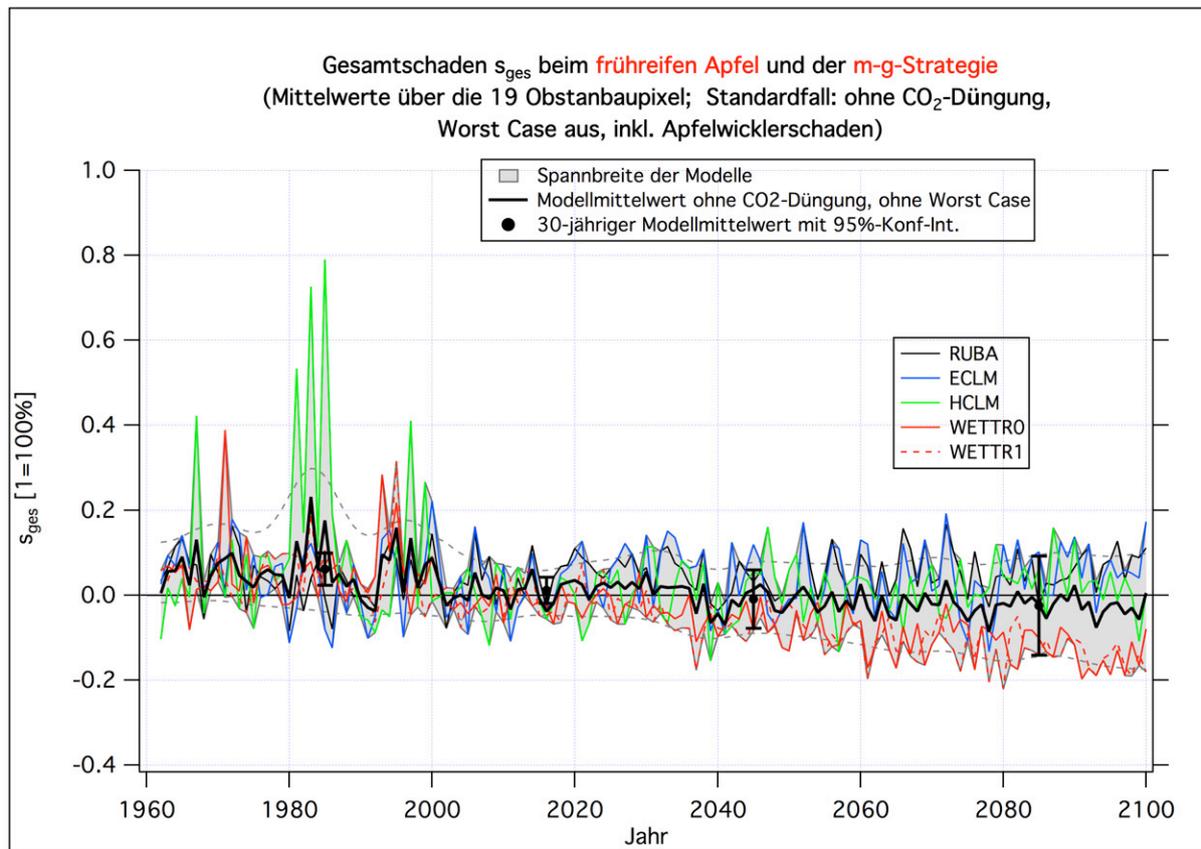


Abbildung 5.43: Verlauf der Gesamtschäden s_{ges} (in %) bei der **Strategie m-g** beim frühreifen Apfel (**Standardfall:** ohne CO₂-Düngung, **Worst Case:** AUS). Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle der 30-jährigen Mittelwerte “über die 5 Klimamodellläufe”.

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 Ergebnisse²⁴, welche mit allen 5 Klimamodellen (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 5.44. 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

²⁴ In diesem Abschnitt sind das die Gesamtschäden, welche vorher über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte) gemittelt wurden.

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 5.44** zeigt denselben Fall (Standardfall) wie **Abbildung 5.43**, 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 4.2)!

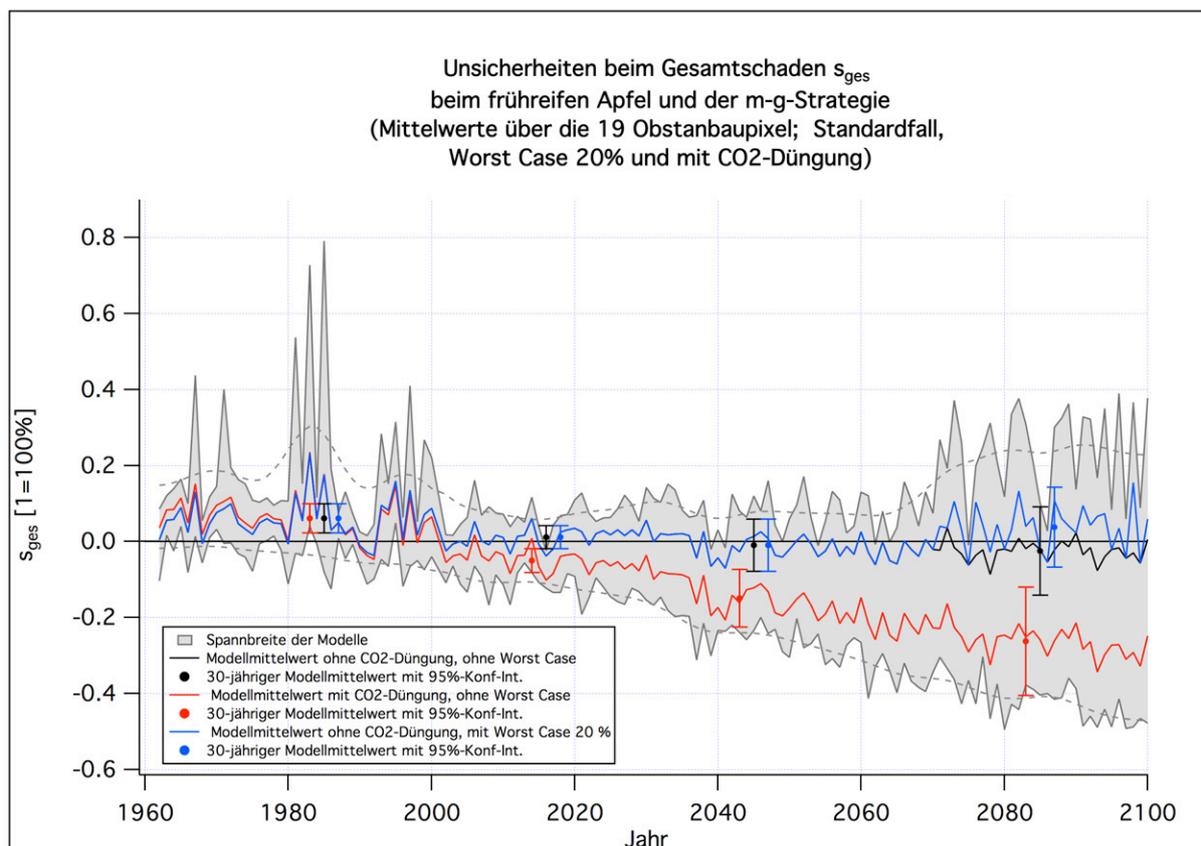


Abbildung 5.44: Unsicherheiten beim Gesamtschaden s_{ges} (in 1=100 %) bei der **Strategie m-g** beim frühreifen Apfel (**3 Fälle:** ohne CO₂-Düngung und ohne Worst Case (= Standardfall), mit CO₂-Düngung und ohne Worst Case, ohne CO₂-Düngung und mit Worst Case 20 %).

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 5.45**). Interessant ist, dass die 95%-Vertrauensintervalle (schwarze Balken), besonders im Zeitraum 2071-2100, nun kleiner ausfallen als bei der m-g-Strategie (**Abbildung 5.43**). 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) im LB] bzw. s_m [Gleichung (4.22) im LB] kleiner. Zusätzlich steigen die Freiheitsgrade FG [Gleichung (4.27) im LB] an, weil s_1 [Gleichung (4.17) im LB] nun größer ist. Größere FG verursachen aber kleinere t-Quantile [Gleichung (4.28) im LB] und folglich schmalere Konfidenzintervalle.

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 5.46** 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.

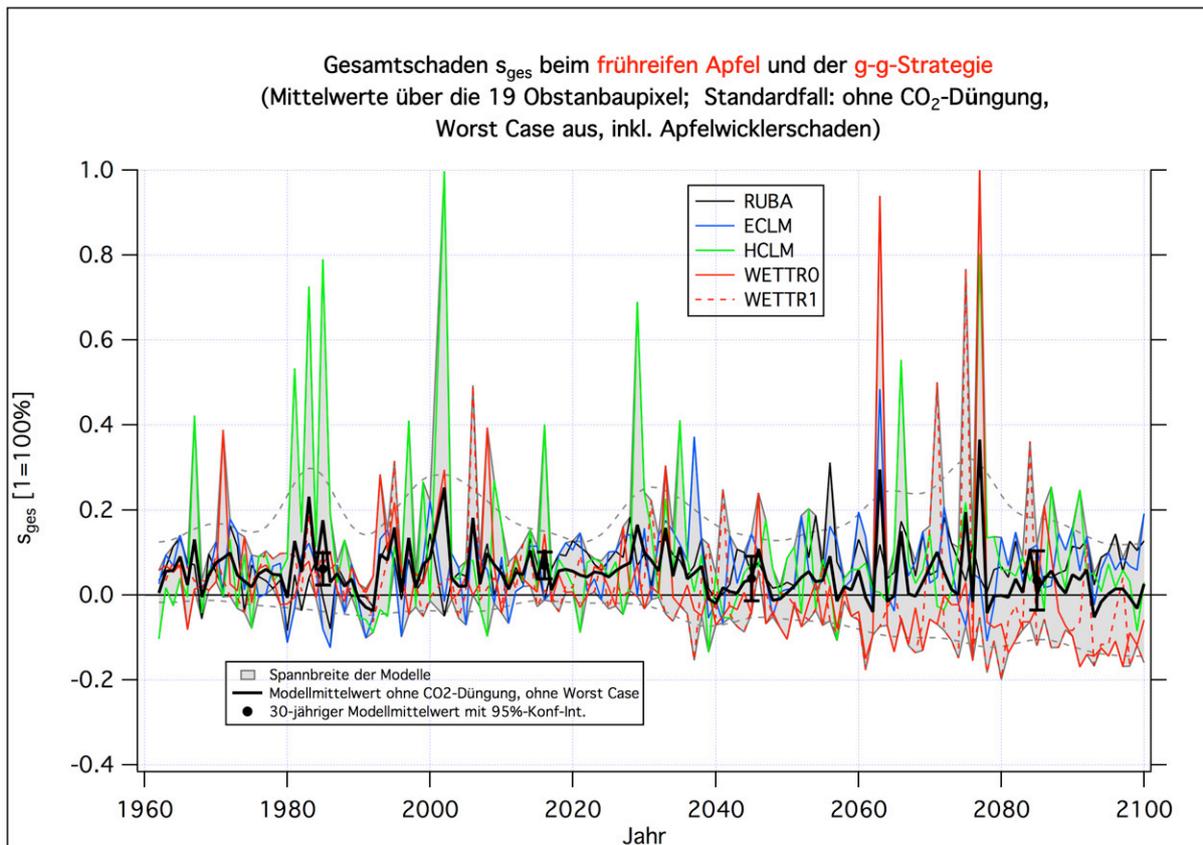


Abbildung 5.45: Verlauf der Gesamtschäden s_{ges} (in %) bei der **Strategie g-g** beim frühreifen Apfel (**Standardfall:** ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS).

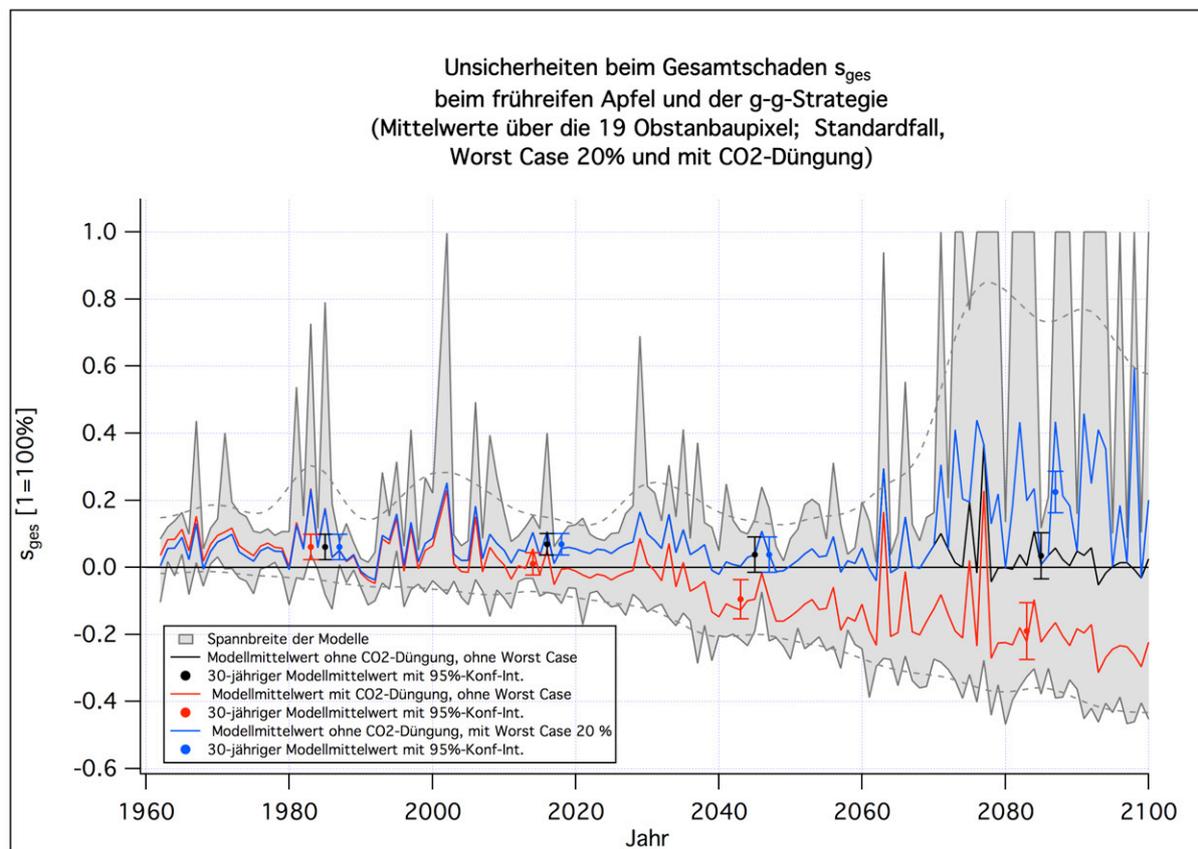


Abbildung 5.46: Unsicherheiten beim Gesamtschaden s_{ges} (in 1=100 %) bei der **Strategie g-g** beim frühreifen Apfel (**3 Fälle:** ohne CO₂-Düngung und ohne Worst Case, mit CO₂-Düngung und ohne Worst Case, ohne CO₂-Düngung und mit Worst Case 20 %).

Die Abbildungen (hier nicht gezeigt) für die **m-m-Strategie** entsprechen ab 2001 denen 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 im LB).

Tabellen zu anderen Strategiekombinationen und Impaktmodell-Variationen findet man im Langbericht. Die wichtigsten Ergebnisse seien hier kurz zusammengefasst: Da bei der o-o-Strategie 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 (Tabelle K.1 im Anhang K.1 im LB; siehe auch die Abbildungen K.1 und K.2 im LB).

Bei der m-o-Strategie (Tabelle K.2 und Abbildungen K.1 und K.3 im LB) 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.

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.

Weitere ausführliche Ergebnisse in Form von Tabellen und Graphiken findet man im **Anhang J.1** und natürlich im Anhang **K.1** im LB.

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-signifikant²⁵ 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 (9 % 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.

²⁵ 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) im LB; Kapitel 4.12.3 im LB] der einzelnen Strategien (Kapitel 4.10) und für die Gesamtkosten [siehe z. B. Gleichung (4.198) und (4.201) im LB; Kapitel 4.12.4 im LB], 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 5.47 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 5.7 und K.20 im LB) 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.

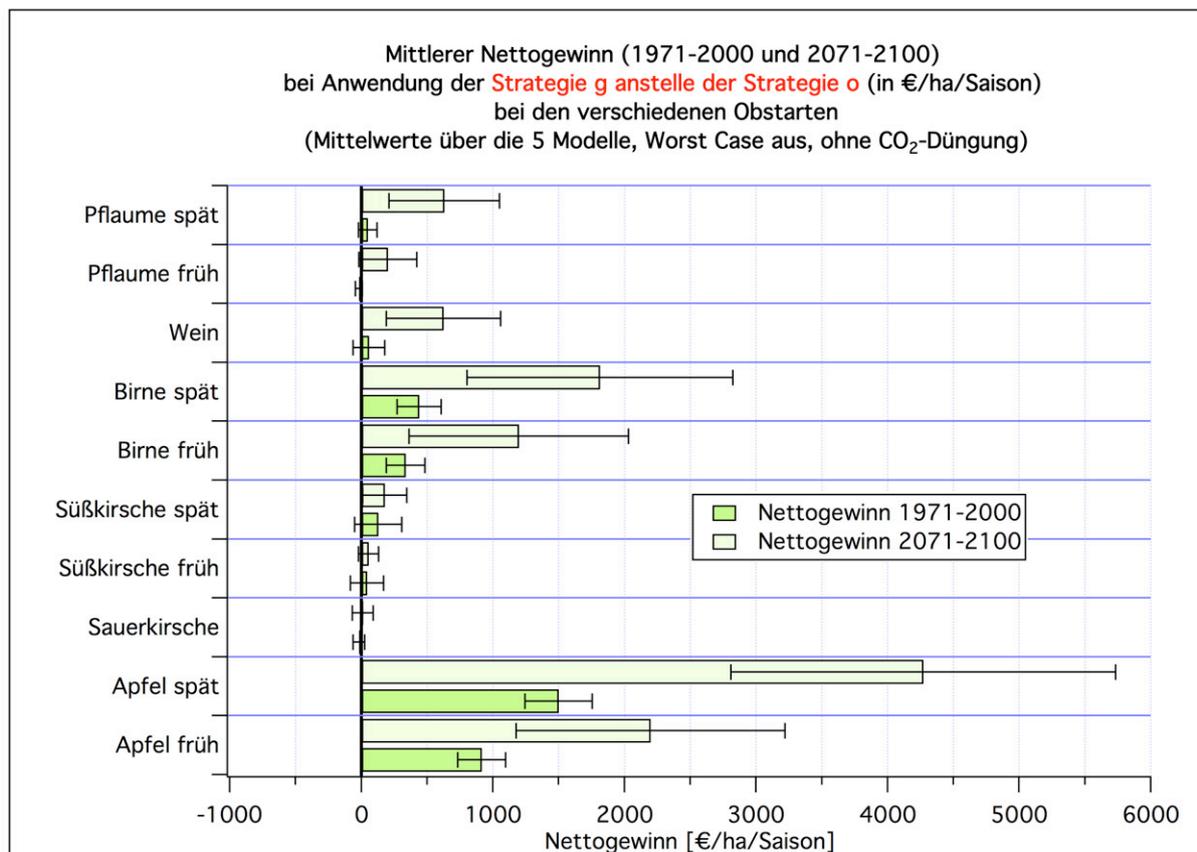


Abbildung 5.47: Mittlerer Nettogewinn (1971-2000 und 2071-2100) bei Verwendung der **Strategie g anstelle von Strategie o** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe mit 95%-Konfidenzintervallen; ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

Verwendet man hingegen die m-Strategie (**Abbildung 5.48**), so erleidet man gegenüber der o-Strategie bei der Sauerkirsche und der Pflaume im Zeitraum 1971-2000 sogar leicht signifikante Verluste.

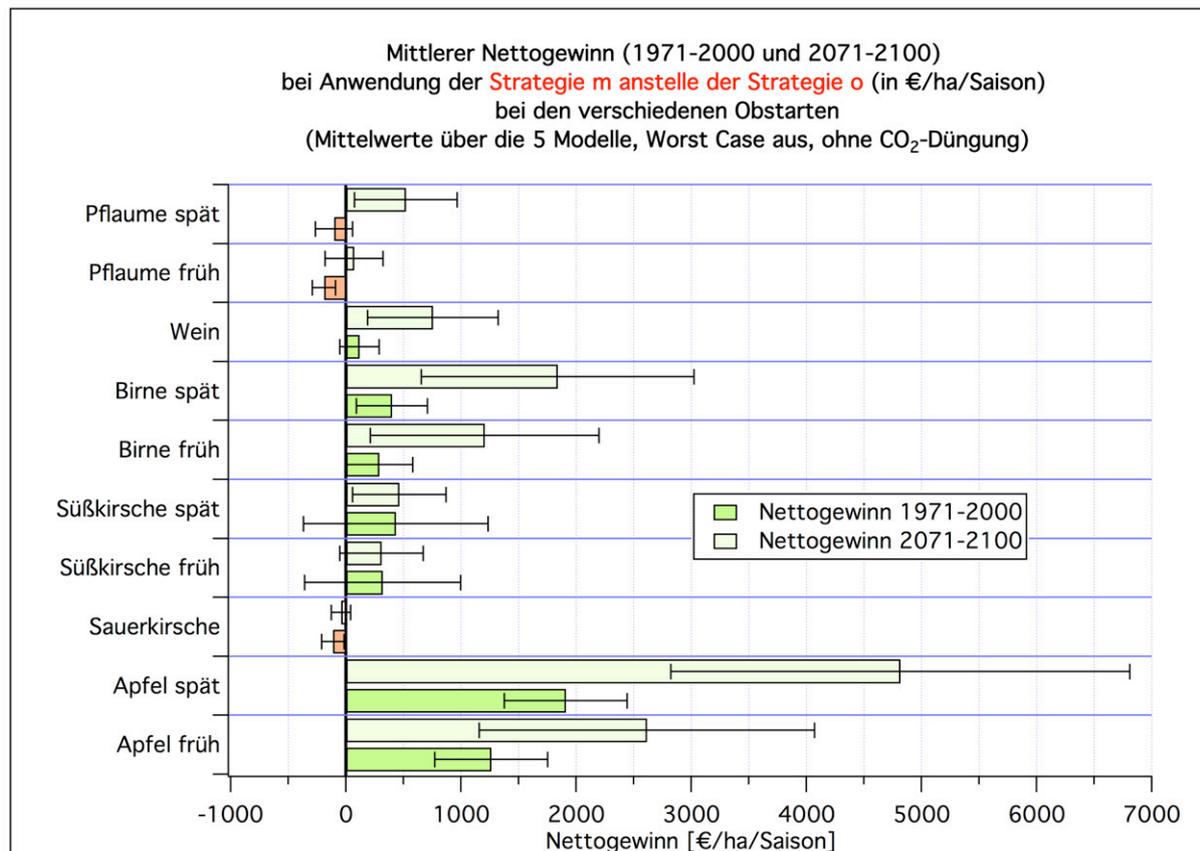


Abbildung 5.48: Mittlerer Nettogewinn (1971-2000 und 2071-2100) bei Verwendung der **Strategie m anstelle von Strategie o** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe; ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

An **Abbildung 5.49** 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 im LB und Gleichung (4.5)] 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 (4.7)]. Bei Sauerkirsche und Pflaume ist es daher sinnvoller, die g-g-Strategie zu verwenden!

Abbildung 5.50 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).²⁶

²⁶ 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 €.

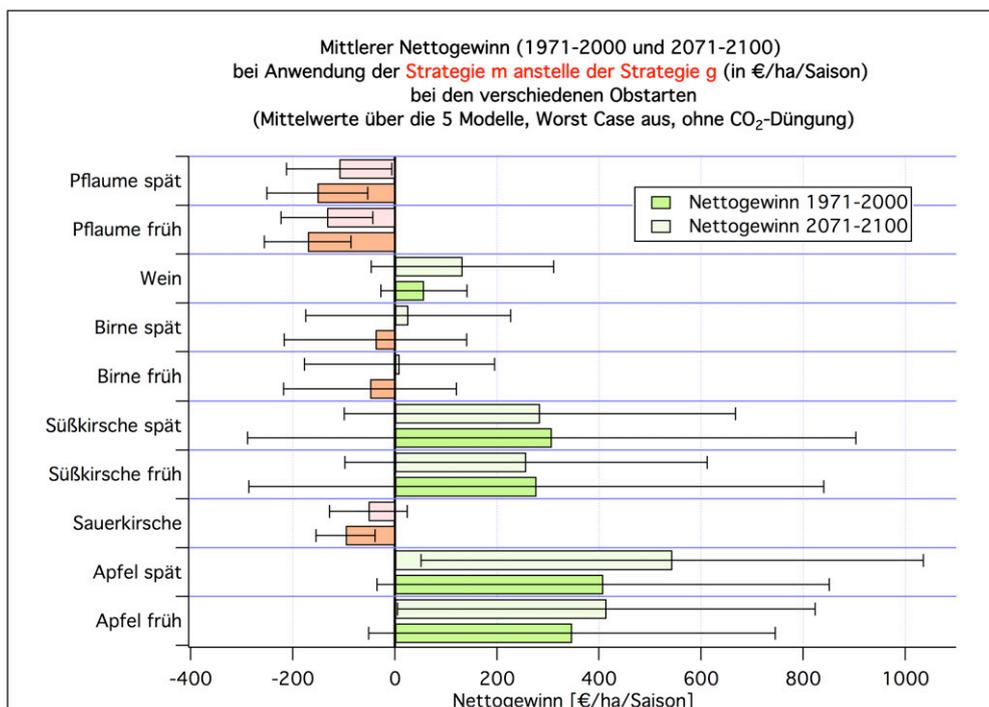


Abbildung 5.49: Mittlerer Nettogewinn (1971-2000 und 2071-2100) bei Verwendung der **Strategie m** anstelle von **Strategie g** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe; ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

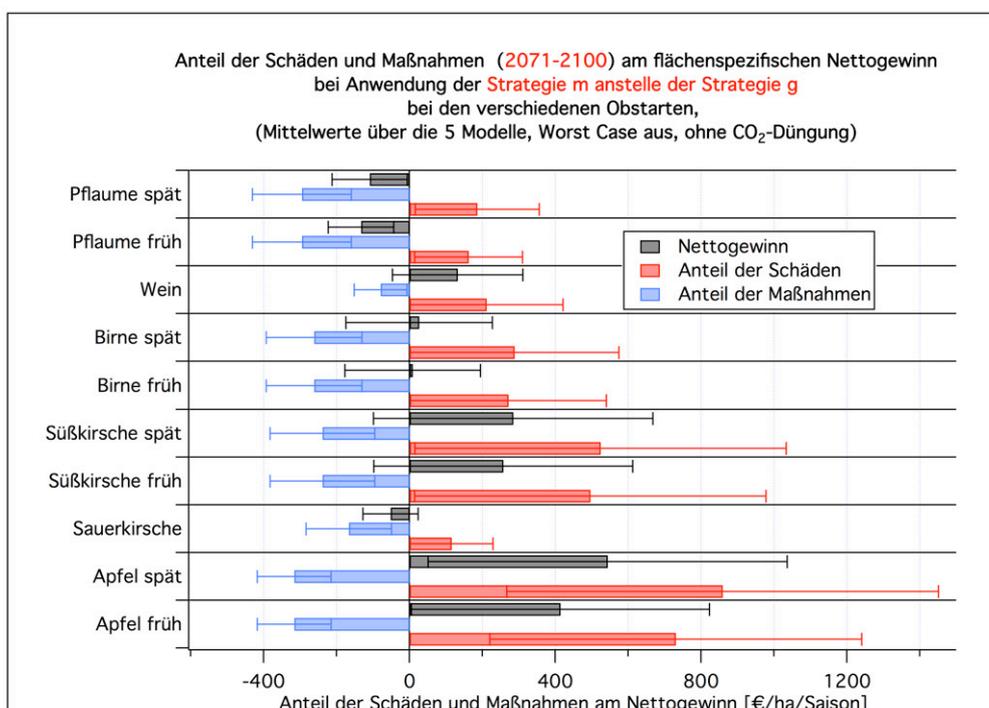


Abbildung 5.50: Anteil der Schäden und Maßnahmen am Nettogewinn (Mittelwert 2071-2100) bei Verwendung der **Strategie m** anstelle von **Strategie g** (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe; ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

und der Nettogewinn ist mit ca. 4800 € auch wesentlich höher.

Die extrem breiten Konfidenzintervalle in der Abbildung 5.49 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 5.51**, welche den ab 2002 akkumulierten Nettogewinn beim frühreifen Apfel zeigt, wenn man die m-Strategie anstelle der g-Strategie anwendet.^{27 28} 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.

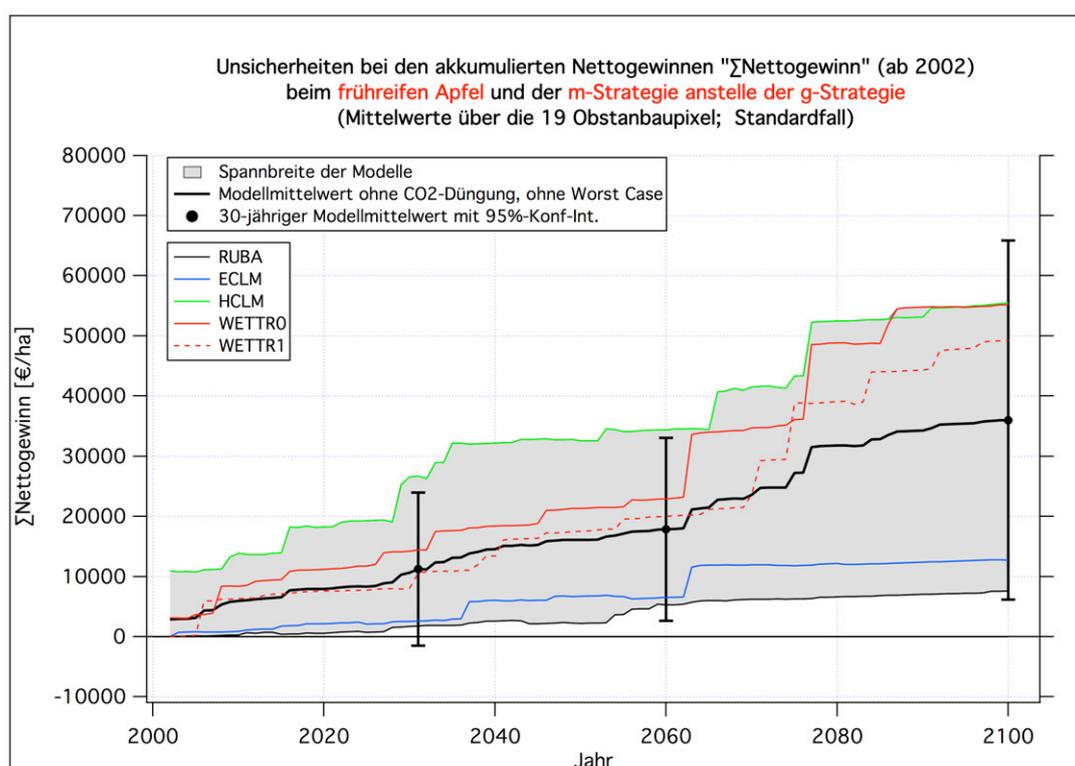


Abbildung 5.51: Akkumulierter Nettogewinn (ab 2002) (in €/ha) beim frühreifen Apfel bei Verwendung der **Strategie m anstelle von Strategie g** (für jedes der 5 Modelle und Modellmittelwert; ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

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

²⁷ Der hohe Startwert des Nettogewinns im Jahr 2002 beim HCLM in Abbildung 5.51 wird durch einen 99.7%-igen Frostschaden hervorgerufen, der bei der g-Strategie auftritt, aber in der m-Strategie durch die Frostberegnung vermieden wird.

²⁸ Die Bezeichnung "30-jähriger Modellmittelwert" in der Abbildung bezieht sich auf die Endjahre der in den Tabellen 5.5 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 4.3).

Die **Tabellen 5.5 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 festhält²⁹. 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 (4.7) 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 (4.2)], 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 (4.7) 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 5.47 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 5.49], werden im Weiteren bevorzugt die g-g- und die m-g-Strategie-Kombinationen untersucht. Für Obstbauern, die bereits 1971-2000 alle möglichen Maßnahmen³⁰ 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.

²⁹ Und intensivere Maßnahmen bei der Strategie (B) durchführt.

³⁰ 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 5.5: 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 5.6: 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 5.7: 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 verschiedene Strategie-Kombinationen findet man im Anhang [K.2.1](#) im LB.

Tabelle 5.8: 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 4.3) ist, verglichen mit einer Strategie ohne irgendwelche Maßnahmen (o-Strategie), für alle Obstarten rentabel (Abbildung 5.47). Die durch die g-Strategie zu erwirtschaftenden Gewinne sind sogar, außer für die Kirsche, die frühreife Pflaume und die spätreife Pflaume³¹, 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 5.49). 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. 5.51 für den frühreifen Apfel), wenn man die m- anstelle der g-Strategie verwendet. Bei der Pflaume und der Sauerkirschen 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 5.5 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 im LB; Spalte D).

5.7.2.2 Die Kosten des Klimawandels

Abbildung 5.52 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 (4.8) mit $x = 3$ und $B = A = g$, gemittelt über die 19

³¹ 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 im LB ff.) zurückzuführen ist. Bei allen anderen Obstarten ist der Schadensanteil negativ (Gewinn!), was durch die negativen Yieldschäden (Abbildung 5.35) [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.

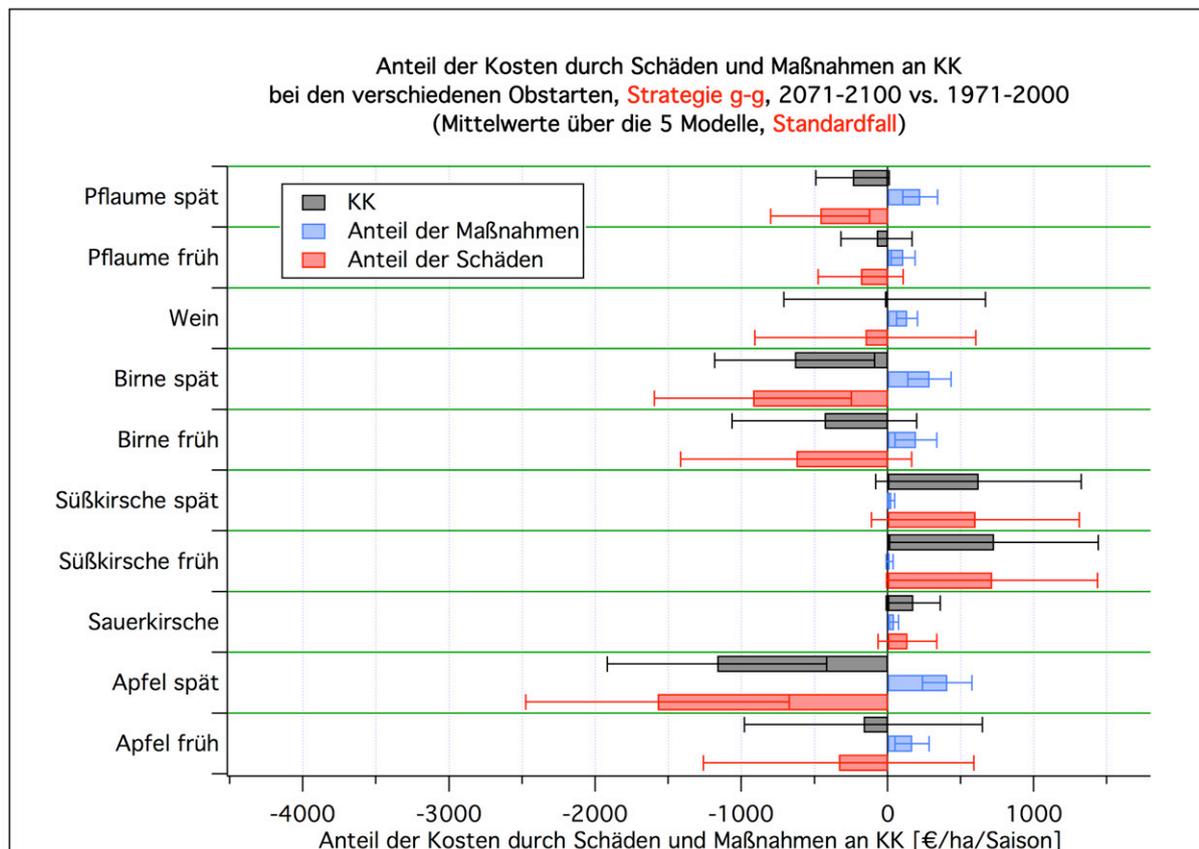


Abbildung 5.52: Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an den “Gesamtkosten *KK* des Klimawandels” (in €/ha/Saison) bei den verschiedenen Obstarten [(2071-2100) vs. (1971-2000)] (Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

Verwendet man die m-g-Strategie (Abbildung 5.53), so wird der Maßnahmeanteil (blaue Balken) an *KK* größer, gleichzeitig verschieben sich aber die Schadenskostenanteile (rote Balken) außer bei der Sauerkirsche und Pflaume³² 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 2001³³ veränderte Strategie. Sogar dann, wenn sich das Klima nicht ändern würde, ergäben sich bei der m-g-Strategie *KK*-Werte ungleich null!³⁴

³² Bei diesen ist die m-g-Strategie, wie im vorherigen Kapitel festgestellt wurde, nicht rentabel.

³³ In den Bildern ist meistens nur der Zeitraum 2071-2100 bzw. die Differenz (2071-2100)-(1971-2000)

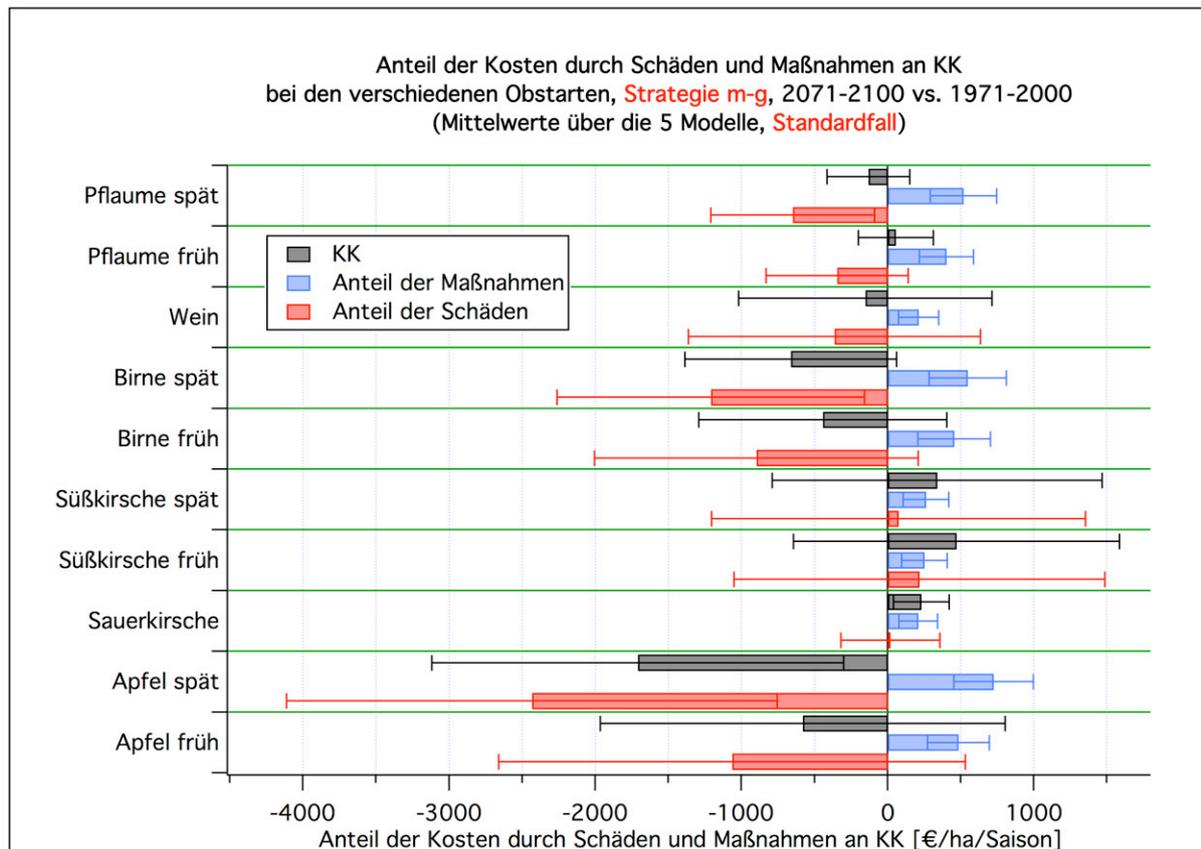


Abbildung 5.53: Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an den “Gesamtkosten *KK* des Klimawandels” (in €/ha/Saison) bei den verschiedenen Obstarten [(2071-2100) vs. (1971-2000)] (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

Bei der m-g-Strategie mit Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffekts (**Abbildung 5.54**) 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 5.55**) 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 [Kapitel 4.5 und Formel (4.98) im LB mit $P_D = 20\%$].

dargestellt.

³⁴ 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.

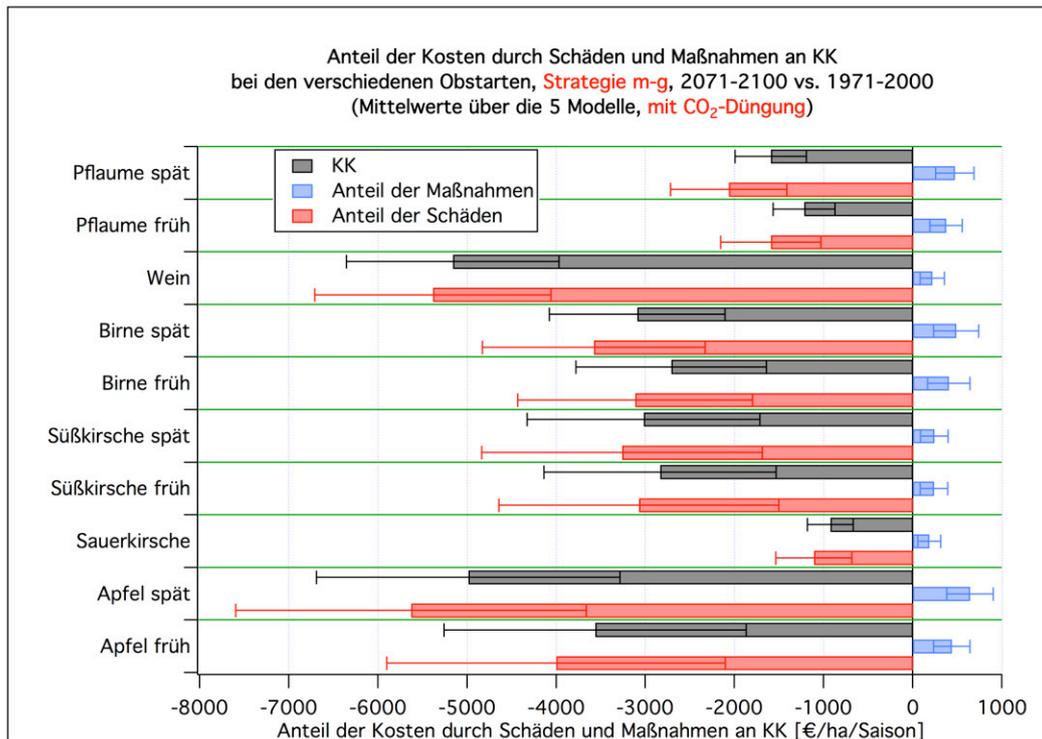


Abbildung 5.54: Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an den “Gesamtkosten *KK* des Klimawandels” (in €/ha/Saison) bei den verschiedenen Obstarten [(2071-2100) vs. (1971-2000)] (Strategie m-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: aus; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

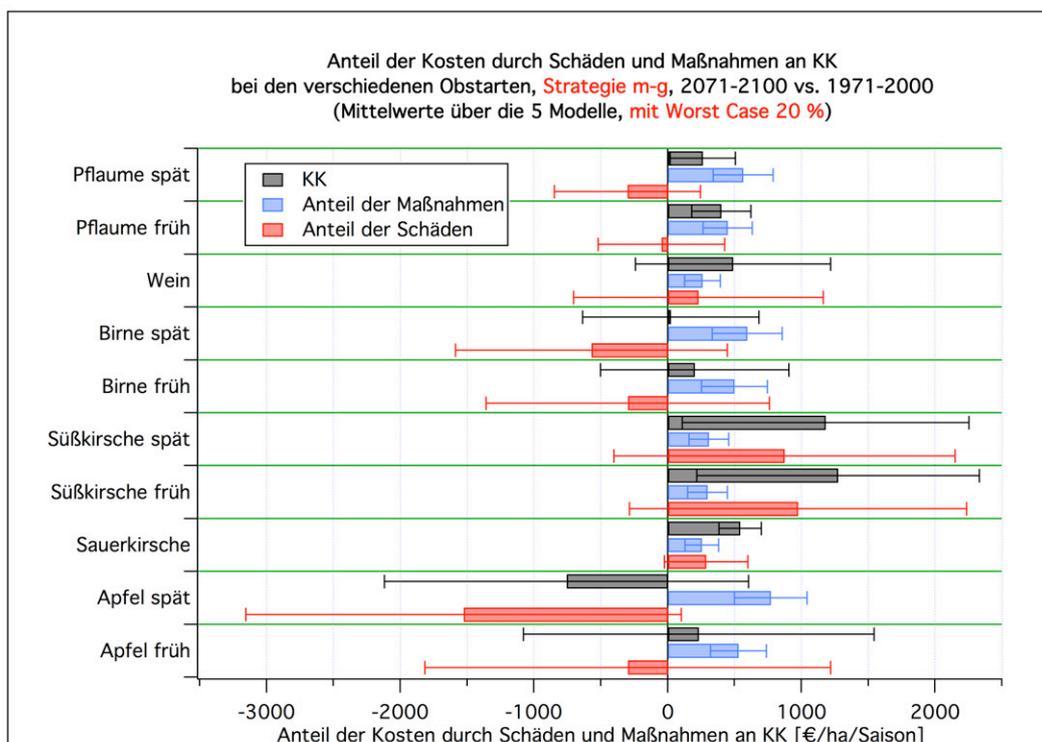


Abbildung 5.55: Anteil der Kosten durch Schäden und Gegenmaßnahmen an den “Gesamtkosten *KK* des Klimawandels” (in €/ha/Saison) bei den verschiedenen Obstarten [(2071-2100) vs. (1971-2000)] (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20%; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

Abbildung 5.56 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)] zwangsläufig ein sehr großes Konfidenzintervall, welches von -1965 €/ha/a bis 803 €/ha/a reicht (vgl. die “m-g-Zeile” in Tabelle 5.9).

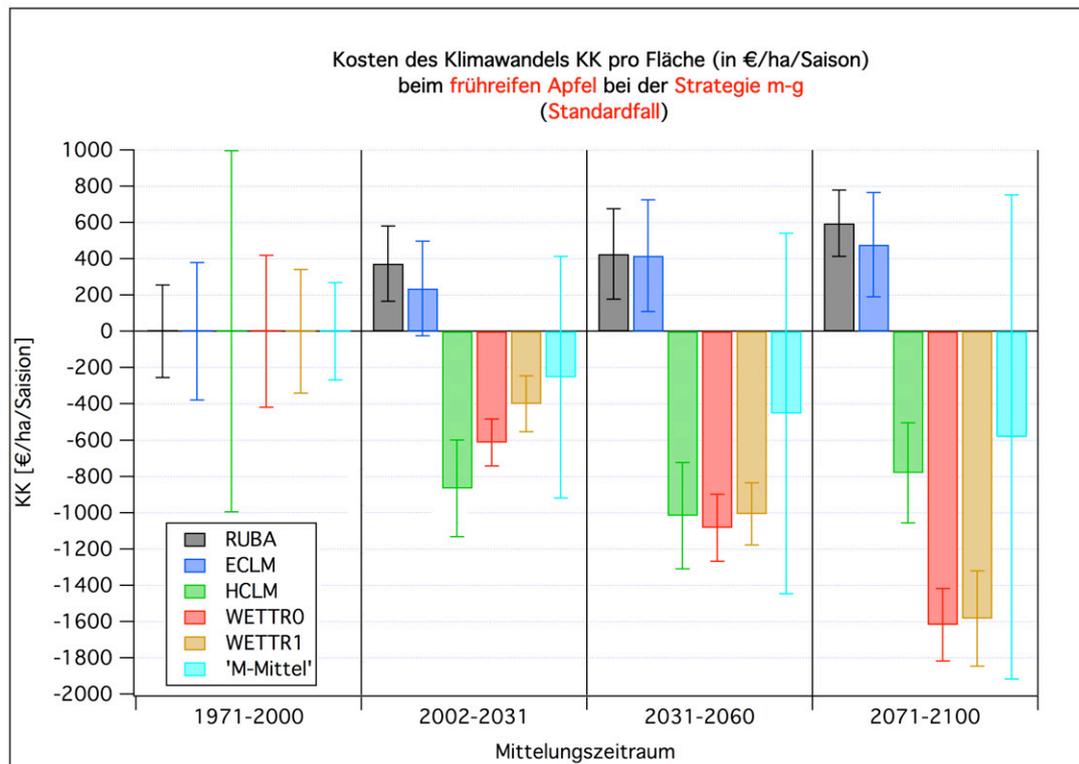


Abbildung 5.56: Kosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim frühreifen Apfel, berechnet mit den 5 unterschiedlichen Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: aus)

Die **Tabellen 5.9 bis 5.11** 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 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).³⁵ 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 J.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.

Tabelle 5.9: 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	

³⁵ 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 5.10: 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 5.11: 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 in ganz Hessen anfallenden Kosten KKA des Klimawandels [für alle 19 Obstanbaugitterpunkte bzw. die 8 Weinbaugitterpunkte; Gleichung (4.201) im LB] entsprechen denen der Tabellen für KK , nur wurden die Zahlen mit den in Tabelle 4.26 im LB angegebenen Anbauflächen der entsprechenden Obstart multipliziert. Werte für diese Größe für den frühreifen und spätreifen Apfel sowie den Wein für verschiedene Strategiekombinationen und Impaktmodellvariationen findet man in den Tabellen 5.23 bis 5.25 im LB. Man beachte, dass die Werte dort 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 im LB, Zeile: g-g WC=20%; Spalte: Differenz”). Die größten Einsparungen³⁶ 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 im LB, Zeile: m-g CO₂ an, Spalte: Differenz” und Abbildung K.74 im LB).³⁷

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 im LB, Zeile: Wein, Spalte: 2100” und Abbildung K.77 im LB). 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 im LB, Zeile: Wein, Spalte: 2100”).

Genaue 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 J.2.1** und als Graphiken im **Anhang J.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 im LB und als Graphiken im Anhang K.2.3.2 im LB.

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 J.2.2.2** findet man Graphiken für diesen jährlichen Verlauf der Kosten KK , die in der Form den Abbildungen 5.43 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 Realisierungen³⁸.

Abbildung J.16 im Anhang J.2.2.2 zeigt die mit den Werten der 5 RCM's berechneten jährlichen KK -Werte [gemäß Gleichung (4.8)³⁹] für den Standardfall bei der g-g-

³⁶ Die *Einsparungen* beinhalten hier sämtliche Gewinne durch verringerte Schäden (inkl. höhere Erträge) sowie ggf. veränderte Maßnahmekosten im Sinne der Gleichung (4.8), welche hier allerdings noch mit der Weinanbaufläche “in Hessen” multipliziert wurde, um Gesamtkosten pro Jahr zu erhalten. Analoges gilt für die *Zusatzkosten*.

³⁷ In der Tabelle und der Graphik haben Einsparungen negative Vorzeichen!

³⁸ 5, weil 5 *unabhängige* RCM's verwendet wurden.

³⁹ Der Mittelwert von 1971-2100 ist in jedem Modell null.

Strategie und den **spätreifen 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 J.17**) 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 J.18** dargestellten Kosten. Die Bedeutung des breiten, grau unterlegten Bereichs wurde bereits auf Seite 78 f. ausführlich beschrieben. Die schwarze Kurve entspricht der dicken schwarzen Kurve (“Mittelwert über die 5 Klimamodellläufe” im Standardfall) aus **Abbildung J.16**. Die rote Kurve ist der “Modellmittelwert” mit eingeschalteter CO₂-Düngung, und die blaue Kurve ergibt sich im Worst Case Szenario mit einer *NoRelease-Prob* von 20 %. Bei Anwendung der m-g-Strategie (**Abbildung J.19**) verkleinert sich der positive Unsicherheitsbereich für *KK* erheblich.

Beim **Wein** (**Abbildungen J.20 bis J.23**) sind die Verhältnisse wieder ähnlich wie beim spätreifen Apfel.

Zusätzlich zum spätreifen Apfel und Wein werden die Sauerkirsche und der frühreife Apfel im Kapitel 5.7.2.2 im LB ab Seite 276 im LB diskutiert.

Die Abbildungen für die **m-m-Strategie** ähneln sehr stark denen der m-g-Strategie, nur sind die Kosten *KK* (in den Abbildungen fast unmerklich⁴⁰) etwas zu größeren Werten hin verschoben. Daher wurde auf die Darstellung dieser Graphiken verzichtet.

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 J.24 bis J.26** im Anhang J.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.

Abbildungen für den jährlichen Verlauf der $\sum_{2002}^j KK$, in ähnlicher Form wie die Abbildungen für *KK* im Anhang J.2.2.2, findet man am Anfang des **Anhang K.2.2.2.3 im LB**.

Tabellen für die Gesamtzusatzkosten *KKA* in ganz Hessen findet man im **Anhang K.2.3.1.1 im LB** und für die akkumulierten Zusatzkosten $\sum_{2002}^{2100} KKA$ für ganz Hessen in **Anhang K.2.3.1.2 im LB**.

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 J.13**). 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 J.9**). Lässt man die *unsicheren* WETTREG-Läufe weg, so erhält man überhaupt keine signifikanten negativen Veränderungen der Kosten mehr,

⁴⁰ 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!

sondern nun zeigen die Sauerkirsche und der Wein signifikante positive Kostensteigerungen (Abbildung J.10).

Wenn man die CO₂-Düngung berücksichtigt, errechnet man für alle Arten hoch signifikante Kostenabnahmen, sowohl bei der g-g- (Abbildung J.11) als auch bei der m-g-Strategie (Abbildung J.14). 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 J.12), und bei der m-g-Strategie ist eine signifikante Zunahme nur noch bei der Pflaume und Kirsche zu verzeichnen (Abbildung J.15).

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 im LB). 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 im LB).

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 im LB). 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 im LB).

6 Diskussion

Betrachtet man nur die klimatischen Veränderungen in den Obstbauregionen Hessens, so erhält man für viele Größen hoch signifikante Veränderungen in der Zukunft. Man 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.5 und Abbildung B.7), und die Globalstrahlung nimmt (wegen der beiden WETTREG-Läufe) im September signifikant zu (Tabelle B.25 im LB und Abbildung B.9). Auch die Schäden durch den Apfelwickler, die hier nur vom Temperaturverlauf abhängen, steigen signifikant an (Tabellen H.2 und H.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 G.2 und blaue Balken in Abbildung I.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 J.2 und J.6).

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 J.13). 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 J.9). 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 J.10).

Die Mittelwerte dieser Kostenänderungen sind, auch wenn sie nicht signifikant sind, häufig trotzdem sehr groß [siehe z. B. die mittleren, aufsummierten Kosten *KKA* (die Balken)

¹ Auch die Veränderung beim spätreifen Apfel ist bei Berücksichtigung der Multiplizität nicht signifikant! Vgl. Seite 110!

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.

in Abbildung K.2.3.2.2 im LB]. 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 J.11) als auch bei der m-g-Strategie (Abbildung J.14). 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 J.12), und bei der m-g-Strategie ist eine signifikante Zunahme bei der Pflaume und Kirsche zu verzeichnen (Abbildung J.15).

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 4.4 erwähnten, systematischen Unzulänglichkeiten der klassischen Forcing-Modelle und deren Behebung (Kapitel 4.6.5 im LB) sind nicht nur für die hier behandelten Schäden und Kosten von Relevanz.⁸ Phänologische Modelle werden, meist in sehr einfacher Form, 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*⁹ und ein zu spätes *Saisonenende*, was zu fehlerhaften Ergebnissen bei den latenten und sensiblen Wärmeflüssen sowie den Strahlungsflüssen (falsche Albedo) und in der CO₂-Bilanz führt (Genauerer hierzu im Kapitel 6.1 im LB). 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.¹⁰ Leider das ist nicht einmal der Fall. Dass sich ein so uneinheitliches Bild ergibt, liegt 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.¹¹ 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 4.6) und deren Autokovarianzen. Diese zusätzlichen Anforderungen an die Inputdaten der Impaktmodelle sind aber leider vor allem beim Modell WETTREG (Seite 12 ff.) nur sehr unzureichend erfüllt, so dass sich

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 Das entspricht genau den in Kapitel 4.4 erwähnten Defiziten der klassischen Phänomodelle.

¹⁰ Der Mittelwert von *KK* im Zeitraum 1971-2000 ist per Definition null [siehe Text nach Gleichung (4.8)].

¹¹ Der Frostschaden hängt beispielsweise sehr sensibel von der Minimumtemperatur der Luft ab.

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 A1B¹² 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.

Weiterhin wird in letzter Zeit wieder vermehrt darüber diskutiert, inwieweit bei den sehr vielen Freiheitsgraden und Rückkopplungsmechanismen, die bei der Entwicklung des Klimas eine Rolle spielen, überhaupt verlässliche Klimaprognosen möglich sind. Viele Beispiele hierzu und eine grundlegende Diskussion zu diesem Thema findet man in Lange (2010), insbesondere in seinen Kapiteln 8.3(h) und 8.3(i) und in Kurzform auch im Kapitel 6.4 auf Seite 285 im LB. Die Unsicherheiten in den Klimamodellen übertragen sich natürlich auch auf die Ergebnisse der Impaktmodelle.

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 annehmen¹³ 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 Obstpreise, Obstanbauflächen, Maßnahmekosten usw. (vgl. Kapitel 4.10) müssten im Prinzip in den "in dieser Arbeit berechneten Fehlerbalken" noch zusätzlich berücksichtigt werden.¹⁴ Hierdurch würden diese Fehlerbereiche noch weiter verbreitert. Da leider keine

¹² 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.

¹³ Unter Berücksichtigung der Kovarianzen usw.

¹⁴ Bisher wurden nur die Unsicherheiten bei der CO₂-Düngung und beim Worst Case Szenario durch

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 4.2 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 J.16 ff. oder Abbildung J.18 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 4.3) 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 aufweisen¹⁵, eine obere Schranke für die zu erzielende Genauigkeit der Vorhersagen.

Die eben erwähnten 95 %-Konfidenzintervalle beziehen sich, wie bei Formel (4.31) auf Seite 50 im LB 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 werden¹⁶, ist ungefähr noch einmal doppelt so breit wie die in den Abbildungen und Tabellen angegebenen Unsicherheitsbereiche für die “Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe”!

Ein- und Ausschalten dieser *Effekte* rudimentär berücksichtigt.

¹⁵ 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).

¹⁶ 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)

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 Schädlinge¹⁷, von Extremwetterschäden u. ä. mit ein, und berücksichtigt außerdem, dass neben dem hier verwendeten A1B-Emissionsszenario je nach Entwicklung des CO₂-Austoßes auch noch viele andere Szenarien denkbar sind¹⁸, 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 Dormanzbrechung¹⁹) umstellt (Abbildung 5.49). 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 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):

“Gegenwärtig liegt der größte Wert solcher Studien vor allem in der Entwicklung von geeigneten Methoden zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels im Obstbau. . . . 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.”

¹⁷ Von denen manche vielleicht heutzutage noch gar nicht bekannt sind.

¹⁸ Vgl. Abschnitt 6.2.

¹⁹ Die aber wahrscheinlich nicht nötig sein werden.

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 im LB)
- Wahl des Stichtags t_s [vgl. Formel (4.102) im LB] bei der Berechnung der Chillingsumme und Berechnung des Dormanzschadens bzw. Brechung der Dormanz. (Kap. 4.5)
- Korrekte Modellierung und Parameterbestimmung für den Chillinganteil der Chilling-Forcing-Modelle. (Kap. 4.6.1.2 im LB)
- Entwicklung verlässlicherer Modelle für den Beginn der Pflückreife. (Kap. 4.6.3 im LB)
- Verminderung der Unsicherheiten durch Abweichungen zwischen den Klimamodellen (Kap. 4.3.1 im LB) oder/und offensichtliche Fehler in den Klimamodellen (Kap. 4.1 in diesem Kurzbericht und Kap. 4.1.5.1 im LB).
- 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.

¹ Z. B. durch Ensembles von verschiedenen Impaktmodellen.

- Bestimmung der Pflanzenparameter (siehe z. B. Abschnitt 4.10.4 und Tabelle 4.17 im LB) 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>)
- 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. 4.7.1).
- Berücksichtigung von Extremereignissen (Hagel, Starkregen, Sturm, Hochwasser etc.) (Kap. 4.11.4 im LB).
- Schäden durch Sonnenbrand, Kosten für Kühlung der Bäume, Kosten für Entwässerungsmaßnahmen bei zu starker Vernässung des Bodens u. ä. (Kap. 4.11.4 im LB).

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.

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) im LB	<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 im LB.

B Mögliche klimatische Veränderungen in Hessen

Im Folgenden (**Tabelle B.1** bis **B.6**) 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 im LB) über die 19 Obstanbaugitterpunkte (vgl. Abschnitt 4.3). Gezeigt werden Mittelwerte über die Jahre 1971-2000, 2002-2031, 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 im LB Gesagte! Die p-Werte (in %) beziehen sich auf den t-Test¹ 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 im LB).

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.4). 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 *Multiplizität* 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-Test² auf Tabelle B.4 anwenden, so wären nur die Differenzen im Juli, August und Januar auf dem 95 %-Niveau signifikant von null verschieden. Denn der p-Wert (3.119 % im Juni) ist bereits größer als $5\%/(12-4+1)=0.556\%$, so dass für diese und alle anderen Differenzen mit noch größerem p-Wert die "H₀: Die Differenz ist null" nicht verworfen werden kann.

¹ Siehe hierzu die Bemerkungen zum Konfidenzbereich von δ am Ende des Kapitels 4.4.1 nach Gleichung (4.28) im LB.

² 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.

Berücksichtigt man die *Multiplizität* nicht, so hat die Wahrscheinlichkeit in einer Tabelle (der Form von **Tabelle B.4**) 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.

Die folgenden Tabellen zeigen nur Werte für die Tagesmitteltemperatur und den Gesamtniederschlag. Tabellen für die anderen ebenfalls ausgewerteten meteorologischen Größen findet man im Anhang B im LB.

Anschließend an die Darstellung der Tabellen werden die Differenzen [(2071-2100) - (1971-2000)] der monatlichen Mittelwerte, die gleichzeitig “über alle 5 Modelle” gemittelt wurden, für alle bearbeiteten, meteorologischen Größen in den **Abbildungen B.1** bis **B.10** ab Seite 113 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 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.5: 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.6: 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	

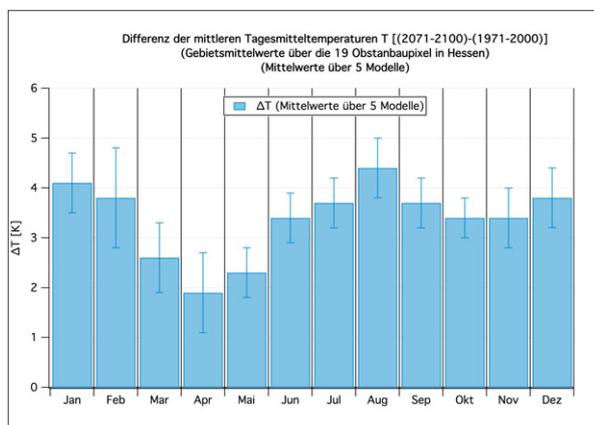


Abbildung B.1: Tagesmitteltemperatur T (jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe)

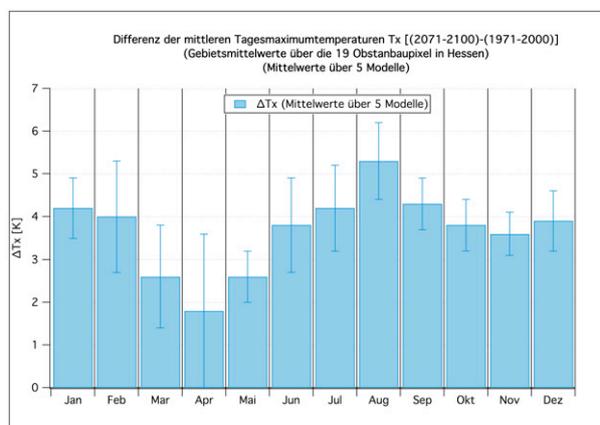


Abbildung B.2: Tagesmaximumtemperatur Tx

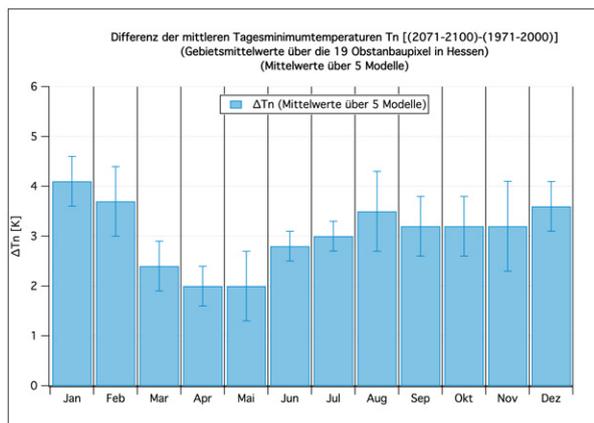


Abbildung B.3: Tagesminimumtemperatur Tn

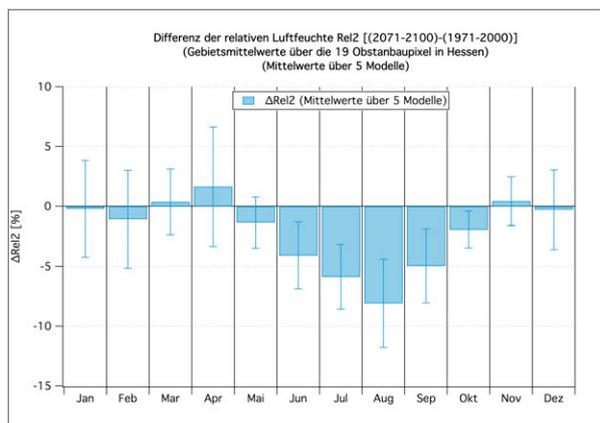


Abbildung B.4: Relative Luftfeuchte Rel2

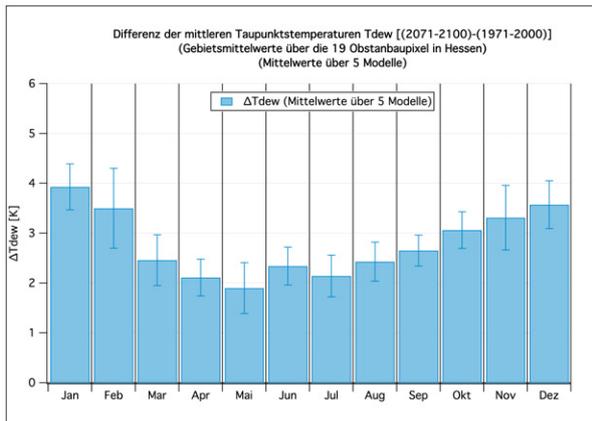


Abbildung B.5: Taupunkttemperatur Tdew

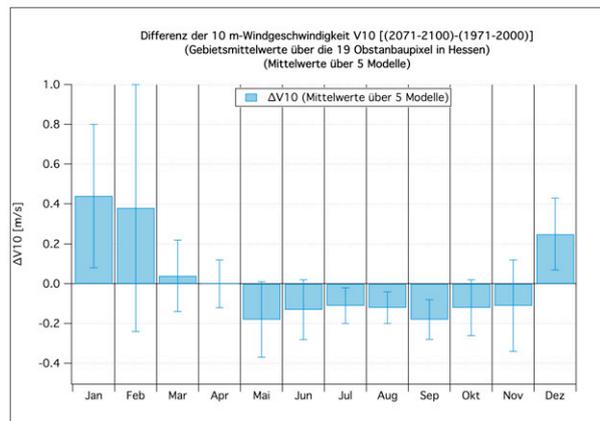


Abbildung B.6: 10 m-Windgeschwindigkeit V10

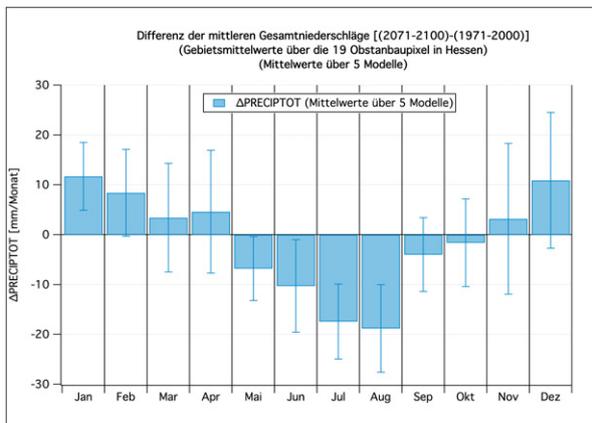


Abbildung B.7: Gesamtniederschlag PRECIP-TOT

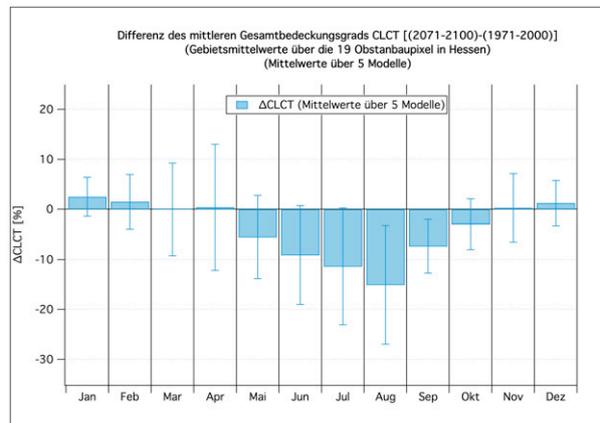


Abbildung B.8: Gesamtbedeckungsgrad CLCT

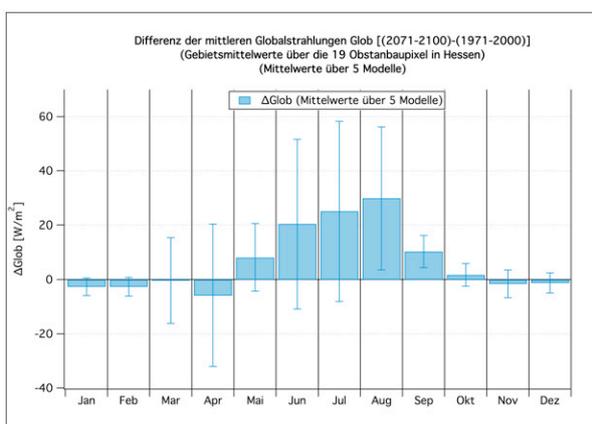


Abbildung B.9: Globalstrahlung Glob

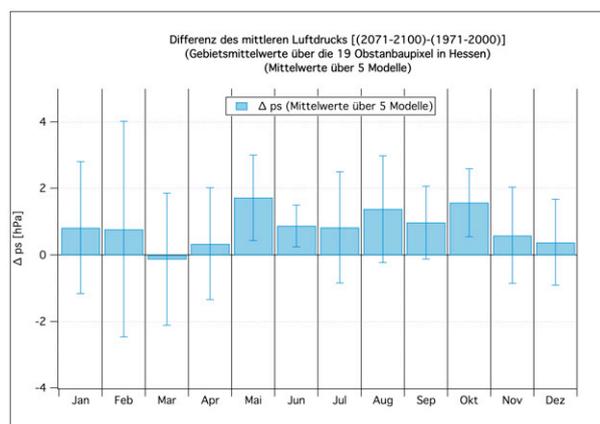


Abbildung B.10: Luftdruck ps am Boden

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 im LB. Für den Forcing-Anteil des Modell 29ga wurde die Gleichung (4.45) im LB 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 auf Seite 50 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.

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 im LB).¹

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 im LB), wurden immer, wenn benötigt (z. B. zur Eichung der Modelle), die Daten des frühreifen Apfels verwendet.

Die **Tabellen C.1** und **C.2** zeigen 30-jährige Mittelwerte \bar{t}_2 des Blühbeginns (in DOY) für den Apfel und die Aprikose über die 19 Obstanbaugitterpunkte (vgl. Abschnitt 4.3) mit einseitigem² 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 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 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.

Exemplarisch wurden nur die Ergebnisse für den Apfel und die Aprikose in tabellarischer

¹ 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.

² Das beidseitige Konfidenzintervall für den Erwartungswert des Blühbeginns erstreckt sich von $\bar{t}_2 - Konf95$ bis $\bar{t}_2 + Konf95$.

Form dargestellt. Werte für die anderen Fruchtarten findet man als Tabellen im Anhang C im LB und in den Abbildungen C.1 und C.2 direkt im Anschluss an die folgenden Tabellen.

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 **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.

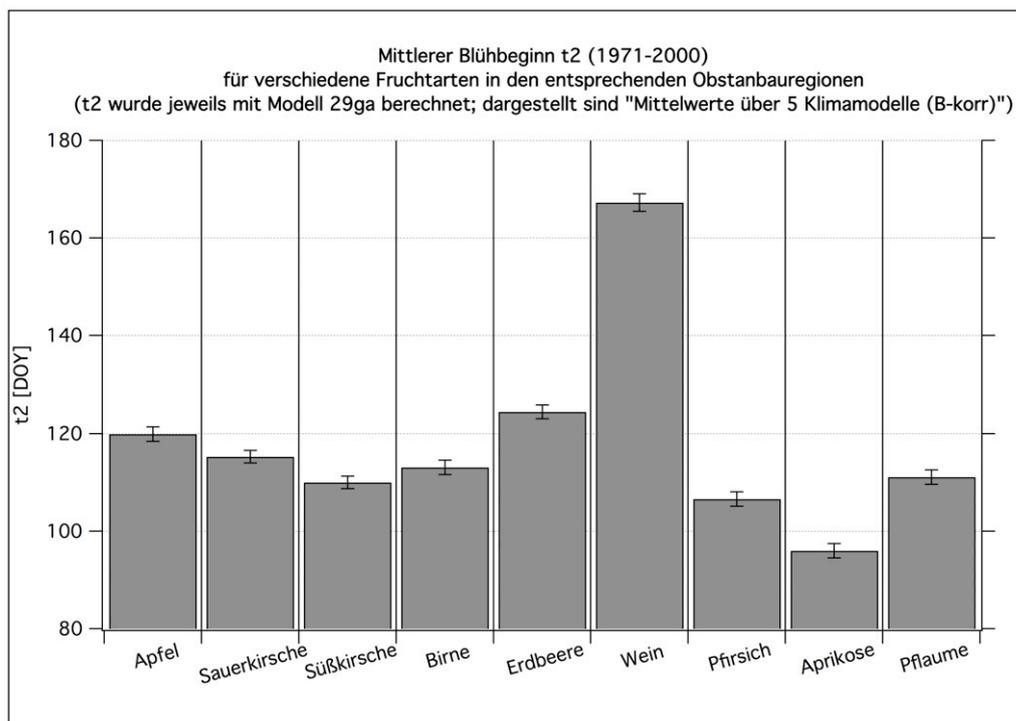


Abbildung C.1: Termin des **mittleren Blühbeginns** t_2 für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein). Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

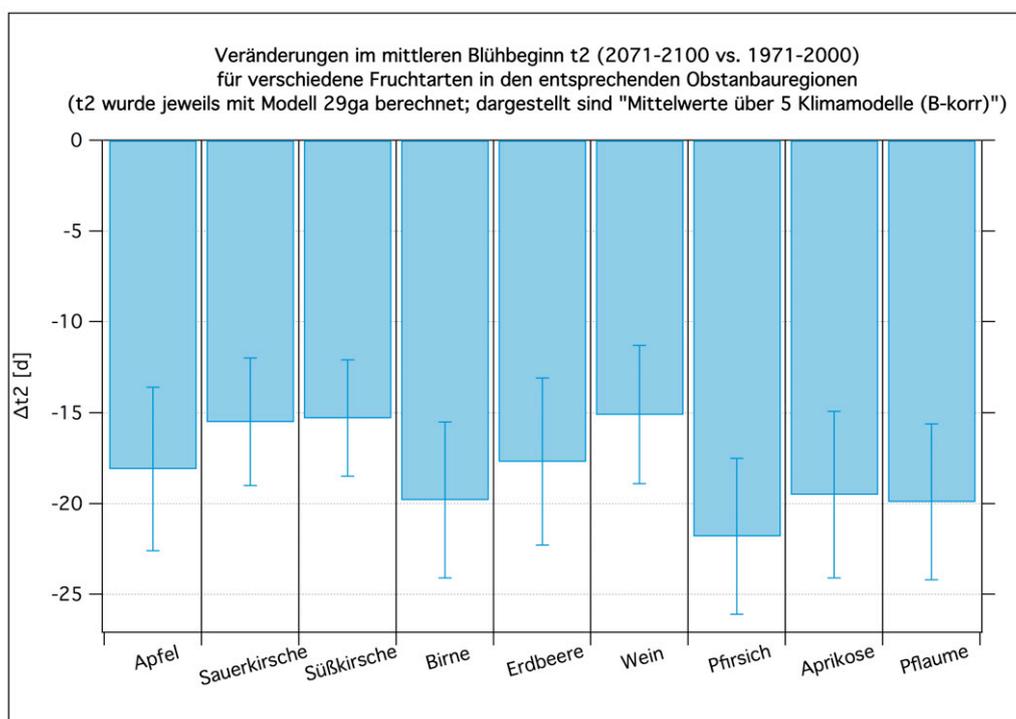


Abbildung C.2: Veränderung des Termins des **mittleren Blühbeginns** t_2 für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein). Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

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 Tabelle A.1 und Kapitel 4.6.2 im LB; die optimierten Parameter findet man in Tabelle 4.14 im LB).

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 im LB), 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 4.3) 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.

Exemplarisch werden hier nur die Werte für den Apfel und die Kirsche in tabellarischer Form angegeben. Werte für die anderen Obstarten findet man als Tabellen in Anhang D im LB und als Graphiken direkt in Anschluss an die folgenden Tabellen.

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	

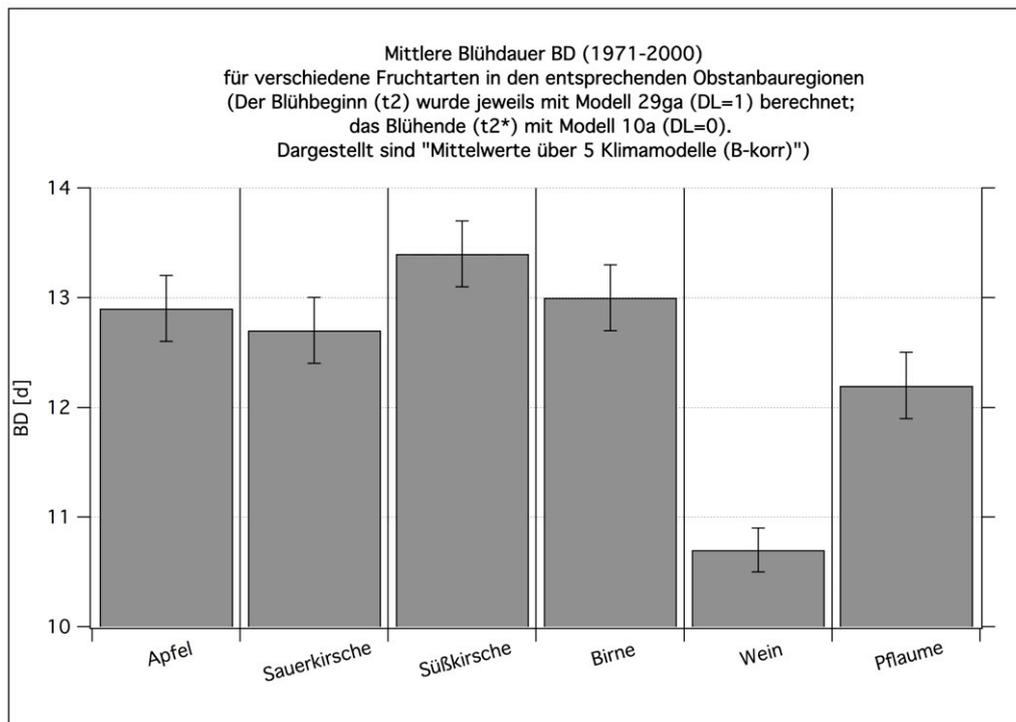


Abbildung D.1: Mittlere Blühdauer für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein). Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

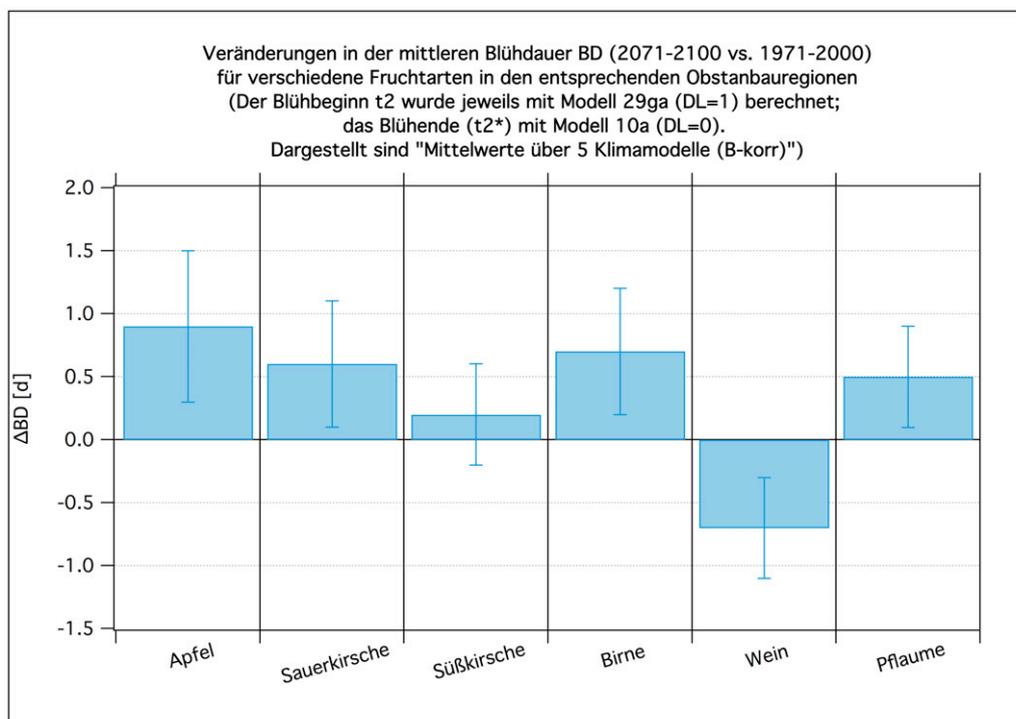


Abbildung D.2: Veränderung der mittleren Blühdauer für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein). Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

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 im LB), dargestellt.

Zunächst werden in **Tabelle E.1** die mittleren beobachteten Reife-Termine gelistet. Die Werte sind Mittelwerte für den Zeitraum 1971-2000 über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bei Wein über die 8 Weinbaugitterpunkte)¹ und wurden aus den regionalisierten phänologischen Beobachtungen des DWD (Kapitel 4.1) 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 124 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.² 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** und **E.3** wurden mit den optimierten Modelle 12a-R bzw. 10a-R (siehe Anhang A.1 und Kapitel 4.6.3 und Tabelle 4.15 im LB) 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. Die Tabelle für den spätreifen Apfel und den Wein wurden hier wieder nur exemplarisch gelistet. Tabellen für die anderen Fruchtarten findet man im Anhang E im LB.

Schließlich sind in **Abbildung E.2** auf Seite 124 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

¹ Bei der Erdbeere ergibt die Auswertung nur für die 4 Erdbeergitterpunkte (Abschnitt 4.3) 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.

² Die Werte an benachbarten Gitterpunkten (im jeweils selben Jahr) sind aber im Gegensatz zu den räumlichen Mittelwerten in aufeinander folgenden Jahren stark miteinander korreliert!

gegenüber 1971-2000 zwischen -11.5 Tagen beim spätreifen Apfel und -21.1 Tagen bei der Weinlese.

Alle hier aufgeführten Aussagen über die Reifetermine sind wegen der am Ende von Abschnitt 4.6.3 auf Seite 72 im LB 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 (spätfrühreif)	188	± 2.7	07.07.	(1971-2000)
Birne (frühreif)	241	± 2.4	29.08.	(1971-2000)
Birne (spätfrühreif)	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 (spätfrühreif)	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 **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.3: 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).

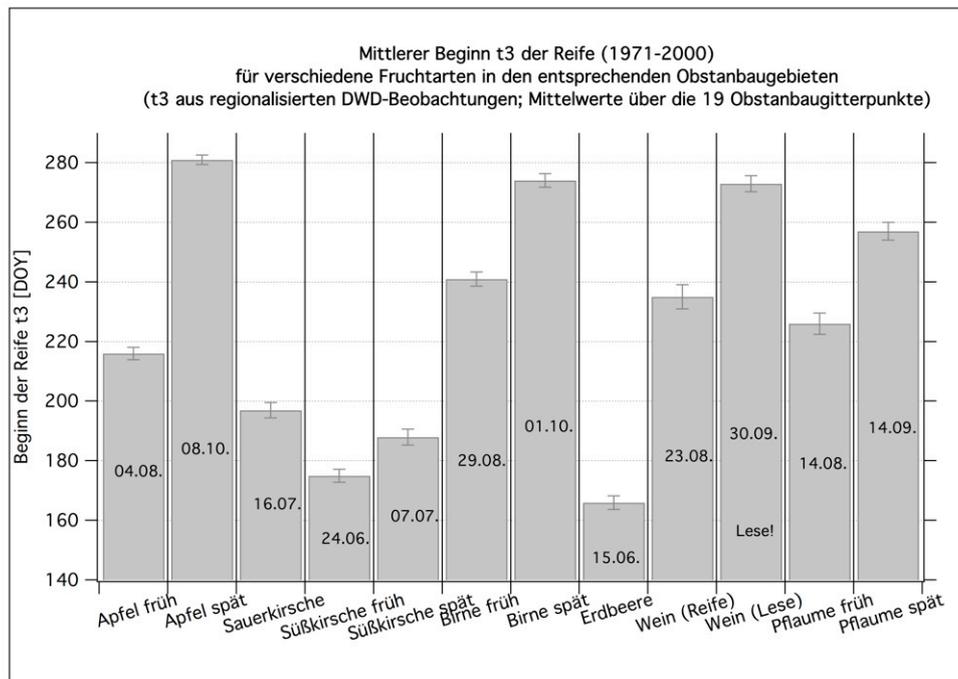


Abbildung E.1: Termin des **mittleren Beginns der Pflückreife t_3** (Mittelwert über 1971-2000; bei Erdbeere über 1971-1990; bei Reife von Wein über 1991-2009) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein) aus **regionalisierten DWD-Beobachtungen**. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

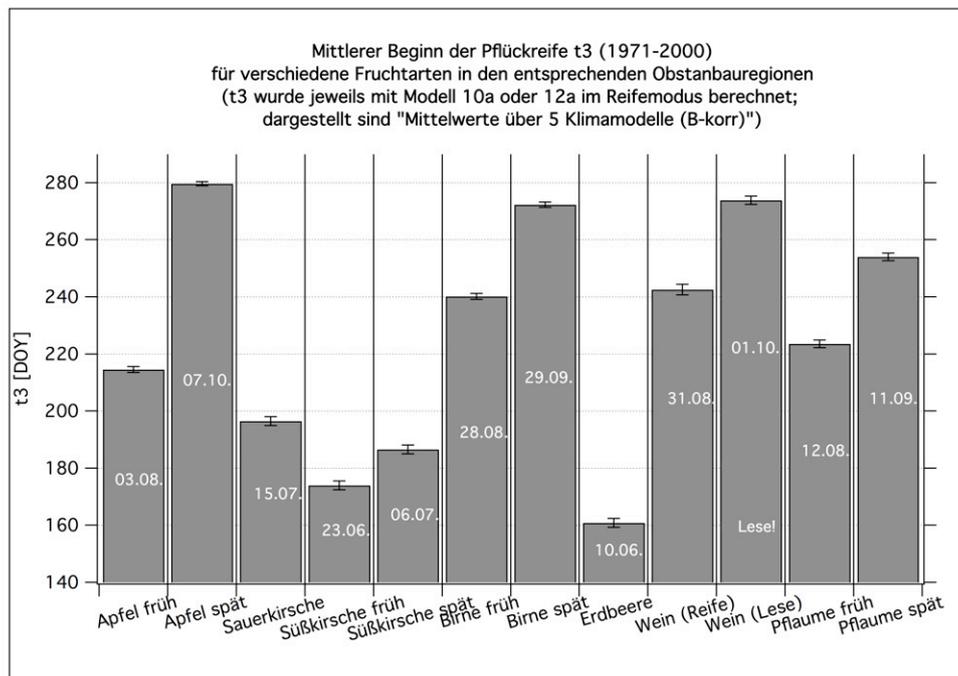


Abbildung E.2: Termin des **mittleren Beginns der Pflückreife t_3** (Mittelwert über 1971-2000) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein bzw. 4 Erdbeergitterpunkte), **berechnet mit Modell 10a-R bzw. 12a-R**. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

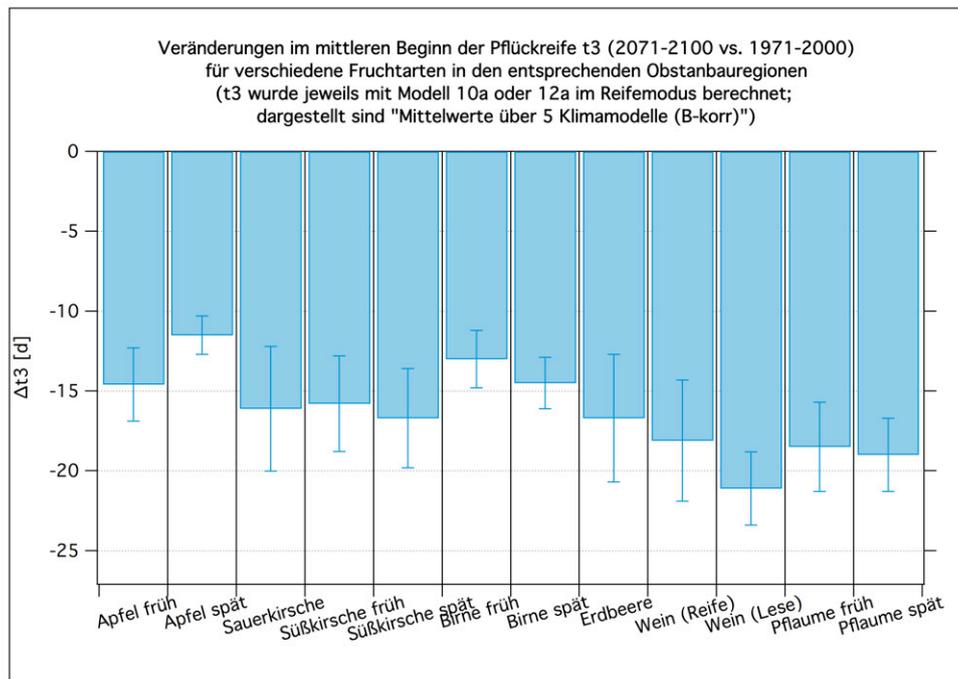


Abbildung E.3: Veränderungen des Termins des mittleren Beginns der Pflückreife t_3 (2071-2100 vs. 1971-2000) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstanbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein bzw. 4 Erdbeergitterpunkte), berechnet mit Modell 10a-R bzw. 12a-R. Die 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 4.2). 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 Obstanbaugebiets-Gitterpunkte) 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 47).

Alle hier aufgeführten Aussagen über die Reifetermine sind wegen der am Ende von Abschnitt 4.6.3 auf Seite 72 im LB erwähnten Probleme relativ unsicher.

Die folgenden Tabellen für den spätreifen Apfel, die frühreife Süßkirsche und den Wein sind wieder nur exemplarisch. Werte für die anderen Obstarten findet man in Anhang F im LB und als Graphiken direkt in Anschluss an die hier gelisteten Tabellen.

¹ Normalerweise wird die Länge der Reifeperiode als Differenz zwischen Reifetermin und Blühendetermin definiert. Wegen der auf Seite 62 im LB 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.1: 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.2: 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.3: 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	***

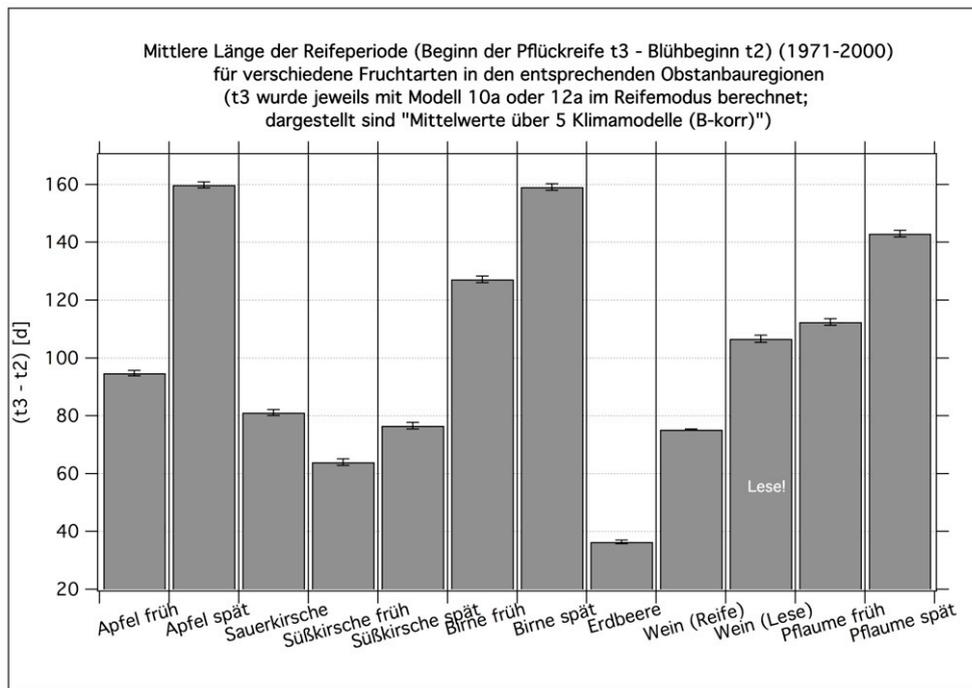


Abbildung F.1: Mittlere Länge der Reifeperiode $t_3 - t_2$ (Mittelwert über 1971-2000) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein bzw. 4 Erdbeergitterpunkte), **berechnet mit Modell 10a-R bzw. 12a-R**. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

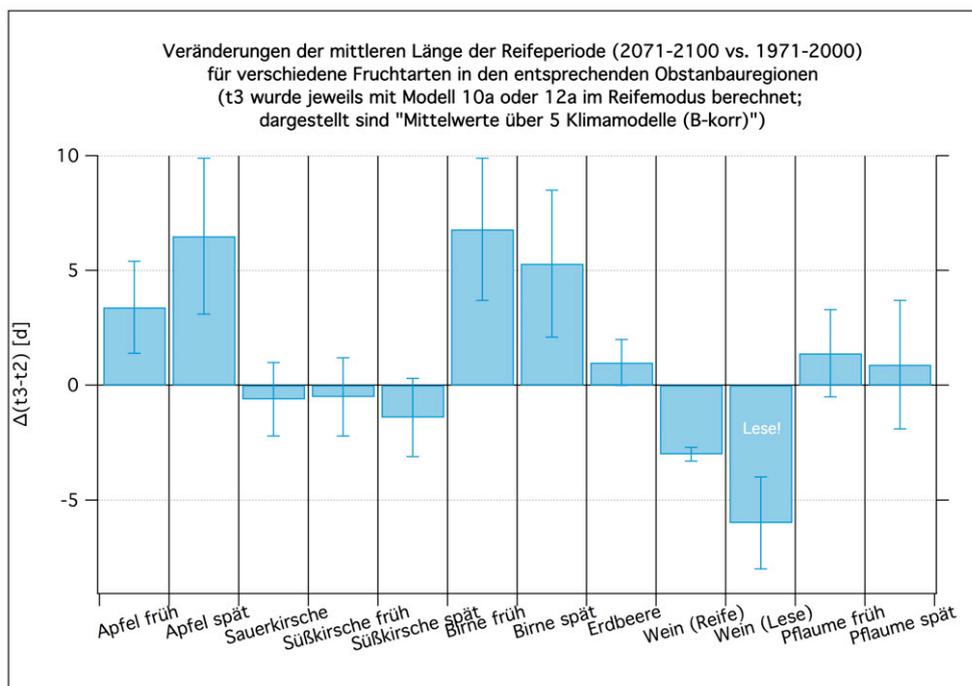


Abbildung F.2: Veränderungen der mittleren Länge der Reifeperiode ($\Delta(t_3 - t_2)$) (2071-2100 vs. 1971-2000) für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über die 19 Obstbaugitterpunkte (bzw. 8 Weinbaugitterpunkte beim Wein bzw. 4 Erdbeergitterpunkte), **berechnet mit Modell 10a-R bzw. 12a-R**. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

G Ergebnisse für Frostschäden und Frostschadenswahrscheinlichkeiten

In diesem Kurzbericht werden nur Ergebnisse für die Größen *Frostschaden* und *FROSTSCHADENSPROB0* gezeigt. Weitere, ausführlichere Ergebnisse zu Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten verschiedener Froststärken und ‘Frostschäden unterschiedlicher Stärke’ (*FROSTSCHADENSPROBx*) findet man im Anhang **H** im LB.

Die folgenden Graphiken zeigen 30-jährige Mittelwerte (1971-2000) und deren Veränderungen ‘(2071-2100)-(1971-2000)’ (in %), gemittelt über die 19 Obstanbau-Gitterpunkte¹, für diese Größen mit 95 %-Konfidenzintervallen (in %) für die verschiedenen Obstarten. Man beachte auch die Bemerkungen am Anfang des Anhangs **B** und die Bemerkungen auf Seite **106** im LB zu den Konfidenzintervallen von Wahrscheinlichkeiten.

G.1 Frostschäden an der Frucht (FROSTSCHADEN)

Die Definition und die Berechnungsmethode für die Frostschäden findet man in Kapitel 4.6. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.4 diskutiert.

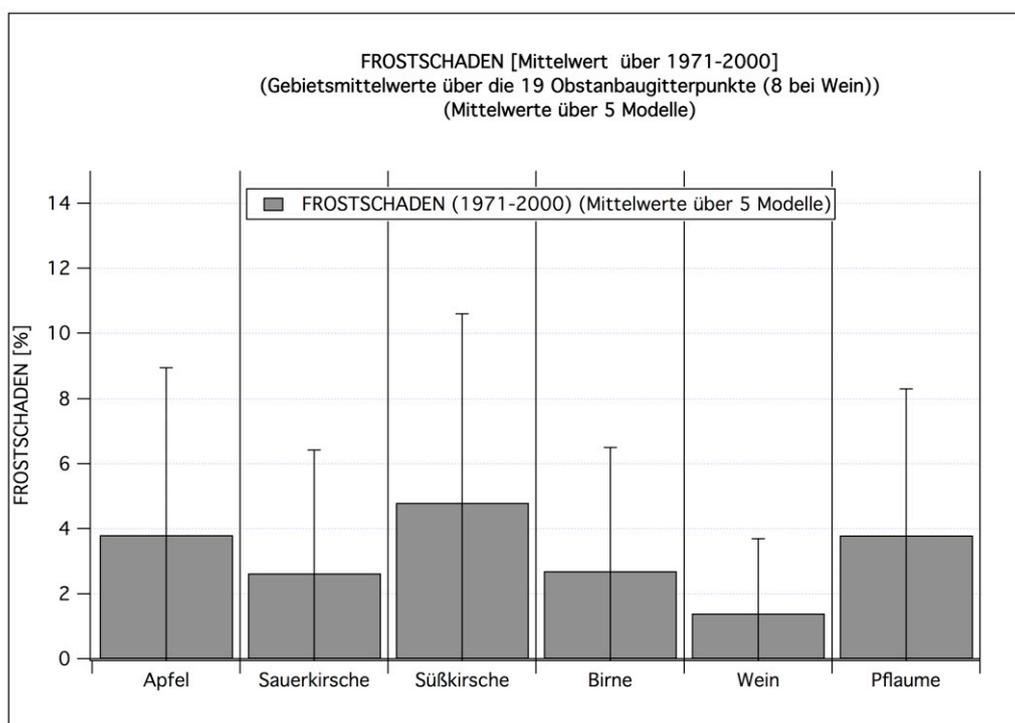


Abbildung G.1: Mittelwert (1971-2000) des **FROSTSCHADENS** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

¹ bzw. über die 8 Weinbau-Gitterpunkte bei Wein.

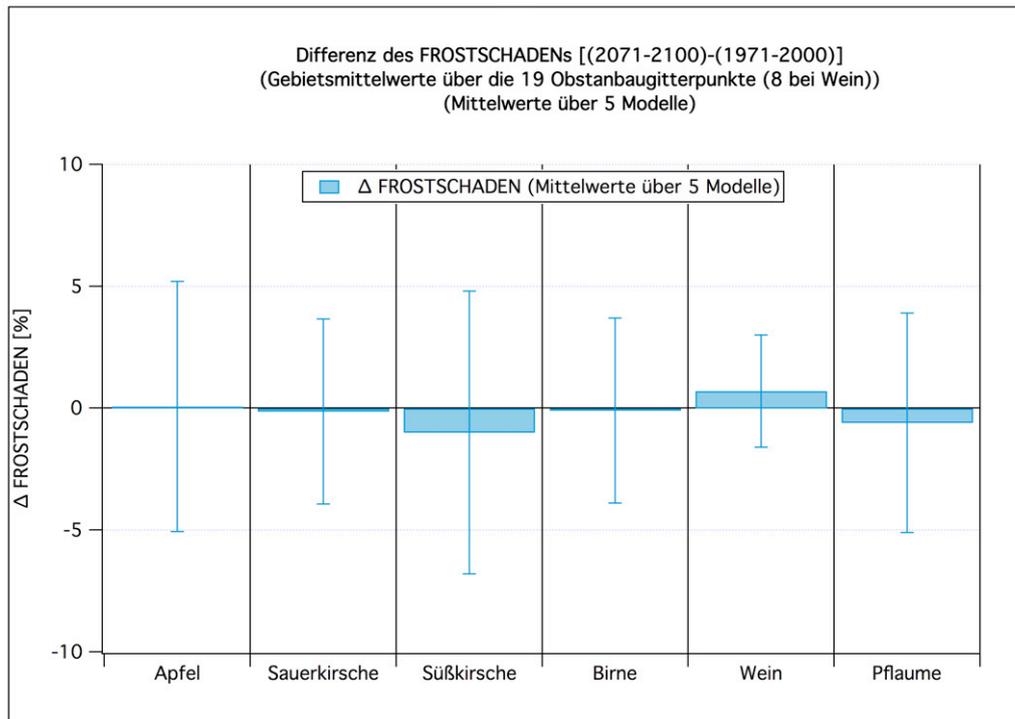


Abbildung G.2: Veränderung des **FROSTSCHADENS** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

G.2 Wahrscheinlichkeit s_F^{0-10} für das Auftreten von Schäden der Stärke 0 an den Früchten (FROSTSCHADENSPROB0)

Die folgenden 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 4.6 in diesem Kurzbericht und in Kapitel 4.8.5 ab Seite 117 im LB. Die FROSTSCHADENSPROB0 s_F^{0-10} wurde aus den Schäden berechnet, die mit der zweifach modifizierte Feuchttemperatur $T_{mm,f}$ nach Gleichung (4.116) im LB 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 im LB).

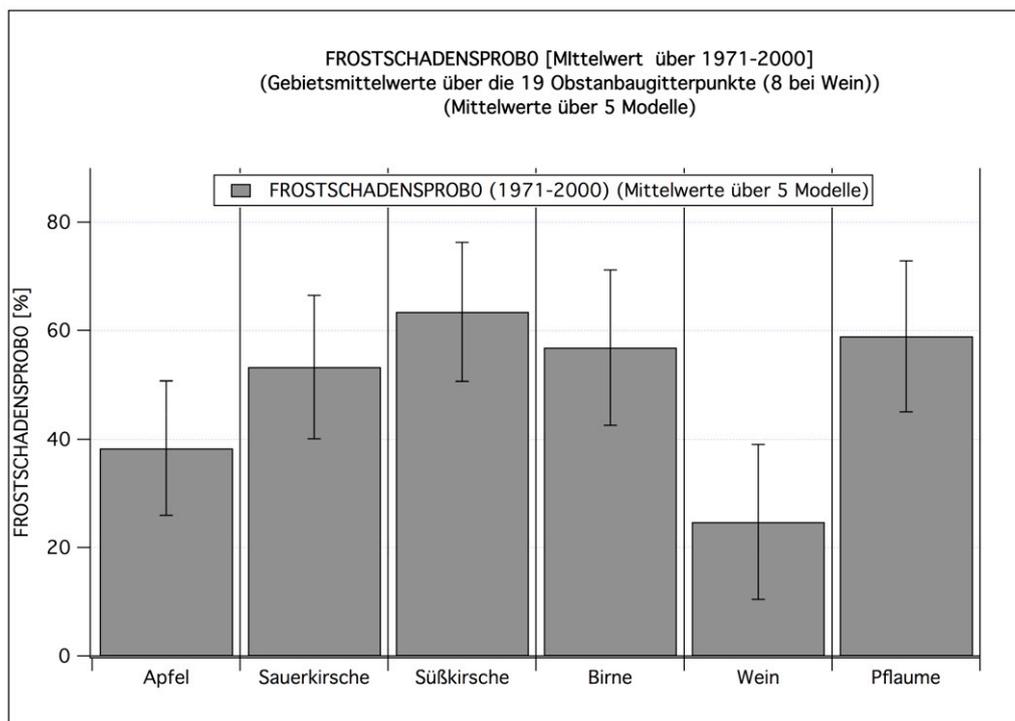


Abbildung G.3: Mittelwert (1971-2000) der **FROSTSCHADENSPROB0** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

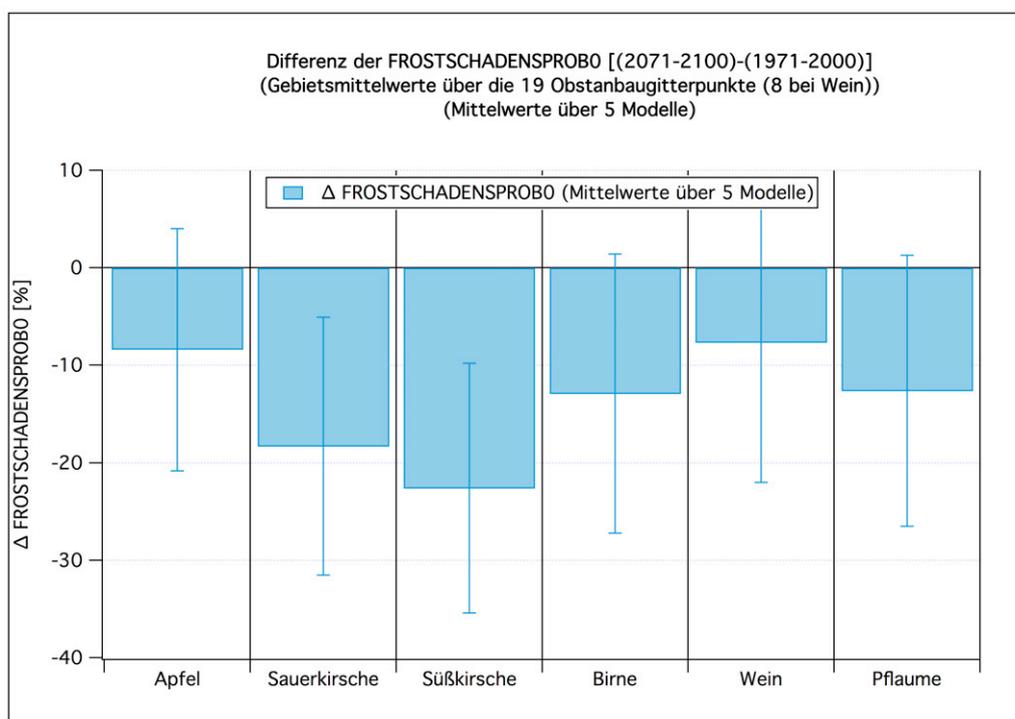


Abbildung G.4: Veränderung der **FROSTSCHADENSPROB0** für verschiedene Obstarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

H Ergebnisse für Schädlinge und Nützlinge im Obstbau

H.1 Ergebnisse für verschiedene Apfelwicklergrößen

Die folgenden Ergebnisse wurden mit dem im Abschnitt 4.7.1 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 4.1 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 4.3) 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 5.5.1.

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 im LB).

Die **Tabellen H.1 bis H.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 H.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 4.4) 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 H.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 H.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 H.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 H.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 H.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 H.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 H.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	***

H.2 Ergebnisse für die Bienenflugintensität

Die mittlere relative Bienenflugintensität während der Blütezeit nimmt bei allen Fruchtarten, außer beim sehr spät blühenden Wein, in der Zukunft hoch signifikant ab (Tabelle H.8 und Abbildung H.2). 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 im LB), und der Niederschlag, welcher sich in Zukunft im März und April leicht erhöht (Tabelle B.4). Alle diese Änderungen bewirken im Bienenmodell (Kapitel 4.8) eine Verringerung der Flugintensität. Man beachte, dass diese reduzierte Bienenflugintensität nur durch die Witterung bedingt wird, da hier keine Bienen-Krankheiten und kein Bienensterben, verursacht durch Pestizide und Varroa-Milben u. ä., berücksichtigt wurde.

Tabelle H.8: 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 (A)		2002-2031 (B)		2031-2060 (C)		2071-2100 (D)		Differenz (D-A)		p-Wert [%]	Signi.
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	***

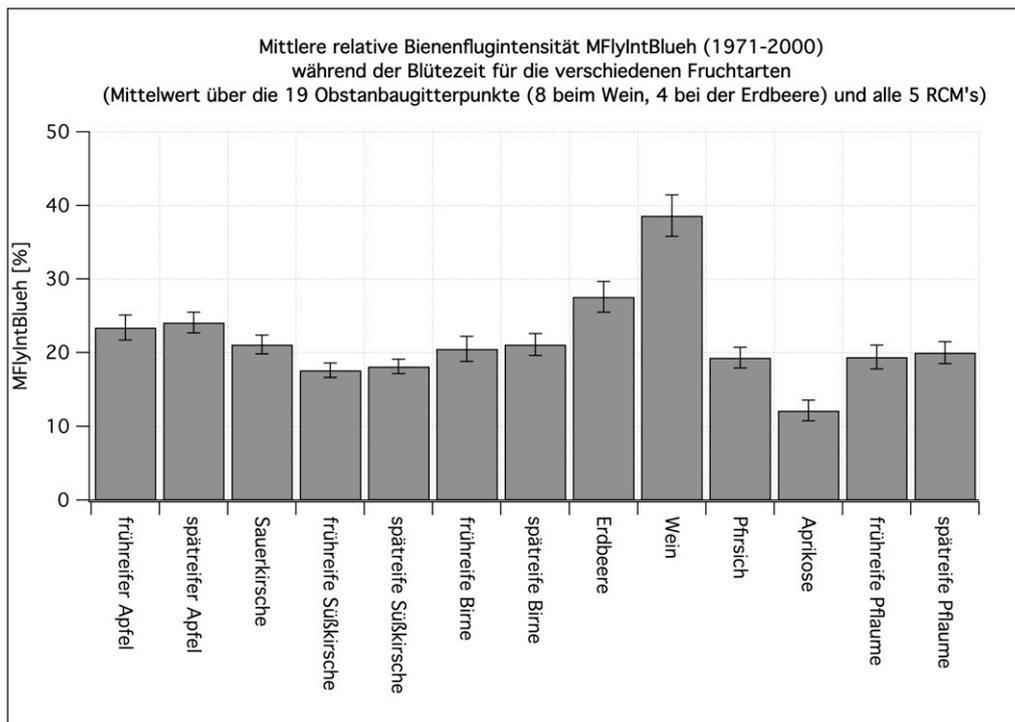


Abbildung H.1: Mittlere relative Bienenflugintensität $MFlyIntBlueh$ (1971-2000) während der Blütezeit für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

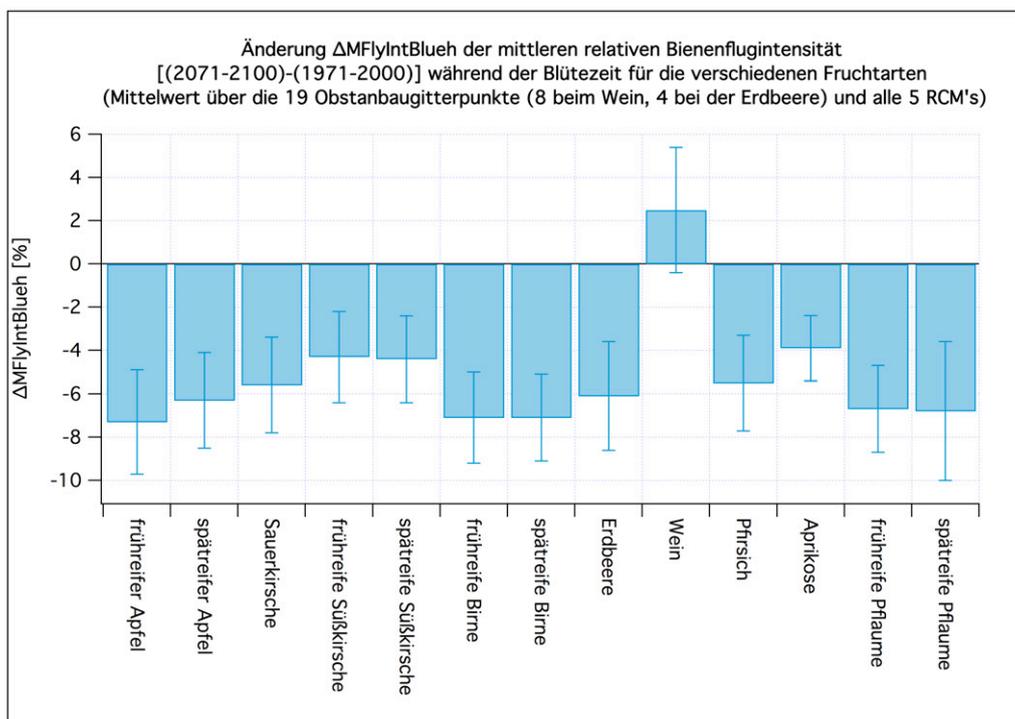


Abbildung H.2: Veränderung $\Delta MFlyIntBlueh$ der mittleren relativen Bienenflugintensität [(2071-2100)-(1971-2000)] während der Blütezeit für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

I Ergebnisse des Bodenwasser- und Ertragsmodells SIMWASER

Hier werden die Ergebnisse des Modells SIMWASER dargestellt. Für jede Größe werden die Werte 30-jährigen Mittelwerte (mit 95 %-Konfidenzintervall in runden Klammern) aller betrachteten 13 Obstarten/-sorten in Tabellenform und als Graphik präsentiert. Um den Rahmen des Berichts nicht zu sprengen, werden jeweils nur noch die “Mittelwerte über die 5 Klimamodellläufe” (und gleichzeitig über die entsprechenden Obstanbaugitterpunkte) betrachtet.

Die Berechnungsmethode für den Feuchtmassenertrag (Fruchtertrag) ist in Kapitel 4.8 bzw. ausführlicher in Abschnitt 4.10.11 im LB beschrieben. Die Methode zur Berechnung der Ertragsschäden ist in Kapitel 4.10.12 im LB dargestellt. Zu den Schäden mit und ohne CO₂-Düngung (Kapitel 4.10.7 im LB) und deren Varianzen bzw. Konfidenzintervallen im Zeitraum 1971-2000 beachte man die Fußnote 178 auf Seite 160 im LB. Die übrigen Größen werden in Kapitel 4.10.5 und 4.10.6 im LB beschrieben.

Eine kürzere Zusammenfassung der hier dargestellten Ergebnisse findet man im SIMWASER-Ergebniskapitel 5.6 ab Seite 71.

Wesentlich ausführlichere Tabellen, für jede Fruchtart getrennt und mit den Ergebnissen, die mit den Daten jedes einzelnen Klimamodells errechnet wurden, sind im Anhang J im LB gelistet.

I.1 Feuchtmassenertrag

Die Veränderungen im Feuchtmassenertrag [(2071-2100)-(1971-2000)], berechnet ohne Berücksichtigung der CO₂-Düngung, aber mit Sommerberegnung, sind bei allen Obstarten nicht signifikant (**Tabelle I.1**). Hingegen beobachtet man bei allen Fruchtarten einen signifikanten Anstieg des Ertrags (**Tabelle I.2**), 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 110 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 I.2 als signifikant eingestuft 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 I.1: 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 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
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 I.2: 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 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
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	**

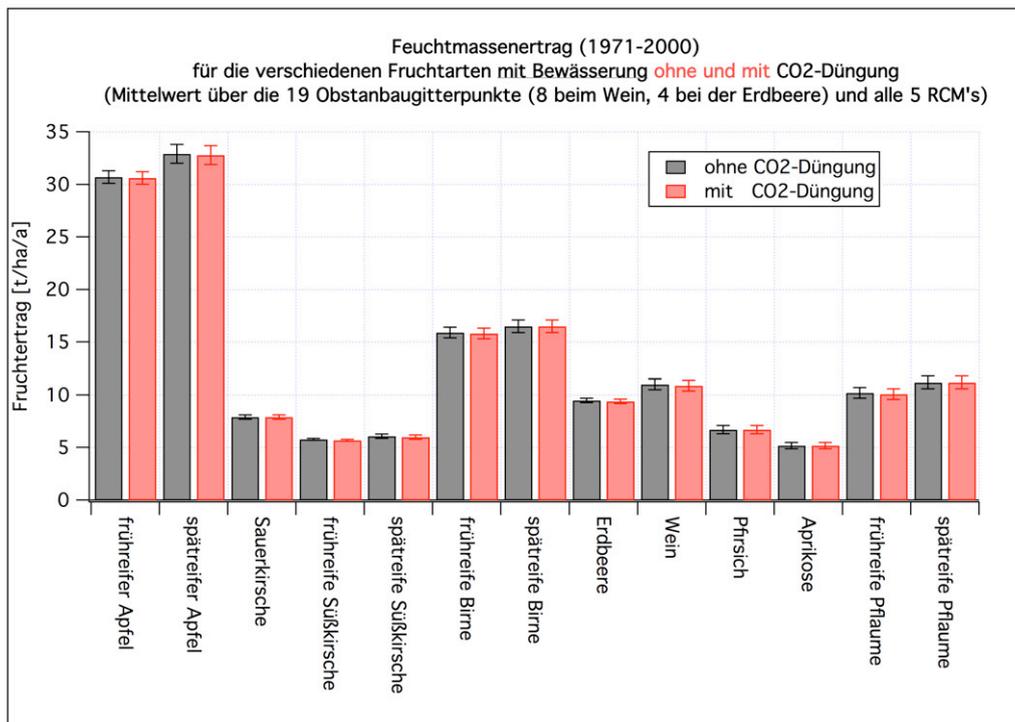


Abbildung I.1: Feuchtmassenertrag (1971-2000) **mit Bewässerung** für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

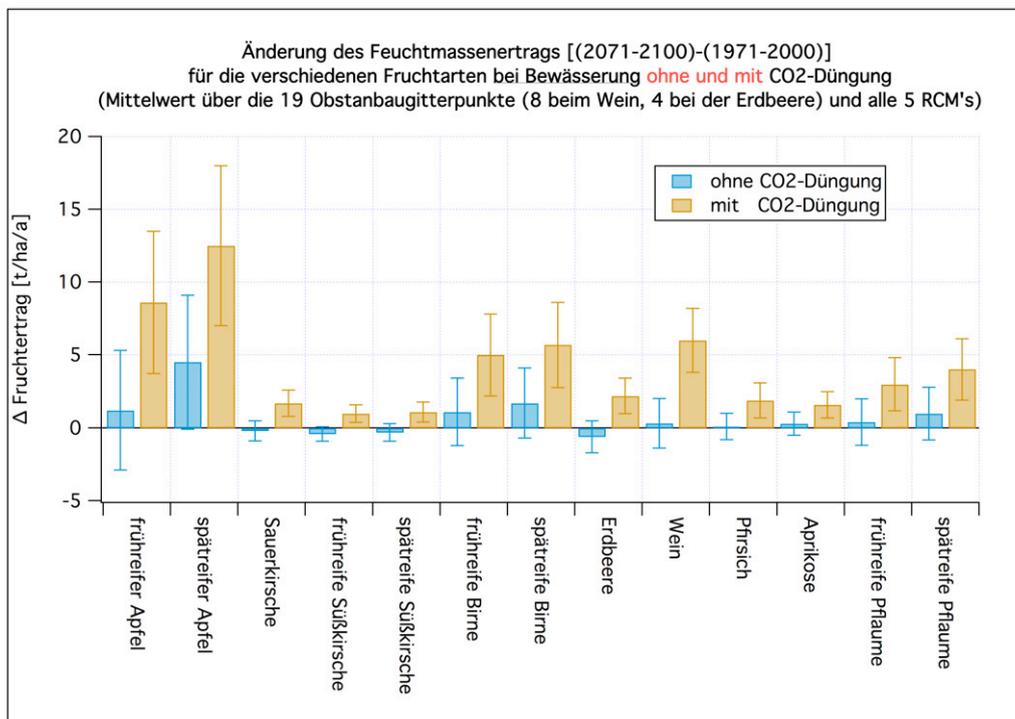


Abbildung I.2: Veränderung des Feuchtmassenertrags [(2071-2100)-(1971-2000)] **mit Bewässerung** für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

I.2 Ertragsschaden ohne Sommerberechnung

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 I.3**), 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.4), 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 I.4**), 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 im LB Gesagte).

Tabelle I.3: 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		2002-2031		2031-2060		2071-2100		Differenz		p-Wert	Signi.
	(A)		(B)		(C)		(D)		(D-A)		[%]	
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 138 beschriebenen, korrekteren Vorgehen sind die Veränderungen für Wein aber nicht signifikant!

Tabelle I.4: 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	***

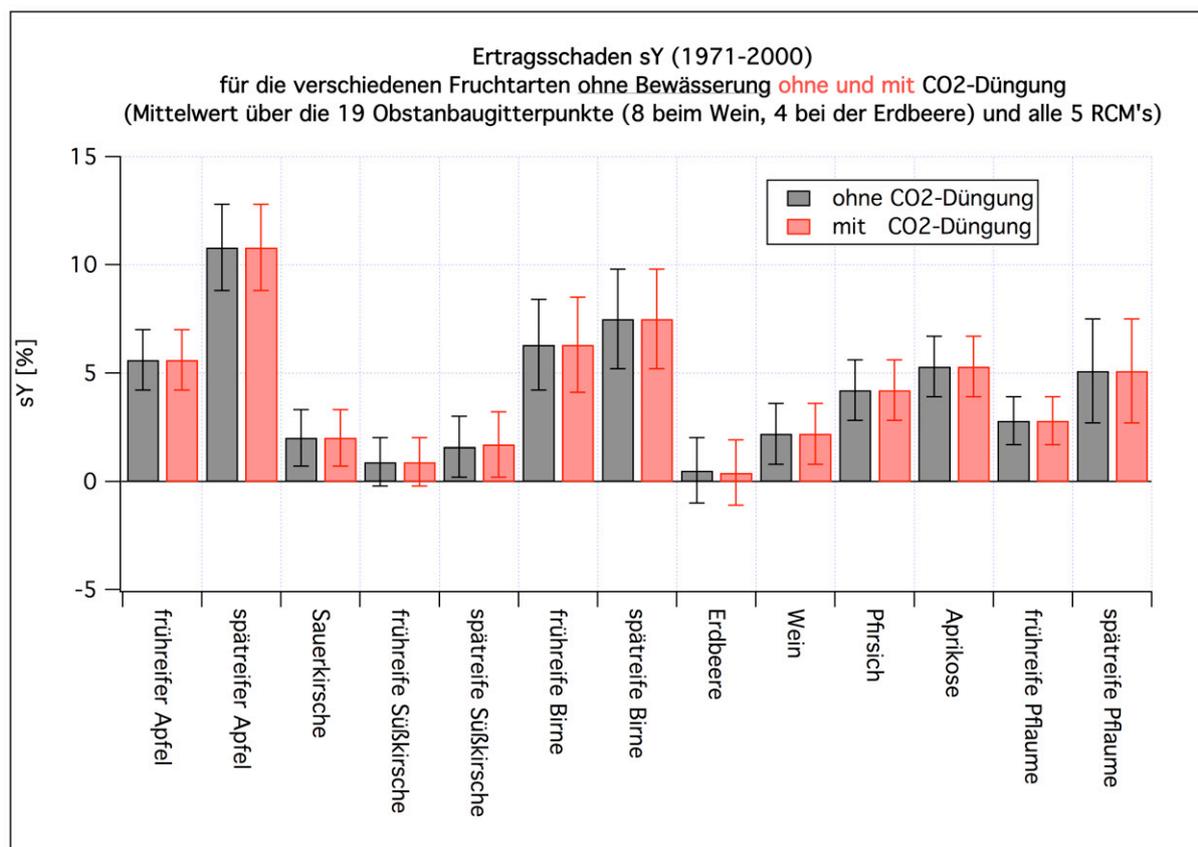


Abbildung I.3: Ertragsschäden s_Y (1971-2000) **ohne Bewässerung** für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

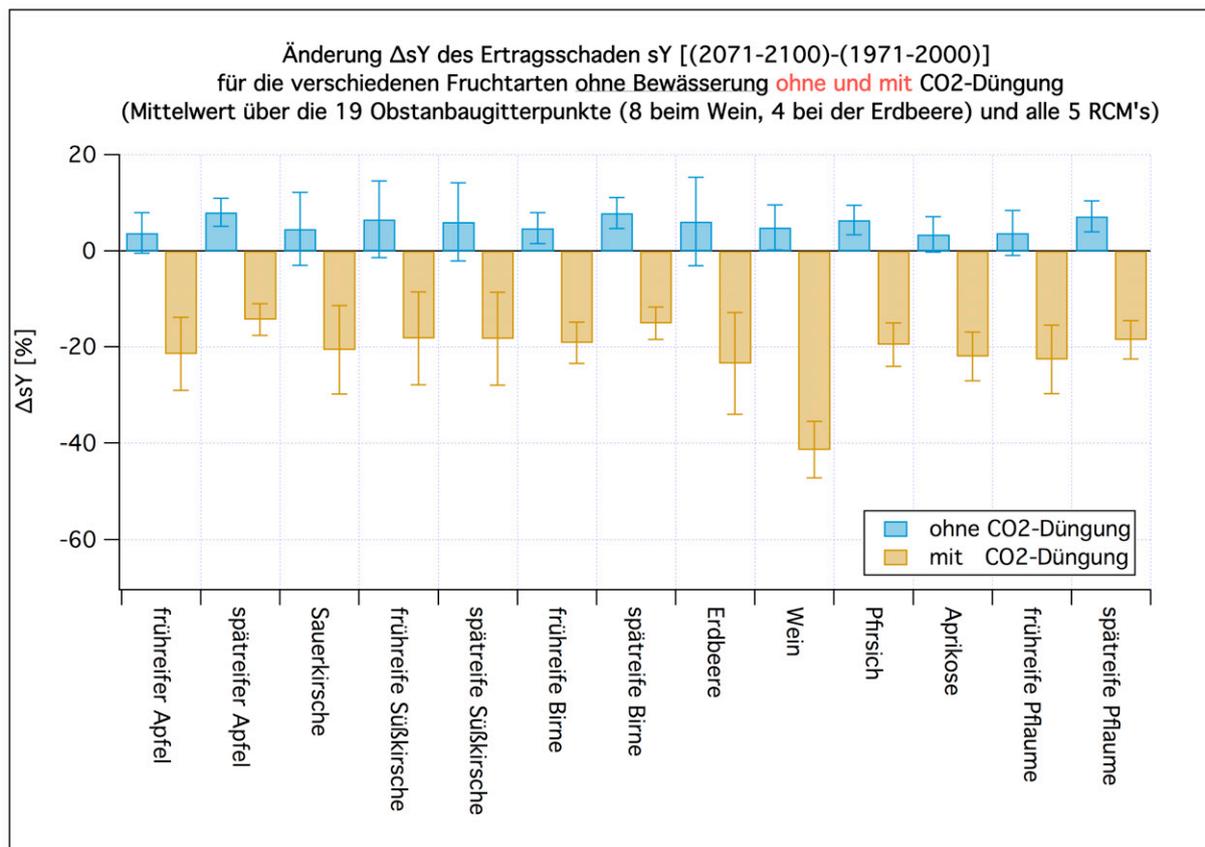


Abbildung I.4: Veränderung Δs_Y der Ertragsschäden s_Y [(2071-2100)-(1971-2000)] **ohne Bewässerung** für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

I.3 Ertragsschaden mit Sommerberechnung

Mit Sommerberechnung und ohne CO₂-Effekt sind alle Schadenveränderungen außer beim spätreifen Apfel² nicht signifikant von null verschieden (**Tabelle I.5**). Die negativen Schäden in der Zukunft (d. h. Ertragszuwächse) beim spätreifen Apfel und auch den anderen, relativ spätreifenden Arten/Sorten sind hauptsächlich auf die Verlängerung der Reifeperiode (Abbildung F.2) und die Zunahme der Globalstrahlung im Sommer (Abbildung B.9 und 4.3) 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 im LB). 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 I.6**).

Tabelle I.5: 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 (A)	2002-2031 (B)	2031-2060 (C)	2071-2100 (D)	Differenz (D-A)	p-Wert [%]	Signi.
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 138 Gesagte berücksichtigt!

³ Ein weiterer Grund ist, dass die Absolutwerte der Schäden hier etwas kleiner sind.

Tabelle I.6: 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	**

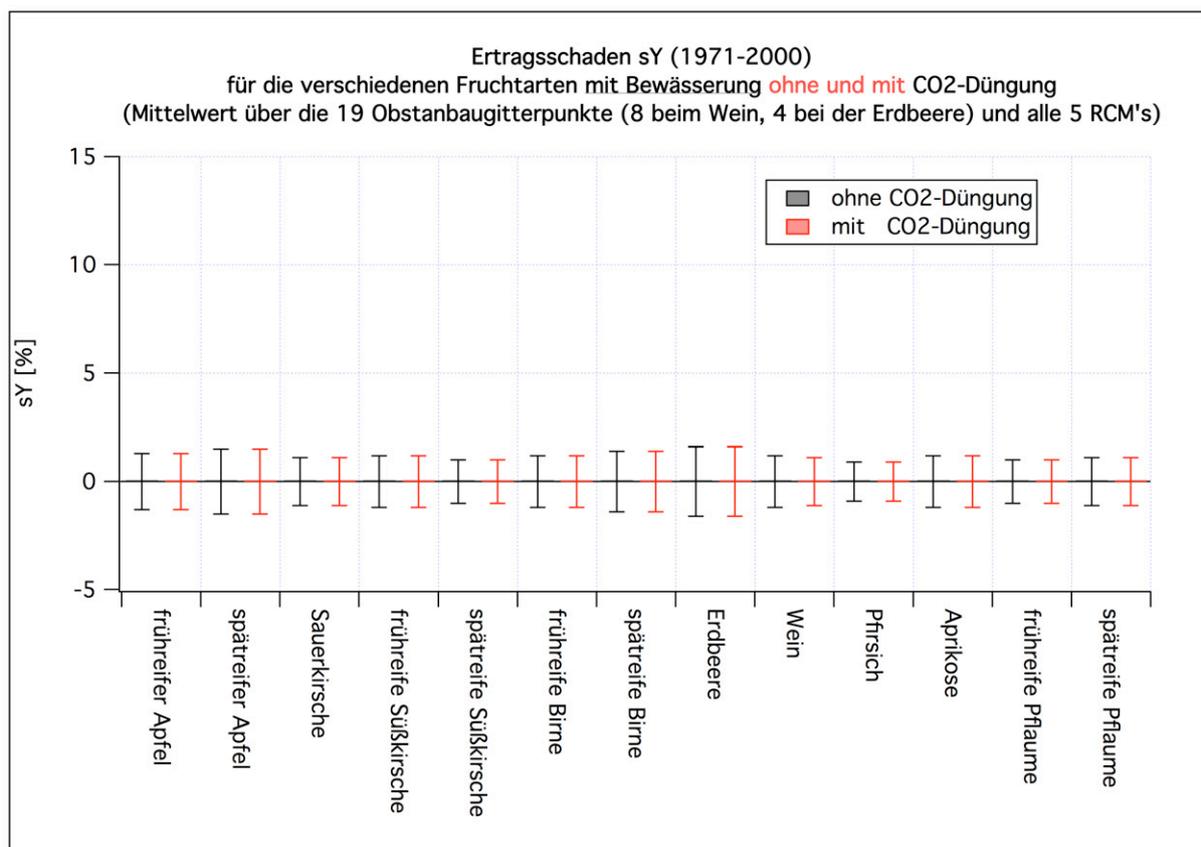


Abbildung I.5: Ertragsschäden s_Y (1971-2000) **mit Bewässerung** für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

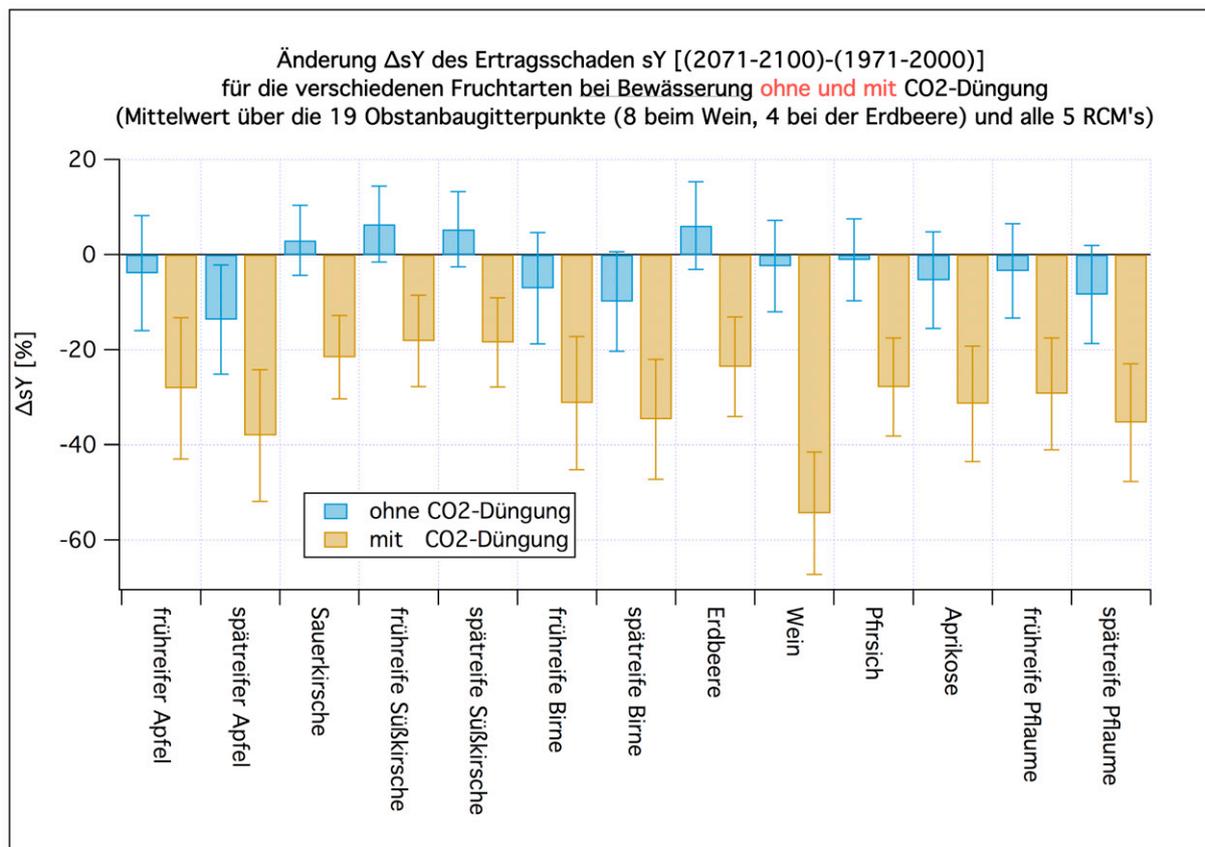


Abbildung I.6: Veränderung Δs_Y der Ertragsschäden s_Y [(2071-2100)-(1971-2000)] **mit Bewässerung** für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95 %-Konfidenzintervalle.

I.4 Bewässerungsmenge

Die notwendige Sommerberechnungsmenge nimmt bis 2100 bei allen Obstarten zu, jedoch sind nur einige dieser Veränderungen, hauptsächlich bei den spätreifenden Arten/Sorten, signifikant (**Tabelle I.7**; 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.4) sowie der im Sommer etwas zurückgehenden relativen Feuchte (Tabelle B.10 im LB). Mit CO₂-Düngung (**Tabelle I.8**) ist die Zunahme der notwendigen Bewässerungsmenge etwas geringer, da mit steigender CO₂-Konzentration der Stomatawiderstand ansteigt, was die Transpiration verringert.

Tabelle I.7: 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 I.8: 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	**

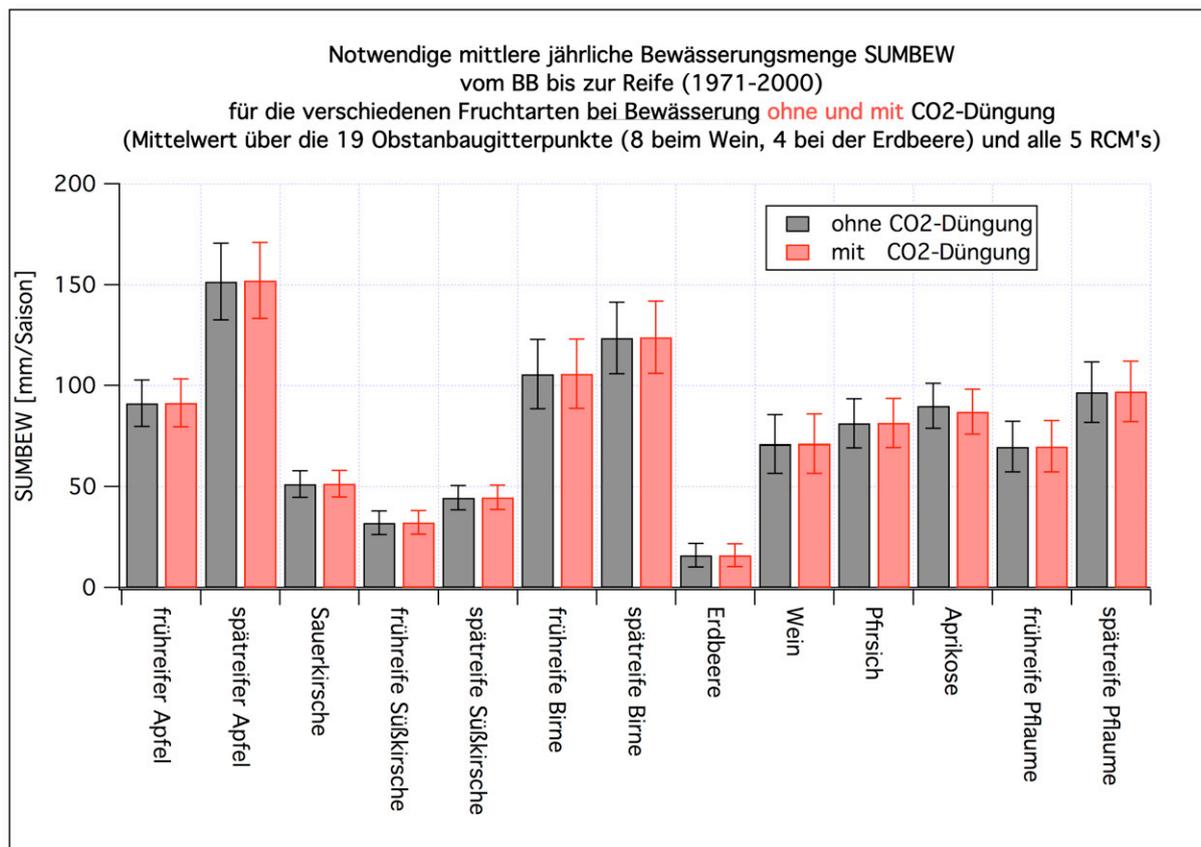


Abbildung I.7: Mittlere jährliche Bewässerungsmenge *SUMBEW* (1971-2000) vom Blühbeginn *BB* bis zur Reife für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

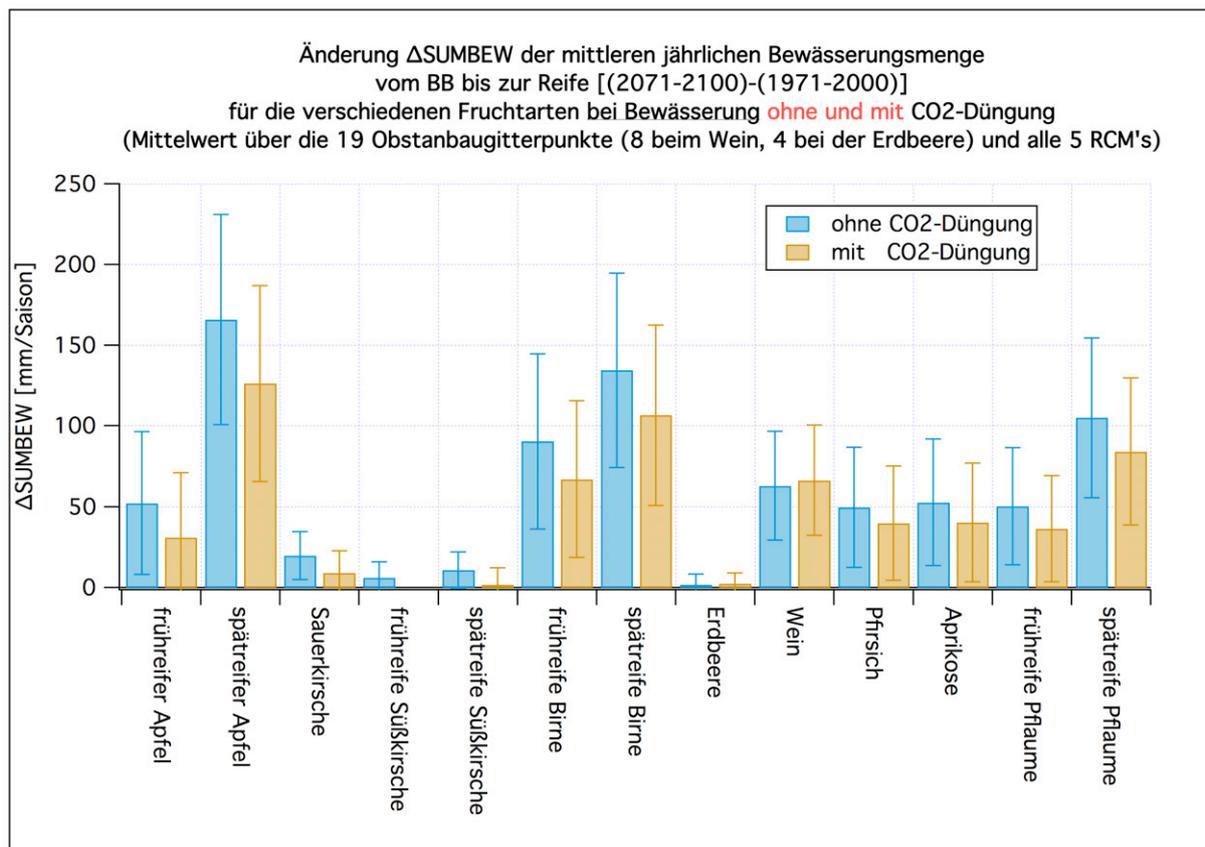


Abbildung I.8: Veränderung $\Delta SUMBEW$ der mittleren jährlichen Bewässerungsmenge [(2071-2100)-(1971-2000)] vom Blühbeginn *BB* bis zur Reife für alle Fruchtarten, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung.

I.5 Transpirationsmenge

Die Transpirationsmenge (von Blühbeginn bis Pflückreife) verhält sich ganz ähnlich wie die notwendige Bewässerungsmenge (siehe Seite 147). 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 I.9**). 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 I.10**) 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 I.9: 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 138 anwendet.

Tabelle I.10: 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	*

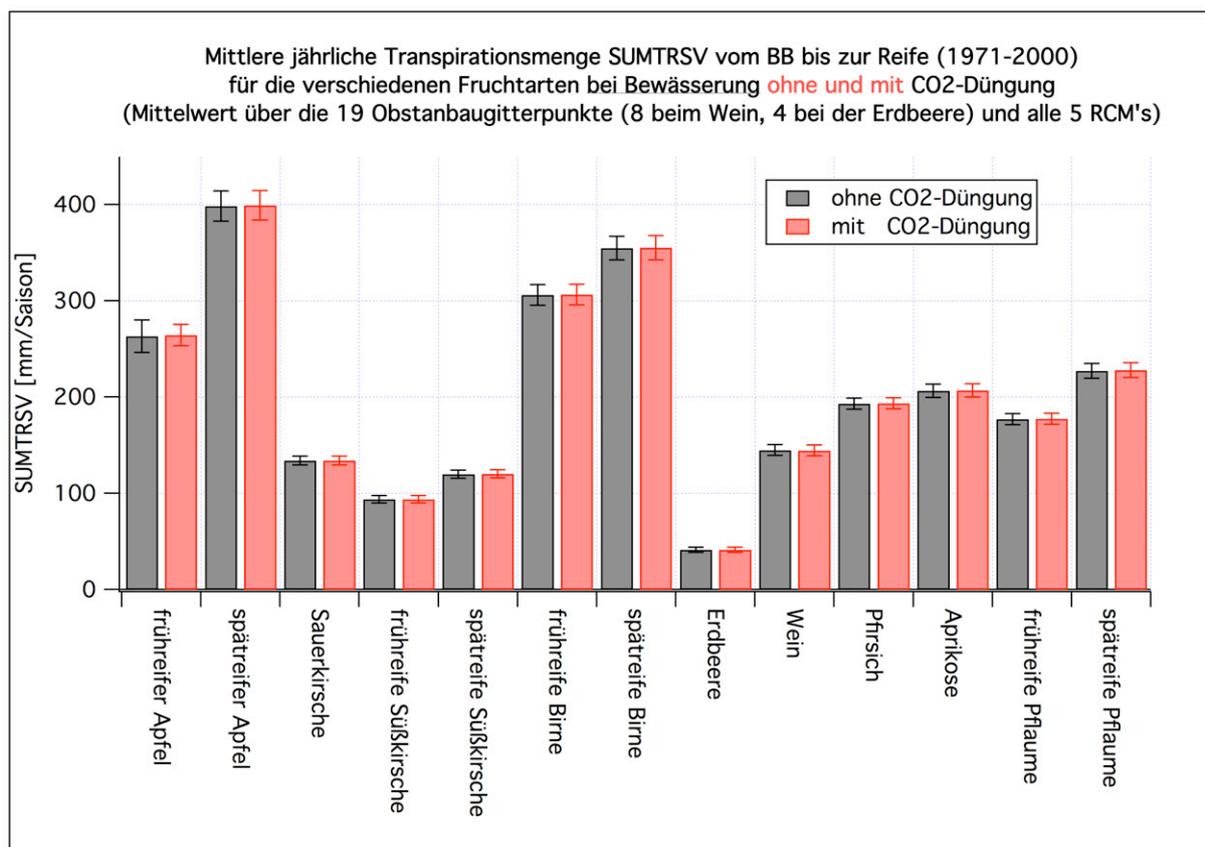


Abbildung I.9: Mittlere jährliche Transpirationsmenge *SUMTRSV* (1971-2000) vom Blühbeginn *BB* bis zur Reife für alle Fruchtarten mit Sommerberegnung, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung. Die Fehlerbalken sind 95%-Konfidenzintervalle.

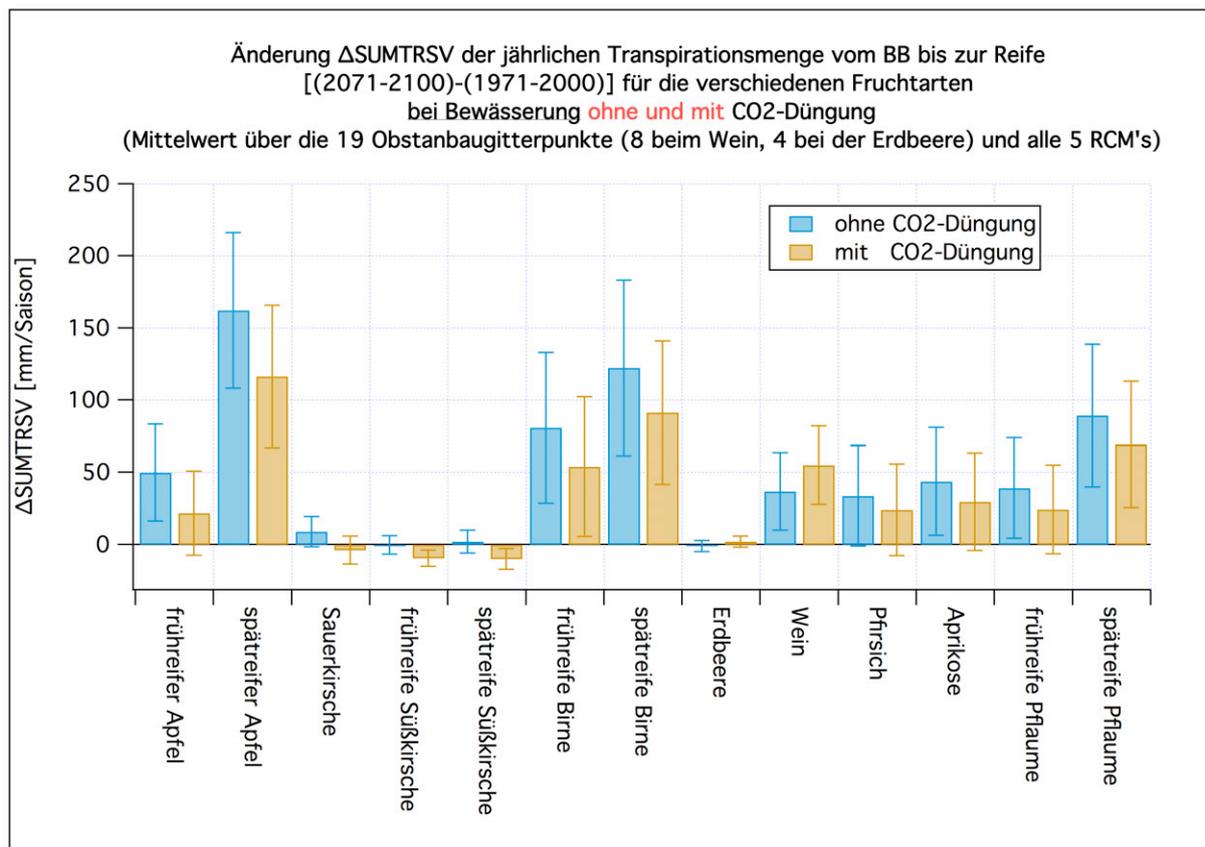


Abbildung I.10: Veränderung $\Delta SUMTRSV$ der mittleren jährlichen Transpirationsmenge [(2071-2100)-(1971-2000)] vom Blühbeginn *BB* bis zur Reife für alle Fruchtarten mit Sommerberegnung, jeweils Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe und die Obstanbaugitterpunkte, mit und ohne CO₂-Düngung.

J 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.

J.1 Gesamtschäden

Die Berechnung der Gesamtschäden s_{ges} wird in Kapitel 4.9 beschrieben. Die hierbei benötigten Dormanzschäden s_D wurden immer mit der Methode aus Kapitel 4.5 (bzw. nach Gleichung (4.99) ff.; siehe Kapitel 4.7 im LB) mit Modell 1g bei $C^* = 89$ CP (maximales Chilling-Requirement gemäß Tabelle 4.16 im LB) berechnet.² Die Methode zur Berechnung der Frostschäden s_F wird in Abschnitt 4.6 bzw. 4.8.4 im LB erläutert. Der Apfelwicklerschaden s_A (Abschnitt 4.7.1) wurde nur beim Apfel berücksichtigt. Die Ertragsschäden s_Y werden in Kapitel 4.8 (und ausführlicher in Kapitel 4.10.12 im LB) diskutiert.

Die nachfolgenden Tabellen und Abbildungen werden zum größten Teil im Kapitel 5.7.1 diskutiert.

J.1.1 Tabellen

Tabellen für die Statistik des Gesamtschadens bei der o-o- und m-o-Strategie findet man im Anhang K.1.1 im LB. Weitere Tabellen für die Statistik des Gesamtschadens bei der Strategie m-g mit Worst Case 10 %, 7 %, 5 %, 4 % und 3 % und für die m-m-Strategie (ohne, mit CO₂-Düngung und mit Worst Case 20 %) findet man ebenfalls in diesem Anhang des Langberichts.

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 5.3.3).

Tabelle J.1: 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 J.2: Statistik für den **Gesamtschaden** s_{ges} (in %) (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS, **nur 3 Klimamodellläufe**); Mittelwerte über nur 3 Modellläufe 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 J.3: 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 J.4: 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 J.5: 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 J.6: 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 J.7: 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 J.8: 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	

J.1.2 Bilder

Bilder für die o-o- und m-o-Strategie findet man im Anhang K.1.2 im LB. Bilder für die Statistik des Gesamtschadens bei der Strategie m-g mit Worst Case 10%, 7%, 5%, 4% und 3% und für die m-m-Strategie (ohne, mit CO₂-Düngung und mit Worst Case 20%) findet man ebenfalls in diesem Anhang des Langberichts.

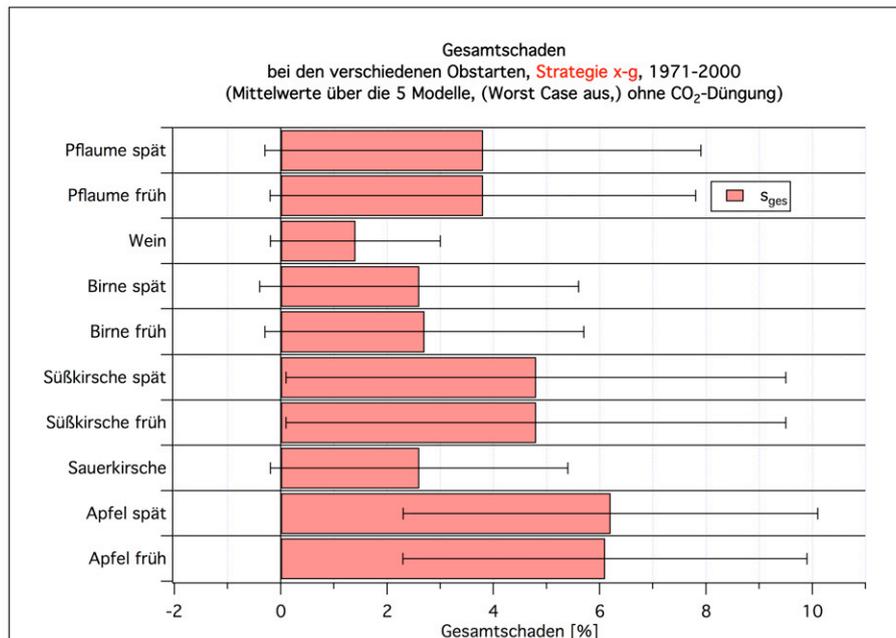


Abbildung J.1: Gesamtschaden s_{ges} (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie x-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS (ist aber im Zeitraum 1971-2000 ohne Relevanz!))

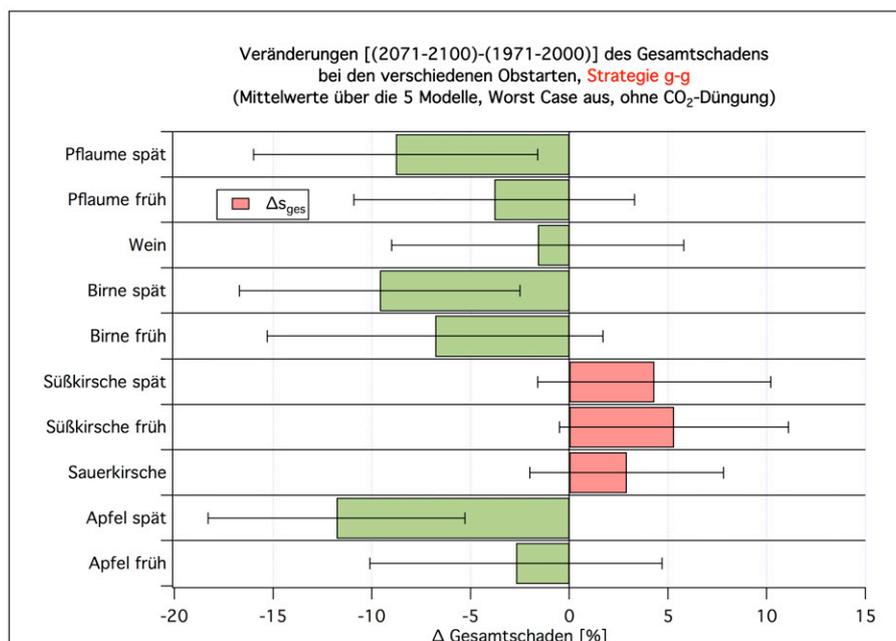


Abbildung J.2: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

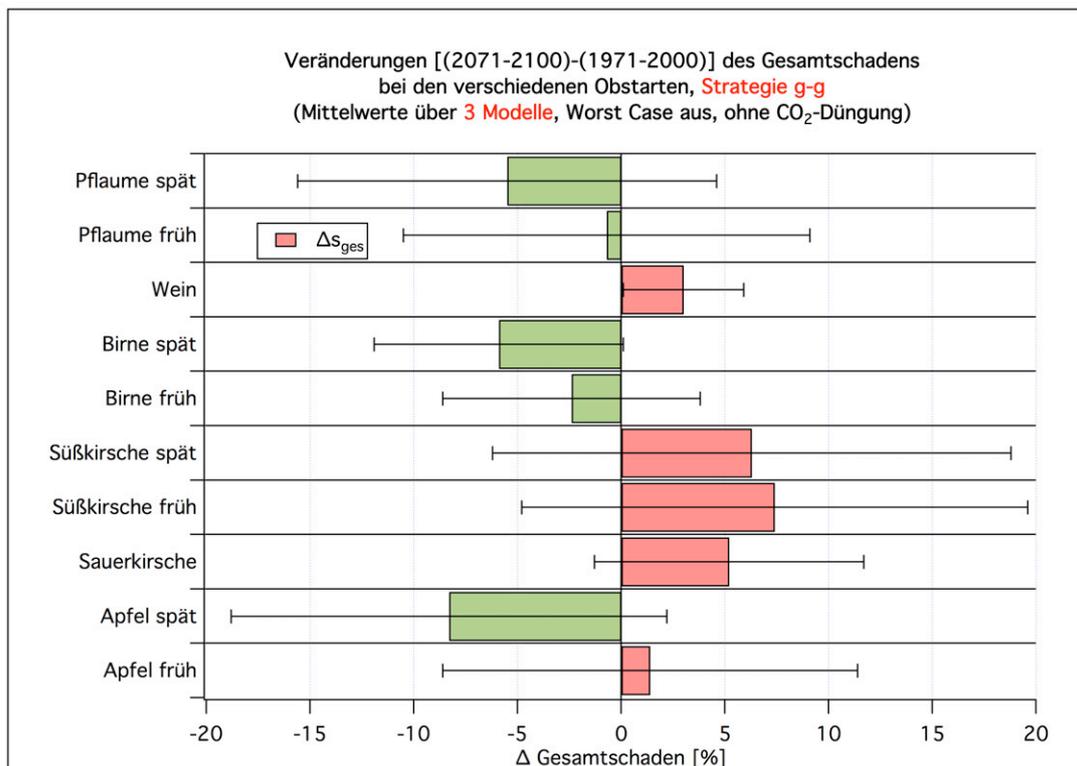


Abbildung J.3: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, nur 3 Klimamodellläufe (ohne WETTREG), ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

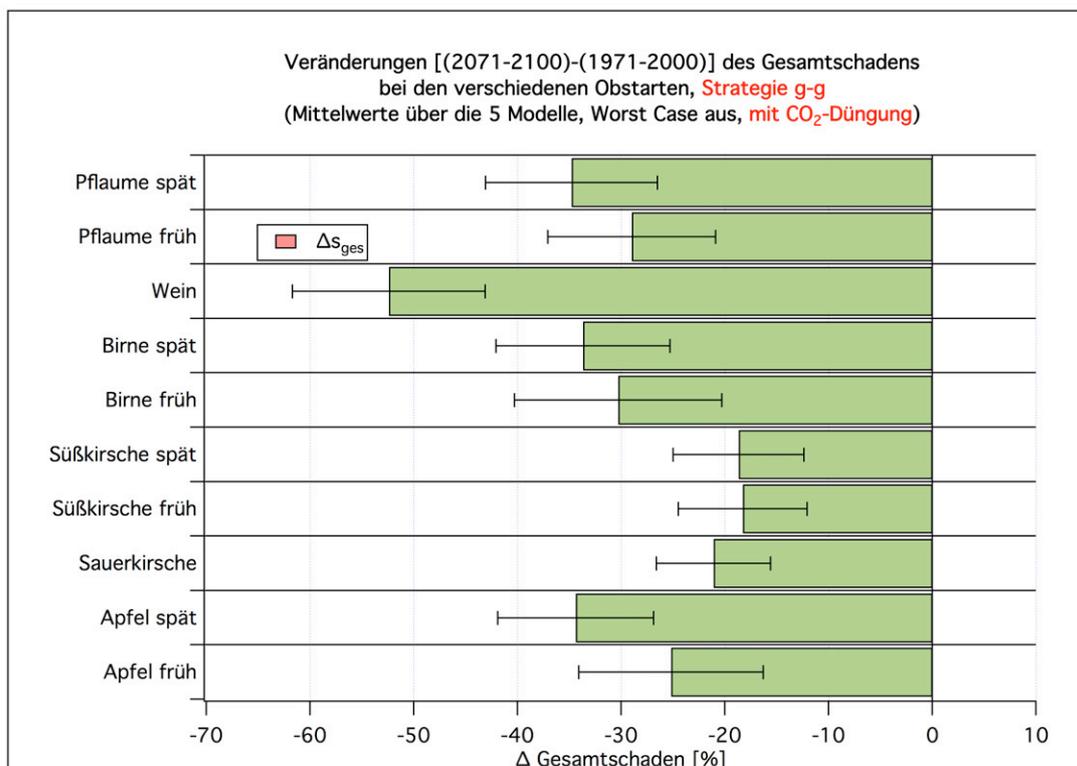


Abbildung J.4: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

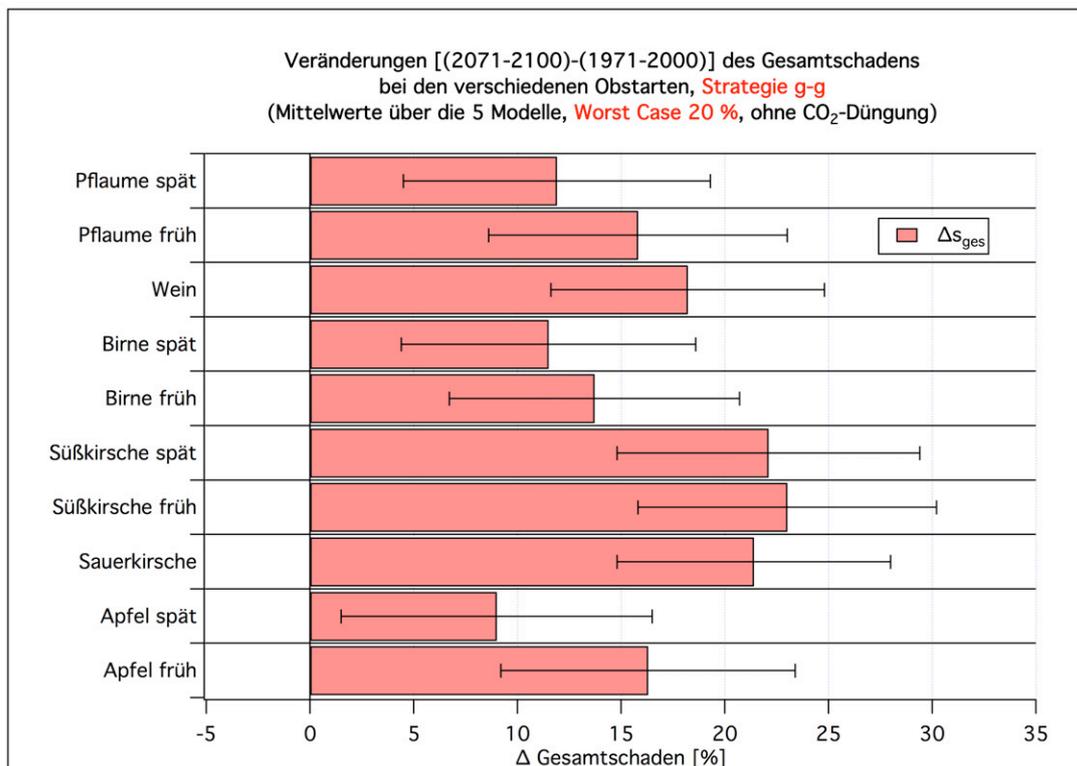


Abbildung J.5: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 20 %**)

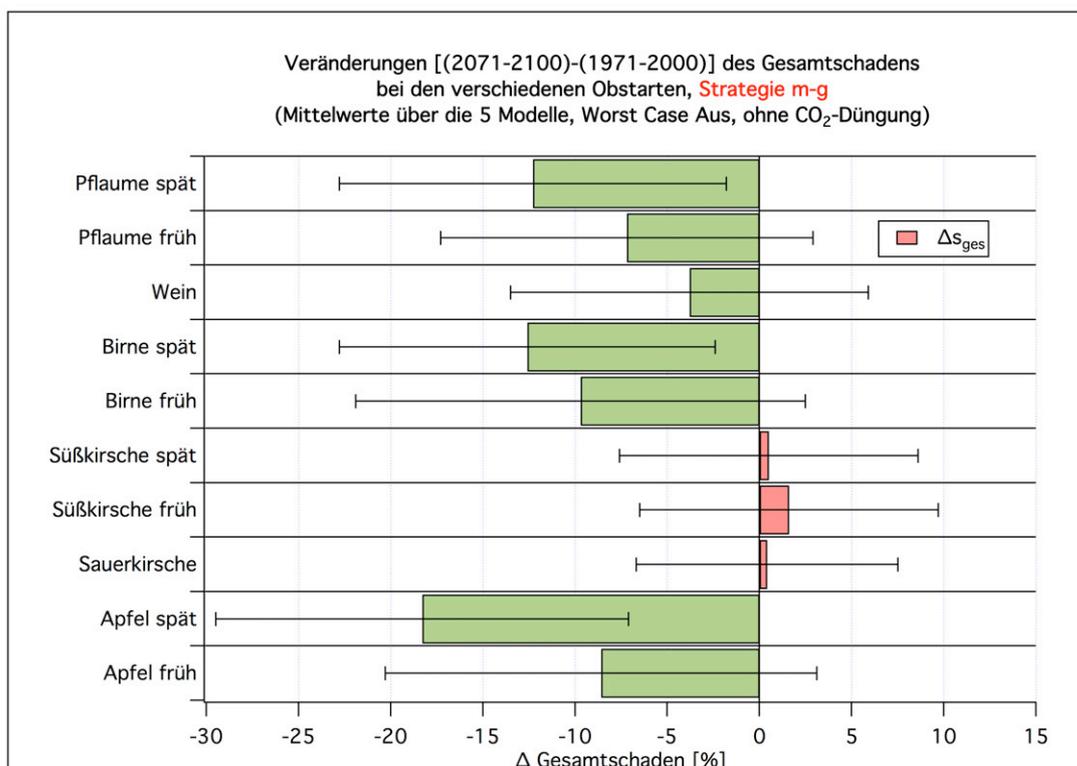


Abbildung J.6: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: AUS**)

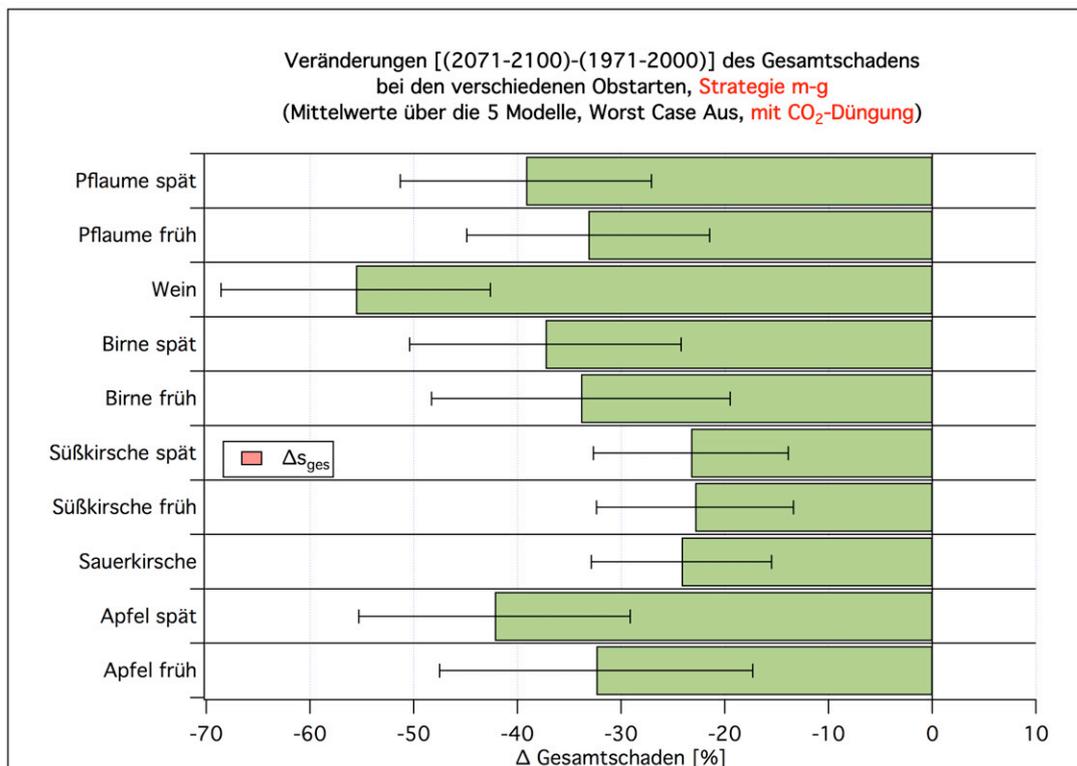


Abbildung J.7: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

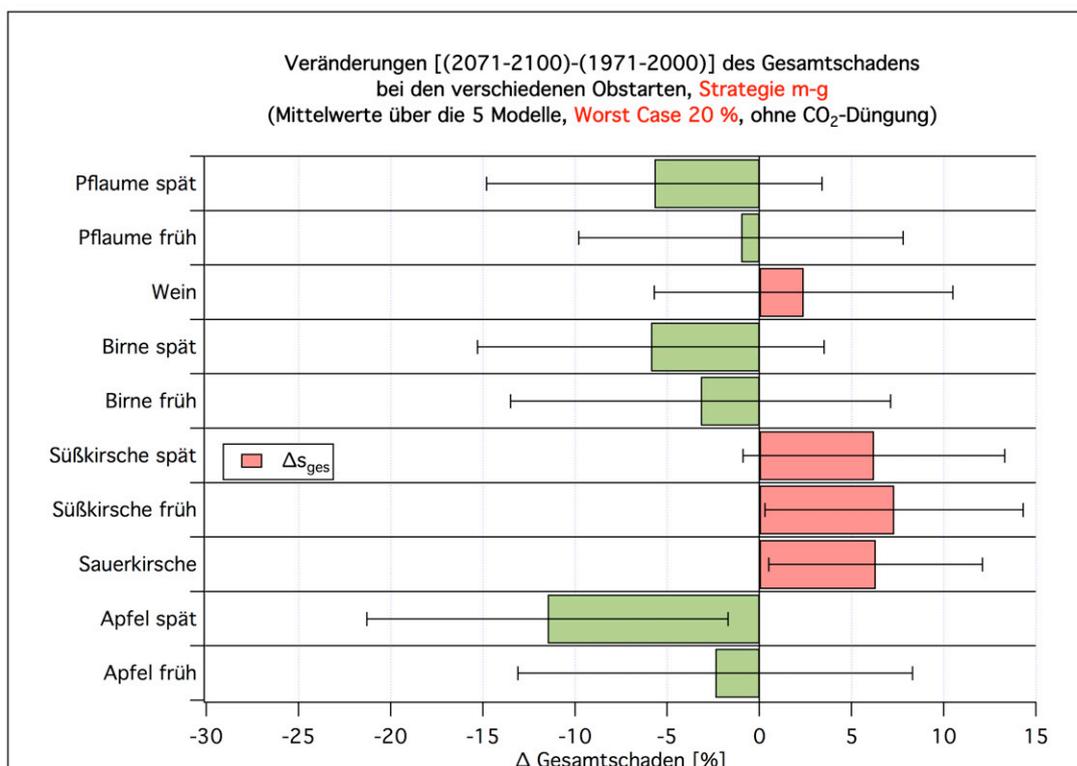


Abbildung J.8: Veränderung Δs_{ges} des Gesamtschadens (in %) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20 %)

J.2 Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (flächenspezifisch)

Die Methodik zur Berechnung der Gesamtkosten *KK* des Klimawandels und die hierbei verwendeten Strategien werden ausführlich im Abschnitt 4.10 erläutert. Im Abschnitt J.2.1.1 werden zunächst die auf die Fläche bezogenen, über 30 Jahre gemittelten Kosten (in €/ha/a) gelistet. Danach werden in Abschnitt J.2.2.1 zuerst die 30-jährigen Mittelwerte der *KK* (2071-2100 vs. 1971-2000) und anschließend in Abschnitt J.2.2.2 der jährliche Verlauf bis zum Jahr 2100 graphisch veranschaulicht. Im Abschnitt J.2.2.3 werden schließlich auch noch die aufsummierten Kosten $\sum_{2002}^j KK$ für alle Obstarten visualisiert. Die akkumulierten Kosten $\sum_{2002}^j KK$ (in €/ha) in Tabellenform findet man in Abschnitt K.2.2.1.2 im LB.

J.2.1 Tabellen

Tabellen für die Statistik der Gesamtkosten pro Fläche bei der o-o- und m-o-Strategie findet man im Anhang K.2.2.1.1 im LB. Weitere Tabellen für die Statistik der Gesamtkosten bei der Strategie m-g mit Worst Case 10 %, 7 %, 5 %, 4 % und 3 % und für die m-m-Strategie (ohne, mit CO₂-Düngung und mit Worst Case 20 %) findet man ebenfalls in diesem Anhang des Langberichts.

Tabellen für die ab 2002 aufsummierten (akkumulierten) Kosten pro Fläche findet man im Anhang K.2.2.1.2 im LB.

J.2.1.1 30-jährige Mittelwerte und Differenzen

Eine kurze Diskussion zu *KK* findet man auf Seite 95 in Kapitel 5.7.2.2. Die Besonderheiten der Konfidenzintervalle der Gesamtkosten des Klimawandels (*KK*) werden auf Seite 176 im LB diskutiert.

Tabelle J.9: 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 J.10: 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 J.11: 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 J.12: 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 J.13: 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 J.14: 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 J.15: 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 J.16: 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	*

J.2.2 Bilder

J.2.2.1 30-jährige Mittelwerte bzw. Differenzen

Eine kurze Beschreibung und Diskussion der folgenden Graphiken findet sich auf Seite 95 in Kapitel 5.7.2.2. Abbildungen für die o-o- und m-o-Strategie sowie die m-g-Strategie für verschiedene NoReleaseProb-Werte im Worst Case Szenario finden sich im Anhang K.2.2.2.1 im LB. Dort findet man auch Bilder zu den Kosten bei der m-m-Strategie.

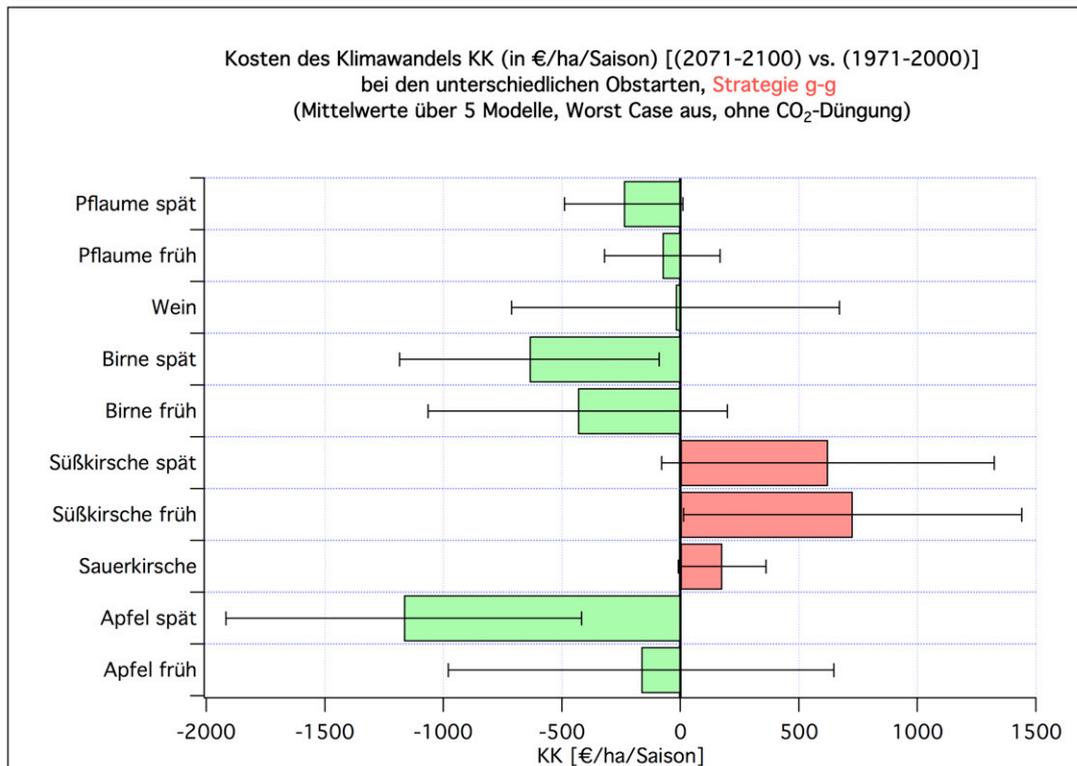


Abbildung J.9: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

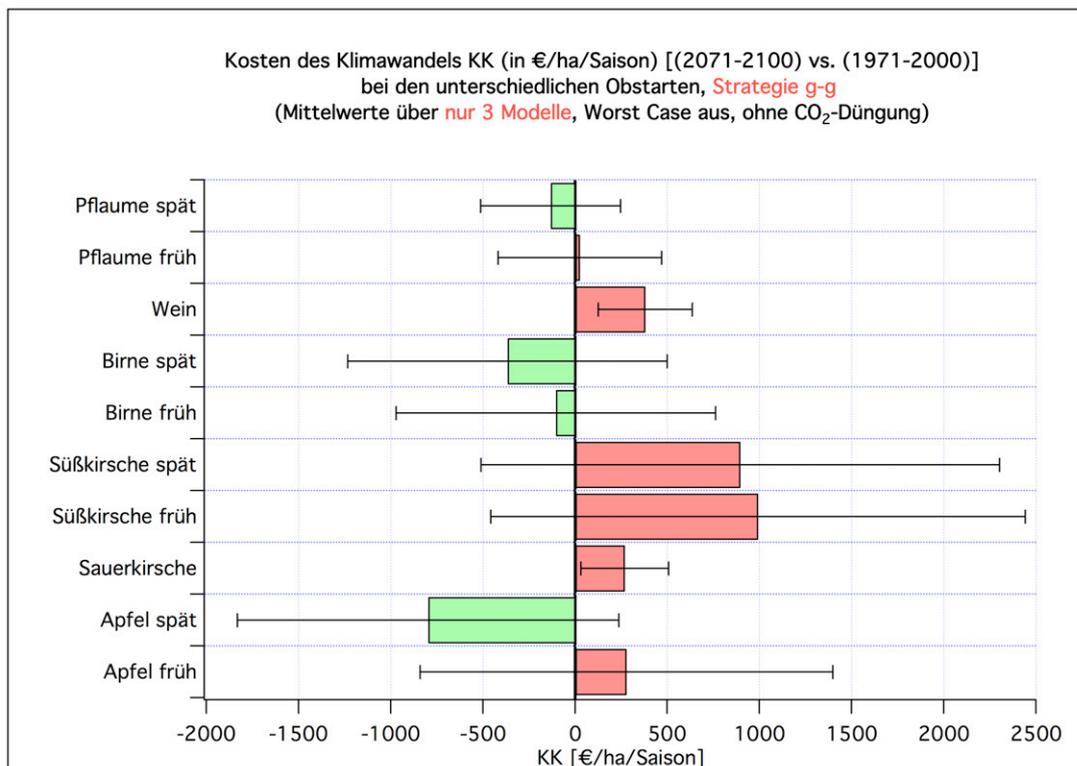


Abbildung J.10: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über nur 3 Klimamodellläufe)

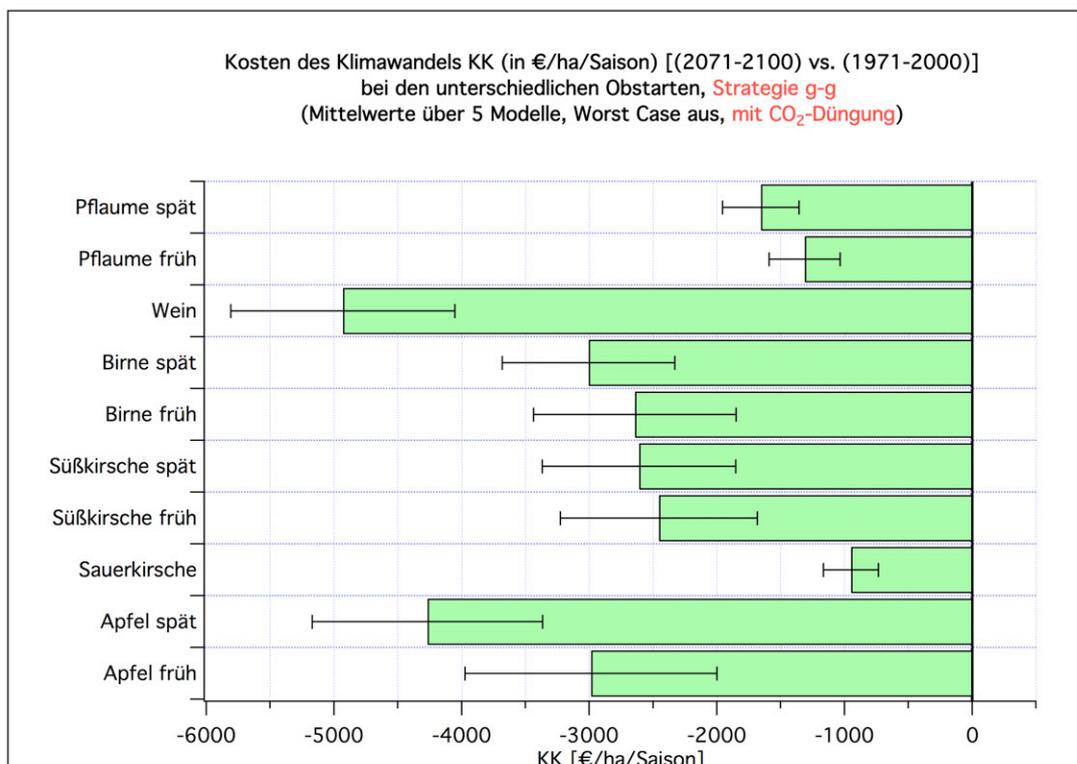


Abbildung J.11: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie g-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

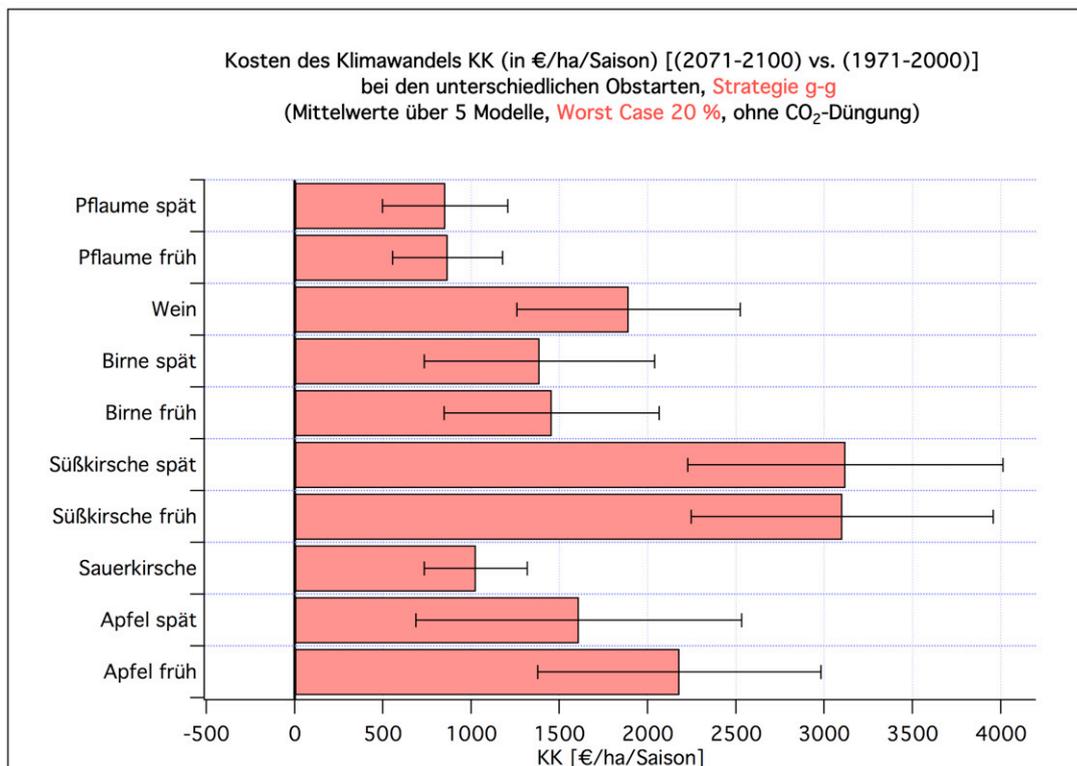


Abbildung J.12: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: 20 %**; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

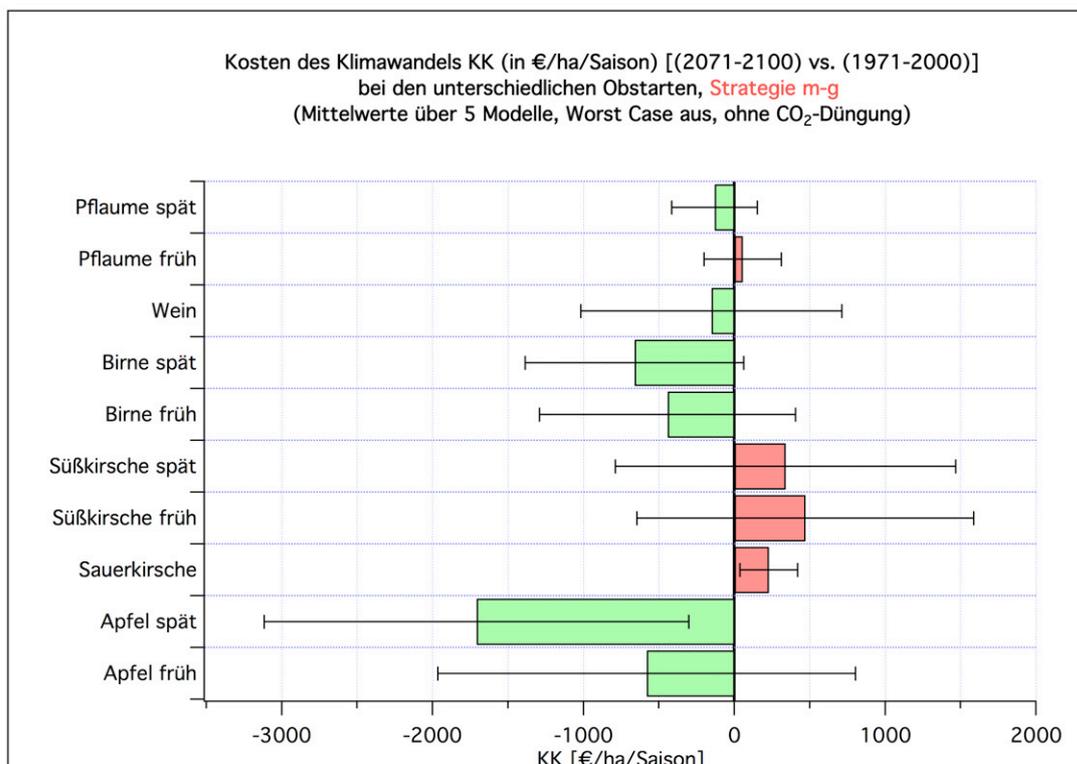


Abbildung J.13: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, **Worst Case: AUS**; Mittelwert über 5 Klimamodellläufe)

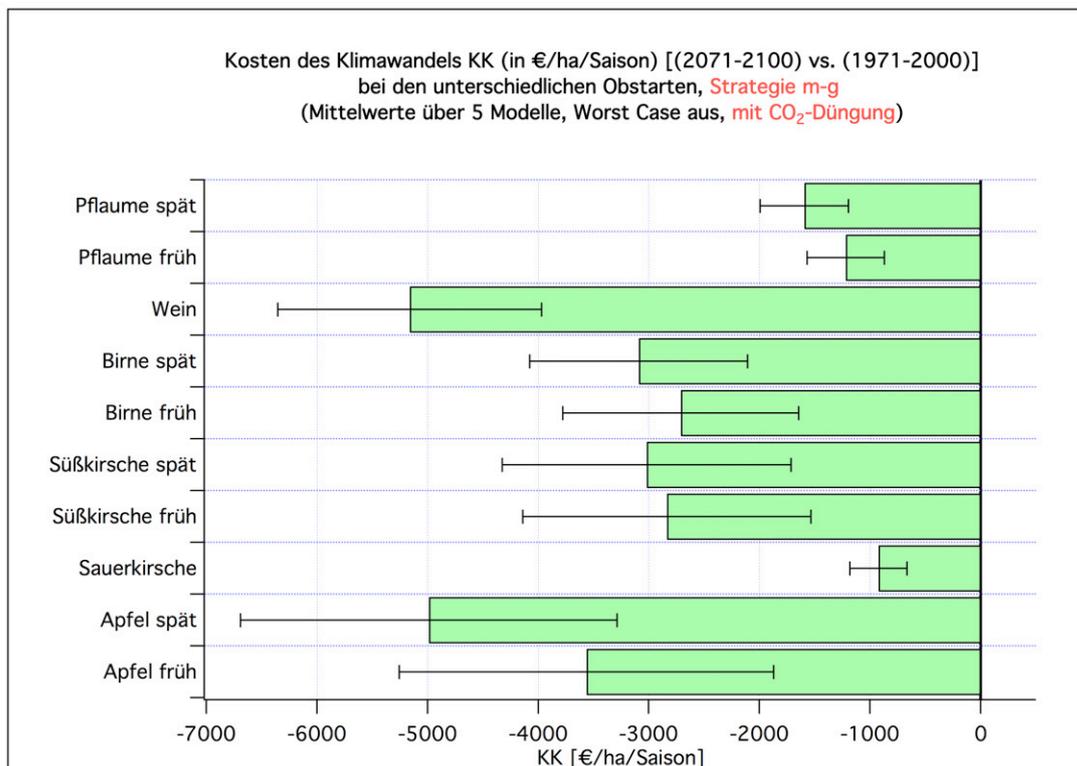


Abbildung J.14: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, mit CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwert über 5 “Modelle”)

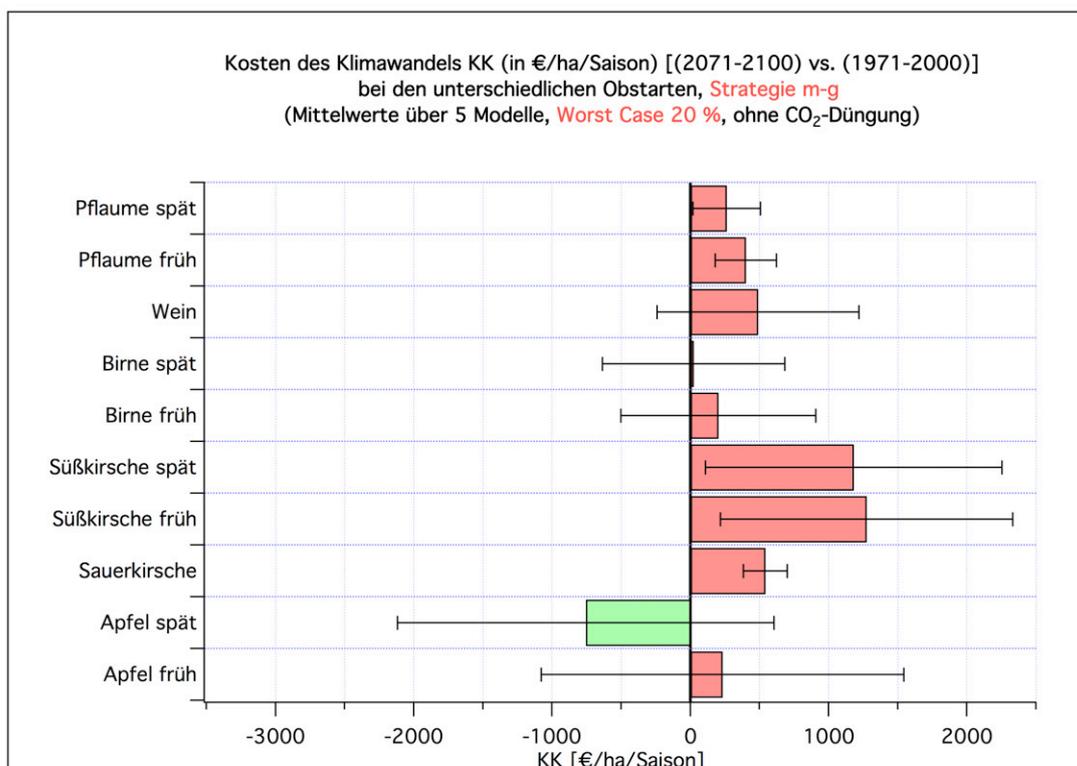


Abbildung J.15: Gesamtkosten KK des Klimawandels (in €/ha/Saison) bei den unterschiedlichen Obstarten (Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20%; Mittelwert über 5 “Modelle”)

J.2.2.2 Jährlicher Verlauf der Kosten

Eine Diskussion der im Folgenden dargestellten Bilder findet man ab Seite 97 am Ende von Kapitel 5.7.2.2.

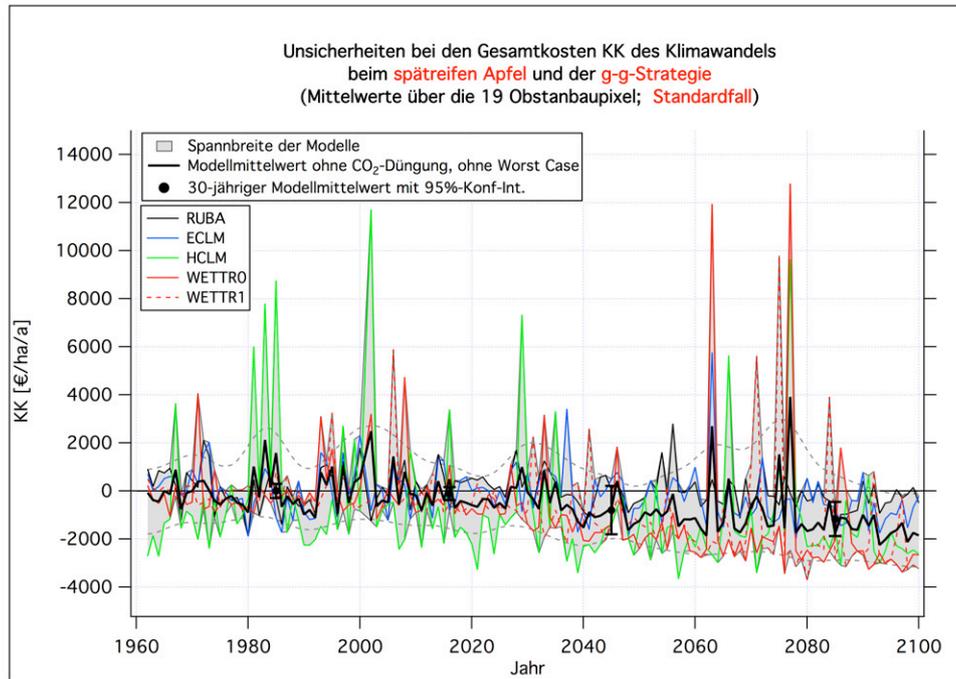


Abbildung J.16: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **spätreifen Apfel**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

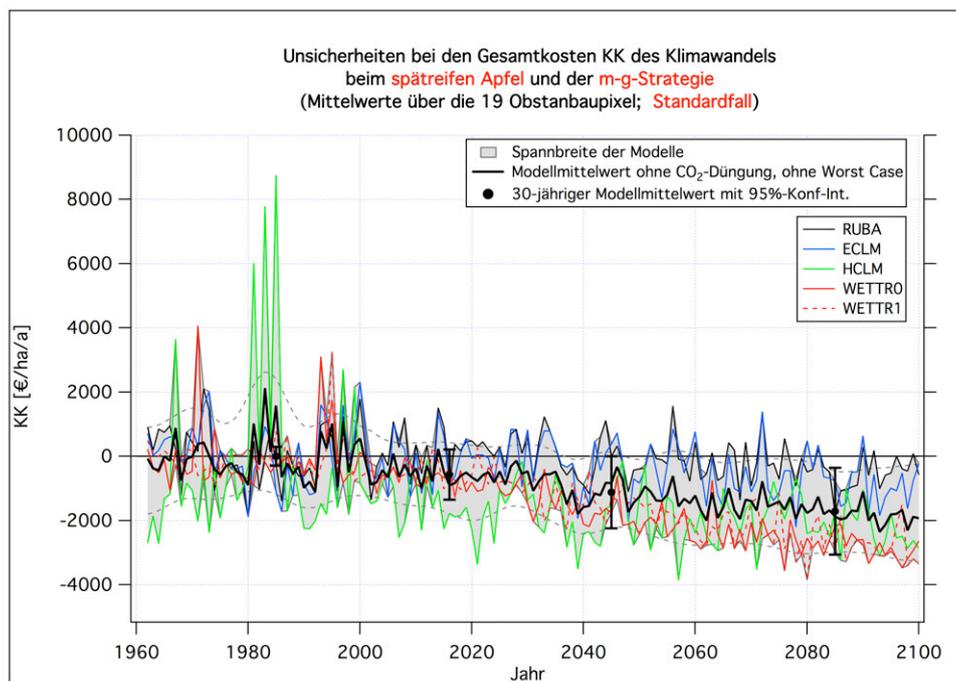


Abbildung J.17: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **spätreifen Apfel**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

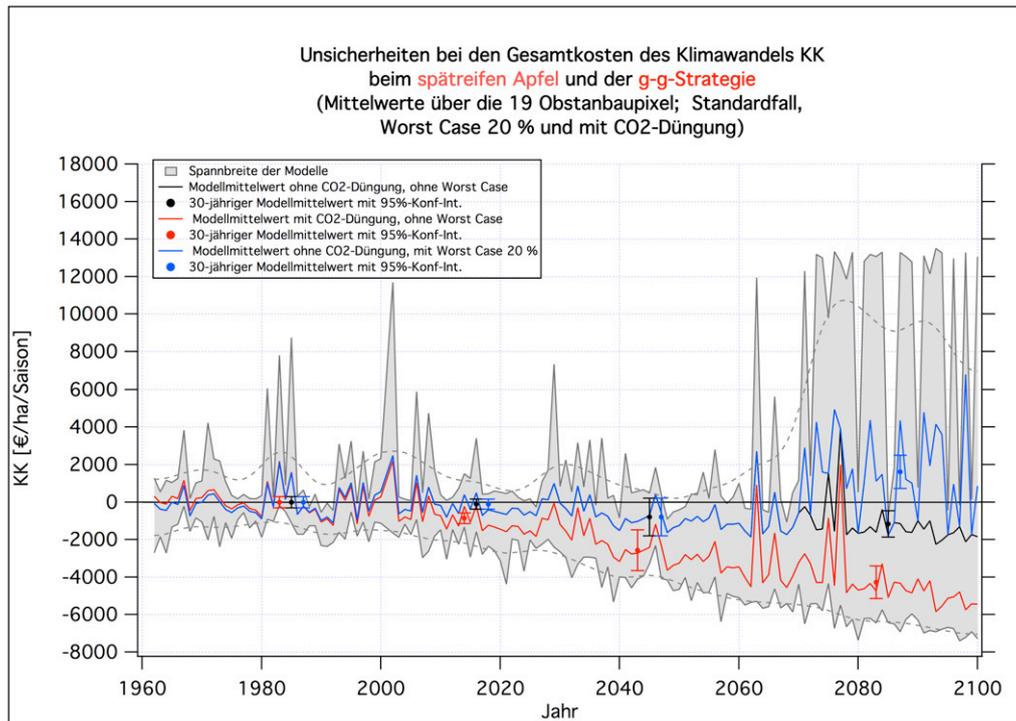


Abbildung J.18: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **spätreifen Apfel**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

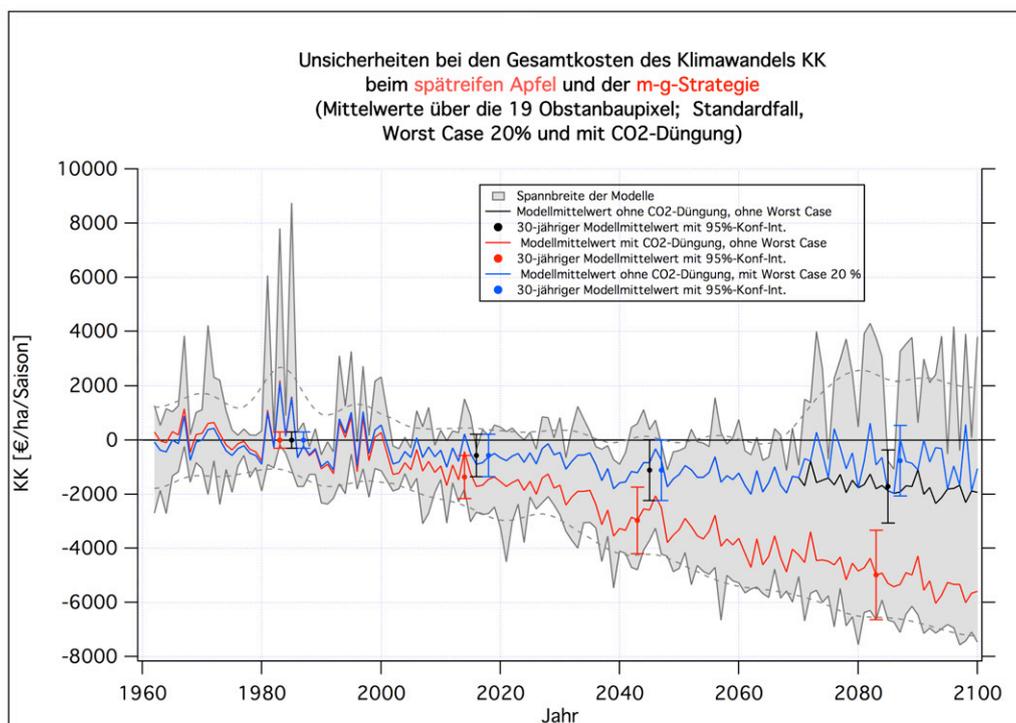


Abbildung J.19: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **spätreifen Apfel**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

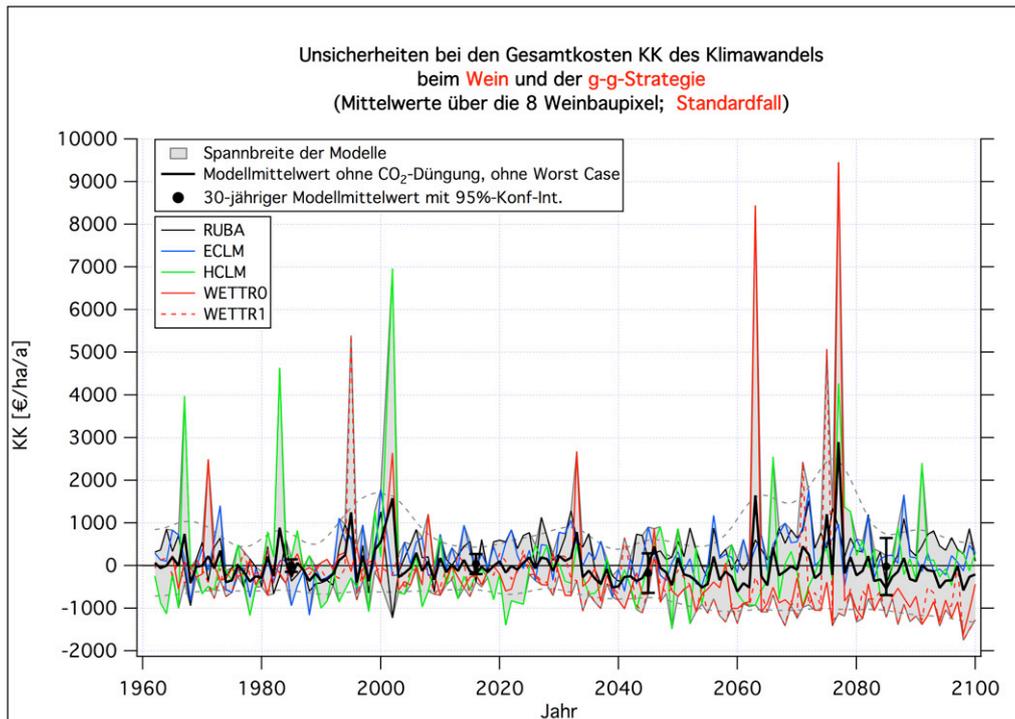


Abbildung J.20: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **Wein**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

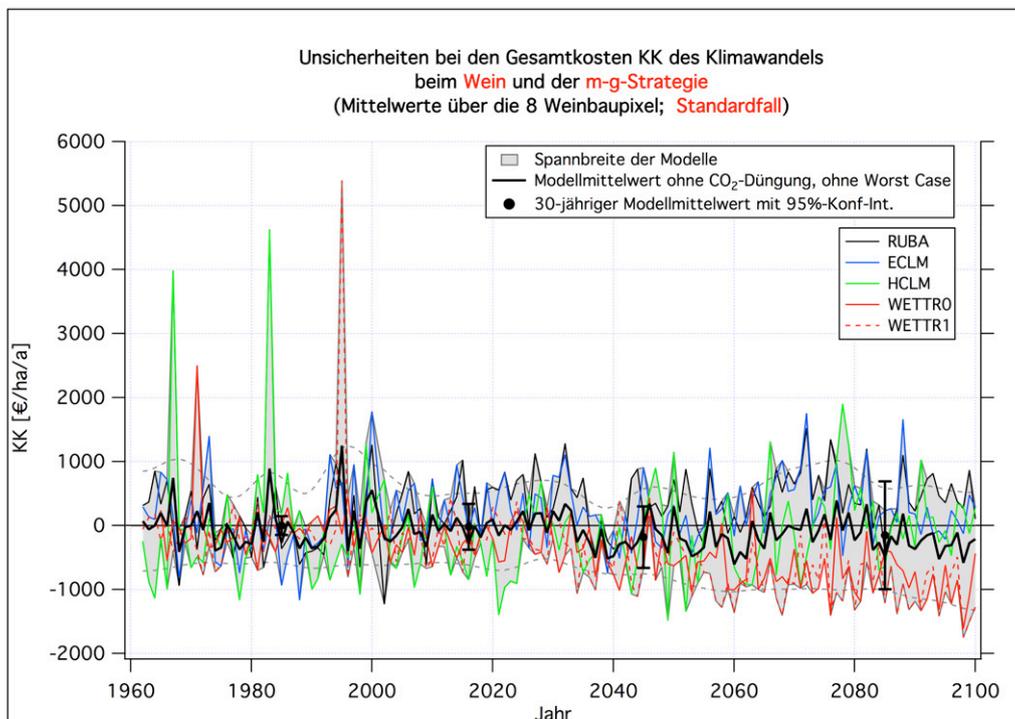


Abbildung J.21: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **Wein**, berechnet mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS)

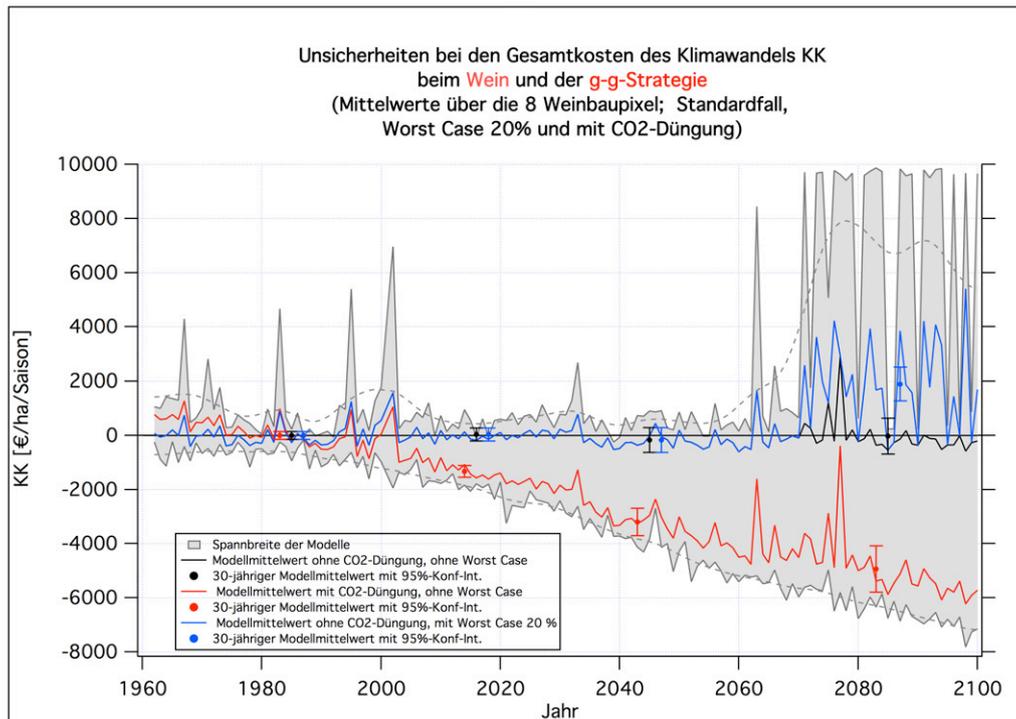


Abbildung J.22: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **Wein**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie g-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

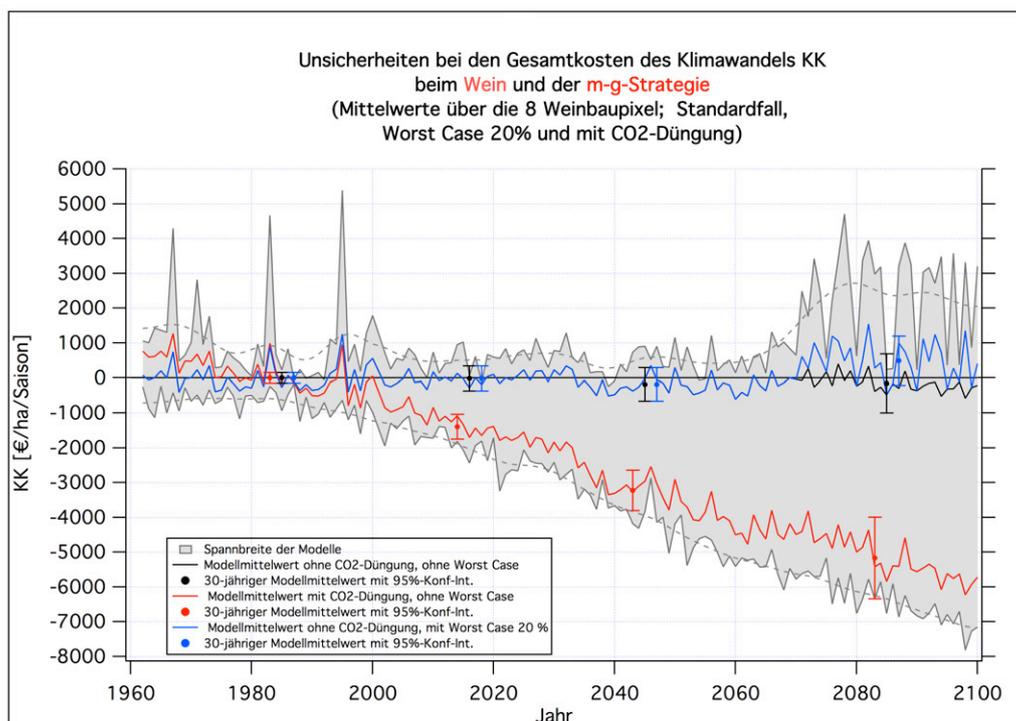


Abbildung J.23: Gesamtkosten *KK* des Klimawandels (in €/ha/Saison) beim **Wein**, berechnet jeweils mit den 5 Klimamodellläufen (**Strategie m-g** mit 3 Modell-Variationen: “Standardfall”, “mit CO₂-Düngung” und mit “Worst Case 20%”)

Zusätzliche Abbildungen für den frühreifen Apfel und die Sauerkirsche sind im Anhang K.2.2.2.2 im LB dargestellt.

J.2.2.3 Aufsummierte (akkumulierte) Kosten

Abbildungen für den jährlichen Verlauf der akkumulierten Kosten, die in der Form denen des Kapitels J.2.2.2 entsprechen, findet man im Anhang K.2.2.2.3 im LB.

Hier sollen nur noch für alle 10 Obstarten die von 2002 bis 2100 akkumulierten Gesamtkosten pro Hektar für die m-g-Strategie verglichen werden. Eine kurze Diskussion der folgenden Bilder findet man auf Seite 98 im Kapitel 5.7.2.2. Werte für die g-g- und m-m-Strategie findet man in den Tabellen im Abschnitt K.2.2.1.2 im LB.

Tabellen und Abbildungen für die Gesamtkosten des Klimawandels für ganz Hessen³ findet man in Anhang K.2.3.1 und K.2.3.2 im LB.

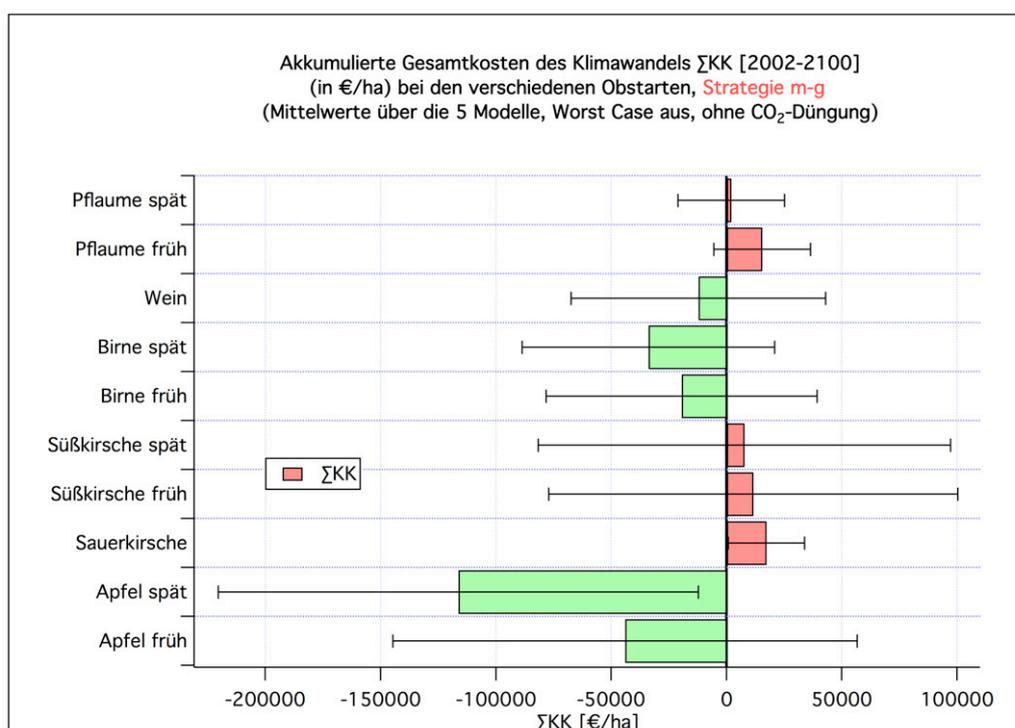


Abbildung J.24: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (von 2002 bis 2100) bei den verschiedenen Obstarten (**Strategie m-g**, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: AUS; Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe)

³ D. h., dass die hier angegebenen, flächenspezifischen Kosten noch mit der jeweiligen Gesamtanbaufläche in Hessen multipliziert wurden.

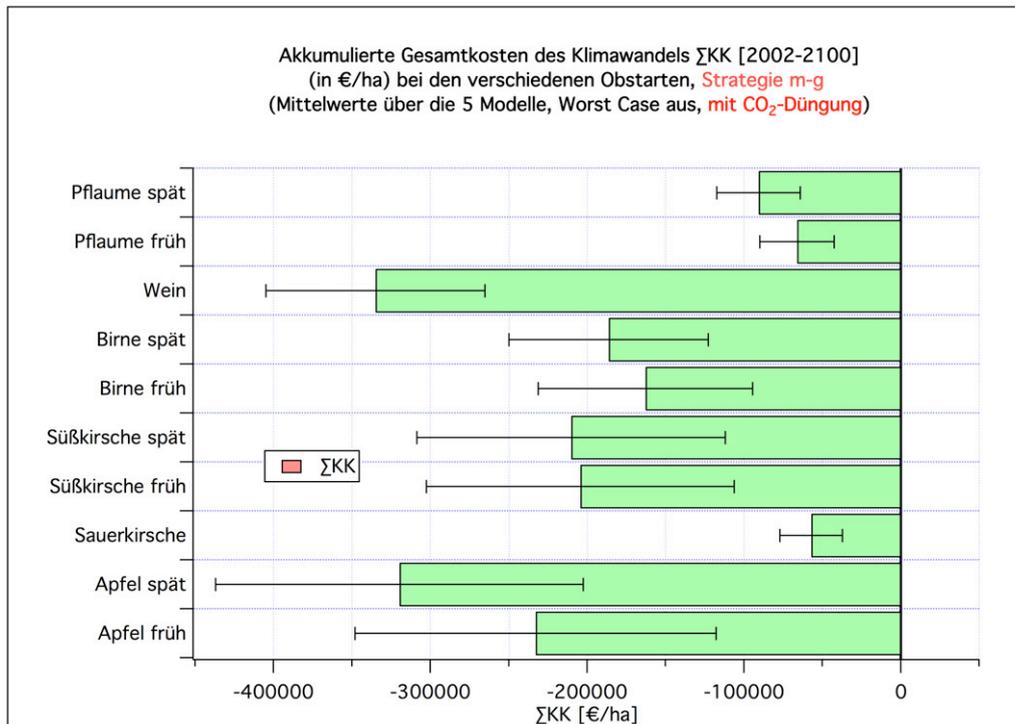


Abbildung J.25: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (von 2002 bis 2100) bei den verschiedenen Obstarten (**Strategie m-g, mit CO₂-Düngung**, Worst Case: AUS; Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe)

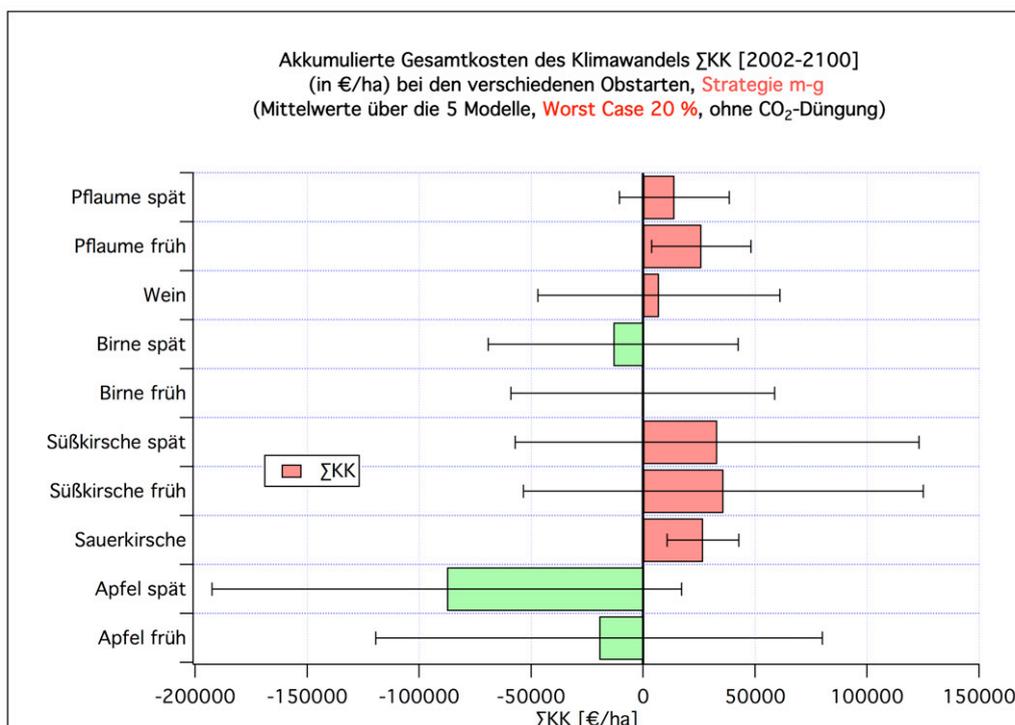


Abbildung J.26: Akkumulierte Gesamtkosten ΣKK des Klimawandels (in €/ha) (von 2002 bis 2100) bei den verschiedenen Obstarten (**Strategie m-g, ohne CO₂-Düngung, Worst Case: 20 %**; Mittelwerte über 5 Klimamodellläufe)

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 26).
- 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 54).
- 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 18).
- Blümel, K.; Chmielewski, F.-M. (2013): *Klimawandel in Hessen (Langversion), Chancen, Risiken und Kosten für den Obst- und Weinbau (CHARIKO)*. Endbericht 10/2009 – 10/2013. Auftraggeber: Fachzentrum Klimawandel Hessen im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel Hessen. Forschungsprojekt INKLIM-A. (http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/CHARIKO_html) (Seite 1).
- 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 17).
- CENTURY 4.0, 1993: <http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/> (Seite 26).
- 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 11, 22 und 25).
- 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 9).
- 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 18 und 18).

- 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 50 und 51).
- Chmielewski, F. M.; Blümel, K. (2013): Klimawandel und Obstbau. *promet* 38, 1/2, Deutscher Wetterdienst (Selbstverlag) Offenbach, 32-41. (Seite 8 und 105).
- CORINE Land Cover 2000: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database> (Seite 17).
- CORINE Land Cover 2006: <http://sia.eionet.europa.eu/CLC2006/> (Seite 17).
- Darbyshire, R.; Webb, L.; Goodwinc, I.; Barlowa, S. (2011): Winter chilling trends for deciduous fruit trees in Australia. *Agric. for Meteorol.* 151, 1074-1085. (Seite 50).
- 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 50).
- 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 49).
- 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 19).
- 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 19 und 50).
- Friesland, H. (1998): BIENE. Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Forschung, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig (persönlicher Austausch). (Seite 24).
- Görgens, M.; Weber R.W.S. (2009): *Klimawandel und Obstbau in Deutschland*. Projekt KliO. Abschlussbericht des Teilprojektes der OVA Jork, Selbstverlag, 52 S. (Seite 22).
- Harzer, U. (2006): *Apfelwickler: neue Erkenntnisse zur Phänologie, Populationsdynamik und Bekämpfung*. Handbuch zum Seminar, DLR Rheinland-Pfalz 20. Nov. 2006. (Seite 23).
- 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 103).
- 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 103 und 104).

- 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 104).
- Linsley-Noakes, G.; Louw, M; Allan, P. (1995): Estimating daily positive Utah chill units using daily maximum and minimum temperatures. *J. S. Afr. Soc. Hort. Sci.* 5, 19-22. (Seite 19 und 19).
- Linville, D. E. (1990): Calculating chilling hours and chill units from daily maximum and minimum temperature observations. *Hortscience* 25(1):14–16. (Seite 19 und 23).
- Matzneller, P.; Chmielewski, F.-M., Blümel, K.; Hilsendegen, P. (2011): *EMS Annual Meeting Abstracts* Vol. 8, EMS2011-363, 2011 11th EMS / 10th ECAM. (Seite 18).
- 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 18).
- Nakicenovic, N.; Alcamo, J.; Davis, G.; de Vries, B.; Fenhann, 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 3).
- Palm, G.; Hauschildt, H. (2006): Integrierte Bekämpfung des Apfelwicklers (*Cydia pomonella*). *Mitteilungen des Obstbauversuchsringes des Alten Landes* 61: 167-173. (Seite 23).
- 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 50).
- 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 101).
- 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 102).
- 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 102).

- 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 25).
- Shaffer, J. P. (1995): Multiple Hypothesis Testing. *Annu. Rev. Psychol.* vol. 46, 561-584. (Seite 110).
- 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 24).
- von Storch, H.; Zwiers, F. W. (2008): *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, 484 S. (Seite 102).
- 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 26).
- Weinberger, J. H. (1950): Chilling requirements of peach varieties, *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 56, 122–128. (Seite 19).
- 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 102).

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 des ihres pdf-Readers benutzen.

- ΔTM , 26
- A1B, 3, 12
- BIAS-Korrektur, 3
- Biosphären-Modelle, 102
- Bonferroni Methode, 110
- C20, 3, 12
- Chilling, 4
- Chilling-Forcing-Modelle, 18
- Chilling-Requirement, 18
- C^* =Chilling-Requirement, 20
- DAYLENGTH-Term, 18
- DOY, 20
- d_{rel} =relatives Chilling-Defizit, 20
- ECLM, 9, 12
- FROSTSCHADENSROBx, 22
- g-g-Strategie, 6
- g-Strategie, 29
- GCM, 9
- HCLM, 9, 12
- Hessenrechteck, 12
- HLUG (Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie), 26
- Holm's Sequentially-Rejective Bonferroni Method, 110
- K_{ges} , 28
- K_j , 28
- KK, 31
- KKA, 97
- Kohlmeise, 18
- Konfidenzintervall, 16–17, 101
- Kontrolllauf, 3
- LAI, 102
- LB, 1
- Leaf Area Index, 102
- m-g-Strategie, 6
- m-m-Strategie, 82
- m-o-Strategie, 82
- MaxWert*, 28
- Messwerte
 - R =Niederschlagssumme, 12
 - Sd =Sonnenscheindauer, 12
 - T =Tagesmitteltemperatur, 12
 - Tn =Tagesminimumtemperatur, 12
 - Tx =Tagesmaximumtemperatur, 12
 - V_{10} =10 m-Windgeschwindigkeit, 12
 - $CLCT$ =Gesamtbedeckungsgrad, 12
 - $Glob$ =Globalstrahlung, 12
 - $Rel2$ =Relative Luftfeuchte, 12
 - $Tdew$ =Taupunkttemperatur, 12
 - e =Dampfdruck des Wasserdampfs, 12
 - ps =Luftdruck am Boden, 12
- NoReleaseProbx, 20
- o-o-Strategie, 82
- OVA, 22
- p-Wert, 101
- P_D , 20
- pdf-Version, 181
- phänologische Gärten, 106
- RCM, 9, 12
- Release of Dormancy, 20
- Rentabilität, 31
- RUBA, 9, 12
- s_A , 27
- $S_c(t_s)$ =Chilling-Summe, 20

s_D , 27

s_F , 27

s_{ges} =Gesamtschaden, 27

signifikant, 101

Signifikanz, 101

SRES, 3

ss_j , 27

s_Y , 27

TM , 26

Universal Kriging, 12

WETTR, 9

WETTR0, 17

WETTR1, 17

WETTREG, 12

Hier finden Sie die pdf-Version dieses Berichts und sowie die ausführlichere Langversion.
http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/CHARIKO_html



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

