

Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen

INKLIM 2012 Baustein II plus

Anita Streitfert und Ludger Grünhage

Institut für Pflanzenökologie, Heinrich-Buff-Ring 26-32, 35392 Gießen



Juli 2008

Gliederung	Seite
1 Einleitung	1
1.1 "Phänologie"	2
1.2 Geschichte der Phänologie	3
1.3 Phänologische Zeigerpflanzen	4
1.4 Systematik der naturräumlichen Gliederung	4
2 Zielsetzung	6
3 Daten und Methoden	6
3.1 Erfassung der phänologischen Daten	6
3.2 Auswahl und Auswertung der phänologischen Daten	7
3.3 Erstellung phänologischer Uhren	10
3.4 Validierung der Prognosemodelle für den Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal" und Ausweitung auf andere Regionen Hessens	11
3.5 Abschätzung der zukünftigen Gefährdung von Obstgehölzen und Beerensträuchern durch Spätfrostereignisse	14
4 Ergebnisse	14
4.1 Auswertung phänologischer Zeitreihen	14
4.2 Validierung der Prognosemodelle und Ausweitung auf andere Regionen Hessens	21
4.3 Abschätzung der zukünftigen Spätfrostgefährdung	33
5 Zusammenfassende Bewertung	35
Literatur	37
Anhang	39

1 Einleitung

Das Klima hat sich in den vergangenen Jahrzehnten verändert. Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zeigt in seinem Bericht zur Klimaänderung, dass die durchschnittliche globale Temperatur an der Erdoberfläche in den letzten 100 Jahren um $0,74\text{ °C}$ angestiegen ist (vgl. IPCC 2007). Elf der zwölf Jahre im Zeitraum 1995-2006 waren unter den zwölf wärmsten Jahren seit 1850, dem Beginn der Aufzeichnung der globalen Oberflächentemperatur. Die beobachtete Klimaänderung ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Dazu gehören die natürlichen Ursachen wie Vulkanismus oder die Änderung der solaren Strahlungsflussdichte als auch der Einfluss des Menschen. Die beobachtete globale Temperaturerhöhung in den letzten 50 Jahren ist doppelt so hoch wie die der letzten 100 Jahre und überwiegend die Folge des Anstiegs anthropogen bedingter Treibhausgase. Der IPCC erwartet bis 2100 einen Anstieg der mittleren globalen Temperatur um $1,1\text{ °C}$ bis $6,4\text{ °C}$ (vgl. IPCC 2007).

Nach Angaben der Weltorganisation für Meteorologie (WMO 2007) waren die Jahre von 1998 bis 2007 weltweit das heißeste Jahrzehnt seit dem Beginn der Temperaturaufzeichnungen. Der Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert ist in Deutschland mit $0,9\text{ °C}$ gegenüber dem globalen Mittel sehr groß (vgl. Klimastatement der DMG, ÖGM und SGM 2003). Das Jahr 2000 war in Deutschland das wärmste, das Jahr 2007 das zweitwärmste seit Beginn der regelmäßigen Wetteraufzeichnungen (vgl. Klimastatement der DMG, ÖGM und SGM 2003, DWD 2007). Auch global betrachtet war das Jahr 2007 mit einer Temperaturerhöhung von $0,62\text{ °C}$ gegenüber der Klimanormalperiode ($14,6\text{ °C}$) auf der nördlichen Hemisphäre das zweitwärmste Jahr und zeichnete sich durch viele Wetterextreme aus: Nach WMO (2008) war der Januar 2007 der wärmste Januar seit Beginn der Aufzeichnung globaler Messungen 1850; in Deutschland waren der Januar sowie der April die wärmsten seit 1901. Nach dem mildesten Winter seit 1901 mit Orkantief Kyrill folgte ein sehr warmer Frühling, ein regenreicher Sommer mit schweren Gewittern und lokalen Überschwemmungen und ein durch starke Niederschläge gekennzeichneter Herbst (vgl. DWD 2007). Das Extremjahr 2007 gibt demnach Hinweise auf die zukünftige Klimaentwicklung mit ihren Folgen. Der IPCC prognostiziert beschleunigte Entwicklungen, so dass sich zum Teil jetzt schon sichtbare Konsequenzen verstärken werden. Die Häufigkeit und Intensität von extremen Wetterereignissen wird sich verändern. Regional kommt es zu Zu- oder Abnahmen von Niederschlägen und zu extrem hohen Temperaturen, wodurch die Dürre- und Überschwemmungsgefahr zunimmt. Für Nordeuropa wird im 21. Jahrhundert eine deutliche Zunahme von Niederschlägen prognostiziert, während der Süden immer trockener werden soll. Die Eis- und Schneebedeckung in der Nordhemisphäre soll weiter abnehmen und zum Anstieg des Meeresspiegels beitragen (vgl. IPCC 2007).

Die globalen und in Deutschland beobachteten Trends in der Temperaturentwicklung werden regional durch die bereits seit mehr als 100 Jahren bestehenden Aufzeichnungen der Lufttemperaturen in Gießen widergespiegelt (Abb. 1).

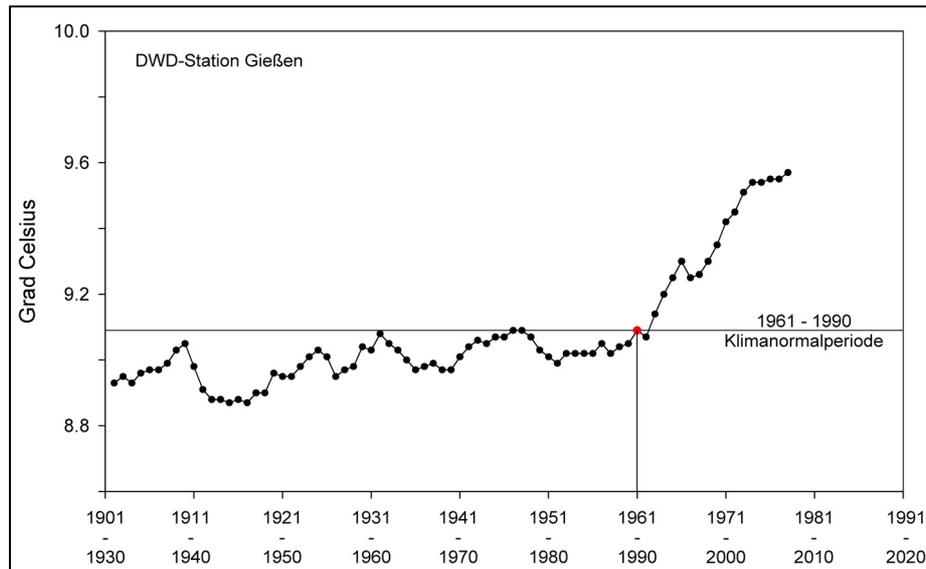


Abb.1: Gleitendes 30-jähriges Mittel der Lufttemperatur in Gießen

Der deutliche Temperaturanstieg in Gießen ab der Klimanormalperiode (1961-1990) um 0,5 °C deckt sich mit den Beobachtungen auf globaler Ebene.

Die Temperatur ist ein wichtiger abiotischer Faktor in Ökosystemen. Eine starke Veränderung dieses Umweltfaktors über einen langen Zeitraum, wie es der IPCC erwartet, führt zu erheblichen Beeinflussungen von biotischen und abiotischen Komponenten in Ökosystemen.

Die Einflüsse der Erderwärmung auf Landökosysteme wurden bereits in zahlreichen Studien untersucht, wobei besonders Änderungen in der Phänologie in der nördlichen Hemisphäre als Reaktion auf die steigenden Temperaturen gut dokumentiert sind (vgl. Menzel et al. 2006, Root et al. 2003, Sparks & Menzel 2002, Walther et al. 2002, Menzel & Fabian 1999).

In unseren Breiten wird die Pflanzenentwicklung maßgeblich durch den Temperaturverlauf bestimmt. Phänologische Beobachtungen sind daher gute Indikatoren, um die Folgen der Klimaänderungen für die Biosphäre zu dokumentieren (sog. Klima-Biomonitoring).

1.1 "Phänologie"

Die Phänologie (von griechisch "phainesthai – erscheinen") beschäftigt sich mit den verschiedenen im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen bei Pflanzen und Tieren (vgl. Schnelle 1955). Bei Pflanzen sind diese Wachstumsercheinungen wie Blattentfaltung, Blüte, Fruchtreife, Laubverfärbung und Blattfall definierte Entwicklungsvorgänge, welche als "Phänologische Phasen" bezeichnet werden. Die Aufgabe der Phänologie ist die Beobachtung erkennbarer Entwicklungserscheinungen sowie die Untersuchung ihrer Abhängigkeit von abiotischen und biotischen Einflüssen. Mit Hilfe der Phänologie kann man die natürliche Vegetationszeit einer Region definieren, den Ablauf der jährlichen Pflanzenentwicklung darstellen und die Auswirkungen des Klimawandels im gemäßigten Klima zeigen.

1.2 Geschichte der Phänologie

Die längste bekannte phänologische Beobachtungsreihe seit dem Jahr 705 wird am Kaiserlichen Hof in Japan aufbewahrt und beinhaltet die Eintrittsdaten der jährlichen Kirschblüte (vgl. Menzel 2003).

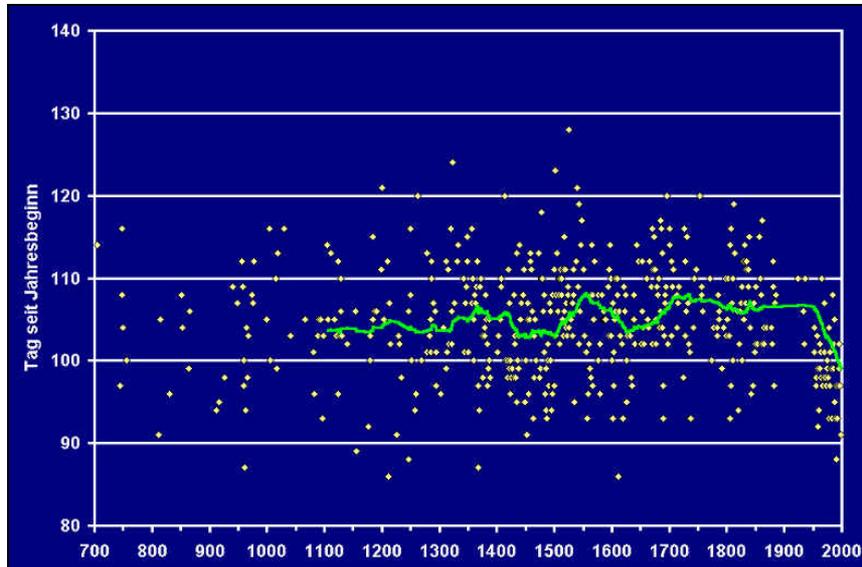


Abb. 2: Eintritt der Kirschblüte in Kioto, Japan
(Quelle: www.mif.uni-freiburg.de/biomet/phaenologie.htm)

Die älteste phänologische Beobachtungsreihe in Europa wurde von der englischen Familie Marsham geführt, welche über fünf Generationen von 1736-1947 die Phänologie von Pflanzen und Tieren in Norfolk aufzeichnete (vgl. Sparks & Carey 1995). Das erste phänologische Beobachtungsnetz von 1750 geht nach Schnelle (1955) auf Karl von Linné, dem Begründer der Phänologie, zurück. Das aus 18 Stationen bestehende Netz in Schweden existierte aber nur drei Jahre. Das erste internationale phänologische Beobachtungsnetz wurde 1780 von der Societas Meteorologica Palatina zu Mannheim gegründet und bis 1792 betrieben.

In Deutschland erfuhr die Phänologie einen deutlichen Aufschwung durch Karl Fritsch (vgl. Schnelle 1955). 1936 wurde die Phänologie dem Wetterdienst angegliedert, da die Pflanzen auf die Gesamtheit der Witterungserscheinungen reagieren und daher ein ideales "Instrument" darstellen, das alle meteorologischen Faktoren registriert (vgl. Schnelle 1955). Seit 1953 gehört das Aufgabengebiet der Phänologie in Westdeutschland zum Deutschen Wetterdienst (DWD), im Gebiet der ehemaligen DDR zum Meteorologischen Dienst (MD). Das phänologische Beobachtungsnetz wurde 1990 in den DWD eingegliedert (vgl. Deutscher Wetterdienst 1991) und enthält heute etwa 1550 phänologische Beobachter.¹ Nachdem die Phänologie in den 1970er und 1980er Jahren des vergangenen Jahrhunderts ein Schattendasein führte, stieg in den 1990er Jahren im Zusammenhang mit der Diskussion um die Erderwärmung das Interesse wieder an, da phänologische Eintrittsdaten sich hervorragend als Indikatoren für Klimaänderungen eignen.

¹ <http://www.dwd.de> (3.7.2008)

Einen Vergleich von Klima- und Witterungseinflüssen auf das Wachstum von Pflanzen an unterschiedlichen Standorten über Landesgrenzen hinweg ermöglicht das Beobachtungsprogramm "Internationale Phänologische Gärten" (IPG), welches bereits 1957 gegründet wurde. Das internationale phänologische Beobachtungsnetz, zurzeit aus 71 phänologischen Gärten in 19 europäischen Ländern bestehend, enthält 21 Arten mit jeweils erbgleichen Pflanzen. Es wird seit 1996 von der Humboldt-Universität Berlin betreut.²

In den 1990er Jahren wurde im Zuge des Aufschwungs der Phänologie das weltweite phänologische Netzwerk "Global Phenological Monitoring" (GPM) gegründet. Ziel ist die weltweite Untersuchung der Klimaveränderung und deren Einflusses auf Ökosysteme (vgl. Bruns et al. 2003). Das GPM-Netz besteht zurzeit aus 26 Stationen in Europa, Asien und Nord Amerika.³

Das Land Hessen hat mit Offenbach, Wiesbaden-Geisenheim und Linden 3 Stationen, welche im IPG-Programm aufgenommen sind. An den 3 Standorten wurden zudem die Pflanzen des GPM-Netzes etabliert.

1.3 Phänologische Zeigerpflanzen

In der Pflanzenphänologie wird das Jahr in 10 physiologisch-biologisch begründete "phänologische Jahreszeiten" eingeteilt. Pflanzenarten, die deren Beginn anzeigen, werden vom DWD als sog. Zeigerpflanzen definiert (Tab. 1). Die jeweils zuerst genannte Art in Tabelle 1 wird zur Charakterisierung der zugehörigen "phänologischen Jahreszeit" bevorzugt, die zweite dient als Ersatz.

Als Indikator für die langfristige Temperaturentwicklung wird von der Länderinitiative für einen länderübergreifenden Kernindikatorsatz (LIKI) der Beginn der Apfelblüte als Anzeiger des Eintritts des Vollfrühlings gewählt (vgl. HLU 2007). Der Beginn der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode wird durch den Blühbeginn der Salweide, das Ende durch die Blattverfärbung der Stieleiche indiziert.

1.4 Systematik der naturräumlichen Gliederung

Die naturräumliche Gliederung ist die Einteilung der Landschaft in Raumeinheiten aufgrund von geologischen, ökologischen und klimatischen Merkmalen. Naturräumliche Einheiten sind individuelle Naturräume, die sich aufgrund von bestimmten Merkmalen (Höhenlage eines Gebietes, Mittelwert der Lufttemperatur, Jahressumme des Niederschlags, mittlere phänologische Eintrittstermine) von anderen benachbarten räumlichen Individuen unterscheiden (vgl. Chen 1994).

Die bei Klausning (1988) als Haupteinheiten bezeichneten Naturräume gleichen landschaftlichen Charakters werden in Haupteinheitengruppen (Naturraumgruppen) zusammengefasst, welche wiederum eine Region differenzieren. So entsteht ein hierarchisches System der Landschaftseinteilung (Tab. 2).

² <http://www.agrar.hu-berlin.de/struktur/institute/pfb/struktur/agrarmet/phaenologie/ipg> (3.7.2008)

³ <http://www.agrar.hu-berlin.de/struktur/institute/pfb/struktur/agrarmet/phaenologie/gpm> (3.7.2008)

Tab. 1: Zeigerpflanzen der 10 "phänologischen Jahreszeiten" (vgl. www.dwd.de)

phänologische Jahreszeit	Zeigerpflanze	phänologische Phase
Vorfrühling	Haselnuss Schneeglöckchen	Blüte Blüte
Erstfrühling	Forsythie Stachelbeere	Blüte Blattentfaltung
Vollfrühling	Apfel Stieleiche	Blüte Blattentfaltung
Frühsommer	Schwarzer Holunder	Blüte
Hochsommer	Sommer-Linde Rote Johannisbeere	Blüte Fruchtreife
Spätsommer	Frühapfel Eberesche	Pflückreife Pflückreife
Frühherbst	Schwarzer Holunder	Fruchtreife
Vollherbst	Stieleiche Rosskastanie	Fruchtreife Fruchtreife
Spätherbst	Stieleiche Rosskastanie	Blattverfärbung Blattverfärbung
Vegetationsruhe	Winterweizen	Beginn des Auflaufens

Tab. 2: Systematik der naturräumlichen Gliederung am Beispiel des phänologischen Gartens Linden in der Talau des Lückenbaches (vgl. Klausning 1988)

Ordnung	Naturräumliche Einheiten	Beispiele
1. Ordnung (ohne Kennziffer)	Großregion	Norddeutsches Flachland Mittelgebirge Alpen und Alpenvorland
2. Ordnung (erste Kennziffer)	Region	1 Süddt. Schichtstufen-Tafelland 2 Oberrheinische Tiefebene 3 _{0...3} Grundgebirgsschollenland 3 _{4...7} Hessisches Bruchschollentafelland
3. Ordnung (zweistellige Ziffer)	Haupteinheitengruppen	34 Westhessisches Berg- und Senkenland
4. Ordnung (dreistellige Ziffer)	Haupteinheiten = Naturraum	348 Marburg-Gießener Lahntal
5. Ordnung	Untereinheiten	348.1 Gießener Becken
6. Ordnung	Teileinheiten	348.11 Großen-Lindener Hügelland
7. Ordnung	Grundeinheiten	Talau des Lückenbaches

2 Zielsetzung

Im Rahmen von INKLIM 2012 Baustein II plus soll eine Fortschreibung der phänologischen Zeitreihen bis 2007 erfolgen. Dies schließt die Auswertung der phänologischen Daten aus Hessen sowie eine Beurteilung dieser im Hinblick auf regionale Klimaänderungen ein. Dabei soll der von der Länderinitiative für einen länderübergreifenden Kernindicatorsatz (LIKI) vorgeschlagene Indikator für die Klimaentwicklung Berücksichtigung finden und regionalisiert angewendet werden.

Um mögliche zukünftige Verschiebungen phänologischer Phasen für die Mitte des Jahrhunderts und die sich daraus ergebenden Konsequenzen abschätzen zu können, werden die transienten WETTREG-Daten der Szenarien A1B, A2 und B1 (auf der Grundlage von ECHAM5; Spekat et al. 2006; UBA 2007) sowie die pseudo-transienten Daten des Szenarios B2 (auf der Grundlage von ECHAM4; Enke 2003) herangezogen. Das bereits im Rahmen von INKLIM 2012 erstellte Prognosemodell (vgl. Streitfert et al. 2005)⁴ für die Abschätzung des zukünftigen Eintritts phänologischer Phasen für den Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal" soll zunächst validiert und anschließend auf weitere Regionen Hessens ausgeweitet werden. Auch hierfür wird der LIKI-Indikator für die Klimaentwicklung in die Auswertung einbezogen.

Des Weiteren soll eine Abschätzung der zukünftigen Spätfrostgefährdung auf der Grundlage der Szenarien B2, B1, A1B und A2 für den Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal" für die Mitte des Jahrhunderts erfolgen.

3 Daten und Methoden

3.1 Erfassung der phänologischen Daten

Das phänologische Grundnetz des Deutschen Wetterdienstes umfasst zurzeit ca. 1340 Stationen. Insgesamt 167 phänologische Phasen der im Programm enthaltenen Wildpflanzen, Forst- und Ziergehölze, landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, Obstgehölze und Weinreben werden beobachtet und deren Daten jeweils am Ende der Vegetationsperiode vom DWD erfasst und archiviert.

Gesammelt werden sie von ehrenamtlichen Mitarbeitern, so genannten "phänologischen Beobachtern", welche 2 bis 3 mal pro Woche ihr "Beobachtungsgebiet" begehen und die pflanzlichen Entwicklungsstadien mit Hilfe einer Anleitung vom DWD bestimmen (vgl. DWD 1991). Der Beobachter soll dabei den Wuchsort der einzelnen Pflanzen so wählen, dass er für das betreffende Gebiet charakteristisch ist und nicht mehr als 50 m von der vereinbarten mittleren Höhe des Beobachtungsgebietes abweicht, da das Klima und damit auch die Eintrittszeiten der Phasen stark von der Höhenlage geprägt sind. Die phänologischen Beobachtungen sind über die ganze Vegetationszeit an derselben Pflanze vorzunehmen, wobei diese über viele Jahre beibehalten werden soll. Der Beobachter notiert die Eintrittstermine der phänologi-

⁴ http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb08/biologie/pflanzenoek/forschung/Foeinr/UKL/pdf-files/Berichtsstand_2005.pdf

schen Phasen und leitet diese am Ende der Vegetationsperiode in Form eines Meldebogens zur weiteren Bearbeitung an den DWD weiter. Eine Ausnahme stellen die ca. 400 Sofortmelder und ca. 37 Sofortmelder im Regionalprogramm Reben dar. Diese melden das Eintreten von insgesamt 74 Entwicklungsstadien sofort an den DWD weiter. Dadurch erhält man sehr schnell Kenntnis über den aktuellen Entwicklungsstand der Pflanzen.

In der DWD-Datenbank finden sich für jede Station Angaben zu den geographischen Koordinaten (Länge, Breite), der Höhe über NN, den Gauß-Krüger Koordinaten sowie Stationskennziffer, Beobachtungsort, Landkreis, Kennziffer und Bezeichnung des Naturraums und der Naturraumgruppe.

3.2 Auswahl und Auswertung der phänologischen Daten

Vom DWD werden in Hessen 553 Beobachtungsstationen geführt. Davon wurden 170 Stationen ausgewertet (Abb. 3; zur Auswahl siehe Stationsauswahl.pdf⁵).

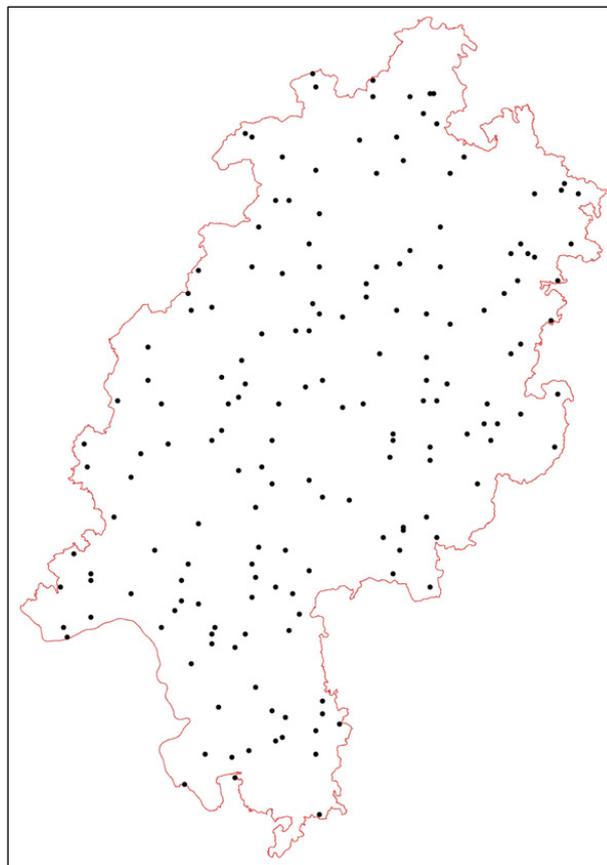


Abb. 3: Lage der berücksichtigten phänologischen Beobachtungsstationen in Hessen

Die Auswertung der phänologischen Daten erfolgte nach den Haupteinheitengruppen und Haupteinheiten (Naturräumen) des Landes Hessen. Eine Karte mit der naturräumlichen Gliederung für Hessen zeigt Abb. 4.

⁵ <http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb08/biologie/pflanzenoek/forschung/Foeinr/UKL/pdf-files/Stationsauswahl.pdf>

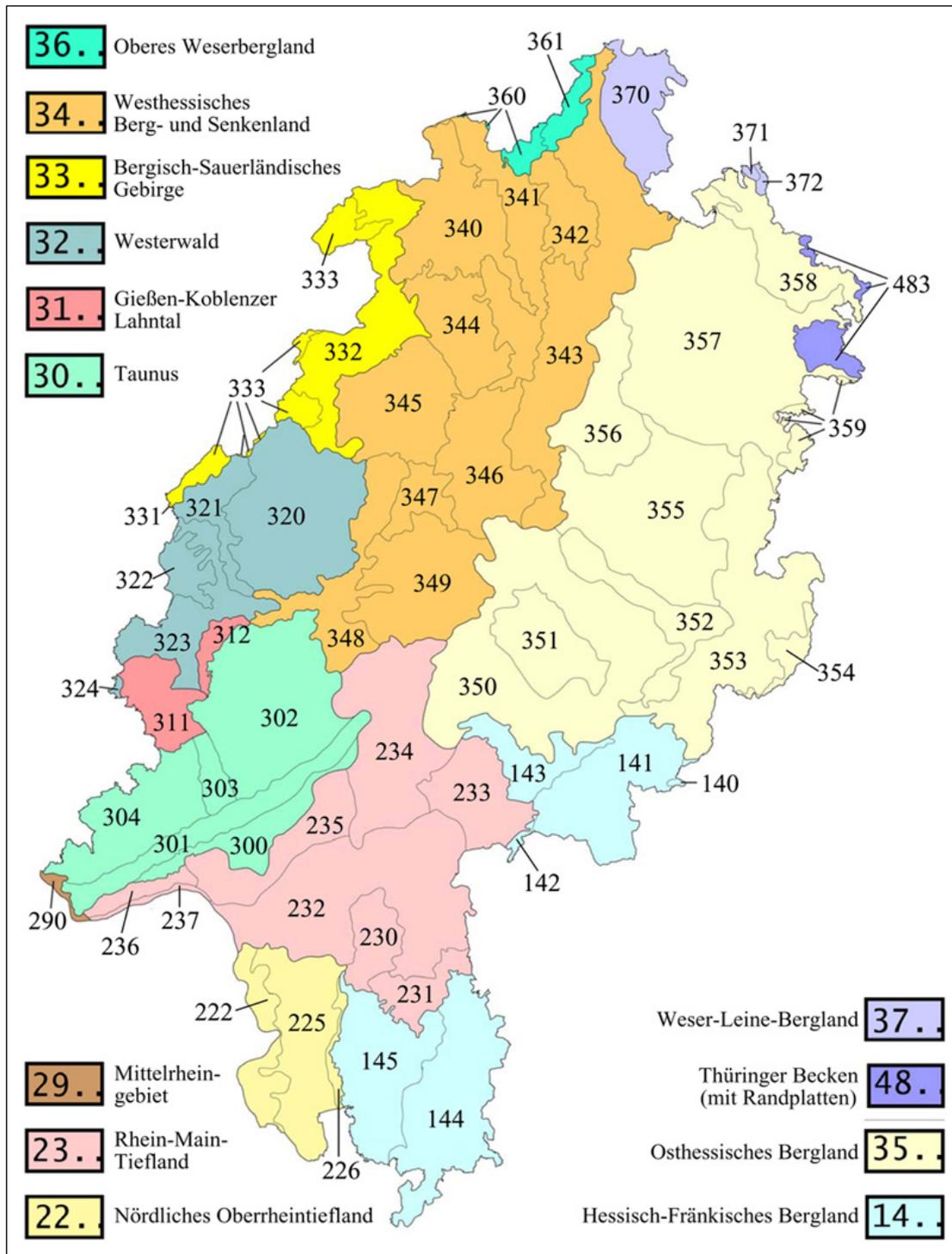


Abb. 4: Karte der naturräumlichen Gliederung Hessens⁶

Das Land Hessen ist in 13 Haupteinheitengruppen mit insgesamt 59 Naturräumen eingeteilt. Davon konnten insgesamt 11 Haupteinheitengruppen mit 41 Naturräumen ausgewertet werden. Die Beobachtungsstationen in den Haupteinheitengruppen 29 (Mittelrheingebiet) und 37

⁶ Die Benennung der Haupteinheiten erfolgte nach Klausning 1988. Der Deutsche Wetterdienst folgt der Nomenklatur nach Gornik & Scharrer (1994): Haupteinheit 14 - Odenwald, Spessart und Südrhön, Haupteinheit 31 - Lahntal, Haupteinheit 34 - Westhessisches Bergland.

(Weser-Rheine-Bergland) sind nur durch kurze Beobachtungsreihen repräsentiert. Eine Auswertung erscheint daher nicht sinnvoll. Die Anzahl der ausgewerteten phänologischen Stationen der jeweiligen Haupteinheitengruppe ist in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3: Naturräumliche Gliederung 3. Ordnung in Hessen (Nomenklatur nach Klausning 1988) und Anzahl der ausgewerteten Stationen der jeweiligen Haupteinheitengruppe

Haupteinheitengruppe	Bezeichnung	Anzahl der ausgewerteten phänologischen Stationen
14	Hessisch-Fränkisches Bergland	19
22	Nördliches Oberrheintiefland	4
23	Rhein-Main-Tiefland	31
29	Mittelrheingebiet	0
30	Taunus	8
31	Gießen-Koblenzer-Lahntal	4
32	Westerwald	10
33	Bergisch-Sauerländisches Gebirge	5
34	Westhessisches Berg- und Senkenland	40
35	Osthessisches Bergland	46
36	Oberes Weserbergland	2
37	Weser-Leine-Bergland	0
48	Thüringer Becken mit Randplatten	1

Die Eintrittsdaten, welche in dem vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellten Datensatz als "falsch, aber nicht korrigiert" indiziert waren und diejenigen, welche "zweifelhaft, aber nicht korrigiert" und gleichzeitig als Ausreißer identifiziert werden konnten, wurden nicht in die Auswertung mit aufgenommen.

Anschließend wurde aus den 170 Stationen erneut eine Auswahl vorgenommen, welche für jede der untersuchten phänologischen Phasen einzeln erfolgte. Während dieses zweiten Auswahlverfahrens wurden jene der 170 Stationen aus der Auswertung genommen, bei denen in den 1960er oder 1990er Jahren oder in den 1970er und in den 1980er Jahren pro Dekade nur drei oder weniger Beobachtungsjahre vorlagen. Eine Beurteilung erschien aufgrund der geringen Datenmenge nicht sinnvoll.

Aus den restlichen Eintrittsdaten wurden der mittlere Beginn der jeweiligen phänologischen Phase in jeder Dekade und der Trend von 1961-2007 mit Hilfe einer linearen Regressionsanalyse berechnet. Letzterer stellt ein Maß für die Veränderung des Beginns der phänologischen Phasen im Laufe eines bestimmten Zeitraums dar (Rapp & Schönwiese 1996). Das Bestimmtheitsmaß (R^2) der linearen Regression wird häufig als der durch die Einflussgröße X erklärbarer Anteil der Varianz von Y bezeichnet. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) zeigt an, in welchem Maß (zu wie viel %) die Variabilität (Gesamtstreuung) von Y durch die unabhängige Variable X erklärt wird.

Da phänologische Daten über unterschiedliche Zeiträume erfasst wurden und verschiedene Jahre repräsentieren, wurde der Trend auf eine Zeitspanne von 10 Jahren normiert.

Nicht alle Daten, einschließlich der phänologischen Beobachtungen, folgen der Normalverteilung (vgl. Runge & Schönwiese 1986). Daher wurde der MANN-KENDALL-Trendtest durchgeführt⁷, ein geeignetes Verfahren zur Abschätzung der Signifikanz eines Trends, ohne dass eine Normalverteilung oder die Linearität des Trends vorausgesetzt wird (vgl. Rapp & Schönwiese 1996). Dieser Test bewertet daher nur ein relatives Ansteigen oder Abfallen der Werte über die Zeit (vgl. Rapp & Schönwiese 1996).

Mit Hilfe einer unifaktoriellen Varianzanalyse (STATGRAPHICS Plus) wurde die Signifikanz der Differenz der mittleren Eintrittsdaten der phänologischen Phasen von 1961-1990 und 1991-2007 berechnet.

Diese statistischen Auswertungen haben zum Ziel, zu testen, mit welcher Wahrscheinlichkeit man sich irren würde, wenn man z.B. die zu überprüfende Hypothese "Der Blühbeginn hat sich in den letzten 47 Jahren im Mittel vorverlagert!" auf Grund der erhobenen Daten für richtig hält. Diese Wahrscheinlichkeit wird als Irrtumswahrscheinlichkeit (p) bezeichnet. In der Regel ist die Hypothese dann als bestätigt zu erklären, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit 5% oder kleiner ($p \leq 0,05$) ist (vgl. Bortz 1979). Muss die Hypothese "Der Blühbeginn hat sich in den letzten 40 Jahren im Mittel vorverlagert" verworfen werden, besteht allerdings ein Risiko unbekannter Größenordnung der fälschlichen Verwerfung (Fehler 2. Art, vgl. Diskussion in Grünhage et al. 1992): Je strenger die Irrtumswahrscheinlichkeit für das Verwerfen der Hypothese gesetzt wird, desto größer wird das Risiko 2. Art. In der vorliegenden Untersuchung ist es aber mindestens ebenso wichtig, die fälschliche Aussage zu vermeiden, dass kein Effekt vorliegt, wie die fälschliche Aussage, es lag ein Effekt vor. In der vorliegenden Diskussion über den Einfluss der globalen Klimaänderungen auf die phänologische Entwicklung der Vegetation fanden deshalb auch tendenzielle Effekte ($0,1 > p > 0,05$) Berücksichtigung. Ein Ergebnis wird in der vorliegenden Studie deshalb ab einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % ($p \geq 0,1$) als nicht signifikant bezeichnet. Signifikante Befunde ($p \leq 0,05$) werden durch die dreistufige Sternsymbolik gekennzeichnet (vgl. z.B. Sachs 1974): *: $0,05 \geq p > 0,01$ (signifikant), **: $0,01 \geq p > 0,001$ (hoch signifikant), ***: $p \leq 0,001$ (höchst signifikant) (siehe Tabelle 5 im Abschnitt 4.1).

Von den im Beobachtungsprogramm des DWD aufgeführten 167 phänologischen Phasen wurden diejenigen 13 Arten, welche vom DWD als Zeigerpflanzen aufgeführt werden, mit insgesamt 17 Phasen ausgewertet (vgl. Tab. 1).

3.3 Erstellung phänologischer Uhren

Für die Darstellung phänologischer Uhren wurde durch Herrn Jochen Senkbeil das Programm PhaenUhr mit der Programmiersprache Java entwickelt. Das Programm ist im Internet verfügbar.⁸

⁷ <http://www.uni-giessen.de/cms/UKL/Mann-Kendall-Test>

⁸ <http://sourceforge.net/projects/phaenuhr>

3.4 Validierung der Prognosemodelle für den Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal" und Ausweitung auf andere Regionen Hessens

Phänologische Modelle sind Hilfsmittel, die es erlauben, die Entwicklung von Pflanzen in Abhängigkeit von Umweltfaktoren zu beschreiben. Die pflanzliche Entwicklung ist dabei ein sehr komplexer Prozess, der durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt wird (Abb. 5).

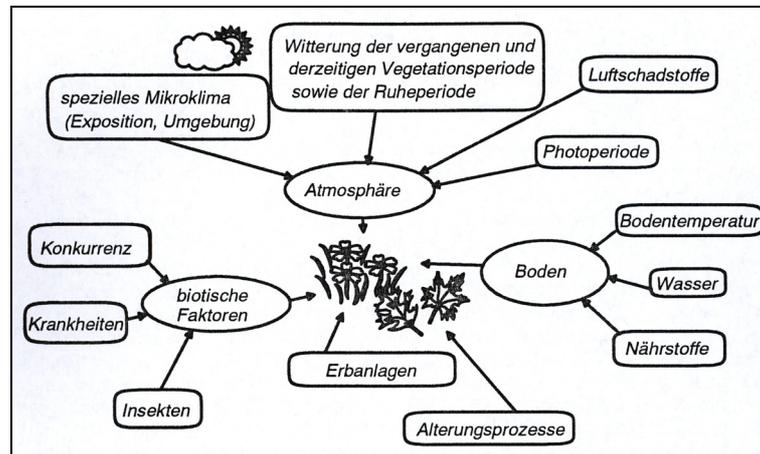


Abb. 5: Einflussfaktoren auf phänologische Phasen (Menzel 1997)

In den mittleren und höheren Breiten, die durch eine winterliche Vegetationsruhe und durch aktives Pflanzenwachstum im Frühjahr und Sommer gekennzeichnet sind, wird insbesondere die frühe Pflanzenentwicklung (Blattaustrieb, Blattentfaltung, Blühbeginn) maßgeblich durch die Lufttemperatur, also durch den Erhalt eines bestimmten Wärmereizes, gesteuert. Hauptproblem bei der Entwicklung phänologischer Modelle ist die Tatsache, dass das Ende der Dormanz, also des Ruhezustandes ohne aktives Wachstum, nicht beobachtet werden kann. Wie Chmielewski & Henniges (2007) ausführen, sind zur Abschätzung der pflanzlichen Entwicklung unter sich ändernden Klimabedingungen "grundsätzlich phänologische Modelle vorzuziehen, die sowohl die Phase der Dormanz als auch den Zeitraum der nachfolgenden ontogenetischen Entwicklung berücksichtigen". Hierzu muss das Kältebedürfnis der jeweiligen Pflanzenart zur Überwindung der endogenen Dormanz in die Modelle integriert werden. Die Kombination von Kälte- und Wärmereiz kann prinzipiell auf zwei Wegen erfolgen: Sequentielle Modelle gehen davon aus, dass der Wärmereiz erst dann auf die Pflanze einwirken kann, wenn das Kältebedürfnis der Pflanze erreicht und die Dormanz beendet ist (vgl. Hänninen 1990). Parallele Modelle gehen dagegen davon aus, dass Kälte- und Wärmereize gleichzeitig wirken (vgl. Cannell & Smith 1983): Die Knospe kann jederzeit auf Wärmereize (höhere Temperaturen) reagieren, wobei der bisher erhaltene Kältereiz lediglich das Reaktionsvermögen verändert. Kurzbeschreibungen der beiden Modelltypen finden sich bei Menzel (1997) oder Chuine (2000).

Da die derzeitigen Modellansätze zur Berücksichtigung des Kältebedürfnis zur Überwindung der Dormanz z.T. noch unbefriedigend sind, wird im Rahmen der vorliegenden Studie auf das Konzept des Temperatursummenmodells zurückgegriffen, das auf eine Arbeit von de Réau-

mur (1735) zurückgeht. Der Dormanz wird in diesem Modellansatz insofern Rechnung getragen, als davon ausgegangen wird, dass das Kältebedürfnis der Pflanze mit Jahresbeginn erfüllt ist. Wie der warme Winter 2006/2007 mit dem warmen Frühjahr 2007 allerdings zeigte, gilt diese Annahme für Kulturen wie z.B. die Erdbeere bereits heute nicht mehr immer (Braun, Forschungsanstalt Geisenheim, mündliche Mitteilung).

Die Temperatursummenmodelle basieren auf der Annahme, dass zum Auftreten einer phänologischen Phase (Zeitpunkt t_2) eine bestimmte pflanzenspezifische Temperatursumme (T_s), die oberhalb einer Basistemperatur (T_B) liegt, erreicht sein muss (vgl. Chmielewski et al. 2004).

$$T_s = \sum_{i=t_1}^{t_2} T_i - T_B \quad \text{mit } (T_i - T_B) > 0$$

Zur Berechnung der pflanzenspezifischen Temperatursumme muss die optimale Temperaturschwelle bestimmt werden. Dazu wurde im Rahmen dieser Studie die Basistemperatur (Lufttemperatur) in 0,1 K-Schritten von 0 °C bis 10 °C variiert. Für das Modell wurde die Basistemperatur verwendet, bei welcher das Modell den geringsten relativen mittleren Fehler (RMSE) zwischen berechnetem und beobachtetem Eintrittstag aufweist.

Die Phasen des Herbstes und die Vegetationsruhe haben einen geringeren Bezug zur Lufttemperatur. Sie wurden deshalb mit Hilfe multipler linearer Regressionsmodelle abgeschätzt, wobei der Zeitpunkt einer vorausgehenden Entwicklungsphase mit einbezogen wurde (vgl. Chmielewski et al. 2004).

Die 2005 durchgeführte Modellierung der Eintrittstermine der phänologischen Phasen für den Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal" erfolgte mit den abgeschätzten Temperaturen der Studie der Firma Meteo-Research für die Dekade 2041-2050 und den phänologischen Daten der Jahre 1961 bis 2000 (Enke 2003).

Für die Validierung wurden die phänologischen und meteorologischen Daten der Jahre 2001 bis 2007 verwendet und untersucht, ob das 2005 erstellte Modell auch unter Einbezug der neueren Daten in der Lage ist, die beobachteten Daten gut wiederzugeben. Des Weiteren wurden neue Prognosemodelle erstellt, basierend auf den phänologischen und meteorologischen Daten der Jahre 1961-2006 bzw. 1961-2007 und ein Vergleich vorgenommen.

Für die Berechnungen des zukünftigen Eintritts der phänologischen Phasen im Marburg-Gießener-Lahntal wurden transiente WETTREG-Daten der Szenarien A1B, A2, B1 und B2 für die meteorologische Station Gießen verwendet.

Für die Ausweitung der erstellten Prognosemodelle auf andere Regionen Hessens wurden zunächst meteorologische Stationen und in der Nähe liegende phänologische Stationen ausgewählt, wobei nur geringe Unterschiede in deren Höhenlage vorliegen sollten (Tab. 4, Abb. 6): Die Abweichung in der Höhenlage der phänologischen Stationen gegenüber den meteorologischen Stationen beträgt maximal 80 m.

Tab. 4: Meteorologische und phänologische Stationen für die Ausweitung der Prognosemodelle

DWD-Station	Naturraum	Anzahl der phänologischen Stationen
Gießen	348	6
Eschwege	358	3
Geisenheim	236	1
Homberg	349	3
Frankfurt/M.	232	12
Biedenkopf	320	3
Biedenkopf, Brilon	332	5

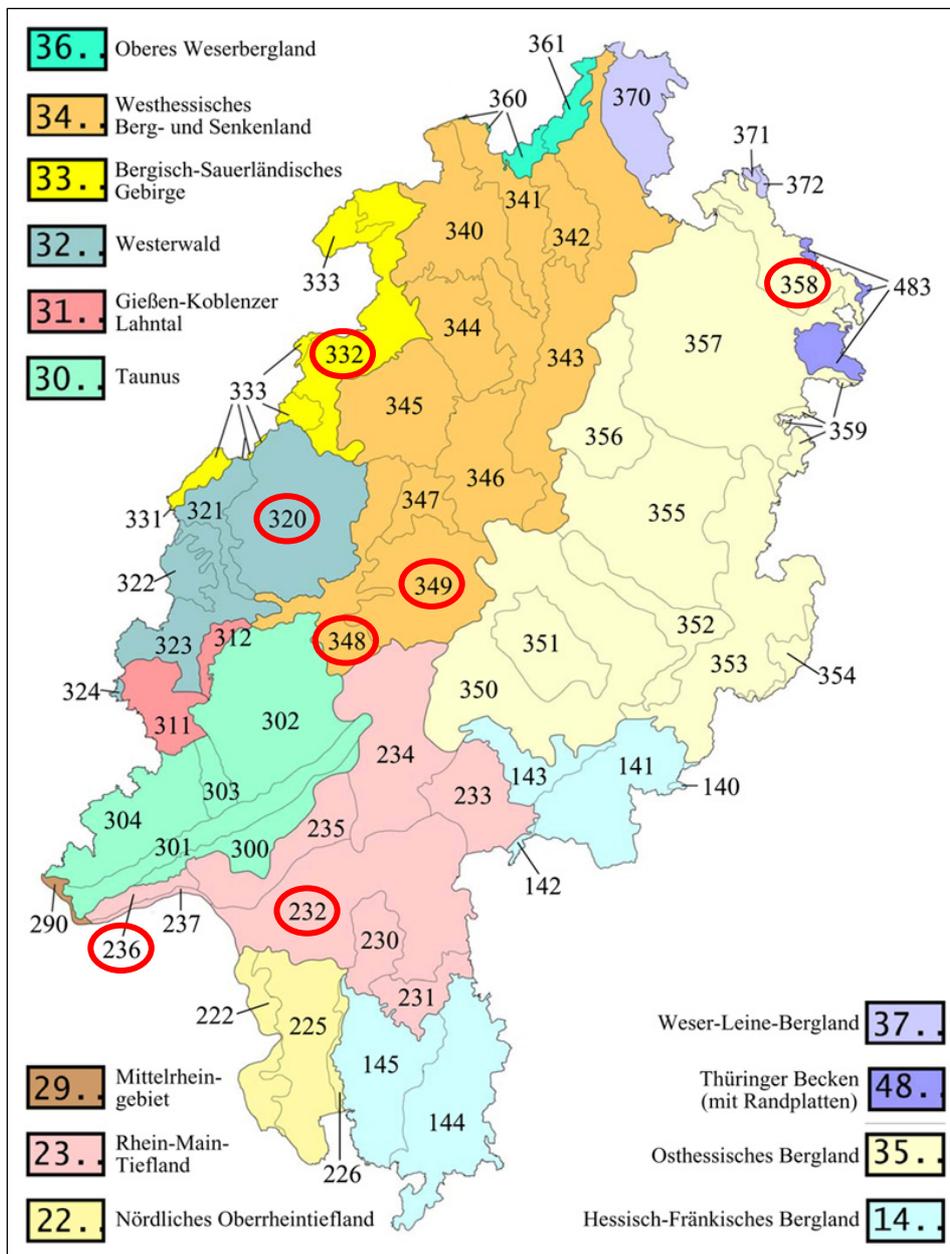


Abb. 6: Lage der ausgewählten Naturräume für die Ausweitung der Prognosemodelle (vgl. Tab. 4)

Mit den modellierten meteorologischen Daten der Szenarien A1B, A2, B1 und B2 für diese Stationen wurden Berechnungen für den zukünftigen Eintritt der phänologischen Phasen durchgeführt. Den Berechnungen liegen die phänologischen und meteorologischen Daten der Stationen aus den Jahren 1961 bis 2000 zu Grunde.

3.5 Abschätzung der zukünftigen Gefährdung von Obstgehölzen und Beerensträuchern durch Spätfrostereignisse

Für einige ausgewählte Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal" wurde das Auftreten von Frost im Zeitraum von 10 Tagen nach dem Zeitpunkt des Blühbeginnes untersucht. Für die Auswertung des Zeitraums 1961-2007 wurden die beobachteten phänologischen Daten der ausgewählten Arten im Marburg-Gießener-Lahntal und die gemessenen Temperaturdaten der meteorologischen Station Gießen herangezogen. Der zukünftige Blühbeginn bzw. die Gefährdung durch Spätfrost in diesem Jahrhundert wurde mit Hilfe von Temperatursummenmodellen und mit den modellierten Tagesmittel- bzw. Tagesminimumtemperaturen der Szenarien A1B, A2, B1 und B2 für die meteorologische Station Gießen abgeschätzt.

4 Ergebnisse

4.1 Auswertung phänologischer Zeitreihen

Im folgenden Teil sind zunächst die Ergebnisse für ganz Hessen dargestellt. Im Anschluss daran folgen die Ergebnisse für die einzelnen Naturräume. Die Berechnung erfolgte überwiegend für den Zeitraum von 1961 bis 2007, da die Datenmenge in den 1950er Jahren zu gering war.

Die in Abb. 7 dargestellten phänologischen Uhren zeigen, dass sich die Jahreszeiten in Hessen verschoben haben.

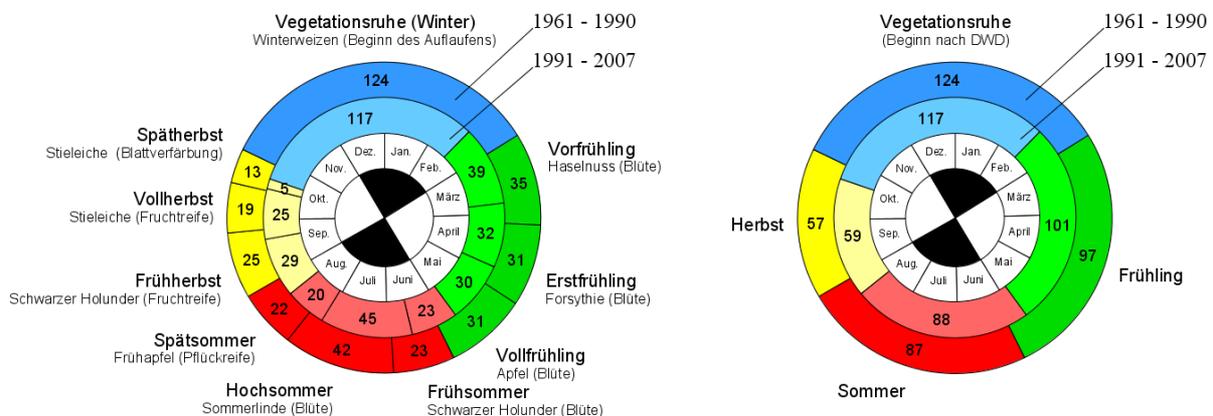


Abb. 7: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für Hessen

Der innere Ring, welcher den Eintritt der phänologischen Jahreszeiten im Zeitraum von 1991 bis 2007 darstellt, scheint sich - bei einem Vergleich mit der im äußeren Ring dargestellten Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 - gegen den Uhrzeigersinn gedreht zu haben. Die Jahreszeiten beginnen früher und weisen erhebliche Differenzen zur klimatologischen Jahreszeit⁹ auf. Das Maß der Verfrühung der Jahreszeiten nimmt im Laufe des Jahres ab, d.h. der Beginn des Frühlings ist stärker nach vorne verlagert als der des Sommers, des Herbstes und der Vegetationsruhe. Bei genauer Betrachtung der vollständigen doppelten phänologischen Uhr (Abb. 7, links) zeigt sich, dass sich nicht alle der 10 phänologischen Jahreszeiten vorverlagert haben. Der Spätherbst beginnt in der Periode von 1991 bis 2007 einen Tag später als in dem Zeitraum von 1961 bis 1990, das Ergebnis ist jedoch nicht signifikant (siehe Tab 5).

Tab. 5: Beginn der phänologischen Jahreszeiten für Hessen gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2007, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2007 sowie die Signifikanz des Trends

Phänologische Jahreszeit	Zeigerpflanze und phänologische Phase	mittl. Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ)			Trend (1961-2007)	
		1961 - 1990	1991 - 2007	Signifikanz	Tage/Dekade	Signifikanz
Vorfrühling	Haselnuss (Blüte)	60	46	**	-4,9	**
Erstfrühling	Forsythie (Blüte)	95	85	**	-3,5	**
Vollfrühling	Apfel (Blüte)	126	117	***	-2,8	***
Frühsommer	Schwarzer Holunder (Blüte)	157	147	***	-3,5	***
Hochsommer	Sommer-Linde (Blüte)	180	170	***	-3,2	***
Spätsommer	Frühapfel (Pflückreife)	222	215	***	-1,8	*
Frühherbst	Schwarzer Holunder (Fruchtreife)	244	235	***	-3,3	***
Vollherbst	Stieleiche (Fruchtreife)	269	264	***	-1,8	***
Spätherbst	Stieleiche (Blattverfärbung)	288	289	n.s.	0,5	n.s.
Vegetationsruhe	Winterweizen (Beginn des Auflaufens)	301	294	***	-2,6	***

JTZ = Jahrestagszahl
n.s.: nicht signifikant *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$ **: hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$ ***: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

Auffällig ist, dass sich die früheren phänologischen Phasen der Jahreszeiten stärker vorverlagert haben als die jeweils späteren. Die stärkste und damit auffälligste Verfrühung zeigt der Vorfrühling mit 14 Tagen, gefolgt vom Erstfrühling mit 10 Tagen (Tab. 5). Der Frühsommer beginnt in dem Zeitraum von 1991 bis 2007 10 Tage früher als in der Klimanormalperiode von 1961 bis 1990, der Frühherbst 9 Tage. Die Vegetationsruhe hat sich um 7 Tage verfrüht.

Zusätzlich zur Verschiebung der Jahreszeiten hat sich auch ihre Dauer verändert. Der Frühling hat sich in dem Zeitraum von 1991 bis 2007 gegenüber 1961 bis 1990 mit 4 Tagen am stärksten verlängert (Abb. 7, rechts). Die Länge des Sommers hat, vergleicht man den inneren mit dem äußeren Ring, um 1 Tag zugenommen, die des Herbstes um 2 Tage. Im Gegensatz dazu hat sich die Vegetationsruhe im Zeitraum von 1991 bis 2007 gegenüber der Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 um 7 Tage verkürzt. Dies ist hauptsächlich durch die Vorver-

⁹ Die klimatologischen Jahreszeiten sind in den phänologischen Uhren durch schwarze und weiße Sektoren dargestellt.

lagerung und Verlängerung des Frühlings bedingt. Frühling, Sommer und Herbst zeigen die Tendenz zur Verlängerung der frühen und Verkürzung der späten Phasen (Abb. 7).

Folge der Veränderung der Dauer der Jahreszeiten ist die Verlängerung der Vegetationsperiode, definiert als Zeitraum zwischen Blühbeginn der Haselnuss und Auflaufen des Winterweizens, im Zeitraum von 1991 bis 2007 um 7 Tage (Abb. 7, rechts). Die Verlängerung basiert dabei zum Großteil auf einem früheren Beginn der Vegetationsperiode und nicht auf einer Verspätung des Vegetationsendes. Der Herbst endet im Zeitraum von 1991 bis 2007 sogar früher als im Zeitraum von 1961 bis 1990.

Die phänologischen Jahreszeiten beginnen auch in den einzelnen Naturraumgruppen im Zeitraum von 1991 bis 2007 im Vergleich zur Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 früher (mit Ausnahme des Frühjahrsbeginns im Taunus und des Beginns des Herbstes im Oberen Weserbergland¹⁰; Tab. 6).

Tab. 6: Beginn der phänologischen Jahreszeiten für die Naturraumgruppen Hessens gemittelt für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2007

Haupt-einheiten-gruppe	Bezeichnung	Frühjahr		Sommer		Herbst		Vegetationsruhe (Beginn nach DWD)	
		Beginn der phänologischen Jahreszeit [Tag im Jahr]							
		1961 -1990	1991 -2007	1961 -1990	1991 -2007	1961 -1990	1991 -2007	1961 -1990	1991 -2007
14	Odenwald, Spessart u. Südrhön	56	40	153	145	242	232	301	299
22	Nördliches Oberrheintiefland	56	39	146	140	227	225	316	314
23	Rhein-Main-Tiefland	49	34	148	138	235	224	307	301
30	Taunus	63	72	155	144	239	232	295	290
31	Lahntal	52	43	154	142	246	227	308	297
32	Westerwald	60	45	159	147	246	239	300	293
33	Bergisch-Sauerländisches Gebirge	79	57	168	158	255	249	299	298
34	Westhessisches Bergland	61	48	159	148	246	236	300	290
35	Osthessisches Bergland	64	49	160	151	250	240	300	294
36	Oberes Weserbergland	65	45	158	148	231	240	301	281
48	Thüringer Becken	71	45	163	157	244	243	296	289
Hessen		60	46	157	147	244	235	301	294

Frühjahr: Blühbeginn der Haselnuss

Sommer: Blühbeginn des Schwarzen Holunders

Herbst: Beginn der Fruchtreife des Schwarzen Holunders

Vegetationsruhe nach DWD: Beginn des Auflaufens des Winterweizens

¹⁰ Der spätere Frühjahrsbeginn im Taunus könnte mit einer reduzierten Anzahl von Beobachtungsstationen zusammen hängen. Für den späteren Herbstbeginn im Oberen Weserbergland liegt keine mögliche Erklärung vor.

Die größte Vorverlagerung ist im Thüringer Becken mit einem 26 Tage früheren Beginn des Frühlings zu verzeichnen, gefolgt vom Bergisch-Sauerländischen Gebirge mit einer Vorverlagerung des Frühlings von 22 Tagen.

Das Maß der Verfrühung der Jahreszeiten nimmt in der überwiegenden Zahl der Naturraumgruppen im Laufe des Jahres ab, d.h. der Beginn des Frühlings ist stärker nach vorne verlagert als der des Sommers, des Herbstes und der Vegetationsruhe (Tab. 6).

Zusätzlich zur Verschiebung der Jahreszeiten in den verschiedenen Naturraumgruppen hat sich auch ihre Dauer in den meisten Regionen verändert. Frühjahr, Sommer und Herbst haben sich von 1991 bis 2007 gegenüber 1961 bis 1990 überwiegend verlängert, um bis zu 20 Tage. In einigen Naturraumgruppen haben sich Frühjahr, Sommer und Herbst verkürzt, in anderen zeigt sich wiederum keine Veränderung (Tab. 7).

Tab. 7: Dauer der phänologischen Jahreszeiten für die Naturraumgruppen Hessens gemittelt für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2007

Haupt-einheiten-gruppe	Bezeichnung	Dauer Frühjahr		Dauer Sommer		Dauer Herbst		Dauer Vegetationsruhe (Beginn nach DWD)	
		[Tage]							
		1961 -1990	1991 -2007	1961 -1990	1991 -2007	1961 -1990	1991 -2007	1961 -1990	1991 -2007
14	Odenwald, Spessart u. Südrhön	97	105	89	87	59	67	120	106
22	Nördliches Oberrheintiefland	90	101	81	85	89	89	105	90
23	Rhein-Main-Tiefland	99	104	87	86	72	77	107	98
30	Taunus	92	72	84	88	56	58	133	147
31	Lahntal	102	99	92	85	62	70	109	111
32	Westerwald	99	102	87	92	54	54	125	117
33	Bergisch-Sauer- ländisches Gebirge	89	101	87	91	44	49	145	124
34	Westhessisches Bergland	98	100	87	88	54	54	126	123
35	Osthessisches Bergland	96	102	90	89	50	54	129	120
36	Oberes Weserbergland	93	103	73	92	70	41	129	129
48	Thüringer Becken	92	112	81	86	52	46	140	121
Hessen		97	101	87	88	57	59	124	117

Die Dauer der Vegetationsperiode, nach dem DWD definiert als Zeitspanne zwischen dem Blühbeginn der Haselnuss und dem Auflaufen des Winterweizens, hat sich in den meisten Naturraumgruppen im Zeitraum von 1991 bis 2007 im Vergleich zur Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 verlängert (Tab. 8). Die Verlängerung ist im Bergisch-Sauerländischen Gebirge mit 21 Tagen am größten. Lediglich im Taunus und im Lahntal ist eine Verkürzung

der Vegetationsperiode festzustellen, im Oberen Weserbergland ist die Dauer unverändert geblieben.

Tab. 8: Mittlere Länge der Vegetationsperioden für die Naturraumgruppen Hessens für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2007

Haupt-einheiten-gruppe	Bezeichnung	Dauer der Vegetationsperiode [Tage im Jahr]			
		nach DWD		nach LIKI	
		1961 -1990	1991 -2007	1961 -1990	1991 -2007
14	Odenwald, Spessart u. Südrhön	245	259	209	217
22	Nördliches Oberrheintiefland	260	275	217	226
23	Rhein-Main-Tiefland	258	267	214	223
30	Taunus	232	218	203	200
31	Lahntal	256	254	202	220
32	Westerwald	240	248	204	210
33	Bergisch-Sauerländisches Gebirge	220	241	190	201
34	Westhessisches Bergland	239	242	200	214
35	Osthessisches Bergland	236	245	201	209
36	Oberes Weserbergland	236	236	203	228
48	Thüringer Becken	225	244	193	206
Hessen		241	248	203	213

nach DWD: Beginn der Vegetationsperiode: Blühbeginn der Haselnuss
 Ende der Vegetationsperiode: Auflaufen des Winterweizens
 nach LIKI: Beginn der Vegetationsperiode: Blühbeginn der Salweide
 Ende der Vegetationsperiode: Blattverfärbung der Stieleiche

Auch die Dauer der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode hat sich verändert. Sie wird nach der Länderinitiative für einen länderübergreifenden Kernindikatorsatz (LIKI) als Zeitspanne zwischen dem Blühbeginn der Salweide und der Blattverfärbung der Stieleiche erfasst. Im Oberen Weserbergland ist die stärkste Verlängerung der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode mit 25 Tagen zu beobachten, lediglich im Taunus ist eine geringe Verkürzung zu verzeichnen (Tab. 8).

Die Verlängerung der Vegetationsperiode nach DWD und LIKI im Zeitraum von 1991 bis 2007 im Vergleich zur Klimanormalperiode basiert dabei zum Großteil auf dem früheren Beginn des Frühlings und dessen Verlängerung.

Aufgrund der sich immer wieder ändernden Sortenwahl und möglichen Änderungen im Management scheint das Auflaufen des Winterweizens als Indikator für den Beginn der Vegetationsruhe wenig geeignet zu sein. Im Folgenden wird der Beginn der Vegetationsruhe als Ende der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode in Anlehnung an die Länderinitiative für einen länderübergreifenden Kernindikatorsatz (LIKI) stets über den Beginn der Blattverfärbung der Stieleiche definiert. Dies bedingt, dass die wenigen Tage des phänologischen Spätherbstes der Vegetationsruhe zugeschlagen werden. In Abb. 8 sind die vereinfachten doppelten phänologi-

schen Uhren für Hessen, die mit den jeweiligen Definitionen für den Beginn der Vegetationsruhe erstellt wurden, dargestellt.

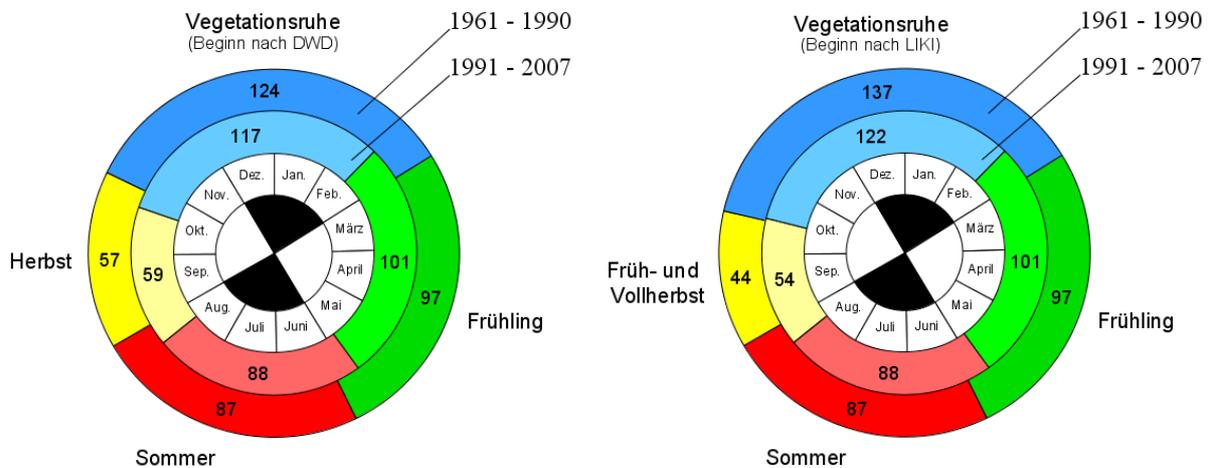


Abb. 8: Vereinfachte doppelte phänologische Uhren für Hessen (links mit Definition des Beginns der Vegetationsruhe nach DWD, rechts mit Definition des Beginns der Vegetationsruhe nach LIKI)

In Hessen hat sich der Beginn des Frühlings, indiziert durch den Blühbeginn der Haselnuss, im Zeitraum von 1951 bis 2007 deutlich vorverlagert (Abb. 9).

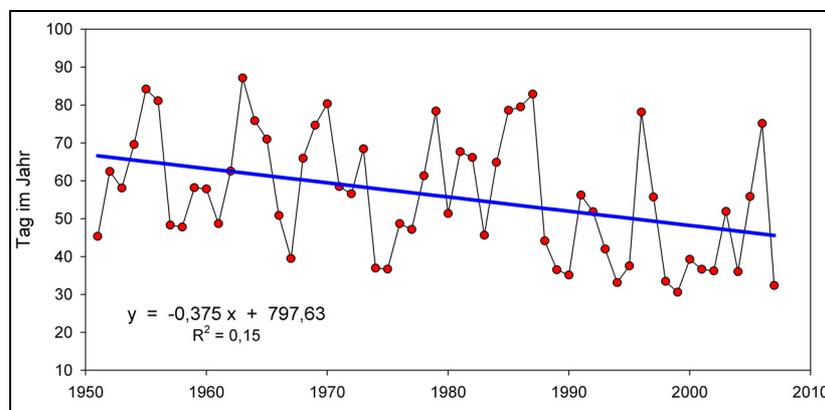


Abb. 9: Blühbeginn der Haselnuss in Hessen

Eine Betrachtung der einzelnen Jahre zeigt jedoch, dass der Beginn der Haselnussblüte erheblichen Schwankungen unterliegt. Im Jahr 2006 erfolgte z.B. der Blühbeginn am 75. Tag im Jahr, also am 16. März. Im Jahr 2007 trat die Haselnussblüte am 32. Tag im Jahr, dem 1. Februar, ein. Der mittlere Trend (1951-2007) beträgt $-3,8$ Tage pro Dekade.

Der Trend indiziert eine gleichmäßige Verfrüfung über den gesamten Beobachtungszeitraum. Unterteilt man diesen Zeitraum jedoch in kürzere Perioden von 30 Jahren, so zeigt sich, dass die Verfrühungen der Jahreszeiten nicht einem gleichmäßigen Trend folgen. Erst mit Einbeziehung der 1990er Jahre in die zugehörigen Beobachtungszeiträume (1971-2000, 1981-2007) ist eine deutliche Verfrüfung im Beginn der Haselnussblüte und damit im Beginn des Früh-

lings im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 zu beobachten (Abb. 10). Der Trend der Jahre 1971-2000 beträgt $-5,1$ Tage, derjenige in den Jahren 1981-2007 sogar $-8,9$ Tage. In der Klimanormalperiode 1961-1990 verfrühte sich der Blühbeginn der Haselnuss dagegen lediglich um 3 Tage.

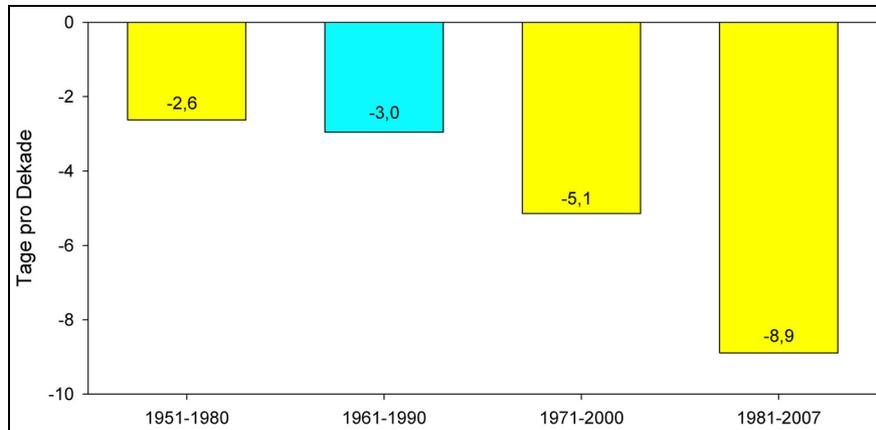


Abb. 10: Trends im Blühbeginn der Haselnuss in Hessen

Zusätzlich zum Frühlingsbeginn zeigen auch der Beginn des Sommers und des Herbstes eine deutliche Verfrühung ab den 1990er Jahren im Vergleich zur Klimanormalperiode (Abb. 11). Das Ende der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode bzw. der Beginn der Vegetationsruhe nach LIKI, definiert als Eintritt der Blattverfärbung der Stieleiche, hingegen tritt ab dem Beginn der 1990er Jahre im Vergleich zu der Periode von 1961 bis 1990 mit einer leichten Verzögerung ein.

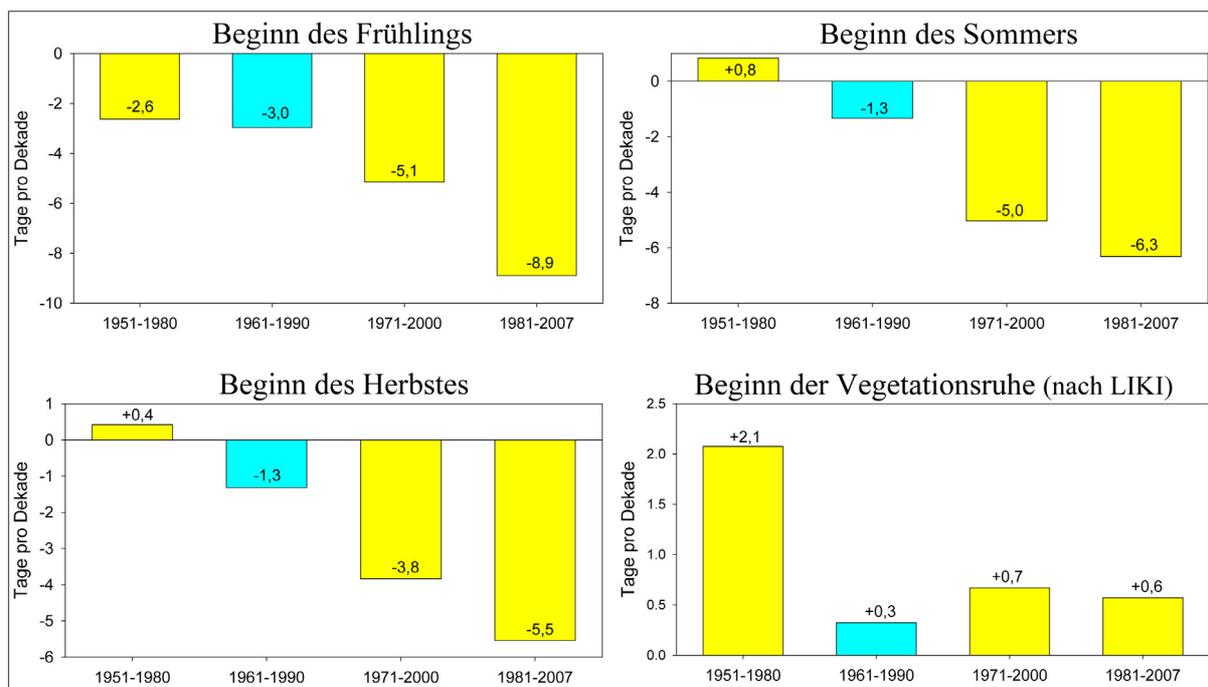


Abb. 11: Trends im Beginn der phänologischen Jahreszeiten in Hessen

4.2 Validierung der Prognosemodelle und Ausweitung auf andere Regionen Hessens

4.2.1 Validierung der Prognosemodelle für den Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal"

Für die Validierung der Prognosemodelle wurde das auf den Daten der Jahre 1961-2000 beruhende Modell mit den zusätzlichen Daten der Jahre 2001-2007 angewendet. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) der linearen Regression zeigt dabei, in welchem Maß (zu wie viel %) die Variabilität (Gesamtstreuung) des Eintritts der Phase durch die unabhängige Variable Temperatur erklärt wird. Zudem wurde das R^2 der neu erstellten Prognosemodelle mit den Daten der Jahre 1961-2006 bzw. 1961-2007 bestimmt.

Ein Vergleich der Bestimmtheitsmaße zeigt, dass die zusätzliche Verwendung der meteorologischen Daten von 2001 bis 2006 bzw. von 2001 bis 2007 für die Modellberechnung keine nennenswerten Änderungen in der Aussagekraft der Modelle bedingt (Tab. 9, Streitfert et al. 2005).

Tab. 9: Bestimmtheitsmaße (R^2) der Modelle abgeleitet mit den Daten des Zeitraumes 1961-2000 und der neuen Modelle mit den Daten der Zeiträume 1961-2006 bzw. 1961-2007

verwendete Zeigerpflanze	Zeitraum 1961-2000 ¹	Zeitraum 1961-2006 ²	Zeitraum 1961-2007 ³
	Bestimmtheitsmaß R^2 (MAE ⁴ in Tagen)		
Haselnuss (Blüte)	0,78 (7,7)	0,77 (7,7)	0,78 (7,6)
Schwarzer Holunder (Blüte)	0,73 (3,2)	0,70 (3,3)	0,73 (3,2)
Schwarzer Holunder (Fruchtreife)	0,74 (3,0)	0,75 (2,9)	0,78 (2,8)
Stieleiche (Blattverfärbung)	0,27 (3,9)	0,27 (3,8)	0,24 (3,9)
Salweide (Blüte)	0,73 (6,7)	0,72 (6,7)	---
Apfel (Blüte)	0,84 (3,1)	0,84 (3,1)	---
Birne (Blüte)	0,80 (3,8)	0,81 (3,8)	---
Süßkirsche (Blüte)	0,85 (3,6)	0,86 (3,4)	---
Sauerkirsche (Blüte)	0,74 (4,6)	0,74 (4,6)	---
Stachelbeere (Blüte)	0,78 (4,8)	0,80 (4,6)	---
Rote Johannisbeere (Blüte)	0,72 (5,2)	0,71 (5,2)	---

¹: Validierung des Modells beruhend auf den Daten der Jahre 1961-2000 mit den Daten der Jahre 2001-2007

²: Für die Neuberechnung des Modells wurden die Daten der Jahre 1961-2006 verwendet.

³: Für die Neuberechnung des Modells wurden die Daten der Jahre 1961-2007 verwendet.

⁴: MAE: mittlere absoluter Fehler (in Tagen) zwischen berechnetem und beobachtetem Eintrittstag

Aufgrund dieses Ergebnisses werden für die Modellrechnungen des zukünftigen Eintritts der phänologischen Jahreszeiten für das Marburg-Gießener-Lahntal und auch für weitere Regionen Hessens die Modelle basierend auf den Daten der Jahre 1961-2000 verwendet.

Für Gießen liegen Lufttemperaturdaten seit 1901 vor. Abb. 12 veranschaulicht die Temperaturentwicklung in Mittelhessen im letzten Jahrhundert als gleitende 30jährige Mittel bzw. dekadenweise als Box-and-Whisker-Plots.

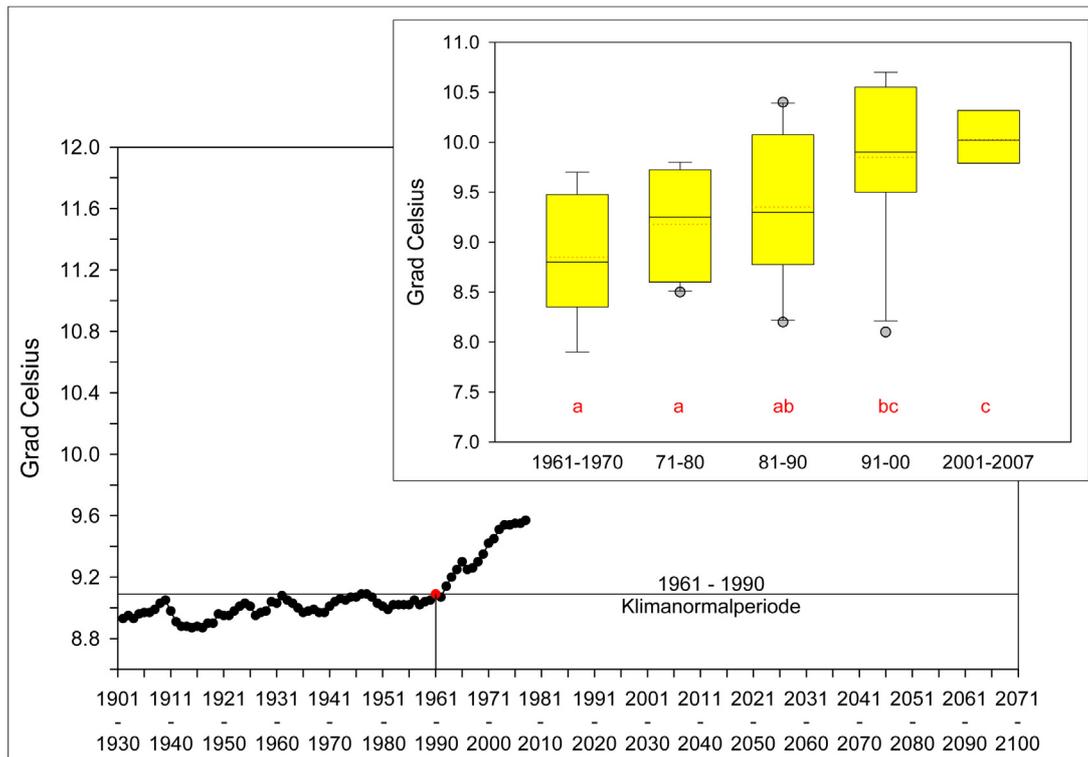


Abb. 12: Entwicklung der Lufttemperatur in Gießen
 - gleitende 30jährige Mittel bzw. Box-and-Whisker-Plots für die letzten 5 Dekaden -
 Bei verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich die Dekaden-Mittelwerte signifikant ($p \leq 0,05$).

Der zu verzeichnende "Temperatursprung" seit Beginn der 1990er Jahre korreliert mit der beschriebenen starken Verfrühung in den phänologischen Daten (vgl. Abb. 10, 11). Auch im Naturraum 348, dem Marburg-Gießener-Lahntal, in welchem sich die meteorologische Station Gießen befindet, hat sich im Zeitraum 1991-2007 der mittlere Beginn der Haselnussblüte verfrüht (Abb. 13, Tab. 10): Er erfolgte im Mittel am 41. Tag im Jahr, d.h. im Vergleich zur Klimanormalperiode um 13 Tage früher.

Zur Abschätzung möglicher zukünftiger Verschiebungen phänologischer Phasen und der sich daraus ergebenden Konsequenzen wurden die transienten WETTREG-Daten der Szenarien A1B, A2 und B1 auf der Grundlage von ECHAM5 sowie des Szenarios B2 auf der Grundlage von ECHAM4 benutzt. Im Gegensatz zu ECHAM5 ist der Einfluss der Aerosole in ECHAM4 noch nicht implementiert. Auch ist die Oberflächentemperatur des Meeres im Startniveau der Simulation von ECHAM4 zu hoch, so dass ECHAM4-Simulationen auf einem deutlich höheren Temperaturniveau liegen. Eine Kopplung zwischen Ozeanmodell und Atmosphäre erfolgte in ECHAM4 über eine Flusskorrektur, während dieser Vorgang in ECHAM5 berechnet wird.

Prinzipiell spiegeln die Rechnungen sowohl mit ECHAM4 als auch mit ECHAM5 eine "mögliche Zukunft" wider. Da es nicht "die Zukunft" gibt, sondern Modelle nur die Spannweite der möglichen zukünftigen Entwicklung liefern können, ist die Berücksichtigung der berechneten Entwicklung der atmosphärischen Situation auf der Grundlage aller zur Verfügung stehenden Szenarien aus dem Vorsorgeprinzip (z.B. als möglicher worst-case) sinnvoll.

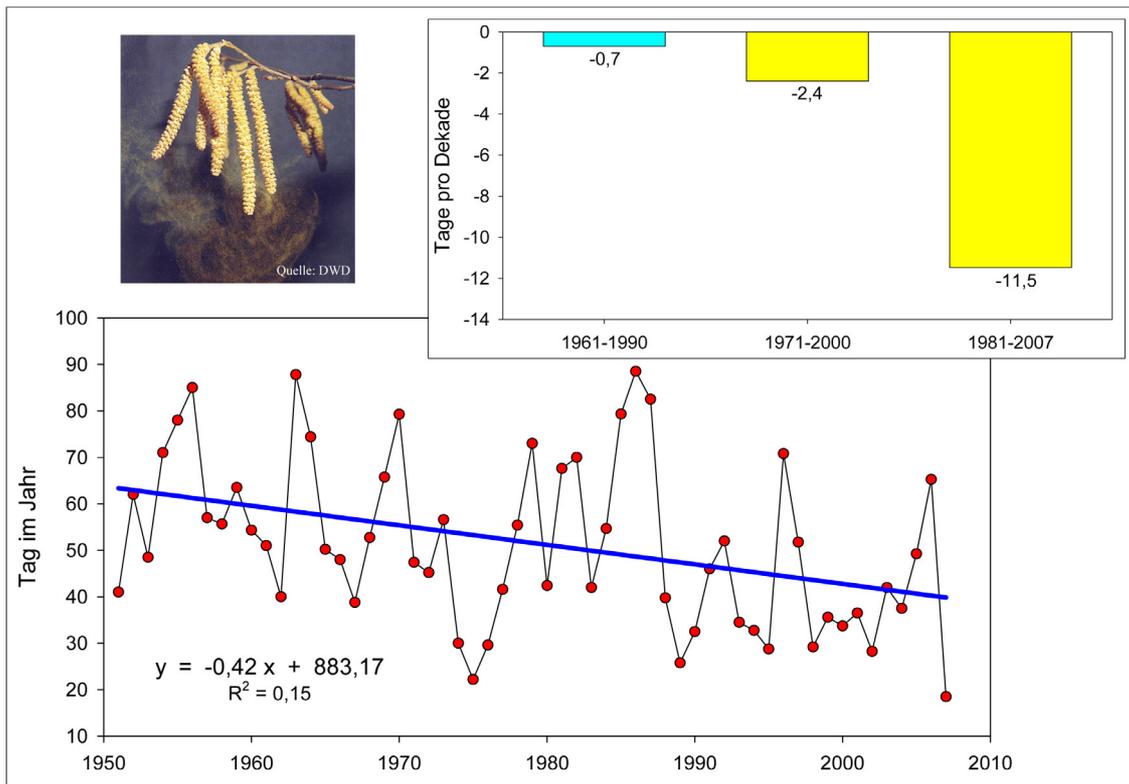


Abb. 13: Blühbeginn der Haselnuss im Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal"

Die Erhöhung der Temperatur wird sich in der Zukunft weiter fortsetzen (Abb. 14). Bis Mitte des Jahrhunderts (2036-2065) wird ein Anstieg der Lufttemperatur um $1,8 \pm 0,3$ K bezogen auf die Klimanormalperiode prognostiziert. Die Standardabweichung spiegelt dabei die Variabilität der Prognosen zwischen den Szenarien und den jeweiligen Realisationen wider.

Als Folge dieser Erwärmung wird sich der Beginn der Haselnussblüte künftig weiter verfrühen, im Zeitraum von 2036 bis 2065 im Mittel auf den 33. Tag im Jahr. Die Abweichung beträgt 4 Tage (Abb. 15). Der phänologische Frühling könnte folglich Mitte dieses Jahrhunderts bereits am 2. Februar beginnen. Das Jahr 2007 mit einem Beginn der Haselnussblüte am 18. Januar lässt erahnen, mit welchen Veränderungen in Zukunft gerechnet werden muss.

Auch der Blühbeginn des Schwarzen Holunders zeigt im Marburg-Gießener-Lahntal in dem Zeitraum 1991-2007 eine deutliche Verfrühen um 10 Tage im Mittel auf den 143. Tag im Jahr. Dies indiziert einen früheren Beginn des phänologischen Sommers. Diese Tendenz wird auch für die Zukunft erwartet. Im Zeitraum von 2036 bis 2065 wird der Eintritt der Blüte des Schwarzen Holunders im Mittel auf den 139. Tag, d.h. den 19. Mai, fallen (Abb. 16). Im Jahre 2007 begann der phänologische Sommer bereits am 28. April.

Der Beginn des Herbstes, angezeigt durch den Eintritt der Fruchtreife des Schwarzen Holunders, hat sich im Marburg-Gießener-Lahntal in den letzten beiden Dekaden im Vergleich zur Klimanormalperiode um 8 Tage verfrüht, im Mittel auf den 229. Tag im Jahr. In der Mitte des Jahrhunderts wird sich der Herbstbeginn um weitere 3 Tage vorverlagern, im Mittel auf den 226. Tag (Abb. 17).

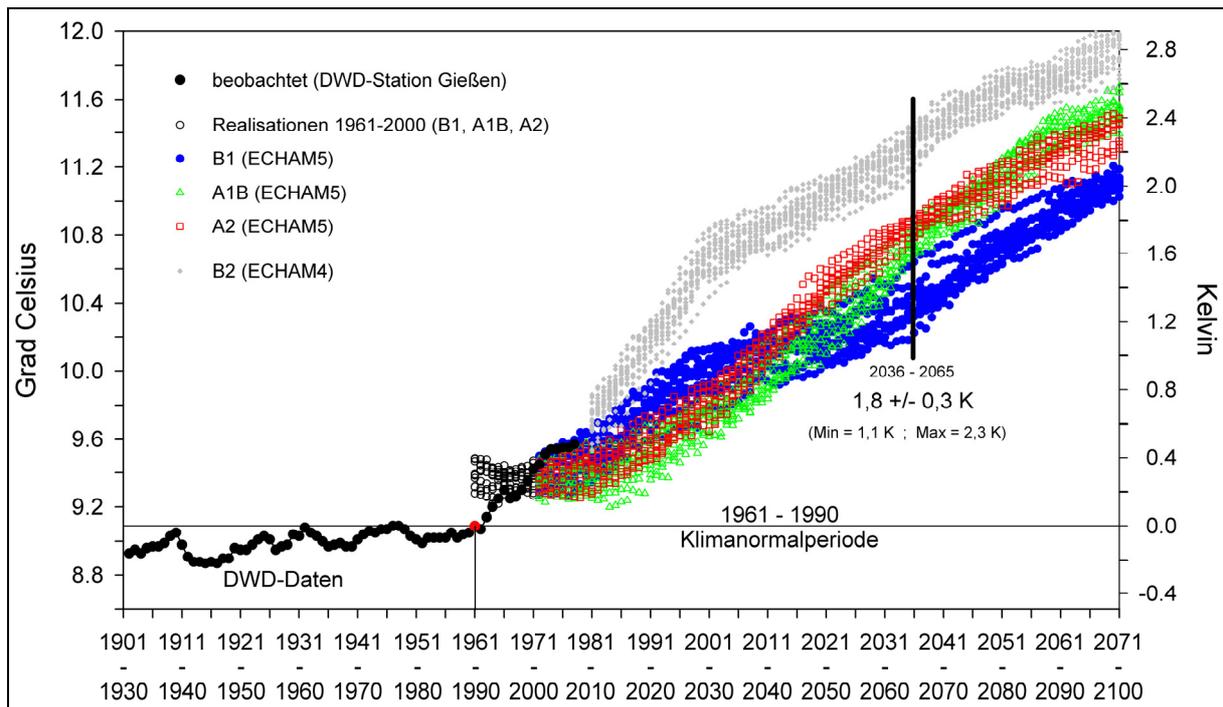


Abb. 14: Gleitende 30jährige Mittel der Lufttemperatur in Gießen

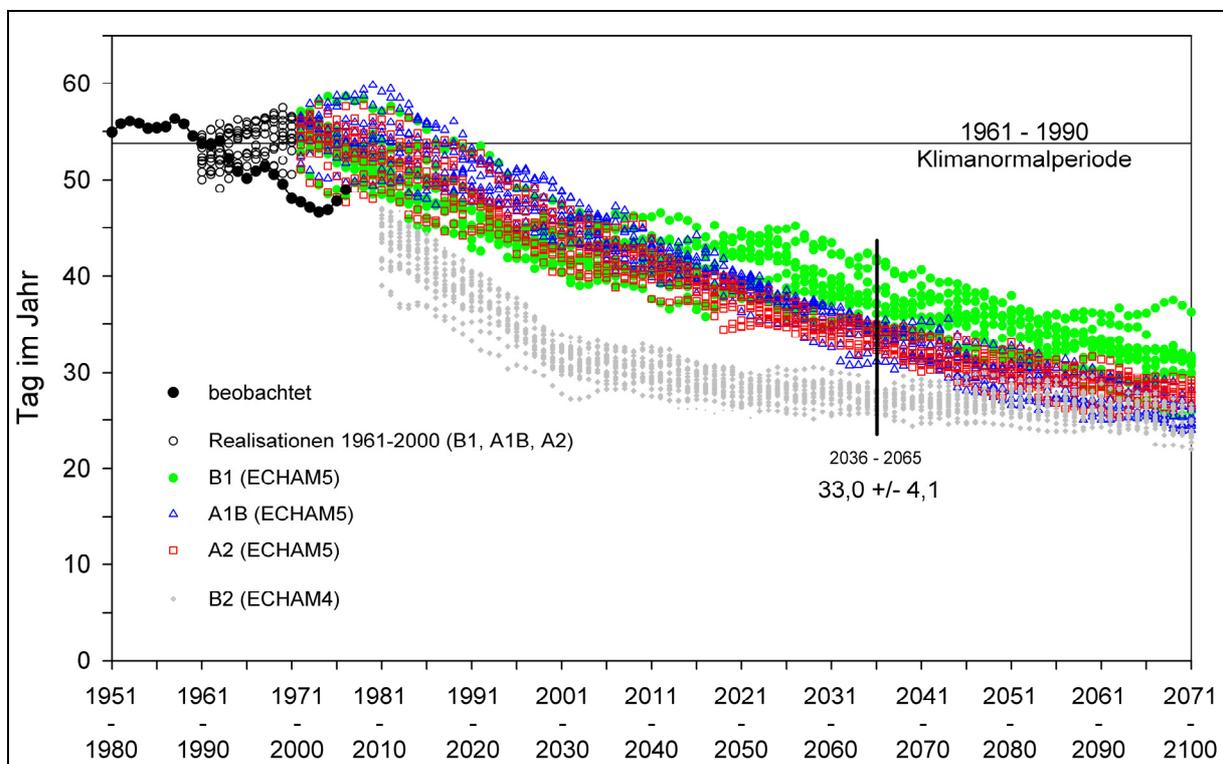


Abb. 15: Gleitende 30jährige Mittel des Blühbeginns der Haselnuss im Marburg-Gießener-Lahntal (Beginn des phänologischen Frühlings)

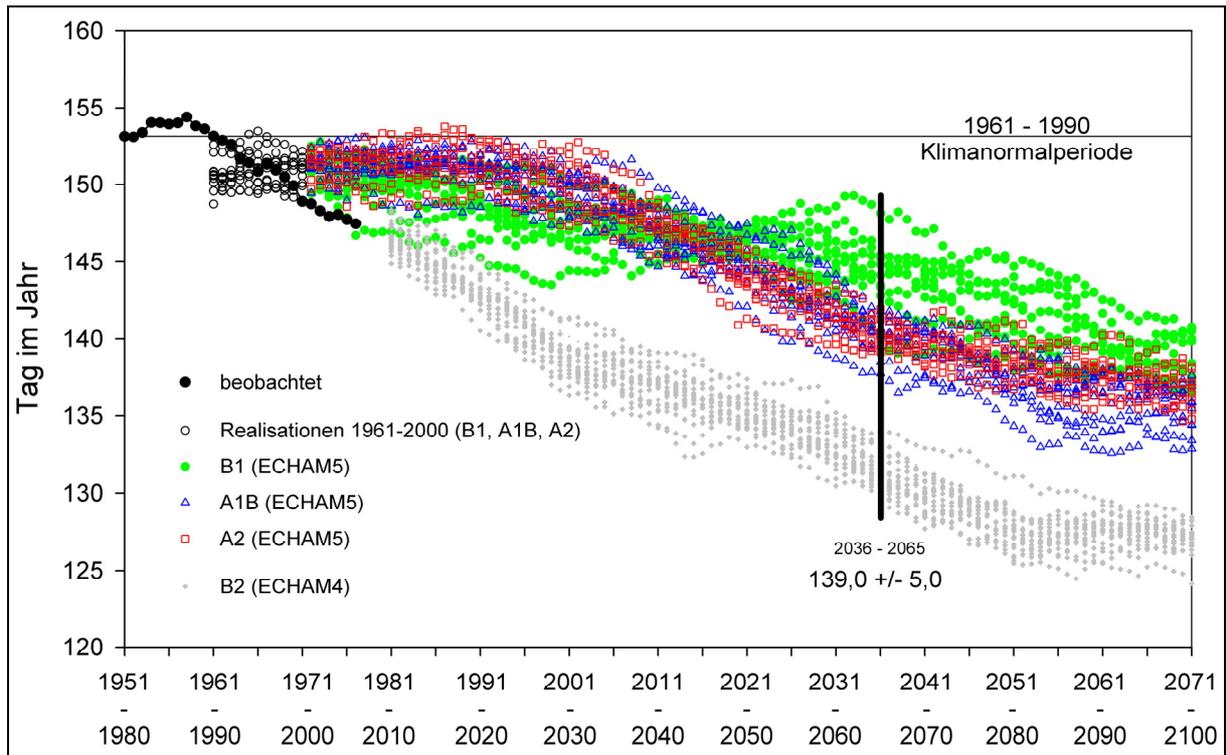


Abb. 16: Gleitende 30jährige Mittel des Blühbeginns des Schwarzen Holunders im Marburg-Gießener-Lahntal (Beginn des phänologischen Sommers)

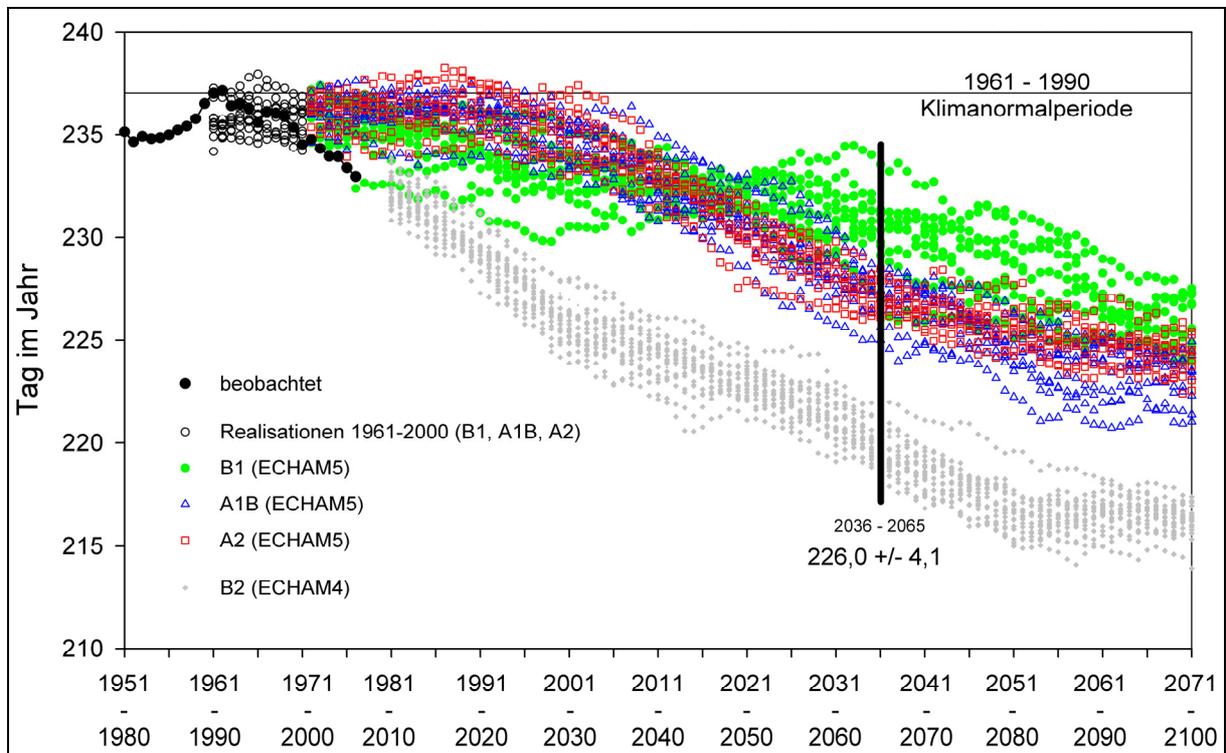


Abb. 17: Gleitende 30jährige Mittel des Beginns der Fruchtreife des Schwarzen Holunders im Marburg-Gießener-Lahntal (Beginn des phänologischen Herbstes)

Der Beginn der Vegetationsruhe nach LIKI, definiert durch den Eintritt der Blattverfärbung der Stieleiche, hat sich im Marburg-Gießener-Lahntal seit der Klimanormalperiode geringfügig um 5 Tage auf den 282. Tag im Jahr verfrüht. Eine weitere Verfrühtung bis Mitte dieses Jahrhunderts scheint nicht wahrscheinlich zu sein. Der Beginn der Vegetationsruhe wird im Mittel lediglich einen Tag früher, also am 281. Tag eintreten (Abb. 18).

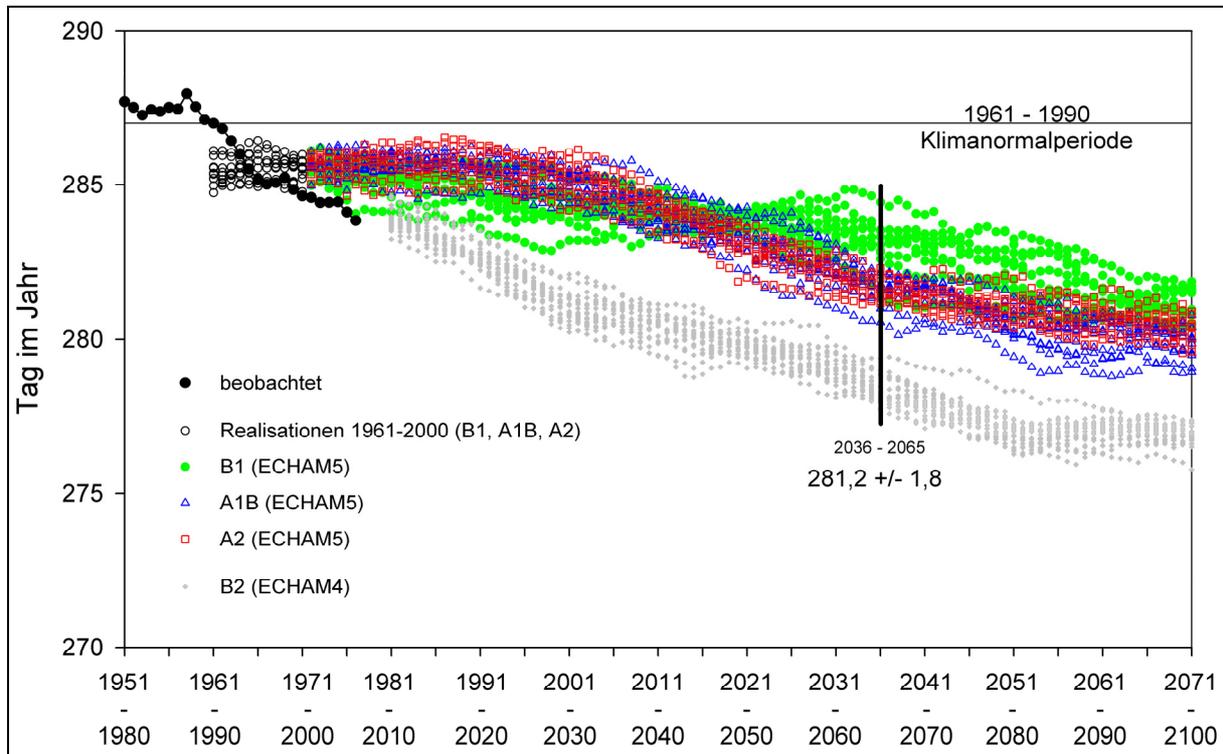


Abb. 18: Gleitende 30jährige Mittel des Beginns der Blattverfärbung der Stieleiche im Marburg-Gießener-Lahntal (Beginn der phänologischen Vegetationsruhe nach LIKI)

Eine Betrachtung der phänologischen Uhr des Marburg-Gießener-Lahntals zeigt, dass sich der Beginn der Jahreszeiten im Zeitraum von 1991 bis 2007 im Vergleich zur Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 um bis zu 13 Tage verfrüht hat. Der Frühling zeigt mit 13 Tagen die stärkste Verfrühtung. Der Sommer beginnt 10 Tage früher, der Herbst 8 Tage und die Vegetationsruhe 5 Tage (Abb. 19, Tab. 10).

Diese Tendenz der Verfrühtung im Beginn der phänologischen Jahreszeiten wird sich weiter fortsetzen (Abb. 20). Im Zeitraum von 2036 bis 2065 werden die phänologischen Jahreszeiten nochmals um bis zu 8 Tage früher eintreten als in der Zeitspanne von 1991 bis 2007. Neben dem 8 Tage verfrühten Einsetzen des Frühlings wird sich der Beginn des Sommers um 4 Tage, des Herbstes um 3 Tage und der Vegetationsruhe um einen Tag vorverlagern. Die Standardabweichungen, die die Variabilität der Prognosen zwischen den Szenarien und den jeweiligen Realisationen widerspiegeln, betragen dabei 2-5 Tage (Abb. 20, Tab. 10).

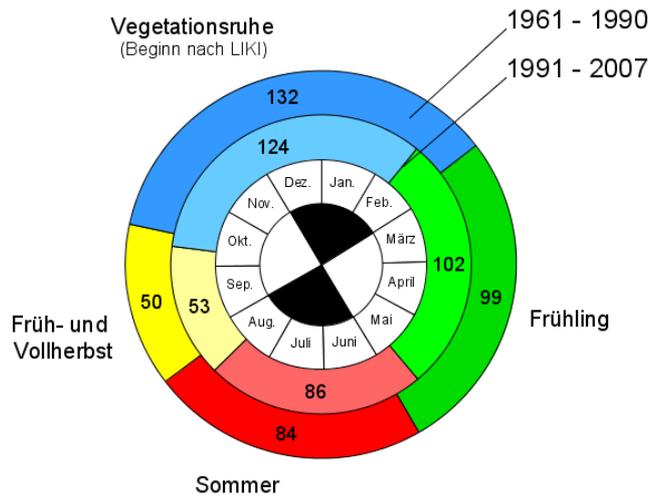


Abb. 19: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr mit beobachteten mittleren Eintrittsterminen für den Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal"

Tab. 10: Beobachtete und modellierte mittlere Eintrittstermine phänologischer Jahreszeiten im Marburg-Gießener-Lahntal

Phänologische Jahreszeit	Phänophase	1961 – 1990	1991 – 2007	2036 – 2065
		beobachtet	beobachtet	modelliert ^{*)}
[Tag im Jahr]				
Frühling	Haselnuss (Blüte)	54	41	33 ± 4
Sommer	Schwarzer Holunder (Blüte)	153	143	139 ± 5
Früh- und Vollherbst	Schwarzer Holunder (Fruchtreife)	237	229	226 ± 4
Vegetationsruhe (Beginn nach LIKI)	Stieleiche (Blattverfärbung)	287	282	281 ± 2

*) Mittelwerte und Standardabweichung der ECHAM5-Szenarien A1B, A2 und B1 sowie des ECHAM4 Szenarios B2

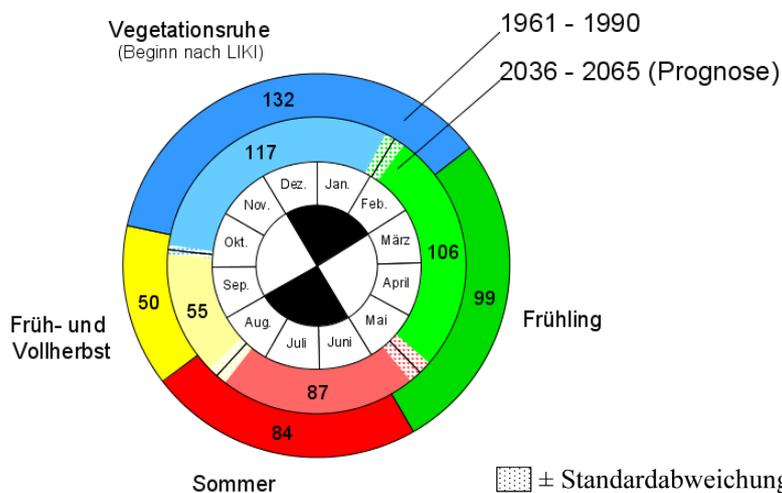


Abb. 20: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr mit beobachteten und prognostizierten mittleren Eintrittsterminen für den Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal"

Die Zeitspanne zwischen dem Blühbeginn der Salweide und der Blattverfärbung der Stieleiche kann nach LIKI als Annäherung an die Dauer der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode angesehen werden. Die zeitliche Entwicklung des Beginns der Blüte der Salweide ist in Abb. 21, die Entwicklung der Blattverfärbung der Stieleiche in Abb. 18 dargestellt.

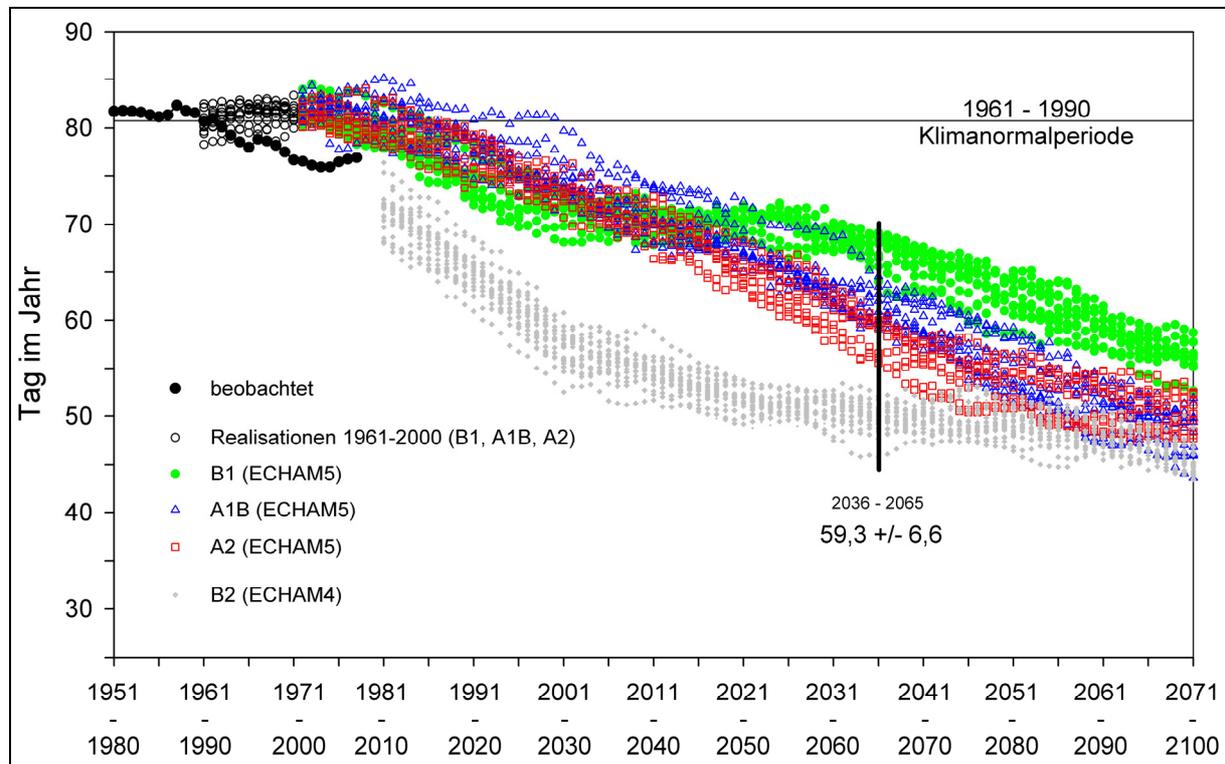


Abb. 21: Gleitende 30jährige Mittel des Blühbeginns der Salweide im Marburg-Gießener-Lahntal (phänologischer Zeiger für den Beginn der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode nach LIKI)

Auch der Blühbeginn der Salweide hat sich bereits verfrüht und wird sich in Zukunft weiter vorverlagern. Die Dauer der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode wird sich bis Mitte dieses Jahrhunderts um etwa 2 Wochen im Vergleich zur Klimanormalperiode verlängern. Aus Abb. 22 in Kombination mit Abb. 18 und 21 geht hervor, dass diese Verlängerung der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode auf einen früheren Beginn und nicht auf ein verzögertes Ende zurückzuführen ist. Dies wird auch in der phänologischen Uhr für die Dauer der Vegetationsruhe und der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode deutlich (Abb. 23).

4.2.2 Ausweitung der Prognosemodelle auf andere Regionen Hessens

Von den in Tab. 4 aufgeführten Standorten wurden Eschwege als Repräsentant für Nordhessen und Geisenheim als Repräsentant für Südhessen ausgewählt. Der DWD-Standort Homberg/Ohm wurde im Jahre 2000, Brilon im Jahre 2004 und Biedenkopf im Jahre 2006 geschlossen. Frankfurt wurde aus zeitlichen Gründen nicht betrachtet.

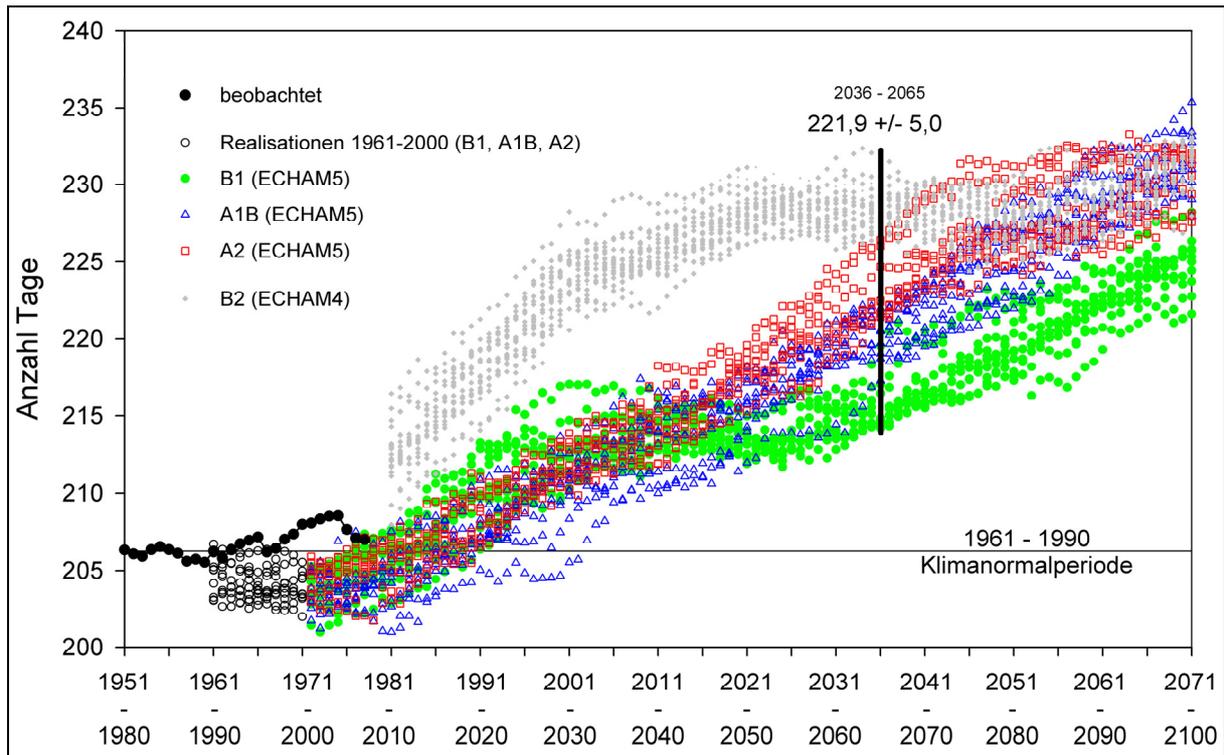


Abb. 22: Gleitende 30jährige Mittel der Dauer der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode im Marburg-Gießener-Lahntal

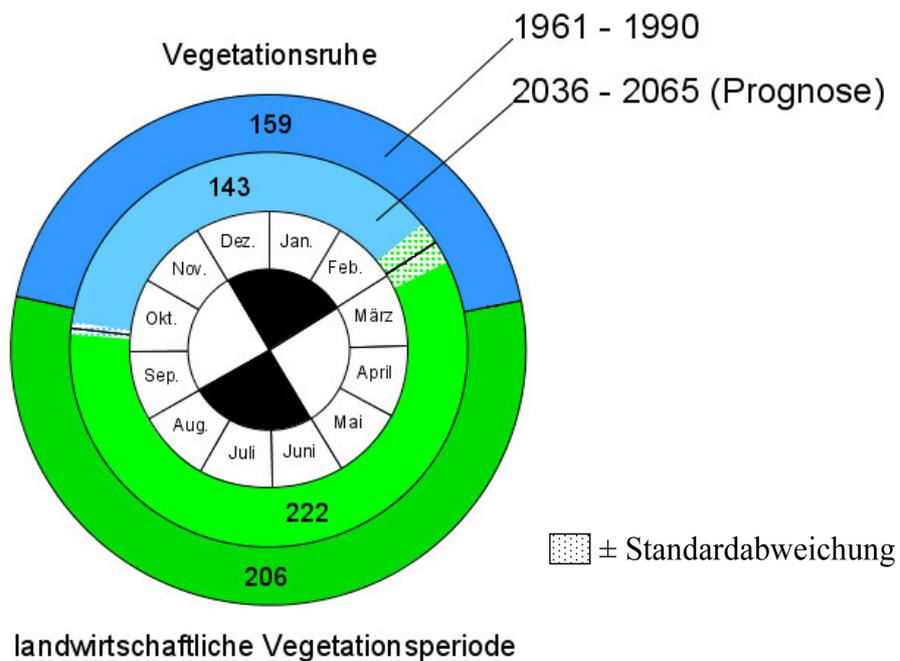


Abb. 23: Phänologische Uhr mit Dauer der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode bzw. der Vegetationsruhe im Marburg-Gießener-Lahntal

ESCHWEGE

Die Tendenz des Marburg-Gießener-Lahntals spiegelt sich in der phänologischen Uhr für Eschwege wider. Auch hier kann eine Verfrühung im Beginn der phänologischen Jahreszeiten beobachtet werden. Die Vorverlagerung ist sogar etwas stärker als im Marburg-Gießener-Lahntal. Der Beginn des Frühlings erfolgt 17 Tage früher, der des Sommers 11 Tage und der des Herbstes 6 Tage. Die Vegetationsruhe tritt 2 Tage verzögert ein (Abb. 24, Tab. 11).

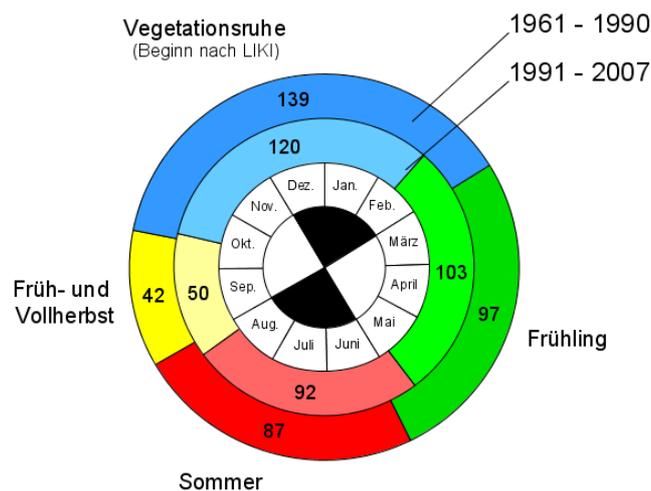


Abb. 24: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr mit beobachteten mittleren Eintrittsterminen für Eschwege

Tab. 11: Beobachtete und modellierte mittlere Eintrittstermine phänologischer Jahreszeiten in Eschwege

Phänologische Jahreszeit	Phänophase	1961 – 1990 beobachtet	1991 – 2007 beobachtet	2036 – 2065 modelliert ^{*)}
				[Tag im Jahr]
Frühling	Haselnuss (Blüte)	60	43	35 ± 5
Sommer	Schwarzer Holunder (Blüte)	157	146	144 ± 5
Früh- und Vollherbst	Schwarzer Holunder (Fruchtreife)	244	238	238 ± 2
Vegetationsruhe (Beginn nach LIKI)	Stieleiche (Blattverfärbung)	286	288	286 ^{**)}

*) Mittelwerte und Standardabweichung der ECHAM5-Szenarien A1B, A2 und B1 sowie des ECHAM4-Szenarios B2

***) Die Angabe einer Standardabweichung ist nicht möglich, da bei der Ableitung des Prognosemodells für den Beginn der Vegetationsruhe eine Konstante (= 286. Tag im Jahr) resultierte.

In der Mitte des Jahrhunderts wird sich diese Tendenz der Verfrühung weiter fortsetzen. Der Frühlingsbeginn wird sich im Vergleich zu 1991-2007 im Zeitraum von 2036 bis 2065 nochmals um 8 Tage vorverlagern, der Sommer und die Vegetationsruhe werden jeweils weitere 2

Tage früher beginnen. Der Herbstbeginn bleibt gleich. Die Standardabweichungen für diese Prognosen betragen bis zu 5 Tage (Tab. 11, Abb. 25).

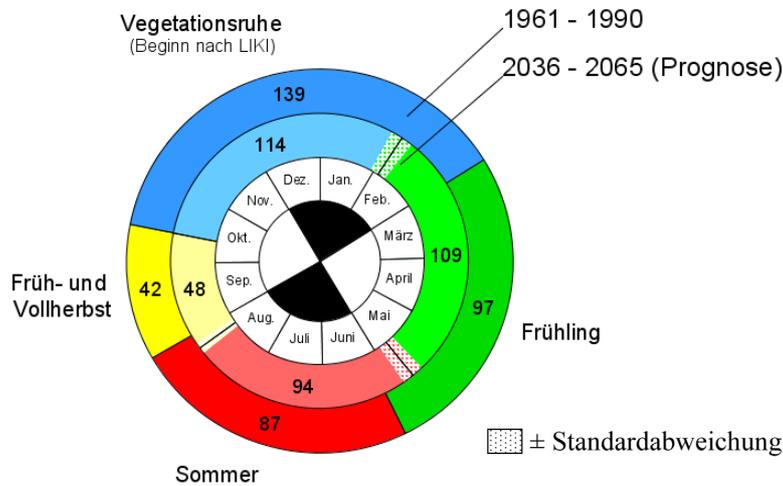


Abb. 25: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr mit beobachteten und prognostizierten mittleren Eintrittsterminen für Eschwege

GEISENHEIM

Für Geisenheim zeigt sich beim Vergleich der Zeiträume von 1991 bis 2007 gegenüber den Dekaden von 1961 bis 1990 in der phänologischen Uhr eine ähnlich starke Verfrühung der phänologischen Jahreszeiten wie für Eschwege (Abb. 26, Tab. 12).

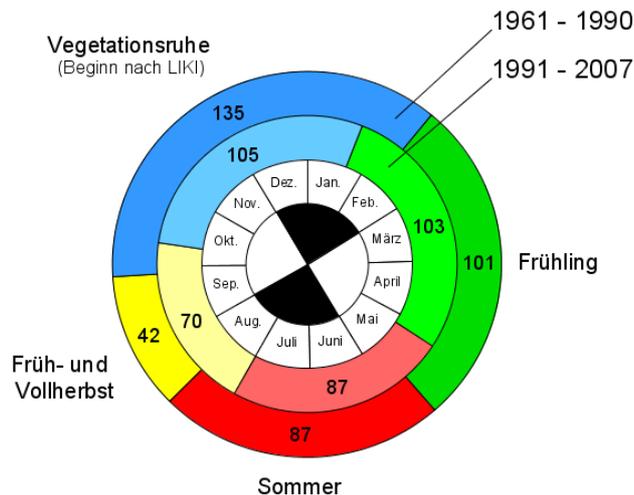


Abb. 26: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr mit beobachteten mittleren Eintrittsterminen für Geisenheim

Der Beginn des Frühjahrs erfolgt 18 Tage früher, der des Sommers und der des Herbstes jeweils 16 Tage. Die Vegetationsruhe hingegen tritt 12 Tage später ein. Diese erhebliche Verzögerung kann damit zusammenhängen, dass für den Beginn dieser Jahreszeit die Blattverfärbung der Rosskastanie verwendet wurde. Die bevorzugte Zeigerpflanze für diese Phase, die

Stieleiche, wurde an diesem Standort nicht beobachtet, so dass die Ersatzpflanze Rosskastanie herangezogen werden musste (Abb. 26, Tab. 12).

Tab. 12: Beobachtete und modellierte mittlere Eintrittstermine phänologischer Jahreszeiten in Geisenheim

Phänologische Jahreszeit	Phänophase	1961 – 1990	1991 – 2007	2036 – 2065
		beobachtet	beobachtet	modelliert ^{*)}
[Tag im Jahr]				
Frühling	Haselnuss (Blüte)	41	23	25 ± 3
Sommer	Schwarzer Holunder (Blüte)	142	126	128 ± 5
Früh- und Vollherbst	Schwarzer Holunder (Fruchtreife)	229	213	215 ± 5
Vegetationsruhe (Beginn nach LIKI)	Rosskastanie (Blattverfärbung)	271	283	290 ± 2

*) Mittelwerte und Standardabweichung der ECHAM5-Szenarien A1B, A2 und B1 sowie des ECHAM4-Szenarios B2

Der zukünftige Eintritt der phänologischen Jahreszeiten für Geisenheim zeigt einen anderen Trend als für das Marburg-Gießener-Lahntal oder für Eschwege. Die phänologischen Jahreszeiten werden im Zeitraum von 2036 bis 2065 gegenüber der Periode von 1991 bis 2007 um 2-7 Tage später eintreten (Tab. 12, Abb. 27). Dies liegt daran, dass das Modell zur Abschätzung des Eintritts der phänologischen Hauptjahreszeiten mit den Daten der Jahre 1961-2000 erstellt wurde, der sehr stark verfrühte Beginn der Jahreszeiten in Geisenheim jedoch verstärkt in den Jahren von 2001 bis 2007 erfolgte. Die Haselnuss blühte beispielsweise anstatt im Frühjahr 2001 bereits im Dezember 2000. Dieser Termin ist mit dem derzeitigen Temperatursummenmodell nicht fassbar, da als Starttermin klassischer Weise der Jahresbeginn gewählt wurde.

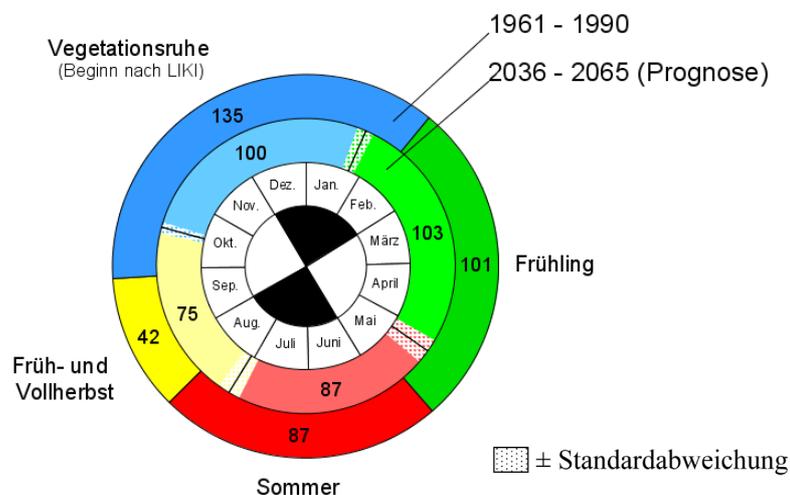


Abb. 27: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr mit beobachteten und prognostizierten mittleren Eintrittsterminen für Geisenheim

4.3 Abschätzung der zukünftigen Spätfrostgefährdung

Der Spätfrost hat eine besondere Bedeutung für den Obst-, Gemüse- und Weinbau, da bereits einzelne Frostnächte während der Obstblüte zu völligen Ertragsausfällen führen können. Dabei spielen neben der Stärke, der Dauer und dem Zeitpunkt des Frostes die Pflanzenart und die Resistenz der Sorte eine entscheidende Rolle (vgl. Chmielewski 2004, Schumacher 1989). Die Empfindlichkeit gegenüber Frost hängt vom phänologischen Stadium ab. Sie steigt mit voranschreitendem Entwicklungszustand der Blüten, da die empfindlichen Reproduktionsorgane weniger gegen Umwelteinflüsse geschützt sind (vgl. Schumacher 1989).

Die Anzahl der Spätfrosttage wird sich in der Zukunft in den Monaten März bis Mai kaum vermindern (Tab. 13). Da der Vegetationsbeginn aber früher einsetzt, ist eine potentielle Spätfrostgefährdung für Pflanzen weiter wahrscheinlich. Aus diesem Grund wurde für einige ausgewählte Obstgehölze und Beerensträucher im Marburg-Gießener-Lahntal das Auftreten von Frost im Zeitraum von 10 Tagen nach dem Zeitpunkt des Blühbeginnes untersucht.

Tab. 13: Mittlere Anzahl der Frosttage ($T_{\min} < 0\text{ °C}$) der Monate Januar bis Mai in den Zeiträumen 1961-1990, 1991-2007 und 2036-2065 in Gießen

	Januar	Februar	März	April	Mai	Jan-Mai
1961 - 1990	17,7	16,4	11,1	3,3	0,2	48,7
1991 - 2007	16,8	15,4	11,2	3,9	0,0	47,3
2036 - 2065 ^{*)}	12,5 ± 1,5	10,8 ± 1,8	8,3 ± 1,3	3,1 ± 0,8	0,2 ± 0,1	34,8 ± 4,5

^{*)} Mittelwert der ECHAM5-Szenarien A1B, A2 und B1 sowie des ECHAM-4 Szenarios B2

So hat sich der Blühbeginn des Apfels im Zeitraum von 1991 bis 2007 gegenüber der Klimanormalperiode im Mittel um 8 Tage auf den 115. Tag im Jahr verfrüht. Diese Tendenz wird auch in den nächsten Jahrzehnten zu sehen sein. In dem Zeitraum von 2036 bis 2065 wird der Blühbeginn im Mittel am 107. Tag im Jahr erwartet. Die Standardabweichung, die die Variabilität innerhalb der Prognosen widerspiegelt, beträgt 6 Tage (Abb. 28, Tab. 14).

Auch der Blühbeginn der anderen untersuchten Obstarten hat sich im Zeitraum von 1991 bis 2007 gegenüber den Dekaden von 1961 bis 1990 um 6 bis 9 Tage verfrüht. Dieser Trend wird sich in der Zukunft fortsetzen. Im Zeitraum von 2036 bis 2065 wird sich der Blühbeginn gegenüber der Periode von 1991 bis 2007 nochmals um 8 bis 11 Tage verfrühen (Tab. 14).

Tab. 14: Blühbeginn verschiedener Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal"

Beurteilungszeitraum	Apfel	Birne	Süßkirsche	Sauerkirsche	Rote Johannisbeere	Stachelbeere
1961 – 1990	123	117	113	118	109	106
1991 – 2007	115	110	105	111	100	100
2036 – 2065 ^{*)}	107 ± 6	101 ± 7	96 ± 7	102 ± 6	92 ± 7	89 ± 6

^{*)} Mittelwert der ECHAM5-Szenarien A1B, A2 und B1 sowie des ECHAM-4 Szenarios B2

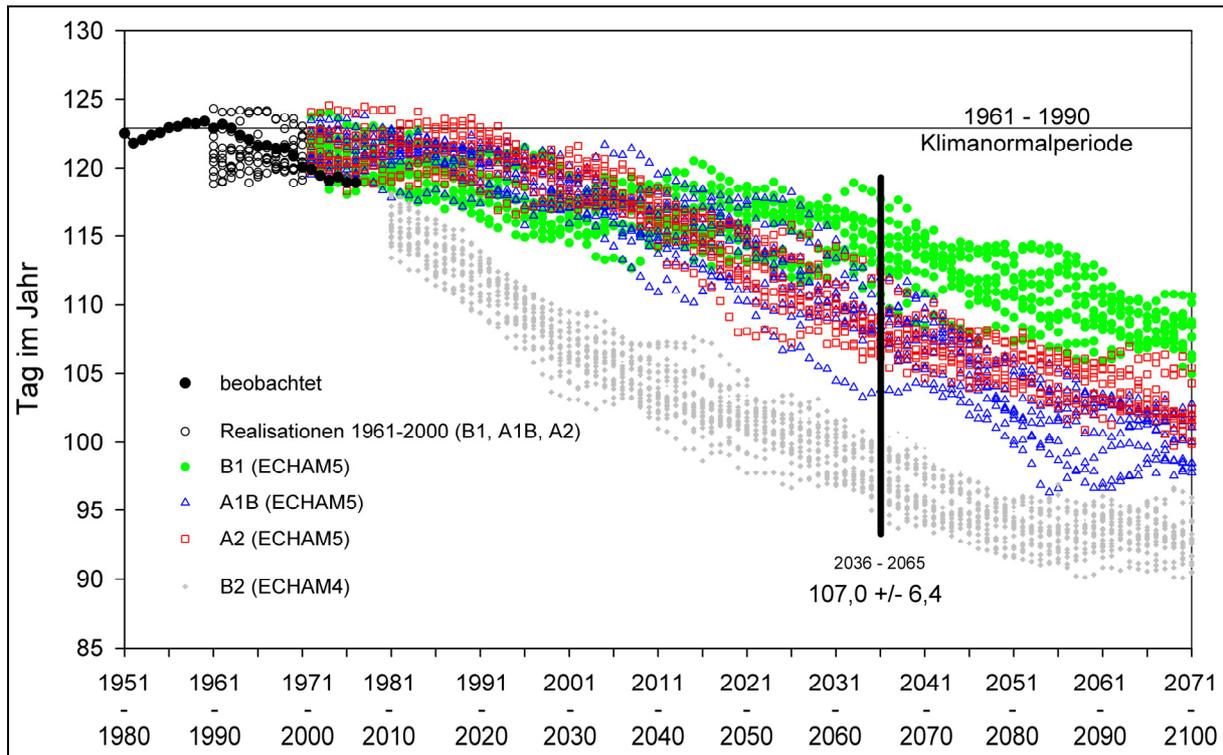


Abb. 28: Gleitende 30jährige Mittel des Blühbeginns des Apfels im Marburg-Gießener-Lahntal

Betrachtet man den Zeitraum von 10 Tagen nach Blühbeginn, so zeigt sich, dass für einige Arten insbesondere in den 1990er Jahren des letzten Jahrhunderts die Gefahr durch Spätfröste zugenommen hat (Tab. 15).

Tab. 15: Gefahr von Spätfrösten ($T_{\min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) bei verschiedenen Obstgehölzen und Beersträuchern im Zeitraum zwischen Blühbeginn und 10 Tagen danach im Naturraum 348 "Marburg-Gießener-Lahntal"

Beurteilungszeitraum	Apfel	Birne	Süßkirsche	Sauerkirsche	Rote Johannisbeere	Stachelbeere
Jahre mit Spätfrösten zur Zeit der Blüte pro Dekade						
1961 – 1990	0,7	2,3	4,0	1,7	5,0	5,0
1991 – 2007	1,2	2,4	5,9	2,9	6,5	6,5
2036 – 2065 ^{*)}	2,2 ± 0,7	3,3 ± 0,9	3,7 ± 1,0	3,3 ± 0,9	3,6 ± 1,0	4,5 ± 1,0

^{*)} Mittelwert der ECHAM5-Szenarien A1B, A2 und B1 sowie des ECHAM-4 Szenarios B2

Diese Gefährdung der Vegetation ist auch in der Zukunft vorhanden. Für den Apfel beispielsweise werden im Zeitraum von 2036 bis 2065 zur Zeit der Apfelblüte 2,2 Jahre pro Dekade mit Spätfrösten erwartet (Abb. 29, Tab. 15).

Die Gefährdung durch Spätfröste im Obstbau nimmt trotz der prognostizierten Erwärmung des Klimas nicht ab (Tab. 15).

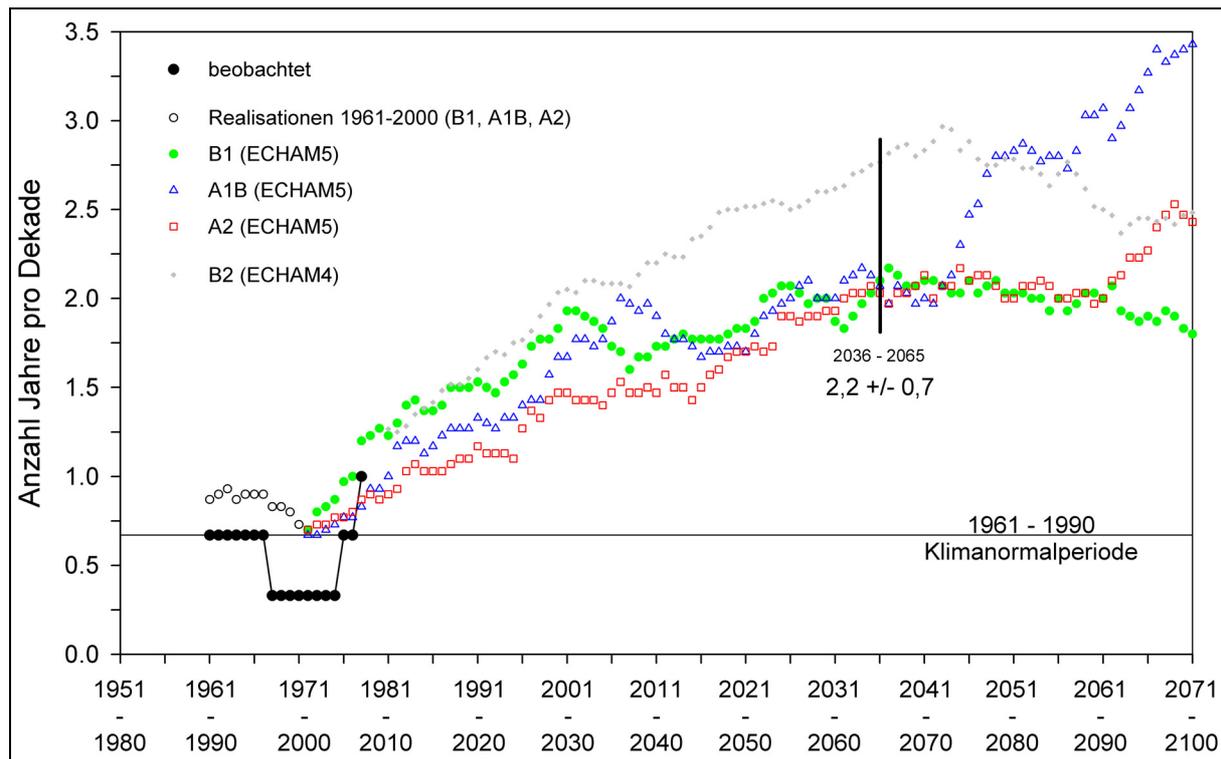


Abb. 29: Gleitende 30jährige Mittel der Spätfröste zur Zeit der Apfelblüte im Marburg-Gießener-Lahntal (Szenarien: dargestellt sind die Mittelwerte der jeweiligen Realisationen)

Den Abbildungen 28 und 29 entsprechende Grafiken für Birne, Süß- und Sauerkirsche, Rote Johannisbeere und Stachelbeere finden sich im Anhang. Für alle Kulturen scheint auf der Grundlage der prognostizierten Temperaturdaten eine steigende Gefährdung durch Spätfröste zur Zeit der Blüte gegeben zu sein. Die Diskrepanzen zwischen beobachteter und simulierter Anzahl von Jahren mit Spätfrösten pro Dekade für die Vergangenheit und die Gegenwart zeigt allerdings die Grenzen der Interpretationsmöglichkeit auf. Deshalb erscheint lediglich die Aussage "eine Gefährdung durch Spätfröste wird auch in Zukunft bestehen" gerechtfertigt zu sein.

5 Zusammenfassende Bewertung

Das Klima in Hessen hat sich in dem Untersuchungszeitraum (1951-2007) nachweislich verändert. Am Beispiel von Gießen konnte gezeigt werden, dass die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur ab Beginn der Klimanormalperiode um etwa 0,5 °C gestiegen sind.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Pflanzen auf die Klimaänderung in Hessen bereits reagiert haben. In der Pflanzenentwicklung konnten in den letzten 57 Jahren zeitliche Verschiebungen beobachtet werden. Diese waren ab Beginn der 1990er Jahre besonders deutlich. Der Eintritt der phänologischen Phasen hat sich im Zeitraum von 1991 bis 2007 im Vergleich zur Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 verfrüht: Bei Betrachtung der phänologischen Uhr für Hessen hat sich der innere Ring gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Die Früh-

jahresphasen zeigen dabei den stärksten Trend. Sie reagieren sehr deutlich auf die höheren Temperaturen in den Wintermonaten. Der frühere Beginn der Phänophasen wurde im Jahresverlauf kleiner und hat sich im Herbst in einer Region sogar verzögert, was eine Folge milder Witterung sein könnte.

Die klimatischen Veränderungen haben folglich unterschiedliche Auswirkungen auf die Pflanzen. Die Mehrheit der Pflanzenphasen reagiert mit einer früheren Entwicklung. Jedoch setzte eine Phase, die Blattverfärbung der Stieleiche, in einer Region Hessens später ein. Am Beispiel dieser Phase wird deutlich, dass sich die Pflanzen regional unterschiedlich entwickeln können. Größere Unterschiede in benachbarten Naturraumgruppen zeigen sich im Bezug auf die Dauer der Vegetationsperiode. Während sich die Vegetationszeit in den meisten Regionen verlängert hat, ist sie wiederum im Oberen Weserbergland unverändert geblieben. Im Taunus und im Lahntal konnte sogar eine Verkürzung der Vegetationsperiode beobachtet werden. Auch die Dauer der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode (nach LIKI definiert als Zeitspanne zwischen dem Blühbeginn der Salweide und der Blattverfärbung der Stieleiche) hat sich in den einzelnen Regionen Hessens verlängert, am stärksten im Oberen Weserbergland mit 25 Tagen. Lediglich im Taunus ist eine geringe Verkürzung zu verzeichnen.

Die beobachteten Veränderungen in der Pflanzenentwicklung setzen sich auch in der Zukunft fort. Beispielhaft konnte für das Marburg-Gießener-Lahntal mit Hilfe von Modellen aufgezeigt werden, dass die phänologischen Jahreszeiten, welche sich in den letzten 2 Dekaden um bis zu 13 Tage verfrüht haben, bis Mitte dieses Jahrhunderts nochmals um bis zu 8 Tage früher eintreten werden. Der Frühling wird in dem Zeitraum von 2036 bis 2065 im Mittel bereits am 2. Februar beginnen. Im Jahr 2007 trat der Frühling in Hessen am 1. Februar, im Marburg-Gießener-Lahntal bereits am 19. Januar ein. Das Jahr 2007 zeigt folglich, welche Veränderungen in der Zukunft erwartet werden können. Der Trend zur Verlängerung der Vegetationsperiode in Hessen, hauptsächlich auf dem früheren Vegetationsbeginn basierend, wird sich in der Zukunft weiter verstärken.

Eine Ausweitung der Modelle auf andere Regionen Hessens spiegelt den Trend im Marburg-Gießener-Lahntal wieder. Der Beginn der phänologischen Jahreszeiten wird sich auch in Eschwege in der Zukunft weiter verfrühen. Der Beginn des Frühjahrs verlagert sich dabei am deutlichsten vor, im Zeitraum von 2036 bis 2065 um nochmals 8 Tage im Vergleich zu den letzten beiden Dekaden. In Geisenheim wird eine Verzögerung im Eintritt der phänologischen Jahreszeiten in der Mitte des Jahrhunderts gegenüber der Periode von 1991 bis 2007 um 2-7 Tage erwartet. Die Ursache hierfür ist, dass für die Modellierung die Daten der Jahre 1961-2000 verwendet wurden. Der sehr stark verfrühte Beginn der Jahreszeiten erfolgte in Geisenheim jedoch verstärkt in den Jahren von 2001 bis 2007.

Der frühere Beginn der Vegetationsperiode und damit zeitigere Austrieb der Pflanzen birgt jedoch auch Gefahren für den Obstbau. Trotz der prognostizierten Klimaerwärmung bleibt nämlich die Gefährdung durch Spätfrost in der Zukunft bestehen. Die Anzahl der Frosttage in den ersten 5 Monaten des Jahres wird in der Zukunft insgesamt weiter abnehmen, jedoch verringern sie sich hauptsächlich in den ersten 2-3 Monaten des Jahres. Die Abschätzung des Auftretens von Spätfrösten zur Zeit des Blühbeginns von ausgewählten Obstgehölzen (Apfel,

Birne, Süß- und Sauerkirsche) und Beerensträuchern (Rote Johannisbeere, Stachelbeere) in dem Zeitraum 2036-2065 zeigt, dass im Mittel je nach Obstart 2 bis 5 Jahre pro Dekade mit Spätfrost auftreten könnten. Eine Gefährdung der Vegetation durch Spätfrost zur Zeit der Blüte bleibt demnach trotz zukünftiger Erwärmung bestehen.

Literatur

Bortz, J. (1979): Lehrbuch der Statistik. Für Sozialwissenschaftler. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Bruns, E., Chmielewski, F.-M. & Van Vliet, A.J.H. (2003): The global phenological monitoring concept – towards international standardisation of phenological networks. In: Schwartz, M. D. (ed.) Phenology: An Integrative Environmental Science, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 93-104.

Cannell, M.G.R. & Smith, R.I. (1983): Thermal time, chill days and prediction of budburst in *Picea sitchensis*. *Journal of Applied Ecology* 20, 951-963.

Chen, X. (1994): Untersuchungen zur zeitlich-räumlichen Ähnlichkeit von phänologischen und klimatologischen Parametern in Westdeutschland und zum Einfluss geoökologischer Faktoren auf die phänologische Entwicklung im Gebiet des Taunus. *Berichte des deutschen Wetterdienstes*, Nr. 189, Offenbach am Main.

Chmielewski, F.-M. & Henniges, Y. (2007): Phänologische Modelle als Grundlage zur Abschätzung des Klimainpakt. in: Matzarakis, A. & Mayer, H. (Hrsg.): Proceedings zur 6. Fachtagung BIOMET des Fachausschusses Biometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg*, 16, 229-235.

Chmielewski, F.-M., Müller, A. & Kuchler, W. (2004): Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen. *Eigenverlag HU Berlin*, 5-14.

Chuine, I. (2000): A unified model for budburst of trees. *Journal of Theoretical Biology* 207, 337-347.

de Réaumur, R.A.F. (1735): Observations du thermometre, faites a Paris pendant l'annee 1735, compares avec celles qui ont ete faites sous la ligne, a l'Isle de France, a Alger et en quelques-unes de nos isles de l' Amerique. *Memoires de l'Academie des Sciences de Paris*, 545.

Deutscher Wetterdienst (1991): Anleitung für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes. 3. Aufl., Selbstverlag des DWD, Offenbach am Main.

DMG, ÖGM, SGM – Deutsche, Österreichische und Schweizerische Meteorologische Gesellschaft (2003): Klimastatement. Homepage der DMG. <www.met.fu-berlin.de/dmg/dmg_home>

DWD (2007): Jahresbericht 2007. <www.dwd.de>

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. *Meteo-Research*, Stahnsdorf.

Gornik, W. & Scharrer, H. (1994): Naturräumliche Gliederung für die Bundesrepublik Deutschland. Offenbach/Main: DWD.

Grünhage, L., Hertstein, U., Dämmgen, U., Schlecht-Pietsch, S., Küsters, A., Haenel, H.-D. & Jäger, H.-J. (1992): Beschreibung der Versuchsfläche, der eingesetzten Meßeinrichtungen sowie der Analyseverfahren. in: Grünhage, L. & Jäger, H.-J. (Hrsg.): Auswirkungen luftgetragener Stoffe auf ein Grünlandökosystem - Ergebnisse siebenjähriger Ökosystemforschung - Teil I. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft* 128, 33-126.

Hänninen, H. (1990): Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. *Acta Forestalia Fennica* 213.

HLUG (2007): Umweltindikatoren - Bundesland Hessen. Schriftenreihe des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie 351. <www.hlug.de/medien/nachhaltigkeit/dokumente/umweltindikatoren_web.pdf>

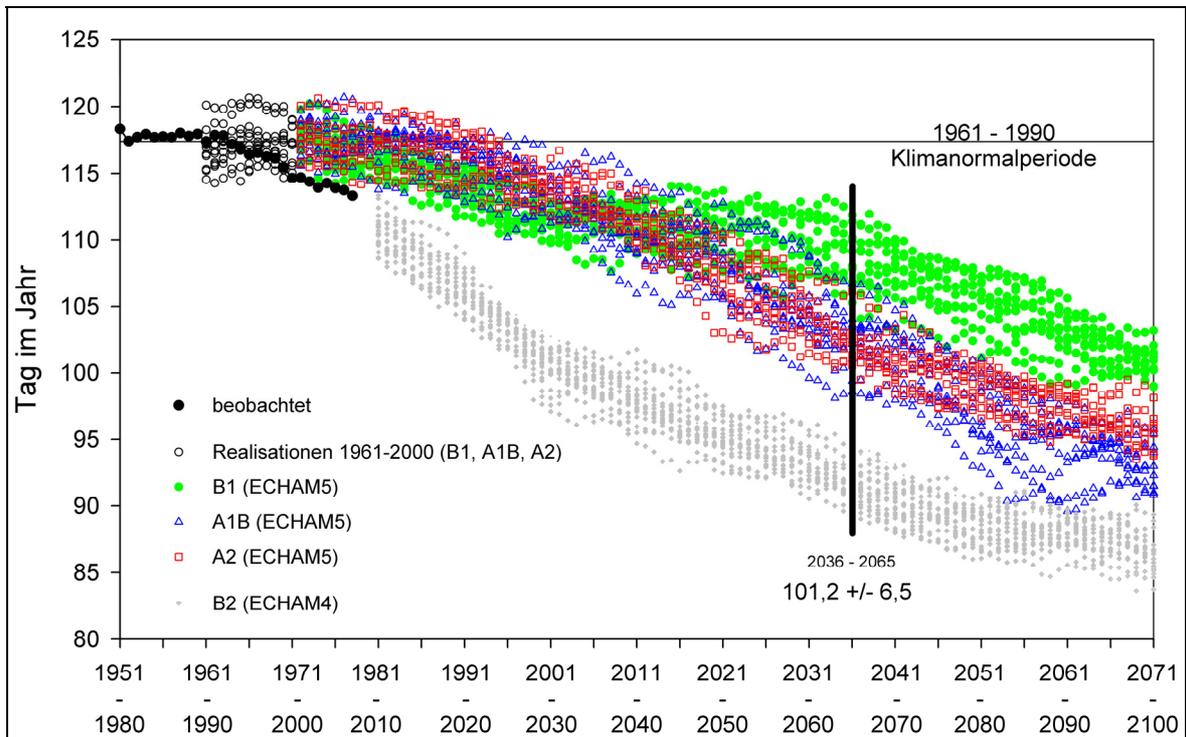
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *Climate Change 2007 – The 4th Assessment Report*. <www.ipcc.ch>

Klausing, O. (1988): Die Naturräume Hessens. Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt, Heft Nr. 67.

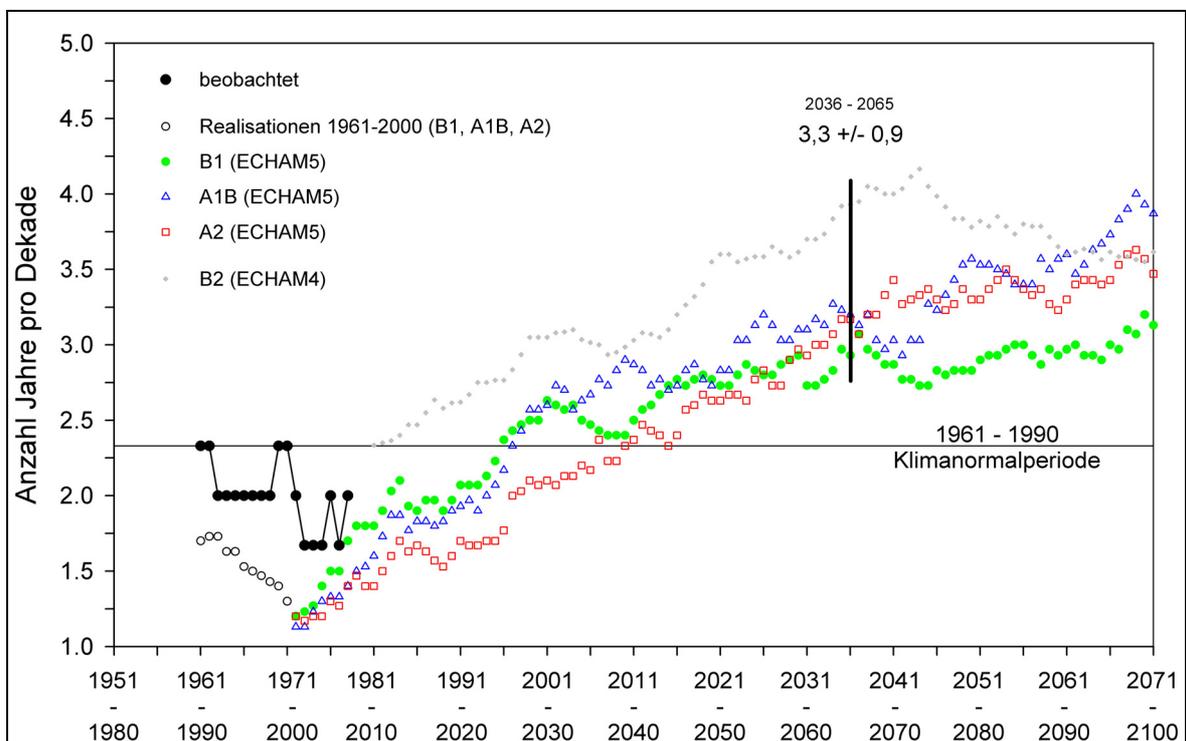
- Menzel, A. (1997): Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen - Auswertung der Beobachtungen in den Internationalen Phänologischen Gärten und Möglichkeiten der Modellierung von Phäno-
daten. Forstliche Forschungsberichte München 164.
- Menzel, A. (2003): Phenological data, networks, and research: Europe. In: Schwartz, M. D. (ed.) Phenology: An Integrative Environmental Science, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 45-56.
- Menzel, A. & Fabian, P. (1999): Growing season extended in Europe. *Nature* 397, 659.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N. et al. (2006): European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12, 1969–1976.
- Rapp, J. und Schönwiese, C.-D. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Band B 5, 2. korrigierte Aufl., 255 S.
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R. et al. (2003): Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421, 57–60.
- Runge, K. & Schönwiese, C.-D. (1986): Statistik phänologischer Zeitreihen Europas. Einige Charakteristika und klimatologische Zusammenhänge. *Arborea Phaenologica* 31, 51-60.
- Sachs, L. (1974): Angewandte Statistik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Schnelle, F. (1955): Pflanzen-Phänologie. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Porting K.-G., Leipzig.
- Schumacher, R. (1989): Die Fruchtbarkeit der Obstgehölze. Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart, 73-84.
- Sparks, T.H. & Carey, P.D. (1995): The responses of species to climate over two centuries: an analysis of the Marsham phenological record, 1736-1947. *Journal of Ecology* 83, 321-329.
- Sparks, T.H. & Menzel, A. (2002): Observed changes in the seasons: an overview. *International Journal on Climatology*, 22, 1715–1725.
- 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 im Rahmen des F+E-Vorhabens 204 41 138 "Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland".
- Streitfert, A., Grünhage, L. & Jäger, H.-J. (2005): Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen. <www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb08/biologie/pflanzenoek/forschung/Foeinr/UKL/pdf-files/Berichtsstand_2005.pdf>
- UBA (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsprogramm WETTREG. Hintergrundpapier "Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen", Dessau, Januar 2007.
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P. et al. (2002): Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389–395.
- WMO (2007): Press Release No. 805. Bali/Geneva, 13 December.
<www.wmo.ch/pages/mediacentre/press_releases/pr_805_en.html>
- WMO (2008): WMO statement on the status of the global climate in 2007. WMO-No. 1031. Geneva, Switzerland. <www.wmo.int/pages/publications/meteoworld/documents/1031_en.pdf>

Anhang

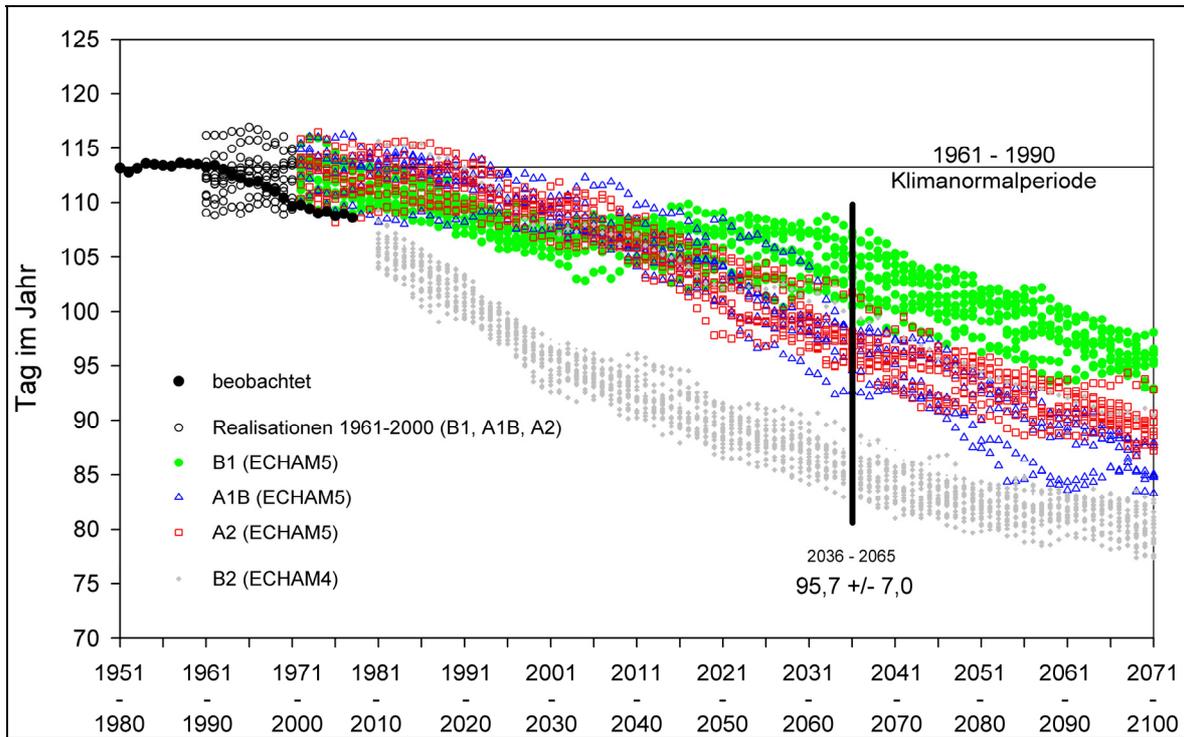
BIRNE



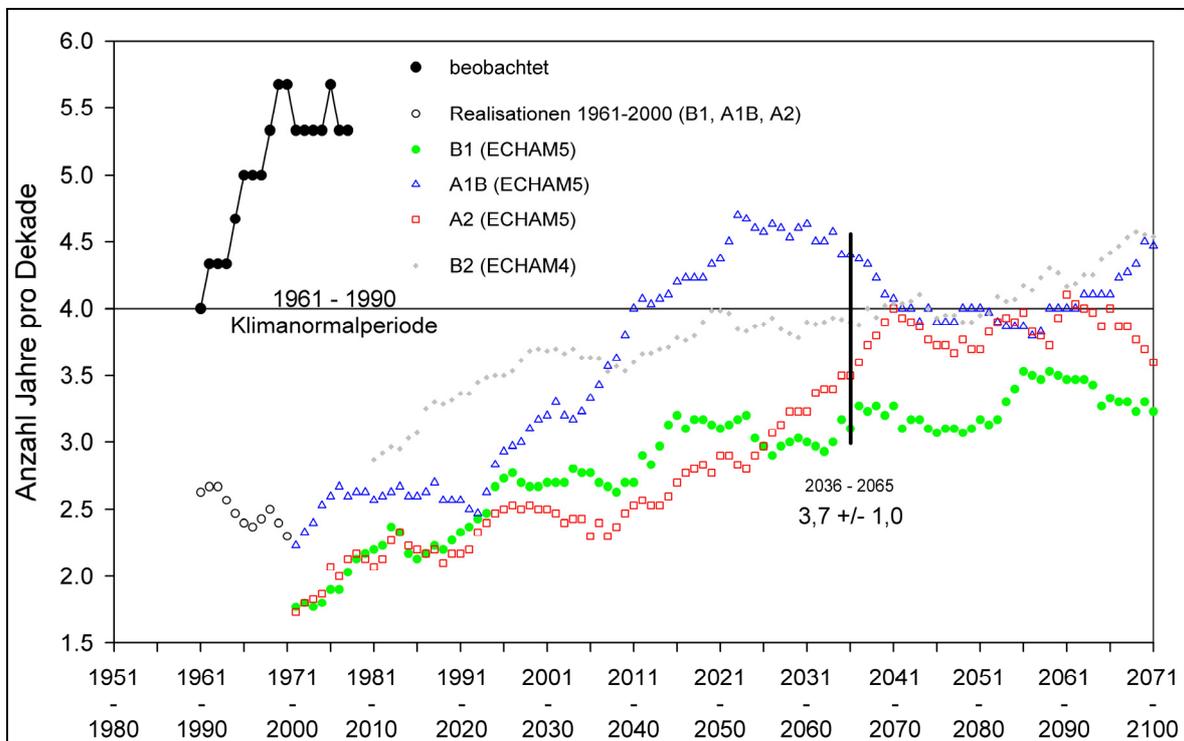
Gleitende 30jährige Mittel des Blühbeginns der Birne im Marburg-Gießener-Lahnthal



Gleitende 30jährige Mittel der Spätfröste zur Zeit der Birnenblüte
im Marburg-Gießener-Lahnthal
(Szenarien: dargestellt sind die Mittelwerte der jeweiligen Realisationen)

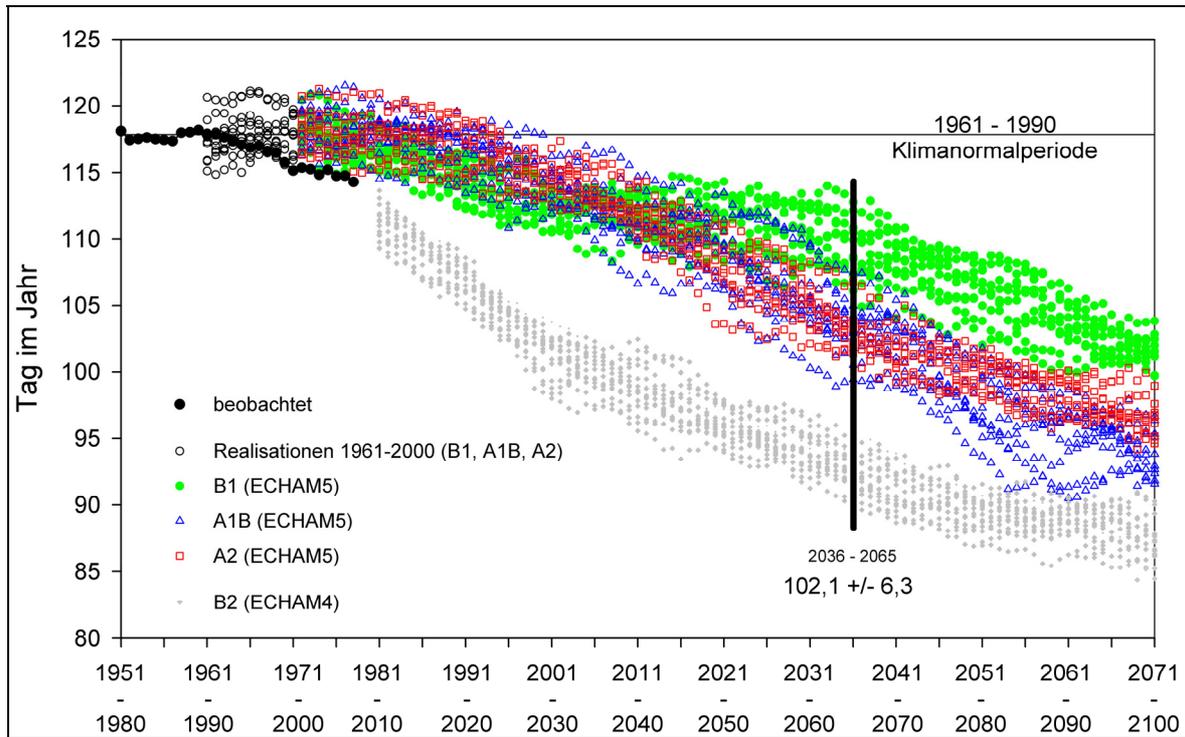


Gleitende 30jährige Mittel des Blühbeginns der Süßkirsche im Marburg-Gießener-Lahntal

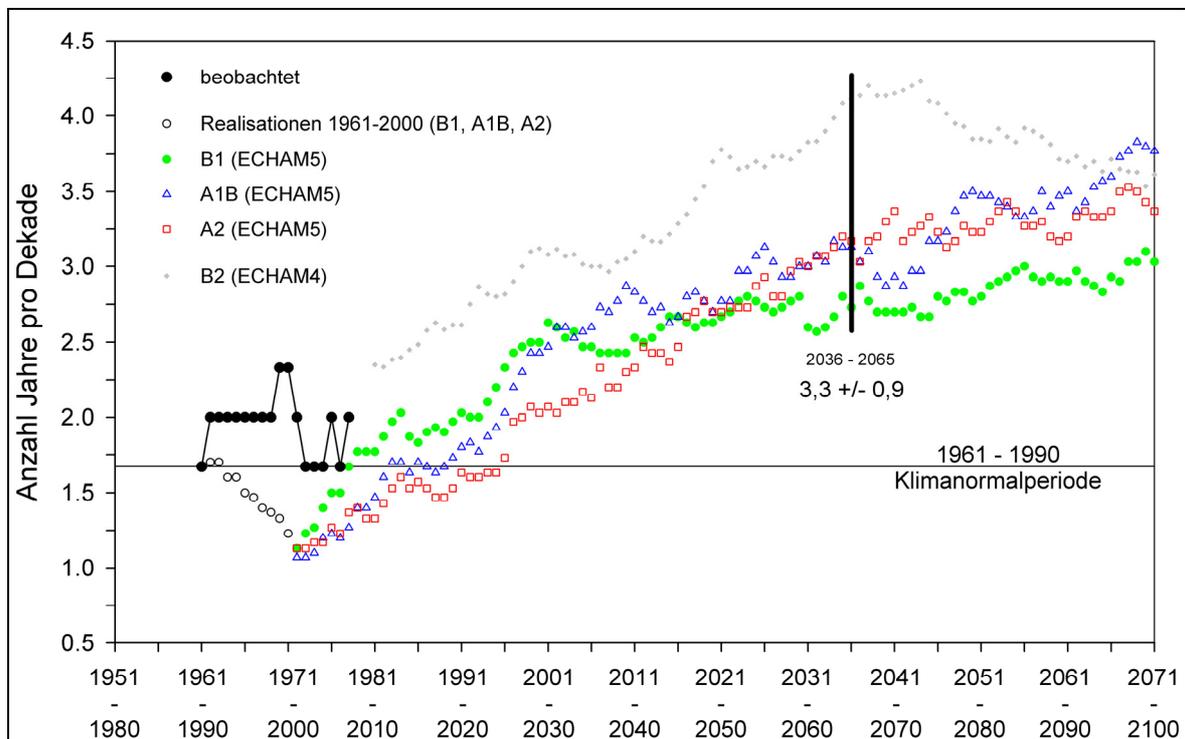


Gleitende 30jährige Mittel der Spätfröste zur Zeit der Blüte der Süßkirsche im Marburg-Gießener-Lahntal

(Szenarien: dargestellt sind die Mittelwerte der jeweiligen Realisationen)



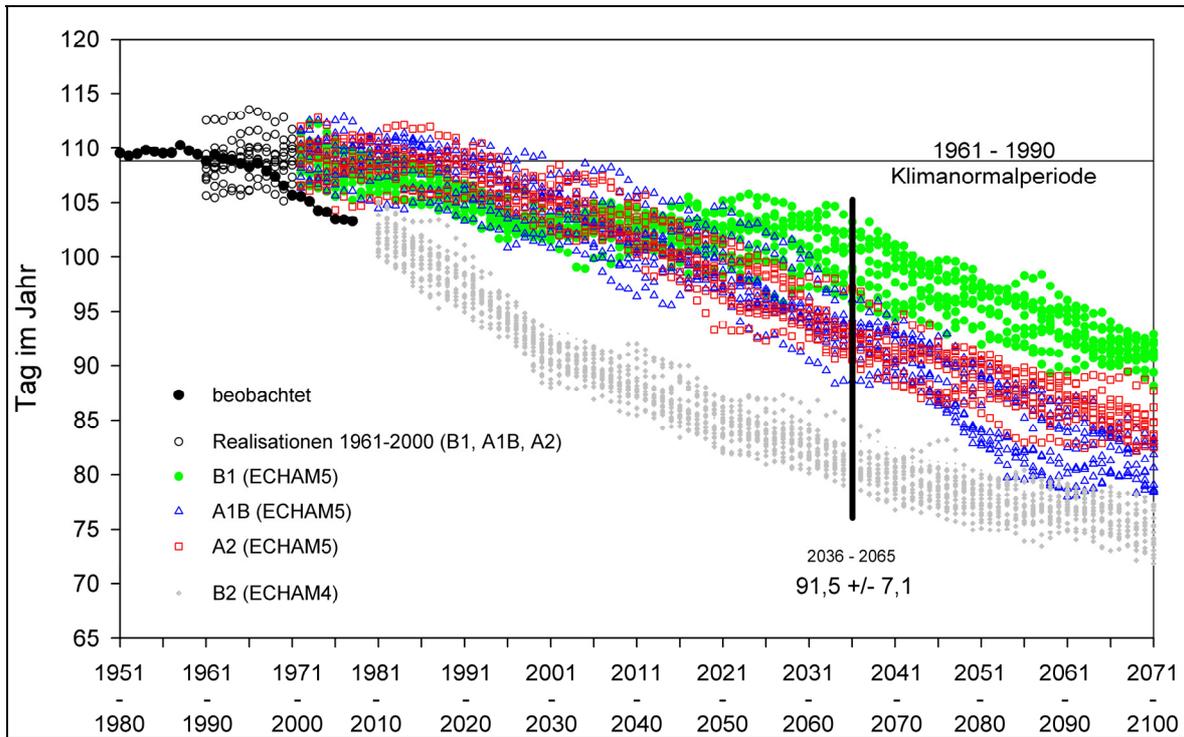
Gleitende 30jährige Mittel des Blühbeginns der Sauerkirsche im Marburg-Gießener-Lahntal



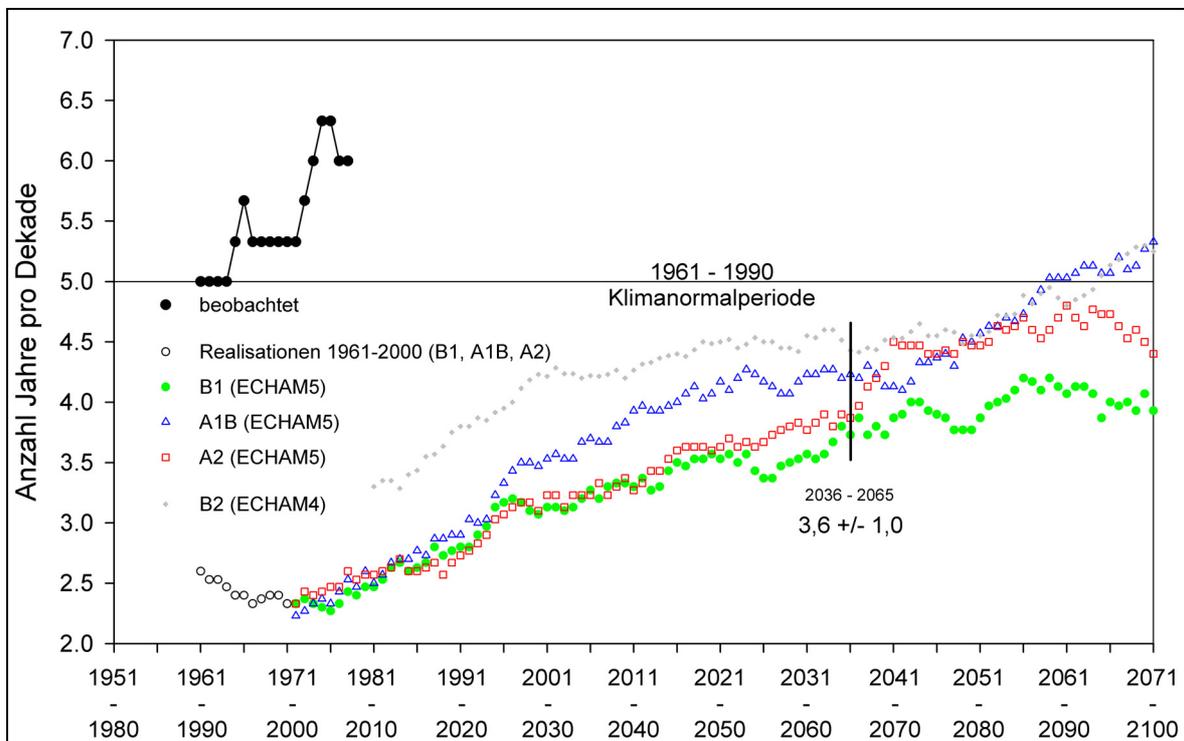
Gleitende 30jährige Mittel der Spätfröste zur Zeit der Blüte der Sauerkirsche im Marburg-Gießener-Lahntal

(Szenarien: dargestellt sind die Mittelwerte der jeweiligen Realisationen)

ROTE JOHANNISBEERE



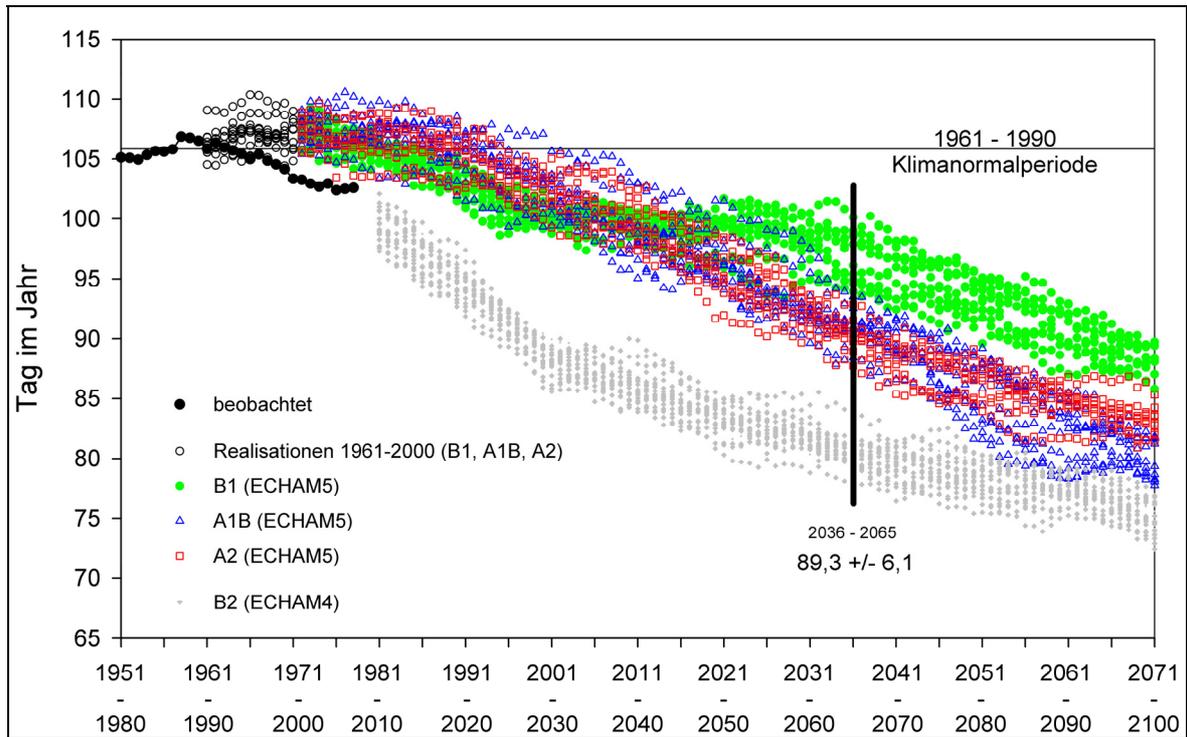
Gleitende 30jährige Mittel des Blühbeginns der Roten Johannisbeere im Marburg-Gießener-Lahntal



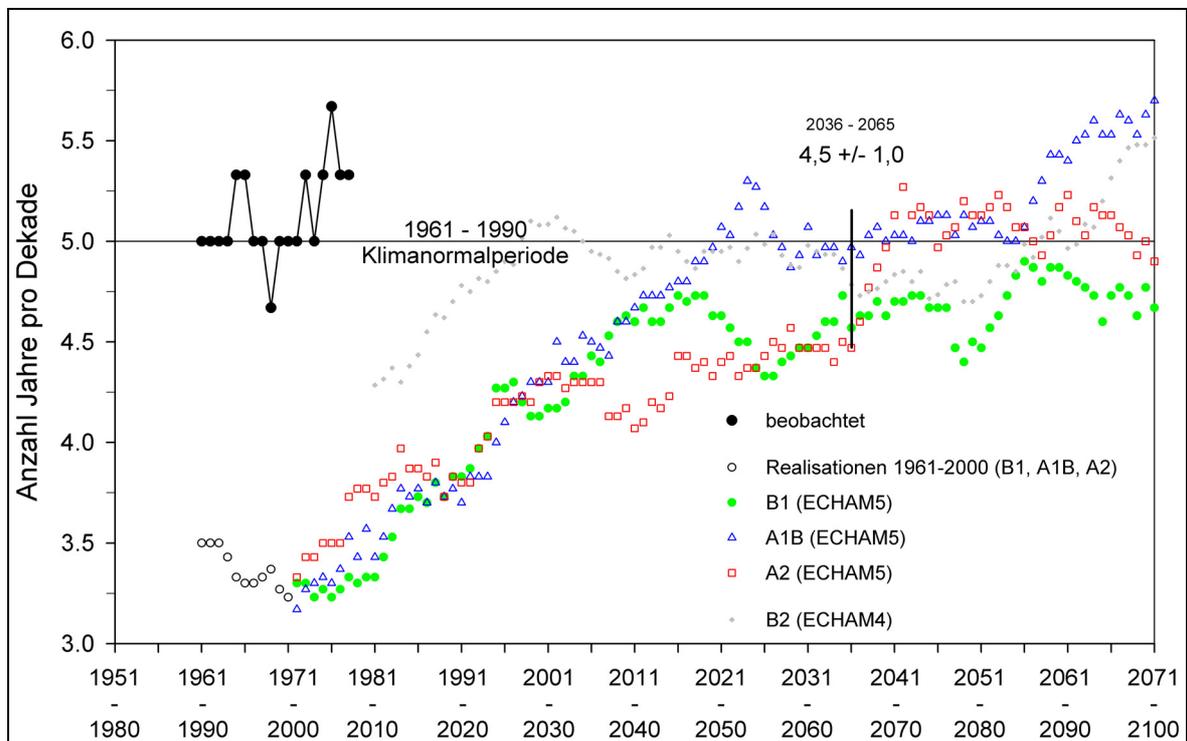
Gleitende 30jährige Mittel der Spätfröste zur Zeit der Blüte der Roten Johannisbeere im Marburg-Gießener-Lahntal

(Szenarien: dargestellt sind die Mittelwerte der jeweiligen Realisationen)

STACHELBEERE



Gleitende 30jährige Mittel des Blühbeginns der Stachelbeere im Marburg-Gießener-Lahntal



Gleitende 30jährige Mittel der Spätfröste zur Zeit der Blüte der Stachelbeere im Marburg-Gießener-Lahntal

(Szenarien: dargestellt sind die Mittelwerte der jeweiligen Realisationen)