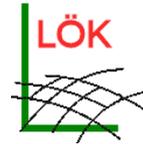


Institution

Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Universität Vechta



Universität Vechta
University of Vechta

Projekttitlel

Landesweite Untersuchungen zu beobachteten und zukünftig zu erwartenden Änderungen der Phänologie von Wild- und Kulturpflanzen in Hessen und deren Implikationen für die Forst- und Landwirtschaft – Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen: HeKlimPh

- Abschlussbericht -

Laufzeit

01.11.2009-31.10.2012



Projektleitung

Prof. Dr. Winfried Schröder

Projektbearbeitung

Simon Schönrock

Dr. Gunther Schmidt

Auftraggeber

Fachzentrum Klimawandel Hessen
im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie

Projektbetreuung

Fachzentrum Klimawandel Hessen

Vechta, Oktober 2012



Hessisches Landesamt
für Umwelt und Geologie



FACHZENTRUM
KLIMAWANDEL
HESSEN

Forschungsprogramm INKLIM-A und weitere Projekte

Inhalt

	Zusammenfassung	8
	Abstract	13
1	Hintergrund	18
2	Projektziele	19
3	Material und Methoden	20
3.1	Datengrundlagen	20
3.1.1	Phänologische Beobachtung	20
3.1.2	Klimadaten	26
3.1.3	Klimaprojektionen	27
3.1.4	Weitere Messgrößen	29
3.2	Methoden	30
3.2.1	Deskriptive Statistik	30
3.2.2	Bivariate Statistik	31
3.2.3	Regression Kriging	33
3.2.4	Multivariate Statistik	33
4	Ergebnisse	38
4.1	Entwicklung der Lufttemperaturen	38
4.2	Phasenauswahl	44
4.3	Deskriptive Statistik	47
4.3.1	Phänologische Entwicklung in Hessen und Deutschland von 1961-2009	47
4.3.2	Naturräumlich differenzierte phänologische Entwicklung in Hessen von 1961-2009	57
4.4	Bivariate Statistik: Korrelation und Regression von Lufttemperaturen und Phasenbeginn	59
4.5	Regression Kriging: Flächenhafte Darstellung der vergangenen und zukünftigen phänologischen Entwicklung in Hessen	64
4.5.1	Phänologische Entwicklung 1961-2009	65
4.5.2	Zukünftige phänologische Entwicklung nach ECHAM5/CLM, A1B (BIAS-korrigiert)	67
		2

4.5.3	Zukünftige phänologische Entwicklung nach REMO/UBA, A1B (BIAS-korrigiert)	68
4.5.4	Zukünftige phänologische Entwicklung nach HADCM3/CLM, A1B (BIAS-korrigiert)	69
4.5.5	Zukünftige phänologische Entwicklung nach WETTREG 2010, A1B (Lauf_00 und Lauf_55)	70
4.5.6	Synopse	71
4.6	Projektion der Weinphasen	76
4.7	Multivariate Statistik	82
5	Diskussion	89
5.1	Phänologische Beobachtung	89
5.2	Diskussion der Ergebnisse	90
5.2.1	Bivariate Statistik	90
5.2.2	Regression Kriging	91
5.2.3	Multivariate Statistik	92
6	Ausblick / Forschungs- / Untersuchungsbedarf	93
7	Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan	95
	Literaturverzeichnis	96
	Anhang (CD)	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Phänologisches Beobachtungsnetz des DWD	21
Abb. 2a	Ausreißer und Extremwerte mit Angabe der jeweiligen Stationsnummer für den mittleren Beginn der Blüte der Sommerlinde (Phase 64) in Deutschland	23
Abb. 2b	Extremwerte mit Angabe der jeweiligen Stationsnummer für den mittleren Beginn der Blüte der Sommerlinde (Phase 64) in Deutschland	23
Abb. 3	Temperaturmessnetz des DWD	26
Abb. 4	Informationsgehalt phänologischer Daten	34
Abb. 5	Monats- und Jahresmittelwerte zum Lufttemperaturverlauf in Deutschland 1961-2009	38
Abb. 6a	Langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / ECHAM 5/CLM A1B, BIAS-korrigiert)	40
Abb. 6b	Langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / REMO/UBA A1B, BIAS-korrigiert)	40
Abb. 6c	Langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / HADCM3/CLM A1B, BIAS-korrigiert)	41
Abb. 6d	Langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / WETTREG 2010 A1B, Lauf 0)	41
Abb. 7	Differenzkarten der gemessenen langjährigen Jahrestemperaturmittel in Hessen und pro Naturraum	42
Abb. 8	Langjährige Jahresmitteltemperatur in Hessen 1961-2100 pro Klimamodell und DWD-Messung	43
Abb. 9	Variabilität der langjährigen mittleren Jahresdurchschnittstemperaturen in Hessen für die Zeiträume 1971-2000, 2031-2061 und 2071-2100 je Klimamodell	44
Abb. 10	Histogramme zum Blühbeginn der Hasel (Phase 1) in Deutschland und Hessen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2005 bzw. 2009	47
Abb. 11a	Phänologischer Kalender Deutschlands für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1991-2005	48
Abb. 11b	Phänologischer Kalender Hessens für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1991-2009	48
Abb. 12a	Phänologischer Kalender Hessens mit den langjährig gemittelten Eintrittsterminen von 34 Phasen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009	51
Abb. 12b	Phänologischer Kalender Deutschlands mit den langjährig gemittelten Eintrittsterminen von 34 Phasen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2005	52
Abb. 13	Verlaufdiagramm zum Blühbeginn der Hasel (Phase 1) in Deutschland und Hes-	53

sen zwischen 1961 und 2005 (bzw. 2009).

Abb. 14a	Phasenverschiebung in Hessen 1961-2009	54
Abb. 14b	Phasenverschiebung in Deutschland 1961-2005	55
Abb. 15a	Phänologische Uhr für Hessen 1961-1990, 1971-2000, 1991-2009	56
Abb. 15b	Phänologische Uhr für Deutschland 1961-1990, 1971-2000, 1991-2005	56
Abb. 16	Phänologische Uhren je Naturraumhauptgruppe (Meynen et al. 1953-1962) in Hessen	58
Abb. 17	Verlaufdiagramm für die Durchschnittstemperatur in den Monaten März bis Juni und den Beginn der Apfelblüte (Phase 62) in Hessen im Zeitraum 1961-2009	60
Abb. 18	Regressionsdiagramm zum Beginn der Apfelblüte (Phase 62) und den für die Monate März bis Juni gemittelten langjährigen Durchschnittstemperaturen im Zeitraum 1971-2000	64
Abb. 19	Differenzkarten für Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte) der Messzeiträume des langjährig gemittelten Phasenbeginns in Hessen und pro Naturraum	66
Abb. 20a	Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte): Mittlerer Phasenbeginn in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / ECHAM5/CLM A1B, BIAS-korrigiert)	67
Abb. 20b	Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte): Mittlerer Phasenbeginn in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / REMO/UBA A1B, BIAS-korrigiert)	68
Abb. 20c	Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte): Mittlerer Phasenbeginn in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / HADCM3/CLM A1B, BIAS-korrigiert)	69
Abb. 20d	Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte): Mittlerer Phasenbeginn in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / WETTREG 2010 A1B, Lauf 0)	70
Abb. 20e	Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte): Mittlerer Phasenbeginn in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / WETTREG 2010 A1B, Lauf 5)	71
Abb. 21a	Phase 1 – Hasel, Blühbeginn - Langjähriger Phasenbeginn in Hessen 1961-2100 pro Klimamodell und DWD-Messung	73
Abb. 21b	Phase 67 – Schwarzer Holunder, erste reife Früchte - Langjähriger Phasenbeginn in Hessen 1961-2100 pro Klimamodell und DWD-Messung	74
Abb. 22	Beginn der Weinblüte (Phase 172) an den drei ausgewählten Standorten in Hessen im langjährigen Mittel des Referenzzeitraums 1971-2000 und projiziert für den Zeitraum 2071-2100 gemäß HADCM3/CLM, BIAS-korrigiert	77
Abb. 23	Beginn der Weinblüte und Temperaturverlauf gemittelt für die Monate April bis Juni zwischen 1961 und 2009 sowie gemäß von vier Klimaprojektionen für die Zeiträume 2031-2060 und 2071-2100 am Beobachtungsstandort Unter-Hambach	78
Abb. 24	CART-Entscheidungsbaum Phase 68 (Roskastanie, erste reife Früchte) für den Zeitraum 1971-2000 in Hessen	83
Abb. 25	Häufigkeiten der Korrelationsstärken pro Zeitraum aus der bivariat-statistischen Analyse zwischen Lufttemperatur und Phasenbeginn für 31 Phänophasen	91

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Übersicht über Stationen in Deutschland und Hessen, die Extremwerte in Einzeljahren aufwiesen und daher zum Teil oder komplett aus der Datenbank gelöscht wurden	25
Tab. 2	Berücksichtigte Parameter der multivariat-statistischen Analyse	35
Tab. 3	Phasenauswahl zur Untersuchung der phänologischen Entwicklung in Hessen	46
Tab. 4	Langjährig gemittelte Phaseneintritte in Hessen (1961-1990, 1971-2000, 1991-2009) und deren Verschiebung zwischen 1961-1990 und 1991-2009 in Hessen und Deutschland	49
Tab. 5	Übersicht über die Korrelationskoeffizienten (r) zwischen Lufttemperatur und Phasenbeginn für die drei Klimaperioden 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009 in Hessen	62
Tab. 6a	Durchschnittliche beobachtete und projizierte Phaseneintritte in Hessen	72
Tab. 6b	Durchschnittliche Phasenverschiebungen in Hessen in der Vergangenheit und in der Zukunft	72
Tab. 7a	Beobachtete und projizierte Eintritte von Weinphasen an drei ausgewählten Standorten in Hessen	80
Tab. 7b	Verschiebung der Weinphaseneintritte zwischen dem Referenzzeitraum 1971-2000 und den projizierten Phaseneintritten in den Zeiträumen 2031-2060 und 2071-2100 an drei ausgewählten Standorten in Hessen	81
Tab. 8	Ergebnisse der CART-Analyse für sechs phänologische Phasen in Hessen im Zeitraum 1971-2000	85
Tab. 9	Ergebnisse der CART-Analyse für sieben phänologische Phasen in Deutschland im Zeitraum 1971-2000	86
Tab. 10	Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für sechs phänologische Phasen in Hessen im Zeitraum 1971-2000	87
Tab. 11	Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für sieben phänologische Phasen in Deutschland im Zeitraum 1971-2000	88

Anhang

- Anhang 1 Qualitätskontrolle: Ausreißer und Extremwerte (mit Angabe der Stationsnummer) der mittleren Phaseneintritte in Deutschland und Hessen in den Zeiträumen 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2005 bzw. 1991-2009
- Anhang 2 Deskriptive Statistik I: Histogramme pro Phänophase für Deutschland und Hessen der Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2005 bzw. 1991-2009
- Anhang 3 Deskriptive Statistik II: Kennwerte der 35 ausgewählten Phänophasen langfristig gemittelt über verschiedene Zeiträume für Deutschland und Hessen
- Anhang 4 Deskriptive Statistik III: Verlaufdiagramme zum Phasenbeginn zwischen 1961 und 2005/2009 in Deutschland und Hessen
- Anhang 5 Deskriptive Statistik IV: Verlaufdiagramme für die Jahresdurchschnittstemperatur und den Eintritt der Leit- und Ersatzphasen ausgewählter phänologischer Jahreszeiten zwischen 1961 und 2009 in Hessen
- Anhang 6 Bivariate Statistik I: Ergebnisse der einfachen linearen Regressionsanalyse zwischen langfristig gemittelten Daten zur Lufttemperatur und zum Phaseneintritt in Deutschland für 35 ausgewählte Phänophasen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2005
- Anhang 7 Bivariate Statistik II: Regressionsdiagramme zwischen den langjährigen Durchschnittstemperaturen ausgewählter Monate (Monatsreihen) und dem Phasenbeginn
- Anhang 8 Regression Kriging: Flächenhafte Darstellung der vergangenen und zukünftigen pflanzenphänologischen Entwicklung in Hessen
- Anhang 9 Projektion der Phänophasen: Langjährig gemittelter Beginn ausgewählter Phänophasen in Hessen zwischen 1961 und 2100 basierend auf DWD Messungen und vier Klimamodelldaten
- Anhang 10 Multivariate Statistik – CART-Analyse: Entscheidungsbäume ausgewählter Phänophasen für Hessen und Deutschland im Zeitraum 1971-2000

Zusammenfassung

Hintergrund. Der sich gegenwärtig vollziehende Klimawandel äußert sich insbesondere im Anstieg der Lufttemperaturen. Zwischen 1906 und 2005 stieg die globale Durchschnittstemperatur um 0,74 °C an. Für das Bundesland Hessen wurde im langjährigen Mittel zwischen der Klimanormalperiode 1961-1990 und dem Zeitraum 1991-2009 gar ein Temperaturanstieg von 0,9 °C gemessen. Dies entspricht auch dem Anstieg auf Bundesebene. Basierend auf den Daten verschiedener Klimamodelle und Emissions-szenarien ist mit einem weiteren Temperaturanstieg in Hessen von 9,1 °C im Zeitraum 1991-2009 auf bis zu 12 °C am Ende des 21. Jahrhunderts zu rechnen. Der Anstieg der Lufttemperatur hat Auswirkungen auf den Eintritt phänologischer Entwicklungsstadien von Pflanzen innerhalb des Jahresverlaufs. Die Pflanzenphänologie untersucht die verschiedenen, im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Wachstumserscheinungen und Entwicklungsvorgänge bei Pflanzen. Der Eintritt phänologischer Phasen wie Blühbeginn, Blattentfaltung oder Fruchtreife wird stark von der Lufttemperatur beeinflusst. Da wärmere Temperaturen das phänologische Geschehen beschleunigen, spiegeln sich in den phänologischen Daten die biologischen Reaktionen auf den Klimawandel wieder. Daher lassen sich phänologische Daten gut zum Klimabiomonitoring verwenden.

Ziele. Übergeordnetes Ziel des Projekts „Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen“ (HeKlimPh) war die landesweite und regional (naturräumlich) differenzierende Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Phänologie von Wild- und Kulturpflanzen. Folgende Teilziele wurden dafür bearbeitet: (0) Auswahl und statistische Beschreibung geeigneter phänologischer Phasen zur Analyse der Auswirkung des Klimawandels; (1) bivariat-statistische Auswertung von Phasenbeginn und Lufttemperatur; (2) flächenhafte Darstellung der bisherigen pflanzenphänologischen Entwicklung; (3) regionale Differenzierung der phänologischen Entwicklung; (4) multivariat-statistische Auswertung; (5) Projektion der zukünftigen phänologischen Entwicklung.

Material und Methoden. Für die Analyse und die flächenhafte Darstellung der vergangenen phänologischen Entwicklung wurden pflanzenphänologische Beobachtungsdaten sowie Messdaten zur Lufttemperatur des Deutschen Wetterdienstes (DWD) von 1961 bis 2009 (für ganz Deutschland bis 2005) verwendet. Das phänologische Beobachtungsnetz des DWD umfasst fast 6.500 Standorte (553 in Hessen). Beim phänologischen Monitoring werden über 270 verschiedene Phänophasen von Wild- und Kulturpflanzen (landwirtschaftliche Kulturpflanzen, Obst- und Weinphasen) beobachtet. Durchgeführt werden die Beobachtungen von ehrenamtlichen Beobachtern gemäß einheitlich definierter Richtlinien des DWD. Im HeKlimPh-Projekt wurden insgesamt 35 phänologische Pflanzenphasen ausgewertet. Dabei handelt es sich um Leit- und Ersatzphasen, die als Indikatoren für den Beginn der phänologischen Jahreszeiten verwendet werden, sowie – aufgrund ihrer wirtschaftlichen Bedeutung – um zusätzliche Obst- und Weinphasen. Zur Georeferenzierung der phänologischen Daten standen Koordinaten zu

den Beobachtungsstandorten zur Verfügung, aus denen im GIS Vektorkarten erzeugt wurden. Die Messdaten zu verschiedenen Klimaelementen wurden für den Zeitraum 1961-2009 in Form von Rasterdaten in einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km vom DWD zur Verfügung gestellt. Für die Projektion der zukünftigen phänologischen Entwicklung in den Zeiträumen 2031-2060 und 2071-2100 wurden Daten von vier statistischen bzw. dynamischen regionalen Klimamodellen (REMO/UBA, ECHAM5/COSMO-CLM, HADCM3/COSMO-CLM, WETTREG 2010) verwendet. Zusätzlich zu den Klimamessdaten des DWD wurden für die multivariat-statistische Auswertung Höhendaten sowie Bodendaten der hessischen BFD 50 verwendet.

Nach Qualitäts- und Plausibilitätsprüfungen wurden die phänologischen Daten zur Analyse der vergangenen phänologischen Entwicklung deskriptiv-statistisch ausgewertet. Anschließend wurden die statistischen Beziehungen zwischen Lufttemperatur und betrachteter Phänophase für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009 mit einer linearen Regressionsanalyse ermittelt. Um belastbarere Ergebnisse zu erzielen, basierte die bivariat-statistische Analyse auf deutschlandweiten Daten. Dazu wurden die phänologischen Punktdaten mit den Temperaturresterkarten in einem GIS verschnitten, so dass für jeden phänologischen Beobachtungsstandort ein Temperaturwert abgegriffen werden konnte. Die Regressionsanalyse wurde für langjährig gemittelte Jahres- und Monatsdurchschnittstemperaturen sowie zusammenfassend für diejenigen Monate durchgeführt, für die eine starke Korrelation zwischen der Lufttemperatur und dem jeweiligen Phaseneintritt ermittelt wurde. Dementsprechend wurden pro Zeitraum für jede Phänophase individuelle Monatsreihen gebildet, für die wiederum die langjährigen Temperaturmittel gebildet wurden.

Für solche Phasen, die eine signifikante und zumindest mittelstarke Korrelation ($0,5 \geq r \geq 0,69$) mit den Durchschnittstemperaturen der gemittelten Monatsreihen aufwiesen, wurden pro Zeitraum (Vergangenheit und Zukunft) mittels Regression Kriging phänologische Flächenkarten in einem GIS berechnet. Dazu wurde die pro Phase und Zeitraum ermittelte Regressionsgleichung auf die jeweilige Rasterkarte zu den langjährig gemittelten Temperaturen der Monatsreihen angewandt. Zur Projektion der zukünftigen phänologischen Entwicklung wurde die Regressionsgleichung des Referenzzeitraums 1971-2000 der jeweiligen Phase auf die Temperaturresterdaten der vier Klimamodelle angewandt. Über eine Verschneidung mit einer Karte der Naturraumhaupteinheiten nach Meynen et al. (1953-1962) erfolgte zusätzlich sowohl für die vergangene als auch für die zukünftige phänologische Entwicklung eine regional differenzierende Auswertung. Drei Weinphasen wurden separat ausgewertet, da für diese Phasen keine flächendeckenden Daten vorlagen. Die Analyse erfolgte hier für jeden Beobachtungsstandort einzeln.

Diejenigen Phasen, die nur eine schwache Korrelation zur Lufttemperatur aufwiesen, wurden mit zwei multivariat-statistischen Methoden ausgewertet: 1) CART-Analyse (Entscheidungsbaumverfahren); 2) multiple lineare Regressionsanalyse. Neben den Lufttemperaturdaten wurden noch weitere Parameter

in die multivariate Analyse einbezogen (u. a. Niederschlag, orografische Höhe und verschiedene Bodenkennwerte), um diejenigen Faktoren zu ermitteln, die neben der Lufttemperatur den Eintritt phänologischer Phasen beeinflusst haben. Mittels CART kann die statistische Beziehung zwischen einer interessierenden Variable (Zielvariable – hier: Phänologie) und mehreren beschreibenden Variablen (s.o.) analysiert werden. CART beruht auf der schrittweisen Segmentierung eines gegebenen Ausgangsdatensatzes durch eine Folge binärer Unterteilungen (splits). Dabei wird der Ausgangsdatensatz in je zwei Tochterklassen (Knoten) aufgeteilt und ggf. weiter aufgegliedert. Auf diese Art werden Dendrogramme berechnet, deren Verzweigungsgrad durch anwenderspezifische Voreinstellungen definiert wird. Die multiple lineare Regressionsanalyse betrachtet ebenfalls die Beziehung zwischen einer abhängigen Variable (Phasenbeginn) und mehreren unabhängigen Prädiktoren. Dabei werden nur solche Prädiktoren im Regressionsmodell berücksichtigt, die eine signifikante partielle Korrelation zur abhängigen Variable aufweisen. Die daraus ermittelte Regressionsgleichung kann zur Schätzung der abhängigen Variablen verwendet werden.

Ergebnisse. 31 der 35 untersuchten Phasen zeigten eine Verfrühung ihres Eintritts zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2009. Dabei waren im Durchschnitt aller untersuchten Phasen die Verfrühungen auf Landesebene stärker ausgeprägt (ca. 8 Tage) als im bundesweiten Mittel (ca. 6 Tage). Bei vielen Phasen, insbesondere in Hessen, wurde eine Verfrühung von mehr als 10 Tagen festgestellt. Die stärksten Verfrühungen wurden für Phasen im Frühling und Frühsommer ermittelt. Für den weiteren Jahresverlauf – insbesondere Spätsommer und Herbst – wurden geringere Verfrühungen festgestellt. Am Ende des phänologischen Jahres im Spätherbst bzw. im Winter wiesen sogar einige Phasen Verspätungen auf. Aus dieser Entwicklung ergab sich eine Verlängerung der Vegetationsperiode, die in einigen Naturräumen über 10 Tage, teilweise gar über zwei Wochen betrug.

Die bivariat-statistische Analyse ergab für alle drei betrachteten Zeiträume mittelstarke Korrelationen ($0,5 \geq r \geq 0,69$) für über 70 % der untersuchten Phasen. Mehr als 50 % der Phasen zeigten gar eine hohe ($0,7 \geq r \geq 0,89$) Korrelation. Die Ergebnisse der Analyse gingen einher mit den bereits oben beschriebenen Erkenntnissen zur vergangenen phänologischen Entwicklung: Nahezu sämtliche Phasen, bei denen eine Verfrühung ihres Eintritts festgestellt wurde, weisen hohe bis sehr hohe negative Korrelationskoeffizienten auf. Dies bestätigt die Annahme, dass die Lufttemperatur einen signifikanten Einfluss auf die phänologische Entwicklung hat. Dagegen weisen im weiteren Jahresverlauf Phasen mit geringer ausgeprägten Verfrühungen (insbesondere im Herbst) schwächere Korrelationen auf. Bei zwei der Phasen, für die eine Verspätung ihres Eintritts festgestellt wurde (Blattentfaltung und Blattfall der Stiel-Eiche), wurden positive Korrelationen ermittelt. Hohe Temperaturen scheinen ab dem Spätherbst einen entgegen gesetzten Effekt auf die Pflanzenphänologie zu haben: Während sie den Phaseneintritt im Frühling und im Sommer fördern, zögern sie ihn im Spätherbst und Winter hinaus.

Basierend auf den Ergebnissen der Regressionsanalyse wurden für 23 der 35 untersuchten Phasen Flächenkarten mittels Regression Kriging erzeugt. Im Falle der Haselblüte zeigte sich eine Verfrühung ihres Eintritts von 12 Tagen zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2009 (14 Tage laut DWD-Beobachtungen). Wie zu erwarten, spiegelt sich die Topographie in den Flächenkarten wider: So waren tiefer gelegene und somit eher wärmere Regionen durch eine frühe Haselblüte gekennzeichnet, während höher gelegene Regionen eher späte Phaseneintritte aufwiesen. Diese Feststellung geht einher mit der naturräumlich differenzierten Analyse: Im Nördlichen Oberrhein-Tiefland beispielsweise trat die Haselblüte über drei Wochen früher ein (10. Februar) als im Ostthessischen Bergland (5. März). Nicht die absolut höchsten Werte, aber die stärksten Verfrühungen (Differenzen zwischen dem Phasenbeginn in der Klimanormalperiode 1961-1990 und dem Zeitraum 1991-2009) hingegen wurden überwiegend in den Mittelgebirgslagen festgestellt, während die Verfrühungen in tiefer gelegenen Regionen geringer ausgeprägt waren.

Im Vergleich des Referenzzeitraums 1971-2000 mit dem zukünftigen Zeitraum 2071-2100 ist je nach Klimamodell mit einer Verfrühung der Haselblüte im landesweiten Mittel zwischen 25 und 34 Tagen zu rechnen. Bei der Betrachtung der Verschiebungen der übrigen 22 projizierten Phasen scheint sich die für die Vergangenheit festgestellte Tendenz der phänologischen Entwicklung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts fortsetzen. So sind sämtliche Differenzen zwischen den langjährig gemittelten Phaseneintritten der Klimanormalperiode 1961-1990 und dem zukünftigen Zeitraum 2071-2100 negativ. Mit wenigen Ausnahmen sind die Verfrühungen dabei häufig doppelt so stark ausgeprägt wie zwischen den Zeiträumen 1991-2009 und 1961-1990, bei vielen Phasen sogar noch stärker.

Die Analyse der Weinphasen ergab für drei Beobachtungsstandorte in Südhessen ähnliche Ergebnisse. Demnach ist, je nach Lage des Standortes und Klimamodell, im langjährigen Mittel mit einer Verfrühung der Weinblüte zwischen den Zeiträumen 1971-2000 und 2071-2100 von zwei bis drei Wochen zu rechnen, während die Weinlese sogar zwischen 19 und 41 Tage früher stattfinden würde.

Für diejenigen Phasen, bei denen die multivariat-statistischen Analysemethoden angewandt wurden, konnten im Vergleich zur bivariat-statistischen Analyse bezüglich der jeweils erzielten Stärke des Bestimmtheitsmaßes immerhin stabilere statistische Modelle ermittelt werden. Die CART-Analyse ergab, dass neben der Lufttemperatur und Parametern, die die Lufttemperatur beeinflussen (z.B. Globalstrahlung, Orografie), insbesondere die Bodenart auf die Pflanzenphänologie einwirkt. Des Weiteren scheinen insbesondere die Tiefsttemperaturen im Zeitraum um den Phasenbeginn den Eintritt der Herbstphasen zu beeinflussen. Die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse ergaben ebenfalls deutliche Zusammenhänge zur Lufttemperatur sowie zur orografischen Höhe. Es wurden jedoch keine signifikanten Korrelationen zu Bodenkennwerten festgestellt.

Diskussion. Bei der bivariat-statistischen Analyse zeigte sich, dass die Verwendung von Durchschnittstemperaturen von für jede Phase individuell festgelegten Monatsreihen anstelle von Jahresdurchschnittstemperaturen bessere Regressionsmodelle mit einem höheren Anteil an erklärter Varianz lieferte. Dadurch konnte eine höhere Qualität der phänologischen Flächenkarten erzielt werden. Darüber hinaus wurden verschiedene statistische Kennwerte berechnet, die Aussagen über die Qualität der Flächenkarten zulassen. Die gemittelten Fehlerquadratsummen (RMSE) lagen für alle Flächenkarten zwischen 0,08 und 1,5.

Für die vier im Rahmen des HeKlimPh-Projekts verwendeten Klimamodellen wurden unterschiedliche Implikationen festgestellt: Während zwei Modelle eher moderate Phasenverschiebungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts lieferten (ECHAM5/CLM, REMO/UBA), wurden basierend auf den anderen beiden Modellen (HADCM3/CLM, WETTREG 2010) stärkere Verschiebungen prognostiziert.

Bei den multivariat-statistischen Analysen konnten nicht alle potenziell in Frage kommenden Einflussgrößen in der Analyse berücksichtigt werden, da entsprechende Daten nicht zur Verfügung standen. Ferner standen Bodendaten in einer ausreichenden räumlichen Auflösung lediglich auf Landesebene zur Verfügung, nicht jedoch auf Bundesebene. Die Durchführung der multivariat-statistischen Analyse auf Bundesebene war jedoch notwendig, da auf Landesebene keine ausreichend hohe Anzahl an Beobachtungsstandorten gegeben war, auf Basis derer statistisch valide Ergebnisse hätten erzielt werden können. Eine Empfehlung für das phänologische Monitoring ist die Erhebung von standardisierten Metadaten. Der Informationsgehalt der phänologischen Daten würde sich dadurch deutlich erhöhen.

Ausblick: Die Verschiebung der Eintrittsdaten phänologischer Phasen steht in einem statistisch signifikanten Zusammenhang zum im Zuge des Klimawandels erfolgten Temperaturanstieg. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist mit einer weiteren Erwärmung zu rechnen. Dies könnte Auswirkungen auf die Verbreitung von Pflanzenarten haben. So muss mit der Einwanderung gebietsfremder Arten gerechnet werden, wodurch einheimische Arten verdrängt werden würden. Daher spielen pflanzenphänologische Beobachtungen auch für den Naturschutz eine wichtige Rolle. Basierend auf phänologischen Flächenkarten könnten geeignete Anpassungsstrategien geplant und umgesetzt werden. In der Landwirtschaft muss die Sortenwahl den veränderten Klimabedingungen angepasst werden. Zudem könnte es aufgrund des wärmeren Klimas zu einem vermehrten Auftreten von Pflanzenschädlingen kommen. Darüber hinaus wird sich aufgrund des früheren Eintretens vieler phänologischer Phasen insbesondere beim Obst- und Weinbau im Frühjahr das Risiko durch Frostschäden erhöhen. In den Sommermonaten wird für Hessen von einer Abnahme der Niederschläge ausgegangen, so dass eine intensivere Bewässerung notwendig wäre. Durch den Klimawandel ergeben sich aber auch Chancen: Die Verlängerung der Vegetationsperiode könnte zu höheren Ernteerträgen führen und der Anbau neuer Fruchtsorten wäre möglich.

Abstract

Background. One of the main characteristics of climate change is the rise of air temperatures. According to the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), the global mean air temperature increased by 0.74 °C between 1906 and 2005. In the federal state of Hesse in central Germany, the long-term mean air temperature of the period 1991-2009 was 0.9 °C higher compared to the climate reference period 1961-1990. The same holds true for entire Germany. With regard to different climate projections and emission scenarios, a further rise of the mean air temperatures in Hesse of up to 3 °C till the end of the 21st century has to be expected. The projected warming has a significant impact on the beginning of the phenological stages of plants over the year. Plant phenology examines different annually and periodically reappearing events in growth and development of plants. The beginning of phenological phases, such as blooming or foliation, is closely related to air temperatures. Since warm temperatures advance the course of phenological events, phenological data reflect biological response to climate change. Hence, phenological data can be used for climate biomonitoring.

Goals. The main goal of the project “Climate Change and Plant Phenology in Hesse” (HeKlimPh) was to analyse and to project the state-wide and regionally differentiated impact of climate change on the phenology of wild growing and crop plants. To achieve this goal the analysis was conducted by processing the following steps: (0) Selection and statistical description of appropriate phenological phases; (1) bivariate statistical analysis on the association between phenological onset and air temperatures; (2) GIS-based mapping of the past phenological development; (3) regional differentiated analysis of the phenological development; (4) multivariate statistical analysis on the effect of additional environmental drivers for phenological development; (5) projection of the future phenological development.

Material and Methods. For analysing and mapping the past phenological development, observations on plant phenology as well as air temperature measurements collected by the German Weather Survey (Deutscher Wetterdienst, DWD) from 1961 to 2009 were used. The German phenological monitoring network comprises almost 6,500 sites (553 in Hesse) observing more than 270 different phenological phases of wild growing plants and crop plants. The phenological observations are conducted by volunteers in accordance with standardized guidelines of the DWD. For the analysis of phenological shift, 35 phases were selected and analysed in course of the HeKlimPh project, comprising indicator phases for different phenological seasons and respective alternative phases. Additional phases described development of fruits and vine plants representing high economic importance for fruit growers. For georeferencing the phenological observation sites, coordinates were provided by the DWD enabling the creation of according GIS vector data (point layer). GIS data on several climate elements were provided as grid data sets with a spatial resolution of 1 x 1 km². For the projection of the future phenological develop-

ment (climate periods 2031-2060, 2071-2100), data of four different statistical and dynamic regional climate models (REMO/UBA, ECHAM5/COSMO-CLM, HADCM3/COSMO-CLM, WETTREG 2010) were processed. In addition, elevation data as well as soil data were used for the multivariate-statistical analyses.

Following quality and plausibility checks, the phenological observations were analysed by descriptive statistics to detect trends in the past phenological development. Subsequently, the statistical associations between air temperatures and phenological onset were calculated for each of the 35 phenological phases for the periods 1961-1990, 1971-2000 and 1991-2009 by bivariate linear regression analysis. To enhance the reliability of results, the computations were performed for whole Germany. To accomplish this task, phenological point data and temperature grids were intersected in a GIS to derive an air temperature value for each phenological observation. The regression analysis based on annual and monthly long-term mean air temperature as well as on average temperatures of those months showing the strongest correlation between air temperature and the respective phenological onset. For those phases showing a significant and at least medium correlation ($0.5 \geq r \geq 0.69$), phenological maps for each period (past and future) were calculated in a GIS by Regression Kriging. The regression equation derived for each phase and period was thereby applied to the long-term mean temperature grids of each according period to get a surface map on the onset of the respective phenological phase. Future phenological development was calculated by applying the regression equations derived for the reference period 1971-2000 by use of air temperature maps for each of the four climate models. Additionally, past and future phenological development was spatially differentiated by intersection with a map on the natural land units of Hesse. The vine-phases were analysed only for single observation sites, since the small number of observations sites did not allow for state-wide analyses.

Those phases showing low correlations ($0.2 \geq r \geq 0.49$) with air temperatures were analysed by two different multivariate statistical approaches: 1) CART-Analysis (Classification and Regression Trees); 2) multiple linear regression analysis. In addition to temperature data, several other environmental drivers were considered (e.g. precipitation, orography, soil conditions) to statistically quantify their influence on the onset of phenological phases. CART analyses the statistical association between a target variable (here: phenological onset) and several predictors as mentioned above. CART divides the input data stepwise by binary splits into two child-nodes until a given homogeneity is met. The resulting dendrograms can be used to detect those predictors that determine rather early or rather late onsets. The multiple linear regression analysis considers the correlation between one dependent variable (phenological onset) and several independent variables like those mentioned above. Thereby, only those predictors showing a significant high partial correlation with the dependent variable are integrated to the regression model. Eventually, the resulting regression equation can be used for estimating the depended variable.

Results. Almost all examined phases (31 of 35 phases) showed a shift in phenological onset to the beginning of the year between the periods 1961-1990 and 1991-2009. In average of all 35 phases, shifts in Hesse were even stronger (about 8 days) than in Germany (about 6 days). Many phases even showed a shift of more than 10 days. The strongest shifts were detected for phases in spring and early summer. In the further course of the year, some phases – especially in late summer and autumn – showed weaker shifts. At the end of the phenological year in late autumn and winter, some phases even showed a reverse shift towards the end of the year. As a result, there was a prolongation of the vegetation period, which amounted up to 10 days in some natural land units in Hesse. Some land units even showed prolongations of almost three weeks.

The bivariate statistical analysis revealed statistical associations of at least medium strength ($0.5 \geq r \geq 0.69$) for more than 70 % of the analysed phases in each of the three considered periods in the past. More than 50 % even showed a high correlation ($0.7 \geq r \geq 0.89$) between air temperatures and phenological onset. The result of the analysis corresponds with the findings for the past phenological development described above: Almost all phases for which earlier beginnings were figured out showed high negative correlation coefficients. These findings corroborate, spatially differentiated, the hypothesis that air temperature is a significant driver for phenological development. However, phases with less intense shifts in the further course of the year showed only weak correlation coefficients, especially in autumn. Eventually, for two of those phases showing shifts towards the end of the year (colouring of leaves and leaf fall of the penduculate oak) positive weak correlation coefficients were calculated. This implies that high temperatures in autumn have reverse effects on these phases: Whereas high temperatures stimulate the beginning of spring and summer phases, they retard the onset of late autumn and winter phases.

Based on the results of the regression analysis, Regression Kriging was applied to 23 of the 35 investigated phases. For instance, hazel bloom (*Corylus avellana*) in Hesse began 12 days earlier in the period 1991-2009 compared to the period 1961-1990. As could be expected, topographical patterns were reflected in the phenological maps: Lower regions indicating rather warm temperatures are characterized by early hazel bloom. In comparison, mountainous regions show late phase beginnings. These observations coincide with the regionally differentiated analysis based on the respective natural land units: For instance, in the *Northern Upper Rhine Valley* hazel bloom in average occurred more than three weeks earlier (February 10th) than in the *Eastern Hessian Highlands* (March 5th). In summary, most mountainous regions in Hesse were affected by stronger shifts of hazel bloom (not the absolute values, but the differences between phase onset of the periods 1961-1990 and 1991-2009) whereas the river valleys in the south of Hesse were affected more moderate.

Depending on the applied climate model, the long-term mean shifts of hazel bloom in Hesse range between 25 and 34 days comparing the periods 1971-2000 and 2071-2100. Regarding the shifts of the respective phase onsets for all 23 phases projected by the four climate models between the respective long-term means of the period 1961-1990 and the future period 2071-2100, the observed tendency of the past phenological development will obviously continue until the end of the 21st century. With only few exceptions, for all four models shifts of the assessed phases between the periods 2071-2100 and 1961-1990 were at least twice as high as they were between 1991-2009 and 1961-1990. For many phases, they were even three times higher or more.

For the examined vine phases, similar results were detected for three considered observation sites in the south of Hesse. Thus, depending on location and climate model, vine flowering might occur between two and three weeks earlier comparing the long-term mean onset of the periods 1971-2000 and 2071-2100, whereas vintage is expected to take place between 19 and 41 days earlier.

With regard to the calculated R^2 -values, models with more statistical power were determined by applying multivariate statistical analyses compared to the results of the bivariate statistical analysis. The results of the CART-Analysis revealed, that, besides air temperature and related variables (e.g. global radiation, orography), soil condition seem to influence plant phenological events in a certain way. Referring to air temperature, especially minimum temperatures seem to force certain onsets for autumn phases. The results of the multiple linear regression analysis showed distinct correlations between air temperature and air temperature related variables only, no significant correlations to soil parameters were detected.

Discussion. For analysing the regional differences of the plant phenological development of the different natural land units in Hesse, the use of the estimated phenological surface maps was essential, especially for those natural land units with small spatial extents. Regarding only phenological data of observation sites might lead to invalid results, as some natural land units contain just few observation sites which are not representative for the whole land unit.

Referring to the bivariate statistical analysis, the applied approach of using air temperature data of only those months that showed strong correlation between air temperature and phase onset instead of using annual mean air temperature data led to more powerful regression models indicated by higher correlation coefficients. Furthermore, several statistical values (e.g. root mean square error, RMSE) were calculated to describe the quality of the surface maps. Considering all calculated maps, RMSE ranged only between 0.08 and 1.5 days.

The four climate models used for projecting the future phase onsets showed different characteristics. As two of them projected rather moderate shifts until the end of the 21st century (ECHAM5/CLM, REMO/UBA), the two others (HADCM3/CLM, WETTREG 2010) projected stronger shifts.

The multivariate statistical analyses suffered from a lack of predictors since not all environmental drivers that potentially influence the onset of phenological phases were available. Moreover, soil data with an appropriate spatial resolution were only available for Hesse, but not for whole Germany. Admittedly, application of the multivariate statistical analyses on a national scale was necessary, as the amount of observation sites in Hesse was not high enough to achieve statistical valid results. An important recommendation for the phenological monitoring is the acquisition of standardized metadata within the network, as it would promote the interpretation of phenological data.

Outlook. The observed shift in phenological development was particularly determined by climate change. Since temperature increase is expected to continue until the end of the 21st century, distinct effects on flora distribution like species migration and disappearance are very likely. By help of the phenological maps created in the course of the HeKlimPh project, appropriate adaption strategies may be implemented. In terms of agricultural management, the selection of crops and cultivars must be adjusted to the changed climatic conditions. Furthermore, farmers have to envisage increased problems related to pest control aggravated by progressing temperature increase. Another threat is the increasing risk of frost damages due to the earlier occurrence of phenological events. Referring to resources management, irrigation during summer will be necessary for larger areas and longer periods as precipitation is expected to decrease in Hesse during the vegetation period. On the other hand, there are also positive effects of climate change: the prolongation of the growing season might lead to higher yields, and cultivation of new fruit varieties might not only necessary but possible.

1 Hintergrund

Ausmaß und Geschwindigkeit des aktuellen Klimawandels übersteigen die natürliche Variation der Lufttemperatur der letzten tausend Jahre. Die globale Durchschnittstemperatur der erdnahen Atmosphäre hat sich zwischen 1906 und 2005 um $0,74\text{ °C}$ ($\pm 0,18\text{ °C}$) erhöht. Europaweit wurde in den letzten 100 Jahren eine durchschnittliche Erwärmung um $0,95\text{ °C}$ festgestellt (IPCC 2007). Zudem war in den letzten Jahrzehnten neben dem absoluten Temperaturanstieg auch eine Zunahme der Temperaturvariabilität zu beobachten (Schär et al. 2004, Xoplaki et al. 2005). In Deutschland nahm die Lufttemperatur in den Jahren von 1991 bis 2009 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 durchschnittlich um $0,9\text{ °C}$ zu. Dieser bundesweit gemittelte Temperaturanstieg variierte seit 1991 räumlich beträchtlich: Er betrug regional bis zu $+3,5\text{ °C}$ (Englert et al. 2007, Schröder et al. 2010, Zebisch et al. 2005). In Hessen wurde von 1951 bis 2000 eine Erwärmung um durchschnittlich $+0,9\text{ °C}$ beobachtet, wobei die stärkste Erwärmung für die Wintermonate ($+1,6\text{ °C}$), der niedrigste für den Herbst ($+0,2\text{ °C}$) zu verzeichnen war. Für den Messzeitraum 1826 bis 2004 ergab sich für das Stadtgebiet Frankfurt/M. gar ein Temperaturanstieg von $+1,8\text{ °C}$ (HLUG 2005). Wie hoch die laut verschiedener Klimaprojektionen für die Zukunft erwartete Temperaturzunahme ausfällt, hängt von Annahmen über Indikatoren wie Bevölkerungsentwicklung oder Wirtschaftswachstum ab (EEA 2008). Hiermit verknüpft werden globale Emissionsszenarien (Nakicenovic et al. 2000) klimarelevanter Gase wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und weiteren, auf die zusammen 90 % der Erderwärmung zurückgeführt werden. In höheren Breiten – insbesondere den nördlichen – wird die Temperatur voraussichtlich stärker steigen als in Äquatornähe. Je nach Szenario nimmt die Temperatur in Deutschland bis zum Ende des Jahrhunderts $2,5$ bis $3,5\text{ °C}$ (REMO), nach den Rechnungen des CLM-Modells sogar bis $4,5\text{ °C}$ zu (Jacob et al. 2008). Klimaprojektionen, die auf Basis des *ECHAM4-OPYC3*-Modells (Szenario B2, moderate Zunahme von Treibhausgasemissionen) bis in das Jahr 2100 durchgeführt wurden (Enke 2003, 2004), sagen für Hessen bis 2100 einen weiteren Temperaturanstieg von $+2,7\text{ °C}$ (von $8,9\text{ °C}$ auf $11,6\text{ °C}$) bezogen auf die Vergleichsperiode 1981-2000 voraus. Die Tagesmitteltemperatur im Winter würde demnach bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um $3,9\text{ °C}$ ansteigen. Auch für den Sommer werden deutlich wärmere Temperaturen ($+2,9\text{ °C}$) vorhergesagt, wohingegen für den Herbst ($+2,3\text{ °C}$) bzw. das Frühjahr ($+1,2\text{ °C}$) nur eine leichte Erwärmung prognostiziert wird (Fahl et al. 2005). Auch die Anzahl sehr kalter ($T_{\min} < 0\text{ °C}$) Tage sowie von Sommertagen ($T_{\max} > 25\text{ °C}$) und sehr heißen Tagen ($T_{\max} > 30\text{ °C}$) soll sich deutlich ändern: Während sich die Anzahl an Eis-, bzw. Frosttagen stark verringern würde, nähmen die heißen Tage zu.

Eine derartige Veränderung des Klimas wirkt sich auch auf die Phänologie von Pflanzen aus, da diese stark von der Lufttemperatur abhängig ist. Die Pflanzenphänologie untersucht die verschiedenen, im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Wachstumserscheinungen und Entwicklungsvorgänge bei

Pflanzen (Kreeb 1990, Rosenkranz 1951, Seyfert 1960, Schnelle 1955), wie z.B. Öffnung der Knospen, Beginn der Blüte, Fruchtreife oder Blattverfärbung (Schnelle 1955). Dabei wird der Zeitpunkt des Eintritts der jeweiligen Entwicklungen sowie deren Abhängigkeit von klimatischen Gegebenheiten, insbesondere von den Temperaturbedingungen sowie den Bodenverhältnissen festgestellt und untersucht (Rosenkranz 1951, Schnelle 1955), um Gesetzmäßigkeiten im periodischen Wachstumsablauf festzustellen. Die Beobachtung der Phänologie an verschiedenen Standorten und Regionen über mehrere aufeinanderfolgende Jahre ermöglicht es, Abhängigkeiten des periodischen Wachstumsablaufs von den Umweltbedingungen zu untersuchen (Schnelle 1955). Die Pflanzenphänologie lässt sich daher zum Klima-Biomonitoring nutzen (Gebhardt et al. 2010, Rammert 2004).

2 Projektziele

Vor dem geschilderten Hintergrund erfolgte in dem Projekt „Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen“ (HeKlimPh) eine landesweite und naturräumlich differenzierende Untersuchung der durch den Klimawandel verursachten Änderungen der Phänologie von Wild- und Kulturpflanzen. Die Untersuchungen basierten auf Klimamessungen und phänologischen Beobachtungen des Deutschen Wetterdiensts (DWD) sowie auf Daten verschiedener Klimaprojektionen für die Zeiträume 2031-2060 und 2071-2100. Im Einzelnen wurden folgende Teilziele (TZ) bearbeitet:

TZ 0 Auswahl und statistische Beschreibung geeigneter phänologischer Phasen

Zunächst mussten die phänologischen und klimatologischen Daten für deren weitere Verwendung geprüft und aufbereitet werden. Anschließend wurden anhand definierter Kriterien geeignete phänologische Pflanzenphasen („Phänophasen“) für eine zeitlich und räumlich differenzierte Analyse ausgewählt und mittels deskriptiver Statistiken beschrieben.

TZ 1 Bivariat-statistische Auswertung

Auf Basis der vom DWD zur Verfügung gestellten Beobachtungsdaten zur Pflanzenphänologie (deutschlandweit rd. 6.400 Beobachtungsstandorte, 270 Pflanzenphasen) sowie zur gemessenen (ca. 680 Messstationen in Deutschland) und prognostizierten (regionale Klimamodelle) Lufttemperatur wurde mit Regressionsmodellen die Stärke und Signifikanz des Zusammenhangs zwischen Lufttemperatur und Phasenbeginn der unter TZ 0 ausgewählten Phänophasen ermittelt.

TZ 2 Flächenhafte Darstellung der bisherigen pflanzenphänologischen Entwicklung

Die Ergebnisse der bivariat-statistischen Auswertung wurden dazu verwendet, die bisherige Entwicklung der Phaseneintrittstermine flächenhaft für ganz Hessen darzustellen.

TZ 3 Regionale Differenzierung der phänologischen Entwicklung

Durch Verschneidung der Flächenkarten mit der Karte der Naturraumhaupteinheiten (Meynen et al. 1953-1962) erfolgte eine naturräumlich differenzierte Analyse der pflanzenphänologischen Entwicklung in Hessen.

TZ 4 Multivariat-statistische Auswertung

Für solche Phasen, für die in TZ 1 keine hinreichende bivariat-statistische Beziehung zur Lufttemperatur ermittelt werden konnte – insbesondere die Herbstphasen – wurden multivariat-statistische Entscheidungsbaumverfahren eingesetzt, um statistisch zu überprüfen, ob neben den thermischen Bedingungen noch weitere klimatologische sowie pedologische Standortmerkmale die Pflanzenentwicklung beeinflussen haben.

TZ 5 Zukünftige phänologische Entwicklung

Die in TZ 1-4 abgeleiteten und statistisch abgesicherten Beziehungen wurden verwendet, um die zukünftige Entwicklung der Pflanzenphänologie in Hessen zu prognostizieren. Anhand der Regressionsmodelle sowie mit den aus den Entscheidungsbaumanalysen ermittelten Zusammenhängen wurden die möglichen zukünftigen pflanzenphänologischen Trends geschätzt. Hierzu wurden die im Forschungsverbund ausgewählten Klimamodelle (ECHAM5/CLM, REMO/UBA, HADCM3/CLM und WETTREG 2010) für das Klimaszenario A1B mit den statistischen Modellen zur Pflanzenphänologie gekoppelt und zu landesweiten Karten der phänologischen Entwicklung ausgewählter Pflanzenphasen verrechnet.

3 Material und Methoden

3.1 Datengrundlagen

3.1.1 Phänologische Beobachtung

Die im Rahmen von HeKlimPh verwendeten phänologischen Daten stammen aus dem phänologischen Beobachtungsnetz des DWD. Seit dem Jahr 1951 wurden flächendeckend Daten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland gesammelt. Die Datenerhebung erfolgt durch ehrenamtliche phänologischer Beobachter, die das Beobachtungsgebiet in eine großmaßstäbliche Karte einzeichnen und die Standorte der darin beobachteten Pflanzen möglichst präzise angeben, damit die Beobachtungen später auch von Nachfolgern kontinuierlich fortgesetzt werden können. Die Beobachtungsgebiete erstrecken sich in einem Radius von maximal fünf Kilometern um eine beim DWD archivierte Stations-Koordinate. Die phänologischen Beobachter begehen zwei bis dreimal pro Woche ihr Gebiet und tragen ihre Phasenbeobachtungen gemäß einer Beobachtungsrichtlinie des DWD (1991) in entsprechende Formulare ein. Insgesamt umfasst das phänologische Beobachtungsnetz des DWD 6.492 Stationen (Abb. 1). Im Oktober 2012 wurden an ca. 1.250 Stationen pflanzenphänologische Beobachtungen

durchgeführt.¹ Im Zeitraum von 1961 bis 2009 wurden vom DWD insgesamt 270 phänologische Phasen von Wildpflanzen, landwirtschaftlichen Pflanzen und Obstpflanzen registriert. Zwischen den Jahren 1961 und 2005 wurden insgesamt 12.060.853 Einzelbeobachtungen aus dem deutschen phänologischen Beobachtungsnetz gemeldet und lagen dem Forschungsnehmer zur Auswertung vor. Für Hessen wurden zusätzlich Daten für den Zeitraum 2006-2009 vom DWD zur Verfügung gestellt, für ganz Deutschland waren Daten für diesen Zeitraum nicht verfügbar. Nach vorausgehender Prüfung der verfügbaren phänologischen Daten (s. u.) wurden jeweils für Deutschland und Hessen separate Datensätze für jede Phänophase erstellt und statistisch untersucht sowie im GIS weiterverarbeitet (Kap. 3.2).

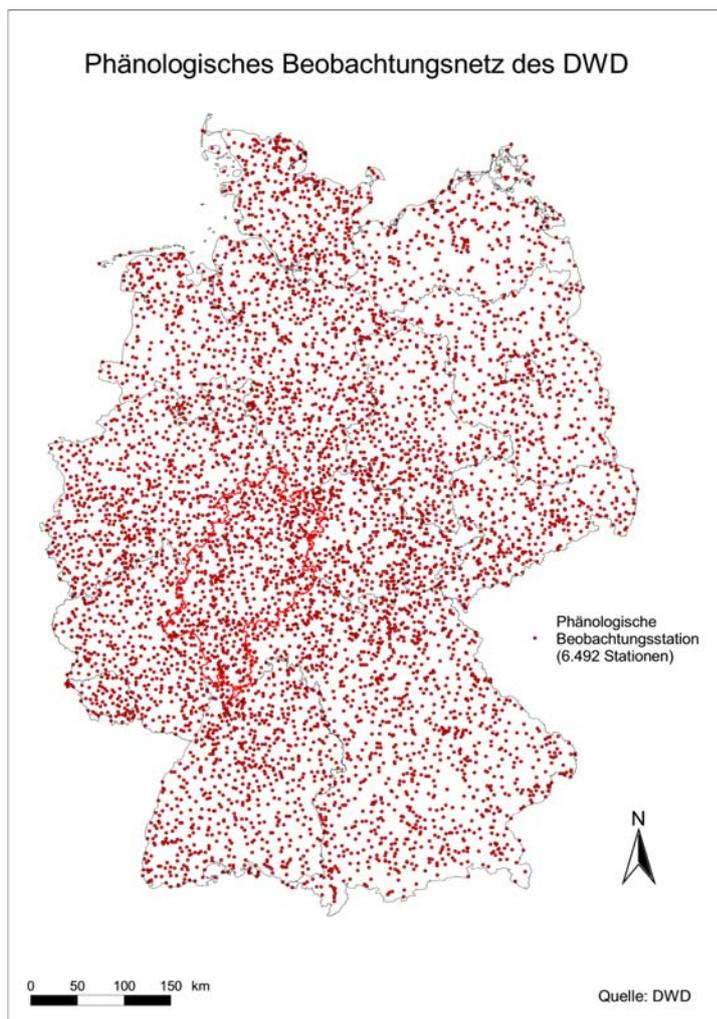


Abb. 1: Phänologisches Beobachtungsnetz des DWD

Qualitätskontrolle

Vor Auswertung der phänologischen Daten wurden die Rohdaten zunächst mit Hilfe der im Folgenden dargestellten Verfahren auf Qualität und Plausibilität geprüft und ggf. korrigiert oder aus der Datenbank entfernt.

¹http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_klima_umwelt_phaenologie&T94009gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima_Umwelt%2FPhaenologie%2FAllgemeines%2FHome_b_eobachtersuche_node.html%3F_nnn%3Dtrue, 27.10.2012

Umrechnung von Eintrittsdaten

Bei den im Jahresverlauf früh beginnenden Phänophasen (z.B. Haselblüte) kam es gelegentlich vor, dass diese bereits im Dezember oder im Spätherbst des Vorjahres eintraten. In der Datenbank des DWD weisen solche Beobachtungen dementsprechend sehr hohe Werte auf (z.B. Phaseneintritt am 20. Dezember = 354 Tage nach Jahresbeginn, TnJ). Damit solche Dateneinträge nicht die folgende Weiterbearbeitung verfälschen, wurden derartige „Vorjahresdaten“ in negative Werte umgerechnet (z.B. 354. TnJ = -11. TnJ). Von den im Projekt ausgewählten Phänophasen (Kap. 4.2) mussten entsprechende Umrechnungen für die Phasen 1 (Haselblüte) und 2 (Schneeglöckchenblüte) durchgeführt werden.

Entfernen fehlerhafter Daten

Vor der Weiterverarbeitung der phänologischen Ausgangsdaten wurden die Rohdaten in mehreren aufeinander folgenden Schritten (Schritte A bis F) auf ihre Plausibilität überprüft (Tabelle 1). Für jeden der drei Beobachtungszeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009 wurde für jede phänologische Beobachtungsstation und für jede ausgewählte Phänophase der mittlere Phaseneintritt während der jeweiligen Klimaperiode berechnet. Dabei wurden nur jene Stationen berücksichtigt, die im entsprechenden Zeitraum in mindestens 90 % der Beobachtungsjahre entsprechende Beobachtungen (1991-2009) aufwiesen (Kap. 4.2).

Zur Ermittlung von Extremwerten wurden mittels der Statistik-Software SPSS zunächst für die zuvor ermittelten Mittelwerten der Beobachtungsstandorte in Deutschland und in Hessen je Phänophase und Klimaperiode Boxplots erstellt (Schritt A). Die Abbildungen 2a (Deutschland) und 2b (Hessen) zeigen dies beispielhaft für Phase 64 (Blühbeginn der Sommer-Linde). Die Boxplots der übrigen Phänophasen sind in Anhang 1 zu finden. Auf diese Weise wurden diejenigen Stationen ermittelt, die für die jeweilige Phänophase in der jeweiligen Klimaperiode Extremwerte aufwiesen.

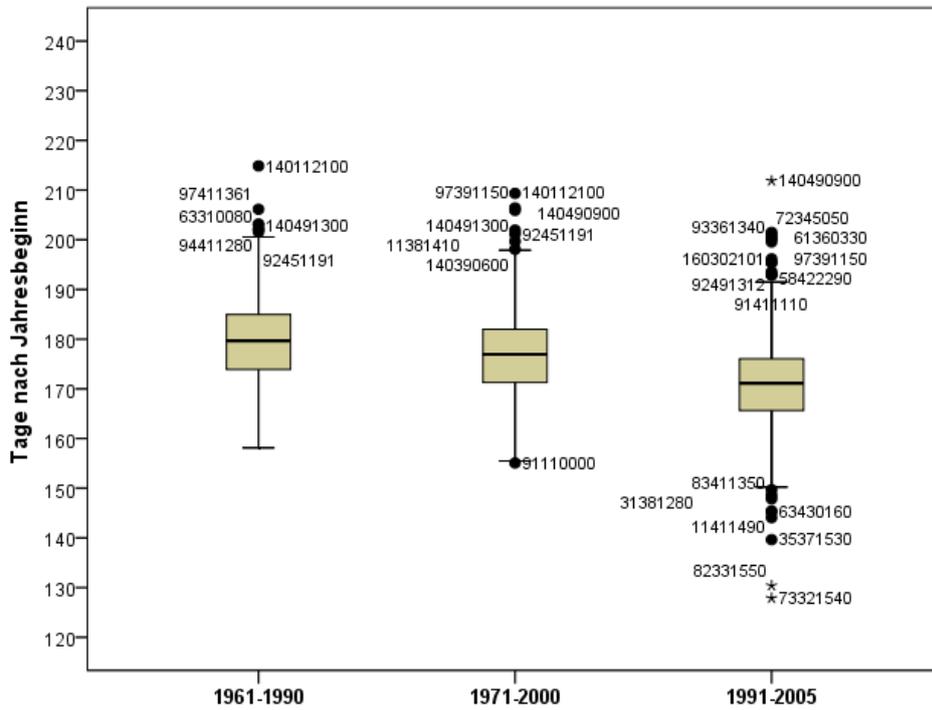


Abb. 2a: Ausreißer (Punkte) und Extremwerte (*) mit Angabe der jeweiligen Stationsnummer für den mittleren Beginn der Blüte der Sommerlinde (Phase 64) in Deutschland

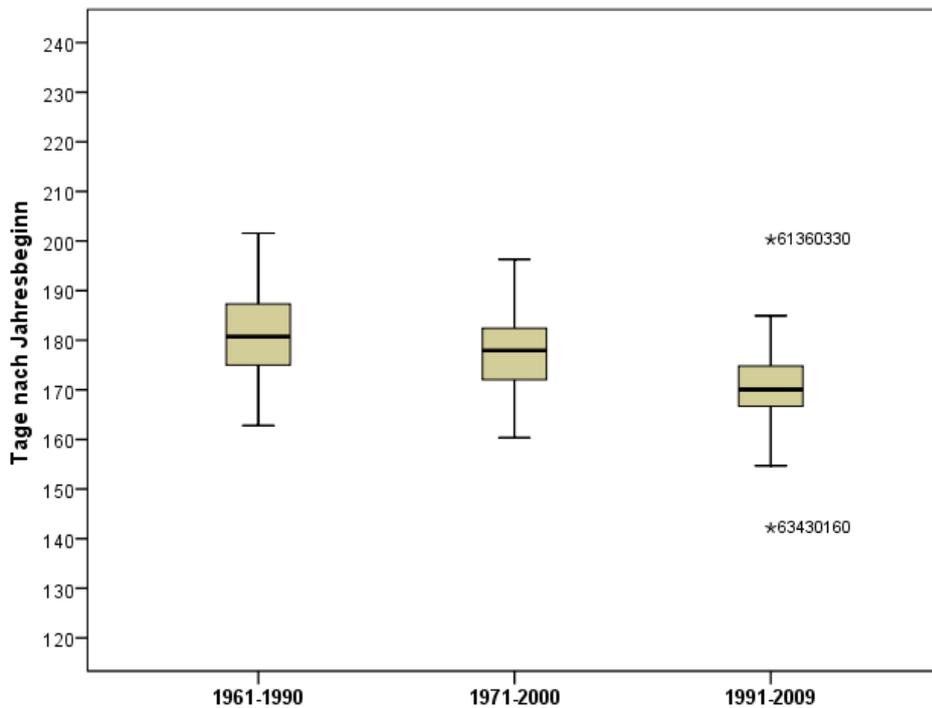


Abb. 2b: Extremwerte (*) mit Angabe der jeweiligen Stationsnummer für den mittleren Beginn der Blüte der Sommerlinde (Phase 64) in Hessen

Die anhand der ermittelten Extremwerte identifizierten Stationen wurden im GIS mit den Beobachtungen an benachbarten Standorten verglichen (Schritt B). Dabei wurde darauf geachtet, nur solche Stationen zu vergleichen, die eine ähnliche orografische Höhe aufwiesen. Lagen Abweichungen der mittleren Phaseneintritte an der selektierten Station im Vergleich zu den Nachbarstationen unterhalb von 5 Tagen oder konnten solche Abweichungen auf die Orografie zurückgeführt werden, so wurde die Station im Datensatz belassen. Konnten die Abweichungen nicht auf den Einfluss der Orografie zurückgeführt werden, so wurden die entsprechenden Mittelwerte als Fehler interpretiert (Schritt C). Daraufhin wurden die Daten der Einzeljahre des betroffenen Zeitraums der selektierten Station auf auffällig hohe oder niedrige Werte untersucht. Wichen alle Werte des Beobachtungsstandorts von denen an benachbarten Standorten ab und waren diese nicht durch die Orografie erklärbar, wurde die gesamte Station aus der Datenbank entfernt (Schritt D). Lagen nur für Einzeljahre unerklärbar abweichende Beobachtungen vor, wurden lediglich die Werte für diese Einzeljahre gelöscht und der Standort in der Datenbank belassen (Schritt E). Lagen nach der Dateneliminierung für eine Station für weniger als 90 % der Beobachtungsjahre innerhalb einer Klimaperiode Werte vor, wurde die gesamte Station für den betreffenden Zeitraum aus der Datenbank gelöscht (Schritt F). Bei der Auswertung der Boxplots wurden für Hessen Stationen mit Extremwerten ermittelt, welche auf Bundesebene nicht auffielen. Dies lag daran, dass die für Hessen ermittelten Extremwerte auf kleineren Grundgesamtheiten basierten und die Streuung der Werte aufgrund geringerer Reliefunterschiede niedriger war. Je kleiner die jeweils untersuchten Raumausschnitte sind, desto eher sollten daher Extremwerte zu identifizieren sein.

Für eine vollständige Untersuchung der Datensätze auf fehlerhafte Werte müsste prinzipiell jede einzelne Beobachtung einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden, was aber in der Praxis aufgrund der großen Datenmenge nicht realisierbar ist, sondern nur durch verschiedene halbautomatisierte Prüfverfahren näherungsweise überprüft werden kann. Die eigenen Untersuchungen in diesem Zusammenhang haben gezeigt, dass die vom DWD selbst durchgeführte Qualitätskontrolle der phänologischen Daten nicht alle unplausiblen Werte identifiziert und entfernt hat (Chmielewski et al. 2009, DWD 2006). Durch die vorgestellten Verfahren konnte jedoch die Datenqualität gegenüber den vom DWD zur Verfügung gestellten Rohdaten zumindest verbessert werden.

Tab. 1: Übersicht über Stationen in Deutschland und Hessen, die Extremwerte in Einzeljahren aufwiesen und daher zum Teil (gelb) oder komplett (rot) aus der Datenbank gelöscht wurden. Die Extremwerte einiger Stationen konnten durch Abgleich mit dem Relief als plausibel eingestuft werden (blau) und wurden in der Datenbank belassen.

BRD																					
Phase	61-90	A	B	C	D	E	F	71-00	A	B	C	D	E	F	91-09	A	B	C	D	E	F
1	94381870	x	x	x			x								63430160	x	x	x			x
															71323020	x	x	x			x
2															97481140	x	x				
6								94381870	x	x	x			x	97150000	x	x	x			x
13								140112100	x						58331130	x	x	x	x		
15	140112100	x						140112100	x						58331130	x	x	x	x		
18															140112100	x					
															100351170	x	x	x			x
								72345050	x	x	x	x			72345050	x	x	x	x		
															150320900	x	x	x	x		
20															97501210	x	x	x			x
54															38311113	x	x	x			x
															38311113	x	x	x	x		
															100344120	x	x	x			x
															82331550	x	x	x			x
															73321540	x	x	x			x
															140490900	x	x	x			x
65	61330380	x	x	x			x								94341220	x	x	x			x
	94381870	x	x	x	x										94431240	x	x	x			x
67								82130000	x	x	x			x							
								82130000	x	x	x			x	71323020	x	x	x	x		
68								75321210	x	x	x			x	35371530	x	x	x			x
								94190000	x	x	x			x							
								11411490	x	x	x			x							
72															140330600	x	x	x	x		
100	94381870	x	x	x			x	94381870	x	x				x	160280800	x	x	x			x
103	94381870	x	x	x			x														
115	94381870	x	x	x			x	94381870	x	x	x			x	57412130	x	x	x			x
	93461360	x	x	x			x	91541520	x	x	x			x	82381530	x	x	x			x
	72372540	x	x	x			x	57412130	x	x	x			x							
	52331110	x	x	x			x	58363110	x	x	x	x									
123															63430520	x	x	x			x
															55325130	x	x	x			x
															38311113	x	x	x			x
172															160170500	x	x	x			x
															73321540	x	x	x			x
177	82130000	x	x	x			x	35351420	x	x	x			x	75381160	x	x	x			x
	52331110	x	x	x			x														

Hessen																					
Phase	61-90	A	B	C	D	E	F	71-00	A	B	C	D	E	F	91-09	A	B	C	D	E	F
1															63430160	x	x	x			x
64															63430160	x	x	x			x
															61360330	x	x	x			x
65	61330380	x	x	x			x														
94	63410670	x	x	x			x														
115															61380440	x	x	x			x

Legende

A	Extremwert im Boxplot
B	Starke Abweichung von den Nachbarstationen
C	Abweichung nicht auf orographische Höhe zurückzuführen
D	Löschen aller Daten eines Zeitraums, da sämtliche Einzeljahre Extremwerte darstellen
E	Extremwerte von Einzeljahren gelöscht; Station bleibt im Datensatz
F	Extremwerte von Einzeljahren gelöscht; Unterschreitung von 90 % Repräsentanz, daher wird die Station für den betroffenen Zeitraum nicht mehr berücksichtigt
	Station wird im entsprechenden Zeitraum nicht mehr berücksichtigt
	Station verbleibt unter Bedingung (s. Anmerkung) im Datensatz
	Station verbleibt im Datensatz, da Abweichungen auf Orographie zurück zu führen sind

3.1.2 Klimadaten

Der Eintritt phänologischer Phasen bei Pflanzen wird in starkem Maße von der Lufttemperatur beeinflusst (Chmielewski und Rötzer 2001; Chmielewski et al. 2005; Chuine et al. 2000; Menzel 2006; Rötzer et al. 2004; Schönrock et al. 2012 und 2013; Schröder et al. 2005, 2006 und 2010). Der statistische Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Phasenbeginn wurde daher mit Hilfe bivariat-statistischer Verfahren (Kap. 3.2.2) untersucht. Die für diese Analyse verwendeten Lufttemperaturdaten wurden ebenfalls vom DWD zur Verfügung gestellt. Für die Analyse standen für den Zeitraum 1961-1990 bundesweit Daten von 672 Klimamessstationen (Abb. 3) zur Verfügung, für den Zeitraum 1991-2009 Daten von 855 Messstationen.

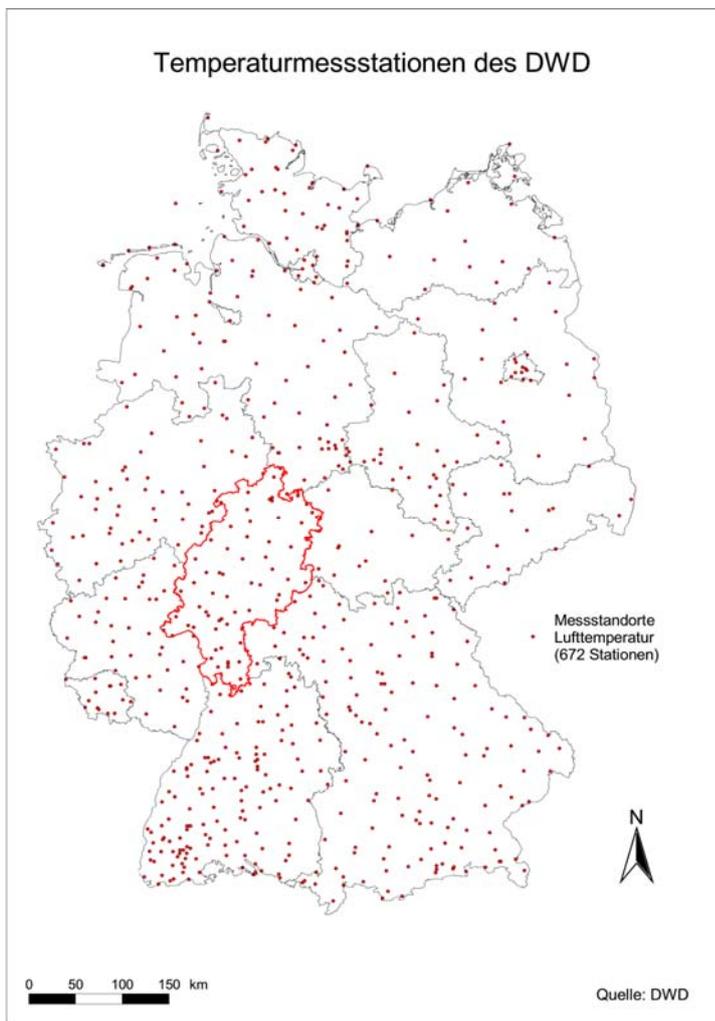


Abb. 3: Temperaturmessnetz des DWD

Der DWD stellte zusätzlich Rasterkarten über die durchschnittlichen monatlichen Tagesmitteltemperaturen für den Zeitraum 1961-2009 zur Verfügung. Daraus wurden im GIS deutschlandweite Rasterkarten mit einer Auflösung von 1 x1 km² für jedes Einzeljahr sowie zu langjährigen Jahres- und Monatsmitteln der Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009 berechnet.

Durch Verschneidung der Temperaturkarten im GIS mit den punkthaft vorliegenden phänologischen Beobachtungen konnte für jeden Beobachtungsstandort und für jeden gewünschten Zeitraum ein entsprechender Temperaturwert abgegriffen werden.

Für die multivariat-statistische Analyse (Kap. 3.2.4) wurden neben den Daten zur Lufttemperatur Daten weiterer Klimaelemente verarbeitet, um den Phasenbeginn insbesondere von Herbstphasen flächenhaft abzuschätzen. Berücksichtigt wurden hierfür Daten zum Maximum und Minimum der Lufttemperatur, zum Niederschlag und zur Globalstrahlung. Die entsprechenden Datensätze standen ebenfalls deutschlandweit als Monatsmittelwerte in Form von Rasterkarten (Auflösung 1 x 1 km) für den Zeitraum 1961-2009 zur Verfügung und wurden im GIS zu langjährigen Monatsmittelwerten aggregiert sowie anschließend mit den phänologischen Beobachtungsstandorten verschnitten.

3.1.3 Klimaprojektionen

Bei der Verwendung von Daten aus Klimamodellen muss grundsätzlich unterschieden werden zwischen Globalen Klimamodellen (GCM, general circulation model) und regionalen Klimamodellen. Globale Klimamodelle sind derzeit noch nicht in der Lage, regionale Klimamuster in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung darzustellen. Regionale Klimamodelle betrachten mit einer deutlich höheren Auflösung Teilräume der Erde und sind daher für regionale Anpassungsstrategien an den Klimawandel von großer Bedeutung. An den Rändern des jeweiligen Raumausschnitts sind regionale Klimamodelle jedoch auf die Daten aus den GCM angewiesen, die die entsprechenden Randdaten liefern (NKGCF 2010).

Das Ableiten regionaler Modelle aus GCMs wird als Downscaling bezeichnet. Dabei wird unterschieden zwischen dynamischem und empirischem bzw. statistischem Downscaling (IPCC 2007). Das BMVBS (2010), das NKGCF (2010), Stock (2003) sowie Walkenhorst und Stock (2009) geben hierzu grundlegende Informationen. Demnach ähneln dynamische regionale Klimamodelle den globalen Klimamodellen und basieren auf der Nachbildung der Dynamik physikalischer und chemischer Prozesse in der Atmosphäre. Statistische regionale Klimamodelle hingegen basieren auf den statistischen Beziehungen zwischen den Klimaparametern, die aus langjährigen Messdatenreihen ermittelt werden. Der Vorteil von dynamischen regionalen Klimamodellen gegenüber statistischen Modellen liegt in der Fähigkeit dieser Modelle, auch neue klimatische Verhältnisse abbilden zu können. Sie sind daher auch für die Modellierung fernerer zukünftiger Zeiträume geeignet. Statistische Modelle eignen sich hingegen besser für kurz- oder mittelfristige Projektionen, in denen keine neuen klimatischen Verhältnisse auftreten. In der Regel liefern statistische Modelle zuverlässigere Ergebnisse, sofern langjährige und flächendeckende Messdatenreihen zur Verfügung stehen. Zudem ist der Rechenaufwand statistischer Modelle deutlich

geringer und je nach räumlicher Auflösung der Messdaten, kann theoretisch eine entsprechend der modellierten Daten hohe räumliche Auflösung erzielt werden.

Für den Forschungsverbund INKLIM-A wurden Daten der beiden dynamischen regionalen Klimamodelle COSMO-CLM und REMO/UBA (Jacob et al. 2008) sowie des statistischen Regionalmodells WETTREG (Spekat et al. 2006) zur Verfügung gestellt. Die Modelle wurden dabei durch das globale Modell ECHAM5 angetrieben. Für COSMO-CLM wurde neben der Kombination mit ECHAM5 (Keuler und Lautenschlager 2006) noch eine zweite Version zur Verfügung gestellt, bei welcher der Antrieb durch das globale Modell HADCM3 erfolgt (Böhm et al. 2006). Aus der Reihe der IPCC-Szenarien wurde im INKLIM-A-Projektverbund das Szenario A1B verwendet. Das Szenario A1B gehört zur Gruppe der A1-Szenarien. Diese gehen von einer Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum, einem Höhepunkt der Weltbevölkerung in der Mitte des 21. Jahrhunderts sowie einer schnellen Entwicklung und Einführung neuer und effizienterer Technologien aus. Das A1B-Szenario geht zusätzlich von einer ausgeglichenen Nutzung fossiler und nicht-fossiler Energieträger aus (IPCC 2007).

Für die eigenen Untersuchungen wurden entsprechende Daten zur Entwicklung der Lufttemperaturen für die Berechnung der zukünftig zu erwartenden phänologischen Entwicklung in Hessen für die Zeiträume 2031-2060 und 2071-2100 sowie im Referenzzeitraum 1971-2000 verarbeitet. Die Daten der Projektionen REMO/UBA, ECHAM5/COSMO-CLM und HADCM3/COSMO-CLM wurden von den Mitgliedern der Daten-AG des INKLIM-A-Projektverbunds mittels BIAS-Korrektur überarbeitet (Blümel und Chmielewski 2010; Blümel 2011). Zudem wurden im Projektverlauf überarbeitete WETTREG-Läufe zur Verfügung gestellt (WETTREG 2010) (Kreienkamp et al. 2010). Für WETTREG 2010 standen insgesamt zehn Läufe zur Verfügung. Auf Empfehlung der Daten AG wurden von diesen zehn Läufen zwei ausgewählt: Lauf 0 (lauf_00) und Lauf 5 (lauf_55). Die WETTREG-Daten und die REMO/UBA-Daten standen sowohl in einer 20 x 20 km² Auflösung also auch in einer 10 x 10 km² Auflösung zur Verfügung. Da die Daten der übrigen beiden Klimamodelle ausschließlich in einer Auflösung von 20 x 20 km² vorliegen, wurde diese Auflösung auch für die WETTREG- und REMO/UBA-Daten gewählt, um eine Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse zu gewährleisten.

Die Modelldaten standen für das jeweilige Klimamodell und -element in zwei Dateien für den Zeitraum 1960-2000 bzw. 2001-2100 als Tageswerte zur Verfügung. Für die weitere Verwendung der Klimamodelldaten mussten diese Daten mit Hilfe des „Climate Data Operator“ (CDO) (Schulzweida et al. 2009) aggregiert werden. Dazu wurden aus den Tageswerten die jeweils benötigten Zeitreihen extrahiert. Die im NetCDF-Format vorliegenden Dateien wurden anschließend im GIS im Rasterformat gespeichert.

Basierend auf den aufbereiteten Projektionsdaten und den mit Hilfe der bivariaten Analyse ermittelten Regressionsbeziehungen zwischen Lufttemperatur und Phasenbeginn für den Referenzzeitraum 1971-

2000 (Kap. 4.4) wurden mittels Regression-Kriging (Kap. 3.2.3) phänologische Flächenkarten für die Zeiträume 1971-2000, 2031-2060 und 2071-2100 berechnet.

3.1.4 Weitere Messgrößen

Neben den Klimadaten des DWD gingen noch weitere Messgrößen mit Bedeutung für die pflanzenphysiologische Entwicklung als Eingangsparameter in die multivariat-statistische Analyse ein. Zum einen waren dies Höhendaten, die bereits für jede phänologische Beobachtungsstation vorlagen. Des Weiteren flossen Bodenflächendaten Hessens (Maßstab 1:50.000; BFD 50) in die Analyse ein, die vom HLUG zur Verfügung gestellt wurden. Die Berücksichtigung des Bodens bei pflanzenphänologischen Untersuchungen ist unerlässlich (Schnelle 1955; Seyfert 1960). Die Wachstumsgeschwindigkeit der Pflanzen wird stark von der Bodentemperatur und der Bodenfeuchtigkeit beeinflusst. Feuchte Böden erwärmen sich langsamer als trockene, so dass beispielsweise in feuchten Flusstälern der Boden eher verzögernd auf den Eintrittstermin phänologischer Phasen wirkt. Ebenso haben die Wasserführung sowie das durch die Korngrößenfraktionen bestimmte Wasserhaltevermögen des Bodens großen Einfluss auf das Pflanzenwachstum. So haben Grobböden gegenüber Feinböden ein geringer ausgeprägtes Wasserhaltevermögen. Wasserführung und Wasserhaltevermögen beeinflussen andererseits die Bodentemperatur (Schnelle 1955). Aufgrund dessen wurden für die multivariat-statistische Analyse folgende Bodenkennwerte berücksichtigt: Bodenart, nutzbare Feldkapazität des Bodens bis 1 m Tiefe (nFK), Luftkapazität (LK) sowie der Durchlässigkeitsbeiwert (kf-Wert). Da insbesondere der durchwurzelte Bereich des Bodens entscheidend für die Pflanzenentwicklung ist, wurden Daten zu den Bodeneigenschaften – sofern vorhanden – bis zu einer Tiefe von 30 cm Tiefe berücksichtigt (Ausnahme: nFK bis 1 m).

Durch eine Verschneidung der phänologischen Beobachtungsstandorte mit dem Polygondatensatz der BFD 50 im GIS wurden für jeden Beobachtungsstandort die entsprechenden Bodenparameter abgegriffen. Einige der phänologischen Beobachtungsstandorte wiesen eine Lage in einem Polygon der Kategorie „Gewässer“ oder „versiegelt“ auf, hier lagen entweder Ungenauigkeiten bei der Lokalisierung der phänologischen Beobachtungsstandorte oder bei der Erstellung der BFD 50 vor. Für diese Standorte konnten demnach keine Bodendaten abgegriffen werden, so dass nicht alle Standorte für die multivariaten Analyse ausgewertet werden konnten.

Da die multiple Regression nur bei metrischem Skalenniveau sowohl der abhängigen als auch der unabhängigen Variablen anwendbar ist (Backhaus et al. 2011), wurden die nominalskalierten Bodendaten zur Bodenart durch die entsprechenden prozentualen Anteile der Korngrößenfraktionen der einzelnen Bodenarten gemäß BGR (2005) ersetzt. Somit lagen auch metrisch skalierte Daten zur Bodenart vor.

Nach der hier und in Kapitel 3.1.2 geschilderten Datenaufbereitung lag schließlich eine Datenmatrix vor, welche für jeden phänologischen Beobachtungsstandort Daten zur gemessenen Lufttemperatur sowie Daten zu den übrigen Klimaparametern (Kap. 3.1.2), zu Bodeneigenschaften und zur Orografie enthielt und für die weitere statistische Auswertung (SPSS 19) und Darstellung im GIS (ArcGIS 10) zugrunde gelegt wurde.

3.2 Methoden

3.2.1 Deskriptive Statistik

Für die 35 ausgewählten Phänophasen (Kap. 4.2) wurden jeweils für den gesamtdeutschen als auch den hessischen Datensatz für jeden der drei Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2005 bzw. 1991-2009 deskriptiv-statistische Kennwerte (Anzahl, Minimum, Maximum, Mittelwert, Median, Standardabweichung) berechnet (TZ 0). Zusätzlich wurden Histogramme zur Darstellung der Datenverteilung für jede Phänophase erstellt. Es wurden nur Standorte mit einer zeitlichen Repräsentanz für die jeweilige Klimaperiode von $\geq 90\%$ berücksichtigt (Kap. 4.2). Ferner wurde für jede ausgewählte Phänophase ein Verlaufdiagramm erstellt, welches die phänologische Entwicklung des Zeitraums 1961-2005 (Deutschland) bzw. 1961-2009 (Hessen) darstellt. Die in den Diagrammen als horizontale Linien eingezeichneten Mediane basieren auf den langjährigen mittleren Phaseneintritten für diesen Zeitraum in Deutschland bzw. Hessen. Für die Erstellung der Diagramme wurden die korrigierten Datensätze (Kap. 3.1.1) verwendet.

Phänologische Uhren

Die phänologische Uhr beschreibt den zeitlichen Vegetationsverlauf, wie er im Mittel für einen vorher festgelegten Raumausschnitt zu erwarten ist. Der Aufbau der phänologischen Uhr basiert auf den phänologischen Jahreszeiten (Vorfrühling bis Winteranfang) (Henniges et al. 2005). Anhand der aufgenommenen Eintrittszeiten der phänologischen Phasen lässt sich ein phänologisches Jahr konstruieren (Rosenkranz 1951, Schnelle 1955, Seyfert 1960). Zur Charakterisierung der Jahreszeiten wurden aus der vorkommenden Flora Phänophasen geeigneter Leitpflanzen ausgewählt. Liegen für diese Leitphasen (z.B. Blühbeginn des Apfels als Leitphase für den Vollfrühling) an einem Beobachtungsstandort keine Beobachtungen vor, kann in einem gewissen Maß auf Ersatzphasen zurückgegriffen werden. Die Zuordnung gleichwertiger Ersatzphasen ist aufgrund unterschiedlicher Biologie der Pflanzen (z.B. Hasel = Phanerophyt, Schneeglöckchen = Geophyt) allerdings nicht immer unproblematisch (Seyfert 1960). Insgesamt gibt es zehn phänologische Jahreszeiten (Englert et al. 2007, Henniges et al. 2005, Schnelle 1955). Durch die Integration von zwei phänologischen Uhren eines Gebietes für zwei unterschiedliche Zeiträume kann eine doppelte phänologische Uhr konstruiert werden. Für den Vergleich der phänologi-

schen Phasen mit dem Jahreslauf und den Jahreszeiten kann die doppelte phänologische Uhr noch um klimatologische Jahreszeiten ergänzt werden (dreifache phänologische Uhr) (Henniges et al. 2005). Die Zuordnung aller Phänophasen zu einer phänologischen Jahreszeit basiert auf der Reihenfolge der Phaseneintritte nach dem phänologischen Kalender (Polte-Rudolf 2007).

Im Rahmen des Projektes wurden für alle ausgewählten Phänophasen dreifache phänologische Uhren für Deutschland und Hessen erstellt. Im äußeren Ring ist jeweils der mittlere Beginn und die mittlere Dauer der phänologischen Jahreszeiten für den Zeitraum 1961-1990 dargestellt. Im inneren Ring ist der Zeitraum 1991-2009 dargestellt. In das Zentrum der phänologischen Uhren wurden die kalendarischen Jahreszeiten integriert. Der in den Uhren eingetragene Beginn der entsprechenden Jahreszeit basiert für jede Leitphase auf allen Stationen, die im jeweiligen Zeitraum eine zeitliche Repräsentanz von $\geq 90\%$ aufweisen. Zusätzlich wurde zwischen innerem und äußerem Ring auch der Verlauf der phänologischen Jahreszeiten für den Referenzzeitraum 1971-2000 in die phänologischen Uhren eingefügt (vgl. Abb. 15, Kap. 4.3.1). Für die regionale Differenzierung der phänologischen Entwicklung (TZ 3) wurden zusätzlich auch für jede Gruppe der Naturraumhaupteinheiten (Meynen et al. 1953-1962) in Hessen phänologische Uhren berechnet. Auf Anraten des DWD sollte anstelle des Auflaufens des Winterweizens (Phase 94) als Leitphase für den Beginn des phänologischen Winters der Blattfall der Stiel-Eiche (Phase 226) verwendet werden. Allerdings lagen für den Blattfall der Stiel-Eiche von 1961-1990 keine Daten vor. Daher wurden die mittleren Eintrittstermine für die Zeiträume 1961-1990 und 1971-2000 in Abstimmung mit dem DWD regressionsanalytisch geschätzt, indem die für den Zeitraum 1991-2005 ermittelte Regressionsbeziehung zugrunde gelegt und auf die Temperaturkarten der beiden zurückliegenden Zeiträume angewendet wurde.

3.2.2 Bivariate Statistik

Ziel der bivariat-statistischen Auswertung (TZ 1) war, mit Hilfe von Regressionsmodellen die Stärke des statistischen Zusammenhangs zwischen Lufttemperatur und jeweiligem Phasenbeginn zu ermitteln. Für die Auswertung wurden im GIS alle in Deutschland punkthaft vorliegenden Stationsdaten zum jeweiligen Phaseneintritt mit den Rasterkarten zur mittleren Lufttemperatur in den drei Klimaperioden (1961-1990, 1971-2000, 1991-2009) verschnitten, um entsprechende Wertepaare für die Regressionsanalysen auswerten zu können. Für jede Phase und jeden Zeitraum wurde der Pearson'sche Korrelationskoeffizient (r) berechnet. Dieser Wert ist ein dimensionsloses Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei mindestens intervallskalierten Merkmalen, in diesem Fall zwischen Lufttemperatur und Phasenbeginn. Er kann Werte zwischen -1 und $+1$ annehmen. Bei $r = 1$ (bzw. -1) besteht ein vollständig positiver (bzw. negativer) linearer Zusammenhang zwischen den betrachteten Merkmalen. Beträgt $r = 0$, gibt es keinen statistischen Zusammenhang. Die Stärke des Zusammenhangs kann nach

Hagl (2008) wie folgt klassifiziert werden: $r < 0,20$: sehr geringer Zusammenhang, $r \geq 0,20-0,49$: geringer Zusammenhang, $r \geq 0,50-0,69$: mittlerer Zusammenhang, $r \geq 0,70-0,89$: hoher Zusammenhang, $r \geq 0,9$: sehr hoher Zusammenhang. Die statistische Beziehung ist in Form einer Regressionsgleichung beschrieben und wurde zur Berechnung der phänologischen Flächenkarten verwendet (Kap. 3.2.3), indem für jede Rasterzelle, für die ein Lufttemperaturwert vorlag, ein Wert für den Phaseneintritt geschätzt wurde.

Für die bivariat-statistische Analyse wurden für den Vergleich von Phaseneintritt und Lufttemperatur verschiedene Zeitabschnitte ausgewertet:

1. Langjährige Jahrestemperaturmittel für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1991-2009;
2. Langjährige Monatstemperaturmittel für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1991-2009;
3. Mittlere Durchschnittstemperaturen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1991-2009 für diejenigen Monate, die die höchsten Korrelationen zum Phaseneintritt aufwiesen und eine fachlich plausible Verknüpfung erlaubten. Als potenziell relevante Zeitintervalle wurden diejenigen Monatsreihen betrachtet, die vom frühesten mittleren Phaseneintritt einer Station im jeweiligen Zeitraum (mittleres Minimum) bis zum spätesten mittleren Phaseneintritt (mittleres Maximum) einer Station im jeweiligen Zeitraum reichten. Entsprechende Kennwerte lieferte die deskriptiv-statistische Auswertung (Kap. 4.3).

Die unter 3) geschilderte Vorgehensweise basiert auf der Erkenntnis, dass für den Eintritt einer Phänophase grundsätzlich zwei Voraussetzungen entscheidend sind: 1) Vorbereitende Bedingungen: Es muss die 'Bereitschaft' einer Pflanze für den Eintritt in eine Phänophase vorhanden sein (Bereitschaftsgrad). Im Witterungsverlauf eines einer Phänophase vorangehenden längeren Zeitraumes müssen daher bestimmte Bedingungen wie höhere Temperaturen erfüllt sein, damit sich die Pflanze bis zu diesem „Bereitschaftsstadium“ entwickeln kann. Ist dieses Stadium erreicht, bedarf es 2) einer auslösenden Bedingung, einer weiteren, verhältnismäßig kleinen Anregung (z.B. Warmluftvorstoß, Hochdruckperiode), um den Phaseneintritt auszulösen (Schnelle 1955). Dies gilt insbesondere für die Frühlingsphasen (Schnelle 1955, Schröder et al. 2005).

Aufgrund ihrer wirtschaftlichen Relevanz wurden auch Phänophasen von Weinreben (geo-)statistisch ausgewertet. Für die bivariat-statistische Analyse der entsprechenden Phasen 171, 172 und 205 wurden dazu für jeden der drei ausgewählten Zeiträume (1961-1990, 1971-2000, 1991-2009) für jedes Jahr Lufttemperaturen und Eintrittstermine für jedes Beobachtungsjahr ausgewertet und nicht nur für die langjährigen Mittel im jeweiligen Zeiträume. Dies war aufgrund der geringen Anzahl an geeigneten Standorten (je nach Phase und Zeitraum 2 bis 3 Beobachtungsstandorte), die für die Analyse zur Ver-

fügung standen, notwendig. Es konnten nur solche Standorte berücksichtigt werden, für die im jeweils betrachteten Zeitraum eine hinreichende ($\geq 90\%$) Anzahl an Beobachtungen vorlag. Aufgrund der geringen Standortzahl war eine flächenhafte Darstellung des Phaseneintritts auf Basis der Regressionsbeziehungen nicht möglich. Wie für die anderen Phänophasen wurden die Korrelations- und Regressionsanalysen sowohl für Einzelmonate als auch für Durchschnittstemperaturen von Monatsreihen durchgeführt. Die auf den Werten der Klimamodelle basierende Projektion der für die Zukunft zu erwartenden Phaseneintritte erfolgte ebenfalls punktuell für jede einzelne Beobachtungsstation.

3.2.3 Regression Kriging

Die Ergebnisse der bivariat-statistischen Analyse (Kap. 4.4) wurden für die weiteren statistischen Analysen der ausgewählten 35 Phänophasen verwendet. Für diejenigen Phasen, die nach Auswertung der Regressionsmodelle signifikante, hohe ($r \geq 0,7$) oder zumindest mittlere Korrelationen ($\geq 0,5$ $r \geq 0,69$) mit den Lufttemperaturen aufwiesen, wurden mittels Regression Kriging Flächenkarten für die entsprechenden Eintrittstermine erstellt (TZ 2). Die mit Hilfe der Regressionsanalyse (Kap. 3.2.2) ermittelte Regressionsgleichung zum statistischen Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Phaseneintritt wurde im GIS mittels „Map Calculator“ mit einer entsprechenden Rasterkarte ($1 \times 1 \text{ km}^2$) des DWD zur Lufttemperatur (Kap. 3.1.2) verrechnet. Diese regressionsanalytische Flächenschätzung wurde weiter verbessert, indem sie mit einer geostatistisch ermittelten Karte zu den Residuen der jeweiligen Schätzungen kombiniert wurde (Broecker et al. 2007, Odeh et al. 1995, Zirlwagen et al. 2007). Residuen sind die Differenzen zwischen den mit dem Regressionsmodell geschätzten Werten und den tatsächlichen Messwerten. Sie bilden den Anteil der Variabilität ab, der durch das aus den Messwerten geschätzte Modell nicht erklärt werden kann. Die Residuen, die sich aus den Differenzen von Schätz- und Messwerten ergaben wurden mit Hilfe von Ordinary Kriging (Krige 1951, Mathéron 1965) flächenhaft interpoliert (s. u.) und mit den zuvor erzeugten phänologischen Flächenkarten verrechnet, so dass im Ergebnis eine entsprechend korrigierte phänologische Flächenkarte vorlag (Regression Kriging).

Für diejenigen Pflanzenphasen, die nach Durchführung der Regressionsanalyse nur eine geringe Korrelation ($r \leq 0,49$) mit der Lufttemperatur aufwiesen (insbesondere für die Herbstphasen), wurden multivariat-statistische Verfahren eingesetzt (Kap. 3.2.4).

3.2.4 Multivariate Statistik

Der Zeitpunkt des Eintritts phänologischer Phasen wird nicht allein durch die Lufttemperatur bestimmt, sondern von einer Vielzahl weiterer Faktoren, die alle zusammen das Pflanzenwachstum beeinflussen (Rosenkranz 1951, Schnelle 1955, Schönrock et al. 2013, Seyfert 1960). Die Einflussstärke der einzelnen Faktoren ist jedoch je nach Pflanzenphase unterschiedlich. Zudem variiert die Einflussstärke der

einzelnen Parameter auch von Standort zu Standort und jede Pflanzenart reagiert in unterschiedlicher Art und Weise auf sie. Ebenso kann die Einflussstärke einzelner Parameter zwischen einzelnen Individuen der gleichen Art variieren (genetische Variabilität) (Abb. 4). Solange die Einflussstärken der einzelnen Parameter empirisch nicht eindeutig erfasst und beschrieben werden können, bilden sie zusammen das so genannte „Rauschen“. Im statistischen Sinne bezeichnet das Rauschen die nicht erklärte Varianz der abhängigen Variable, im Rahmen der vorliegenden Arbeit also des Phasenbeginns.

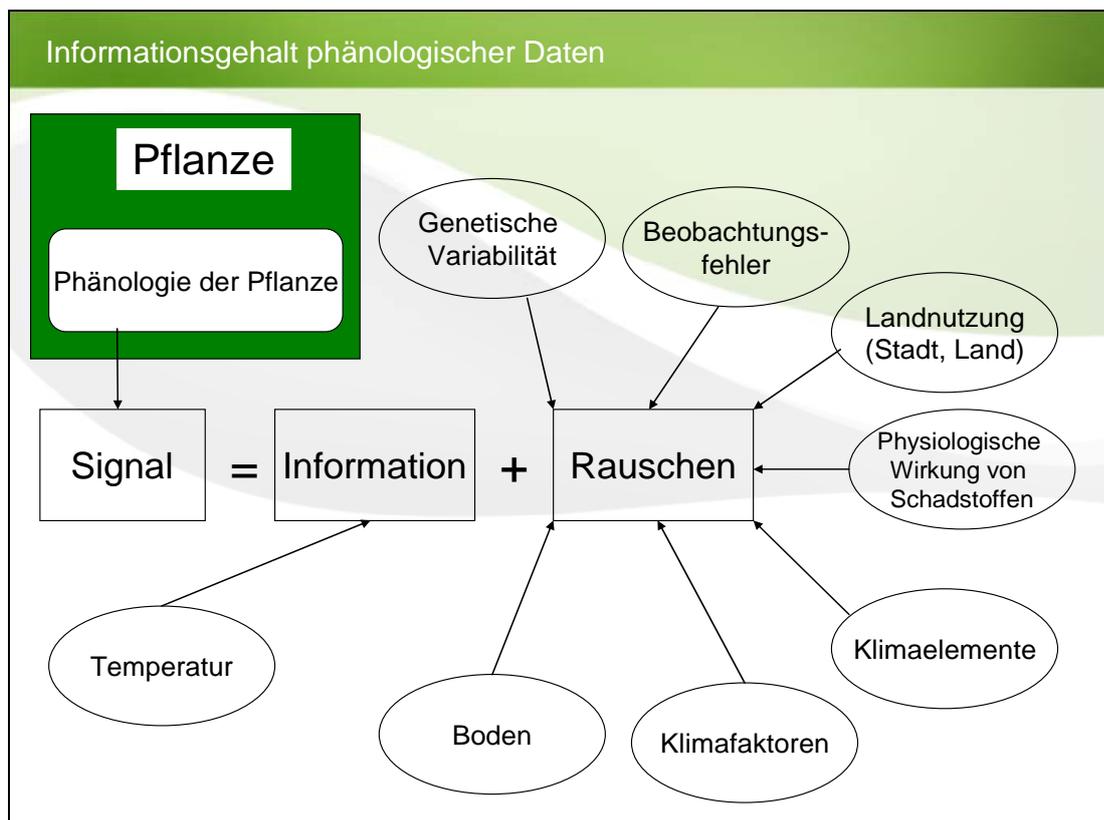


Abb. 4: Informationsgehalt phänologischer Daten (nach Schmüser 1993, verändert)

Mittels statistischer Analysemethoden kann ein Teil dieses Rauschen quantifiziert und somit in eine konkrete Information transformiert werden. Dies kann durch eine lineare Regressionsanalyse erfolgen (Kap. 3.2.2). Hierbei wurde lediglich der Einfluss der Lufttemperatur auf den Phasenbeginn untersucht, da die Lufttemperatur insbesondere für die Frühjahrs- und Sommerphasen einen entscheidenden Einfluss auf die Pflanzenphänologie hat wie sich auch in den eigenen Untersuchungen bestätigt hat (Kap. 4.4): Aufgrund der Korrelationsstärke zwischen beiden Variablen konnte ein ausreichend hoher Anteil der Varianz des Phasenbeginns durch die Lufttemperatur erklärt werden, so dass das Regressionsmodell für flächenhafte Schätzungen zum jeweiligen Phaseneintritt (TZ 2) sowie zur Projektion der möglichen zukünftigen Phaseneintritte (TZ 5) verwendet werden konnte.

Bei denjenigen Phasen, die nur eine schwache ($r \leq 0,49$) Korrelation zur Lufttemperatur aufwiesen, war der Anteil des Rauschens im Regressionsmodell zu hoch, um valide Flächenschätzungen bzw. Projek-

tionen für die Zukunft vorzunehmen. Offensichtlich wurde der Eintrittstermin solcher Phasen neben der Lufttemperatur in einem deutlich stärkeren Maße von weiteren Parametern bestimmt. Daher wurden die betroffenen Phasen mit Hilfe von zwei Verfahren der multivariaten Statistik analysiert (TZ 4): 1) dem Entscheidungsbaumverfahren (CART-Analyse) und 2) der multiplen linearen Regressionsanalyse. Beide multivariat-statistischen Verfahren wurden sowohl für die deutschlandweiten als auch für die hessischen Datensätze mit Hilfe der Statistik-Software SPSS durchgeführt. In Tabelle 2 sind die für die Analysen berücksichtigten Einflussgrößen aufgeführt.

Tab. 2: Berücksichtigte Parameter der multivariat-statistischen Analyse

<i>Parameter</i>	<i>CART-Analyse</i>		<i>Multiple lineare Regression</i>	
	<i>Hessen</i>	<i>Deutschland</i>	<i>Hessen</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Mitteltemperatur (DWD)</i>	X	X	X	X
<i>Maximumtemperatur (DWD)</i>	X	X	X	X
<i>Minimumtemperatur (DWD)</i>	X	X	X	X
<i>Globalstrahlung (DWD)</i>	X	X	X	X
<i>Niederschlag (DWD)</i>	X	X	X	X
<i>Orographische Höhe (Phän. Stationen)</i>	X	X	X	X
<i>Bodenart (BFD 50 / BÜK 1000)</i>	X	X	X	-
<i>nFK bis 100 cm (BFD 50)</i>	X	-	X	-
<i>Luftkapazität (BFD 50)</i>	X	-	X	-
<i>k_r-Wert (BFD 50)</i>	X	-	X	-

CART-Analyse (Entscheidungsbaumverfahren)

Entscheidungsbaumverfahren dienen zur Identifikation von Strukturen in Datensätzen, die eine Vielzahl an Objekten mit unterschiedlichen Ausprägungen verschiedener kategorialer und metrischer Merkmale enthalten. Ziel ist es, anhand der statistischen Beziehung zwischen einer interessierenden Variable (Zielvariable – hier: Phasenbeginn) und mehreren mit dieser in einem fachlichen Zusammenhang stehenden beschreibenden Variablen (Prädiktoren – hier: klimatologische Faktoren, Orografie, Pedologie) ein Erklärungs- oder Vorhersagemodell für die Zielvariable abzuleiten. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde hierfür Classification and Regression Trees (CART) angewendet (Breiman et al. 1984). CART beruht auf der schrittweisen Segmentierung eines gegebenen Ausgangsdatsatzes durch eine Folge binärer Unterteilungen (splits). Dabei wird der Ausgangsdatsatz in einem ersten Schritt in zwei Tochterklassen (Knoten) aufgeteilt und ggf. weiter aufgegliedert. Auf diese Art werden Dendrogramme berechnet, deren Verzweigungsgrad durch anwenderspezifische Voreinstellungen definiert wird – z.B. durch Minimalwerte für die Anzahl von Objekten pro Klasse. Die Teilung erfolgt bei Entscheidungsbaumverfahren anhand der Merkmalsausprägungen der zur Verfügung stehenden Prädiktorvariablen. Dabei wird derjenige Prädiktor zur Teilung herangezogen, welcher im Vergleich zu allen anderen Prädiktoren ein statistisches Zielkriterium optimiert: CART wählt aus allen beschreibenden Variablen denjenigen Prädiktor als Teilungs- oder Splitvariable aus, der in den Tochterklassen den größten Zuwachs an

Homogenität (Improvement) in Bezug auf die Ausprägung der Zielvariablen erzeugt. Bei metrisch skalierten Zielvariablen wie den Eintrittsterminen der phänologischen Phasen wird die Homogenität an der klasseninternen Varianz und das Improvement pro Split anhand der Verringerung der Varianz des Ausgangsdatensatzes in Bezug auf die Varianz der durch die Teilung gebildeten neuen Bauebene bestimmt. Es können nebeneinander sowohl metrische, ordinale als auch nominale Daten verarbeitet werden. Aus den derart ermittelten Entscheidungsbäumen können diejenigen Parameterkonstellationen abgelesen werden, die jeweils einen frühen oder späten Phasenbeginn bedingen.

Multiple Regressionsanalyse

Im Gegensatz zur einfachen linearen Regressionsanalyse (Kap. 3.2.2), welche die Beziehung zwischen einer abhängigen Variablen (Phasenbeginn) und nur einer unabhängigen Variablen (Lufttemperaturmittel) untersucht, werden bei der multiplen linearen Regressionsanalyse mehrere unabhängige Variablen in das Regressionsmodell aufgenommen. Daraus ergibt sich folgende Regressionsgleichung (Backhaus et al. 2011):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_jx_j + \dots + b_Jx_J$$

mit

Y = zu ermittelnder Schätzwert der abhängigen Variable

b_0 = konstantes Glied (Schnittpunkt der Regressionsgerade mit der Y -Achse)

b_j = Regressionskoeffizient ($j = 1, 2, \dots, J$) (Steigung der Regressionsgerade)

x_j = Werte der unabhängigen Variablen ($j = 1, 2, \dots, J$).

Der multiple Korrelationskoeffizient kann dabei nur Werte im Bereich zwischen 0 und 1 annehmen. Das Quadrat des multiplen Korrelationskoeffizienten entspricht dabei dem Bestimmtheitsmaß R^2 .

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde eine schrittweise multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Bei diesem Verfahren gehen im Unterschied zur multiplen Regressionsanalyse nicht alle unabhängigen Variablen gleichzeitig in die für die abhängige Variable zu bestimmende Gleichung ein. Stattdessen wird schrittweise diejenige unabhängige Variable in das Modell einbezogen, die für den größten Anteil an der noch nicht durch die vorhergehende unabhängige Variable erklärten Varianz verantwortlich ist. Dabei wird in einem ersten Schritt diejenige unabhängige Variable (x_1) als erste in das Regressionsmodell einbezogen, die mit der abhängigen Variablen am höchsten korreliert ist. Dazu wird die lineare Einfachregression zwischen beiden Variablen berechnet. In einem zweiten Schritt werden anschließend die partiellen Korrelationskoeffizienten bezüglich der im ersten Schritt ausgewählten unabhängigen Variablen (x_1) zwischen der abhängigen Variablen und den noch nicht in die Regression aufgenommenen restlichen unabhängigen Variablen berechnet. Diejenige unabhängige Variable mit dem höchsten partiellen Korrelationskoeffizienten wird dann neben x_1 als x_2 in das Regressionsmodell auf-

genommen, da sie für den größten Anteil an durch x_1 noch nicht erklärter Varianz aufkommt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis keine Variable mehr übrig ist oder er abgebrochen wird, wenn der zusätzlich erklärte Varianzanteil für eine Variable unter eine zuvor definierte Grenze (z.B. 5 %) fällt oder sonstige Stoppkriterien greifen. Bei der vorliegenden Analyse wurden nur diejenigen Variablen in das Modell aufgenommen, bei denen das Signifikanzniveau ihres partiellen Korrelationskoeffizienten (F-Wahrscheinlichkeit) $\leq 0,05$ war. Aus dem Modell entfernt wurden Variablen mit einem Signifikanzniveau ihres partiellen Korrelationskoeffizienten von $\geq 0,1$.

Die schrittweise multiple Regressionsanalyse bietet den Vorteil, dass ersichtlich wird, in welchem Maß die einzelnen Variablen einen Beitrag zur Erklärung der abhängigen Variablen leisten. Die Regressionskoeffizienten in der endgültigen Gleichung ändern sich durch dieses Vorgehen nicht. Ferner werden, je nach Abbruchkriterium, störende Variablen aus dem Regressionsmodell entfernt (Bahrenberg und Giese 1975). Für die Durchführbarkeit der multiplen linearen Regressionsanalyse existieren eine Reihe von Kriterien, die erfüllt sein müssen (Backhaus et al. 2011). Zunächst ist dabei die Güte des Regressionsmodells zu prüfen, wobei sich die Überprüfung in zwei Bereiche gliedern lässt:

- Globale Prüfung der Regressionsfunktion, ob und wie gut die abhängige Variable Y durch das Regressionsmodell erklärt wird. Globale Gütemaße zur Prüfung der Regressionsfunktion sind das Bestimmtheitsmaß (R^2), die F-Statistik sowie der Standardfehler.
- Prüfung des Regressionskoeffizienten, ob und wie gut einzelne Variablen des Regressionsmodells zur Erklärung der abhängigen Variablen Y beitragen. Maße zur Prüfung der Regressionskoeffizienten sind der t-Wert und der Beta-Wert. Zeigt sich hier, dass eine Variable keinen Beitrag zur Erklärung leistet, so ist diese aus der Regressionsfunktion zu entfernen.

Die Güte der Schätzung für die Regressionsparameter sowie die oben genannten Tests zur Überprüfung der Güte sind von der Erfüllung bestimmter Modelprämissen abhängig. Dazu gehören:

- Linearität zwischen den unabhängigen Variablen x_i und der abhängigen Variable;
- Vollständigkeit des Modells (Auswahl der richtigen Variablen, ausreichender Stichprobenumfang);
- Konstante Varianz der Residuen (Homoskedastizität): Die Residuen dürfen nicht von den unabhängigen Variablen und von der Reihenfolge der Beobachtungen abhängig sein;
- keine perfekte Multikollinearität: es darf keine lineare Abhängigkeit zwischen den erklärenden Variablen x_j bestehen;
- Normalverteilung der Residuen.

Stellt sich bereits bei der Prüfung der globalen Güte heraus, dass das Modell unbrauchbar ist, so erübrigt sich die Überprüfung der einzelnen Regressionskoeffizienten bzw. der Modellprämissen. Für sämtli-

che im Rahmen der multiplen Regression ausgewerteten Phasen wurde eine entsprechende Überprüfung anhand der oben aufgeführten Kriterien durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Entwicklung der Lufttemperaturen

In Abbildung 5 (oben) ist der Verlauf der bundesweiten Monatsmitteltemperaturen von 1961 bis 2009 dargestellt. Zusätzlich wurden in das Diagramm die Jahresmittelwerte als rosafarbene Punkte sowie als gestrichelte Linie die Durchschnittstemperatur für die Klimanormalperiode 1961-1990 (8,2 °C) sowie den Zeitraum von 1991-2009 (9,1 °C) eingetragen. Ein klarer Trend ist hier nicht zu erkennen. Wird die Darstellung auf die Jahresdurchschnittstemperaturen reduziert (Abb. 5, unten), ist eine deutlichere Tendenz ablesbar.

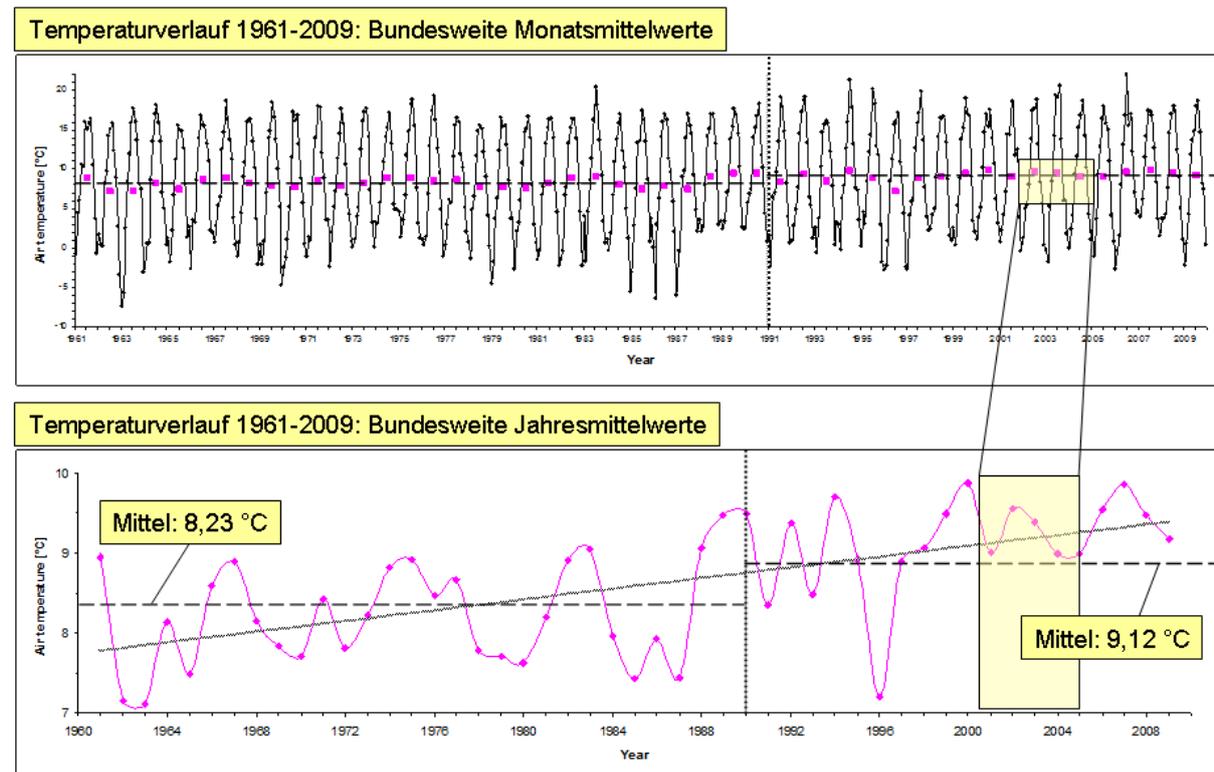


Abb. 5: Monats- (oben) und Jahresmittelwerte (unten) zum Lufttemperaturverlauf in Deutschland 1961-2009

Die Abbildungen 6a-d illustrieren die flächenhafte Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperaturen in Hessen von 1961 bis 2009 sowie differenziert für die vier verwendeten Klimamodelle bis 2100. Die jeweils oberen drei Karten zeigen die Veränderungen der langjährigen Mittelwerte der Lufttemperatur in Hessen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009. Dabei entspricht die Lufttemperaturentwicklung auf Landesebene jener der Bundesebene: Die langjährige Jahresdurchschnittstemperatur lag auch hier im Zeitraum 1991-2009 mit 9,1 °C um 0,9 °C über dem langjährigen Mittel des Zeitraums 1961-1990 (8,2 °C). Deutlich sichtbar sind dabei naturräumliche Unterschiede, die überwiegend reliefbedingt sind. So wurden die Höchstwerte in tiefer gelegenen Naturräumen erreicht (Nördliches Oberrhein-Tiefland, Rhein-Main-Tiefland und Lahntal), während in den Mittelgebirgslagen kühlere Temperaturen vorherrschten (z.B. Westerwald, Osthessisches Bergland).

Je nach verwendetem Klimamodell (Kap. 3.1.3) variiert der Anstieg der langjährigen Jahresdurchschnittstemperaturen zwischen dem Referenzzeitraum 1971-2000 (DWD-Messungen) und dem Zeitraum 2071-2100 von im Mittel 3,2 °C (ECHAM5/CLM, BIAS-korrigiert) (Abb. 6a) bis 3,7 °C (WETTREG 2010, Lauf 0) (Abb. 6d). Mit einem Anstieg der Durchschnittstemperatur von 8,6 °C im Zeitraum 1971-2000 auf 9,9 °C im Zeitraum 2031-2060 weisen die Klimaprojektionen ECHAM5/CLM (Abb. 6a) und REMO/UBA (Abb. 6b) etwas mildere Temperaturen auf als die Projektionen HADCM3/CLM (Abb. 6c) und WETTREG 2010 (Lauf 0) (Abb. 6d) (10,8 °C bzw. 10,5 °C als Mittel für den Zeitraum 2031-2060). Diese Tendenz bleibt im Zeitraum 2071-2100 erhalten, allerdings werden die Differenzen zwischen den „kühleren“ Modellen ECHAM5/CLM und REMO/UBA und den „wärmeren“ Modellen HADCM3/CLM und WETTREG 2010 geringer (mittlere Temperaturen von 11,7 °C bis 12,2 °C). Auf eine flächenhafte Darstellung von Lauf 5 von WETTREG 2010 wurde aufgrund seiner Ähnlichkeit zu Lauf 0 verzichtet. Die Mittelwerte beider Läufe in den Zeiträumen 1971-2000 und 2031-2060 sind identisch. Im Zeitraum 2071-2100 liegt Lauf 5 mit 12,0 °C knapp unter dem Mittel von Lauf 0.

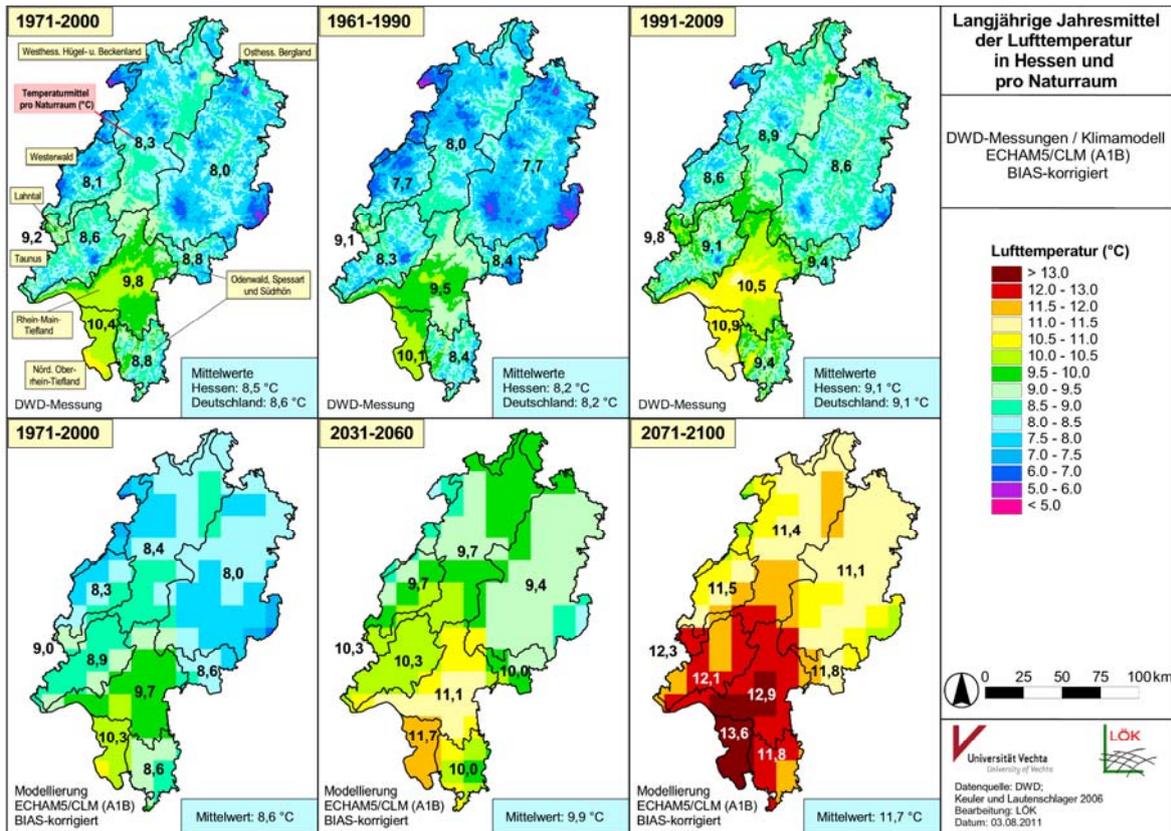


Abb. 6a: Langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / ECHAM 5/CLM A1B, BIAS-korrigiert)

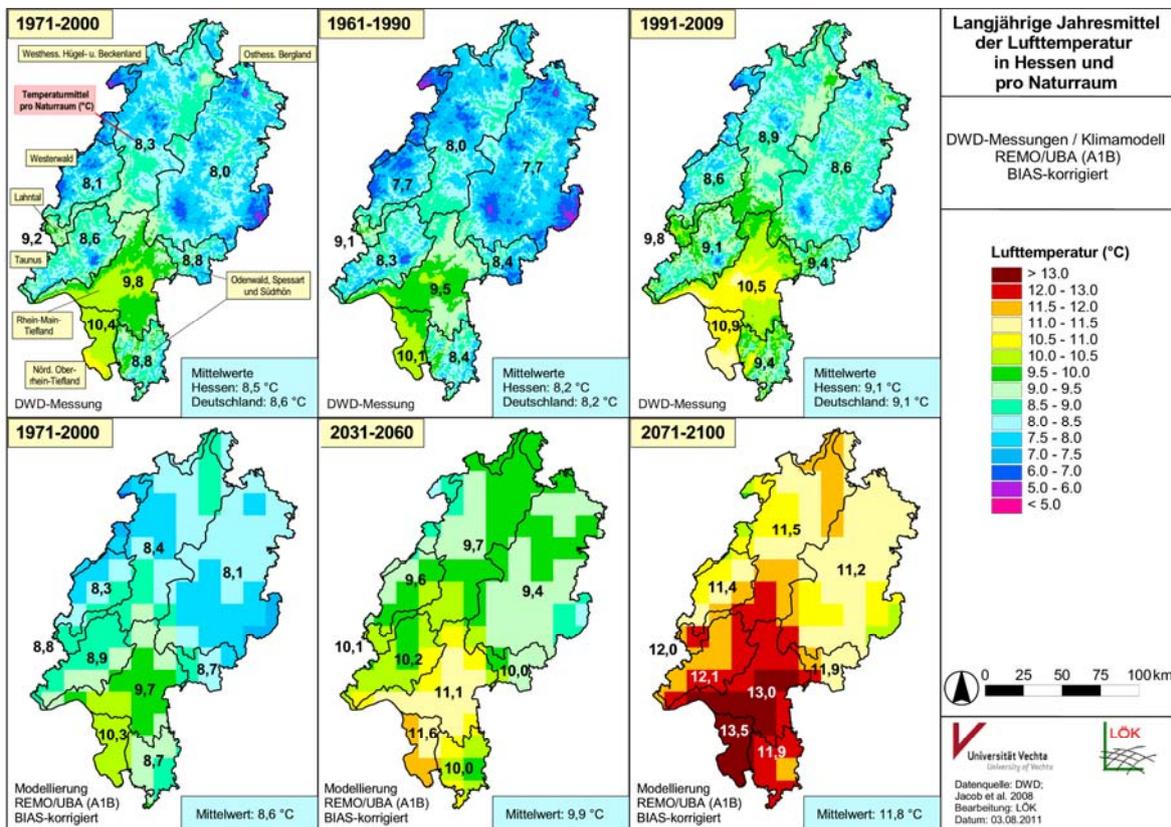


Abb. 6b: Langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / REMO/UBA A1B, BIAS-korrigiert)

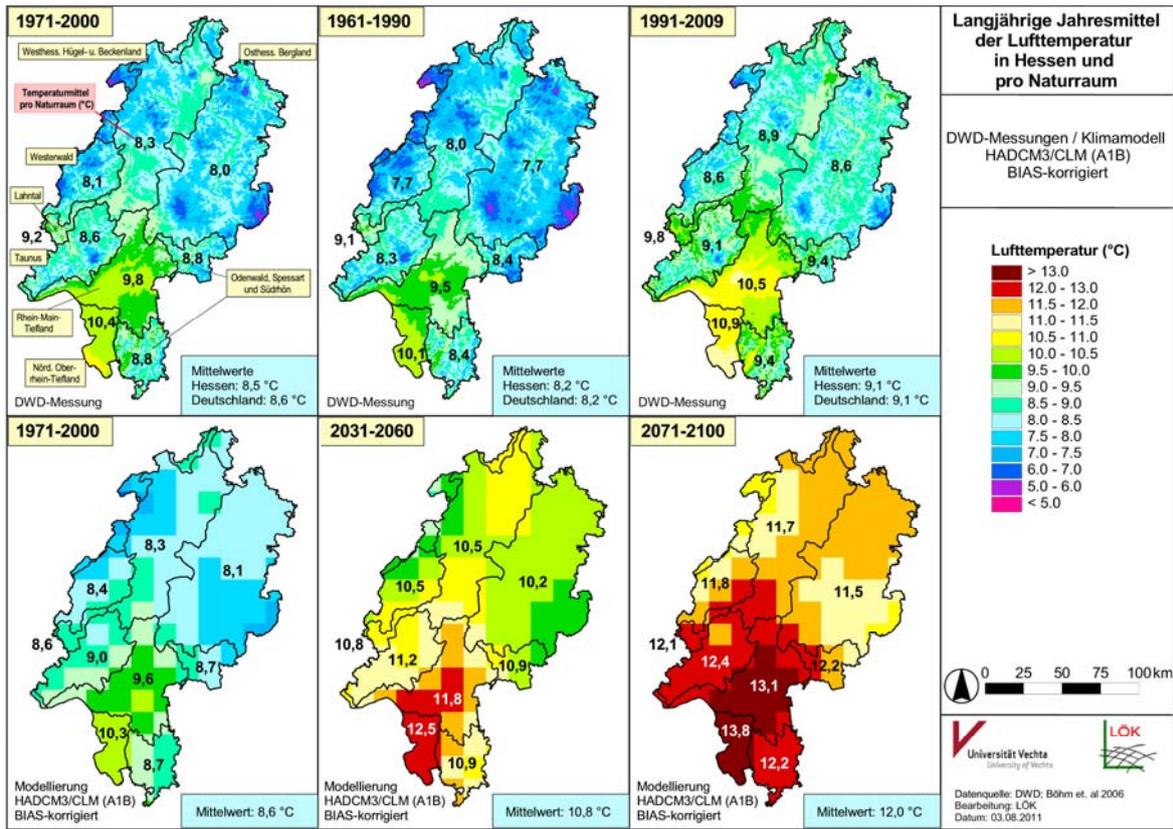


Abb. 6c: Langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / HADCM3/CLM A1B, BIAS-korrigiert)

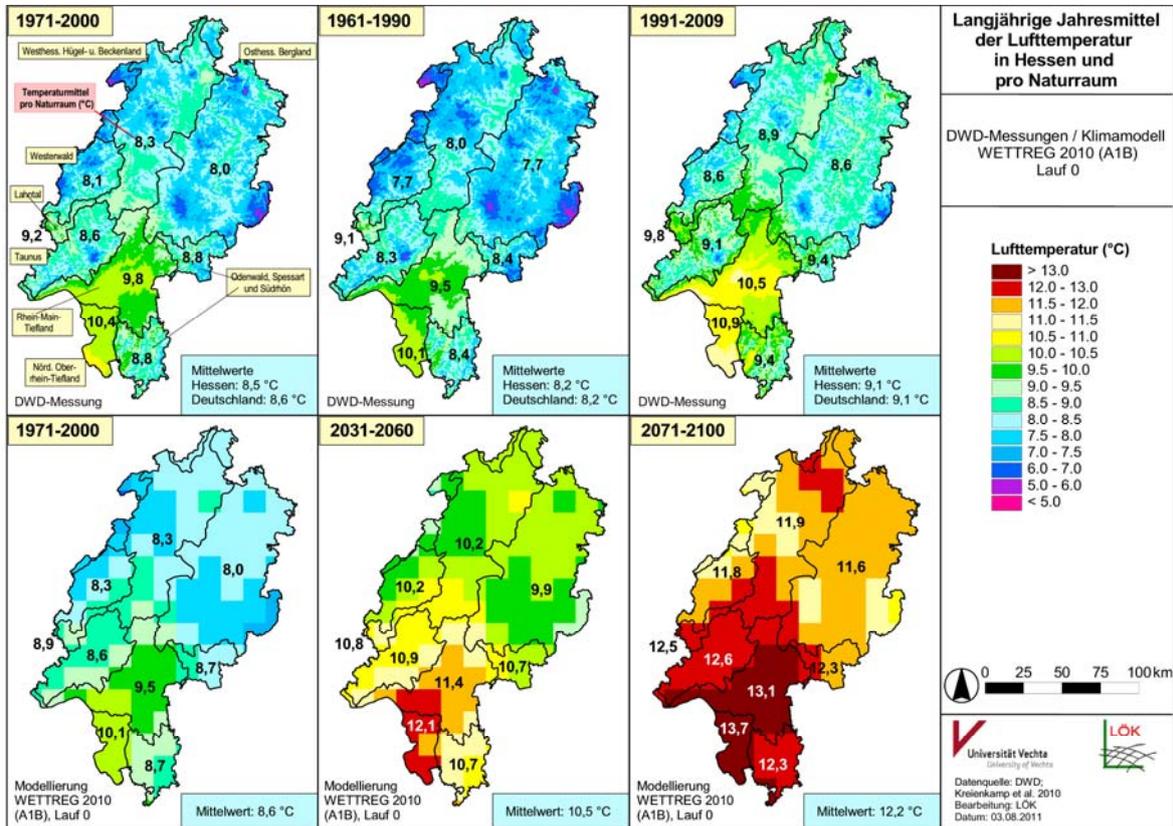


Abb. 6d: Langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / WETTREG 2010 A1B, Lauf 0)

Ein klareres Bild hinsichtlich der Stärke des Temperaturanstiegs in den verschiedenen Naturräumen Hessens lässt sich aus den Differenzkarten zur Lufttemperatur ablesen (Abb. 7). Demnach ist in Hessen ein relativ gleichmäßiger Temperaturanstieg festzustellen. Einzelne „Hotspots“ mit starken Temperaturzunahmen treten dabei sowohl in niedrigeren als auch in höheren Lagen auf. Gut zu erkennen ist die Zunahme der Erwärmung in der jüngeren Vergangenheit (Vergleich der Zeiträume 1991-2009 und 1971-2000), die mit 0,6 °C doppelt so hoch ausfällt wie die Erwärmung zwischen den Zeiträumen 1971-2000 und 1961-1990 (+0,3 °C). Für den Vergleich der Klimanormalperiode 1961-1990 mit dem Zeitraum 1991-2009 fiel demnach der durchschnittliche Temperaturanstieg mit 0,7 °C im Lahntal am niedrigsten aus, während er mit 1,0 °C im Odenwald, im Spessart und der Südrhön sowie in der Rhein-Main-Tiefebene am höchsten war.

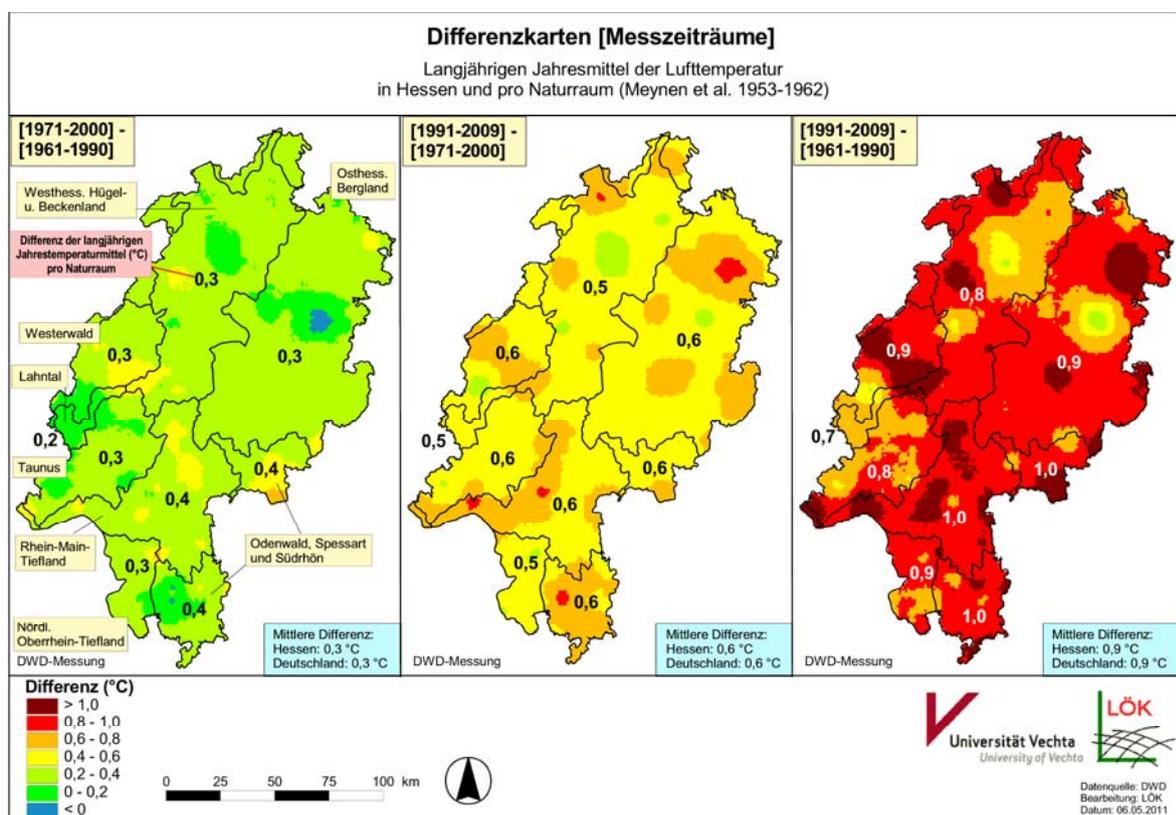


Abb. 7: Differenzkarten der gemessenen langjährigen Jahrestemperaturmittel in Hessen und pro Naturraum

Einen zusammenfassenden Überblick über die gemessene und anhand der vier Klimamodelle prognostizierte Entwicklung der Lufttemperaturen in Hessen von 1961 bis 2100 liefert Abbildung 8. Hier sind die für die jeweiligen Zeiträume langjährig gemittelten Jahresdurchschnittstemperaturen aufgetragen. Für den Referenzzeitraum 1971-2000 sind die Durchschnittstemperaturen der Klimaprojektionen so ähnlich, dass sie graphisch nicht mehr unterscheidbar sind und nur ein Symbol zu erkennen ist. Wie zuvor bereits ausgeführt, ist deutlich abzulesen, dass für den Zeitraum 2031-2060 die Durchschnittstemperaturen der Projektionen ECHAM5/CLM und REMO/UBA nahezu identisch sind und um rd. 1 °C niedriger

ausfallen als die Werte von HADCM3/CLM und WETTREG 2010 (Lauf 0). Im Zeitraum 2071-2100 steigen die modellierten Lufttemperaturen noch einmal deutlich um 1-1,5 °C an, wobei die Unterschiede zwischen den einzelnen Klimaprojektionen geringer werden.

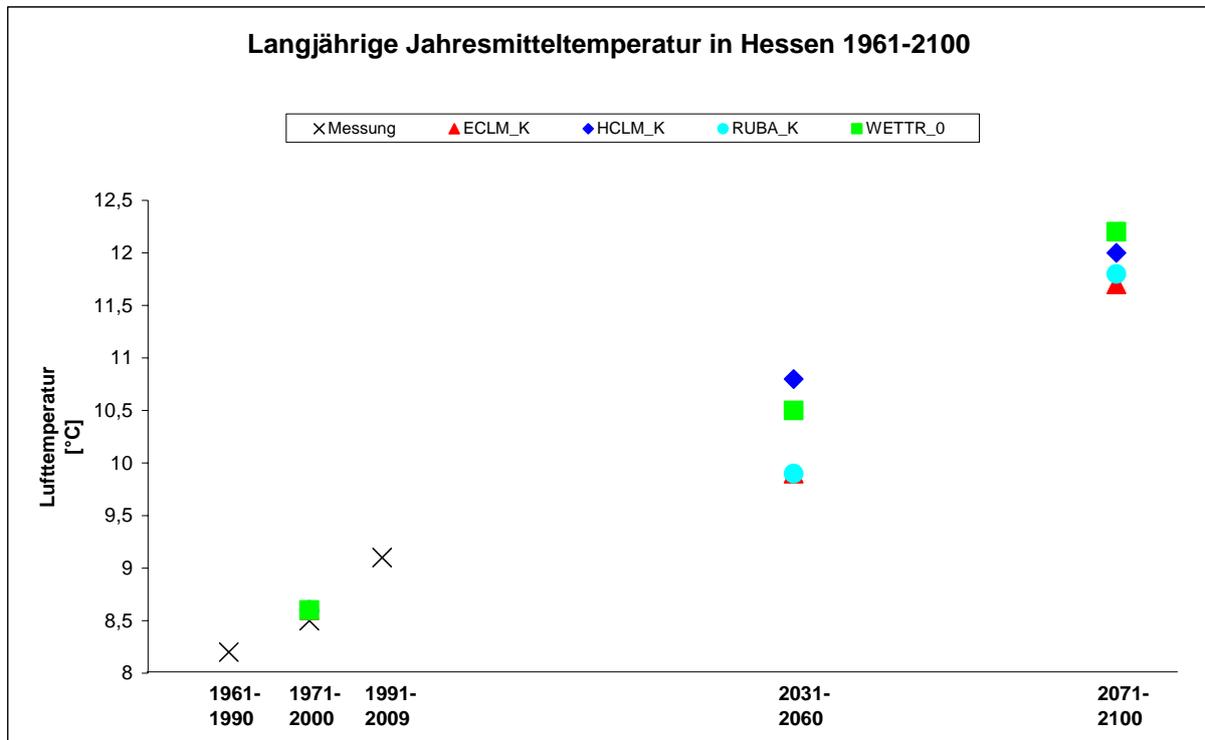


Abb. 8: Langjährige Jahresmitteltemperatur in Hessen 1961-2100 pro Klimamodell und DWD-Messung

Abbildung 9 enthält zusätzlich Angaben zur Variabilität der projizierten Temperaturwerte innerhalb der einzelnen Klimamodelle für das Emissionsszenario A1B.

Variabilität der langjährigen mittleren Jahresdurchschnittstemperaturen in Hessen für die Zeiträume 1971-2000, 2031-2060 und 2071-2100 je Klimamodell

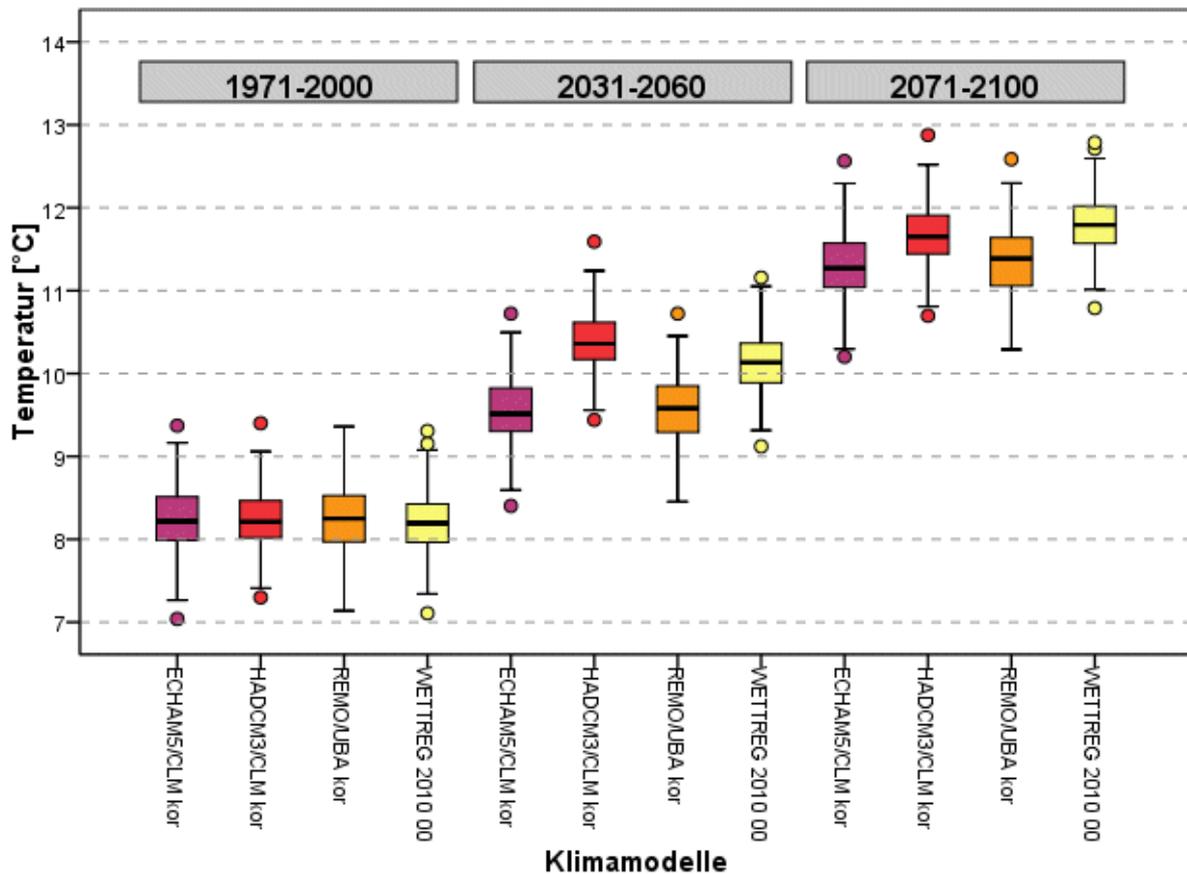


Abb. 9: Variabilität der langjährigen mittleren Jahresdurchschnittstemperaturen in Hessen für die Zeiträume 1971-2000, 2031-2061 und 2071-2100 je Klimamodell

4.2 Phasenauswahl

Die Auswahl repräsentativer Phänophasen aus einer Gesamtmenge von 270 Phasen erfolgte aufgrund folgender Kriterien:

- **Vorauswahl:** Leit- bzw. Ersatzphase, zusätzlich Obst- und Weinphasen, Abdeckung möglichst vieler verschiedener Vegetationsstraten, Vorkommen der Phase deutschland- und hessenweit;
- **zeitliche Repräsentanz** (Phasen mit ausreichend vielen Standorten mit vollständigen Datenreihen);
- **räumliche Repräsentanz** (Phasen mit möglichst gleichmäßig in ganz Hessen verteilten Standorten).

Vorauswahl

Die Auswahl von für die phänologische Entwicklung repräsentativen Phänophasen orientierte sich zunächst an den vom DWD festgelegten Leit- und Ersatzphasen (Kap. 3.2.1). Aufgrund ihrer wirtschaftlichen Bedeutung wurden zusätzlich Phänophasen von Obst und Weinreben berücksichtigt. Des Weiteren

ren wurde angestrebt, für jede phänologische Jahreszeit möglichst die drei Vegetationsstraten Baumschicht, Strauchschicht und Krautschicht mit mindestens einer Phänophase abzudecken (Rosenkranz 1951). Schließlich sollten die auszuwählenden Phänophasen sowohl in der gesamten Bundesrepublik Deutschland als auch in Hessen flächendeckend vorkommen. Alle Phänophasen, die diese Vorauswahlkriterien erfüllten, wurden bezüglich der im Folgenden erläuterten weiteren Kriterien geprüft.

Zeitliche Repräsentanz

Sämtliche phänologischen Beobachtungsstationen wurden daraufhin überprüft, ob eine ausreichende Anzahl von Beobachtungswerten je Zeitraum (1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009) vorlag. Für jede Klimaperiode sollten in mindestens 90 % der Erhebungsjahre Beobachtungen durchgeführt worden sein (Englert et al. 2008, Schröder et al. 2005, 2007, 2008). Das entspricht einer Mindestanzahl von 27 Jahren für die Zeiträume 1961-1990 und 1971-2000 sowie von 17 Jahren für den Zeitraum für 1991-2009. Wären nur solchen Standorte ausgewählt worden, für die in jedem Erhebungsjahr eine Beobachtung durchgeführt wurde, hätten zwischen vier bis fünfmal weniger Standorte für die Auswertung zur Verfügung gestanden, was zu einer deutlichen Verschlechterung der Aussagekraft und Belastbarkeit der festgestellten statistischen Beziehungen geführt hätte.

Räumliche Repräsentanz

Eine Phänophase galt im Rahmen der vorliegenden Arbeit als räumlich repräsentativ, wenn eine ausreichende und hinreichend im Raum verteilte Anzahl an Stationen mit einer zeitlichen Repräsentanz von mindestens 90 % pro Phase gegeben war. Dies wurde qualitativ im GIS durch Visualisierung der Beobachtungsstandorte überprüft.

Sobald eine Phase eine der o. g. Kriterien nicht erfüllte, wurde diese für die weitere Auswertung verworfen. Konnte aufgrund dieses Vorgehens eine Leit- oder Ersatzphase nicht ausgewählt werden, so wurde eine für die entsprechende phänologische Jahreszeit charakteristische Ersatzphase gewählt, die diese drei Kriterien erfüllte. Um sortenbedingte Einflüsse bei der Analyse der phänologischen Entwicklung zu vermeiden, wurden hierfür ausschließlich Phasen von Wildpflanzen verwendet. Ferner wurde bei der Auswahl der Ersatzphasen denjenigen Phasen Vorrang gewährt, welche den frühesten Eintritt innerhalb ihrer jeweiligen phänologischen Jahreszeit aufwiesen (Kap. 3.2.1). Weiterhin wurden solche Phasen bevorzugt, deren Ansprache durch den Beobachter möglichst einfach ist (z.B. Vermeidung von Verwechslungen, Auftreten von Bastarden, schwieriges Erkennen eines Phasenbeginns) (DWD 1991). Stammt sowohl Leit- als auch Ersatzphase einer phänologischen Jahreszeit aus den gleichen Vegetationsstraten, wurde versucht, eine weitere Phänophase aus einer fehlenden Vegetationsschicht zu berücksichtigen. Auf diese Weise lagen für jede phänologische Jahreszeit mindestens zwei Phasen vor,

im Idealfall drei, die jeweils eine der drei Vegetationsstraten abdeckten. Ausnahmen bildeten der Spätherbst sowie der Winter, da für diese phänologischen Jahreszeiten lediglich die jeweiligen Leitphasen die Auswahlkriterien erfüllten.

Insgesamt wurden nach dieser Vorgehensweise 35 Phänophasen ausgewählt (11 Leitphasen, 6 Ersatzphasen, 7 weitere Phasen von wild wachsenden Pflanzen, 8 Phasen von Obstgewächsen, 3 Phasen von Weinreben) und mit den zuvor beschriebenen Methoden weiter ausgewertet (Tabelle 3).

Tab. 3: Phasenauswahl zur Untersuchung der phänologischen Entwicklung in Hessen

Phasen ID	Pflanze	Entwicklungsstadium	Phasen- ken- nung	Vegetationsstraten	Phasenrang	Phänologische Jahreszeit
Wildwachsende Pflanzen						
1	Hasel	Beginn der Blüte	B	Strauch- / Baumschicht	Leitphase	Vorfrühling
2	Schneeglöckchen	Beginn der Blüte	B	Krautschicht	Ersatzphase	Vorfrühling
6	Forsythie	Beginn der Blüte	B	Strauchschrift	Leitphase	Erstfrühling
52	Stachelbeere	Beginn der Blattentfaltung	BO	Strauchschrift	Ersatzphase	Erstfrühling
7	Roskastanie	Beginn der Blattentfaltung	BO	Baumschicht		Erstfrühling
115	Busch-Windröschen	Beginn der Blüte	B	Krautschicht		Erstfrühling
62	Apfel	Beginn der Blüte	B	Baumschicht	Leitphase	Vollfrühling
13	Stiel-Eiche	Beginn der Blattentfaltung	BO	Baumschicht	Ersatzphase	Vollfrühling
15	Flieder	Beginn der Blüte	B	Strauchschrift		Vollfrühling
19	Wiesen-Fuchsschwanz	Beginn der Vollblüte	AB	Krautschicht		Vollfrühling
18	Schwarzer Holunder	Beginn der Blüte	B	Strauchschrift	Leitphase	Frühsommer
123	Robinie	Beginn der Blüte	B	Baumschicht	Ersatzphase	Frühsommer
20	Wiesen-Knäulgrass	Beginn der Vollblüte	AB	Krautschicht		Frühsommer
64	Sommer-Linde	Beginn der Blüte	B	Baumschicht	Leitphase	Hochsommer
100	Rote Johannisbeere	Beginn der Pflückreife	F	Strauchschrift	Ersatzphase	Hochsommer
109	Apfel (frühreifend)	Beginn der Pflückreife	F	Baumschicht	Leitphase	Spätsommer
65	Heide-Kraut	Beginn der Blüte	B	Krautschicht		Spätsommer
67	Schwarzer Holunder	Erste reife Früchte	F	Strauchschrift	Leitphase	Frühherbst
177	Hunds-Rose	Erste reife Früchte	F	Strauchschrift		Frühherbst
72	Stiel-Eiche	Erste reife Früchte	F	Baumschicht	Leitphase	Vollherbst
68	Roskastanie	Erste reife Früchte	F	Baumschicht	Ersatzphase	Vollherbst
73	Stiel-Eiche	Blattverfärbung	BV	Baumschicht	Leitphase	Spätherbst
226	Stiel-Eiche	Blattfall	BF	Baumschicht	Leitphase	Winter
94	Winterweizen	Beginn des Auflaufens	AU	Krautschicht	Leitphase	Winter
Obst						
54	Süßkirsche	Beginn der Blüte	B	Baumschicht		Erstfrühling
56	Sauerkirsche	Beginn der Blüte	B	Baumschicht		Erstfrühling
60	Birne	Beginn der Blüte	B	Baumschicht		Erstfrühling
102	Süßkirsche (frühreifend)	Beginn der Pflückreife	F	Baumschicht		Hochsommer
103	Süßkirsche (spätreifend)	Beginn der Pflückreife	F	Baumschicht		Hochsommer
104	Sauerkirsche	Beginn der Pflückreife	F	Baumschicht		Hochsommer
107	Birne (frühreifend)	Beginn der Pflückreife	F	Baumschicht		Frühherbst
108	Birne (spätreifend)	Beginn der Pflückreife	F	Baumschicht		Vollherbst
Weinreben						
171	Weinrebe (Müller-Thurgau)	Beginn des Austriebs	A	Strauchschrift		Erstfrühling
172	Weinrebe (Müller-Thurgau)	Beginn der Blüte	B	Strauchschrift		Frühsommer
205	Weinrebe (Müller-Thurgau)	Lese	L	Strauchschrift		Vollherbst

4.3 Deskriptive Statistik

4.3.1 Phänologische Entwicklung in Hessen und Deutschland von 1961-2009

Einhergehend mit dem Anstieg der Lufttemperatur in Deutschland und Hessen zwischen 1961 und 2009 (Kap. 4.1) wurde für die Mehrzahl der untersuchten Phasen im langjährigen Mittel eine Verfrühung des Eintritts festgestellt. Exemplarisch ist dies in Abbildung 10 für die Haselblüte (Phase 1) dargestellt. Im deutschlandweiten langjährigen Mittel (Abb. 10, oben) trat demnach die Haselblüte im Referenzzeitraum 1971-2000 fast sechs Tage früher ein als während der Klimanormalperiode 1961-1990. Die Differenz zwischen der Klimanormalperiode und dem jüngsten langjährigen Messzeitraum 1991-2005 betrug rd. elf Tage. Für Hessen war die Verfrühung der Haselblüte noch deutlicher: So blühte die Hasel im Mittel des jüngsten Messzeitraums 1991-2009 fast zwei Wochen früher als noch während der Klimanormalperiode 1961-1990 (Abb. 10, unten). Die Histogramme der übrigen untersuchten Phänophasen befinden sich in Anhang 2.

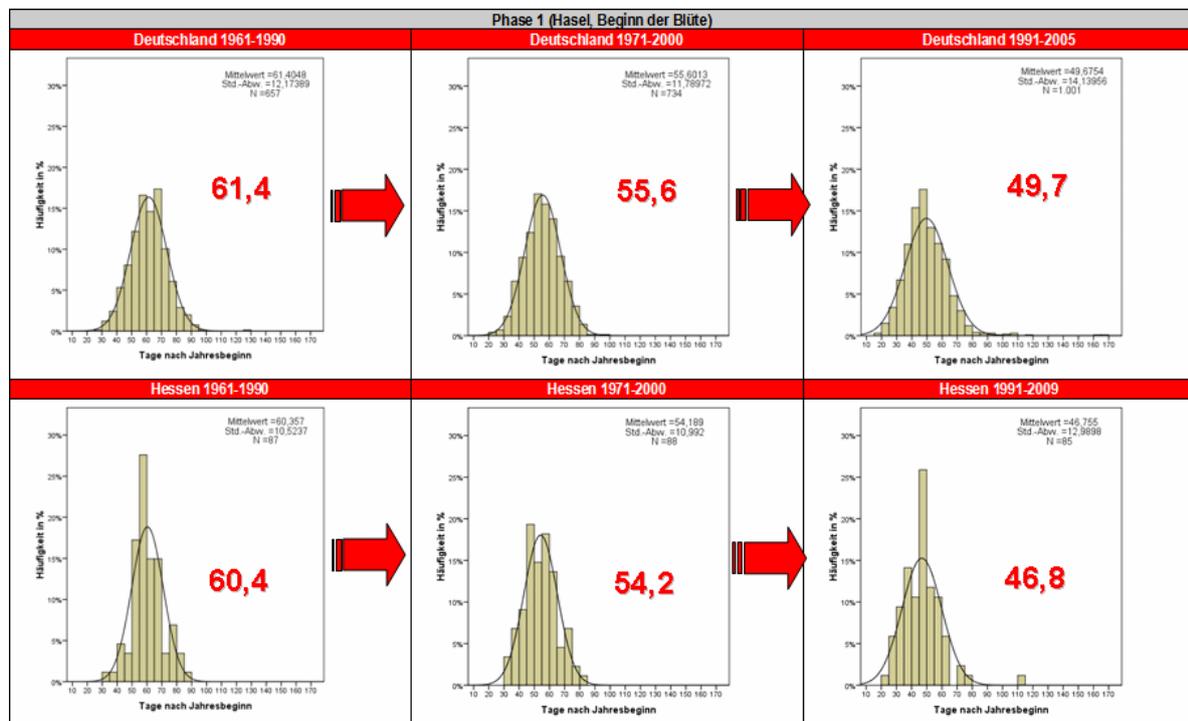


Abb. 10: Histogramme zum Blühbeginn der Hasel (Phase 1) in Deutschland (oben) und Hessen (unten) für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2005 bzw. 2009

Mit der Verschiebung der phänologischen Phasen verschieben sich auch die phänologischen Jahreszeiten, was anhand der phänologischen Kalender (Abb. 11a und b) abzulesen ist. So begannen vom Beginn der Vegetationsperiode (Vorfrühling) an sämtliche phänologischen Jahreszeiten bis hin zum Vollherbst im langjährigen Mittel des Zeitraums 1991-2009 (bzw. 2005 bei den deutschlandweiten Daten) früher als noch in der Klimanormalperiode 1961-1990. Dies trifft sowohl für Hessen (Abb. 11b) als auch für ganz Deutschland (Abb. 11a) zu. Für das Ende der Vegetationsperiode war eine gegenläufige

Entwicklung zu beobachten. So verschob sich der Beginn des Spätherbstes und des phänologischen Winters hin zum Jahresende, da die für diese Jahreszeiten repräsentativen Leitphasen (Blattverfärbung bzw. Blattfall der Stiel-Eiche) im langjährigen Vergleich der drei betrachteten Zeiträume im Mittel später eintraten. Diese Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten führte folglich zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode.

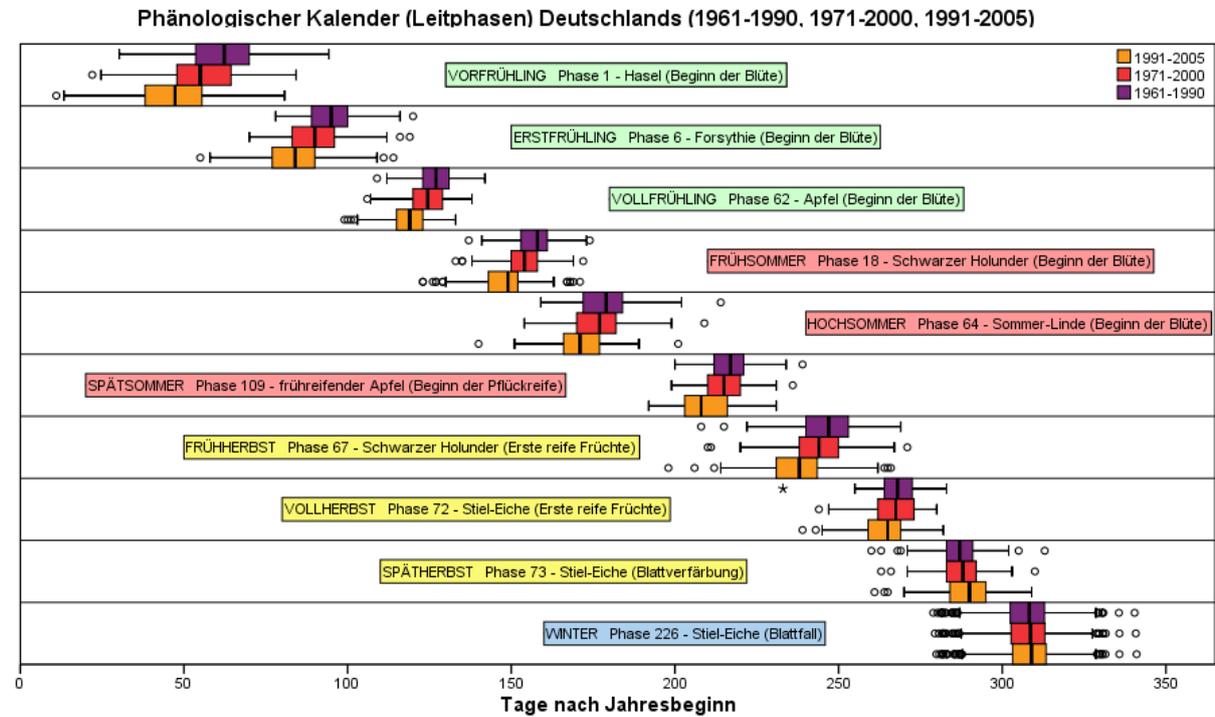


Abb. 11a: Phänologischer Kalender Deutschlands für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1991-2005

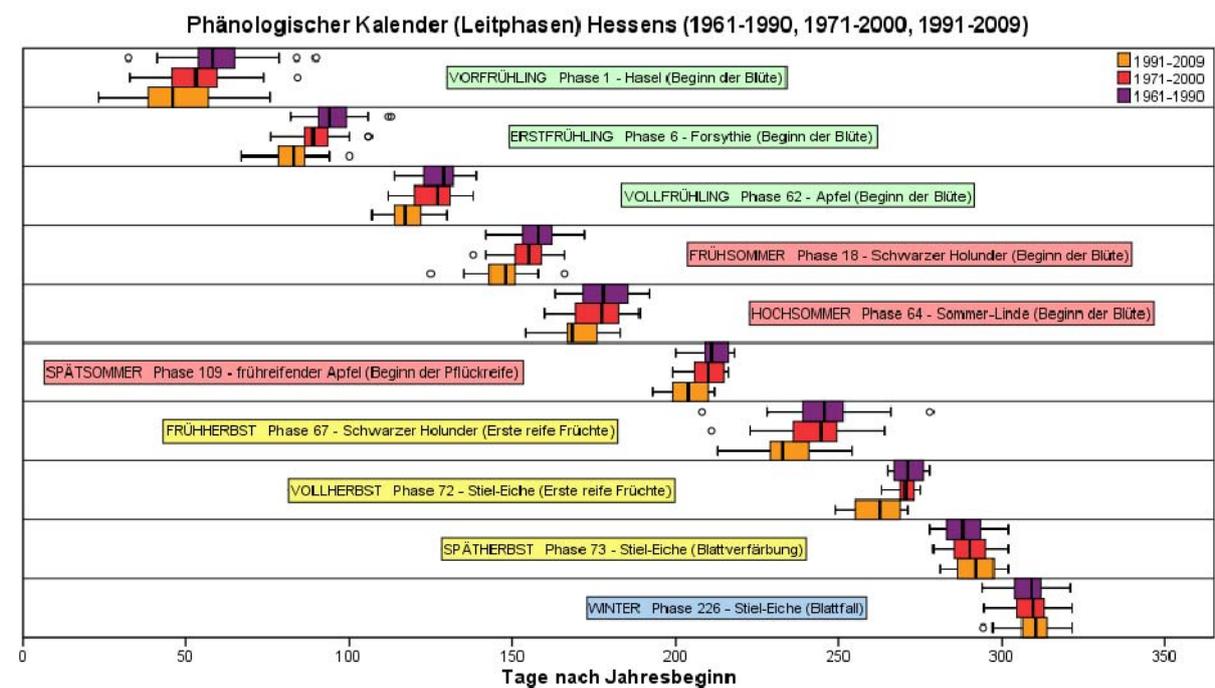


Abb. 11b: Phänologischer Kalender Hessens für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000, 1991-2009

Für alle ausgewählten Phänophasen wurden jeweils für Deutschland und Hessen (Anhang 3) deskriptiv-statistische Kennwerte für jeden der drei Zeiträume berechnet. Die Auswertung ergab, dass sich die mittleren Phaseneintrittstermine bei 31 Phänophasen im Zeitraum 1991-2009 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 deutlich zum Jahresbeginn hin verschoben hatten (Tab. 4). Lediglich die Phasen 73 und 226 (Blattverfärbung bzw. Blattfall der Stiel-Eiche) sowie 107 (Pflückreife der frühreifenden Birne) wiesen eine geringe Verspätung des Phaseneintritts von wenigen Tagen auf. Bei diesen Phasen handelt es sich um Herbst- bzw. Winterphasen.

Tab. 4: Langjährig gemittelte Phaseneintritte in Hessen (1961-1990, 1971-2000, 1991-2009) und deren Verschiebung zwischen 1961-1990 und 1991-2009 in Hessen und Deutschland

Phase	Pflanze	Ke	1961-1990	1971-2000	1991-2009	Diff. HE 6190-9109	Diff. DE 6190-9109
Leit-/Ersatzphasen und wildwachsende Pflanzen							
1	Hasel	B	59,6	54,2	46,0	-13,6	-12,6
2	Schneeglöckchen	B	60,1	56,3	51,1	-9,0	-9,3
6	Forsythie	B	95,0	91,6	84,0	-11,0	-9,4
52	Stachelbeere	BO	96,7	93,6	87,3	-9,4	-8,0
7	Rosskastanie	BO	112,9	110,2	104,9	-8,0	-6,1
115	Busch-Windröschen	B	93,3	93,6	87,3	-6,1	-6,8
62	Apfel	B	126,7	124,5	116,3	-10,4	-8,6
13	Stiel-Eiche	BO	127,6	126,2	119,6	-8,0	-6,5
15	Flieder	B	133,8	132,8	125,0	-8,7	-6,9
19	Wiesen-Fuchsschwanz	AB	143,8	141,2	134,9	-8,9	-6,4
18	Schwarzer Holunder	B	157,4	154,6	147,1	-10,4	-8,4
123	Robinie	B	148,6	152,4	145,5	-3,2	-6,4
20	Wiesen-Knäulgrass	AB	155,7	153,9	148,6	-7,1	-4,6
64	Sommer-Linde	B	179,9	177,3	170,4	-9,5	-8,3
100	Rote Johannisbeere	F	187,7	185,5	180,0	-7,7	-6,3
109	Apfel (frühreifend)	F	218,1	219,5	212,6	-5,6	-5,3
65	Heide-Kraut	B	225,0	225,4	220,5	-4,5	-2,8
67	Schwarzer Holunder	F	245,4	242,8	234,9	-10,6	-8,5
177	Hunds-Rose	F	253,0	251,0	244,5	-8,5	-8,5
72	Stiel-Eiche	F	270,9	268,3	262,0	-8,9	-5,4
68	Rosskastanie	F	265,1	264,4	262,6	-2,6	-3,0
73	Stiel-Eiche	BV	289,0	288,5	290,6	1,6	1,5
94	Winterweizen	AU	300,5	299,1	293,7	-6,9	-5,3
226	Stiel-Eiche	BF	309,1	309,6	310,0	0,9	0,5
Obst							
54	Süßkirsche	B	114,9	113,6	108,9	-6,1	-5,9
56	Sauerkirsche	B	120,7	118,4	113,4	-7,3	-5,4
60	Birne	B	119,3	117,1	111,5	-7,8	-7,7
102	Süßkirsche (frühreifend)	F	180,7	177,3	169,4	-11,3	-2,9
103	Süßkirsche (spätreifend)	F	192,1	192,9	183,1	-9,0	-9,9
104	Sauerkirsche	F	203,2	200,7	192,8	-10,4	-8,2
107	Birne (frühreifend)	F	242,1	243,4	247,5	5,4	6,1
108	Birne (spätreifend)	F	278,1	274,4	268,5	-9,6	-9,9
Weinreben							
171	Weinrebe (Müller-Thurgau)	A	124,1	122,0	107,6	-16,5	-13,3
172	Weinrebe (Müller-Thurgau)	B	169,9	167,2	158,1	-11,8	-6,7
205	Weinrebe (Müller-Thurgau)	L	-	274,7	266,5	-	-

Für Phase 205 (Weinlese, Müller-Thurgau) konnte aufgrund fehlender Daten in der Klimanormalperiode 1961-1990 keine Differenz berechnet werden. Bei 24 von 31 Phasen, die im Mittel im Zeitraum 1991-2009 früher eintraten als in der Klimanormalperiode 1961-1990, waren die Verfrühungen des Phaseneintritts in Hessen stärker ausgeprägt als im bundesweiten Vergleich. Insgesamt betragen die Verfrühungen in Hessen im Durchschnitt aller betrachteten Phasen 8 Tage. Deutschlandweit lag die durchschnittliche Verfrühung dieser Phasen bei 6 Tagen. Die deutlichsten Verschiebungen hin zum Jahresbeginn wurden für Deutschland mit 13 Tagen für die Phasen 1 (Haselblüte) und 171 (Weinreben, Austrieb) und mit 10 Tagen für Phasen 103 (spät reifende Süßkirsche, Pflückreife) und 108 (spät reifende Birne, Pflückreife) ermittelt. Ebenfalls starke Verschiebungen zum Jahresbeginn (8 Tage und mehr) wurden für die Phasen 2, 52, 6, 62, 18, 64, 67, 177 und 104 berechnet. Auffällig war, dass es sich bei denjenigen Phasen mit starken Verfrühungen überwiegend um Leitphasen im Frühling und Sommer handelte. Im weiteren Jahresverlauf nahm die Stärke der Verfrühungen der Phaseneintritte ab. In Hessen wiesen ebenfalls die Phasen 171 (17 Tage) und 1 (14 Tage) die stärksten Verfrühungen für den mittleren Phasenbeginn auf. Daneben verfrühten sich eine Reihe weitere Phasen um 10 bis 12 Tage: Phase 1, 6, 62, 18, 64, 67, 102, 104, 108 und 172.

Die Abbildungen 12a und b verdeutlichen die beschriebene Phasenentwicklung für Hessen (Abb. 12a) und Deutschland (Abb. 12b). Gut zu erkennen ist hierbei, dass die Phasenverfrühungen zwischen den jüngeren Zeiträumen 1991-2009 und 1971-2000 bei fast allen betrachteten Phasen stärker ausgeprägt waren als zwischen den älteren Zeiträumen 1971-2000 und 1961-1990. Dieser Verlauf spiegelt die Entwicklung des Anstiegs der Lufttemperaturen wider (Kap. 4.1). Hier wurde im langjährigen Mittel eine stärker ausgeprägte Erwärmung zwischen den jüngeren Zeiträumen 1991-2009 und 1971-2000 gegenüber der Erwärmung zwischen den älteren Zeiträumen 1971-2000 und 1961-1990 festgestellt.

Phänologischer Kalender Hessens (1961-1990, 1971-2000, 1991-2009) für 34 ausgewählte Phasen

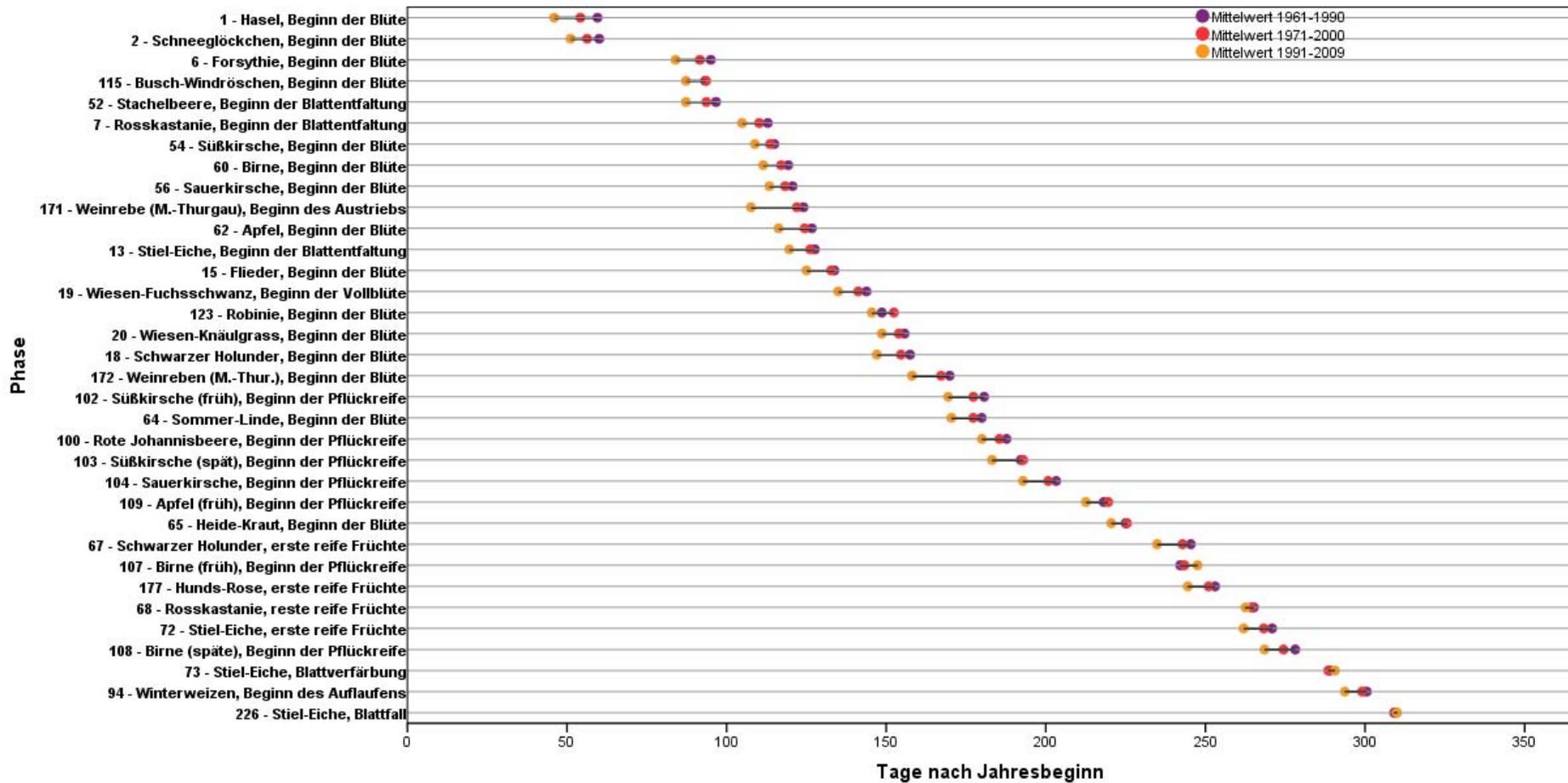


Abb. 12a: Phänologischer Kalender Hessens mit den langjährig gemittelten Eintrittsterminen von 34 Phasen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009

Phänologischer Kalender Deutschlands (1961-1990, 1971-2000, 1991-2005) für 34 ausgewählte Phasen

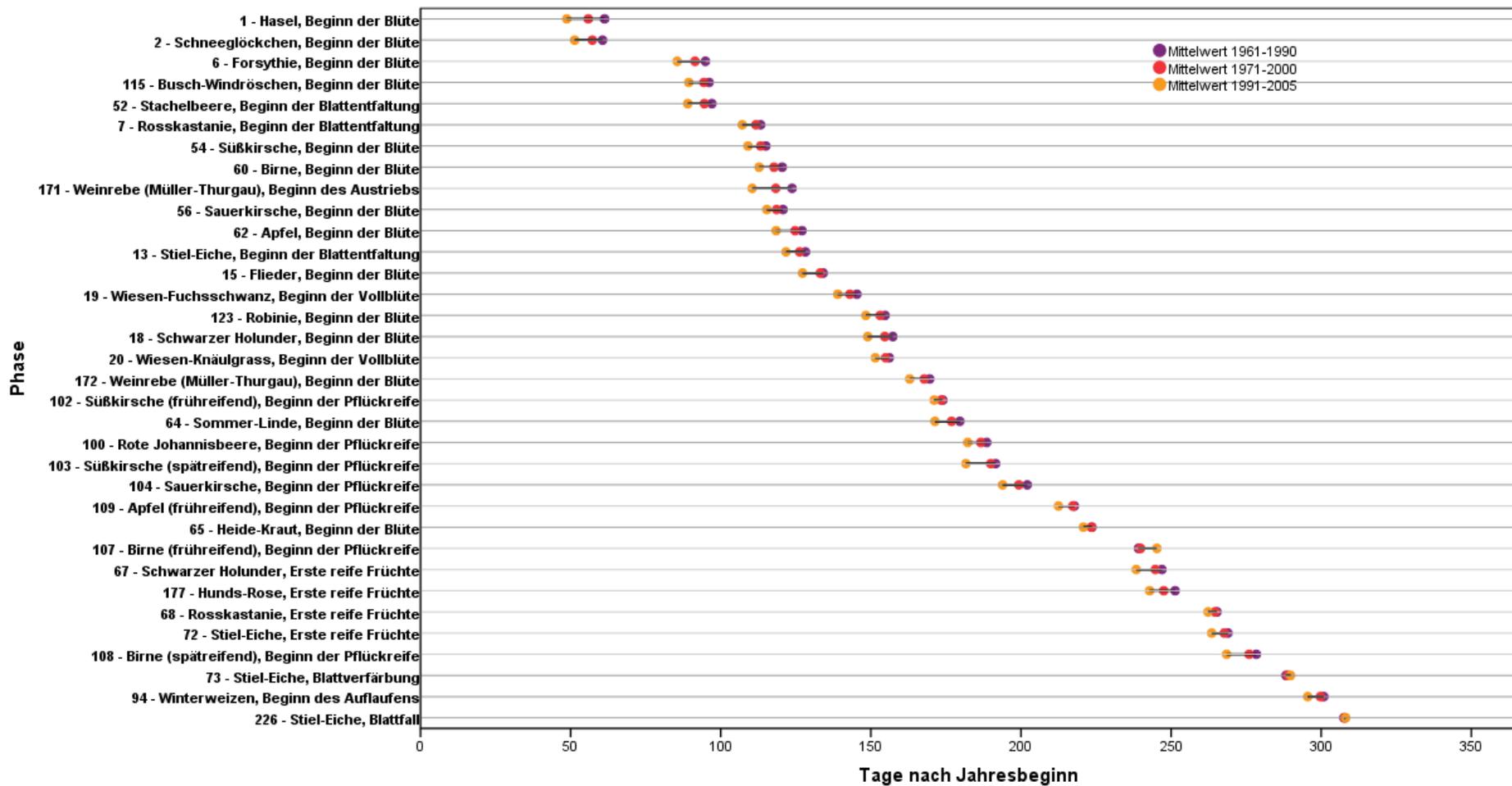


Abb. 12b: Phänologischer Kalender Deutschlands mit den langjährig gemittelten Eintrittsterminen von 34 Phasen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2005

Was bei der Betrachtung der langjährig gemittelten Phaseneintritte nicht erkennbar ist, wird anhand der für jede Phase berechneten Verlaufsdiagramme sichtbar. Abbildung 13 zeigt dies exemplarisch für den Beginn der Haselblüte (Phase 1). Die Verlaufsdiagramme der übrigen Phasen sind in Anhang 4 zu finden.

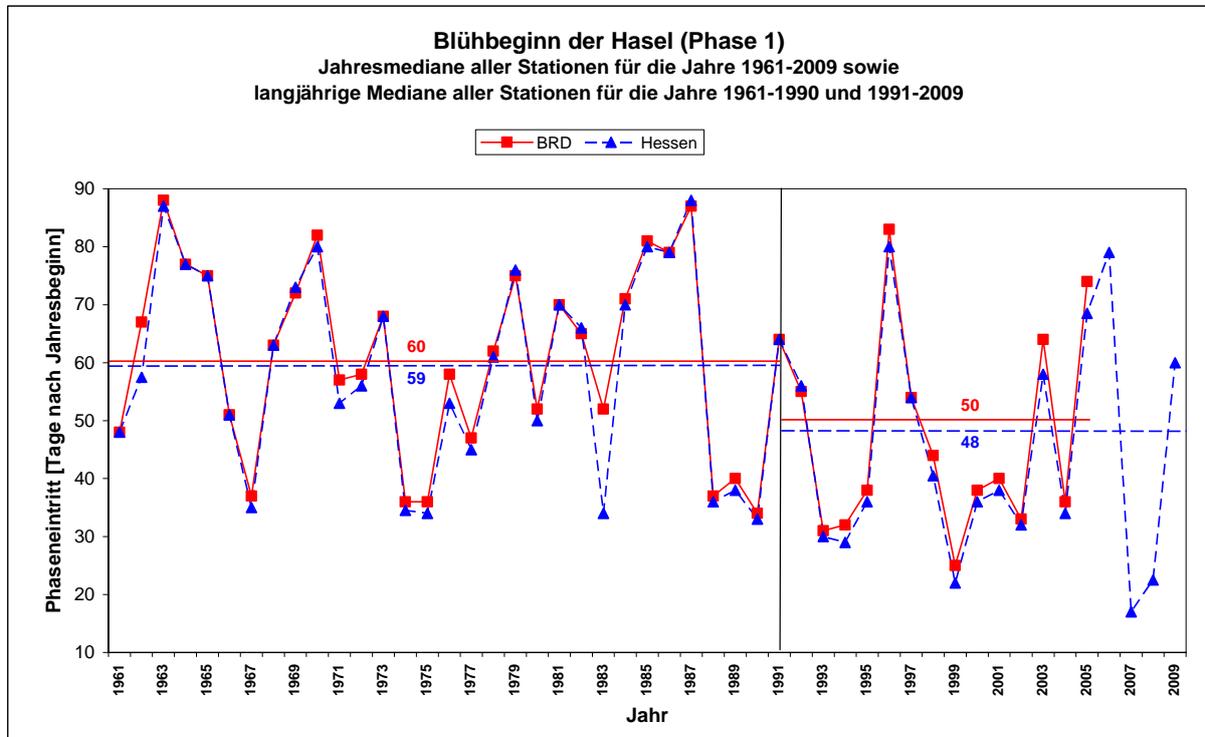


Abb. 13: Verlaufsdiagramm zum Blühbeginn der Hasel (Phase 1) in Deutschland und Hessen zwischen 1961 und 2005 (bzw. 2009).

Es zeigt sich, dass der Phasenbeginn in Einzeljahren starken Schwankungen unterliegt, wobei die Tendenzen des Phaseneintritts auf nationaler Ebene und auf Landesebene in den Einzeljahren eine hohe Übereinstimmung aufweisen. So trat beispielsweise die Haselblüte im Jahre 1988 im hessischen Landesmittel weit über einen Monat früher ein (+ 52 Tage) als im Vorjahr 1987 (deutschlandweit + 50 Tage). Abbildung 5 in Kapitel 4.1 ist zu entnehmen, dass das Jahr 1987 durch einen extrem kalten Winter gekennzeichnet war, während der darauf folgende Winter im Jahr 1988 überdurchschnittlich milde Temperaturen aufwies. Extremwerte in Einzeljahren sollten daher bei der Analyse der Auswirkungen klimatischer Veränderungen im Zuge des Klimawandels auf die Pflanzenphänologie stets unter Berücksichtigung der jährlichen natürlichen Schwankungen betrachtet werden. Für eine Bewertung von langfristigen Änderungen im Phasenbeginn muss daher anstelle von Einzeljahren ein längerer Zeitraum herangezogen werden. Häufig ist das Auftreten von Extremwerten an entsprechend extreme Umweltbedingungen (z.B. Temperaturanstieg) gekoppelt.

Der Vergleich der phänologischen Entwicklung im Jahresverlauf hat gezeigt, dass die stärksten Verfrühungen am Beginn des phänologischen Jahres auftraten. Die Abbildungen 14a und b verdeutlichen dies für die untersuchten Phasen in Hessen (Abb. 14a) und ganz Deutschland (Abb. 14b). Aufgetragen wurden hierfür die Differenzen der Phaseintrittstermine zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2005 (Deutschland) bzw. 1991-2009 (Hessen). Jeder im Diagramm aufgetragene Wert steht dabei für die jeweilige für alle Standorte in Hessen bzw. Deutschland gemittelte Abweichung im Beginn einer Phänophase. Statistisch signifikante ($p < 0,01$) Verfrühungen waren nicht nur für alle Frühjahrsphasen, sondern auch für die meisten Sommerphasen und einige Herbstphasen festzustellen. Im späteren Jahresverlauf waren die Verfrühungen bei einigen Phasen schwächer ausgeprägt. Im Spätherbst und im Winter waren sogar für einige Phasen leichte Verspätungen zu beobachten, was insgesamt zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode zum Jahresende führte.

Der Verlauf und vor allem die Veränderung des phänologischen Jahres ist gut anhand der entsprechenden phänologischen Uhren, die für Hessen (Abb. 15a) und Deutschland (Abb. 15b) berechnet wurden, abzulesen. Der Verlauf des phänologischen Jahres ist in den jeweiligen Uhren für jeden der drei Vergleichszeiträume in nach phänologischen Jahreszeiten segmentierten Ringen dargestellt (Kap. 3.2.1). Im Zentrum sind jeweils die kalendarischen Jahreszeiten abgebildet, der Wert in der Mitte steht für die Verlängerung der Vegetationsperiode im Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 1991-2005 (Deutschland) bzw. 1991-2009 (Hessen).

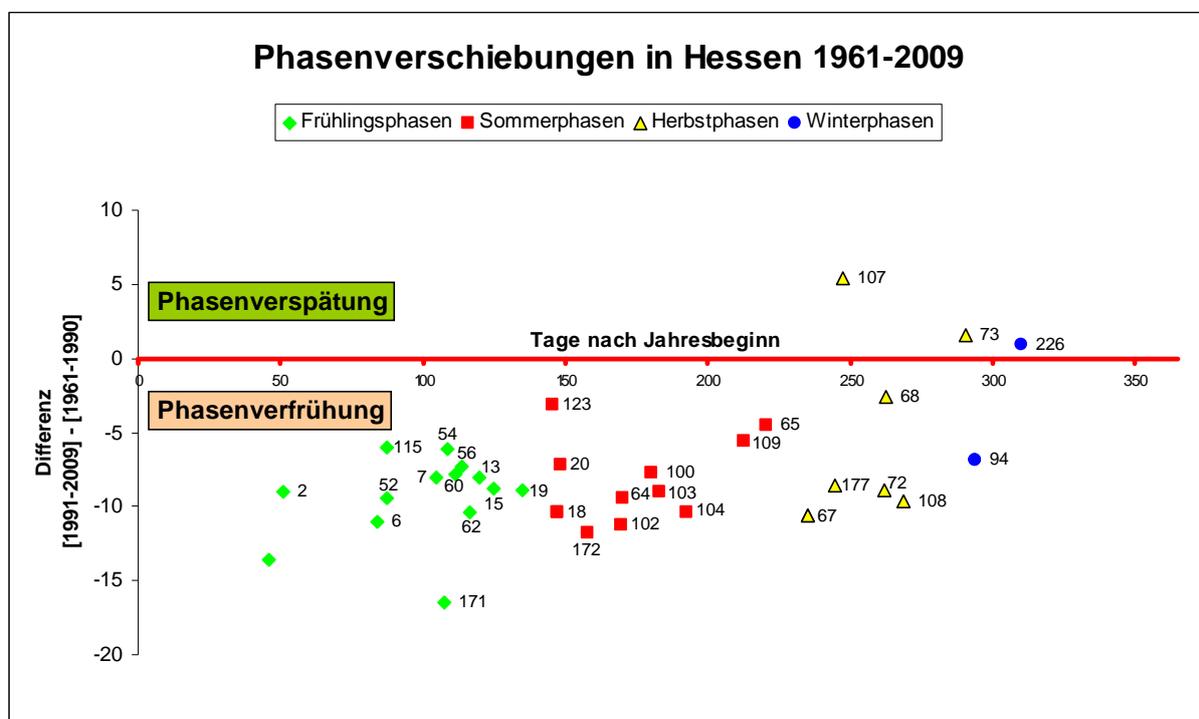


Abb. 14a: Phasenverschiebung in Hessen 1961-2009

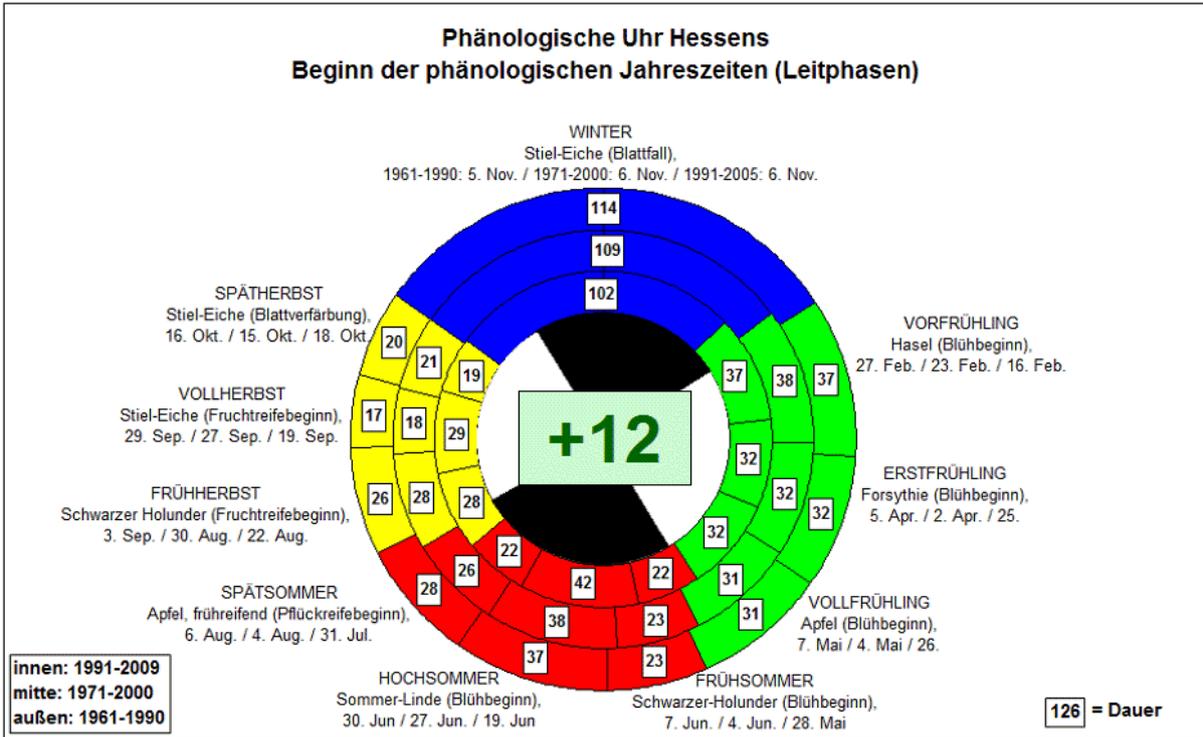


Abb. 15a: Phänologische Uhr für Hessen für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009

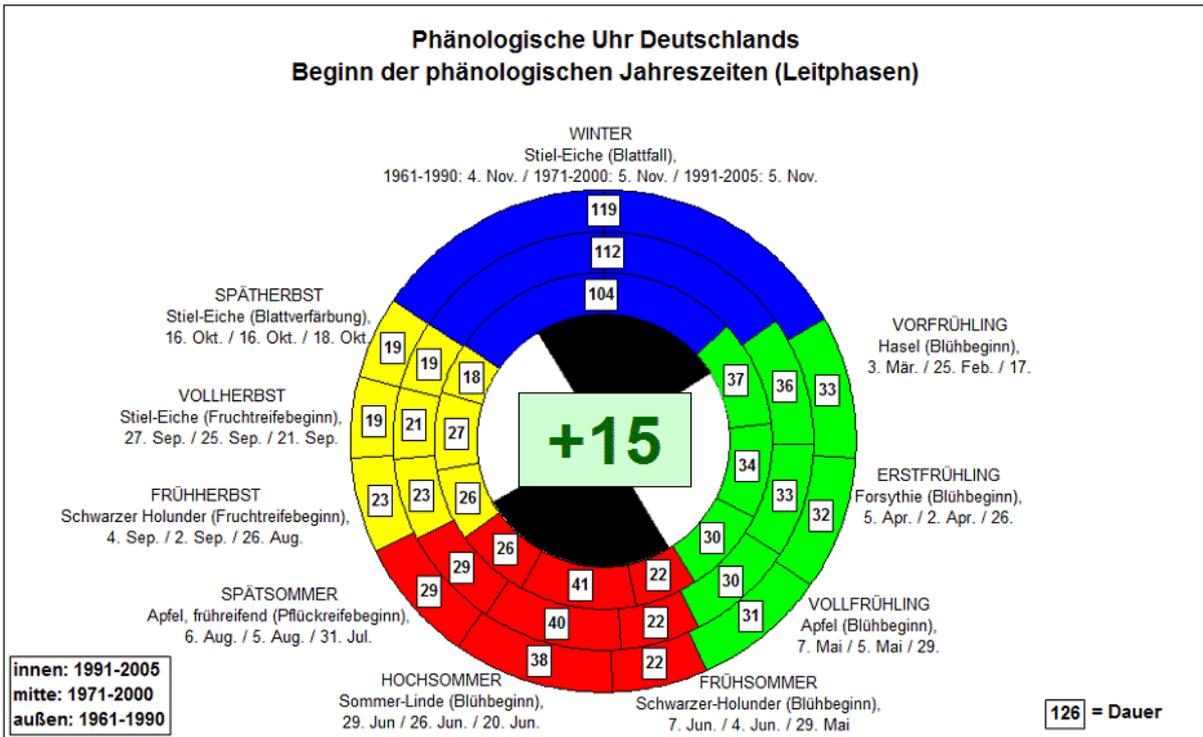


Abb. 15b: Phänologische Uhr für Deutschland für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2005

4.3.2 Naturräumlich differenzierte phänologische Entwicklung in Hessen von 1961-2009

Die pflanzenphänologische Entwicklung in den unterschiedlichen Naturräumen (Meynen et al. 1953-1962) in Hessen ergab deutliche regionale Unterschiede. Eine Verfrühung des Beginns der phänologischen Jahreszeiten war in allen Naturräumen auszumachen, fiel allerdings regional unterschiedlich stark aus (Abb. 16). Ebenso waren die Verschiebungen je nach phänologischer Jahreszeit unterschiedlich stark ausgeprägt. Die deutlichsten Verfrühungen traten im Lahntal (Naturraumhauptgruppe, NRHG, 310) und im Westerwald (NRHG 320) auf. Im tiefer gelegenen Lahntal war die Verfrühung der phänologischen Jahreszeiten besonders im jüngsten Zeitraum (1991-2009) auffällig. Am schwächsten ausgeprägt waren die Veränderungen im Nördlichen Oberrhein-Tiefland (NRHG 220) und im Taunus (NRHG 300). Die naturräumlichen Unterschiede lassen sich gut mit der jeweiligen Dauer der Vegetationsperioden zusammenfassen, deren Veränderung zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2009 in Abbildung 16 jeweils im Zentrum der phänologischen Uhren angegeben ist. So betrug die Verlängerung in vielen Naturräumen zwischen 10 und 12 Tagen (NRHG 230, 340, 350 und 140), in einigen Naturräumen sogar fast 3 Wochen (NRHG 320, NRHG 310). In allen Naturräumen war bis einschließlich zum Frühherbst eine Verfrühung der phänologischen Jahreszeiten zu erkennen. Im phänologischen Frühling waren die Verfrühungen am stärksten ausgeprägt, während ab dem Vollherbst nur geringe Verfrühungen festzustellen waren, im Spätherbst und im Winter sogar Verspätungen, was mit den Erkenntnissen aus der landesweiten Betrachtung (Kap. 4.3.1) übereinstimmt.

**Naturräumliche Differenzierung des Phasenbeginns in Hessen
anhand phänologischer Uhren für die Zeiträume
1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009**

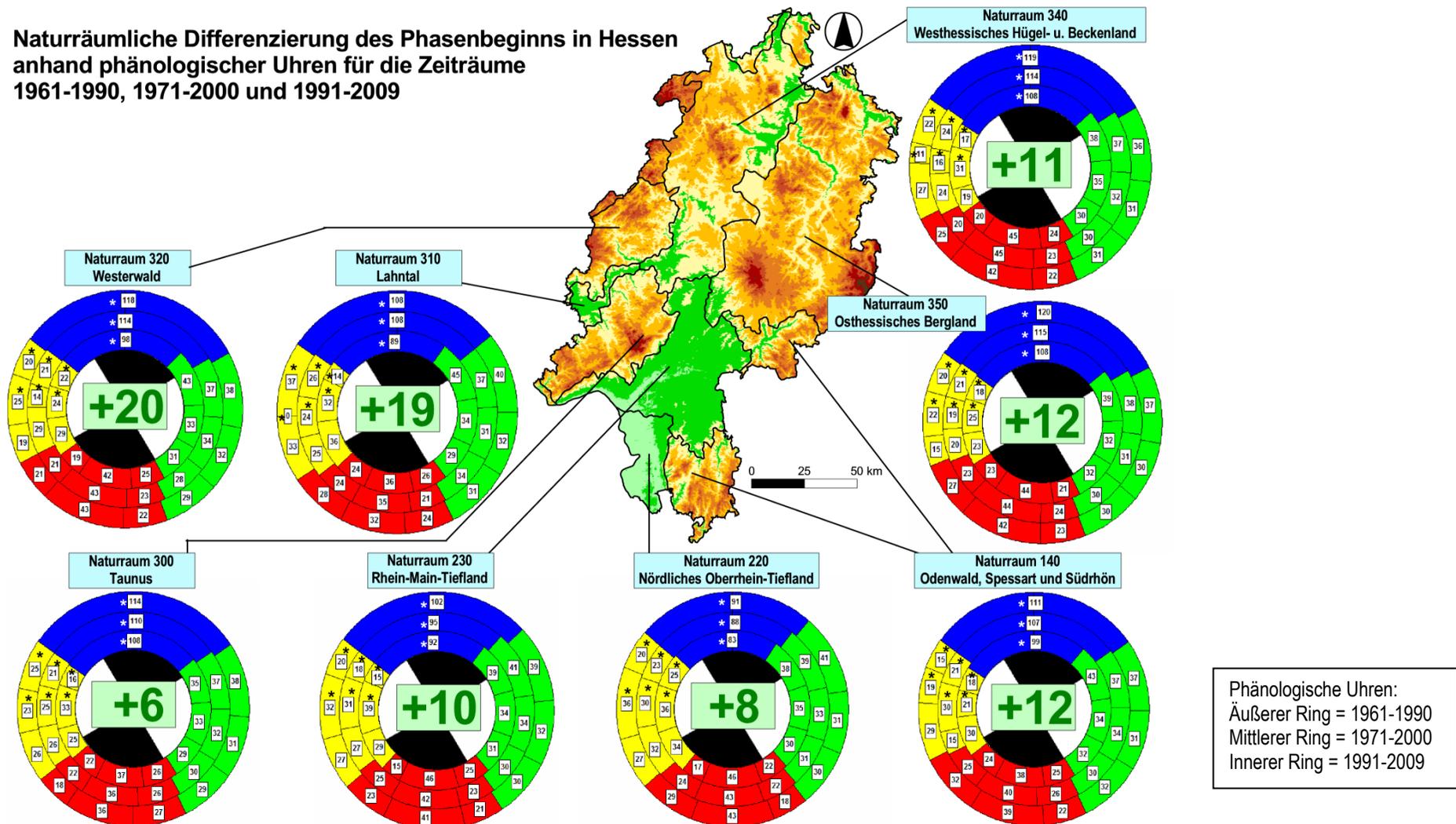


Abb.16: Phänologische Uhren je Naturraumhauptgruppe (Meynen et al. 1953-1962) in Hessen basierend auf den Flächenschätzungen zum Phasenbeginn (* markieren solche phänologische Jahreszeiten, für die eine Flächenschätzung nicht möglich war; stattdessen wurde der Phasenbeginn anhand der Beobachtungsdaten gemittelt); die Zahlen innerhalb der Uhren beziffern die Verlängerung der Vegetationsperioden im Vergleich der Klimanormalperiode 1961-1990 mit dem Zeitraum 1991-2009.

Auffällig waren die vereinzelt im Zeitraum 1971-2000 auftretenden Verspätungen phänologischer Jahreszeiten – insbesondere des Vollherbstes –, die dann im Mittel des Zeitraums 1991-2009 wieder deutlich früher eintraten (z.B. Hoch- und Spätsommer in NRHG 140, Spätsommer in NRHG 350, Früh- und Vollherbst in NRHG 230 sowie Vollherbst in NRHG 320). Diese Tendenz geht einher mit der in Kapitel 4.1 dargestellten Entwicklung der langjährigen Jahresdurchschnittstemperaturen in Hessen. Diese ist durch einen doppelt so starken Anstieg zwischen den Zeiträumen 1971-2000 und 1991-2009 gegenüber dem Anstieg zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1971-2000 gekennzeichnet.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die großräumig ermittelten Tendenzen der pflanzenphänologischen Entwicklung (Verfrühung der phänologischen Jahreszeiten) auch bei naturräumlicher Detailbetrachtung wiederzuerkennen sind. Allerdings gibt es regional deutliche Unterschiede, die insbesondere durch die Orografie in den jeweiligen Landesteilen verursacht werden.

4.4 Bivariate Statistik: Korrelation und Regression von Lufttemperaturen und Phasenbeginn

Die in Kapitel 4.3 beschriebene Entwicklung der Pflanzenphänologie zwischen 1961 und 2009 geht einher mit einem Anstieg der Lufttemperatur im betrachteten Zeitraum (Kap. 4.1). Diesen Zusammenhang veranschaulicht Abbildung 17, in der exemplarisch der jährlich für Hessen gemittelte Beginn der Apfelblüte (Phase 62) den landesweiten Durchschnittstemperaturen in den Monaten März bis Juni gegenübergestellt ist, die nach statistischer Auswertung die stärkste Beziehung zwischen Phasenbeginn und Monatsdurchschnittstemperaturen aufwies. Es ist zu erkennen, dass in vielen Jahren niedrige Temperaturen mit späten Phaseneintritten bzw. hohe Temperaturen mit frühen Phaseneintritten einhergehen. In Anhang 5 befinden sich entsprechende Auswertungen zu weiteren Leit- und Ersatzphasen.

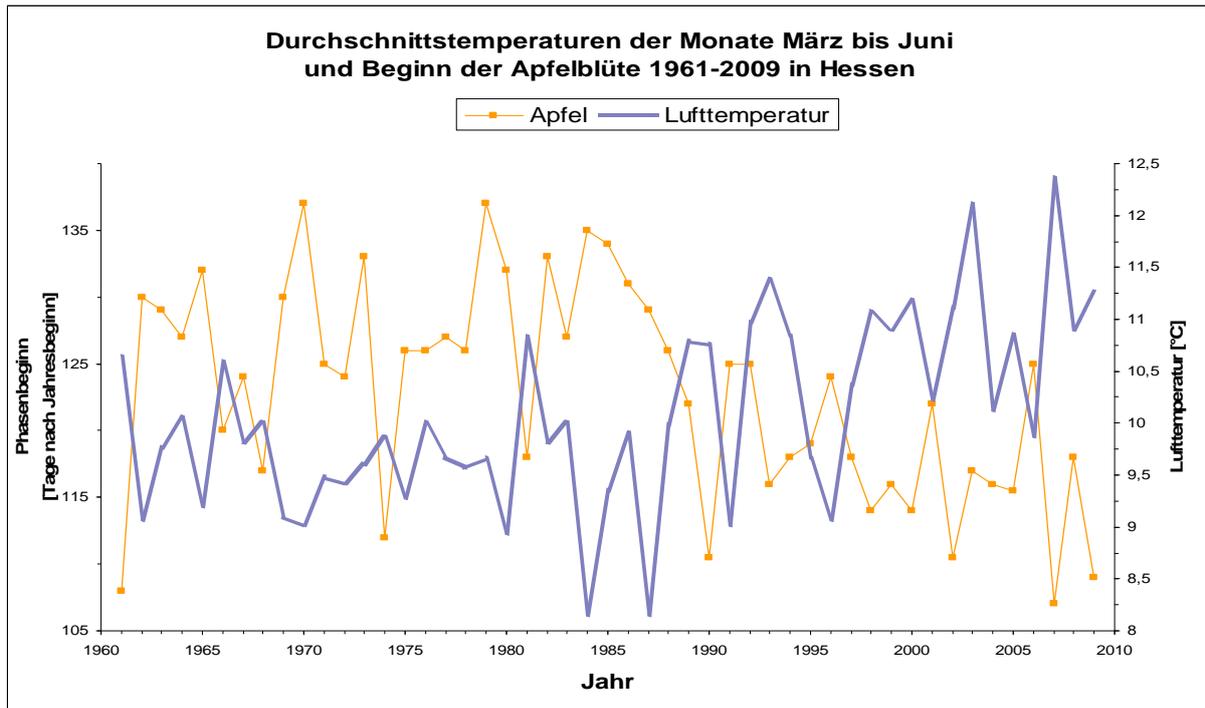


Abb. 17: Verlaufsdiagramm für die Durchschnittstemperatur in den Monaten März bis Juni und den Beginn der Apfelblüte (Phase 62) in Hessen im Zeitraum 1961-2009

Mit Korrelations- und Regressionsanalysen wurden die Stärke und die Signifikanz des Zusammenhangs zwischen Phasenbeginn und Lufttemperatur für jede ausgesuchte Phänophase bivariat-statistisch untersucht. Dabei wurden die phänologischen Eintrittstermine verknüpft mit (1) den langjährigen Jahresmitteltemperaturen für jeden der drei Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009, (2) den langjährigen Monatsmitteltemperaturen für jeden der drei Zeiträume und (3) den mittleren Durchschnittstemperaturen derjenigen Monate eines Jahres, die die höchsten Korrelationen zum Phaseneintritt aufwiesen und fachlich plausibel waren. Dieses Vorgehen bot den Vorteil, dass für jede Phase nur die Temperaturen derjenigen Monate berücksichtigt wurden, die den jeweiligen Phaseneintritt beeinflussen können. Aus pflanzenphysiologischer Sicht sind insbesondere diejenigen Temperaturen ausschlaggebend, die bis einige Monate vor Ausbildung der jeweiligen Phase herrschten (Schnelle 1955). Damit wird insbesondere bei den Frühjahrsphasen dem Phänomen der Dormanz Rechnung getragen. Eine Angabe über die Anzahl dieser Monate für die entsprechenden Phasen gab Schnelle (1955) nicht. In der vorliegenden Arbeit wurde die Anzahl der relevanten Monate individuell pro Phase und Untersuchungszeitraum ermittelt. Zur Festlegung der jeweiligen Monatsreihen wurden für jede Phase in jedem der drei Zeiträume diejenigen Monate ausgewählt, die den jeweiligen mittleren Eintrittstermin markieren. Fiel der durchschnittliche Eintrittstermin zwischen zwei Monate (± 3 Tage), wurden beide Monate ausgewählt. Der Beginn bzw. das Ende der zu berücksichtigenden Monatsreihe ergab sich aus dem durchschnittlich frühesten bzw. spätesten Eintrittstermin im jeweiligen Untersuchungszeitraum. Wenn der früheste mittlere Phasenbeginn nur einen zusätzlichen Monat umfasst, dann wurde auch noch der nächst frühere

Monat berücksichtigt, sofern das Bestimmtheitsmaß R^2 für diesen Monat $\geq 0,50$ war. Dies sollte u. a. dem Phänomen der Dormanz Rechnung tragen (Kap. 3.2.2).

Für (1) fasst Anhang 6 die Ergebnisse für die bundesweite Auswertung für die drei Untersuchungszeiträume (1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009) zusammen.

Für (2) sind in Anhang 6 die jeweiligen Bestimmtheitsmaße (R^2) für die langjährigen Monatsdurchschnittstemperaturen und den Phasenbeginn aufgeführt. Die Korrelationen zwischen Phasenbeginn und einzelnen langjährigen Monatsmitteltemperaturen jedes Zeitraums waren ähnlich hoch wie zwischen Phasenbeginn und langjährigen Jahresmitteltemperaturen, vereinzelt auch deutlich höher.

Einen Überblick über die für (3) ermittelten Korrelationskoeffizienten für die drei untersuchten Zeiträume (1961-1990, 1971-2000, 1991-2009) liefert Tabelle 5. In Anhang 6 finden sich weitere Angaben für jeden der drei Untersuchungszeiträume, u. a. die ermittelten Regressionsgleichungen für die zugrunde gelegten Monatsreihen. Diese wurden anhand der zuvor in (2) ermittelten statistischen Zusammenhänge sowie basierend auf den durchschnittlich frühesten bzw. spätesten langjährigen Phaseneintrittsterminen in den jeweiligen Zeiträumen festgelegt. Abbildung 18 illustriert die festgestellten Zusammenhänge beispielhaft für den Beginn der Apfelblüte (Phase 62) für den Zeitraum 1971-2000 in Hessen. 76 % der Varianz der Werte zum Phasenbeginn konnten demnach anhand der langjährigen Durchschnittstemperatur in den Monaten März bis Juni erklärt werden, was einem Korrelationskoeffizienten (r) von 0,87 entspricht. Die übrigen Regressionsdiagramme für die weiteren Phasen und Zeiträume sind in Anhang 7 zu finden.

Tab. 5: Übersicht über die Korrelationskoeffizienten (r) zwischen Lufttemperatur und Phasenbeginn für die drei Klimaperioden 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009 in Hessen. Gelb eingefärbt sind diejenigen Phasen für die eine Flächenschätzung mittels Regression Kriging durchgeführt werden konnte ($r \geq 0,5$); blau eingefärbt sind die Weinphasen, für die lokale Projektionen berechnet wurden. Bei den mit einem # gekennzeichneten Werten handelt es sich um nicht signifikante Korrelationen.

Phase	1961-1990	1971-2000	1991-2005
	r	r	r
1	-0,79	-0,79	-0,71
2	-0,75	-0,73	-0,64
6	-0,85	-0,88	-0,82
52	-0,70	-0,69	-0,62
7	-0,73	-0,77	-0,72
115	-0,52	0,61	-0,51
62	-0,82	-0,87	-0,83
13	-0,73	-0,77	-0,70
15	-0,83	-0,86	-0,83
19	-0,46	-0,53	-0,45
18	-0,75	-0,77	-0,74
123	-0,60	-0,73	-0,70
20	-0,56	-0,65	-0,63
64	-0,71	-0,76	-0,63
100	-0,73	-0,73	-0,61
109	-0,76	-0,74	-0,62
65	-0,11	-0,07 [#]	-0,06 [#]
67	-0,55	0,59	-0,57
177	-0,39	-0,38	-0,33
72	-0,30	-0,34	-0,34
68	-0,38	-0,40	-0,43
73	0,12	0,14	0,13
94	0,12	0,16	0,23
226	-	-	0,15
54	-0,82	-0,86	-0,84
56	-0,83	-0,85	-0,81
60	-0,84	-0,88	-0,84
102	-0,69	-0,76	-0,68
103	-0,65	-0,74	-0,60
104	-0,63	-0,63	-0,58
107	-0,51	-0,63	-0,51
108	-0,30	-0,39	-0,28
171	-0,44	-0,51	-0,62
172	-0,62	-0,78	-0,85
205	-	-0,78	-0,36

Die Regressionsanalysen für Variante (3) ergaben für alle drei Zeiträume überwiegend negative Korrelationskoeffizienten. Ausnahmen bildeten die Phasen 73, 94 und 226. Dieses Ergebnis geht einher mit dem in der deskriptiv-statistischen Auswertung ermittelten Trend (Kap. 4.3). Alle Phasen, deren langjährig gemittelte Eintrittstermine sich zum Jahresbeginn verschoben haben, wiesen einen negativen Korrelationskoeffizienten auf, d. h., je höher die Lufttemperatur im entsprechenden Zeitraum war, desto früher

im Jahr war auch der jeweilige Phasenbeginn. Im Zeitraum 1961-1990 konnten für 48,4 % der betrachteten Phänophasen hohe Korrelationen (Kap. 3.2.2) ermittelt werden, für weitere 25,8 % immerhin eine mittlere. Im Zeitraum 1991-2009 wiesen nur noch 35,5 % der Phänophasen hohe Korrelationskoeffizienten auf, für weitere 38,7 % der Phänophasen wurde eine mittelstarke Korrelation berechnet. Die stärksten Korrelationen wurden für den Zeitraum 1971-2000 ermittelt. Hier zeigten über die Hälfte der Phasen (54,8 %) eine hohe und weitere 22,6 % der Phasen immerhin eine mittlere Korrelation (Tab. 5). Auffällig war, dass insbesondere diejenigen Phasen mit den höchsten Korrelationskoeffizienten auch die stärksten Verschiebungen zum Jahresbeginn aufwiesen (Kap. 4.3). Für die Obstphasen ergab sich ein uneinheitliches Bild: So wurden für die Blühphasen beim Obst (Phasen 54, 56 und 60) sehr hohe Korrelationen mit der Lufttemperatur ermittelt, für den Beginn der Pflückreife dieser Pflanzen (Phasen 102, 103, 104, 107 und 108) jedoch weniger starke Korrelationen. Allerdings zeigten letztere Phasen stärkere Verschiebungen hin zum Jahresbeginn als die zuerst genannten.

Für alle Frühjahrs- und Sommerphasen wurde eine mittlere bis hohe Korrelation zur Lufttemperatur berechnet, lediglich Phase 65 (Blühbeginn des Heidekrauts) wies eine sehr niedrige Korrelation zur Lufttemperatur auf. Bei den Herbstphasen konnten dagegen nur noch Korrelationen mit maximal mittlerer Stärke ermittelt werden. Viele dieser Phasen weisen niedrige oder sehr niedrige Korrelationen mit der Lufttemperatur auf. Einzige Ausnahme war Phase 205 (Lese Weinreben) im Zeitraum 1971-2000. Am Ende des phänologischen Jahres kommt es schließlich zu einer Umkehrung der Verhältnisse. Hier wurden für den Spätherbst (Phase 73, Blattverfärbung der Stiel-Eiche) und den Winter (Phase 94, Beginn des Auflaufens des Winterweizens und Phase 226, Blattfall der Stiel-Eiche) positive Korrelationen ermittelt, so dass diese aufgrund der festgestellten Klimaerwärmung später eintreten müssten. Für die Phasen 73 und 226 traf dieses gemäß den ausgewerteten Beobachtungsdaten zu, für Phase 94 jedoch nicht (Kap. 4.3). Insgesamt ist auch aufgrund dieser bivariat-statistischen Zusammenhänge eine Verlängerung der Vegetationsperiode zu erwarten, was bereits die Auswertung der Beobachtungsdaten gezeigt hat (Kapitel 4.3.1).

Die Regressionsbeziehungen, die für den statistischen Zusammenhang zwischen dem Phasenbeginn und den Mitteltemperaturen während definierter Monate (Variante 3) ermittelt wurden, waren Basis für die flächenhafte Darstellung der pflanzenphänologischen Entwicklung in Hessen (Kap. 4.5).

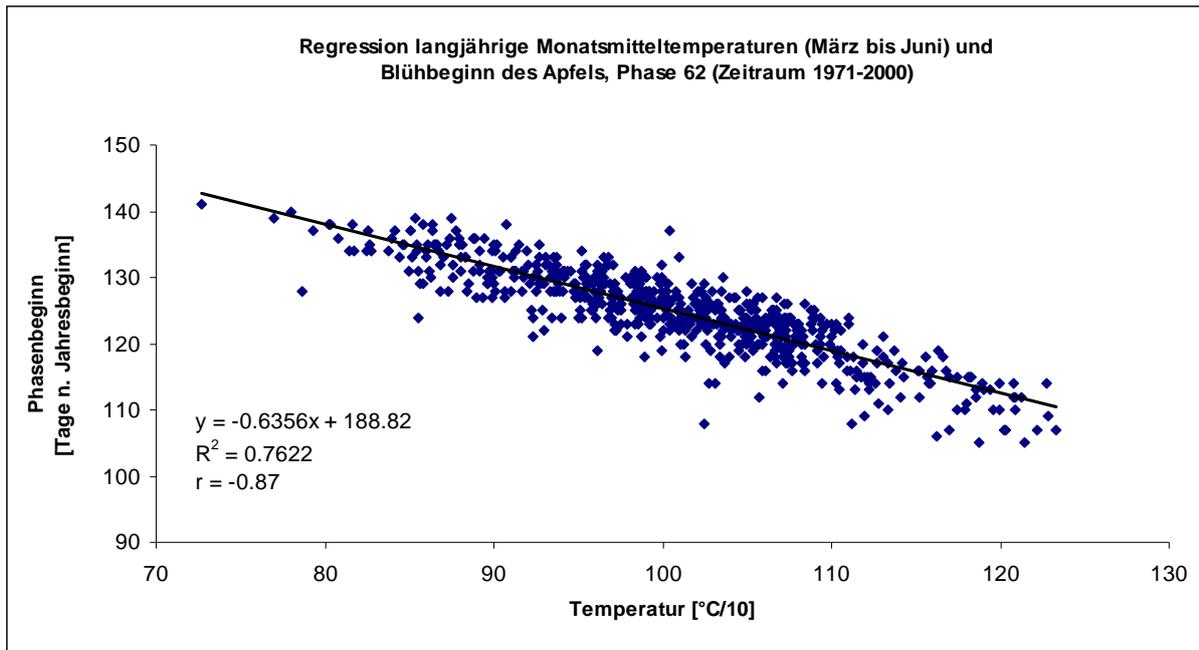


Abb. 18: Regressionsdiagramm zum Beginn der Apfelblüte (Phase 62) und den für die Monate März bis Juni gemittelten langjährigen Durchschnittstemperaturen im Zeitraum 1971-2000

4.5 Regression Kriging: Flächenhafte Darstellung der vergangenen und zukünftigen phänologischen Entwicklung in Hessen

Wie in Kapitel 3.2.2 erläutert, wurde basierend auf den Ergebnissen der bivariat-statistischen Analyse zwischen Lufttemperatur und Phaseneintritt (Kap. 4.4) das weitere Auswertungsverfahren individuell für jede Phase festgelegt. Bei einer signifikanten Korrelation zwischen Phasenbeginn und Lufttemperatur von $r \geq 0,5$ wurde eine landesweite flächenhafte Schätzung des jeweiligen Phaseneintritts mittels Regression Kriging (Kap. 3.2.3) vorgenommen. Zusätzlich wurden für die Beobachtungen der drei Weinphasen lokale Abschätzungen zur Entwicklung von Austrieb, Blüte und Weinlese gemacht (Kap. 4.6). Phasen, die eine Korrelationsstärke von $r < 0,5$ aufwiesen, wurden mittels multivariater Statistik untersucht, um den Einfluss weiterer Umweltbedingungen zu quantifizieren (Kap. 4.7).

Insgesamt wurden nach den oben benannten Kriterien für 23 Phasen (Tab. 5) mittels Regression Kriging landesweite Flächenschätzungen zur vergangenen phänologischen Entwicklung in Hessen für die drei Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009 berechnet (Kap. 4.5.1). Auf die flächenhafte Darstellung von Phase 107 (Pflückreife der frühreifenden Birne) wurde verzichtet, da einerseits die Stationsanzahl für Deutschland mit Werten unter 100 sehr gering war und andererseits die Ergebnisse der Regressionsanalyse (Verfrühung) den beobachteten Befunden (leichte Verspätung) widersprachen. Zudem waren die Korrelationskoeffizienten mit Werte zwischen -0,51 und -0,63 relativ niedrig.

Darüber hinaus wurden die ermittelten Regressionsbeziehungen für den Referenzzeitraum 1971-2000 für die Projektion der zukünftigen Entwicklung der Phänologie für die Zeiträume 2031-2060 und 2071-2100 zugrunde gelegt (Kap. 4.5.2-4.5.5). Hierfür wurden im GIS die Rasterkarten zu den Durchschnitts-

temperaturen aus den Klimamodellen für die Zeiträume 2031-2060, 2071-2100 und 1971-2000 (Referenzzeitraum) zur Flächenschätzung genutzt.

4.5.1 Phänologische Entwicklung 1961-2009

Mit Hilfe der in Kapitel 4.4 beschriebenen Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Phasenbeginn wurden im Anschluss mittels Regression Kriging Flächenschätzungen für solche Pflanzenphasen unternommen, die eine hinreichende, statistisch signifikante Beziehung zwischen den beiden Messgrößen aufwiesen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Flächenschätzung beispielhaft für den Beginn der Haselblüte (Phase 1) in Hessen vorgestellt (Abb. 20a-e, jeweils oben). Die entsprechenden Karten zu den übrigen 22 Phasen mit einer hinreichenden Korrelation zur Lufttemperatur sind in Anhang 8 zu finden.

Die Flächenkarten für die Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2009 verdeutlichen regional differenziert die bereits anhand der Beobachtungsdaten (Kap. 4.3) erkennbare Verfrühung des Blühbeginns der Hasel. So hat sich im langjährigen landesweiten Mittel der Beginn der Haselblüte zwischen der Klimanormalperiode 1961-1990 und dem Zeitraum 1991-2009 gemäß der Flächenschätzung um 12 Tage (16.02. statt 28.02.) verfrüht. Die anhand der Beobachtungsdaten des DWD abgeleitete mittlere Verfrühung betrug 14 Tage (15.02. statt 01.03.). Erwartungsgemäß spiegelt sich in den Karten der Einfluss der Lufttemperatur und damit auch des Reliefs auf die Pflanzenphänologie wider. So waren frühe Phaseneintritte in den tiefer gelegenen Gebieten wie dem Nördlichen Oberrhein-Tiefland, dem Rhein-Main-Tiefland, dem Lahntal und den übrigen Flusstälern zu finden. Höher gelegene Gebiete wie der Westerwald und das Hochsauerland sowie der Taunus und das Osthessische Bergland mit dem Vogelsberg wiesen demgegenüber späte Phaseneintrittstermine auf. Die regionale Differenzierung belegt dies anhand der für jeden Naturraum gemittelten Phaseneintrittstermine (Zahlen innerhalb der in den Karten eingezeichneten Naturräume). So begann die Haselblüte in der Klimanormalperiode 1961-1990 im Nördlichen Oberrhein-Tiefland im Mittel bereits am 10. Februar (41 Tage n. Jahresbeginn), während sie im Osthessischen Bergland im Mittel mehr als drei Wochen später, nämlich am 5. März (64 Tage n. Jahresbeginn) beobachtet wurde.

Regionale Unterschiede in der Stärke der Phasenverfrühungen können anschaulich anhand von Differenzkarten abgelesen werden (Abb. 19). Wie schon in Kapitel 4.1 für den Anstieg der Lufttemperaturen ausgeführt, ist zwischen den jüngeren Zeiträumen 1971-2000 und 1991-2009 eine deutlich stärker ausgeprägte Verfrühung der Haselblüte im landesweiten Mittel gegenüber der Verfrühung zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1971-2000 festzustellen. Während die Haselblüte beim Vergleich der beiden älteren Zeiträume maximal 6 Tage früher einsetzte (Rhein-Main-Tiefland), sind im Vergleich der beiden jüngeren Zeiträume Verfrühungen von im Mittel über zwei Wochen festzustellen (Westerwald,

Odenwald, Gladenbacher Bergland). Insgesamt hat sich gezeigt, dass die Haselblüte in jüngerer Zeit insbesondere in den höheren Mittelgebirgslagen von einer intensiven Verfrühung betroffen war. In den niedriger gelegenen Naturräumen in den südhessischen Flusstälern waren dagegen eher weniger starke Verfrühungen zu verzeichnen. In einigen hat sich die Haselblüte sogar verspätet. Ausnahmen bildeten das Lahntal, in dem ebenfalls eine intensive Verfrühung der Haselblüte zu erkennen war (-16 Tage), sowie der Hoch- und Vortaunus, wo die Haselblüte mit einigen Tagen Verspätung eintrat.

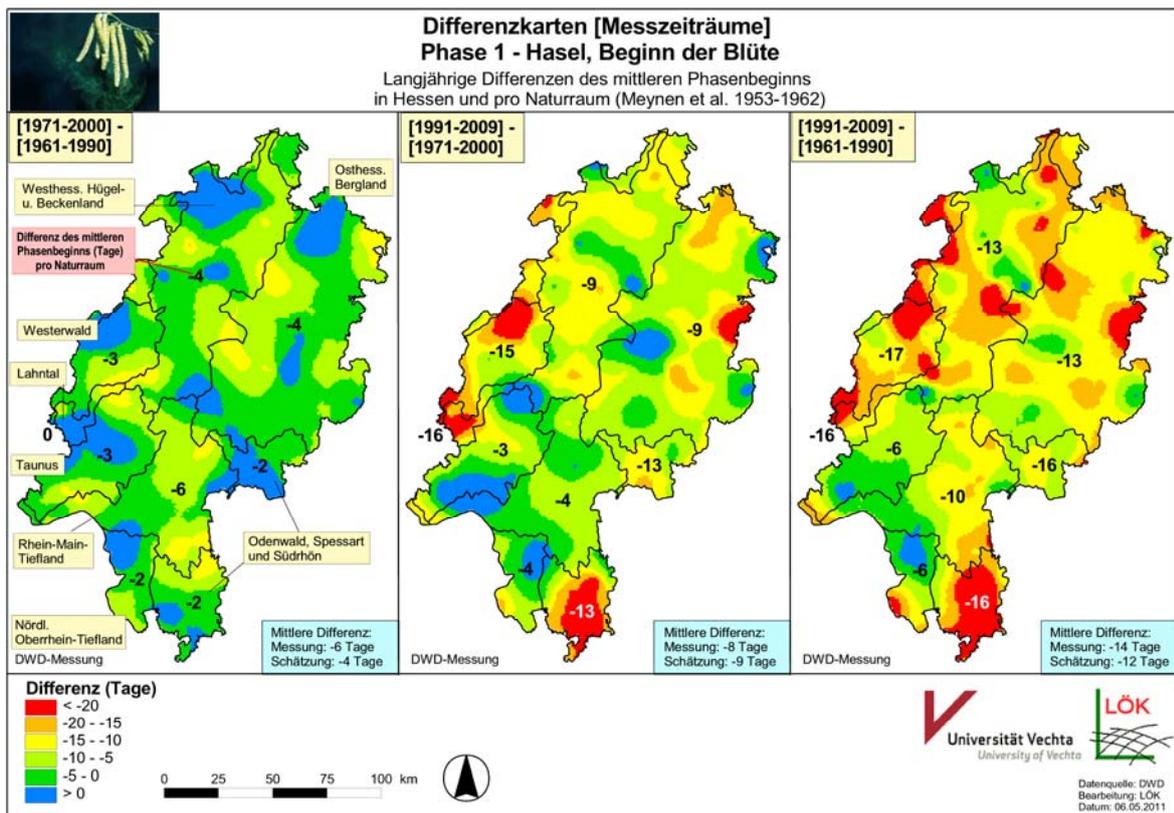


Abb. 19: Differenzkarten für Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte) der Messzeiträume des langjährig gemittelten Phasenbeginns in Hessen und pro Naturraum

4.5.2 Zukünftige Phänologische Entwicklung nach ECHAM5/CLM A1B (BIAS-korrigiert)

Gemäß der Klimaprojektion ECHAM5/CLM (Szenario A1B, BIAS-korrigiert) wurde im langjährigen landesweiten Mittel eine Verfrühung der Haselblüte (Phase 1) von 25 Tagen im Zeitraum 2071-2100 (30 Tage nach Jahresbeginn) (Abb. 20a, rechts unten) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000 (55 Tage) (Abb. 20a, links unten) berechnet. Regional könnte demnach die Haselblüte bis zum Zeitraum 2071-2100 bereits am 17. Januar eintreten (mittlerer Beginn im Nördlichen Oberrhein-Tiefland), bis hin zum 6. Februar im Westerwald. Die stärksten Veränderungen würden den Schätzungen zu Folge zwischen den Zeiträumen 2031-2060 und 2071-2100 einsetzen. Der landesweite mittlere Eintrittstermin verschiebt sich demnach um 2 Wochen vom 13. Februar auf den 30. Januar.

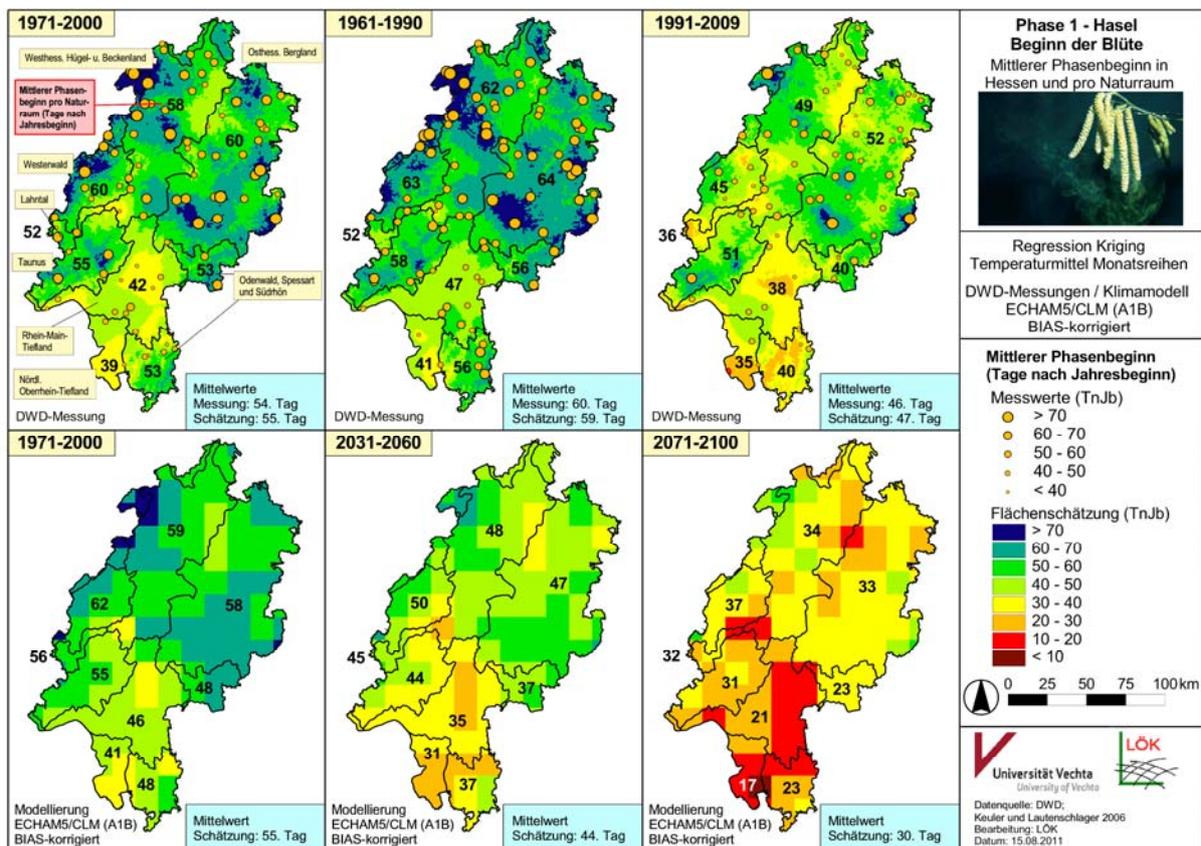


Abb. 20a: Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte): Mittlerer Phasenbeginn in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / ECHAM5/CLM A1B, BIAS-korrigiert)

4.5.3 Zukünftige Phänologische Entwicklung nach REMO/UBA A1B (BIAS-korrigiert)

Basierend auf der REMO/UBA-Projektion wurde für den Blühbeginn der Hasel (Phase 1) eine Verfrühung zwischen dem landesweiten Mittelwert des Referenzzeitraums 1971-2000 und jenem des Zeitraums 2071-2100 von 28 Tagen ermittelt (Abb. 20b). Demnach würde die Haselblüte im landesweiten Mittel im Zeitraum 2071-2100 bereits am 27. Januar statt am 14. Februar einsetzen. Damit liegt die REMO/UBA-Projektion für die Haselblüte im landesweiten Mittel drei Tage vor dem mit der ECHAM5/CLM-Projektion berechneten Phasenbeginn für diesen Zeitraum. Ein Vergleich der beiden Karten zeigt, dass in entsprechend mehr Landesteilen im Zeitraum 2071-2100 die Haselblüte weniger als drei Wochen nach Jahresbeginn einsetzen würde. Wie bei der ECHAM5/CLM-Projektion liegen diese Regionen im niedriger gelegenen Tiefland in Südhessen. Ebenso wie bei ECHAM5/CLM finden die stärksten Verfrühungen jeweils zwischen den Zeiträumen 2031-2060 und 2071-2100 statt.

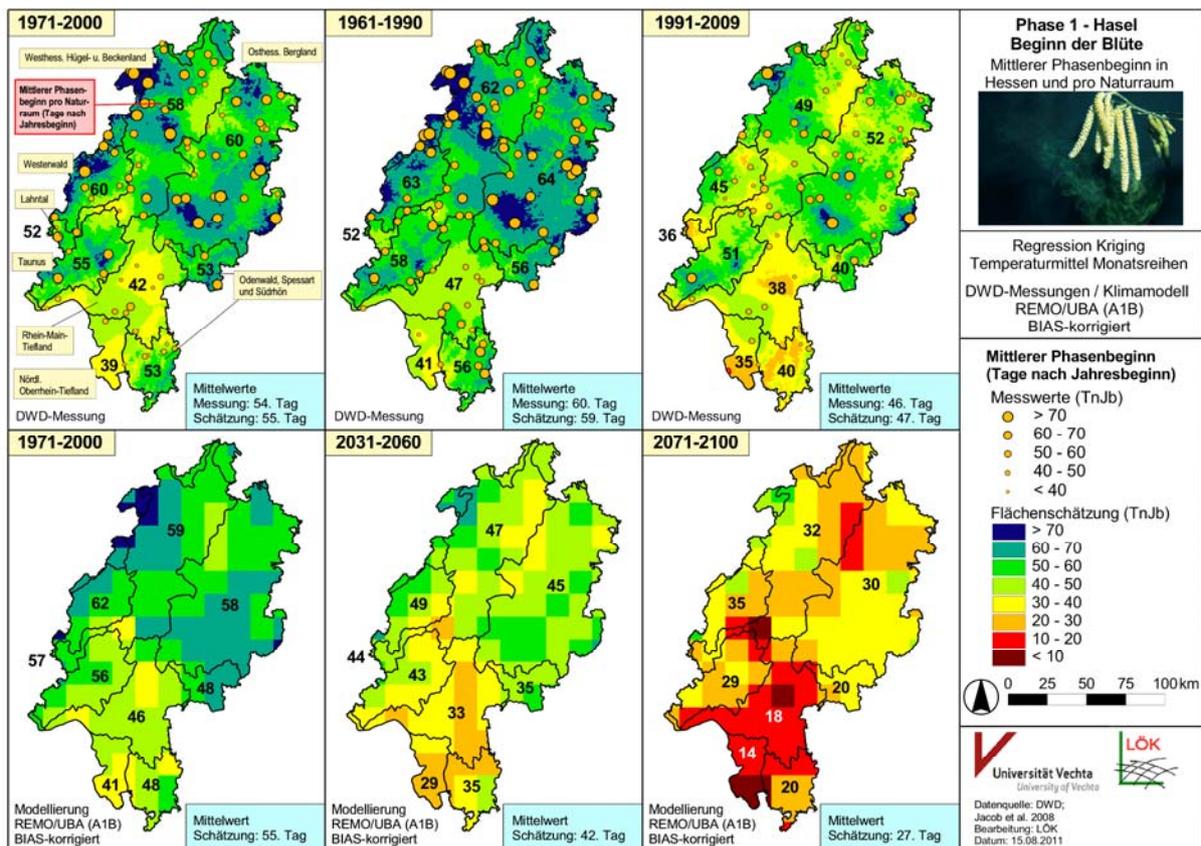


Abb. 20b: Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte): Mittlerer Phasenbeginn in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / REMO/UBA A1B, BIAS-korrigiert)

4.5.4 Zukünftige Phänologische Entwicklung nach HADCM3/CLM A1B (BIAS-korrigiert)

Die auf Basis des HADCM3/CLM-Klimamodells berechneten Werte zeichnen sich durch eine vergleichsweise stärkere Verfrühung der Phaseneintritte im Zeitraum 2031-2060 aus (20 Tage). Im Mittel würde hier die Haselblüte bereits 35 Tage nach Jahresbeginn (Abb. 20c) beginnen, während die Werte für die anderen drei Klimaprojektionen zwischen 37 Tagen (WETTREG2010) und 44 Tagen (ECHAM5/CLM) nach Jahresbeginn schwanken. Regional hat dies zur Folge, dass im Gegensatz zu den mittels ECHAM5/CLM und REMO/UBA berechneten Flächenkarten bei den auf HADCM3/CLM basierenden Flächenkarten die Haselblüte in einigen Landesteilen (südliches Marburg-Giessener Lahn-tal, nördliches Rhein-Main-Tiefland, südlicher Teil des Nördlichen Oberrhein-Tieflandes) bereits im lang-jährigen Mittel des Zeitraums 2031-2060 vor dem 20. Januar eintreten würde. Die Verfrühung der Ha-selblüte zwischen den Zeiträumen 2031-2060 und 2071-2100 ist dagegen im Vergleich zu den übrigen drei Klimamodellen geringer ausgeprägt, die Haselblüte würde demnach im Zeitraum 2071-2100 mit 28 Tagen nach Jahresbeginn vergleichsweise spät eintreten.

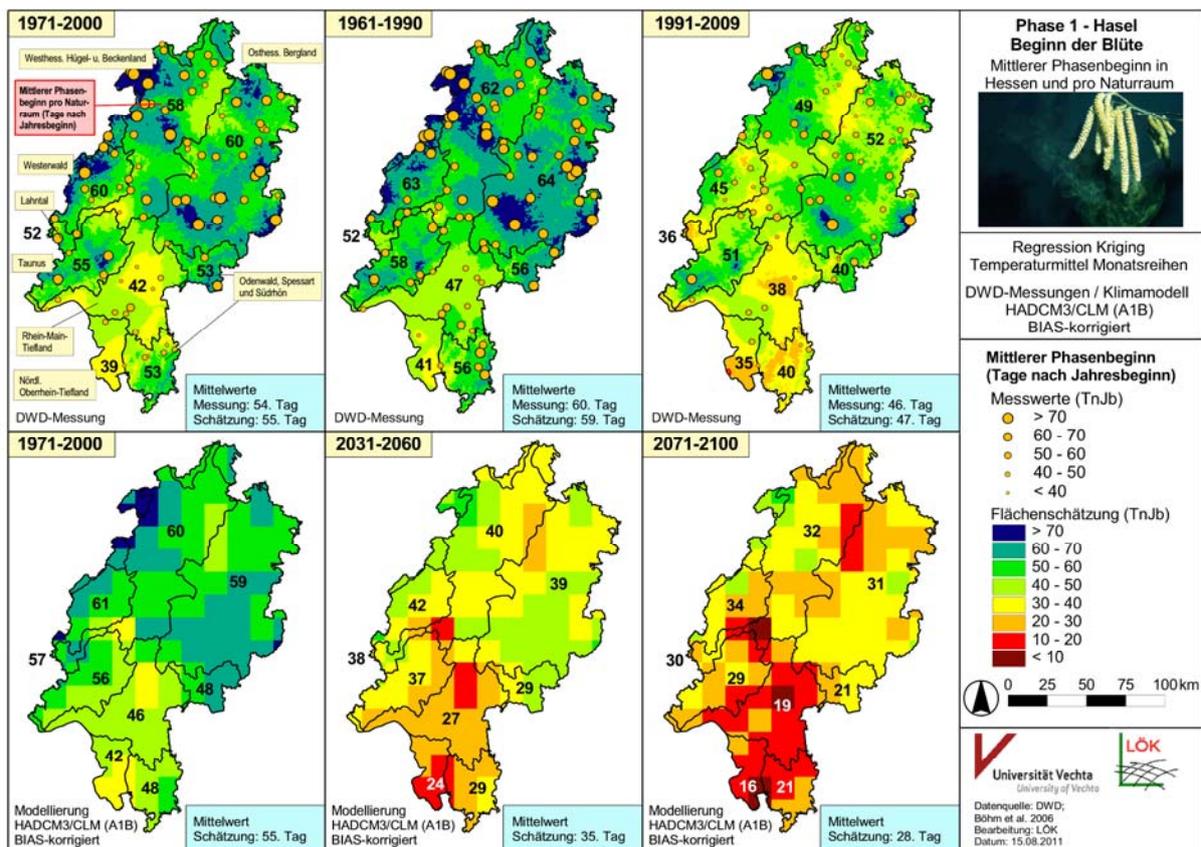


Abb. 20c: Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte): Mittlerer Phasenbeginn in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / HADCM3/CLM A1B, BIAS-korrigiert)

4.5.5 Zukünftige Phänologische Entwicklung nach WETTREG 2010 A1B (Lauf 0 und Lauf 5)

Abbildung 20d zeigt exemplarisch die Modellierung des Beginns der Haselblüte auf Basis der Lufttemperaturdaten der Klimaprojektion WETTREG 2010 (Lauf 0). Demnach ist für den Beginn der Haselblüte der Anteil an Regionen mit einem Phasenbeginn vor dem 10. Januar am größten. Im Nördlichen Oberrhein-Tiefland würde die Haselblüte demnach im Mittel sogar schon am 8. Januar beginnen. Als einzige Projektion liefert WETTREG 2010 (Lauf 0) derart frühe Phaseneintritte regional auch für den Norden Hessens. Die Verfrühung zwischen dem Referenzzeitraum 1971-2000 und dem Zeitraum 2071-2100 beträgt mehr als einen Monat (34 Tage).

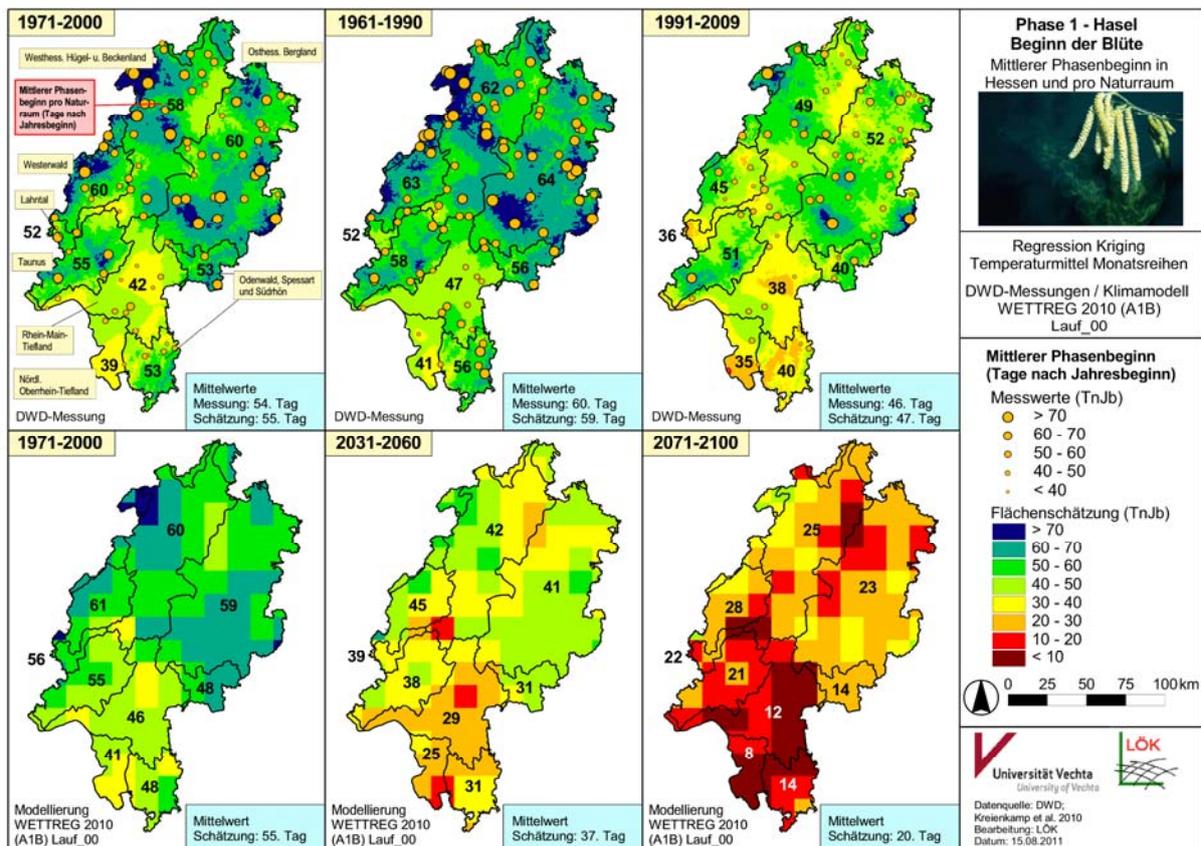


Abb. 20d: Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte): Mittlerer Phasenbeginn in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / WETTREG 2010 A1B, Lauf 0)

In Abbildung 20e ist die Modellierung des Beginns der Haselblüte basierend auf den Lufttemperaturen von Lauf 5 der WETTREG 2010-Klimaprojektion dargestellt. Wie schon bei der Lufttemperaturentwicklung festgestellt wurde (Kap. 4.1) sind die modellierten langjährig gemittelten Phaseneintritte zwischen den Läufen 0 und 5 nahezu identisch. Lediglich in der regionalen Differenzierung sind sehr geringe Unterschiede zu erkennen.

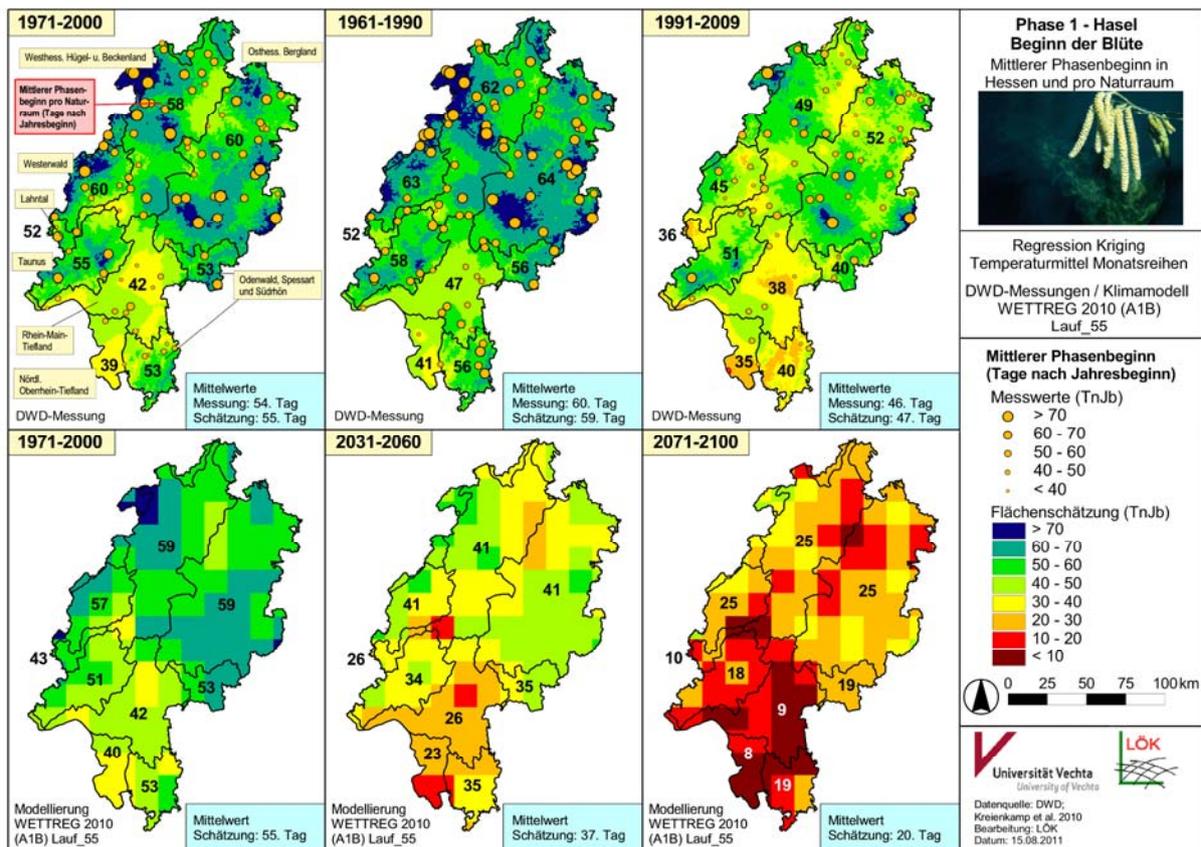


Abb. 20e: Phase 1 (Hasel, Beginn der Blüte): Mittlerer Phasenbeginn in Hessen und pro Naturraum (DWD-Messungen / WETTREG 2010 A1B, Lauf 5)

Bei der Interpretation der Projektionsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass es sich um langjährige Mittelwerte handelt. Das bedeutet, dass in Einzeljahren deutliche Abweichungen auftreten können und weitaus frühere Phaseneintritte möglich sind (Kap. 4.3).

4.5.6 Synopse

Einen Überblick über die in den Kapiteln 4.5.2 bis 4.5.5 vorgestellten Veränderungen im Phasenbeginn für die untersuchten Zeiträume in der Vergangenheit und der Zukunft liefern die Tabellen 6a und 6b für alle mittels Regression Kriging ausgewerteten Phasen.

Tab. 6a: Durchschnittliche beobachtete und projizierte Phaseneintritte in Hessen

Modell & Periode / Phase		1	2	6	52	7	115	62	13	15	19	18	123	20	64	100	109	67	54	56	60	102	103	104
Gemessen (DWD)	1961-1990	60	60	95	97	113	93	127	128	134	144	157	150	156	180	188	218	246	115	121	119	181	192	203
	1971-2000	54	56	92	94	110	94	125	126	133	141	155	152	154	177	186	220	243	114	118	117	177	193	201
	1991-2009	46	51	84	87	105	87	116	120	125	137	147	146	149	171	180	213	235	109	114	112	169	183	193
Wert der Flächen-schätzung	1961-1990	59	60	97	97	113	96	127	128	134	143	157	157	156	180	188	221	246	115	122	121	180	194	204
	1971-2000	55	57	93	95	111	94	125	127	133	142	155	155	155	179	186	222	244	114	120	119	180	193	202
	1991-2009	47	52	86	88	106	88	118	122	127	137	150	150	150	173	182	216	237	110	116	113	177	190	197
ECLM_K	1971-2000	55	57	93	94	110	93	125	126	132	142	155	154	154	178	186	221	244	114	119	118	179	192	201
	2031-2060	44	48	84	91	105	91	121	124	130	140	151	151	151	174	178	209	233	108	115	111	172	185	193
	2071-2100	30	38	72	84	97	86	112	114	119	132	140	138	141	161	163	192	219	100	106	100	155	171	179
HCLM_K	1971-2000	55	57	93	94	111	94	126	127	133	142	155	155	155	179	186	221	244	114	120	118	179	192	201
	2031-2060	35	43	76	84	100	86	114	116	122	134	144	145	146	167	173	204	229	103	109	105	165	180	189
	2071-2100	28	37	69	79	94	82	107	111	116	130	138	138	141	160	163	191	217	98	103	98	156	171	179
RUBA_K	1971-2000	55	56	93	94	110	93	125	126	132	141	155	154	155	178	186	221	244	114	119	118	179	192	201
	2031-2060	42	47	82	90	103	90	120	122	128	138	150	149	150	173	178	211	235	107	115	110	171	185	194
	2071-2100	27	36	70	84	96	86	112	114	119	132	141	139	142	163	166	195	221	100	107	100	158	174	183
WETTR_00	1971-2000	55	57	92	94	111	93	124	126	132	142	155	153	154	178	186	221	244	114	119	117	177	191	201
	2031-2060	37	44	77	86	100	87	115	118	123	135	145	144	146	167	173	205	230	103	110	104	164	180	189
	2071-2100	20	32	65	79	92	82	106	110	115	129	136	137	140	158	163	191	219	95	102	94	154	171	178
WETTR_55	1971-2000	55	57	92	94	110	93	124	126	132	141	153	153	153	177	185	221	244	114	119	117	177	191	201
	2031-2060	37	44	77	87	101	88	115	118	123	135	145	145	146	167	173	204	230	104	110	106	165	180	188
	2071-2100	20	32	65	81	93	83	108	110	117	131	138	139	141	159	162	192	219	96	104	96	155	171	178

Tab. 6b: Durchschnittliche Phasenverschiebungen in Hessen in der Vergangenheit und in der Zukunft

Phase	1	2	6	52	7	115	62	13	15	19	18	123	20	64	100	109	67	54	56	60	102	103	104	
Differenzen (Tage) zwischen 1991-2009 und 1961-1990 (DWD-Beobachtung)																								
Beobachtet	-14	-9	-11	-10	-8	-6	-10	-8	-9	-7	-10	-4	-7	-9	-8	-5	-11	-6	-7	-7	-12	-9	-10	
Differenzen (Tage) zwischen 2071-2100 (Projektion) und 1961-1990 (DWD-Beobachtung)																								
ECLM_K	-30	-22	-23	-13	-16	-7	-16	-14	-15	-12	-17	-12	-15	-19	-25	-26	-27	-15	-15	-19	-26	-21	-24	
HCLM_K	-32	-23	-26	-18	-19	-11	-20	-17	-18	-14	-19	-12	-15	-20	-25	-27	-29	-17	-18	-21	-25	-21	-24	
RUBA_K	-33	-24	-25	-13	-17	-7	-15	-14	-15	-12	-16	-11	-14	-17	-22	-23	-25	-15	-14	-19	-23	-18	-20	
WETTR_00	-40	-28	-30	-18	-21	-11	-21	-18	-19	-15	-21	-13	-16	-22	-25	-27	-27	-20	-19	-25	-27	-21	-25	
WETTR_55	-40	-28	-30	-16	-20	-10	-19	-18	-17	-13	-19	-11	-15	-21	-26	-26	-27	-19	-17	-23	-26	-21	-25	

Die stärksten Veränderungen im Phasenbeginn wurden zu Beginn des phänologischen Jahres (Vor- und Erstfrühling) und bei den Fruchtreifephase im Hoch- und Spätsommer sowie im Frühherbst ermittelt. Der Blühbeginn der Hasel (Phase 1, Vorfrühling) wird sich den Berechnungen zu Folge je nach Klimamodell von der Klimanormalperiode 1961-1990 bis zum Zeitraum 2071-2100 um 30 bis 38 Tage, also um mehr als einen Monat, verfrühen. Für Phase 109 (Pflückreife des frühreifenden Apfels, Spätsommer) sind es immerhin noch 3-4 Wochen. Weitere Phasen, für die mehrere Modelle Verfrühungen von drei Wochen und mehr projizieren, sind der Blühbeginn des Schneeglöckchens (Phase 2), der Forsythie (Phase 2) und der Birne (Phase 60) sowie zwischen Hochsommer und Frühherbst die Fruchtreife der Roten Johannisbeere (Phase 100), der frühreifenden und der spätreifenden Süßkirsche (Phase 102 bzw. 103), der Sauerkirsche (Phase 104), des frühreifenden Apfels (Phase 109) sowie des Schwarzen Holunders (Phase 67). Darüber hinaus zeigen die Tabellen 6a und 6b, in wie weit sich die vier Klimamodelle voneinander unterscheiden. Abbildung 21a illustriert dies zusätzlich exemplarisch für die in den Kapiteln 4.5.2 bis 4.5.5 ausgewertete Phase 1 (Haselblüte).

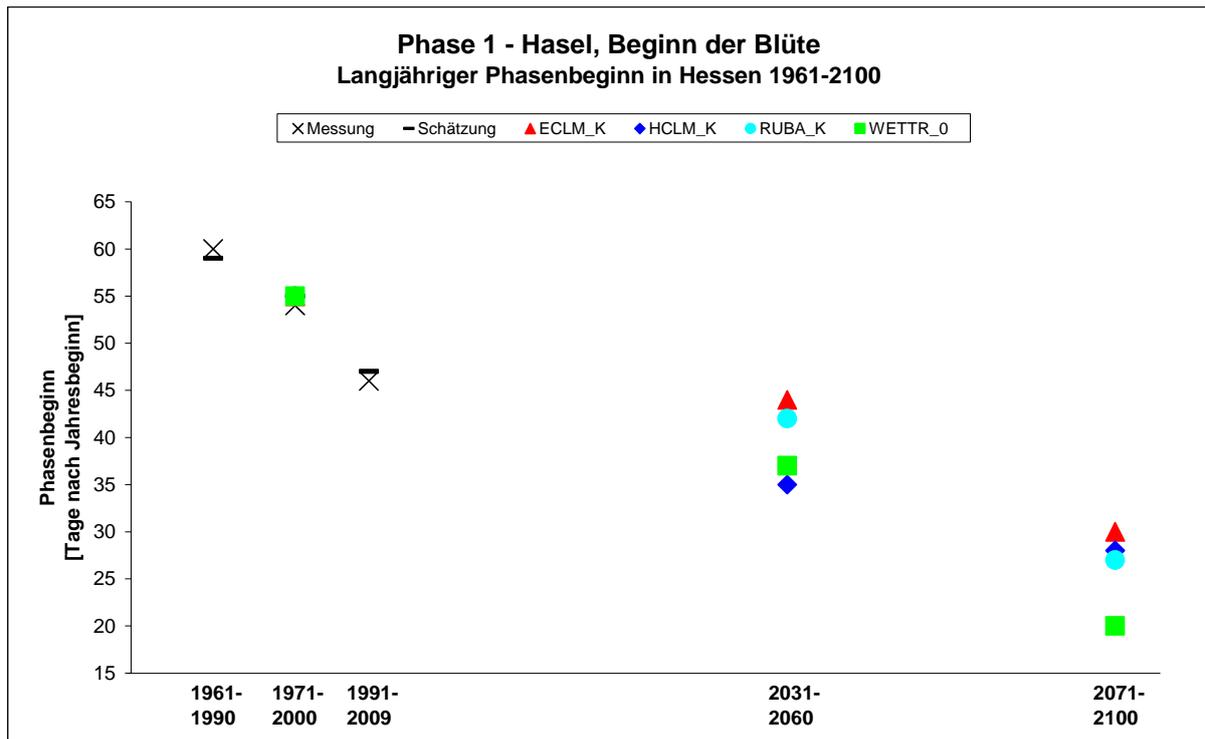


Abb. 21a: Phase 1 – Hasel, Blühbeginn - Langjähriger Phasenbeginn in Hessen 1961-2100 pro Klimamodell und DWD-Messung

Aus Abbildung 21a geht hervor, dass die auf Grundlage des ECHAM5/CLM-Modells berechneten Karten zum Phasenbeginn der Haselblüte (rote Dreiecke im Diagramm) im Vergleich die konservativsten Schätzungen liefern. Gegenüber den anderen Klimamodellen wurde hier der späteste Blühbeginn vorhergesagt, wobei sich die Werte für den Zeitraum 2071-2100 deutlich annähern. Für die in den Tabellen 6a und 6b aufgeführten Phasen liefert die ECHAM5/CLM-Projektion bei fast allen Frühlingsphasen (Phase 1, 2, 6, 52, 7, 115, 62, 13, 15, 19, 54 und 60) die spätesten Eintrittstermine, wobei die Schätzungen für die Obstphasen 54, 60 und 62 im Zeitraum 2071-2100 bei der ECHAM5/CLM-Projektion und der REMO/UBA-Projektion übereinstimmen. Im Früh- und Hochsommer (Phase 18, 123, 20, 64, 100, 102, 103 und 104) liefert ECHAM5/CLM bei den meisten Phasen nur noch für den Zeitraum 2031-2061 die konservativsten Schätzungen. Im Zeitraum 2071-2100 basieren die konservativsten Schätzungen nun auf REMO/UBA, während sich die Schätzungen der ECHAM5/CLM-Projektion nun immer stärker jenen der HADCM3/SLM-Projektion bzw. der WETTREG 2010-Projektion annähern. Im Spätsommer (Phase 109) und Frühherbst (Phase 67) wurden dann schließlich für beide zukünftigen Zeiträume die spätesten Phaseneintritte mit der REMO/UBA-Projektion ermittelt.

Abbildung 21b veranschaulicht die für die späteren Sommerphasen und den Frühherbst ermittelte Tendenzen exemplarisch für die Fruchtreife des Schwarzen Holunders (Phase 67). Die Diagramme der übrigen 21 Phasen, deren zukünftige Eintritte basierend auf den Klimamodelldaten projiziert wurden, sind in Anhang 9 zu finden.

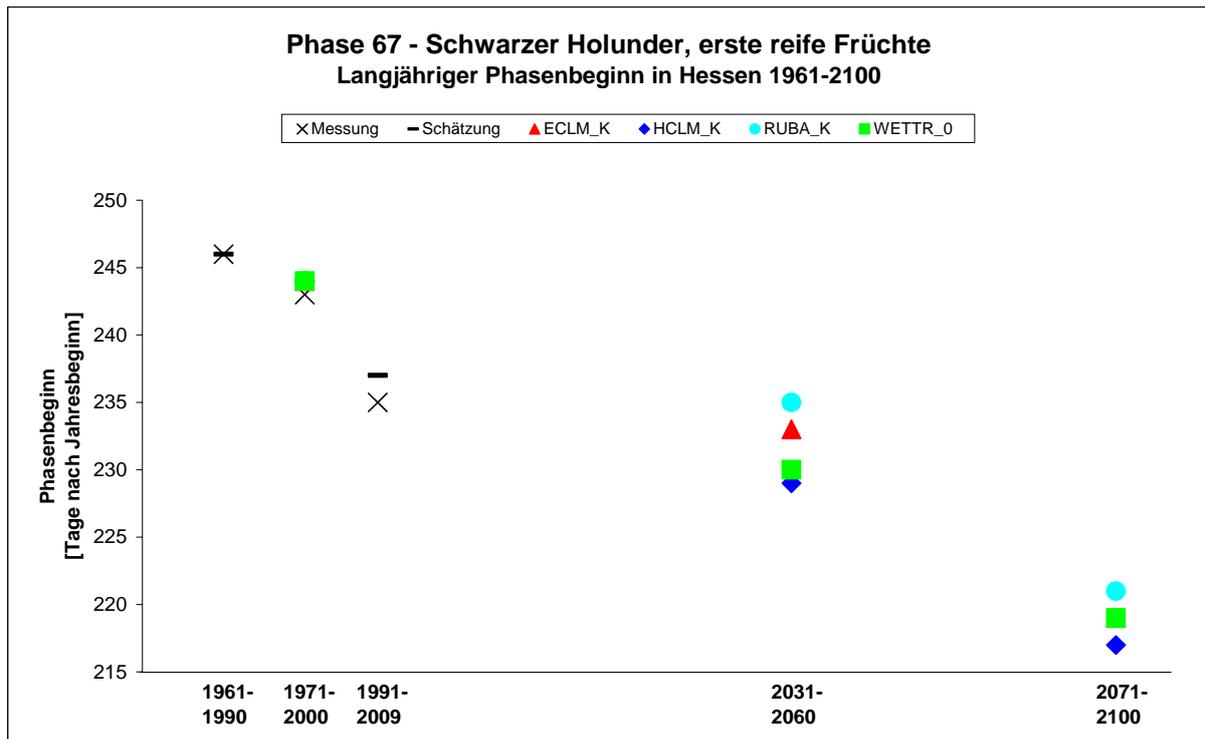


Abb. 21b: Phase 67 – Schwarzer Holunder, erste reife Früchte - Langjähriger Phasenbeginn in Hessen 1961-2100 pro Klimamodell und DWD-Messung (die Symbole für WETTREG 2010 und ECHAM5/CLM liegen im Diagramm im Zeitraum 2071-2100 übereinander)

Insgesamt ähneln die auf der REMO/UBA-Projektion basierenden Flächenkarten der 23 projizierten Phasen von den drei übrigen Projektionen am häufigsten den Ergebnissen der ECHAM5/CLM-Projektion (Tab. 6a und 6b). Beide Modelle prognostizieren im Vergleich eher niedrigere Lufttemperaturen, wobei die REMO/UBA-Projektion für den Zeitraum 2071-2100 etwas höhere Temperaturen als die ECHAM5/CLM-Projektion aufwies. Die mit REMO/UBA projizierten zukünftigen Phaseneintritte ergaben bei fast allen Phasen spätere Eintrittstermine, als es bei den Projektionen HADCM3/CLM und WETTREG 2010 der Fall war. Ausnahmen bilden hier nur der Blühbeginn der Hasel (Phase 1) und des Schneeglöckchens (Phase 2) im Zeitraum 2071-2100, wo REMO/UBA nach WETTREG 2010 die frühesten Phaseneintritte projiziert.

Die auf Basis der HADCM3/CLM-Projektion berechneten Phaseneintrittstermine sind dagegen durch eine gegenüber ECHAM5/CLM und REMO/UBA deutlich stärkere Verfrühung charakterisiert. Die HADCM3/CLM-Projektion ähnelt damit stärker den Werten der WETTREG 2010-Projektion. Im Zeitraum 2071-2100 liegt HADCM3/CLM bei den frühen Frühlingsphasen (Phase 1 und 2) näher an den Projektionen ECHAM5/CLM und REMO/UBA. Erst im Erstfrühling und im Vollfrühling (Phase 6, 52, 7, 115, 54, 56, 60, 62, 13, 15 und 19) wird die Differenz zu diesen beiden Modellen größer. Bei diesen Phasen liefern ECHAM5/CLM und REMO/UBA sehr ähnliche Ergebnisse, während basierend auf WETTREG 2010 mit deutlichem Abstand frühere Phaseneintritte berechnet wurden. HADCM3/CLM liegt zwischen diesen drei Modellierungen. Ab dem Frühsommer orientieren sich im Zeitraum 2071-2100

HADCM3/CLM und ECHAM5/CLM zwischen REMO/UBA einerseits (späte Phaseneintritte) und WETTREG2010 andererseits (frühe Phaseneintritte). Zum Teil liefert ECHAM5/CLM nun sogar frühere Werte als HADCM3/CLM (Phase 123, 20, 102 und 104). Für einige Phasen sind die Ergebnisse von ECHAM5/CLM, HADCM3/CLM und WETTREG 2010 im Zeitraum 2071-2100 sogar identisch (Phase 100, 103, 104 und 109). Auffällig ist, dass HADCM3/CLM bei sehr vielen der projizierten Phasen die frühesten Eintrittstermine im Zeitraum 2031-2060 liefert, teilweise zusammen mit WETTREG 2010 (Phase 7, 54, 20, 64, 100, 103 und 104). Ausnahmen bildeten die Phasen 60, 123 und 102.

Die mittels der WETTREG 2010-Projektion berechneten Lufttemperaturdaten ähneln am stärksten denen der HADCM3/CLM-Projektion (Kap. 4.1). Aufgrund der im Vergleich eher wärmeren Temperaturen sind ebenso wie bei der HADCM3/CLM-Projektion stärker ausgeprägte Verfrühungen des Phasenbeginns zu verzeichnen. Der Unterschied zu HADCM3/CLM besteht in der etwas schwächeren Verfrühung im Zeitraum 2031-2030 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000 bzw. dem jüngsten Messzeitraum 1991-2009 sowie einer im Vergleich stärksten Verfrühung im letzten Zeitraum 2071-2100. Mit Ausnahme von Phase 67 liefert WETTREG 2010 bei allen projizierten Phasen im Zeitraum 2071-2100 die frühesten Phaseneintritte (bei den Phasen 52, 115 und 109 zusammen mit HADCM3/CLM, bei den Phase 102 und 104 mit ECHAM5/CLM und bei den Phasen 100 und 103 mit beiden Modellen zusammen).

Die Klimamodelle ECHAM5/CLM und REMO/UBA führen eher zu moderaten Verfrühungen der Phaseneintritte. Auf Basis der anderen beiden Klimamodelle (HADCM3/CLM, WETTREG 2010) wurden deutlich stärkere Verfrühungen projiziert. Dies galt insbesondere für die Ergebnisse des Zeitraums 2031-2060. Im Zeitraum 2071-2100 ähneln sich ab dem Frühsommer zunehmend die Ergebnisse von HADCM3/CLM und ECHAM5/CLM, die sich nun zwischen dem für diesen Zeitraum moderatem Modell REMO/UBA auf der einen Seite und WETTREG 2010, welches sehr frühe Phaseneintritte projiziert, auf der anderen Seite, einordnen. Bei einigen Phasen projizierte ECHAM5/CLM gegenüber HADCM3/CLM sogar frühere Werte in diesem Zeitraum.

Die in den Diagrammen in den Abbildungen 21a und 21b beispielhaft illustrierten Ergebnisse ergaben zusammengefasst, dass von 23 projizierten Phasen 19 Phasen im Zeitraum 2031-2060 stärkere Unterschiede hinsichtlich der vier verwendeten Klimamodelle aufwiesen als im Zeitraum 2071-2100. Im Mittel aller 23 mittels Regression Kriging ausgewerteten Phasen betrug die Schwankungsbreite des Phaseneintritts im Zeitraum 2031-2060 6,5 Tage, während es im Zeitraum 2071-2100 nur 4,7 Tage waren. Im Vergleich der Differenzen des Phasenbeginns zwischen der Klimanormalperiode 1961-1990 und dem Zeitraum 2071-2100 waren die aus der Verwendung der vier Klimamodelle resultierenden Unterschiede mit zehn Tagen für die Haselblüte (Phase 1) am größten und mit 2 Tagen für den Blühbeginn der Robinie (Phase 123) sowie des Wiesen-Knäulgrases (Phase 20) am geringsten.

4.6 Projektion der Weinphasen

Abbildung 22 zeigt diejenigen Standorte zur Beobachtung von Weinphasen, an denen gemäß der gesetzten Kriterien (Kap. 4.2) ausreichende Beobachtungsdaten für eine Auswertung vorlagen. Für Phase 171 (Beginn des Austriebs) standen entsprechend diesen Kriterien lediglich für zwei Standorte ausreichende Daten zur Verfügung (Unter-Hambach und Geisenheim). Entsprechend weniger Wertepaare standen für die Ermittlung der Regressionsbeziehungen zur Verfügung. Für die Phasen 172 (Beginn der Blüte) und 205 (Lese) konnten phänologische Daten für alle drei in Abbildung 22 dargestellten Standorte ausgewertet werden. Die für jeden der drei Standorte erstellten Diagramme geben die Differenz zwischen dem an dem jeweiligen Standort langjährig gemittelten Beobachtungswert im Referenzzeitraum 1971-2000 (weiße Säule) und dem projizierten langjährigen Phaseneintritt im Zeitraum 2071-2100 (schwarze Säule) – hier exemplarisch für das Klimamodell HADCM3/CLM – wieder.

Am Standort Unter-Hambach trat die Weinblüte im Mittel des Referenzzeitraums 1971-2000 einen bzw. zwei Tage früher ein (14. Juni) als an den Standorten Eichberg bzw. Geisenheim. Diese Tendenz spiegelt sich auch in den projizierten Phaseneintritten wider, die Unterschiede werden allerdings größer. So ist an den Standorten Geisenheim und Eichberg mit einer Verfrühung der Weinblüte um fast zwei Wochen (13 bzw. 12 Tage) zu rechnen. Am Standort Unter-Hambach wird sich die Weinblüte der Projektion zu Folge gar um drei Wochen (21 Tage) verfrühen.

Beginn der Weinblüte (Müller-Thurgau), Phase 172
Mittlerer Phasenbeginn an drei ausgewählten Standorten in Hessen

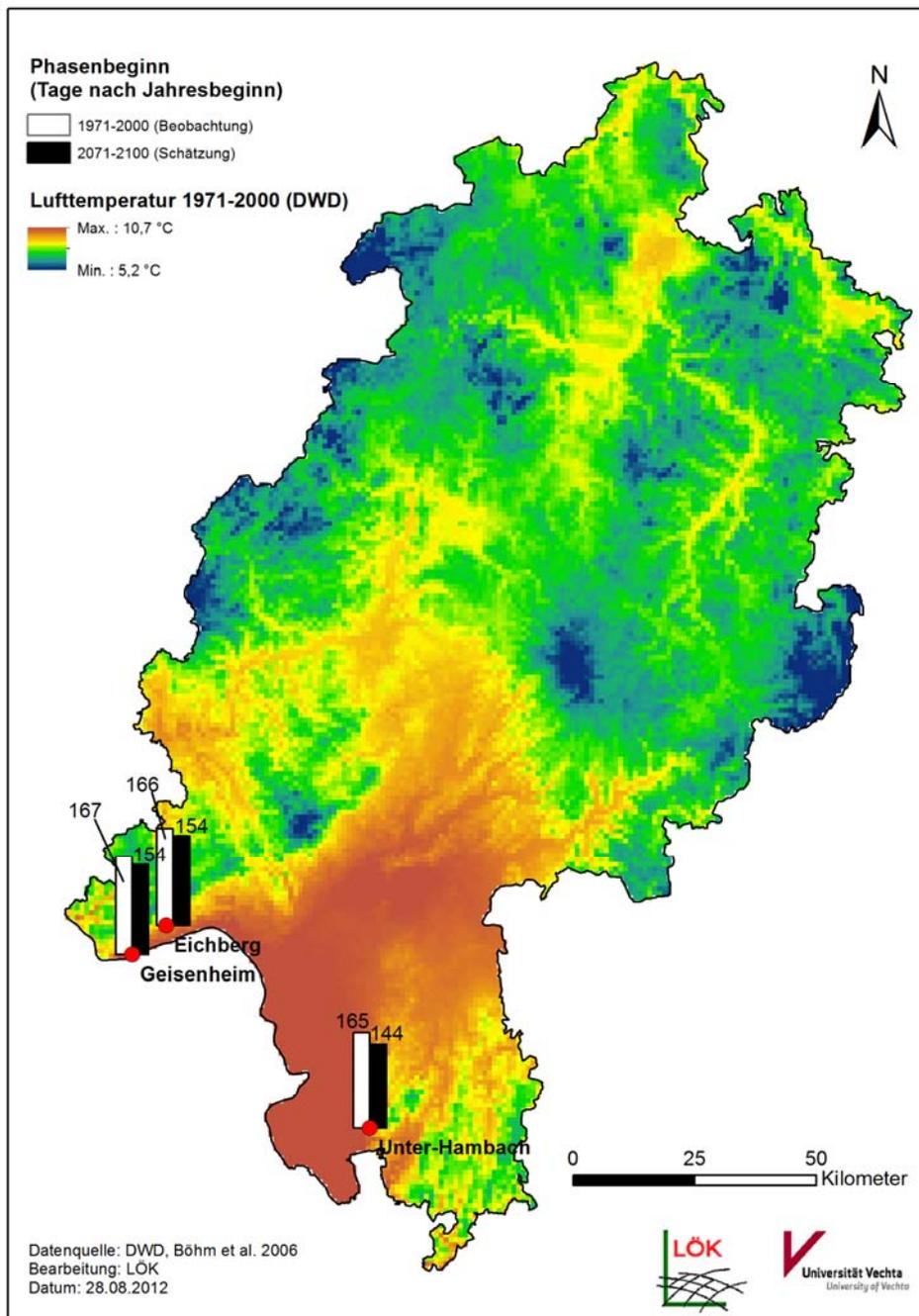


Abb. 22: Beginn der Weinblüte (Phase 172) an den drei ausgewählten Standorten in Hessen im lang-jährigen Mittel des Referenzzeitraums 1971-2000 und projiziert für den Zeitraum 2071-2100 gemäß HADCM3/CLM, BIAS-korrigiert

Beispielhaft für den Standort Unter-Hambach (Vorderer Odenwald) zeigt Abbildung 23 den bisherigen Verlauf der Weinblüte und der Lufttemperatur (Mittel für die Monate April bis Juni) zwischen 1961 und 2009 sowie die Ergebnisse der Projektion für die beiden zukünftigen Zeiträume für alle vier ausgewerteten Klimamodelle. Dabei ergibt sich ein ähnliches Bild wie bereits in Abbildung 17 (s. Kap. 4.4): In der Mehrzahl der Jahre gehen hohe gemessene Temperaturwerte mit frühen Phaseneintritten einher. Ver-

gleichsweise kühle Jahre gehen mit späten Phaseneintritten einher. Ab den 1990er Jahren nehmen die Temperaturen stetig zu, so dass die Weinblüte früher eintritt. Diese Tendenz setzt sich den Projektionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts fort.

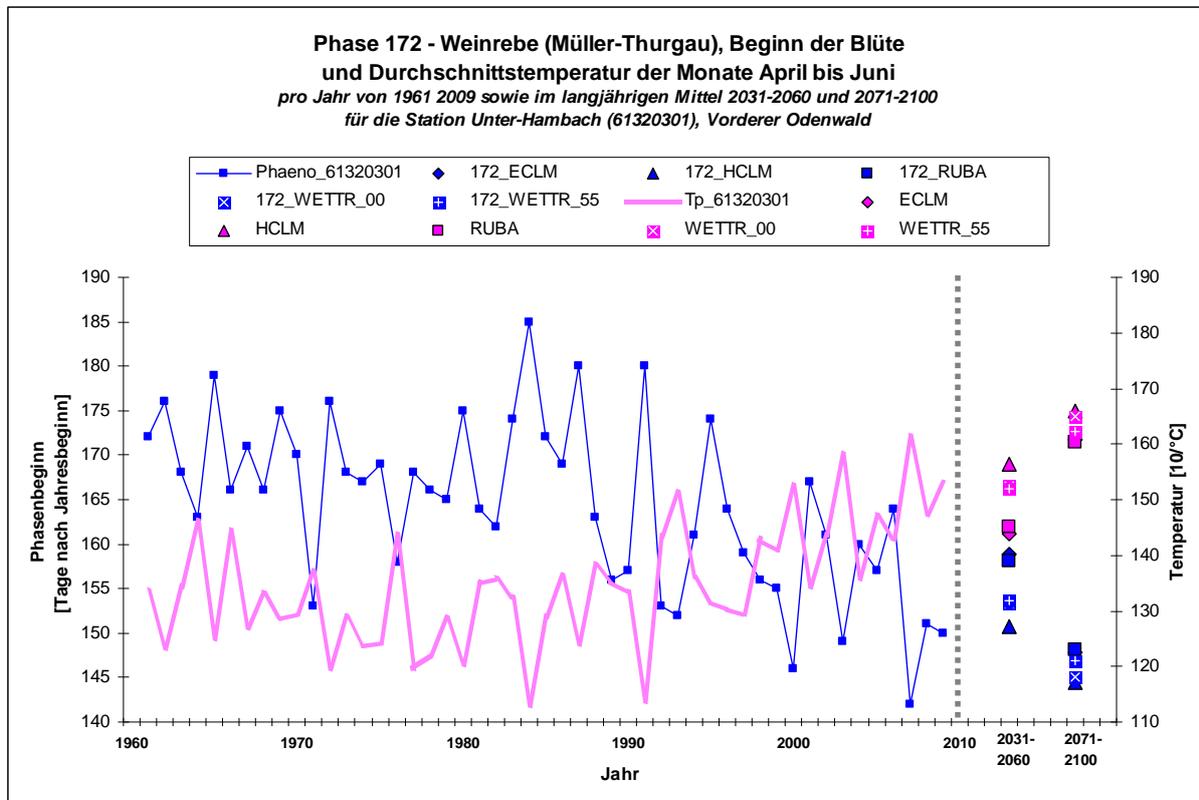


Abb. 23: Beginn der Weinblüte und Temperaturverlauf gemittelt für die Monate April bis Juni zwischen 1961 und 2009 sowie gemäß von vier Klimaprojektionen für die Zeiträume 2031-2060 und 2071-2100 am Beobachtungsstandort Unter-Hambach

Für die projizierten Phaseneintritte sind bei den Unterschieden zwischen den einzelnen Klimamodellen die gleichen Charakteristika auszumachen, wie sie bereits bei der Projektion der Haselblüte exemplarisch in den Kapiteln 4.5.2 bis 4.5.5 dargestellt wurden. So wurden die stärksten Verfrühungen der Weinblüte für das WETTREG-Modell und für HADCM3/CLM prognostiziert. Die mittels REMO/UBA und ECHAM5/CLM projizierten zukünftigen Phaseneintritte fallen moderater aus. Wie schon bei der Haselblüte sind die Differenzen zwischen diesen beiden Modelltypen im Zeitraum 2031-2060 größer als im Zeitraum 2071-2100. Der mittels des Laufs 5 von WETTREG 2010 prognostizierte Phasenbeginn für den Zeitraum 2071-2100 ordnet sich zwischen beiden Modellen ein.

Die Tabellen 7a und b zeigen die Ergebnisse der Projektion aller drei ausgewerteten Weinphasen im Überblick für alle vier Klimamodelle sowie für jeden der in Abbildung 22 dargestellten Standorte. Auch hier zeigen sich wieder die zuvor beschriebenen Unterschiede der Klimamodelle. Die geringste Intensität der Phasenverfrühung zwischen dem Beobachtungszeitraum 1971-2000 und dem zukünftigen Zeitraum 2071-2100 wurde für den Austrieb (Phase 171) berechnet. Für den Standort Unter-Hambach wurden bei den moderaten Modellen ECHAM5/CLM und REMO/UBA gar Phasenverspätungen berechnet.

Lediglich für WETTREG 2010 und HADCM3/CLM wurden Verfrühungen (max. 6 Tage) prognostiziert. Am Standort Geisenheim wurden dagegen ausschließlich Verfrühungen festgestellt, die zum Teil mehr als zwei Wochen betragen (WETTREG 2010, Lauf 0: 15 Tage). Den Klimamodellen zu Folge wird der Austrieb der Weinreben je nach Standort im Mittel des Zeitraums 2071-2100 zwischen dem 15. und dem 24. April beginnen. Die Spanne des Phasenbeginns im Beobachtungszeitraum 1971-2000 lag zwischen dem 23. und dem 30. April. Auf die Weinblüte (Phase 172) wurde bereits eingegangen. Für die Weinlese (Phase 205) ergaben sich die stärksten Verschiebungen für die Zukunft. Diese bewegten sich je nach Standort und Klimamodell zwischen 19 Tagen (REMO/UBA am Standort Unter-Hambach) und 41 Tagen (WETTREG 2010, Lauf 0 am Standort Eichberg). Je nach Klimamodell und Standort ist mit dem Beginn der Weinlese im Mittel des Zeitraums 2071-2100 zwischen dem 28. August und dem 8. September zu rechnen. Im Referenzzeitraum 1971-2000 lag der Beginn der Weinlese je nach Standort noch zwischen dem 27. September und dem 8. Oktober. Bei der Interpretation der für die Weinlese erzielten Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass der Phaseneintritt einem starken anthropogenen Einfluss unterliegt, da der Beginn der Weinlese je nach Rebsorte an den einzelnen Standorten durch lokale Gremien freigegeben wird (DWD 1991).

Tab. 7a: Beobachtete und projizierte Eintritte von Weinphasen an drei ausgewählten Standorten in Hessen; „Beob.“ = Beobachtungswertswerte DWD, „Schätz.“ = Wert der Flächenschätzung, „Dif.“ = Differenz zwischen Beobachtungswert und Flächenschätzung

Phase	171		172			205			
	Station	Unter-Hambach	Geisenheim	Unter-Hambach	Eichberg	Geisenheim	Unter-Hambach	Eichberg	Geisenheim
1961-1990	Beob.	117	124	168	169	170	-	-	-
	Schätz.	121	119	170	171	167	-	-	-
	Dif.	4,45	-4,30	1,14	2,13	-2,53	-	-	-
1971-2000	Beob.	113	120	165	166	167	270	281	273
	Schätz.	118	114	167	169	163	275	280	270
	Dif.	5,14	-5,14	1,93	2,59	-4,27	5,07	-1,25	-2,97
1991-2009	Beob.	108	110	158	161	160	262	269	268
	Schätz.	110	108	160	162	156	267	268	265
	Dif.	2,00	-1,99	2,11	1,07	-3,19	4,80	-1,32	-3,79

ECHAM5/CLM, A1B (BIAS-korrigiert)								
1971-2000	122	120	163	171	171	285	281	281
2031-2060	118	117	159	167	167	271	266	266
2071-2100	114	113	148	155	155	250	245	245

HADCM3/CLM, A1B (BIAS-korrigiert)								
1971-2000	121	121	163	172	172	283	284	284
2031-2060	111	112	151	160	160	258	260	260
2071-2100	107	108	144	154	154	242	244	244

REMO/UBA, A1B (BIAS-korrigiert)								
1971-2000	121	120	163	170	170	283	280	280
2031-2060	119	117	158	165	165	271	267	267
2071-2100	114	112	148	156	156	251	248	248

WETTREG 2010 - Lauf 00, A1B (BIAS-korrigiert)								
1971-2000	122	119	163	169	169	284	279	279
2031-2060	114	112	153	159	159	263	258	258
2071-2100	107	105	145	150	150	245	240	240

WETTREG 2010 - Lauf 55, A1B (BIAS-korrigiert)								
1971-2000	122	119	162	168	168	283	278	278
2031-2060	114	112	154	160	160	262	258	258
2071-2100	108	106	147	152	152	247	241	241

Tab. 7b: Verschiebung der Weinphaseneintritte zwischen dem Referenzzeitraum 1971-2000 und den projizierten Phaseneintritten in den Zeiträumen 2031-2060 und 2071-2100 an drei ausgewählten Standorten in Hessen

Phase	171		172			205		
Station	Unter-Hambach	Geisenheim	Unter-Hambach	Eichberg	Geisenheim	Unter-Hambach	Eichberg	Geisenheim

ECHAM5/CLM, A1B (BIAS-korrigiert)								
7100r-7100beob	9	1	-2	4	3	15	0	8
3160-7100beob	5	-3	-6	0	-1	1	-15	-7
7100-7100beob	2	-7	-17	-11	-12	-20	-35	-28

HADCM3/CLM, A1B (BIAS-korrigiert)								
7100r-7100beob	8	2	-2	6	5	12	3	11
3160-7100beob	-1	-8	-14	-6	-7	-12	-21	-13
7100-7100beob	-6	-12	-21	-12	-13	-28	-37	-29

REMO/UBA, A1B (BIAS-korrigiert)								
7100r-7100beob	9	0	-2	4	3	13	-1	7
3160-7100beob	6	-3	-7	-1	-2	1	-13	-6
7100-7100beob	2	-7	-17	-11	-12	-19	-33	-25

WETTREG 2010 - Lauf 00, A1B (BIAS-korrigiert)								
7100r-7100beob	10	0	-1	3	2	14	-2	6
3160-7100beob	2	-7	-12	-7	-8	-8	-22	-15
7100-7100beob	-5	-15	-20	-17	-18	-25	-41	-33

WETTREG 2010 - Lauf 55, A1B (BIAS-korrigiert)								
7100r-7100beob	9	0	-2	2	1	13	-3	5
3160-7100beob	2	-7	-11	-7	-8	-8	-23	-15
7100-7100beob	-4	-14	-18	-15	-16	-23	-39	-32

4.7 Multivariate Statistik

Für die multivariat-statistisch Analyse derjenigen Phänophasen, die eine Korrelationskoeffizienten von $r < 0,5$ aufwiesen (Kap. 4.4), wurden die beiden in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Verfahren (CART, multiple Regression) angewandt. Von den in den Kapiteln 3.1.2 aufgeführten zusätzlichen Klimaparametern wurden langjährige Mittelwerte aus denjenigen Monaten berücksichtigt, die innerhalb der Spannbreite der jeweiligen langjährig gemittelten Phaseneintritte im Referenzzeitraum 1971-2000 lagen. Bei Phase 68 (Roskastanie, Beginn der Fruchtreife) lag beispielsweise der früheste langjährig gemittelte Phasenbeginn im Zeitraum 1971-2000 in Hessen am 9. September, der späteste am 5. Oktober. Folglich wurden die für den Zeitraum 1971-2000 gemittelten Werte der Klimaparameter der Monate September und Oktober berücksichtigt. Zusätzlich wurden Angaben zur Bodenbeschaffenheit sowie zur Höhenlage für die multivariate Analyse berücksichtigt (Kap. 3.1.4). Für die Pflanzenentwicklung ggf. bedeutsame Summationseffekte, etwa in Form von Temperatursummen, konnten im Erklärungsmodell nicht berücksichtigt werden, da geeignete Datengrundlagen hierfür nicht zur Verfügung standen (Kap. 5.2.3).

CART-Analyse

Neben der Festlegung der Prädiktoren, die für die CART-Analyse der Phänophasen (Zielvariable = Phasenbeginn) berücksichtigt werden sollten (Kap. 3.1.2 und 3.1.4), wurden für die Berechnung der Entscheidungsbäume Stoppkriterien definiert, die festlegten, wann die automatisierte Partitionierung der Datensätze (Beobachtungsstandorte) beendet wurde. Als minimale Homogenitätssteigerung wurde 1 % der Gesamtvarianz des Ausgangsdatsatzes, als Mindestanzahl der Datensätze innerhalb eines Tochterknotens ein minimaler Anteil von 10 % aller Datensätze im Wurzelknoten festgesetzt. Für die in Kapitel 4.4 identifizierten 8 Phasen, die keine hinreichende Korrelation mit den Lufttemperaturen aufwiesen, wurden sowohl für Deutschland als auch für Hessen entsprechende Analysen durchgeführt. Phase 94 (Auflaufen des Winterweizens) wurde jedoch nicht weiter untersucht, da es sich um eine Kulturart handelt, deren Eintritt als zu stark von Managemententscheidungen (Sortenwahl, Ausbringzeitpunkt) abhängige Phase eingeschätzt wurde.

Abbildung 24 zeigt exemplarisch den entsprechend den oben angegebenen Kriterien generierten Entscheidungsbaum für Phase 68 (Roskastanie, erste reife Früchte), in dem jeder der untersuchten phänologischen Beobachtungsstandorte in Hessen ($N = 63$) einem Endknoten zugewiesen wurde. Aus dem Dendrogramm konnte jeweils abgelesen werden, welche Parameterkonstellationen einen resultierenden Endknoten definieren und damit den jeweiligen mittleren Phasenbeginn innerhalb eines entsprechenden Endknotens bedingen. Für den Endknoten 5 waren dies beispielsweise diejenigen Standorte ($N = 14$), die eine orografische Höhe von ≤ 360 Meter über NN aufwiesen, an denen im September die Globalstrahlung unter 2872 Wh/m^2 lag und an denen eine der folgenden Bodenarten vorkamen: Schluffiger

Lehm, mittelstark toniger Schluff, mittelstark lehmiger Sand, schluffig-lehmiger Sand oder stark toniger Schluff. An diesen Standorten begann die Fruchtreife der Rosskastanie im Mittel des Zeitraums 1971-2000 am 20. September (263 TnJ). Standorte, die sich auf einer Höhe von über 360 Meter über NN befanden und somit eher niedrigeren Temperaturen unterlagen, wiesen demnach im Mittel einen späteren Phasenbeginn (29. September) auf als diejenigen, die eher in niedrig gelegenen Flusstälern oder -ebenen verortet waren (20. September).

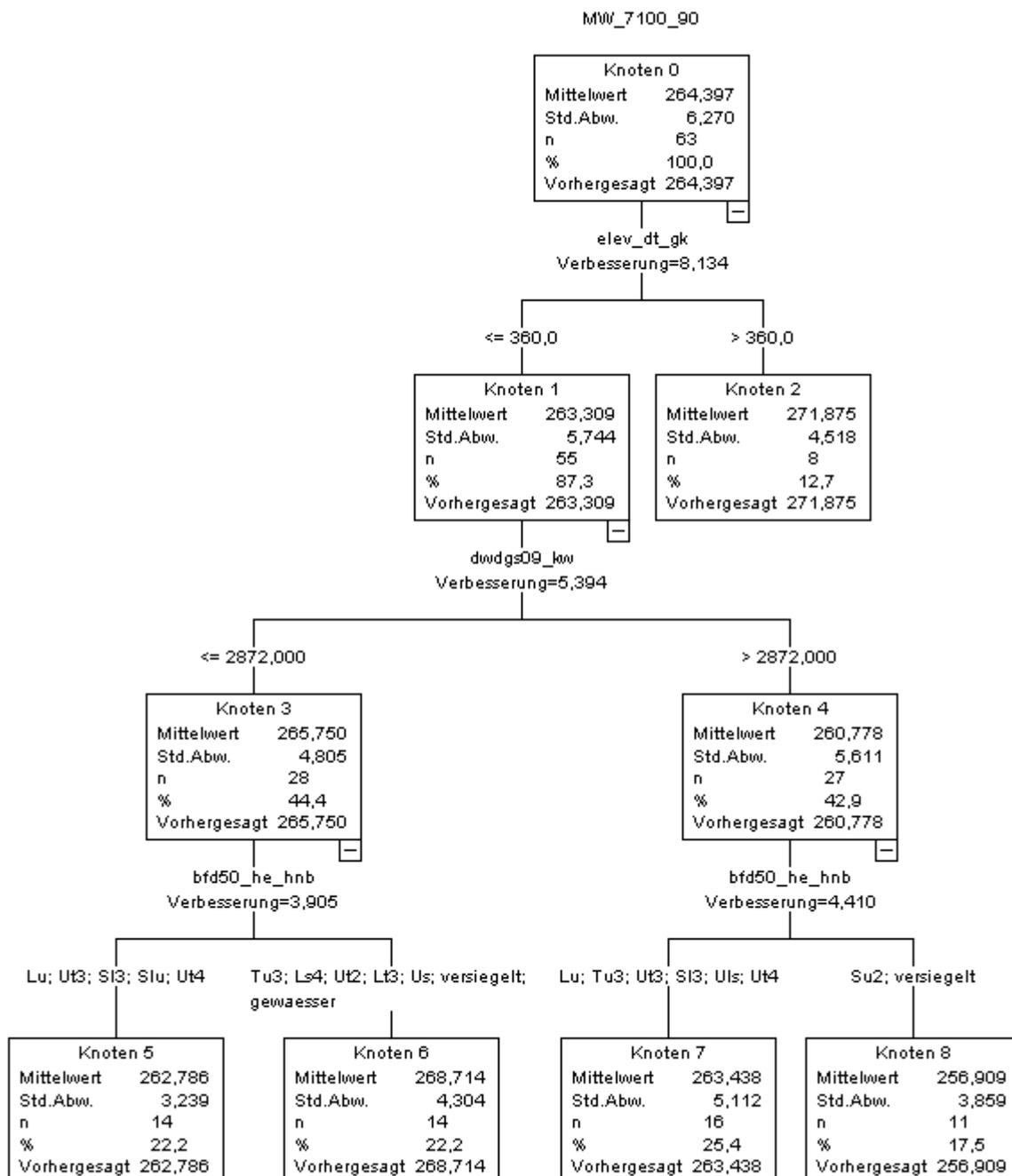


Abb. 24: CART-Entscheidungsbaum Phase 68 (Rosskastanie, erste reife Früchte) für den Zeitraum 1971-2000 in Hessen

Als nächstes Splitkriterium ergab die Globalstrahlung im September die günstigste Untergliederung in zwei Tochterknoten. An Standorten, an denen eine höhere Globalstrahlung ($> 2872 \text{ wh/m}^2$) gemessen wurde (Knoten 4), begann die Fruchtreife der Rosskastanie im Mittel 5 Tage früher als an Standorten mit weniger Sonneneinstrahlung (Knoten 3). Für eine folgende Untergliederung wurde die Bodenart als weiteres Splitkriterium für beide Tochterklassen gewählt. Bindige Bodenarten bedingten demnach tendenziell eher einen späteren Phasenbeginn (Knoten 6 und 7), auf Böden mit geringerem Feinkornanteil setzte die Fruchtreife der Rosskastanie hingegen etwas früher ein (Knoten 5 und 8). Diese Beobachtung korrespondiert mit den fachlich zu erwartenden Zusammenhängen. Grobkörnige Bodenarten weisen eine gute Wasserführung, Durchlüftung und Durchwurzelbarkeit auf, besitzen jedoch ein geringeres Wasserhalte- und Nährstoffbindungsvermögen als feinkörnigere Bodenarten (Blum 2007). Für die Geschwindigkeit des Pflanzenwachstums haben das Bodenklima und dabei insbesondere die Bodentemperatur und die Bodenfeuchtigkeit entscheidenden Einfluss (Schnelle 1955). Je wärmer die Bodenschichten sind, in denen sich die Wurzeln befinden, umso stärker wird das Wachstum der Pflanze beschleunigt. Die Bodentemperatur wird dabei wiederum von der Bodenfeuchte beeinflusst, da feuchte Böden sich langsamer erwärmen als trockene Böden. Gleichzeitig kann das Bodenwasser in durchlässigen Böden die Wärme schneller in tiefere Bodenhorizonte ableiten.

Als statistisches Maß für die Gesamtgüte der CART-Analyse, die eine Aussage darüber erlaubt, wie gut die jeweils ermittelten Parameterkonstellationen die Gesamtvarianz des Ausgangsdatensatzes (hier: phänologischer Phasenbeginn) erklären können, wird die Summe der Improvement-Werte der Einzelknoten des Entscheidungsbaums ermittelt. Der entsprechende Wert beziffert den Anteil der erklärten Varianz und entspricht somit dem aus der Regressionsanalyse bekannten Bestimmtheitsmaß R^2 . Für das in Abbildung 24 gezeigte Beispiel zum Beginn der Fruchtreife der Rosskastanie wurde ein Wert von 0,56 ermittelt, d.h. 56 % der Gesamtvarianz aller Beobachtungsdaten konnten durch das ermittelte Prädiktorenmodell erklärt werden.

Die Entscheidungsbäume der übrigen für Hessen mittels CART ausgewerteten Phasen sind in Anhang 10 zu finden. In Tabelle 8 ist für jede dieser Phasen das berechnete R^2 , und damit der Anteil der erklärten Varianz, ablesbar. Der höchste Anteil an erklärter Varianz wurde bei den analysierten Phasen für die Fruchtreife der Rosskastanie ermittelt. Ferner zeigt die Tabelle diejenigen Prädiktoren, die gemäß dem CART-Algorithmus als Split-Kriterien für die Generierung des Dendrogramms verwendet wurden und demnach den Phasenbeginn im jeweiligen Erklärungsmodell bestimmten. Es zeigte sich, dass neben der mittleren Lufttemperatur insbesondere die Bodenverhältnisse starken Einfluss auf die Pflanzenphänologie hatten. So wurde die Bodenart sehr häufig als Splitparameter gewählt. Weitere Boden-

kennwerte (nutzbare Feldkapazität, Luftkapazität, kf-Wert) sowie der Niederschlag fanden bei der Partitionierung im Dendrogramm durch CART keine Berücksichtigung.

Für die Phase 226 (Stiel-Eiche, Blattfall) ergab die CART-Analyse kein Dendrogramm, da kein Entscheidungsbaummodell zu einer hinreichenden Verbesserung der Varianz führte. Für Phase 108 (spät reifende Birne, Beginn der Pflückreife) konnten für Hessen keine Entscheidungsbäume generiert werden, da lediglich Daten von 8 Standorten in Hessen zur Analyse vorlagen.

Tab. 8: Ergebnisse der CART-Analyse für sechs phänologische Phasen in Hessen im Zeitraum 1971-2000

Jahreszeit	Spätsommer	Frühherbst	Vollherbst		Spätherbst	Winter
Phase	Phase 65 Heide-Kraut, Blüte 	Phase 177 Hunds-Rose, Fruchtreife 	Phase 72 Stiel-Eiche, Fruchtreife 	Phase 68 Rosskastanie, Fruchtreife 	Phase 73 Stiel-Eiche, Blattverfärbung 	Phase 226 Stiel-Eiche, Blattfall 
Ant. d. erklärten Varianz	0,25	0,30	0,38	0,56	0,16	-
Splitparameter	Bodenart; T_max (Juli)	T_mittel (Okt.); Bodenart	GS (Sep.); Bodenart	Höhe; GS (Sep.); Bodenart (2x)	T_mittel (Okt.)	Kein Dendrogramm

T_mittel = Mitteltemperatur; T_max = Höchsttemperatur; GS = Globalstrahlung

Die Ergebnisse der CART-Analyse auf Bundesebene fasst Tabelle 9 zusammen. Die basierend auf den bundesweit vorliegenden Daten berechneten CART-Bäume sind ebenfalls in Anhang 10 zu finden. Die gewonnenen Erkenntnisse bestätigen wie zuvor für Hessen, dass für die Herbstphasen neben der Lufttemperatur insbesondere die Bodenverhältnisse entscheidenden Einfluss auf die Pflanzenphänologie nahmen. Neben Temperaturparametern wurden diese von CART am häufigsten als Splitparameter herangezogen. Bei einigen Herbstphasen scheinen insbesondere die in dieser Jahreszeit herrschenden Tiefsttemperaturen den Phaseneintritt zu beeinflussen. Dabei ergab die Analyse für einige Standorte, dass moderate Tiefsttemperaturen auf den Beginn der Fruchtreife im Früh- und Vollherbst (Hunds-Rose, Stiel-Eiche und spät reifende Birne) beschleunigend wirken. Im Spätherbst zögerten sie dagegen den Blattfall der Stiel-Eiche (Phase 73) hinaus. Dies geht einher mit den bisherigen Ergebnissen der deskriptiven Statistik (Kap. 4.3) und der bivariat-statistischen Analyse (Kap. 4.4). Ferner wurde auch die Niederschlagshöhe als Splitparameter verwendet. Dabei zeigte sich, dass höhere Niederschläge den Phaseneintritt der Herbst- und Winterphasen (Phase 68 und 226) hinauszögerten. Für die Heideblüte (Spätsommer) beschleunigten dagegen höhere Niederschläge den Phasenbeginn.

Tab. 9: Ergebnisse der CART-Analyse für sieben phänologische Phasen in Deutschland im Zeitraum 1971-2000

Jahreszeit	Spätsommer	Frühherbst	Vollherbst			Spätherbst	Winter
Phase	Phase 65 Heide-Kraut, Blüte 	Phase 177 Hunds-Rose, Fruchtreife 	Phase 72 Stiel-Eiche, Fruchtreife 	Phase 68 Rosskastanie, Fruchtreife 	Phase 108 Birne (spätrei- fend), Frucht- reife 	Phase 73 Stiel-Eiche, Blattverfärbung 	Phase 226 Stiel-Eiche, Blattfall 
Ant. d. erklärten Varianz	0,08	0,19	0,13	0,21	0,22	0,05	0,05
Splitparameter	Bodenart; NS (Sep.)	T_min (Jul.); Bodenart; T_mittel (Sep.)	T_min (Sep.), T_mittel (Aug.)	T_mittel (Sep) (2x), T_mittel (Aug), Bodenart, NS (Okt)	T_min (Sep)	T_min (Okt), Bodenart	T_mittel (Nov), NS (Okt)

T_mittel = Mitteltemperatur; T_min = Tiefsttemperatur

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die räumliche Auflösung der Bodendaten für Deutschland deutlich niedriger (BÜK 1000, Maßstab 1:1 Mio.) war als für Hessen (BFD 50, Maßstab 1:50.000). Ein Abgleich der Bodenarten zwischen beiden Datenquellen ergab eine Übereinstimmung von etwa 50 %. Ferner standen für Deutschland keine Daten zur nutzbaren Feldkapazität, zur Luftkapazität und zur hydraulischen Durchlässigkeit zur Verfügung (Tab. 2). Die mittels der erklärten Varianz quantifizierten statistischen Zusammenhänge erreichten lediglich Werte $< 0,25$.

Multiple Regressionsanalyse

Tabelle 10 enthält die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für jede untersuchte Phase in Hessen für den Zeitraum 1971-2000 sowie die entsprechend abgeleiteten Regressionsgleichungen. Wie schon für die CART-Analyse konnten auch für die multiple Regressionsanalyse keine Berechnungen für die Phasen 94 und 108 aus den o. g. Gründen durchgeführt werden. Für die Phasen 65, 72 und 226 ergab die multiple Regressionsanalyse keine Parameter, die den Phasenbeginn statistisch signifikant beeinflussten. Insbesondere bei Phase 72 mag dies unter anderem auf die geringe Anzahl an Beobachtungsstandorten ($N = 14$) zurückzuführen sein.

Für die erfolgreich analysierten Phasen variierte das berechnete R^2 zwischen 0,22 (Phase 68 und 177) und 0,09 (Phase 73). Die erklärte Varianz war demnach geringer als bei den mittels CART durchgeführten Analysen (Tab. 8). Wie schon bei der CART-Analyse war ein indirekter Einfluss der Lufttemperatur auf den Phasenbeginn zu beobachten. So wurde zweimal die orografische Höhe als erklärende Variable in das Regressionsmodell aufgenommen und einmal die Tiefsttemperatur im September. Zusätzlich

wurde die Luftkapazität (partieller Korrelationskoeffizient = 0,33) zur Beschreibung der Fruchtreife der Hunds-Rose im Regressionsmodell berücksichtigt.

Tab. 10: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für sechs phänologische Phasen in Hessen im Zeitraum 1971-2000

Jahreszeit	Spätsommer	Frühherbst	Vollherbst		Spätherbst	Winter
Phase	Phase 65 Heide-Kraut, Blüte	Phase 177 Hunds-Rose, Fruchtreife	Phase 72 Stiel-Eiche, Fruchtreife	Phase 68 Rosskastanie, Fruchtreife	Phase 73 Stiel-Eiche, Blattverfärbung	Phase 226 Stiel-Eiche, Blattfall
						
r	-	0,47	-	0,46	0,30	-
R ²	-	0,22	-	0,22	0,09	-
Regressionsgleichung	-	$y = 225,349 + 0,069x + 0,208x$	-	$y = 0.032x + 256.324$	$y = 0.349x + 256.556$	-
Erklärende Variablen	keine	Höhe, Luftkapazität	keine	Höhe	T_min (Sep.)	keine

T_min = Tiefsttemperatur

Die Ergebnisse der auf den deutschlandweiten Daten basierenden multiplen Regressionsanalyse zeigt Tabelle 11. Auch hier war die erklärte Varianz sehr niedrig, das berechnete R² erreichte bestenfalls einen Wert von 0,19 (Phase 177). Besonders häufig wurde die Lufttemperatur als erklärende Größe verwendet, sowohl die Höchst- und Tiefsttemperaturen als auch das Monatsmittel wurden in den Regressionsmodellen berücksichtigt. Auch die Globalstrahlung (Phase 65, Heideblüte) sowie orografische Höhe (Phase 177, Fruchtreife der Hunds-Rose) fanden Verwendung. Der Niederschlag wurde bei zwei Phasen (177, 73) in das Regressionsmodell aufgenommen. Bezogen auf die partielle Korrelation war der Einfluss des Niederschlags jedoch sehr gering (r = -0,18 bzw. r = -0,11). Die stärksten partiellen Korrelationen wurden für die Monatsmitteltemperaturen bei der Fruchtreife der Rosskastanie (r = -0,40), der Stiel-Eiche (r = -0,36) sowie der spätreifenden Birne (r = -0,41) ermittelt. Bodenkennwerte fanden in den Regressionsmodellen keine Berücksichtigung, vermutlich waren weder die räumliche noch die inhaltliche Auflösung der Daten der BÜK 1000 für eine Erklärung des Phasenbeginns ausreichend.

Tab. 11: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für sieben phänologische Phasen in Deutschland im Zeitraum 1971-2000

Jahreszeit	Spätsommer	Frühherbst	Vollherbst			Spätherbst	Winter
Phase	Phase 65 Heide-Kraut, Blüte 	Phase 177 Hunds-Rose, Fruchtreife 	Phase 72 Stiel-Eiche, Fruchtreife 	Phase 68 Rosskastanie, Fruchtreife 	Phase 108 Birne (spätreifend), Fruchtreife 	Phase 73 Stiel-Eiche, Blattverfärbung 	Phase 226 Stiel-Eiche, Blattfall 
r	0,22	0,43	0,36	0,40	0,41	0,15	0,16
R ²	0,05	0,19	0,13	0,16	0,17	0,02	0,03
Regressionsgleichung	$y = 235,227 + 0,009x - 0,007x - 0,082x$	$y = 322,951 - 1,253x - 0,158x + 0,023x + 0,920x$	$y = 326,246 - 0,412*x - 0,047*x$	$y = -0,286x + 302,770$	$y = 329,885 - 0,399x$	$y = 0,129x + 277,074$	$y = 0,143x + 302,126$
Erklärende Variablen	GS (Sep.), GS (Aug.), T_min (Aug.)	T_min (Jul.), NS (Sep.), Höhe, T_min (Sep.)	T_mittel (Sep.), NS (Sep.)	T_mittel (Sep.)	T_mittel (Sep.)	T_min (Sep.)	T_mittel (Nov.)

T_mittel = Mitteltemperatur; T_min = Tiefsttemperatur; GS = Globalstrahlung; NS = Niederschlag

5 Diskussion

5.1 Phänologische Beobachtung

Die Erhebung phänologischer Daten ist aufgrund der angewendeten Methodik grundsätzlich mit räumlichen und zeitlichen Ungenauigkeiten behaftet. Gemäß der „Anleitung für phänologische Beobachtungen“ des DWD (1991) ist jeder phänologische Beobachtungsstandort durch eine Standortkoordinate georeferenziert. Das jeweilige Beobachtungsgebiet kann sich jedoch demgemäß über einen Radius von fünf Kilometern um diese Standortkoordinate erstrecken. Der tatsächliche Fundort des jeweiligen Beobachtungsobjekts, also einer einzelnen Pflanze, kann also nicht exakt angegeben werden. Dies hat u. a. Bedeutung für die Verschneidung der Beobachtungsstandorte im GIS mit Karten zu anderen relevanten Messgrößen. Ist dies für Klimakarten aufgrund deren an die räumliche Variabilität des Klimas angepassten Auflösung ($1 \times 1 \text{ km}^2$) noch hinnehmbar, ist gerade die Verschneidung mit Bodendaten problematisch, da diese nicht dem kleinräumigen Wechsel der Bodenverhältnisse Rechnung tragen. Nichtsdestotrotz haben die multivariat-statistischen Auswertungen gezeigt, dass die Bodeneigenschaften, gerade für die Herbstphasen, eine wichtige Rolle für den Phasenbeginn spielen. Zusätzlich müssen abhängig vom Maßstab der Bodenkarten Generalisierungen in Kauf genommen werden. Je kleinmaßstäbiger (z.B. BÜK 1000) die Bodenkarte ist, desto größer ist auch der Grad der Generalisierung durch Zusammenfassung von unterschiedlichen Bodenarealen zu einem Polygon mit gleichen Bodeneigenschaften. Beide Phänomene – der Standort der Pflanze ist nicht genau bekannt bzw. die aus der Karte abgelesenen Bodeneigenschaften entsprechen nicht den realen Bedingungen am Fundort – bedeuten, dass häufig die falschen Bodeneigenschaften mit dem beobachteten Phasenbeginn einer Pflanze assoziiert werden. Eine mögliche Lösung wäre die Erhebung von zusätzlichen Metadaten für die phänologischen Beobachtungen, und dies nicht nur für jeden phänologischen Beobachtungsstandort, sondern insbesondere für jedes einzelne Beobachtungsobjekt (Schönrock et al. 2013), wie es bereits für andere Monitoringprogramme in der Umweltbeobachtung durchgeführt oder in Planung ist (Kleppin et al. 2008, Pesch und Schröder 2006, Schmidt et al. 2010).

Ein weiteres Problem ist, dass die phänologischen Beobachtungen gemäß DWD 1991 nur zwei bis dreimal pro Woche durchgeführt werden, was zu einer gewissen zeitlichen Ungenauigkeit bei der Feststellung des tatsächlichen Phasenbeginns führt. Weiterhin kann es gerade bei Obstsorten passieren, dass der Phasenbeginn je nach Region an unterschiedlichen Spezies beobachtet wird. Selbst bei Individuen derselben Spezies kann es durch genetische Variation zu Unterschieden in der Phasenentwicklung kommen (vgl. Kap. 3.2.4). Zudem unterliegen die phänologischen Beobachtungen der Subjektivität des jeweiligen Beobachters (Schnelle 1955). Die phänologischen Daten werden nicht mit einem geeichten Messgerät erfasst, sondern durch visuelle Ansprache des jeweiligen Beobachters. Trotz der Beobachter-Richtlinie des DWD (DWD 1991) liegt es im Ermessen des Beobachters, wann eine Pflanzen-

phase als eingetreten betrachtet wird. Damit erfüllt das pflanzenphänologische Klimabiomonitoring nicht alle Hauptkriterien, die an empirische Beobachtungen zu stellen sind (Schröder 1996, Schröder et al. 1994). Möglichkeiten, die Plausibilität der Beobachtungsdaten neben dem vom DWD durchgeführten Verfahren (DWD 2006) zu überprüfen, wurden in Kapitel 3.1.1 vorgestellt. Zusätzlich erhobene Metadaten könnten weiterhin die Interpretation der Daten und die Identifikation potenzieller Datenfehler befördern und den Anteil des „Rauschens“ (Kap. 3.2.4) am Messsignal reduzieren helfen.

Ferner ergeben sich Unstimmigkeiten in den phänologischen Daten, die auf Beobachterwechsel oder aber den Wechsel des Beobachtungsobjektes zurückgeführt werden könnten. Bei Obstphasen könnte hier auch eine geänderte Sortenwahl bei der Beobachtung die Ursache sein. Derartige Änderungen bei der Datenerhebung werden nicht in den vom DWD zur Verfügung gestellten phänologischen Daten dokumentiert. Sie beeinflussen jedoch deutlich die Auswertung der phänologischen Beobachtungen an einem Standort. In Rahmen der Datenanalyse der vorliegenden Arbeit wurden in Einzeljahren immer wieder vom Mittel stark abweichende Beobachtungswerte festgestellt. Handelte es sich hierbei um Ausnahmen, die nur ein einziges Jahr oder nur wenige Jahre betrafen, so wurde davon ausgegangen, dass es sich um die natürliche Variabilität des Phaseneintritts handelte (Kap. 4.3.1), die durch für den jeweiligen Standort extreme Klimaverhältnisse in dem betroffenen Jahr verursacht wurden. Es wurden jedoch immer wieder Standorte ermittelt, bei denen die Beobachtungswerte ab einem bestimmten Jahr über eine Dauer von mehreren Jahren und teilweise gar dekadensübergreifend abrupt und lang anhaltend von den davor oder danach gemessenen Werten abwichen. Derartige langjährige Abweichungen wurden auf die o. g. Gründe zurückgeführt. Stark abweichende Beobachtungswerte wurden dann entsprechend der in Kapitel 3.1.1 dargelegten Vorgehensweise bei der weiteren Analyse aus dem Datensatz eliminiert. Auch während der anschließenden bivariaten Analyse (Kap. 4.4) sowie bei der Berechnung der phänologischen Flächenkarten (Kap. 4.5) wurden immer wieder stark abweichende Phaseneintritte ermittelt, welche dann nachträglich – sofern notwendig – korrigiert wurden.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Bivariate Statistik

Anhand von Abbildung 25 ist zu erkennen, dass die Verwendung von Monatsreihen für die Lufttemperatur bessere Ergebnisse geliefert hat als die Korrelationsanalyse zwischen den Jahresdurchschnittstemperaturen und dem Phasenbeginn (Kap. 4.4). Die Stärke des statistischen Zusammenhangs zwischen Phasenbeginn und langjährigen Monatsmitteltemperaturen war bei mehreren Phasen höher als für den Vergleich mit den langjährigen Jahresmitteltemperaturen. So wiesen beispielsweise für den Zeitraum 1971-2000 17 Phasen einen starken Zusammenhang ($r \geq 0,7-0,89$) zu den langjährig gemittelten Temperaturen der zuvor definierten Monatsreihen auf, für die langjährigen Jahresmitteltemperaturen konnte

dagegen nur für 14 Phasen eine entsprechend hohe Korrelation mit den Lufttemperaturen ermittelt werden. Dieses zu erwartende Erkenntnis konnte anhand der vorgestellten statistischen Auswertungen quantitativ belegt werden.

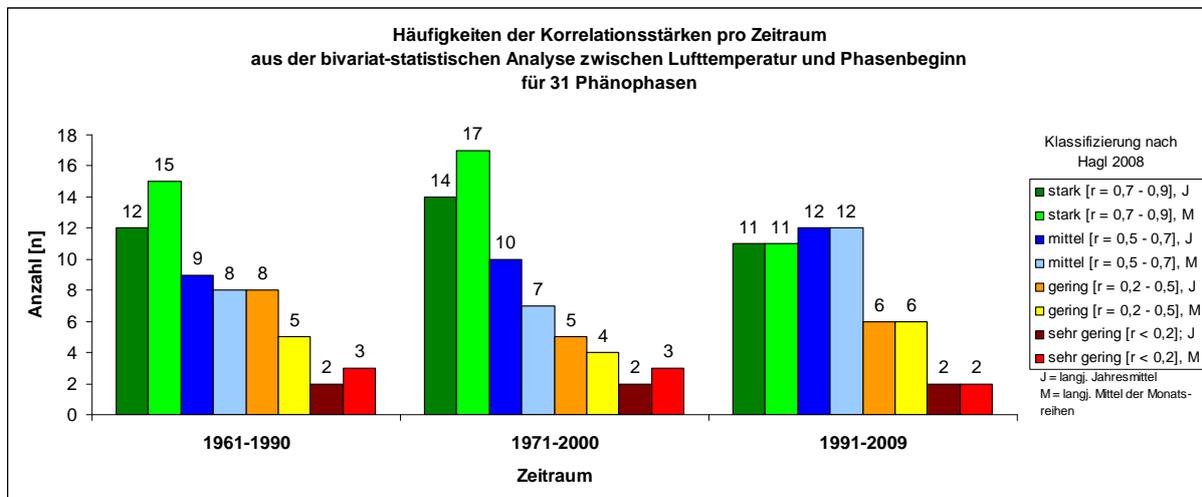


Abb. 25: Häufigkeiten der Korrelationsstärken pro Zeitraum aus der bivariat-statistischen Analyse zwischen der Lufttemperatur und dem Phasenbeginn für 31 Phänophasen

5.2.2 Regression Kriging

Die Qualität der mittels Regression Kriging berechneten Flächenschätzungen zur phänologischen Entwicklung zwischen 1961 und 2009 wurde anhand des Root Mean Square Errors (RMSE) statistisch überprüft. Je näher der RMSE bei null liegt, desto höher ist die Schätzqualität, denn dann sind Schätz- und zugehöriger Messwert im Mittel identisch. Die berechneten RMSE-Werte für die deutschlandweite und die landesweiten Schätzungen für Hessen schwankten insgesamt nur zwischen 0,08 (Median der Phasen 62 und 102, jeweils im Zeitraum 1961-1990, jeweils deutschlandweit) und 1,5 (Median Phase 60, Zeitraum 1991-2009, Hessen). Neben (1) den RMSE-Werten wurden zusätzlich (2) die mittlere Abweichung (Median und Mittelwert), (3) der mittlere Betrag (Median und Mittelwert) der Differenz zwischen Schätz- und Messwert sowie (4) der Korrelationskoeffizient (r) zwischen Schätz- und Messwert berechnet. Während die beiden ersten Kennwerte idealer Weise ebenfalls den Wert null annehmen sollten (negative und positive Abweichungen heben sich hierbei auf), beträgt der Korrelationskoeffizient und das Bestimmtheitsmaß im Idealfall +1 bzw. -1 (Kap. 3.2.2). Die geringsten mittleren Abweichungen (2) zwischen Mess- und Schätzwert wurden mit einem Wert von 0,00 für nahezu alle untersuchten Phasen für den Median des Zeitraums 1961-1990 (deutschlandweite Auswertung) erreicht. Die höchsten mittleren Abweichungen ergaben sich für Phase 1 (Zeitraum 1991-2009, Hessen) mit einem Wert von 1,4 Tagen. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich auch für den Betrag der Abweichungen (3). Die ermittelten Korrelationskoeffizienten schwankten zwischen 0,89 (Phase 6 im Zeitraum 1971-2000, Hessen) und 1,00 (mehrere Phasen).

Bei der flächenhaften Darstellung der zukünftigen phänologischen Entwicklung (Kap. 4.5.2 bis 4.5.5) wurden die auf den jeweiligen Klimamodelldaten basierenden Flächenkarten mit den Residuen der regressionsanalytischen Schätzung des Zeitraums 1971-2000 korrigiert (Kap. 3.2.3). Wie sich gezeigt hat, wirkte sich diese Verrechnung nur geringfügig auf das Gesamtergebnis aus. Der durchschnittliche landesweite Phasenbeginn veränderte sich durch die Berücksichtigung der Residuen nur um -1 bis +2 Tage. Durch die Berücksichtigung der Residuen wurden aber die räumlichen Strukturen der phänologischen Entwicklung, die in erster Linie reliefbedingt waren, deutlicher hervorgehoben. Dies präziserte die naturräumliche Differenzierung, da die Reliefeigenschaften der einzelnen Naturräume stärker berücksichtigt wurden.

5.2.3 Multivariate Statistik

Die Kriterienprüfung für die Anwendung der multiplen linearen Regressionsanalyse (Kap. 3.2.4) ergab zwar, dass bei allen multivariat ausgewerteten Phasen die meisten Kriterien erfüllt werden konnten. Allerdings wurden bei der multiplen Regressionsanalyse im Vergleich zur bivariaten Regressionsanalyse nur geringfügige Verbesserungen des Bestimmtheitsmaßes für die einzelnen Phasen erzielt. Bei keiner der untersuchten Phasen überstieg dabei der Korrelationskoeffizient einen Wert von $r \geq 0,5$. Der Klassifizierung der Korrelationskoeffizienten nach Hagel (2008) zu Folge wurden demnach nur „schwache“ oder „sehr schwache“ Korrelationen ermittelt. Auf Basis solch geringer Assoziationswerte konnten keine Flächenschätzungen und damit auch keine Projektionen zum zukünftig zu erwartenden Phaseneintritte vorgenommen werden. Der statistische Zusammenhang zwischen der abhängigen Variablen und den Prädiktoren und damit der erklärten Varianz der abhängigen Variablen war hierfür zu gering. Ursache hierfür könnte die Nichterfüllung einer für das Regressionsmodell entscheidenden Modellprämisse sein, nämlich die Vollständigkeit des Regressionsmodells (Backhaus et al. 2011). Offensichtlich fehlten für die insbesondere zu betrachtenden Herbstphasen entscheidende Faktoren, um den Phasenbeginn hinreichend zu erklären. Prädiktoren wie etwa die Anzahl der Frosttage oder Temperatursummen, die durchaus entscheidende Einflussgrößen für den Eintritt phänologischer Phasen sind (Holz et al. 2010, Schnelle 1955), konnten aufgrund der Datenlage nicht als Eingangsgrößen in der multivariat-statistischen Analyse berücksichtigt werden. Entsprechende Daten lagen für den Zeitraum 1961-2009 nur als Monatsmittelwerte, jedoch nicht als Tageswerte vor.

Eine weitere Limitierung bei der multivariaten Auswertung stellten die zur Verfügung stehenden Bodendaten dar. Der Boden hat insbesondere auf die Entwicklung der Herbstphasen einen besonderen Einfluss (Schnelle 1955; Seyfert 1960). Verschiedene Bodenkenngrößen (Tab. 2) wurden daher in die multivariate Analyse einbezogen. Außer der Bodenart waren diese Kenngrößen jedoch nur für Hessen verfügbar (BFD 50). Für die auf Hessen konzentrierte Auswertung war wiederum von Nachteil, dass die

Anzahl an Standorten für jede Phase vergleichsweise gering war, um statistisch belastbare Ergebnisse erzielen zu können. Zudem muss damit gerechnet werden, dass selbst in großmaßstäbigen Karten wie der BFD 50 aufgrund der notwendigen Generalisierung die für die Monitoringstandorte abgelesenen Bodenverhältnisse nicht immer tatsächlich auch zutrafen (vgl. Kap. 5.1). Zusammengefasst führten die beschriebenen Einschränkungen dazu, dass die für Hessen und Deutschland angewendeten Datenmodelle das „Rauschen“ des phänologischen Signals nicht hinreichend reduzieren konnten. Immerhin lieferten die CART-Modelle und die multiple Regression einige plausible Prädiktoren, deren Einflussstärke jeweils anhand der statistischen Kennwerte quantifiziert werden konnten.

Der Vergleich des Anteils der Varianz, der durch die jeweils berücksichtigten Parameter erklärt werden konnte, hat gezeigt, dass durch die CART-Analyse etwas bessere Werte erzielt werden konnten als anhand der multiplen Regression. Beide multivariaten Verfahren lieferten erwartungsgemäß eine bessere Erklärung der Varianz des Phasenbeginns als dies durch die bivariat-statistische Analyse (Kap. 4.4) zwischen Lufttemperatur allein und Phasenbeginn erreicht werden konnte. In diesem Sinne, konnte die multivariat-statistische Analyse einen Erkenntnisgewinn liefern, auch wenn aufgrund der bereits dargelegten Einschränkungen (s.o) die ursprünglich intendierte flächenhafte Darstellung dieser Phasen nicht möglich war.

6 Ausblick / Forschungs-/ Untersuchungsbedarf

Den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit zu Folge muss mit einer weiteren Verfrühung vieler phänologischer Phasen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gerechnet werden. Der phänologische Wandel zeigt damit deutlich auf, wie der Klimawandel direkten Einfluss auf Organismen und ihre Lebensräume nimmt. Mit dem zunehmend früheren Einsetzen vieler Phänophasen reagieren die Biozöosen auf den Klimawandel: Kälte liebende Arten weichen in höhere Breiten oder Hochlagen aus, Wärme liebende Arten drängen aus dem Süden nach Norden vor. Dies gilt beispielsweise auch für die Ausbreitung invasiver Pflanzenschädlinge. Ein Beispiel stellt die Kastanienminiermotte (*Cameraria ohridella*) dar, deren Larvenfraß in den Blättern der Rosskastanie bei starkem Befall schon im Sommer zur Blattverfärbung und oftmals auch zum frühzeitigen Blattfall führt (DWD 1991). Die Störung der Winterruhe hat eine starke Belastung des Stoffwechsels zur Folge, was bei vielen Bäumen zu einer erhöhten Anfälligkeit für Pilzkrankheiten (Wulf 2008) und Schädlinge wie etwa dem Grünen Eichenwickler, (*Tortrix viridana*), dem Kleinen Frostspanner (*Operophtera brumata*) oder dem Borkenkäfer (*Scolytinae*) führen kann (Kölling und Zimmermann 2007).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Umwelt machen es erforderlich, Anpassungsmaßnahmen an die veränderten Umweltbedingungen zu treffen. Die hier vorgestellten, auf den Daten der Klimamodelle basierenden Projektionen zur zukünftigen phänologischen Entwicklung können hierzu als Grund-

lage verwendet werden. Derartige Ergebnisse haben beispielsweise in der Regionalplanung eine wichtige Funktion. Sie können dazu beitragen, Vulnerabilitäten und Gefährdungspotenziale einzelner Regionen festzustellen. Zudem können sie dazu dienen, die interessierte Öffentlichkeit über regionale Auswirkungen und Risiken, die sich im Zuge des Klimawandels ergeben könnten, aufzuklären. Auch bei Investitionsentscheidungen (z.B. in die Infrastruktur) für einzelne Regionen sind Auswirkungen des Klimawandels zu berücksichtigen (BMVBS 2010). Für forst- und landwirtschaftliche Betriebe könnten Anpassungen an die veränderten Klimabedingungen mit einer erhöhten ökonomischen Belastung verbunden sein. Durch den potenziell steigenden Schädlingsbefall und dem damit verbundenem zunehmenden Einsatz von Pestiziden sowie durch entsprechende Ertragseinbußen könnten zusätzliche Kosten für die Betriebe entstehen. Ferner ist mit einem erhöhten Risiko durch Frostschäden zu rechnen (Inouye 2000), wovon insbesondere der Obstanbau betroffen wäre.

Aber auch positive Effekte durch den Klimawandel sind vorstellbar. So könnte eine Verlängerung der Vegetationsperiode zur Steigerung von Ernteerträgen führen, und der Anbau neuer Sorten könnte möglich werden (Bindi und Olesen 2011, Priess et al. 2005, Streiffert et al. 2005). Letzteres stellt eine wichtige Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel dar. Die zunehmend milderen Winter hatten bereits positive Auswirkungen auf den Anbau von Winterweizen in Deutschland (Schaller und Wiegel 2007). Beim Weinanbau könnte es aufgrund des Klimawandels zu einer Veränderung des Sortenspektrums in den verschiedenen Weinanbauregionen kommen (Schultz et al. 2009). So könnten in Hessen zukünftig Weinsorten kultiviert werden, die zuvor nur in südlicheren Regionen gediehen, wie z.B. Chinon blanc oder Cabernet sauvignon (Stock et al. 2007).

Des Weiteren können die im Rahmen des Projektes berechneten phänologischen Flächenkarten zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen im Naturschutz dienen. Die Phänologie liefert dem Naturschutz hierfür Grundlageninformationen. Phänologische Modelle ermöglichen es, zukünftige phänologische Entwicklungen abzuschätzen. So kann die Phänologie zur Klärung wichtiger Naturschutzfragen, die sich auf mögliche Folgen des Klimawandels beziehen, beitragen und Hinweise auf sinnvolle Maßnahmen und ein präventives Risikomanagement liefern: Sind beispielsweise durch den phänologischen Wandel schutzwürdige Pflanzen- oder Tierarten bedroht? Welche Gebiete können auch in Zukunft noch potenzielle Gunststandorte für bestimmte Arten darstellen und müssen daher frühzeitig als Schutzgebiete ausgewiesen werden? Inwieweit können einheimische Arten in Zukunft überhaupt geschützt werden? Müssen ggf. frühzeitig gebietsfremde Arten integriert werden? Der Naturschutz ist gehalten, Arealveränderungen zu prognostizieren (Elith und Leathwick 2009) und die Gefährdungsdiskposition geschützter Arten abzuschätzen (Schlumprecht et al. 2010). Hierfür sind vor allem Optionen für dynamische Entwicklungsmaßnahmen zu erarbeiten (Mawdsley et al. 2009), z.B. die räumliche Anpassung von

Schutzgebietsnetzwerken an räumliche Muster des Klimawandels (Milad et al. 2011). Phänologische Daten liefern dafür eine wichtige Grundlage.

Zuletzt könnte die Einführung einer standardisierten Metadatenerhebung für jedes Beobachtungsobjekt im phänologischen Monitoring eine entscheidende Verbesserung bei der Bewertung und Interpretation der Beobachtungsdaten liefern.

7 Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan

Erheblichen Einfluss auf die Bearbeitung der Projekthalte hatten zum einen die verzögerte Bereitstellung von Messdaten des DWD sowie die im Laufe des Vorhabens vom Projektverbund beschlossene Überarbeitung und Korrektur der Daten aus den Klimamodellen (Kap. 3.1.3). Erst Anfang 2011 standen die benötigten Modelldatensätze zur Verfügung und konnten erst dementsprechend verspätet im Projektverlauf verarbeitet werden. Zum anderen erforderte die Aufbereitung der Klimamodelldaten zur weiteren Verarbeitung im Projekt einen erheblichen, vorher nicht absehbaren Aufwand. Aus Zeitgründen musste daher auf die ursprünglich geplante, beispielhafte Modellierung des Bodenwasserhaushalts auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen in Hessen anhand des Modellsystems WASMOD zur Analyse möglicher Folgewirkungen des Klimawandels verzichtet werden.

Literaturverzeichnis

- BACKHAUS, K.; ERICHSON, B.; PLINKE, W.; WEIBER, R. (2011): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 13. Aufl., Springer. Berlin, Heidelberg.
- BAHRENBURG, G.; GIESE, E. (1975): Statistische Methoden und ihre Anwendung in der Geographie. Teubner. Stuttgart. 308. S.
- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., Stuttgart.
- BINDI, M.; OLESEN, J. E. (2011): The responses of agriculture in Europe to climate change. *Reg Environ Change* 11: 151-158.
- BLUM, W. E. H. (2007): Bodenkunde in Stichworten. 6. Aufl., Berlin, Stuttgart.
- BLÜMEL, K. (2011): Nachtrag zur BIAS-Korrektur. Unveröffentlicht.
- BLÜMEL, K.; CHMIELEWSKI, F.-M. (2010): Rasterung der neuen DWD-Stationsdaten und „BIAS“-Korrektur der Modelle. Unveröffentlicht.
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (2010): Regionale Klimamodellierung für Anpassungsstrategien. BMVBS-Online-Publikation, Nr. 07/2010. Bonn.
- BÖHM, U.; KÜCKEN, M.; AHRENS, W.; BLOCK, A.; HAUFFE, D.; KEULER, K.; ROCKEL, B.; WILL, A. (2006): Clm – the climate version of Im: Brief description and long-term applications. *COSMO Newsletter*, 6.
- BREIMAN, L.; FRIEDMAN, J.H.; OLSHEN, R.A.; STONE, C.J. (1984): Classification and Regression Tree. - Wadsworth, Belmont.
- BROECKER, F.; PESCH, R.; SCHMIDT, G.; SCHRÖDER, W. (2007): Großräumige Regionalisierung der Kohlenstoffbindung in Wäldern anhand von Inventurdaten und digitalen Karten. In: STROBL J., BLASCHKE TH., GRIESEBNER G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2007. Beiträge zum 19. Agit-Symposium, 101- 110.
- CHMIELEWSKI, F.-M.; RÖTZER, T. (2001): Response of tree phenology to climate change across Europe. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 108, S. 101–112.
- CHMIELEWSKI, F.-M.; MÜLLER, A.; KÜCHLER, W. (2005): Possible impacts of climate change on natural vegetation in Saxony (Germany). In: *International Journal of Biometeorology* (50), S. 96-104.
- CHMIELEWSKI, F.-M.; BLÜMEL, K.; HENNIGES, Y.; MÜLLER, A. (2009): Klimawandel und Obstanbau in Deutschland – KLIO. BMBF-Verbundprojekt unter Koordination der Humboldt-Universität zu Berlin. Förderkennzeichen 01LS05024. Abschlussbericht des Teilprojekts der HU Berlin für den Bearbeitungszeitraum 01.07.2006-30.06.2009, erstellt am 30.09.2009, Berlin.
- CHUINE, I.; CAMBON, G.; COMTOIS, P. (2000): Scaling phenology from local to the regional level: advances from species-specific phenological models. *Global Change Biol* 6 (8): 943-952.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (1991): Anleitung für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes (BAPH). Offenbach am Main, 1-155.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2006): Phänologie-Journal. Mitteilungen für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes. Nr. 27, Dezember 2006.
- EEA (European Environment Agency) (2008): Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment. Report No 4/2008. http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_4
- ELITH, J. U. LEATHWICK, J. (2009): Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annu Rev Ecol Evol* S 40: 677-697.
- ENGLERT, C.; PESCH, R.; SCHMIDT, G.; SCHRÖDER, W. (2008): Analysis of spatially and seasonally varying plant phenology in Germany. In: CAR, A.; GRIESEBNER, G.; STROBL, J. (Hrsg.): Geospatial Crossroads @GI_Forum '08: Proceedings of the Geoinformatics Forum Salzburg. - Wichmann, Heidelberg, S. 81 – 89.
- ENGLERT, C.; SCHMIDT, G.; SCHRÖDER, W. (2007): Bildung eines Frühlings-Indikators für Deutschland auf Grundlage phänologischer Daten. In: STROBL, J.; BLASCHKE, TH.; GRIESEBNER, G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2007. Beiträge zum 19. AGIT-Symposium, S. 177-186.

- ENKE, W. (2003): Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4 OPYC3 Klima-Simulationslaufes, bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden.
- ENKE, W. (2004): Erweiterung des Simulationszeitraumes der wetterlagenbasierten Regionalisierungsmethode auf der Basis des ECHAM4-OPYC3 Laufes für die Dekaden 2011/2020 und 2051/2100, Szenario B2. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden.
- FAHL, U.; KOSCHEL, H; LÖSCHEL, A.; RÜHLE, B.; WOLF, H. (2005): Regionale Klimaschutzprogramme – Zur integrierten Analyse von Kosten des Klimawandels und des Klimaschutzes auf regionaler Ebene. Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung 74 (2), S. 286–309.
- GEBHARDT, H.; RAMMERT, U.; SCHRÖDER, W.; WOLF, H. (2010): Klima-Biomonitoring: Nachweis des Klimawandels und dessen Folgen für die belebte Umwelt. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 22, S. 7-19.
- HAGL, S. (2008): Schnelleinstieg Statistik. Freiburg, Berlin, München.
- HENNIGES, Y.; DANZEISEN, H.; ZIMMERMANN, R.-D. (2005): Regionale Klimatrends mit Hilfe der phänologischen Uhr, dargestellt am Beispiel Rheinland-Pfalz. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 17 (1), S. 28-34.
- HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (2005): Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen INKLIM 2012 - Projektbaustein II: Klimawandel und Klimafolgen in Hessen. Abschlussbericht, HLUG, Dezernat I1, Wiesbaden. (<http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/index.htm>)
- HOLZ, I.; FRANZARING, J.; BÖCKER, R.; FANGMEIER, A. (2010): Die Eintritte phänologischer Phasen und ihre Beziehung zu Witterung und Klima. Darstellung und Auswertung phänologischer Langzeit-Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes in Baden-Württemberg. Abschlussbericht. Universität Hohenheim, Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie (320), Stuttgart.
- INOUYE, D. W. (2000): The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecol Lett* 3: 457-463.
- IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) (2007): Climate change 2007. Synthesis report. Genf.
- JACOB, D.; GÖTTEL, H.; KOTLARSKI, S.; LORENZ, P.; SIECK, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Forschungsbericht 204 41 138, UBA-FB 000969. *Climate Change* 11 / 08, 1862-4359; <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3513.pdf>
- KEULER, K.; LAUTENSCHLAGER, M. (2006): Climate Simulations with CLM. Climate of the 20th Century run No.1, 1960-2000, Data Stream 2 und Scenario A1B run No.1, 2001-2100, European region, MPI-M/MaD.
- KLEPPIN, L.; SCHRÖDER, W.; PESCH, R. U. SCHMIDT, G. (2008): Entwicklung und Erprobung einer Metadaten- und WebGIS-Applikation für das Expositionsmonitoring mit Moosen in Deutschland. Ein Beitrag zum LTER-Netzwerk. *Umweltwiss Schadst Forsch* 20: 38-48.
- KÖLLING, C.; ZIMMERMANN, L. (2007): Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. *Gefahrst Reinhalt L* 67(6): 259-268.
- KREEB, K. H. (1990): Methoden zur Pflanzenökologie und Bioindikation. Stuttgart, New York.
- KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2010): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010, Bericht, Fassung vom 24. August 2010, CEC Potsdam.
- KRIGE, D. (1951): A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa* 52 (6), pp. 119-139.
- MATHÉRON, G. (1965): Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature – Masson, Paris.
- MAWDSLEY, J.R.; O'MALLEY, R. U. OJIMA, D.S. (2009): A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conserv Biol* 23(5): 1080-1089.
- MENZEL, A. (2006): Zeitliche Verschiebung von Austrieb, Blüte, Fruchtreife und Blattverfärbung im Zuge der rezenten Klimaerwärmung. In: *Forum für Wissen* 2006, S. 47-53.

- MEYNEN, E.; SCHMITTHÜSEN, J.; GELLERT, J.; NEEF, E.; MÜLLER-MINY, H.; SCHULTZE, J.H. (1953-1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. – 2 Bde. Bad Godesberg.
- MILAD, M.; SCHAICH, H.; BÜRGI, M. U. KONOLD, W. (2011): Climate change and nature conservation in Central European forests: A review of consequences, concepts and challenges. *Forest Ecol Manag*, 261, 829-843.
- NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; et al. (2000): IPCC Special Report: Emissions Scenarios. Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>
- NKGCF (Nationales Komitee für Global Change Forschung) (2010): Regionale Klimamodelle. Potentiale, Grenzen und Perspektiven. Kiel.
- ODEH, I.O.A.; MCBRATNEY, A.B.; CHITTLEBOROUGH, D.J. (1995): Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. In: *Geoderma* 67, pp. 215-226.
- PESCH, R.; SCHRÖDER, W. (2006): Assessment of metal accumulation in mosses by combining metadata, statistics and GIS. *Nova Hedwigia* 82 (3-4): 447-466.
- POLTE-RUDOLF, C. (2007): Der „neue“ phänologische Kalender. In: DWD (Deutscher Wetterdienst) (2007): Phänologie-Journal. Mitteilungen für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes. Nr. 29 / Dezember 2007.
- PRIESS, J. A.; HEISTERMANN, M.; SCHALDACH, R.; ONIGKEIT, J.; MIMLER, M.; TRINKS, D.; ALCAMO, J. (2005): Klimawandel und Landwirtschaft in Hessen: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge. Abschlussbericht für den Bereich Landwirtschaft, InKlim 2012 - Integriertes Klimaschutzprogramm Baustein II: Klimawandel und Klimafolgen in Hessen, Wiesbaden, 2005.
- RAMMERT, U. (2004): Monitoring von Klimaveränderungen mit Hilfe von Bioindikatoren (Klima-Biomonitoring). Jahresbericht Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein 2004, Flintbek.
- ROBESON, S. M. (2002): Increasing Growing-Season Length in Illinois during the 20th Century. In: *Climatic Change* 52 (1-2), S. 219-238.
- ROSENKRANZ, F. (1951): Grundzüge der Phänologie. Mit besonderer Berücksichtigung von Österreich. Die periodischen Erscheinungen in der belebten Natur, ihre Darstellung, Erklärung und Bedeutung für Wissenschaft und Praxis. Wien.
- RÖTZER, T.; GROTE, R.; PRETZSCH, H. (2004): The timing of the bud burst and its effect on tree growth. In: *Int J Biometeorol* 48, S. 109-118.
- SCHALLER, M.; WIEGEL, H.-J. (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. Landbauforschung Völknerode – FAL Agricultural Research. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL). Sonderheft 316.
- SCHÄR, C.; VIDALE, P.L.; LÜTHI, D.; FREI, C.; HÄBERLI, C.; LINIGER, M.A.; APPENZELLER, C. (2004): The Role of Increasing Temperature Variability in European Summer Heatwaves. *Nature* 427, 332–335.
- SCHLUMPRECHT, H.; BITTNER, T.; JAESCHKE, A.; JENTSCH, A.; REINEKING, B. U. BEIERKUHNLEIN, C. (2010): Gefährdungsdiskussion von FFH-Tierarten Deutschlands angesichts des Klimawandels – Eine vergleichende Sensitivitätsanalyse. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 42 (10): 293-303.
- SCHMIDT, G.; ADEN, C.; KLEPPIN, L.; PESCH, R.; SCHRÖDER, W. (2010): Integration of long-term environmental data by the example of the UNECE Heavy Metals in Mosses Survey in Germany: Application of a WebGIS-based metadata system. In: MÜLLER, F.; KLOTZ, S.; SCHUBERT, H. (Hrsg.): Long-Term Ecological Research - Between Theory and Application (Part 5). Springer. Berlin: 299-313.
- SCHMÜSER, H. (1993): Phänologische Untersuchungen zur Stadtklimatologie Neumünsters. Diplomarbeit an der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel [unveröffentlicht]. 68. S.

- SCHNELLE, F. (1955): Pflanzen-Phänologie. Leipzig.
- SCHÖNROCK, S.; SCHMIDT, G.; SCHRÖDER, W. (2012): Climate Biomonitoring: Impacts of climate change on plant phenology in Hesse (Germany). In: OLABI, A.G., BENYOUNIS, K.Y. (Hrsg.): Environment and Clean Technologies. Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection, SEEP 2012, 05th – 08th June 2012, DCU, Dublin, Rep. Ireland, pp. 44-49, ISBN: 978-1-873769-10-2.
- SCHÖNROCK, S.; SCHMIDT, G.; SCHRÖDER, W. (2013): Klimabiomonitoring: Untersuchung der Pflanzenphänologie auf lokaler Ebene und ihr Vergleich mit regionalen und nationalen Daten. In: Natur und Landschaft 88 (1), S. 14-21, (eingereicht).
- SCHRÖDER, W. (1996): Einsatz von Biosphärenreservaten für Integrative Umweltbeobachtung und -bewertung sowie Naturschutz. In: Beiträge der Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden-Württemberg; Bd. 23, S. 143-167.
- SCHRÖDER, W.; VETTER, L.; FRÄNZLE, O. (Hrsg.) (1994): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie. - Braunschweig, Wiesbaden.
- SCHRÖDER, W.; SCHMIDT, G.; HASENCLEVER, J. (2005): Korrelation meteorologischer und phänologischer Indikatoren des Klimawandels? Statistische Analyse am Beispiel Baden-Württembergs. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 17 (2), S. 94-105.
- SCHRÖDER, W.; SCHMIDT, G.; HASENCLEVER, J. (2006): Geostatistical analysis of data on air temperature and plant phenology from Baden-Württemberg (Germany) as a basis for regional scaled models of climate change. Environ Monit Assess 130 (1-3): 27-43.
- SCHRÖDER, W.; PESCH, R.; SCHMIDT, G. (2007): Analysis of climate change affecting German forests by combination of meteorological and phenological data within a GIS environment. In: The Scientific World Journal 7 S1, pp. 84-89.
- SCHRÖDER, W.; ENGLERT, C.; SCHMIDT, G. (2008): Klima und Pflanzenphänologie. In: LOZÁN, L.; GRAßL, H.; JENDRITZKY, G.; KARBE, L.; REISE, K.; MAIER, A. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken. Gefahren für Menschen, Tiere und Pflanzen. Wissenschaftliche Fakten. – Hamburg, S. 86-88.
- SCHRÖDER, W.; PESCH, R.; SCHMIDT, G. (2010): Klimawandel. In: SCHRÖDER, W.; FRÄNZLE, O.; MÜLLER, F. (Hrsg.) (2010): Handbuch der Umweltwissenschaften. Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung. - Wiley VCH, Weinheim, 18. Erg.Lfg., Kap. VI-1.4, S. 1-23.
- SCHULTZ, H. R.; HOFMANN, M.; JONES, G. (2009): Weinanbau im Klimawandel: Regionen im Umbruch. In: Klimastatusbericht des DWD, S. 12-20.
- SCHULZWEIDA, U.; KONRBLUEH, L.; QUAST, R. (2009): CDO User's Guide: Climate Data Operators Version 1.4.1. <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/software/cdo/cdo.pdf>. (06.04.2011).
- SEYFERT, F. (1960): Phänologie. Lutherstadt Wittenberg.
- SPEKAT, A.; ENKE, W.; KREIENKAMP, F. (2006): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI – OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES – Szenarien B1, A1B und A2. Projektbericht F+E-Vorhaben 204 41 138 Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Potsdam, 94 S.
- STOCK, M. (2003): Klimafolgenforschung. Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Gesellschaft. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 15 (4), S. 251-261.
- STOCK, M.; BADECK, F.; GERSTENGARBE, F.-W.; HOPPMANN, D.; KARTSCHALL, T.; ÖSTERLE, H.; WERNER, P.C.; WODINSKI, M. (2007): Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinbau in Deutschland (Klima 2050). Schlussbericht zum FDW-Vorhaben: Klima 2050. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). PIK Report No. 106. Potsdam.

- STREITFERT, A.; GRÜNHAGE, L.; JÄGER, H.-J. (2005): Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen. Institut für Pflanzenökologie, Justus-Liebig-Universität Giessen.
http://www.hlug.de/klimawandel/monitor/dokumente/klimabiomonitoring_nov08.pdf
- WALKENHORST, O.; STOCK, M. (2009): Regionale Klimaszenarien für Deutschland. Eine Leseanleitung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung. E-Paper der ARL (6). Hannover.
- WULF, A. (2008): Über die Zunahme thermophiler Schadorganismen in den Wäldern – Umbaupläne müssen dies berücksichtigen. In: LOZÁN, L.; GRAßL, H.; JENDRITZKY, G.; KARBE, L.; REISE, K. U. MAIER, A. (Hrsg.): Warnsignal Klima. Gesundheitsrisiken. Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. Hamburg, S. 282-285.
- XOPLAKI, E.; LUTERBACHER, J.; PAETH, H.; DIETRICH, D.; STEINER, N.; GROSJEAN, M.; WANNER, H. (2005): European spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millennium, Geophysical Research Letters. 32, L15713, doi:10.1029/2005GL023424
- ZEBISCH, M.; GROTHMANN, T.; SCHRÖTER, D.; HASSE, C.; FRITSCH, U.; CRAMER, W. (2005): Climate Change in Germany - Vulnerability and Adaption of Climate sensitive Sectors. Climate Change 10, Umweltbundesamt, Berlin. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2974.pdf>
- ZIRLEWAGEN, D.; RABEN, G.; WEISE, M. (2007): Zoning of forest health conditions based on a set of soil, topographic and vegetation parameters. Forest Ecology and Management 248, pp. 43-55.