

Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen

Anita Streitfert, Ludger Grünhage & Hans-Jürgen Jäger
Institut für Pflanzenökologie, Heinrich-Buff-Ring 26-32, 35392 Gießen



Stand August 2005

| Gliederung | Seite |
|---|--------------|
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 "Phänologie" | 2 |
| 1.2 Geschichte der Phänologie | 2 |
| 1.3 Phänologische Zeigerpflanzen | 4 |
| 1.4 Systematik der naturräumlichen Gliederung | 4 |
| 2 Zielsetzung | 5 |
| 3 Daten und Methoden | 6 |
| 3.1 Erfassung der phänologischen Daten | 6 |
| 3.2 Auswahl und Auswertung der phänologischen Daten | 7 |
| 3.3 Erstellung der phänologischen Uhren | 11 |
| 3.4 Abschätzung des Eintritts der Phänophasen in der Dekade 2041-2050 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) | 11 |
| 4 Ergebnisse | 12 |
| 4.1 Entwicklung phänologischer Phasen der Zeigerpflanzen in Hessen | 12 |
| 4.1.1 Beginn des Vorfrühlings | 12 |
| 4.1.2 Beginn des Erstfrühlings | 14 |
| 4.1.3 Beginn des Vollfrühlings | 15 |
| 4.1.4 Beginn des Frühsommers | 17 |
| 4.1.5 Beginn des Hochsommers | 18 |
| 4.1.6 Beginn des Spätsommers | 19 |
| 4.1.7 Beginn des Frühherbstes | 21 |
| 4.1.8 Beginn des Vollherbstes | 22 |
| 4.1.9 Beginn des Spätherbstes | 23 |
| 4.1.10 Beginn der Vegetationsruhe | 25 |
| 4.2 Phänologische Uhr | 26 |
| 4.2.1 Hessen | 27 |
| 4.2.2 Haupteinheitengruppe 14 – Hessisch-Fränkisches Bergland | 29 |
| 4.2.3 Haupteinheitengruppe 22 – Nördliches Oberrheintiefland | 30 |
| 4.2.4 Haupteinheitengruppe 23 – Rhein-Main-Tiefland | 32 |
| 4.2.5 Haupteinheitengruppe 30 – Taunus | 33 |
| 4.2.6 Haupteinheitengruppe 31 – Gießen-Koblenzer-Lahntal | 34 |
| 4.2.7 Haupteinheitengruppe 32 – Westerwald | 35 |
| 4.2.8 Haupteinheitengruppe 33 – Bergisch-Sauerländisches-Gebirge | 37 |
| 4.2.9 Haupteinheitengruppe 34 – Westhessisches Berg- und Senkenland | 38 |
| 4.2.10 Haupteinheitengruppe 35 – Osthessisches Bergland | 39 |
| 4.2.11 Haupteinheitengruppe 36 – Oberes Weserbergland | 40 |
| 4.2.12 Haupteinheitengruppe 48 – Thüringer Becken mit Randplatten | 42 |
| 4.3 Veränderung des Klimas am Beispiel Gießen | 43 |
| 4.4 Abschätzung des zukünftigen Beginns der Phänophasen am Beispiel des Naturraums 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) | 47 |
| 4.4.1 Modellentwicklung | 47 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.4.2 | Entwicklung des Vegetationsverlaufs in der Dekade 2041-2050 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) | 53 |
| 4.5 | Abschätzung der Spätfrostgefahr für ausgewählte Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) | 54 |
| 5 | Zusammenfassende Bewertung | 57 |
| | Literatur | 62 |
| | Quellen im Internet | 63 |
| | Anhang: Inhalt des beiliegenden Datenträgers | 64 |

1 Einleitung

Das Klima hat sich in den vergangenen Jahrzehnten verändert. Der Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) zeigt in seinem Bericht zur Klimaänderung, dass die durchschnittliche globale Temperatur an der Erdoberfläche im Verlaufe des 20. Jahrhunderts um 0,6 °C angestiegen ist (vgl. IPCC 2001). Die Erwärmung erfolgte dabei vor allem in zwei Zeiträumen, von 1910 bis 1945 und von 1976 bis 2000. Die beobachtete Klimaänderung ist auf natürliche Ursachen wie Vulkanismus oder die Änderung der solaren Strahlungsflussdichte sowie auf den Einfluss des Menschen zurückzuführen. Die Temperaturerhöhung in den letzten 50 Jahren ist überwiegend die Folge des Anstiegs anthropogener Treibhausgase. Der IPCC erwartet bis 2100 einen Anstieg der mittleren globalen Temperatur um 1,4 °C bis 5,8 °C (vgl. IPCC 2001).

Der Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert ist in Deutschland mit 0,9 °C gegenüber dem globalen Mittel sehr groß. Das Jahr 2000 war in Deutschland das wärmste seit Beginn der Messungen im Jahr 1761 und in den Jahren 2001 und 2002 sind die dritt- bzw. zweithöchsten Werte bis zu diesem Zeitpunkt erreicht worden (Klimastatement der DMG, ÖGM und SGM 2003). Die weltweiten Klimaänderungen dauern also weiter an. Nach Angaben des DWD war 2003 bedingt durch eine quasi-stationäre Hochdruckwetterlage über Mitteleuropa ein Rekordsommer mit extrem hohen Temperaturen, überdurchschnittlicher Sonnenscheindauer und einem erheblichen Niederschlagsdefizit: Die Sommertemperatur lag in Deutschland um 3,4 °C über der klimatologischen Referenzperiode von 1961-1990 (DWD 2003).

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 zum Teil jetzt schon sichtbaren Konsequenzen werden sich verstärken. 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. In den nördlichen Breiten Europas sollen die Niederschläge zunehmen, während der Süden immer trockener werden soll. Die Eis- und Schneebedeckung in der Nordhemisphäre soll weiter abnehmen und zum Anstieg des Meeresspiegels beitragen (IPCC 2001).

Die durch den Temperaturanstieg verursachten klimatischen Schwankungen beeinflussen die Entwicklung und das Verhalten von Pflanzen und Tieren. Es gibt bereits Hinweise auf eine Verschiebung der Vegetationsperiode und der periodischen Wanderung von Zugvögeln (Menzel & Fabian 1999, Ahas 1999). Dies könnte zu Schädigungen oder der Zerstörung der empfindlichen und miteinander vernetzten Lebensgemeinschaften in Ökosystemen führen.

Das Klima ist einer der wichtigsten Umweltfaktoren für die Entwicklung der Pflanzen, denn diese reagieren auf die Gesamtheit der Witterungserscheinungen (Schnelle 1955). In unseren Breiten wird die Pflanzenentwicklung maßgeblich durch den Temperaturverlauf bestimmt. Phänologische Beobachtungen sind daher gute Indikatoren zur Untersuchung der Auswirkungen von Klimaänderungen in der Biosphäre.

Mit Hilfe der phänologischen Daten kann der Ablauf der jährlichen Pflanzenentwicklung, welche die natürliche Vegetationsperiode beschreibt, definiert und der Wachstumsrhythmus von Pflanzen festgehalten werden.

1.1 "Phänologie"

Das Wort "Phänologie" ist von den griechischen Worten "phainesthai – erscheinen" und "logos - Lehre, Wissenschaft" abgeleitet und bedeutet "Lehre von den Erscheinungen". Die Phänologie befasst sich mit den verschiedenen im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen bei Pflanzen und Tieren (vgl. Schnelle 1955). Bei Pflanzen sind diese Wachstumserscheinungen wie Blattentfaltung, Blüte, Fruchtreife, Laubverfärbung und Blattfall definierte Entwicklungsvorgänge und werden auch als "Phänologische Phasen" bezeichnet.

Die Aufgabe der Phänologie ist aber nicht nur die reine Beobachtung auffälliger und leicht erkennbarer Entwicklungserscheinungen und die Datierung ihres Eintritts, sondern auch die Untersuchung der Abhängigkeit des periodischen Wachstumsablaufes von den Umweltbedingungen, besonders des Einflusses des Bodens und des Klimas.

Mit Hilfe der Phänologie kann man die natürliche Vegetationszeit einer Region definieren, den Ablauf der jährlichen Pflanzenentwicklung darstellen und den Wachstumsrhythmus erkennen.

1.2 Geschichte der Phänologie

Die längste bekannte phänologische Beobachtungsreihe stammt aus dem japanischen Kyoto und reicht bis ins Jahr 705 zurück. Sie beinhaltet die Eintrittsdaten der jährlichen Kirschblüte und wird am Kaiserlichen Hof in Japan archiviert (vgl. Menzel 2003). Die älteste phänologische Beobachtungsreihe in Europa ist der Rekord der Familie Marsham, welche über fünf Generationen von 1736-1947 die Phänologie von Pflanzen und Tieren in Norfolk, England notierte (vgl. Sparks & Carey 1995). Nach Schnelle (1955) wurde das erste phänologische Beobachtungsnetz 1750 von Karl von Linné, dem Begründer der Phänologie, in Schweden eingerichtet. Das aus 18 Stationen bestehende Netz 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. Er erließ 1853 eine "Instruction für Vegetationsbeobachtungen" mit jährlichen Meldeformularen an die meteorologischen Stationen. Seine Bemühungen scheiterten jedoch, da niemand außer ihm danach gearbeitet hatte (vgl. Schnelle 1955).

Hoffmann und Ihne gelang es ein Beobachtungsnetz zu schaffen, indem sie von 1883-1941 jährlich phänologisches Beobachtungsmaterial aus Europa sammelten und es für weitere Bearbeitungen zur Verfügung stellten (vgl. Schnelle 1955). In Deutschland wurden 1936 regional unterschiedliche Netze zum Phänologischen Reichsdienst vereinigt und unter der

Leitung des Reichswetterdienstes weitergeführt. Die Phänologie, seitdem maßgeblich von Fritz Schnelle beeinflusst, wurde 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).

Zu Beginn des zweiten Weltkrieges berichteten etwa 10000 Mitarbeiter über phänologische Beobachtungen. Nach dem zweiten Weltkrieg wurde der Deutsche Wetterdienst wieder aufgebaut, jedoch zunächst den verschiedenen Besatzungszonen angegliedert (vgl. Deutscher Wetterdienst 1991). Seit 1953 gehört das Aufgabengebiet der Phänologie in Westdeutschland zum Deutschen Wetterdienst (DWD). Im Gebiet der ehemaligen DDR wurde es unter die Leitung des Meteorologischen Dienstes (MD) gestellt. Er betrieb ein phänologisches Beobachtungsnetz mit ca. 800 Mitarbeitern, welches 1990 in den DWD eingegliedert wurde (vgl. Deutscher Wetterdienst 1991). In den 70er und 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts sank das Interesse an phänologischen Beobachtungen, die Phänologie führte ein Schattendasein. Bei der Zusammenlegung der beiden Netze im Jahr 1990 waren nur noch etwa 2600 Beobachter aktiv, heute sind es 1550. Informationen zum Phänologischen Netz sind im Internet unter <http://www.dwd.de>¹ zu finden. In den 90er Jahren stieg im Zusammenhang mit der Diskussion um die Erderwärmung das Interesse an der Phänologie wieder, da phänologische Eintrittsdaten sich hervorragend als Indikatoren für Klimaänderungen eignen.

So gründeten bereits 1957 Fritz Schnelle und Franz Volkert das Beobachtungsprogramm "Internationale Phänologische Gärten" (IPG) (vgl. Menzel 2003), um Klima- und Witterungseinflüsse auf das Wachstum von Pflanzen an unterschiedlichen Standorten über Landesgrenzen hinweg vergleichend zu beobachten. Dies ist möglich, da alle Pflanzen einer Art von einer Mutterpflanze abstammend vegetativ vermehrt wurden und damit erbgleich sind. Das internationale phänologische Beobachtungsnetz, welches zurzeit aus 58 phänologischen Gärten in 18 europäischen Ländern besteht, wird seit 1996 von der Humboldt-Universität Berlin betreut. Die berichteten Daten werden regelmäßig in der Zeitschrift "Arborea Phaenologica" veröffentlicht. Informationen zum IPG-Programm sind zu finden unter: <http://www.agrar.hu-berlin.de/pflanzenbau/agrarmet/ipg.html>.

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 (Bruns et al. 2003). Das GPM-Netz soll eine gewisse "backbone-Funktion" übernehmen und regionale Netze verbinden. Gleichzeitig dient es der Expansion phänologischer Beobachtungen, der internationalen Kooperation zwischen Phänologen und dem Austausch der Forschungsergebnisse über Datenbanken (Bruns et al. 2003). Darüber hinaus soll die globale Klimaänderung in Beziehung zu phänologischen Trends gesetzt werden. Eine weitere Aufgabe ist die Verstärkung der Öffentlichkeitsarbeit, um besonders Schüler und Studenten durch Bildungsangebote an die Wissenschaft der Phänologie heranzuführen. Das GPM-Netz besteht zur Zeit aus 18 Stationen in Europa, Asien und Nord Amerika. Zu Einzelheiten siehe: www.agrar.hu-berlin.de/pflanzenbau/agrarmet/gpm.html.

¹ <http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/nkdz/fachdatenbank/datenkollektive/phaenologie/index.htm>

Das Land Hessen hat mit Offenbach, Wiesbaden-Geisenheim und Linden 3 Stationen, welche im IPG-Programm aufgenommen sind (www.agrar.hu-berlin.de). 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. Bestimmte Pflanzenarten, deren Phasen den Beginn der "phänologischen Jahreszeiten" anzeigen, werden vom DWD als so genannte Zeigerpflanzen definiert. Sie sind in Tab. 1 aufgeführt. Die jeweils zuerst genannte Art wird zur Charakterisierung der zugehörigen "phänologischen Jahreszeit" bevorzugt, die zweite dient als Ersatz.

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 Stiel-Eiche | Blüte Blattentfaltung |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder | Blüte |
| Hochsommer | Sommer-Linde Rote Johannisbeere | Blüte Fruchtreife |
| Spätsommer | Frühapfel Eberesche | Pflückreife Pflückreife |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder | Fruchtreife |
| Vollherbst | Stiel-Eiche Roskastanie | Fruchtreife Fruchtreife |
| Spätherbst | Stiel-Eiche Roskastanie | Blattverfärbung Blattverfärbung |
| Vegetationsruhe | Winterweizen | Beginn des Auflaufens |

1.4 Systematik der naturräumlichen Gliederung

Die naturräumliche Gliederung ist die Einteilung der Landschaft in Raumeinheiten aufgrund von geologischen, ökologischen und klimatischen Merkmalen. Diese Faktoren wie Gesteinsaufbau, Untergrund, Bodentyp, Relief und Klima tragen zur heutigen Ausprägung der Landschaft bei.

Naturräumliche Einheiten sind individuelle Naturräume, die sich aufgrund von bestimmten Merkmalen von anderen benachbarten räumlichen Individuen unterscheiden. "Bei Naturräumen handelt es sich um Gebiete mit ähnlichem Landschaftscharakter, der durch definierte geographische, hydrologische und klimatologische Merkmale – wie z.B. die Höhenlage eines Gebietes, den Mittelwert der Lufttemperatur, die Jahressumme des

Niederschlags und die mittleren phänologischen Eintrittstermine beschrieben wird" (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).

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

| Ordnung | Naturräumliche Einheit | Beispiel | |
|--|---------------------------------|-------------------------------|--|
| 1. Ordnung (ohne Kennziffer) | Großregion | Mittelgebirge | |
| 2. Ordnung (erste Kennziffer) | Region | 3_{4...7} | Hessisches Bruchschollentafelland |
| 3. Ordnung (zweite Kennziffer) | Haupteinheitengruppe | 34 | Westhessisches Berg- und Senkenland |
| 4. Ordnung (dritte Kennziffer) | Haupteinheit = Naturraum | 348 | Marburg-Gießener Lahn-tal |
| 5. Ordnung | Untereinheit | 348.1 | Gießener Becken |
| 6. Ordnung | Teileinheit | 348.11 | Großen-Lindener Hügel-land |
| 7. Ordnung | Grundeinheit | Talau des Lückenbaches | |

2 Zielsetzung

Im Rahmen von INKLIM 2012 - Baustein II – sollen die phänologischen Zeitreihen aus Hessen ausgewertet und im Hinblick auf regionale Klimaänderungen beurteilt werden. In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob es in den vergangenen 40-50 Jahren zu zeitlichen Verschiebungen in der Pflanzenentwicklung gekommen ist und welche regionalen Unterschiede es dabei gibt. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Studie "Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4 OPYC3 Klima - Simulationslaufes, bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen" der Firma Meteo-Research (Enke 2003) genutzt, um mögliche zukünftige Verschiebungen phänologischer Stadien und die sich daraus ergebende Konsequenzen abschätzen zu können. Ferner wird der Einfluss moderat erhöhter CO₂-Konzentrationen (+20%) auf den Beginn von Phänophasen in der Vegetationsperiode 2005 im GiFACE-Experiment (siehe Jäger et al. 2003) untersucht. Da die Vegetationsperiode bis September andauert, erfolgt der Bericht über diese Untersuchungen erst Ende 2005.

3 Daten und Methoden

3.1 Erfassung der phänologischen Daten

Das phänologische Grundnetz des Deutschen Wetterdienstes umfasst zur Zeit ca. 1550 Stationen. Von dem im Programm enthaltenen Wildpflanzen, Forst- und Ziergehölzen, landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, Obstgehölzen und Weinreben werden insgesamt 167 phänologische Phasen beobachtet. Die Daten werden 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. Jeder Mitarbeiter erhält vom DWD eine "Anleitung für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes" (DWD 1991). Eine spezielle berufliche Vorraussetzung ist daher nicht erforderlich; die Beobachter sollten jedoch über gute Pflanzenkenntnisse verfügen. Das Beobachtungsgebiet soll im Allgemeinen beim Wohnort des Beobachters liegen und die Gemeindeflur dieses Ortes umfassen. Der Beobachter soll 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. Jeder Beobachter erhält vom DWD eine Kopie einer großmaßstäbigen Karte, in der er sein Beobachtungsgebiet markiert und den Wuchsort der beobachteten Pflanzen einträgt. Dadurch ist es möglich Daten an demselben Objekt auch bei wechselnden Beobachtern über einen langen Zeitraum zu erfassen und gegebenenfalls Sonderuntersuchungen zum Einfluss von Boden und Exposition auf die Entwicklung der Pflanze durchzuführen. Dem festgelegten Beobachtungsgebiet wird vom Netzverwalter des DWD eine "Stationskennzahl" zugewiesen. Der Beobachter notiert die Eintrittstermine der phänologischen Phasen und schickt sie am Ende der Vegetationsperiode in einem Meldebogen zur weiteren Bearbeitung an den DWD. Eine Ausnahme stellen die 400 Sofortmelder 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. 1). Die Auswahl erfolgte nach folgenden Kriterien²:

1. Stationen, die von 1961-2000 mindestens 7 Beobachtungsjahre pro Dekade aufweisen (n=97)
2. Stationen, in denen die 60er und 90er Jahre nahezu vollständig repräsentiert sind, d.h. in diesen Dekaden liegen mindestens fünf Beobachtungsjahre vor (n=22)
3. Stationen, die im Umkreis von 10 km liegen und sich durch ihre Beobachtungsjahre ergänzen (n=51)



Abb. 1: Lage der berücksichtigten phänologischen Beobachtungsstationen in Hessen

² Die genaue Begründung für die Auswahl der Stationen ist zu finden in:
<http://www.uni-giessen.de/~gf1034/Pflanzenphaenologie/Stationsauswahl.pdf>

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. 2.

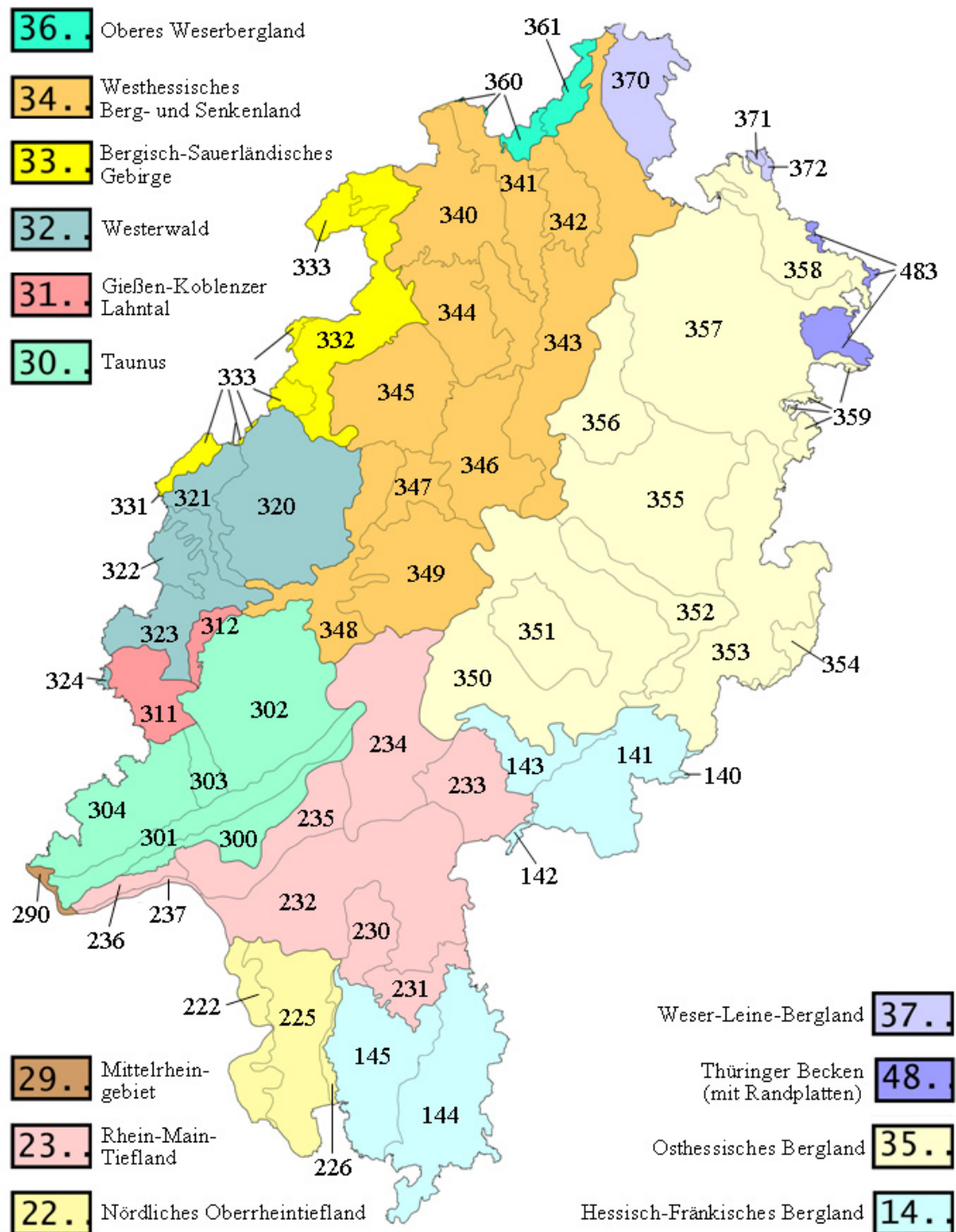


Abb. 2: Karte der naturräumlichen Gliederung Hessens³

³ 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.

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 (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 Datensatzes 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 10 untersuchten phänologischen Phasen einzeln erfolgte. Während dieses zweiten Auswahlverfahrens wurden jene der 170 Stationen aus der Auswertung genommen, bei denen in den 60er oder 90er Jahren oder in den 70er und in den 80er 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 1961-2000 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 erklärable 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 (Runge & Schönwiese 1986). Daher wurde der MANN-KENDALL-Trendtest durchgeführt⁴, ein geeignetes Verfahren zur Abschätzung der Signifikanz eines Trends, ohne dass eine Normalverteilung oder die Linearität des Trends vorausgesetzt wird (Rapp & Schönwiese 1996). Dieser Test bewertet daher nur ein relatives Ansteigen oder Abfallen der Werte über die Zeit (Rapp & Schönwiese 1996).

Mit Hilfe einer univariaten Varianzanalyse (STATGRAPHICS Plus) wurde die Signifikanz der Differenz der mittleren Eintrittsdaten der phänologischen Phasen von 1961-1990 und 1991-2000 berechnet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung befinden sich auf dem beiliegenden Datenträger (Arbeitsmappe "1 - Entwicklung phänologischer Phasen").

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 40 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 Tabellen im Abschnitt 4.2).

Von den im Beobachtungsprogramm des DWD aufgeführten 167 phänologischen Phasen wurden diejenigen 14 Arten, welche vom DWD als Zeigerpflanzen aufgeführt werden, mit insgesamt 17 Phasen ausgewertet (vgl. Tab. 1). Die Ergebnisse sind auf dem beiliegenden Datenträger dokumentiert (Arbeitsmappe "1 - Entwicklung phänologischer Phasen"). Für jede Indikatorphase wurde eine eigene Arbeitsmappe angelegt. Diese ist wie folgt aufgebaut: Jede Arbeitsmappe enthält ein zugehöriges Erläuterungsblatt, in welchem alle durchgeführten Korrekturen aufgeführt sind. Im Datenblatt "DWD-Daten" sind alle Eintrittsdaten enthalten, mit Ausnahme der Daten, welche vom DWD als "falsch, aber nicht korrigiert" indiziert wurden. Daten, die vom DWD als "zweifelhaft, aber nicht korrigiert" indiziert wurden und die

⁴ siehe: <http://www.mai.liu.se/~cllib/welcome/PMKtest.html>

als Ausreißer, d.h. Extremwerte, identifiziert werden konnten, fehlen im Datenblatt "Daten" und "kor. Daten". Das Datenblatt "Daten" enthält alle phänologischen Daten der 170 Stationen, sofern Beobachtungen vorliegen. Im Datenblatt "kor. Daten" sind zusätzlich die im zweiten Auswahlverfahren identifizierten Stationen mit lückenhaften Datenreihen entfernt worden. Die Berechnung der mittleren Eintrittsdaten der phänologischen Phasen erfolgte nach Haupteinheitengruppen (Naturraumgruppen) und basiert auf dem Arbeitsblatt "kor. Daten". Die Auswertung der Daten nach Naturräumen (Haupteinheiten) basiert hingegen auf dem Arbeitsblatt "Daten". Für ganz Hessen wurde sowohl eine Auswertung mit allen Stationen (Datenblatt "Daten") als auch eine mit den korrigierten Daten (Datenblatt "kor. Daten") durchgeführt. In jeder Arbeitsmappe wurde für ganz Hessen und jeden Naturraum ein Tabellenblatt erstellt, welches die mittleren Eintrittstage und den Trend der Phänophase für die Naturraumgruppe und die dazugehörigen Naturräume enthält. Zusätzlich wurde eine Zusammenfassung mit den mittleren Eintrittstagen, dem Trend und dessen Signifikanz für alle Haupteinheitengruppen und Haupteinheiten Hessens erstellt.

Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse für Hessen und für die Haupteinheitengruppen basieren auf der Auswertung der Datenblätter "kor. Daten". Die Ergebnisse für die einzelnen Naturräume befinden sich auf dem beiliegenden Datenträger (Arbeitsmappe "1 - Entwicklung phänologischer Phasen").

3.3 Erstellung der phänologischen Uhren

Für die Darstellung der phänologischen Uhren wurde durch Herrn Jochen Senkbeil das Programm PhänUhr mit der Programmiersprache Java entwickelt.

3.4 Abschätzung des Eintritts der Phänophasen in der Dekade 2041-2050 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Die Modellierung der Eintrittstermine der phänologischen Phasen für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) basiert auf den für die Dekade 2041-2050 abgeschätzten Temperaturen der Studie der Firma Meteo-Research (Enke 2003).

Für die Abschätzung des Beginns der Frühjahrs- und Sommerphasen werden im Allgemeinen Temperatursummenmodelle verwendet, da diese Phasen eine starke Abhängigkeit von der Lufttemperatur zeigen (Chmielewski et al. 2004a). 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 (Chmielewski et al. 2004a).

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

Zur Berechnung der pflanzenspezifischen Temperatursumme muss die optimale Temperaturschwelle bestimmt werden. Dazu wurde die Basistemperatur (Lufttemperatur) in 0,1 K-Schritten von 0 °C bis 10 °C variiert. Diesen niedrigen Temperaturen müssen die Pflanzen

ausgesetzt sein, bevor die Knospen die Dormanz überwinden (Chmielewski et al. 2004a). Für das Modell wurde die Basistemperatur verwendet, bei welcher der mittlere Fehler zwischen berechnetem und beobachtetem Eintrittstag (RMSE) am kleinsten war.

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

4 Ergebnisse

4.1 Entwicklung phänologischer Phasen der Zeigerpflanzen in Hessen

Im folgenden Ergebnisteil ist für jede Zeigerpflanze der Trend des mittleren Eintrittsdatums der Phänophase für ganz Hessen dargestellt. Die Berechnung erfolgte für den Zeitraum von 1961 bis 2000, da die Datenmenge in den 50er Jahren zu gering war. Zusätzlich ist der Beginn der phänologischen Phasen für jede Dekade aufgelistet. Die Ergebnisse für die einzelnen Naturraumgruppen und Naturräume sowie der Trend des Eintrittsdatums bezogen auf den Median sind auf dem beiliegenden Datenträger dokumentiert (Arbeitsmappe "1 - Entwicklung phänologischer Phasen").

4.1.1 Beginn des Vorfrühlings

Haselnuss (Blüte)

Der Blühbeginn der Haselnuss zeigt für ganz Hessen einen Trend zur Verfrühung um 0,55 Tage pro Jahr (Abb. 3).

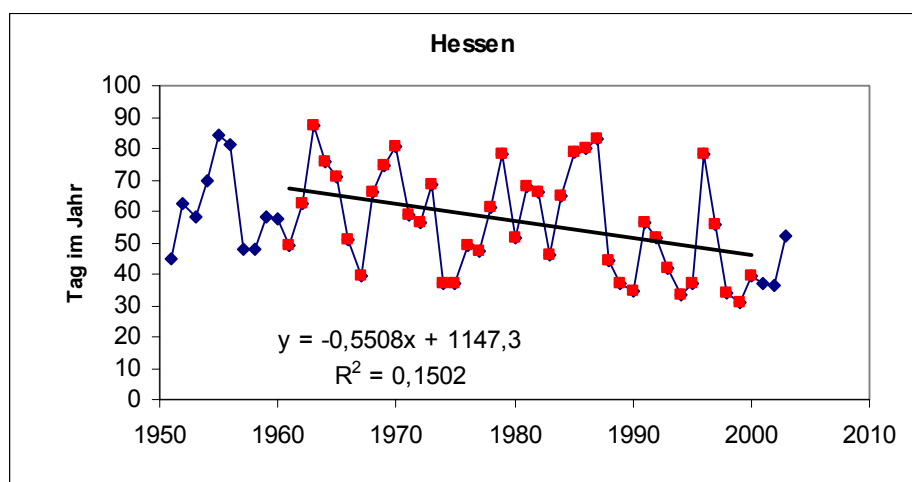


Abb. 3: Blühbeginn der Haselnuss in Hessen

Das mittlere Eintrittsdatum des Blühbeginns der Haselnuss hat sich im Zeitraum von 1991-2000 im Vergleich zu den früheren Jahrzehnten um etwa 14 Tage auf den 15.2. vorverlagert

(Tab. 4). Dabei verfrühte sich der Eintritt der Phase pro Dekade in den letzten 50 Jahren nicht kontinuierlich, sondern zeigte Schwankungen von etwa einer Woche auf.

Tab. 4: Mittlerer Blühbeginn der Haselnuss in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 61 |
| 1961-1970 | 66 |
| 1971-1980 | 54 |
| 1981-1990 | 60 |
| 1991-2000 | 46 |
| Trend: -5,5 Tage/10 Jahre | |

Schneeglöckchen (Blüte)

Beim Schneeglöckchen konnte eine Verfrüfung des Blühbeginnes im Zeitraum 1961-2000 im Mittel um 0,34 Tage pro Jahr beobachtet werden (Abb. 4).

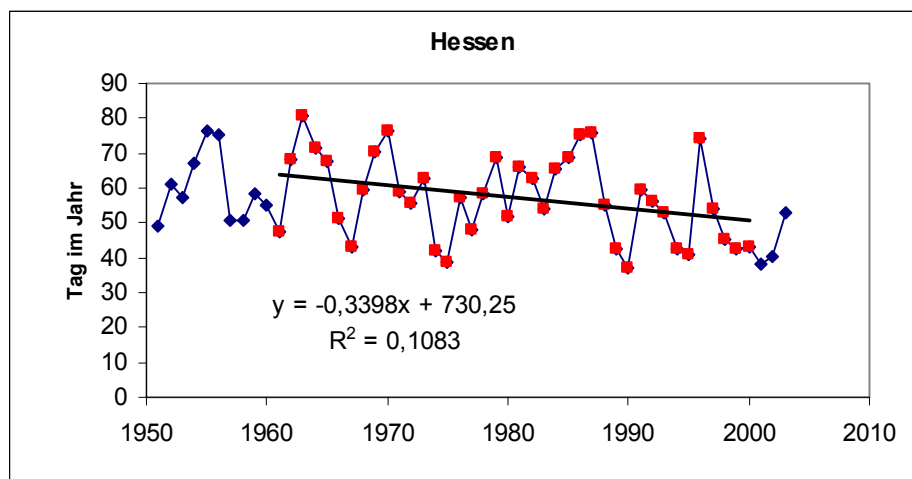


Abb. 4: Blühbeginn des Schneeglöckchens in Hessen

Folglich beträgt die Vorverlagerung pro Dekade 3,4 Tage. Die Schwankungen des mittleren Eintritts des Blühbeginns des Schneeglöckchens in den letzten 50 Jahren sind kleiner als die der Haselnuss.

Tab. 5: Mittlerer Blühbeginn des Schneeglöckchens in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 60 |
| 1961-1970 | 64 |
| 1971-1980 | 54 |
| 1981-1990 | 60 |
| 1991-2000 | 51 |
| Trend: -3,4 Tage/10 Jahre | |

Beide Phänophasen, welche den Beginn des Vorfrühlings charakterisieren, haben sich vorverlagert, die Haselnuss dabei stärker als das Schneeglöckchen.

4.1.2 Beginn des Erstfrühlings

Forsythie (Blüte)

Der Blühbeginn der Forsythie hat sich in der Periode 1961 bis 2000 ebenfalls verfrüht (Abb. 5).

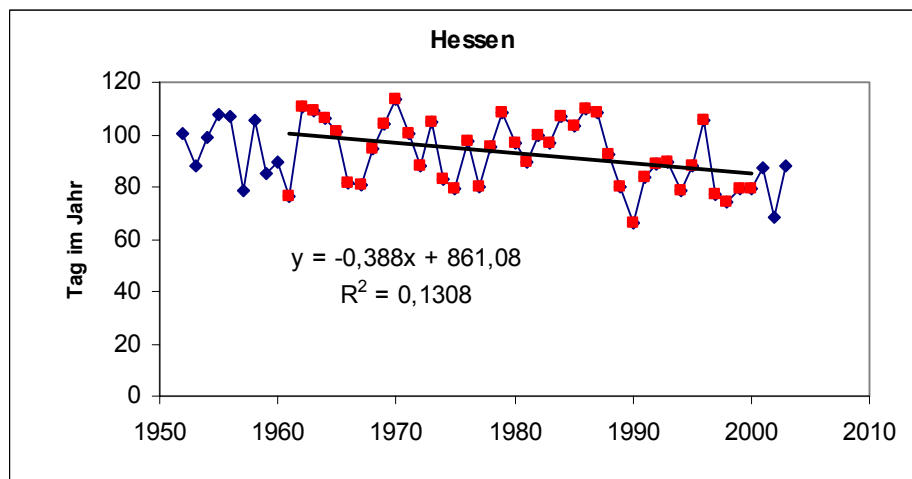


Abb. 5: Blühbeginn der Forsythie in Hessen

Der über diesen Zeitraum gemittelte Trend beträgt 3,9 Tage pro Dekade (Tab. 6). In ganz Hessen verlagerte sich der mittlere Blühbeginn vom 96. Tag im Jahr in der Periode 1951 bis 1960 auf den 84. Tag im Jahr in dem Zeitraum 1991 bis 2000 vor, wobei sich Verspätungen und Vorverlagerungen der Eintrittstage abwechselten.

Tab. 6: Mittlerer Blühbeginn der Forsythie in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 96 |
| 1961-1970 | 98 |
| 1971-1980 | 93 |
| 1981-1990 | 95 |
| 1991-2000 | 84 |
| Trend: -3,9 Tage/10 Jahre | |

Stachelbeere (Blattentfaltung)

Abbildung 6 zeigt, dass sich der Beginn der Blattentfaltung der Stachelbeere im Verlauf der letzten 50 Jahre verfrüht hat. Der über den Zeitraum 1961 bis 2000 gebildete Trend beträgt 0,33 Tage/Jahr.

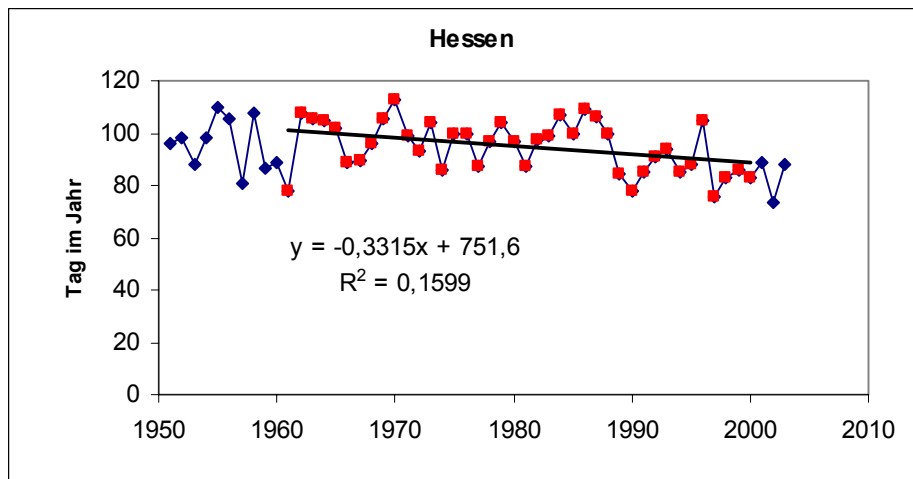


Abb. 6: Beginn der Blattentfaltung der Stachelbeere in Hessen

Die Verfrühung des Eintritts dieser Phänophase erfolgte jedoch erst in den letzten 10 Jahren: Während in dem Zeitraum 1951 bis 1990 keine deutlichen Verschiebungen im Beginn der Phase beobachtet werden konnten, zeigte sich in der Dekade 1991 bis 2000 im Vergleich zur Dekade 1981 bis 1990 eine Verfrühung um 10 Tage (Tab. 7).

Tab. 7: Mittlerer Beginn der Blattentfaltung der Stachelbeere in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 96 |
| 1961-1970 | 99 |
| 1971-1980 | 97 |
| 1981-1990 | 97 |
| 1991-2000 | 87 |
| Trend: -3,3 Tage/10 Jahre | |

Beide Zeigerpflanzen zeigen eine Vorverlagerung des Erstfrühlings im Mittel um 3-4 Tage/Dekade.

4.1.3 Beginn des Vollfrühlings

Apfel (Blüte)

Der mittlere Blühbeginn des Apfels zeigte mit 0,22 Tage/Jahr im Vergleich zu den vorherigen phänologischen Phasen einen geringeren Trend zur Verfrühung (Abb. 7).

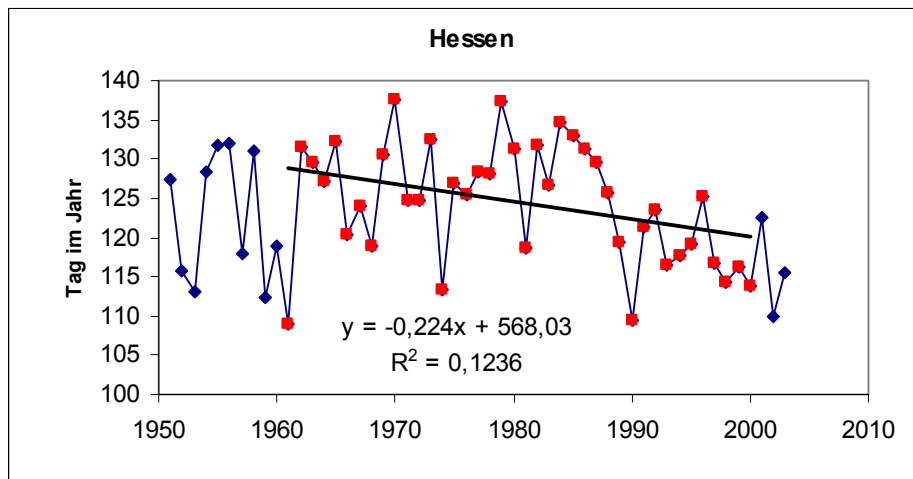


Abb. 7: Blühbeginn des Apfels in Hessen im Zeitraum

Im Verlauf der letzten 50 Jahre trat zunächst eine Verspätung des Phasenbeginns, im Mittel um 3-4 Tage, ein. Eine Vorverlagerung des Blühbeginns des Apfels erfolgte erst in den letzten 10 Jahren (Tab. 8).

Tab. 8: Mittlerer Blühbeginn des Apfels in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 123 |
| 1961-1970 | 126 |
| 1971-1980 | 127 |
| 1981-1990 | 126 |
| 1991-2000 | 118 |
| Trend: -2,2 Tage/10 Jahre | |

Stiel-Eiche (Blattentfaltung)

Die Blattentfaltung der Stiel-Eiche hat sich im Zeitraum 1951 bis 2000 geringfügig nach vor-

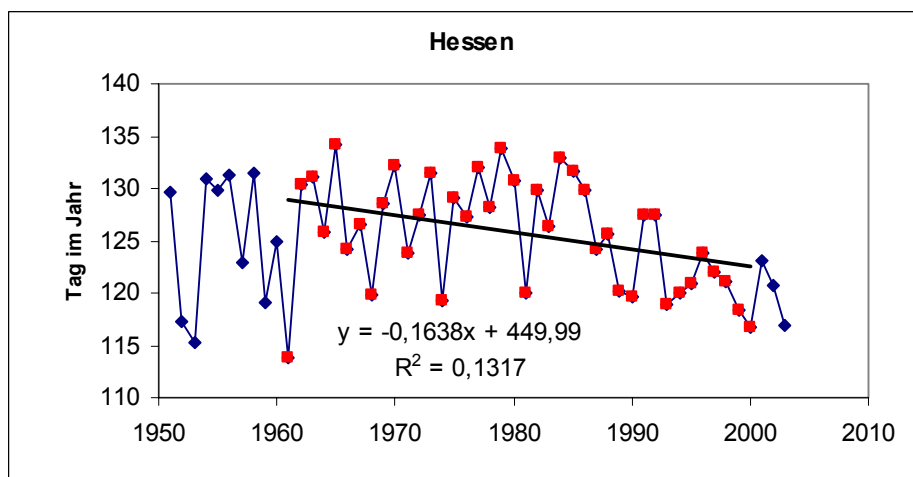


Abb. 8: Beginn der Blattentfaltung der Stiel-Eiche in Hessen

ne verschoben, wobei die Schwankungen im Verlauf der Zeit kleiner geworden sind (Abb. 8). Der Trend der Verfrüfung beträgt 1,6 Tage/Dekade. Das pro Dekade gemittelte Eintrittsdatum der Phase verspätete sich zunächst und trat seit den 80er Jahren früher ein. Im Vergleich zu 1951 bis 1960 hat sich der Beginn im Zeitraum 1991 bis 2000 lediglich um 3 Tage verschoben.

Tab. 9: Mittlerer Beginn der Blattentfaltung der Stiel-Eiche in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 125 |
| 1961-1970 | 127 |
| 1971-1980 | 128 |
| 1981-1990 | 126 |
| 1991-2000 | 122 |
| Trend: -1,6 Tage/10 Jahre | |

Die Verschiebung des Vollfrühlings wird von beiden Zeigerpflanzen gleichermaßen gezeigt.

4.1.4 Beginn des Frühsommers

Schwarzer Holunder (Blüte)

Der mittlere Blühbeginn des Schwarzen Holunders verfrühte sich in Hessen im Zeitraum 1961 bis 2000 um 0,31 Tage/Jahr. Dessen Vorverlagerung ist damit größer als die des Apfels und der Stiel-Eiche.

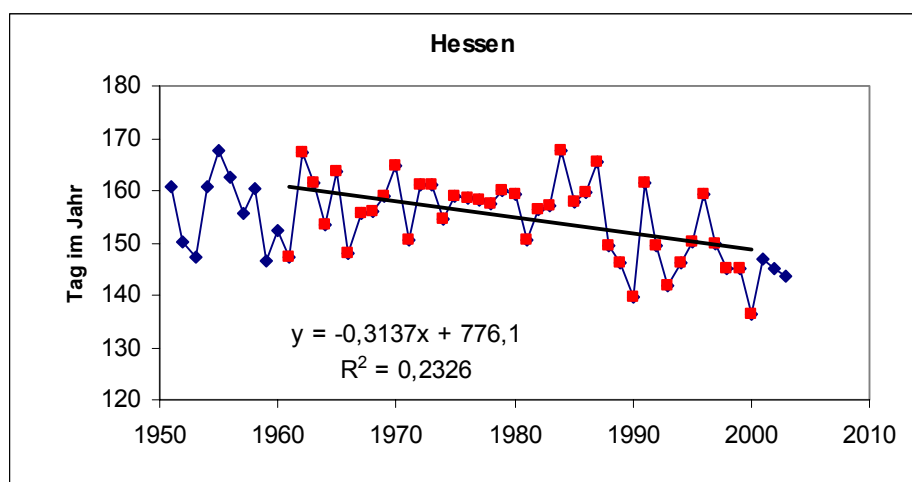


Abb. 9: Blühbeginn des Schwarzen Holunders in Hessen

Im Verlauf der letzten 50 Jahre hat sich der Blühbeginn um insgesamt 8 Tage verfrüht, wobei dieser erst ab den 80er Jahren einsetzte und damit dem Verlauf des Phaseneintritts von Apfel und Stiel-Eiche ähnelt (vgl. Tab. 8 - 10).

Tab. 10: Mittlerer Blühbeginn des Schwarzen Holunders in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 156 |
| 1961-1970 | 158 |
| 1971-1980 | 158 |
| 1981-1990 | 155 |
| 1991-2000 | 148 |
| Trend: -3,1 Tage/10 Jahre | |

4.1.5 Beginn des Hochsommers

Sommer-Linde (Blüte)

Der für Hessen über den Zeitraum 1961 bis 2000 gemittelte Trend des Blühbeginns der Sommer-Linde ist mit 0,28 Tagen/Jahr im Vergleich zum Schwarzen Holunder etwas schwächer (Abb. 10).

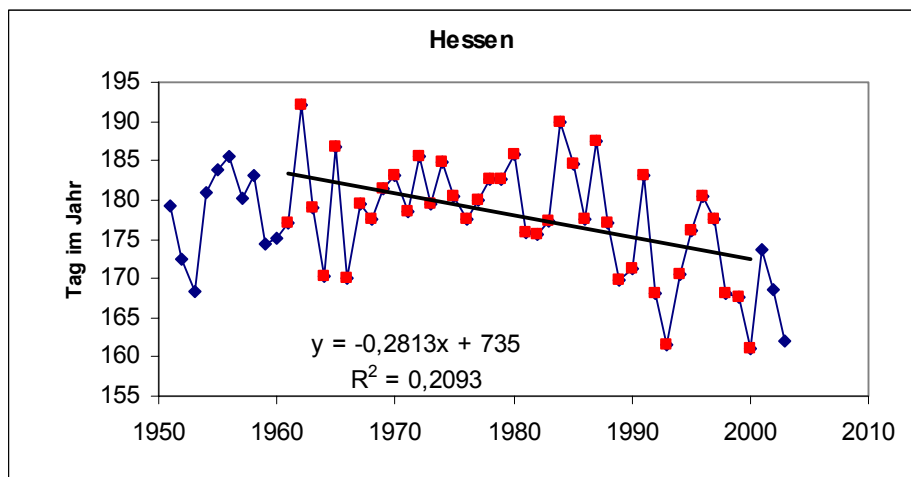


Abb. 10: Blühbeginn der Sommer-Linde im Zeitraum in Hessen

Wie bei den Zeigerpflanzen der vorangegangenen phänologischen Jahreszeiten war auch bei der Sommer-Linde in den 50er bis 80er Jahren eine geringe Verspätung des Phaseneintritts und ab den 80er Jahren eine stärkere Verfrühung zu beobachten (Tab. 11).

Tab. 11: Mittlerer Blühbeginns der Sommer-Linde in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 178 |
| 1961-1970 | 180 |
| 1971-1980 | 182 |
| 1981-1990 | 179 |
| 1991-2000 | 171 |
| Trend: -2,8 Tage/10 Jahre | |

Rote Johannisbeere (Fruchtreife)

Bei der Roten Johannisbeere ist im Hinblick auf den Beginn der Pflückreife in Hessen im Zeitraum 1951 bis 2000 eine leichte Verfrüfung eingetreten.

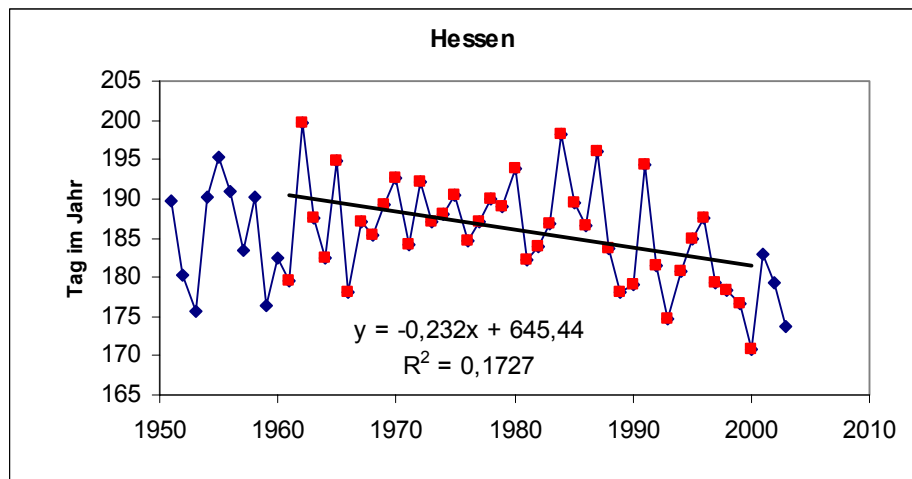


Abb. 11: Beginn der Fruchtreife der Roten Johannisbeere in Hessen

Der Trend der Vorverlagerung beträgt 2,3 Tage/Dekade. In der ersten Hälfte des untersuchten Zeitraums hat sich der Beginn der Phänophase nach hinten verschoben, in der zweiten Hälfte dagegen nach vorne, so dass über den gesamten Zeitraum gesehen nur eine 4-tägige Verfrüfung stattfand (Tab. 12).

Tab. 12: Mittlerer Beginn der Fruchtreife der Roten Johannisbeere in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 185 |
| 1961-1970 | 188 |
| 1971-1980 | 189 |
| 1981-1990 | 186 |
| 1991-2000 | 181 |
| Trend: -2,3 Tage/10 Jahre | |

Ein Vergleich der beiden Zeigerpflanzen (Sommer-Linde und Rote Johannisbeere) zeigt, dass sich beide Phänophasen um gut 2 Tage pro Dekade verfrüht haben. Das Ausmaß der Verschiebung des Hochsommers wird folglich einheitlich beschrieben.

4.1.6 Beginn des Spätsommers

Frühapfel (Pflückreife)

Der Beginn der Pflückreife des Frühapfels hat sich in Hessen im Zeitraum von 1951-2003 im Gegensatz zu den anderen Phänophasen nicht merklich verschoben (Abb. 12).

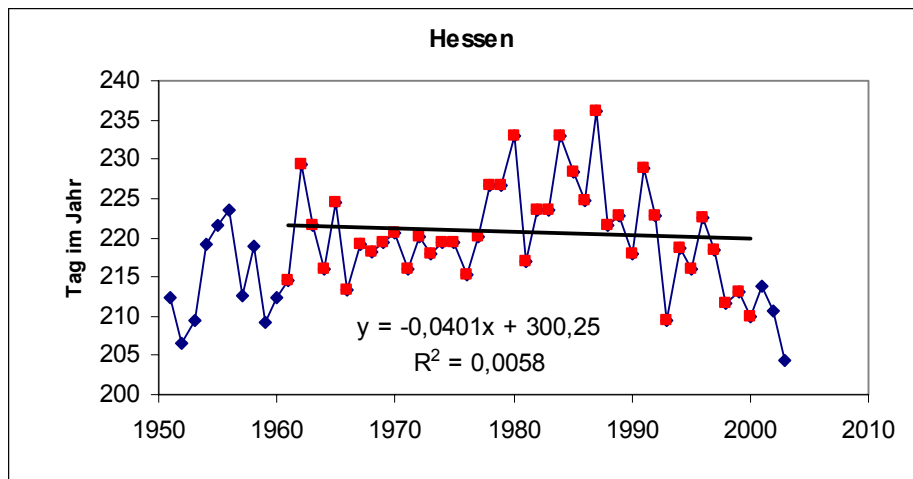


Abb. 12: Beginn der Pflückreife des Frühapfels in Hessen

Es ist lediglich ein sehr leichter Trend zur Verfrüfung erkennbar (0,4 Tage/Dekade). Die gemittelten Eintrittstage pro Dekade zeigen von den 50er bis zu den 90er Jahren eine kontinuierliche Verspätung des Phaseneintritts. Eine Verfrüfung dessen konnte erst seit den 90er Jahren beobachtet werden (Tab. 13).

Tab. 13: Mittlerer Beginn der Pflückreife des Frühapfels in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 215 |
| 1961-1970 | 220 |
| 1971-1980 | 221 |
| 1981-1990 | 225 |
| 1991-2000 | 217 |
| Trend: -0,4 Tage/10 Jahre | |

Eberesche (Pflückreife)

Betrachtet man den Verlauf des Beginns der Pflückreife der Eberesche in Hessen (Abb. 13),

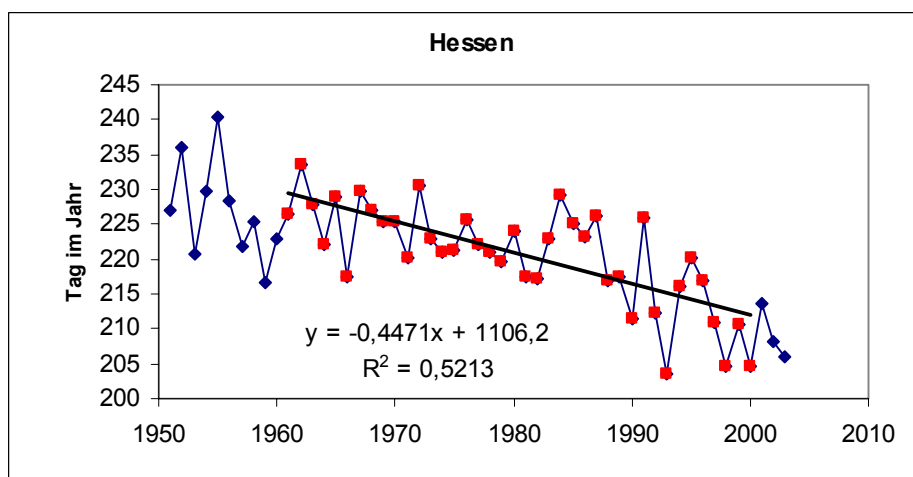


Abb. 13: Beginn der Pflückreife der Eberesche in Hessen

so stellt man fest, dass diese Phase im Zeitraum von 1951-2003 kontinuierlich früher eingetreten ist. Der Trend dieser Verfrüfung liegt bei 4,5 Tage/10 Jahre (Tab. 14). Der mittlere Eintritt der Phänophase pro Dekade hat sich über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg um beinahe 2 Wochen nach vorne verlagert.

Tab. 14: Mittlerer Beginn der Pflückreife der Eberesche in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 227 |
| 1961-1970 | 226 |
| 1971-1980 | 223 |
| 1981-1990 | 221 |
| 1991-2000 | 213 |
| Trend: -4,5 Tage/10 Jahre | |

Die Zeigerpflanzen für den Beginn des Spätherbstes zeigen beide einen negativen Trend, dieser liegt jedoch mit einer Differenz von 4 Tagen pro Dekade sehr weit auseinander.

4.1.7 Beginn des Frühherbstes

Schwarzer Holunder (Fruchtreife)

In Hessen hat sich der Beginn der Fruchtreife des Schwarzen Holunders in den letzten 50 Jahren um 0,28 Tage/Jahr verfrüht (Abb. 14).

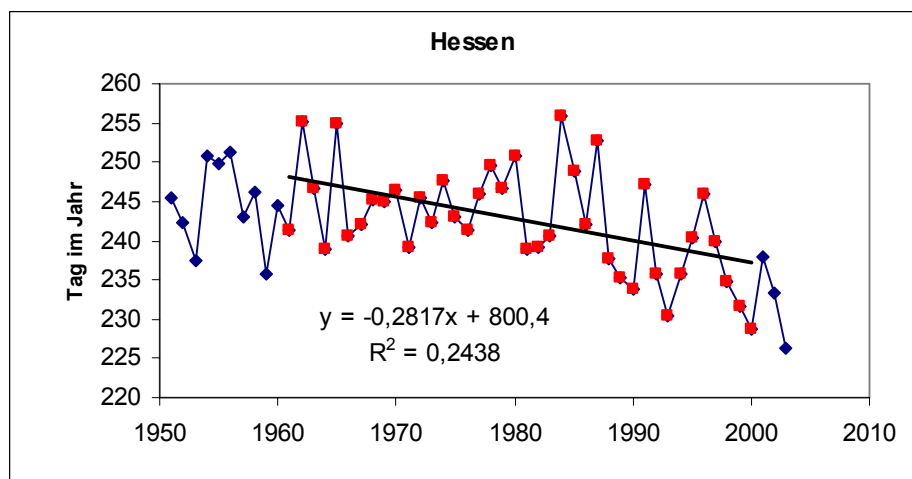


Abb. 14: Beginn der Fruchtreife des Schwarzen Holunders in Hessen

Der Eintrittstermin hat sich vom 245. Tag im Zeitraum 1951-1960 auf den 237. Tag in der Dekade 1991-2000 verschoben (Tab 15). Eine deutliche Verfrüfung setzte erst ab den 80er Jahren ein.

Tab. 15: Mittlerer Beginn der Frucht-
reife des Schwarzen Holun-
ders in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 245 |
| 1961-1970 | 246 |
| 1971-1980 | 245 |
| 1981-1990 | 242 |
| 1991-2000 | 237 |
| Trend: -2,8 Tage/10 Jahre | |

4.1.8 Beginn des Vollherbstes

Stiel-Eiche (Fruchtreife)

Der Trend des mittleren Beginns der Fruchtreife der Stiel-Eiche im Zeitraum von 1961-2000 ist im Vergleich zu dem des Schwarzen Holunders kleiner (Abb. 15). Er betrug lediglich 1,8 Tage/Dekade (Tab. 16).

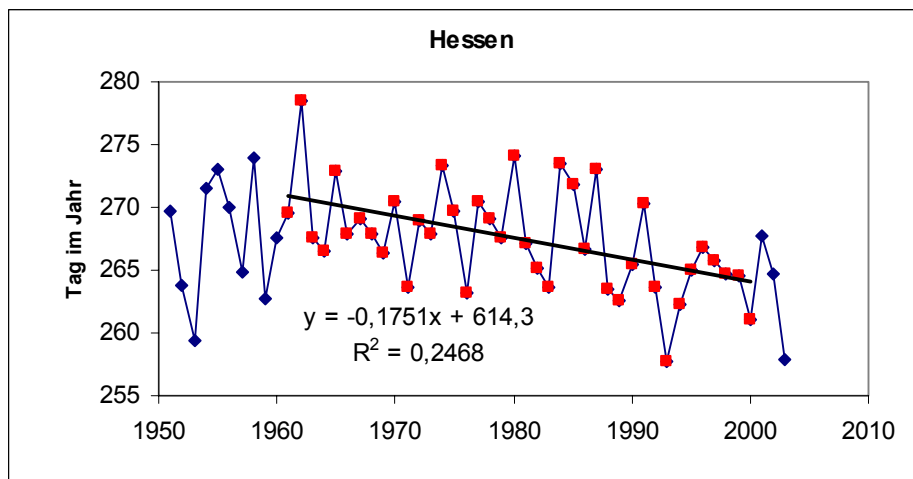


Abb. 15: Beginn der Fruchtreife der Stiel-Eiche in Hessen

Der Eintrittstermin der Fruchtreife zeigte über den gesamten Beobachtungszeitraum einen früheren Eintritt, wobei die mittleren Werte des Phasenbeginns in den ersten 3 Dekaden schwankten (Tab. 16).

Tab. 16: Mittlerer Beginn der Frucht-
reife der Stiel-Eiche in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 268 |
| 1961-1970 | 270 |
| 1971-1980 | 269 |
| 1981-1990 | 267 |
| 1991-2000 | 264 |
| Trend: -1,8 Tage/10 Jahre | |

Roskastanie (Fruchtreife)

Der Trend des mittleren Beginns der Fruchtreife der Roskastanie hat sich im Zeitraum von 1951-2003 ähnlich dem Beginn der Fruchtreife des Frühapfels nicht nennenswert verschoben (Abb. 16).

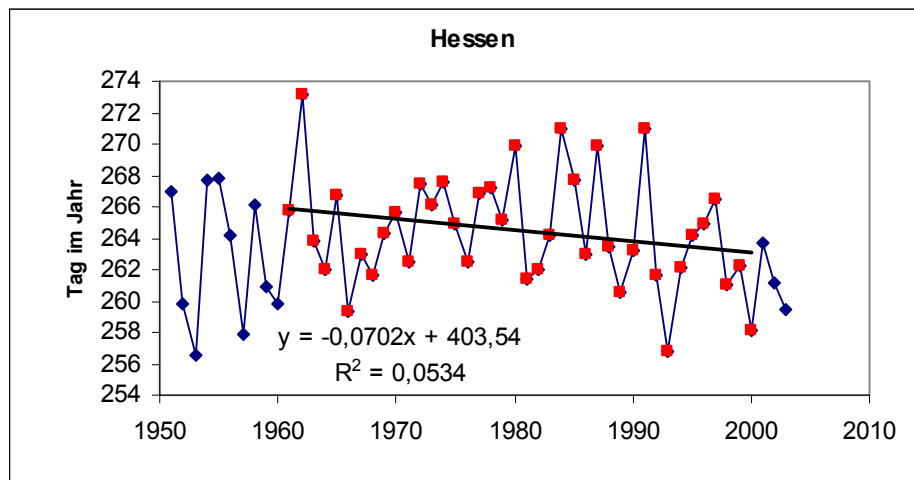


Abb. 16: Beginn der Fruchtreife der Roskastanie in Hessen

Der mittlere Eintrittstermin in der Dekade 1991 bis 2000 war mit dem der Dekade 1951 bis 1960 identisch (Tab. 17).

Tab. 17: Mittlerer Beginn der Fruchtreife der Roskastanie in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 263 |
| 1961-1970 | 265 |
| 1971-1980 | 266 |
| 1981-1990 | 265 |
| 1991-2000 | 263 |
| Trend: -0,7 Tage/10 Jahre | |

Die Zeigerpflanzen (Stiel-Eiche und Roskastanie) beschreiben beide eine Verschiebung im Beginn des Vollherbstes im Mittel um 1-2 Tage.

4.1.9 Beginn des Spätherbstes

Stiel-Eiche (Blattverfärbung)

Der zeitliche Verlauf des Eintritts der Blattverfärbung der Stiel-Eiche zeigte eine Besonderheit und unterscheidet sich daher von allen übrigen phänologischen Phasen. Die Verschiebung dieser Phase war in Hessen im Zeitraum von 1961 bis 2000 nur minimal, zeigte aber mit 0,5 Tagen/Dekade eine Tendenz zur Verspätung (Abb. 17).

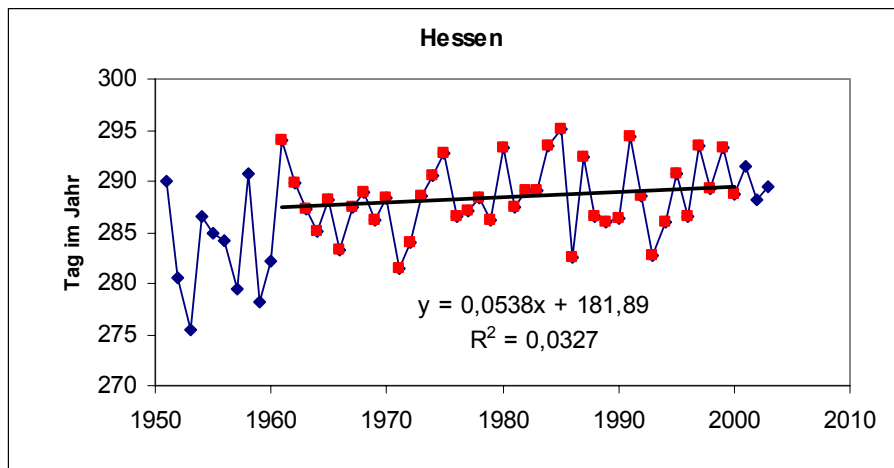


Abb. 17: Beginn der Blattverfärbung der Stiel-Eiche in Hessen

Das Eintrittsdatum der Blattverfärbung wurde in der Dekade 1991 bis 2000 im Vergleich zum Zeitraum 1951 bis 1960 fast eine Woche später beobachtet (Tab. 18). Der Trend war jedoch nur gering, da er über den Zeitraum 1961 bis 2000 gemittelt wurde und es in dieser Periode zu keiner stärkeren Verschiebung gekommen ist.

Tab. 18: Mittlerer Beginn der Blattverfärbung der Stiel-Eiche in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|---------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 283 |
| 1961-1970 | 288 |
| 1971-1980 | 288 |
| 1981-1990 | 289 |
| 1991-2000 | 289 |
| Trend: 0,5 Tage/10 Jahre | |

Roskastanie (Blattverfärbung)

Im Beginn der Blattverfärbung der Roskastanie (Abb. 18) konnte im Zeitraum 1951-2003 le-

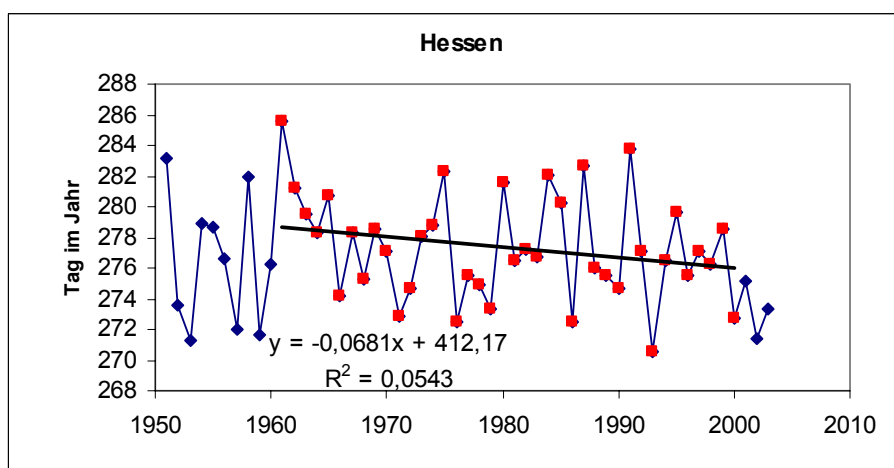


Abb. 18: Beginn der Blattverfärbung der Roskastanie in Hessen

diglich eine geringe Verschiebung beobachtet werden.

Diese Phase verfrühte sich mit 0,7 Tage/10 Jahre nur minimal und war mit dem Trend der Fruchtreife der Rosskastanie identisch (Tab. 17 und 19). Der Eintrittstermin der Blattverfärbung hat sich in den 60er Jahren im Vergleich zu den 10 Jahren davor leicht verspätet und in den darauf folgenden Jahrzehnten minimal verfrüht (Tab. 17).

Tab. 19: Mittlerer Beginn der Blattverfärbung der Rosskastanie in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 276 |
| 1961-1970 | 279 |
| 1971-1980 | 276 |
| 1981-1990 | 277 |
| 1991-2000 | 277 |
| Trend: -0,7 Tage/10 Jahre | |

Die beiden Zeigerpflanzen für den Beginn des Spätherbstes zeigen damit einen gegenläufigen Trend.

4.1.10 Beginn der Vegetationsruhe

Winterweizen (Beginn des Auflaufens)

Der Eintrittstermin des Auflaufens des Winterweizens verschob sich in Hessen im Zeitraum von 1961 bis 2000 um 0,25 Tage /Jahr nach vorne (Abb. 19).

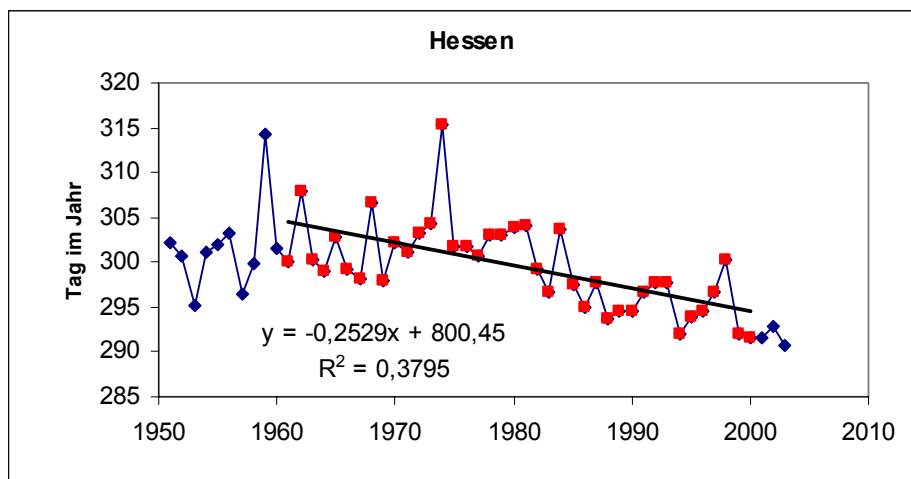


Abb. 19: Beginn des Auflaufens des Winterweizens in Hessen

Dabei wurde in der ersten Hälfte des Beobachtungszeitraumes ein verspäteter Phaseneintritt beobachtet, in der zweiten Hälfte verfrühte er sich hingegen, so dass er im Mittel in der Dekade 1991-2000 eine Woche früher als in dem Zeitraum 1951 bis 1960 eintrat (Tab. 20).

Tab. 20: Mittlerer Beginn des Auf-
laufens des Winterweizens
in Hessen

| Dekade | Tag im Jahr |
|----------------------------------|-------------|
| 1951-1960 | 302 |
| 1961-1970 | 301 |
| 1971-1980 | 304 |
| 1981-1990 | 298 |
| 1991-2000 | 295 |
| Trend: -2,5 Tage/10 Jahre | |

4.2 Phänologische Uhr

Die 10 "phänologischen Jahreszeiten" werden graphisch in einer so genannten phänologischen Uhr dargestellt. Diese beschreibt zuverlässig die natürlichen Jahreszeiten und somit den zeitlichen Vegetationsablauf, wie er im Mittel erwartet werden kann. Jede Jahreszeit wird durch eine phänologische Leitphase eröffnet und endet mit dem Beginn der nächsten phänologischen Jahreszeit. Die phänologische Uhr zeigt die mittleren Verhältnisse des Beginns der jeweiligen phänologischen Jahreszeit für bestimmte Gebiete. Daher müssen die Daten lückenlos vorliegen. In gewissem Umfang kann jedoch von einzelnen Phasen auf andere ausgewichen werden.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) wählt für die Darstellung der phänologischen Uhr gewöhnlich einen Zeitraum von 1961 bis 1990 (Klimanormalperiode) oder von 1951 bis 1990. Je länger dieser Zeitraum ist, umso genauer spiegeln die berechneten Mittelwerte die realen Verhältnisse eines Gebietes wider. Die Aussagekraft der phänologischen Uhr ist ungeachtet der kleinen Phasenauswahl sehr groß, denn für einen 30-jährigen Zeitraum liegen ihr $30 \cdot 10 \cdot X$ Einzeldaten, also bei $X = 1$ Station mindestens 300 Daten für ein Gebiet zu Grunde.

Die vom DWD verwendete und auch in dieser Studie dargestellte "doppelte phänologische Uhr" ermöglicht die Darstellung von zwei Zeiträumen in einer Uhr und damit einen direkten Vergleich. Der äußere Ring zeigt das mittlere Eintrittsdatum des Zeitraumes von 1961 bis 1990 und der innere Ring das Zehnjahresmittel von 1991 bis 2000. Innerhalb des inneren Ringes sind die Monate und die "klimatologische Jahreszeit" dargestellt. Sie ermöglichen eine bessere Zuordnung der Zeiträume. Die Zahlen in den Ringfeldern geben die Dauer der jeweiligen Phase an.

Die "klimatologische Jahreszeit" ist als Kreisdiagramm in Abb. 20 dargestellt. Sie zeigt vier Jahreszeiten, in die das Jahr eingeteilt wird. Sie sind alle jeweils 3 Monate lang, beginnen mit dem ersten Tag des ersten Monats und enden mit dem letzten Tag des dritten Monats. Der Frühling beginnt am 1. März und endet am 31. Mai, der Sommer fängt am 1. Juni an und dauert bis zum 31. August. Der Herbst reicht vom 1. September bis zum 30. November und der Winter vom 1. Dezember bis zum letzten Tag im Februar.

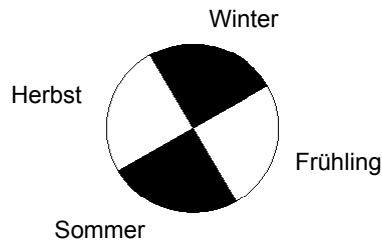


Abb. 20: "Klimatologische Jahreszeit"

Im Folgenden werden die ausgewerteten phänologischen Phasen in Form von doppelten phänologischen Uhren zunächst für ganz Hessen und danach für die einzelnen Naturraumgruppen getrennt dargestellt.

Die den Darstellungen zugrunde liegenden Daten sind in der Datei "Zusammenfassung.xls" in der Arbeitsmappe "2 - Zusammenfassung - Entwicklung phänologischer Phasen" auf dem beiliegenden Datenträger dokumentiert. Die Daten beziehen sich auf die Auswertung der Datenblätter "kor. Daten" (siehe Arbeitsmappe "1 - Entwicklung phänologischer Phasen" auf beiliegendem Datenträger). Der jeweils angegebene Trend (Tage/Dekade) bezieht sich auf Mittelwerte, der Trend bezogen auf den Median ist in der Mappe "1 - Entwicklung phänologischer Phasen" auf beiliegendem Datenträger zu finden.

4.2.1 Hessen

Die in Abb. 21 dargestellten phänologischen Uhren zeigen, dass sich die Jahreszeiten in Hessen verschoben haben.

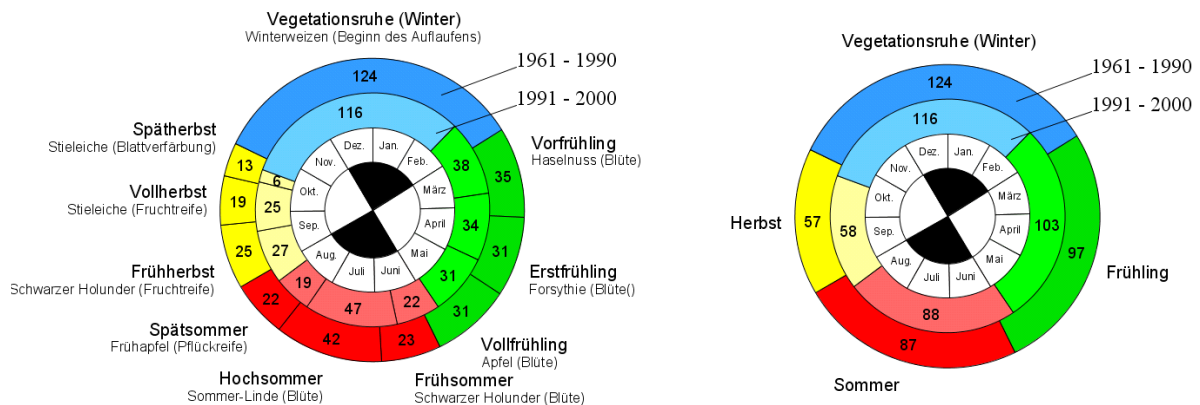


Abb. 21: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für Hessen

Es hat den Anschein, als ob sich der innere Ring gegen den Uhrzeigersinn gedreht hat. Die Jahreszeiten beginnen früher und weisen erhebliche Differenzen zur klimatologischen Jahreszeit 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, Herbstes und

der Vegetationsruhe. Bei genauer Betrachtung der vollständigen doppelten phänologischen Uhr (Abb. 21, links) zeigt sich, dass sich nicht alle der 10 phänologischen Jahreszeiten vorverlagert haben. Der Spätherbst beginnt in der Dekade von 1991 bis 2000 einen Tag später als in dem Zeitraum von 1961 bis 1990, das Ergebnis ist jedoch nicht signifikant (siehe Tab 21).

Tab. 21: Beginn der phänologischen Jahreszeit für Hessen gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | | | 1961 - 1990 | 1991 - 2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 165 | 60 | 46 | -5,5 | ** |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 164 | 95 | 84 | -3,9 | * |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 159 | 126 | 118 | -2,2 | * |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 166 | 157 | 148 | -3,1 | ** |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 153 | 180 | 171 | -2,8 | ** |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 147 | 222 | 217 | -0,4 | n.s. |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 166 | 244 | 237 | -2,8 | ** |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 152 | 269 | 264 | -1,8 | ** |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 160 | 288 | 289 | 0,5 | n.s. |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 155 | 301 | 295 | -2,5 | *** |

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 11 Tagen (Tab. 21). Der Frühsommer und der Hochsommer beginnen in der Dekade 1991-2000 je 9 Tage früher als in der Periode 1961-1990, der Frühherbst 7 Tage. Die Vegetationsruhe hat sich um 6 Tage verfrüht.

Zusätzlich zur Verschiebung der Jahreszeiten hat sich auch ihre Dauer verändert. Der Frühling hat sich zwischen dem Zeitraum 1991 bis 2000 und 1961 bis 1990 mit 5 Tagen am stärksten verlängert (Abb. 21, rechts). Die Länge des Sommers hat, vergleicht man den inneren mit dem äußeren Ring, um 2 Tage, die des Herbstes hat um 1 Tag zugenommen. Im Gegensatz dazu hat sich die Vegetationsruhe im Zeitraum von 1991 bis 2000 gegenüber 1961-1990 um 8 Tage verkürzt. Dies ist hauptsächlich durch die Vorverlagerung und Verlängerung des Frühlings bedingt. Während sich der Vor- und der Erstfrühling um jeweils 3 Tage verlängert haben, hat sich der Vollfrühling sogar um einen Tag verkürzt. Die Tendenz zur Verlängerung der frühen und Verkürzung der späten Phasen zeigen auch der Sommer und der Herbst. Der Spätherbst hat sich mit 7 Tagen im Zeitraum von 1991 bis 2000 gegenüber 1961-1990 am stärksten verkürzt, während der Vollherbst die größte Verlängerung (um 6 Tage) zeigt. Der Frühherbst hat sich hingegen nur um 2 Tage verkürzt. Während der Frühsommer

exakt gleich geblieben ist, hat sich der Hochsommer um 4 Tage verlängert und der Spätsommer um 2 Tage verkürzt.

Folge der Veränderung der Dauer der Jahreszeiten ist die Verlängerung der Vegetationsperiode in der Dekade 1991-2000 um 8 Tage (Abb. 21, rechts). Die Verlängerung basiert dabei zum Großteil auf einem früheren Beginn der Vegetationsperiode und nicht auf einer Verspätung des Vegetationsendes. Der Herbst endet sogar früher als im Zeitraum 1961 bis 1990.

Ähnliche Beobachtungen wurden auch in Rheinland-Pfalz gemacht. Dort haben sich ebenfalls alle phänologischen Jahreszeiten vorverlagert, mit Ausnahme des Spätherbstes, welcher auch in Rheinland-Pfalz später beginnt. Das Ausmaß der Verkürzung der Vegetationsruhe gleicht dem in Hessen. In Rheinland-Pfalz ist die Vegetationsruhe in der Dekade 1991-2000 im Vergleich zu 1961-1990 9 Tage kürzer, in Hessen 8 Tage.

4.2.2 Haupteinheitengruppe 14 - Hessisch-Fränkisches Bergland

Im Hessisch-Fränkischen Bergland scheint sich der innere Ring der Uhr gegen den Uhrzeigersinn verschoben zu haben (Abb. 22). Alle phänologischen Jahreszeiten haben sich in der Dekade 1991 bis 2000 vorverlagert, mit Ausnahme des Spätherbstes, welcher auch im Zeitraum 1961-1990 am gleichen Tag (Tag 261 im Jahr) beginnt (Tab. 22). Der Vorfrühling hat sich mit 19 Tagen am stärksten verfrüht, gefolgt vom Erstfrühling (12 Tage) und Vollfrühling (8 Tage). Die Tendenz, dass sich die frühen Phasen der Jahreszeit um einen größeren Zeitraum verfrühen als die späteren ist auch im Sommer und Herbst erkennbar.

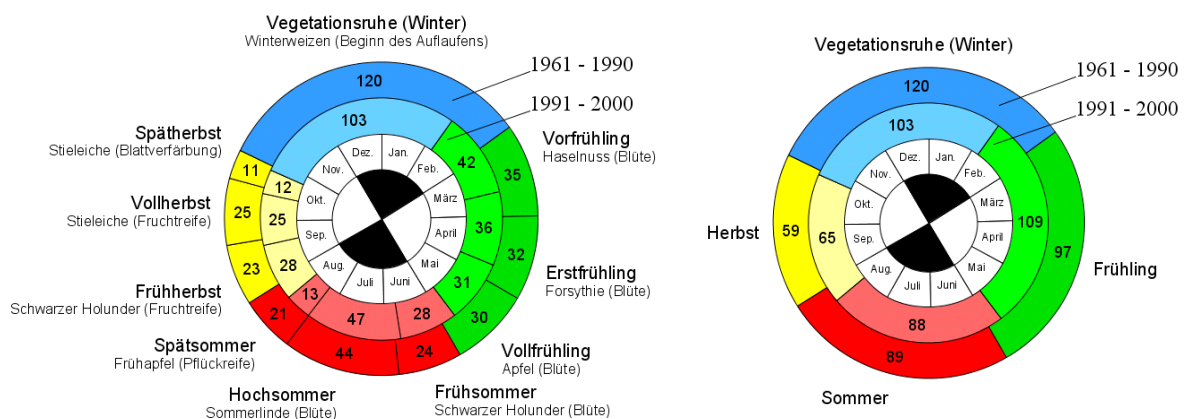


Abb. 22: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 14 - Hessisch-Fränkisches Bergland

Zusätzlich haben sich im Zeitraum von 1991 bis 2000 im Vergleich zu 1961 bis 1990 beinahe alle phänologischen Jahreszeiten im Mittel um 1-7 Tage verlängert, wobei die Länge der frühen Phasen einer Jahreszeit tendenziell stärker zugenommen haben als die späteren (Abb. 22, links). Eine Ausnahme stellen der Spätsommer und der Winter dar. Diese haben sich um 8 bzw. 17 Tage verkürzt.

Tab. 22: Beginn der phänologischen Jahreszeit für das Hessisch-Fränkische Bergland gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------|------------|-------------|
| | | | 1961-1990 | 1991-2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 18 | 56 | 37 | -6,9 | ** |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 18 | 91 | 79 | -3,7 | * |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 18 | 123 | 115 | -2,1 | * |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 18 | 153 | 146 | -2,4 | * |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 14 | 177 | 174 | -0,6 | n.s. |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 18 | 221 | 221 | -0,4 | n.s. |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 18 | 242 | 234 | -2,9 | * |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 19 | 265 | 262 | -1,1 | (*) |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 19 | 290 | 287 | -1,1 | n.s. |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 18 | 301 | 299 | -1,6 | (*) |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: 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 Vegetationsperiode im Hessisch-Fränkischen Bergland um insgesamt 17 Tage verlängert hat (Abb. 22, rechts). Ähnliche starke Tendenzen sind auch im Nördlichen Oberrheintiefland, Bergisch-Sauerländischen Gebirge und im Thüringer Becken mit Randplatte zu beobachten. Die Verlängerung der Vegetationsperiode liegt vor allem an der Verlängerung des Frühlings um 12 Tage und an der des Herbstes (6 Tage), der Sommer hat sich sogar um einen Tag verkürzt, bedingt durch die Abnahme der Länge des Spätsommers.

4.2.3 Haupteinheitengruppe 22 - Nördliches Oberrheintiefland

Im Nördlichen Oberrheintiefland beginnen, vergleicht man die Periode 1991 bis 2000 mit dem Zeitraum 1961 bis 1990, alle phänologischen Jahreszeiten, mit Ausnahme des verspäteten Eintritts des Spätsommers und des gleich gebliebenen Eintrittsdatums des Spätherbstes, früher (Abb. 23).

Der Frühling zeigt die größte Vorverlagerung mit 17 Tagen (Tab. 23). Dieser verfrühte Eintritt der Phasen nimmt im Laufe des Jahres ab. Die Vegetationsruhe beginnt im Zeitraum 1991 bis 2000 lediglich einen Tag früher als noch in der Periode 1961 bis 1990 (Tab. 23).

Beim Vergleich der phänologischen Jahreszeiten bezogen auf die Dauer ist keine einheitliche Tendenz erkennbar. In der Dekade 1991 bis 2000 haben sich alle Frühlingsphasen verlängert, bei den Sommer- und Herbstphasen treten hingegen auch Verkürzungen auf (Abb. 23, links).

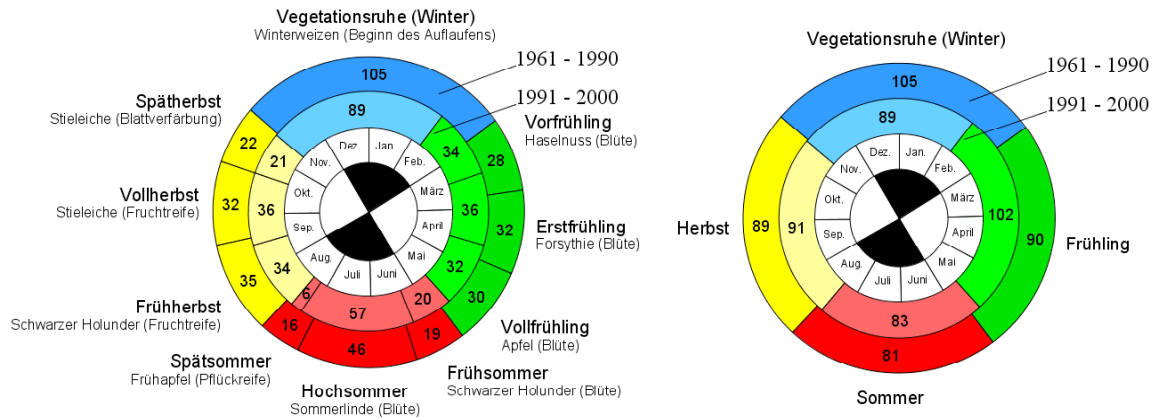


Abb. 23: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 22 - Nördliches Oberrheintiefend

Die Veränderung im Bezug auf die Dauer der Vegetationsperiode ähnelt der im Hessisch-Fränkischen Bergland in hohem Maße. Die Vegetationsperiode hat sich verlängert, im nördlichen Oberrheintiefend um insgesamt 16 Tage. Die Ursache hierfür liegt in dem früheren Beginn der Vegetationsperiode, das Vegetationsende ist gleich geblieben. Die Länge des Frühlings hat um 12 Tage, die des Sommers und des Herbstes allerdings nur um 2 Tage zugenommen (Abb. 23, rechts).

Tab. 23: Beginn der phänologischen Jahreszeit für das nördliche Oberrheintiefend gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | | | 1961 - 1990 | 1991 - 2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 4 | 56 | 39 | -8,5 | ** |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 4 | 84 | 73 | -4,0 | * |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 4 | 116 | 109 | -1,8 | n.s. |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 4 | 146 | 141 | -2,5 | ** |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 3 | 165 | 161 | -1,6 | n.s. |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 3 | 211 | 218 | 0,2 | n.s. |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 4 | 227 | 224 | -1,2 | n.s. |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 2 | 262 | 258 | -2,6 | n.s. |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 4 | 294 | 294 | 3,3 | (*) |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 4 | 316 | 315 | 0,2 | n.s. |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$
 : hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$ *: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

4.2.4 Haupteinheitengruppe 23 - Rhein-Main-Tiefland

Die doppelte phänologische Uhr für das Rhein-Main-Tiefland ist ähnlich gestaltet wie die der Haupteinheitengruppen 14 und 22. Der innere Ring scheint sich auch hier entgegen dem Uhrzeigersinn gedreht zu haben (Abb. 24).

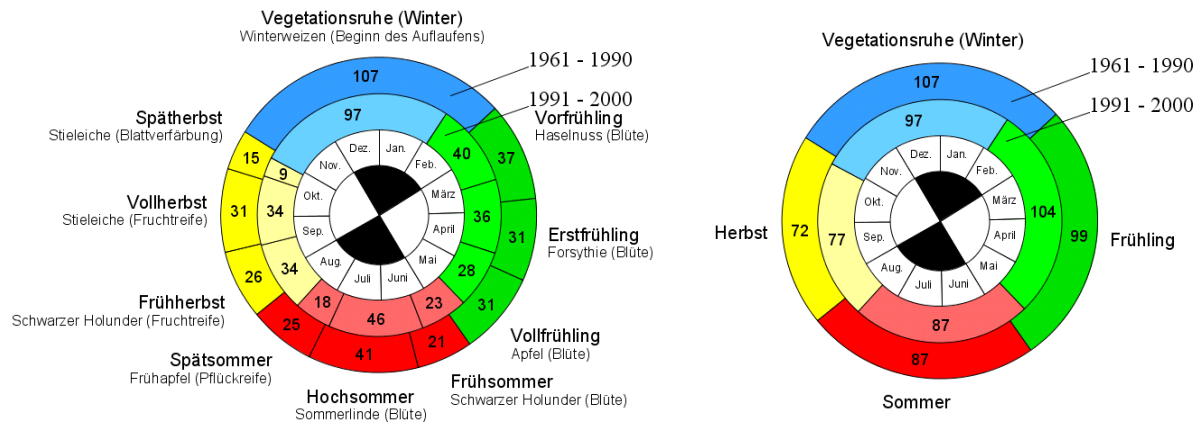


Abb. 24: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 23 - Rhein-Main-Tiefland

Die Jahreszeiten haben sich, vergleicht man den Zeitraum 1991-2000 mit 1961-1990, verfrüht, wobei das Ausmaß der Vorverlagerung im Laufe des Jahres abnimmt (Tab. 24). Die einzige phänologische Jahreszeit, welche in der Dekade 1991-2000 mit Verspätung eingetreten ist, ist der Spätherbst (Abb. 24, links).

Tab. 24: Beginn der phänologischen Jahreszeit für das Rhein-Main-Tiefland gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | | | 1961 - 1990 | 1991 - 2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 30 | 49 | 35 | -5,7 | * |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 30 | 86 | 75 | -4,4 | * |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 27 | 117 | 111 | -1,9 | * |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 30 | 148 | 139 | -3,1 | ** |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 29 | 169 | 162 | -2,4 | * |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 26 | 210 | 208 | 1,2 | n.s. |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 30 | 235 | 226 | -3,4 | ** |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 29 | 261 | 260 | -0,7 | n.s. |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 30 | 292 | 294 | 1,2 | * |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 21 | 307 | 303 | -0,7 | n.s. |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$
 : hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$ *: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

Die Eintrittstermine von Spätsommer und Vollherbst haben sich kaum verändert. Am stärksten verfrüht haben sich die jeweils frühen Phasen einer Jahreszeit, nämlich der Vorfrühling (2 Wochen), Erstfrühling (11 Tage) sowie Fröhsommer und Fröhherbst (um jeweils 9 Tage) (Tab. 24).

Ein Überblick über die Dauer der phänologischen Jahreszeiten zeigt, dass sich die ersten beiden Phasen von Frühling, Sommer und Herbst stets verlängert haben, während sich die jeweils letzte Phase (Vollfrühling, Spätsommer, Spätherbst) verkürzt hat (Abb. 24, links).

Bedingt durch diese Verlängerung ist die Vegetationsperiode in der Dekade 1991 bis 2000 zehn Tage länger als im Zeitraum 1961 bis 1990. Die Ursache hierfür ist die Verlängerung des Frühlings und des Herbstes um jeweils 5 Tage (Abb. 24, rechts).

4.2.5 Haupteinheitengruppe 30 – Taunus

Die doppelte phänologische Uhr des Taunus ist im Vergleich zu den anderen Haupteinheitengruppen anders gestaltet. Die Jahreszeiten haben sich, vergleicht man die Mittelwerte von 1991 bis 2000 mit denen von 1961 bis 1990, mit einer Differenz von einigen Tagen bis zu einer Woche nur sehr wenig verfrüht (Abb. 25, rechts). Alle phänologischen Jahreszeiten haben sich vorverlagert, wobei der Spät- und der Vollherbst beinahe zum gleichen Zeitpunkt eintreten (Tab. 25; Abb. 25, links).

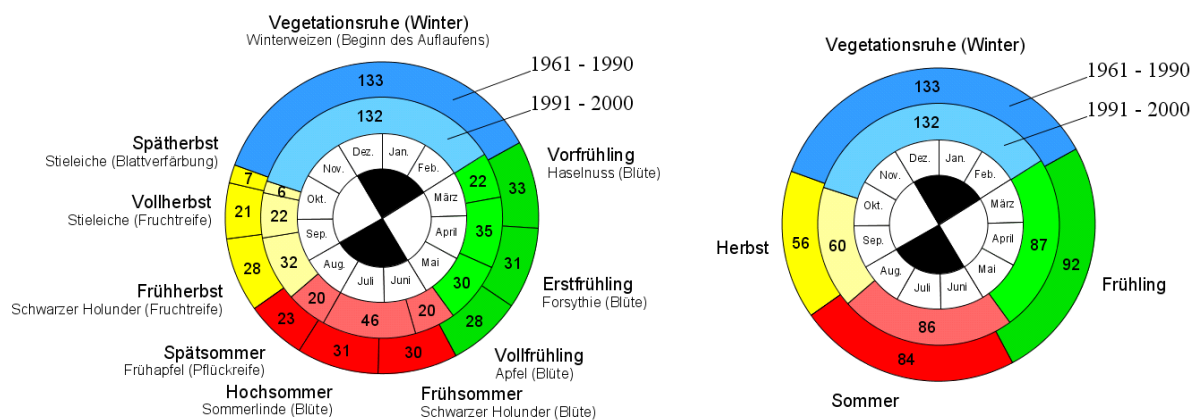


Abb. 25: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 30 - Taunus

Betrachtet man die Dauer der phänologischen Jahreszeiten, ist keine Tendenz erkennbar. Fröhsommer, Spätsommer, Spätherbst und Vorfrühling haben sich verkürzt, die zuletzt genannte Phase sogar um 11 Tage. Bei allen anderen phänologischen Phasen ist eine Verlängerung zu beobachten, wobei der Hochsommer mit 15 Tagen die stärkste Zunahme zeigt (Abb. 25, links; Tab. 25).

Tab. 25: Beginn der phänologischen Jahreszeit für den Taunus gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | | | 1961 - 1990 | 1991 - 2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 8 | 63 | 60 | -3,3 | n.s. |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 8 | 96 | 82 | -4,8 | ** |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 7 | 127 | 117 | -2,8 | ** |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 8 | 155 | 147 | -3,2 | ** |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 7 | 185 | 167 | -4,5 | ** |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 7 | 216 | 213 | -2,9 | * |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 8 | 239 | 233 | -3,1 | ** |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 8 | 267 | 265 | -1,4 | n.s. |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 8 | 288 | 287 | 0,4 | n.s. |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 7 | 295 | 293 | -0,2 | n.s. |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$
 : hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$ *: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

Die Länge der Vegetationsperiode im Taunus hat sich im Gegensatz zu vielen anderen Haupteinheitengruppen nicht verändert. Dies liegt daran, dass die Verkürzung des Frühlings durch die Verlängerung des Herbstes kompensiert wird (Abb. 35, rechts).

4.2.6 Haupteinheitengruppe 31 – Gießen-Koblenzer-Lahntal

Auffällig an der doppelten phänologischen Uhr des Gießen-Koblenzer-Lahntals ist, dass sich die Vegetationsperiode in der Dekade 1991 bis 2000 im Vergleich zu dem Zeitraum 1961 bis 1990 verkürzt hat (um 2 Tage) (Abb. 26).

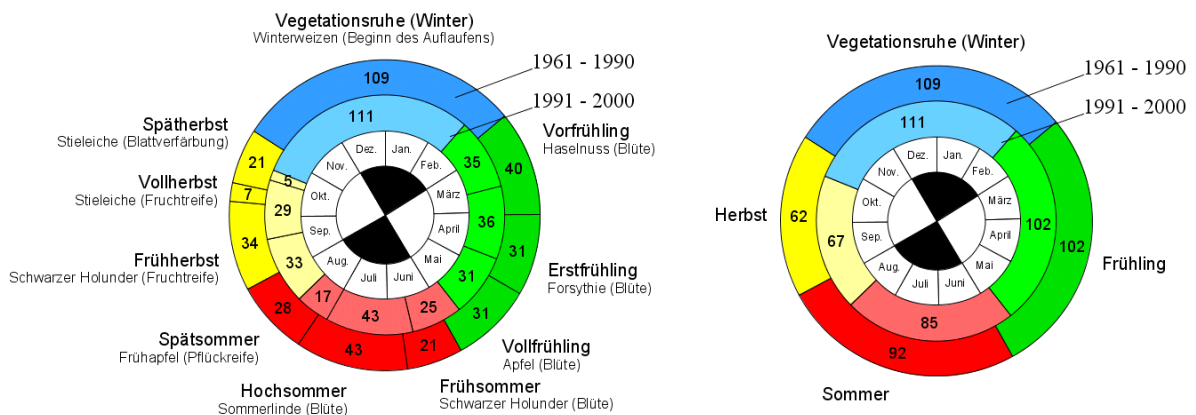


Abb. 26: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 31 - Gießen-Koblenzer-Lahntal

Diese Beobachtung konnte in keiner weiteren Haupteinheitengruppe Hessens gemacht werden. Die Verkürzung der Vegetationsperiode liegt zum Großteil an der Verkürzung des Sommers von 92 auf 85 Tage, infolge der Abnahme der Länge des Spätsommers (Abb. 26). Während die Dauer des Frühlings unverändert geblieben ist, hat sich der Herbst um 5 Tage verlängert.

Betrachtet man die Dauer der phänologischen Jahreszeiten von 1991 bis 2000 und 1961 bis 1990, so ist keine eindeutige Tendenz zu erkennen. Die Länge von Vollfrühling und Hochsommer ist exakt gleich geblieben. Verkürzt haben sich Erstfrühling und Frühherbst, besonders stark jedoch der Spätsommer (11 Tage) und der Spätherbst (16 Tage). Alle übrigen Phasen haben an Länge zugenommen, in besonderem Maße der Vollherbst, welcher sich von 7 auf 29 Tage verlängert hat.

Mit anderen Uhren übereinstimmend ist der frühere Eintritt der Jahreszeiten. Alleine der Spätherbst beginnt mit einer leichten Verzögerung von 5 Tagen. Frühherbst und Vollherbst zeigen mit 16 und 17 Tagen die größte Verfrühung auf (Tab. 26).

Tab. 26: Beginn der phänologischen Jahreszeit für das Lahntal gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | | | 1961 - 1990 | 1991 - 2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 4 | 52 | 43 | -2,8 | n.s. |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 4 | 92 | 78 | -5,0 | ** |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 4 | 123 | 114 | -2,4 | * |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 4 | 154 | 145 | -3,2 | * |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 4 | 175 | 170 | -1,7 | n.s. |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 4 | 218 | 213 | 0,8 | n.s. |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 4 | 246 | 230 | -6,3 | *** |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 2 | 280 | 263 | -7,5 | *** |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 4 | 287 | 292 | 1,6 | n.s. |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 4 | 308 | 297 | -5,1 | *** |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$
 : hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$ *: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

4.2.7 Haupteinheitengruppe 32 – Westerwald

Im Westerwald scheint sich der innere Ring der doppelten phänologischen Uhr übereinstimmend mit den übrigen hessischen Uhren im Zeitraum von 1991 bis 2000 gegenüber 1961 bis 1990 gegen den Uhrzeigersinn gedreht zu haben. Die phänologischen Jahreszeiten treten früher ein, wobei sich der Vor- und Erstfrühling am stärksten, nämlich um 2 Wochen vorverlagert haben (Abb. 27, links). Lediglich der Beginn des Spätherbstes bleibt unverändert (Tab. 27; Abb. 27, links).

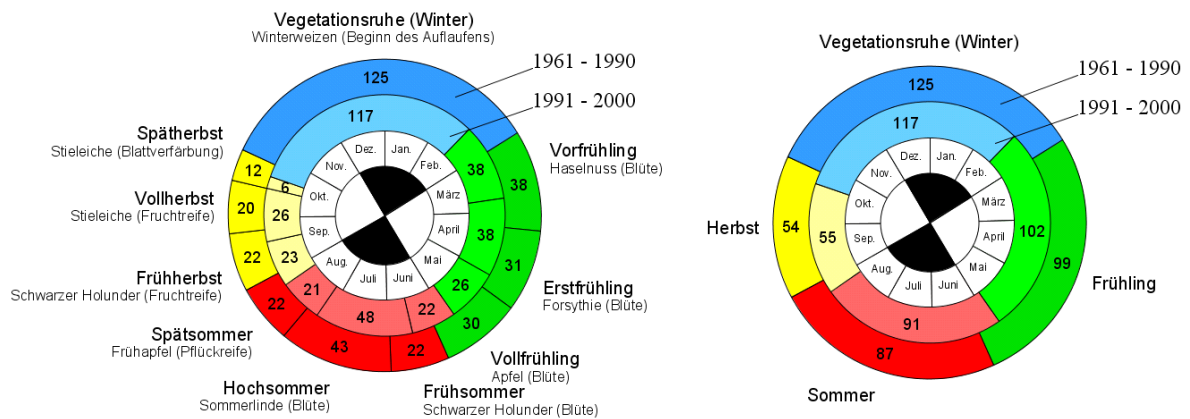


Abb. 27: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 32 - Westerwald

Im Hinblick auf die Dauer der phänologischen Jahreszeiten ist folgende Tendenz erkennbar: Die frühe Phase von Frühling, Sommer und Herbst ist exakt oder annähernd gleich geblieben, die zweiten Phasen haben sich verlängert und die jeweils späten verkürzt (Abb. 27, links). Dies führt dazu, dass sich der Frühling um 3 Tage sowie Sommer um 4 Tage und Herbst um 1 Tag verlängern.

Folglich hat sich die Vegetationsperiode im Westerwald im Zeitraum 1991 bis 2000 bezogen auf den Zeitraum 1961 bis 1990 um gut eine Woche verlängert (Abb. 27, rechts).

Tab. 27: Beginn der phänologischen Jahreszeit für den Westerwald gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | | | 1961 - 1990 | 1991 - 2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 9 | 60 | 46 | -5,2 | * |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 9 | 98 | 84 | -4,6 | ** |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 9 | 129 | 122 | -1,7 | (*) |
| Frührsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 9 | 159 | 148 | -4,4 | ** |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 9 | 181 | 170 | -3,9 | ** |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 9 | 224 | 218 | -1,7 | n.s. |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 9 | 246 | 239 | -2,3 | * |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 9 | 268 | 262 | -2,3 | * |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 9 | 288 | 288 | 0,2 | n.s. |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 10 | 300 | 294 | -2,2 | ** |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$
 : hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$ *: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

4.2.8 Haupteinheitengruppe 33 – Bergisch-Sauerländisches Gebirge

Im Bergisch-Sauerländischen Gebirge ist die größte Differenz in der Dauer der Vegetationsperiode zwischen 1991-2000 und 1961-1990 im Vergleich mit allen anderen Haupteinheitengruppen in Hessen zu beobachten. Die Vegetationsperiode hat sich um 3 Wochen (22 Tage) verlängert (Abb. 28, rechts). Dies basiert auf einem früheren Beginn der Vegetationsperiode, denn das Vegetationsende hat sich zeitlich nicht verschoben.

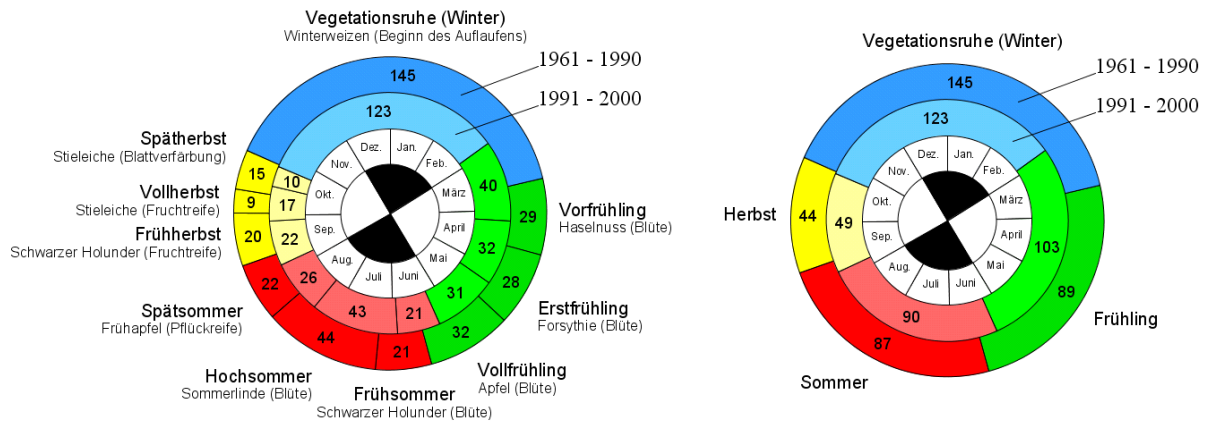


Abb. 28: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 33 - Bergisch-Sauerländisches Gebirge

Tab. 28: Beginn der phänologischen Jahreszeit für das bergisch-sauerländische Gebirge gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | | | 1961 - 1990 | 1991 - 2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 5 | 79 | 56 | -7,3 | ** |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 5 | 108 | 96 | -5,4 | *** |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 5 | 136 | 128 | -2,1 | (*) |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 5 | 168 | 159 | -4,1 | ** |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 5 | 189 | 180 | -2,8 | (*) |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 5 | 233 | 223 | -3,7 | ** |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 5 | 255 | 249 | -2,0 | (*) |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 5 | 275 | 271 | 0,5 | n.s. |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 5 | 284 | 288 | 2,5 | ** |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 5 | 299 | 298 | -3,0 | (*) |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$
 : hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$ *: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

Alle phänologischen Jahreszeiten mit Ausnahme des Spätherbstes treten zu einem früheren Zeitpunkt ein (Abb. 28, links). Am stärksten vorverlagert sind Vorfrühling (23 Tage) und Erstfrühling (12 Tage) (Tab. 28). Der Beginn der Vegetationsruhe hat sich nicht verschoben.

Beim Vergleich der phänologischen Jahreszeiten bezogen auf ihre Dauer zeigt sich, dass sich Vorfrühling, Erstfrühling, Spätsommer, Früh- und Vollherbst verlängert haben. Der Frühsommer ist in seiner Länge unverändert geblieben. Alle anderen Phasen haben sich verkürzt (Abb. 28, links).

4.2.9 Haupteinheitengruppe 34 - Westhessisches Berg- und Senkenland

Im Westhessischen Berg- und Senkenland zeigt die doppelte phänologische Uhr im Zeitraum 1991 bis 2000 gegenüber 1961 bis 1990 auch einen verfrühten Beginn der phänologischen Jahreszeiten. Dieser wird im Jahresverlauf jedoch kleiner. Eine Ausnahme stellt der Spätherbst dar, welcher 3 Tage später beginnt (Abb. 29, links).

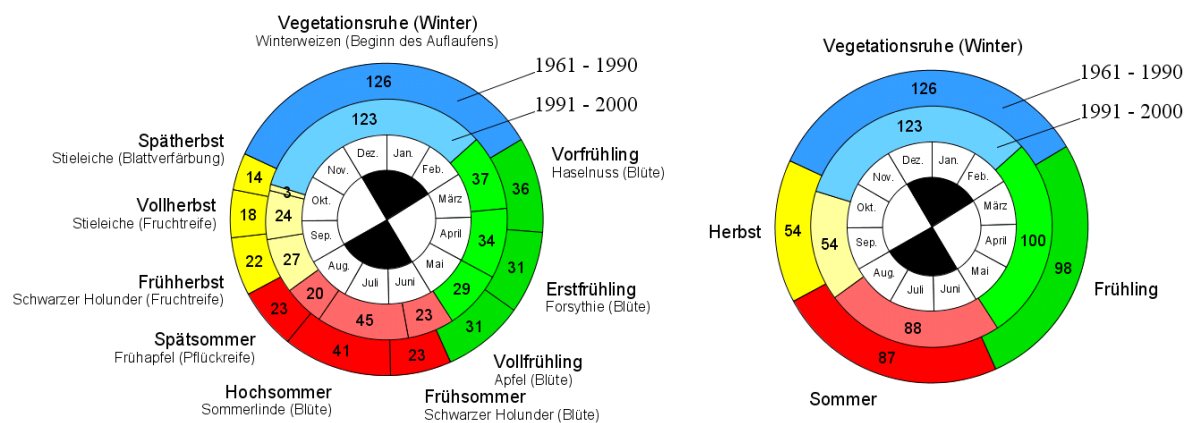


Abb. 29: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 34 - Westhessisches Berg- und Senkenland

Im Vergleich der beiden Zeiträume im Hinblick auf die Dauer haben sich die früheren Phasen von Frühling, Sommer und Herbst verlängert, während sich die jeweilige späte Phase verkürzt hat. Der Spätherbst zeigt dabei die stärkste Verkürzung. Während er im Zeitraum 1961 bis 1990 noch 14 Tage lang war, dauerte er in 1991 bis 2000 nur noch 3 Tage. Hingegen hat der Frühsommer seine Dauer beibehalten (Abb. 29, links).

Die Vegetationsperiode hat sich in der Dekade 1991 bis 2000 im Vergleich zu 1961 bis 1990 nur minimal verlängert, bedingt durch die Ausdehnung der Frühlings- und Sommerphase. Die Dauer des Herbstes ist unverändert geblieben (Abb. 29, rechts).

Tab. 29: Beginn der phänologischen Jahreszeit für das westhessische Berg- und Senkenland gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------|------------|-------------|
| | | | 1961-1990 | 1991-2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 40 | 61 | 50 | -4,0 | n.s. |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 40 | 97 | 87 | -3,8 | * |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 38 | 128 | 121 | -2,2 | ** |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 40 | 159 | 150 | -3,5 | *** |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 36 | 182 | 173 | -3,1 | * |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 33 | 223 | 218 | -0,7 | n.s. |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 40 | 246 | 238 | -3,0 | * |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 32 | 268 | 265 | -1,2 | n.s. |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 34 | 286 | 289 | 0,9 | n.s. |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 37 | 300 | 292 | -4,0 | *** |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$
 : hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$ *: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

4.2.10 Haupteinheitengruppe 35 - Osthessisches Bergland

Im Osthessischen Bergland hat sich der Eintritt der Jahreszeiten verschoben. Ein Vergleich der Dekade 1991 bis 2000 mit dem Zeitraum 1961 bis 1990 zeigt, dass sich die phänologischen Phasen verfrüht haben, am stärksten der Vorfrühling mit über 2 Wochen. Nur der Spätherbst beginnt noch am gleichen Tag (Abb. 30, links; Tab. 30).

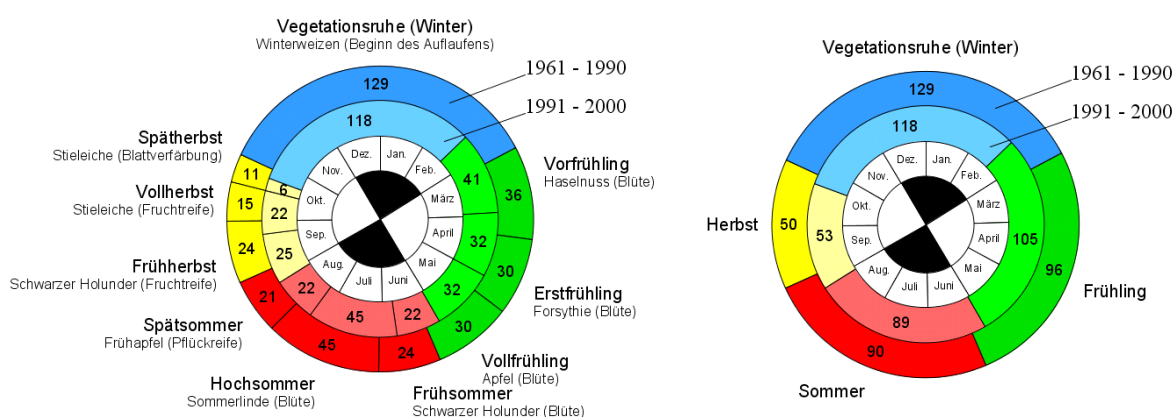


Abb. 30: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 35 - Osthessisches Bergland

Zusätzlich zum Eintritt hat sich auch ihre Dauer verändert. Der Spätherbst und der Frühsommer haben sich um einige Tage, der Winter um eineinhalb Wochen verkürzt.

Vorfrühling und Vollherbst zeigen eine einwöchige Verlängerung, alle anderen Phasen sind unverändert.

Tab. 30: Beginn der phänologischen Jahreszeit für das Osthessische Bergland gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------|------------|-------------|
| | | | 1961-1990 | 1991-2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 44 | 64 | 48 | -5,9 | (*) |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 45 | 100 | 89 | -3,7 | * |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 45 | 130 | 121 | -2,3 | * |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 45 | 160 | 153 | -2,7 | * |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 44 | 184 | 175 | -2,6 | * |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 40 | 229 | 220 | -2,0 | (*) |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 45 | 250 | 242 | -2,4 | ** |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 43 | 274 | 267 | -2,7 | *** |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 44 | 289 | 289 | 0,2 | n.s. |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 46 | 300 | 295 | -2,3 | *** |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: 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 Vegetationsperiode im Osthessischen Bergland, vergleicht man 1991 bis 2000 mit 1961 bis 1990, um elf Tage verlängert hat. Die Ursache hierfür liegt zum Großteil an dem früheren Beginn der Vegetationsperiode und an der Verlängerung der Frühlingsphase (Abb. 30, rechts). Die Dauer des Herbstes hat insgesamt zugenommen, da die Verkürzung des Spätherbstes durch die Verlängerung des Vollherbstes ausgeglichen wurde.

4.2.11 Haupteinheitengruppe 36 - Oberes Weserbergland

In dieser Naturraumgruppe befinden sich in Hessen nur zwei phänologische Beobachtungsstationen. Die Datenmenge für die Auswertung dieser naturräumlichen Einheit ist daher lückenhaft. Folglich werden zur Charakterisierung einiger phänologischer Phasen Zeigerpflanzen herangezogen, welche nach Angaben des DWD ersatzweise benutzt werden können.

Der Beginn des Erstfrühlings kann nicht durch die Forsythie (Blüte) charakterisiert werden, da der Datensatz lückenhaft ist. Als Zeigerpflanze für diese Phase dient ersatzweise der Beginn der Blattentfaltung der Stachelbeere (Tab. 31, Abb. 31).

Zur Berechnung des Beginns des Spätherbstes können die Daten der Blattverfärbung der Stiel-Eiche nicht verwendet werden, denn diese phänologische Phase tritt erst 5 Tage nach dem Beginn des Auflaufens des Winterweizens, welche den Beginn der Vegetationsruhe anzeigt, ein. Mit diesen Daten kann die phänologische Uhr nicht erstellt werden. Daher

werden zur Charakterisierung des Beginns des Spätherbstes der Daten der Blattverfärbung der Rosskastanie benutzt (Tab. 31, Abb. 31).

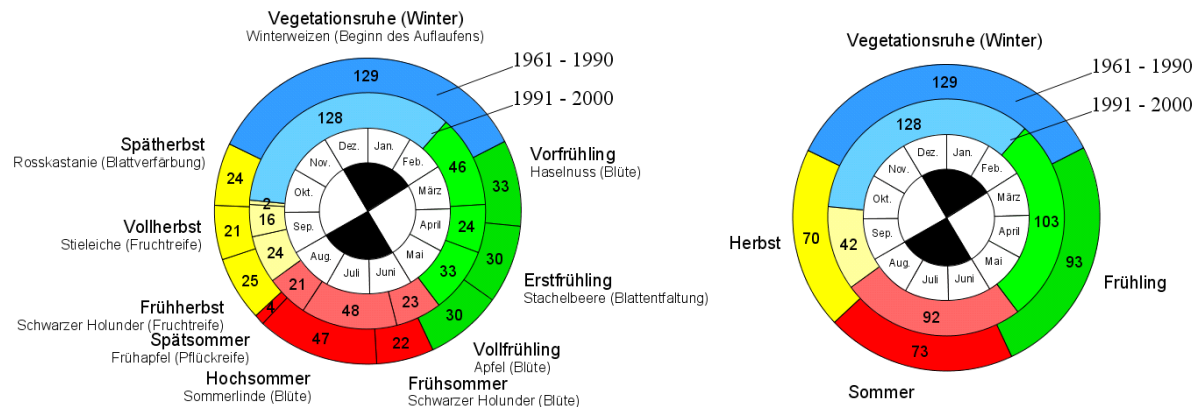


Abb. 31: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 36 - Oberes Weserbergland

Auffällig an der doppelten phänologischen Uhr des Oberen Weserberglandes ist, dass der Beginn des Herbstes im Zeitraum 1991 bis 2000 gegenüber 1961-1990 erst mit einer einwöchigen Verspätung einsetzt. Im Gegensatz dazu haben sich die Eintrittstermine von Frühling, Sommer und Vegetationsruhe mit einer Differenz von bis zu 2-3 Wochen sehr stark verfrüht. (Abb. 31, rechts; Tab. 31). Mit Ausnahme der drei Herbstphasen haben sich alle phänologischen Jahreszeiten vorverlagert (Abb. 31, links).

Tab. 31: Beginn der phänologischen Jahreszeit für das obere Weserbergland gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------|------------|-------------|
| | | | 1961-1990 | 1991-2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 2 | 65 | 43 | -8,6 | ** |
| Erstfrühling | Stachelbeere (Blattentfaltung) | 2 | 98 | 89 | -4,4 | * |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 2 | 128 | 113 | -5,1 | ** |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 2 | 158 | 146 | -5,4 | *** |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 2 | 180 | 169 | -2,7 | n.s. |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 2 | 227 | 217 | -1,0 | n.s. |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 2 | 231 | 238 | 1,0 | n.s. |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 2 | 256 | 262 | 0,4 | n.s. |
| Spätherbst | Roskastanie (Blattverfärbung) | 2 | 277 | 278 | -3,0 | n.s. |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 2 | 301 | 280 | -11,1 | *** |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$
 : hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$ *: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

Ein Vergleich der Dauer der phänologischen Jahreszeiten zwischen 1991-2000 und 1961-1990 zeigt, dass sich der Sommer mit 19 Tagen am stärksten verlängert hat (Abb. 42).

Während die Vegetationsruhe nahezu gleich geblieben ist, hat sich der Herbst sehr stark verkürzt, um insgesamt einen Monat (Abb. 36, rechts). Dies liegt hauptsächlich an der Verkürzung des Spätherbstes von 24 auf 2 Tage (Abb. 36, links).

In ihrer Länge abgenommen haben zudem noch Vollherbst und Erstfrühling. Vorfrühling, Vollfrühling und Spätsommer haben sich verlängert. Alle anderen Phasen sind in ihrer Dauer unverändert geblieben.

Die Länge der Vegetationsperiode ist, wie im Taunus auch, nahezu gleich geblieben (Abb. 31, rechts).

4.2.12 Haupteinheitengruppe 48 - Thüringer Becken mit Randplatten

In Hessen befindet sich im Gebiet des Thüringer Beckens mit Randplatten nur eine phänologische Station. Die Auswertung für diese Haupteinheitengruppe basiert daher auf einer sehr geringen Datengrundlage. Die doppelte phänologische Uhr für die Haupteinheitengruppe 48 kann nicht erstellt werden, da der Beginn des Spätsommers nicht berechnet werden kann. Eine Auswertung der Daten der beiden Zeigerpflanzen für den Beginn des Spätsommers (Frühapfel (Pflückreife) und Eberesche (Pflückreife)) ist nicht sinnvoll, da beide Datenreihen lückenhaft sind.

Tab. 32: Beginn der phänologischen Jahreszeit für das Thüringer Becken mit Randplatten gemittelt für die Dekaden 1961-1990 und 1991-2000, ihr Trend bezogen auf die Mittelwerte von 1961-2000 und die Signifikanz des Trends.

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Anzahl der Stationen | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | | | 1961 - 1990 | 1991 - 2000 | (Tage/10a) | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 1 | 71 | 45 | -7,7 | (*) |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 1 | 103 | 92 | -4,0 | * |
| Vollfrühling | Stiel-Eiche (Blattentfaltung) | 1 | 136 | 127 | -3,0 | * |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 1 | 163 | 157 | -1,6 | n.s. |
| Hochsommer | Rote Johannisbeere (Fruchtreife) | 1 | 191 | 179 | -4,6 | * |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 0 | k.A. | k.A. | k.A. | k.A. |
| | Eberesche (Pflückreife) | 0 | k.A. | k.A. | k.A. | k.A. |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 1 | 244 | 243 | -2,2 | n.s. |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 1 | 260 | 255 | -6,8 | n.s. |
| Spätherbst | Roskastanie (Blattverfärbung) | 1 | 279 | 281 | -0,9 | n.s. |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 1 | 296 | 289 | -5,1 | ** |

n.s.: nicht signifikant (*): Tendenz; $0,10 > p > 0,05$ *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$
 : hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$ *: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

Ein Vergleich der Eintrittstermine der Phänophasen der Dekade 1991 bis 2000 mit denen von 1961-1990 in Tab. 32 zeigt, dass sich die phänologischen Jahreszeiten mit Ausnahme des Spätherbstes, welcher 2 Tage später beginnt und des Frühherbstes, welcher fast gleich

geblieben ist, stark verfrüht haben. Der Vorfrühling beginnt fast einen Monat früher, Frühlommer und Vegetationsruhe haben sich um eine Woche vorverlagert.

Zusätzlich sind Unterschiede im Bezug auf die Dauer der phänologischen Jahreszeiten zu beobachten. Alle Frühlingsphasen und der Vollherbst haben sich verlängert. Eine Verkürzung konnte beim Frühlommer, Früh- und Spätherbst festgestellt werden. Die Länge der Vegetationsruhe hat mit 3 Wochen am stärksten abgenommen (Tab. 32).

Im Thüringer Becken mit Randplatten hat sich die Vegetationsperiode um insgesamt 19 Tage verlängert. Sie basiert zum Großteil auf dem früheren Vegetationsbeginn (Vorverlagerung des Vorfrühlings um 26 Tage) und auf der Verlängerung der Vorfrühlingsphase.

4.3 Veränderung des Klimas am Beispiel Gießen

Das Klima unterliegt einem Wandel. Bereits in der Vergangenheit konnten Veränderungen in der Lufttemperatur beobachtet werden. Inwiefern sie sich in der Zukunft fortsetzen, wird auf der Grundlage der in der Studie der Firma Meteo-Research prognostizierten Temperaturentwicklung im 21. Jahrhundert (Enke 2003) am Beispiel der meteorologischen Station Gießen gezeigt.

Die beobachteten meteorologischen Daten der letzten 40 Jahre und die prognostizierten Daten der Dekade 2041-2050 (berechnet aus 10 Simulationen mit je 20 Realisationen) sind in Form von Box-and-Whisker-Plots dargestellt. Die Box enthält die mittleren 50 % der Werte, die gestrichelte Linie innerhalb der Box symbolisiert den Mittelwert, die durchgezogene Linie den Median. Der Querstrich oberhalb der Box zeigt den größten Stichprobenwert an, derjenige unterhalb der Box den kleinsten Stichprobenwert, sofern kein Ausreißer⁵ (kreisförmige Symbole außerhalb dieses Bereichs) vorliegt.

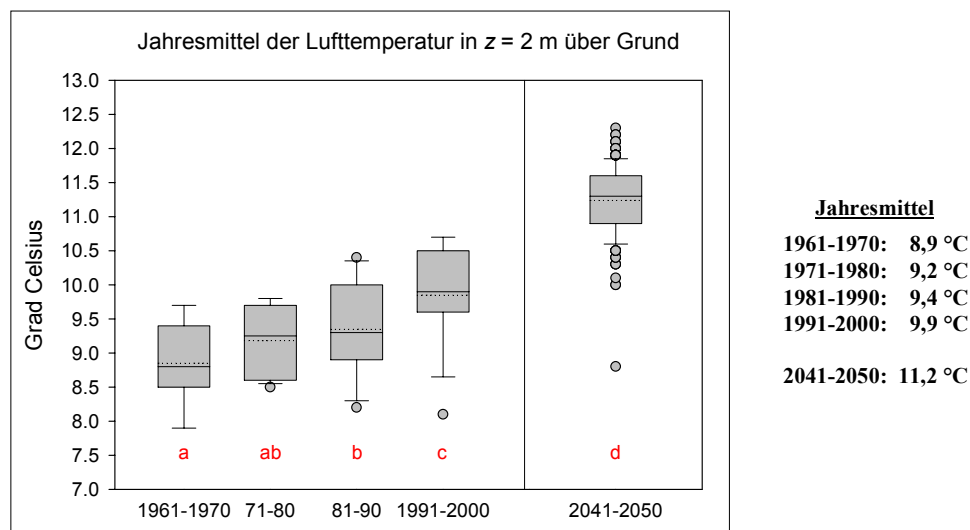


Abb. 32: Verlauf der Lufttemperatur im Zeitraum von 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen

Bei verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich die Dekaden-Mittelwerte signifikant ($p \leq 0,05$).

⁵ Ausreißer: Messwert mehr als das 1,5fache des Interquartilbereiches von der Box entfernt

Das Jahresmittel der Lufttemperatur hat sich in Gießen im Zeitraum 1961 bis 2000 um 1 °C signifikant erhöht, was an den verschiedenen rot markierten Buchstaben zu erkennen ist (Abb. 32). Tritt die von Enke (2003) prognostizierte Temperaturentwicklung für das 21. Jahrhundert ein, so ist für Gießen mit einer signifikanten Erhöhung der Lufttemperatur für die Dekade 2041-2050 auf 11,2 °C zu rechnen.

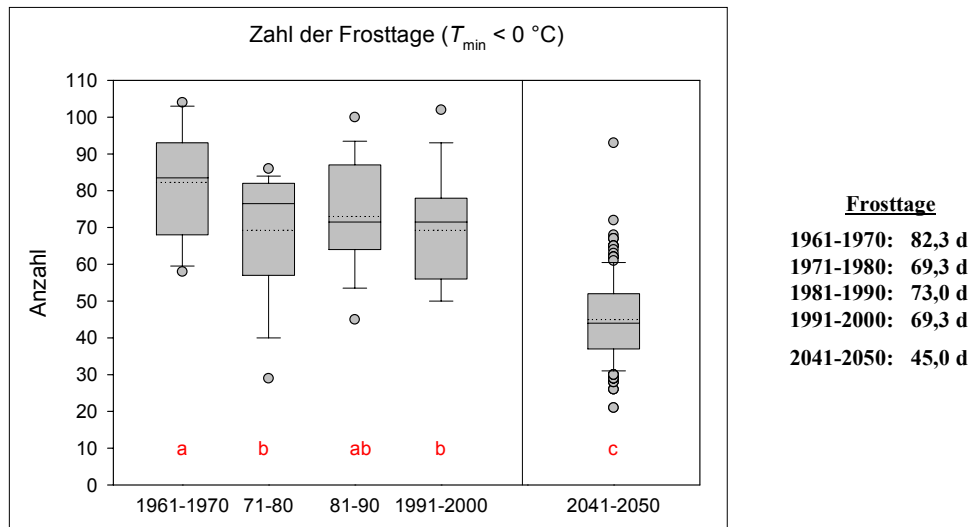


Abb. 33: Anzahl der Frosttage im Zeitraum von 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen

Bei verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich die Dekaden-Mittelwerte signifikant ($p \leq 0,05$).

Die Anzahl der Frosttage wird sich in Gießen von 69 Tagen in der Periode 1991-2000 auf 45 Tage in der Dekade 2041-2050 verringern (Abb. 33). Die Abnahme ist ebenfalls signifikant.

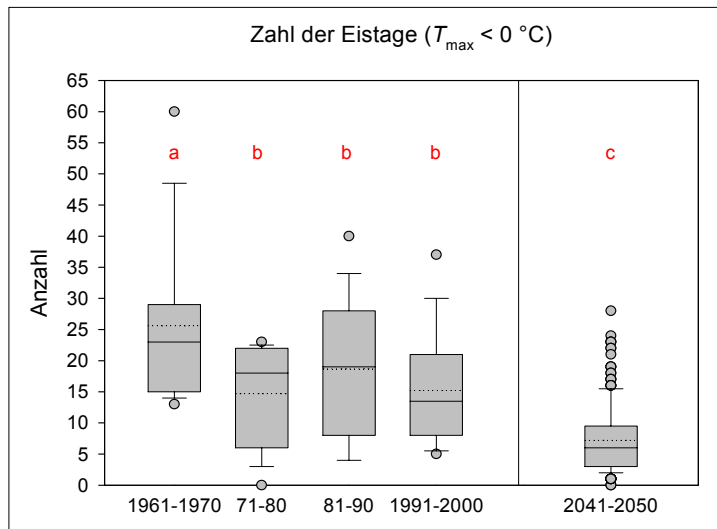
Tab. 33: Anzahl der Frosttage der Monate Januar bis Mai in den Dekaden 1961-2000 und 2041-2050

| | Januar | Februar | März | April | Mai | Jan-Mai |
|-----------|--------|---------|------|-------|-----|---------|
| 1961-2000 | 17,4 | 16,2 | 10,5 | 3,5 | 0,2 | 47,7 |
| 2041-2050 | 10,5 | 7,6 | 7,6 | 2,6 | 0,5 | 28,9 |

Ein Vergleich der beiden Zeiträume 1961-2000 und 2041-2050 zeigt, dass sich die Anzahl der Frosttage jedoch hauptsächlich in den ersten 2-3 Monaten des Jahres vermindert (Tab. 33). Die Gefahr von Spätfrösten ist deshalb auch in der Zukunft gegeben.

Zusätzlich zur Anzahl der Frosttage hat auch die Anzahl der Eistage abgenommen (Abb. 34), in den letzten 40 Jahren insgesamt um 10 Tage. Auch dieser Trend setzt sich in der Zukunft fort.

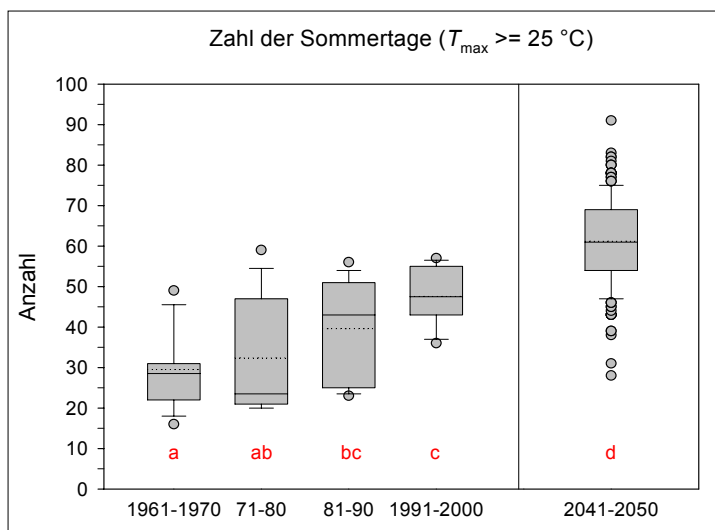
Einhergehend mit der Abnahme der Frost- und Eistage stieg die Zahl die Sommertage und heißen Tage in dem Zeitraum von 1961 bis 2000. Für die Dekade 2041-2050 wird eine weitere Erhöhung der Sommertage auf 61 Tage pro Jahr und der heißen Tage auf 12 Tage pro Jahr prognostiziert (Abb. 35 und 36).



Eistage

| | |
|------------|--------|
| 1961-1970: | 25,6 d |
| 1971-1980: | 14,7 d |
| 1981-1990: | 18,7 d |
| 1991-2000: | 15,7 d |
| 2041-2050: | 7,2 d |

Abb. 34: Anzahl der Eistage im Zeitraum von 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
Bei verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich die Dekaden-Mittelwerte signifikant ($p \leq 0,05$).



Sommertage

| | |
|------------|--------|
| 1961-1970: | 29,5 d |
| 1971-1980: | 32,4 d |
| 1981-1990: | 39,6 d |
| 1991-2000: | 47,6 d |
| 2041-2050: | 61,2 d |

Abb. 35: Anzahl der Sommertage im Zeitraum von 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
Bei verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich die Dekaden-Mittelwerte signifikant ($p \leq 0,05$).

Die Veränderungen in der Lufttemperatur haben Auswirkungen auf den Beginn und die Dauer der thermischen Vegetationsperiode. Die thermische Vegetationsperiode beginnt, wenn das Tagesmittel der Lufttemperatur die $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - Schwelle nachhaltig überschreitet und endet mit der Unterschreitung der $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - Schwelle (Chmielewski & Köhn 2000).

Im Untersuchungszeitraum 1961-2000 ist eine Verfrühung des Beginns der thermischen Vegetationsperiode um fast 2 Wochen zu verzeichnen. Diese ist jedoch nicht signifikant, was durch die rot markierten Buchstaben dargestellt ist. Für die Dekade 2041-2050 wird sich der Beginn der thermischen Vegetationsperiode signifikant verfrühen, im Mittel auf den 31.1. (Abb. 37).

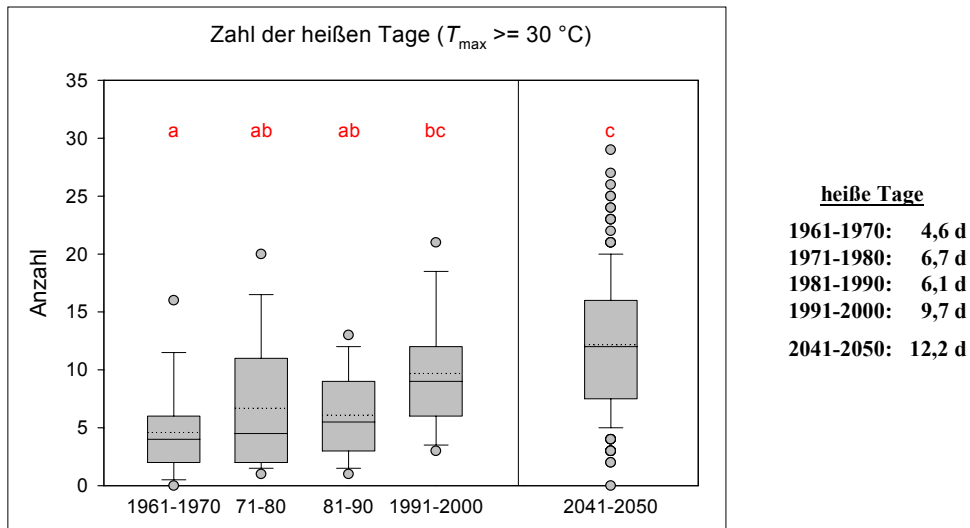


Abb. 36: Anzahl der heißen Tage im Zeitraum von 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
Bei verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich die Dekaden-Mittelwerte signifikant ($p \leq 0,05$).

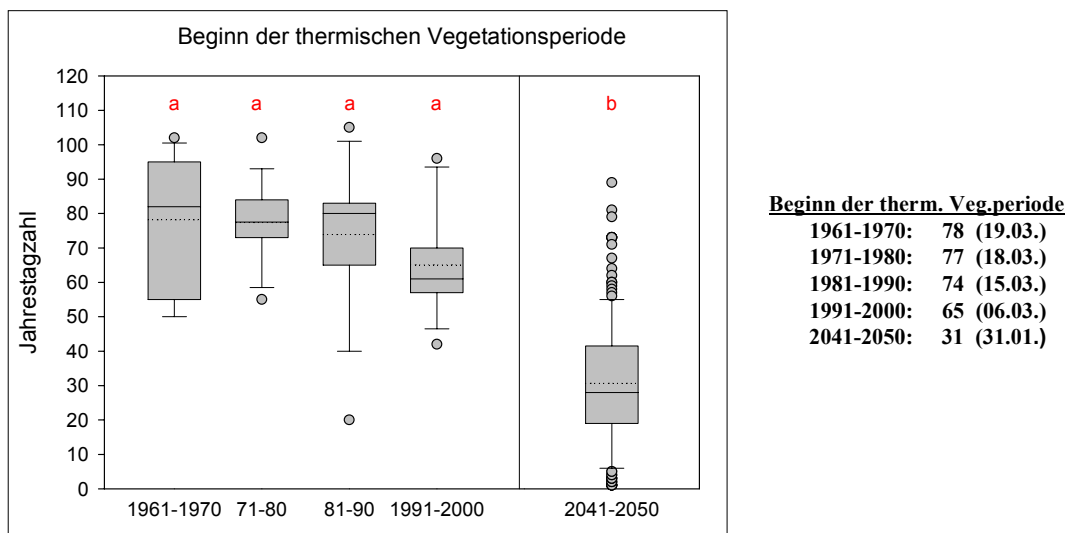


Abb. 37: Beginn der thermischen Vegetationsperiode im Zeitraum von 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
Bei verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich die Dekaden-Mittelwerte signifikant ($p \leq 0,05$).

Betrachtet man das Ende der thermischen Vegetationsperiode, ist für den Zeitraum 1961-2000 keine eindeutige Tendenz zu erkennen (Abb. 38). Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der phänologischen Daten in den einzelnen Naturraumgruppen wider.

In der Dekade 2041-2050 verzögert sich das Ende der thermischen Vegetationsperiode im Mittel um 3 Wochen, was insgesamt zu einer signifikanten Verlängerung der thermischen Vegetationsperiode von 235 Tagen im Zeitraum 1991-2000 auf 294 Tage in 2041-2050 führt (Abb. 39).

Im Zeitraum 1961-2000 hat sich die thermische Vegetationsperiode um fast zwei Wochen verlängert (Abb. 39). Die Ergebnisse der phänologischen Jahreszeiten zeigen im Bezug auf die Dauer der Vegetationsperiode kein einheitliches Bild. Während in den meisten

Naturraumgruppen eine Verlängerung beobachtet werden konnte, bleibt bei einigen die Vegetationslänge annähernd gleich. Im Taunus ist sogar eine Verkürzung zu beobachten.

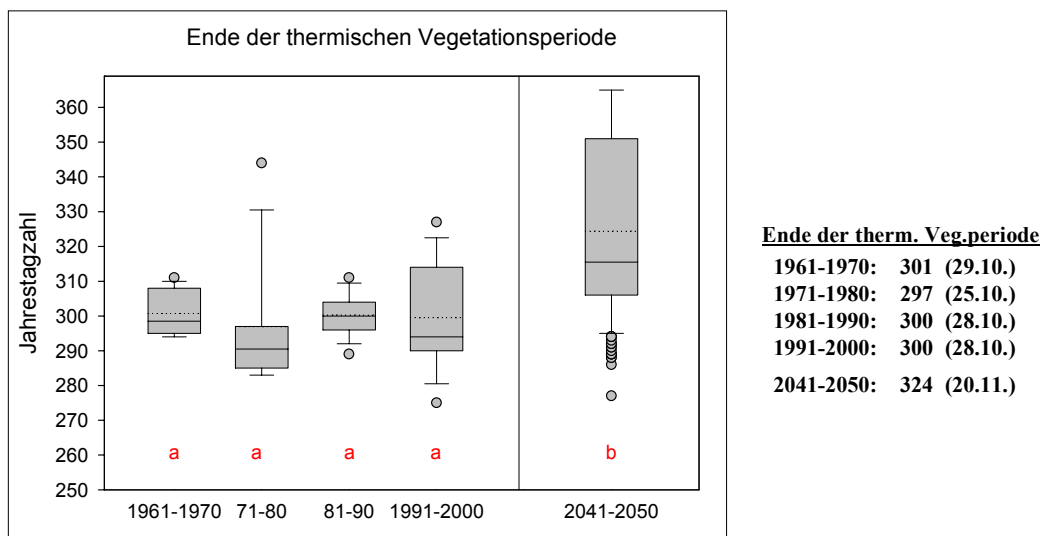


Abb. 38: Ende der thermischen Vegetationsperiode im Zeitraum von 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
Bei verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich die Dekaden-Mittelwerte signifikant ($p \leq 0,05$).

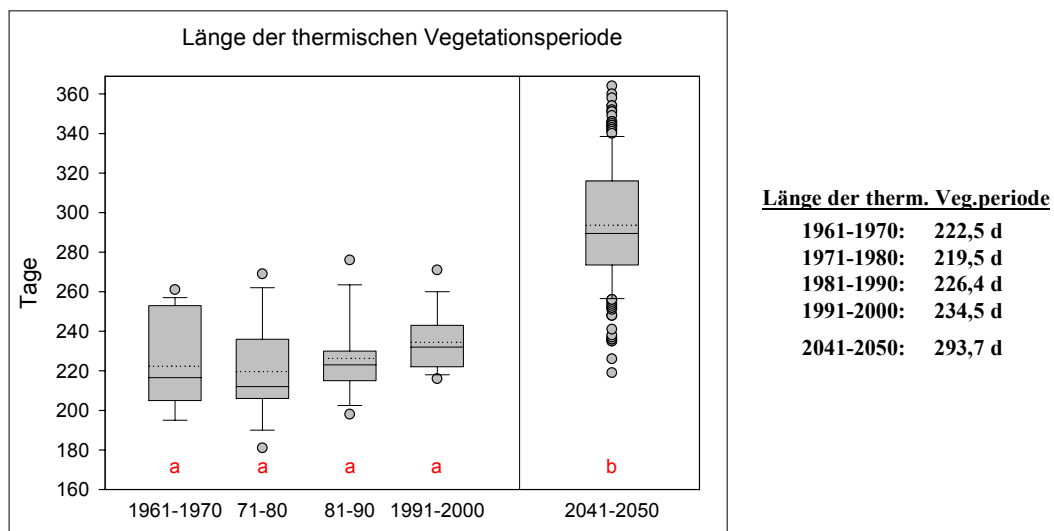


Abb. 39: Länge der thermischen Vegetationsperiode im Zeitraum von 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
Bei verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich die Dekaden-Mittelwerte signifikant ($p \leq 0,05$).

4.4 Abschätzung des zukünftigen Beginns der Phänophasen am Beispiel des Naturraums 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

4.4.1 Modellentwicklung

Für den Beginn der Frühlingsphase ist der Temperaturverlauf im Zeitraum zwischen Februar und April am bedeutendsten (Chmielewski et al. 2004b). Aufgrund der Annahme, dass die

Ruhephase der Pflanzen bis zum Ende des Vorjahres abgeschlossen ist und sie folglich auf höhere Temperaturen im Januar reagieren können, wurde der 01.01. als Starttag definiert (vgl. Chmielewski et al. 2004a). Die Frühlingsphase wurde durch den Blühbeginn der Hasel charakterisiert. Das optimierte Modell ($R^2 = 0,80$) berechnete sich für eine Basistemperatur von $0\text{ }^\circ\text{C}$ und einer effektiven Temperatursumme von $112,4\text{ }^\circ\text{C}$ mit einem mittleren Modellfehler (RMSE) von 9,2 Tagen und einem mittlerem absoluten Fehler (MAE) von 7,3 Tagen (Abb. 40). Das R^2 von 0,80 besagt, dass 80 % der Varianz in den beobachteten Daten durch das Modell erklärt wird.

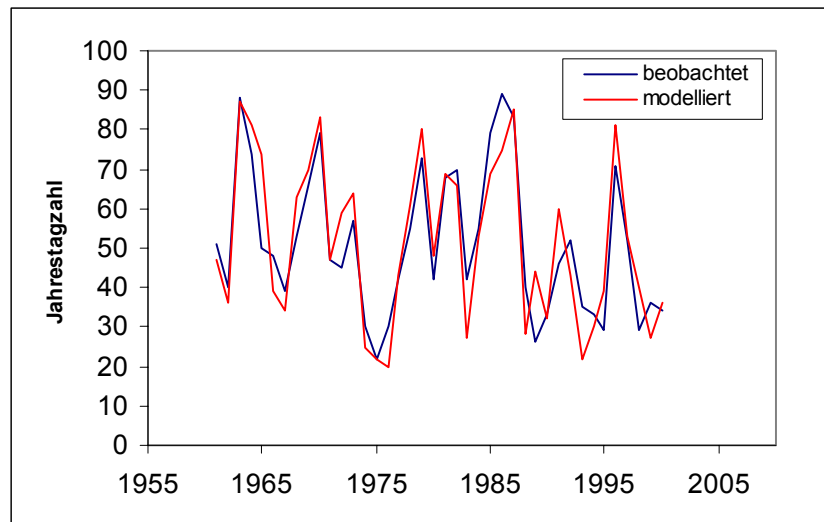


Abb. 40: Berechneter (rote Linie) und beobachteter (blaue Linie) Blühbeginn der Haselnuss im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal), ($T_B = 0\text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 112,4\text{ }^\circ\text{C}$, RMSE = 9,2 Tage, MAE = 7,3 Tage, $R^2 = 0,80$)

Für die Modellierung der Sommerphase, repräsentiert durch den Blühbeginn des Schwarzen Holunders, diente ebenfalls der 01.01. als Starttag. Bei einer Basistemperatur von $2,6\text{ }^\circ\text{C}$ (Abb. 41) und einer Temperatursumme von $675,2\text{ }^\circ\text{C}$ war der mittlere Modellfehler (RMSE) mit 4,4 Tagen am kleinsten.

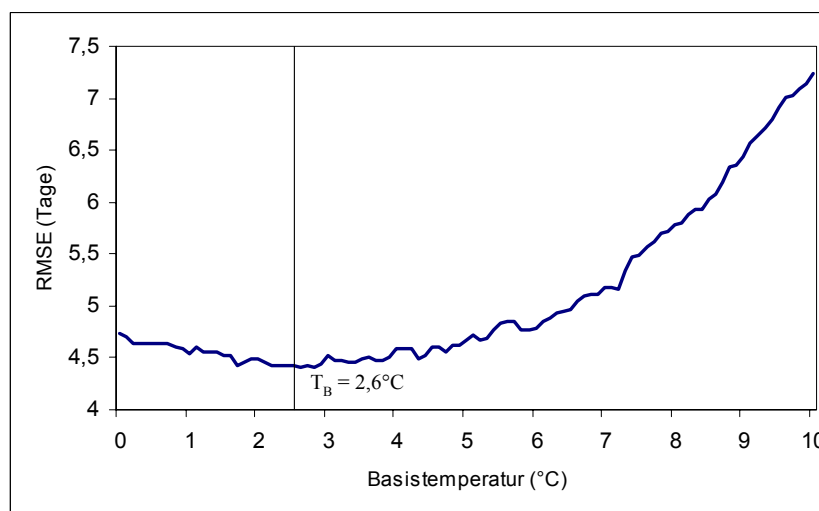


Abb. 41: Bestimmung der Basistemperatur für den Blühbeginn des Schwarzen Holunders ($T_B = 2,6\text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 675,2\text{ }^\circ\text{C}$, RMSE = 4,4 Tage, MAE = 3 Tage)

Die beobachteten und durch das Modell berechneten Eintrittstermine des Blühbeginns des Schwarzen Holunders zeigen nur geringe Differenzen auf (Abb. 42).

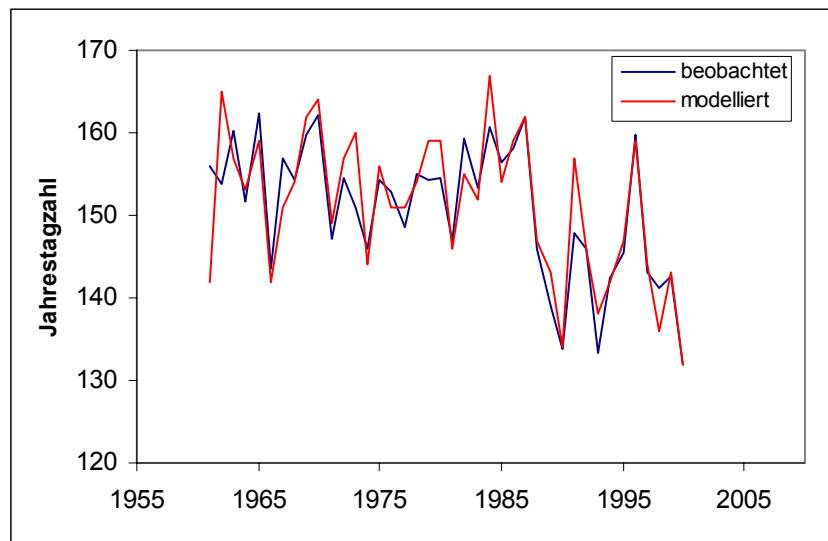


Abb. 42: Berechneter (rote Linie) und beobachteter (blaue Linie) Blühbeginn des Schwarzen Holunders im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)
 ($T_B = 2,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_S = 675,2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\text{RMSE} = 4,4 \text{ Tage}$, $\text{MAE} = 3 \text{ Tage}$, $R^2 = 0,76$)

Die beiden Temperatursummenmodelle beschreiben die Gegebenheiten trotz der Subjektivität des Beobachters, des unterschiedlichen genetischen Materials und aufgrund dessen, dass in mehreren Stationen nicht alle Jahre beobachtet wurden, gut. Sie erklären die Variabilität der Eintrittstermine zu 80 % bzw. 76 %.

Der Beginn der Herbst- und Winterphasen wurde mit Regressionsmodellen abgeschätzt, weil kein entsprechendes Temperatursummenmodell berechnet werden konnte. Für die Berechnung des Eintrittstermins der jeweiligen Phänophase (P_i) kann eine vorausgehende Phase (P_{i-1}) und der Einfluss der Lufttemperatur in den nachfolgenden Monaten (T_1, T_2, \dots) berücksichtigt werden (Chmielewski et al. 2004a).

$$P_i = a_0 + a_1 * P_{i-1} + a_2 * T_1 + a_3 * T_2$$

Die Regressionsmodelle wurden mit Hilfe der multiplen Regression und "backward selection" entwickelt. Dabei zeigte sich, dass die Temperatur weder auf den Beginn des Herbstes, noch auf den der Vegetationsruhe einen Einfluss hatte. Bei "Vernachlässigung" des Faktors Temperatur war jeweils das R^2 größer.

Der Beginn des Früh- und Vollherbstes wurde durch den Beginn der Fruchtreife des Schwarzen Holunders charakterisiert (Abb. 43). Dabei wurde der Blühbeginn des Schwarzen Holunders von 1971-2000 berücksichtigt, der über das Temperatursummenmodell ermittelt wurde.

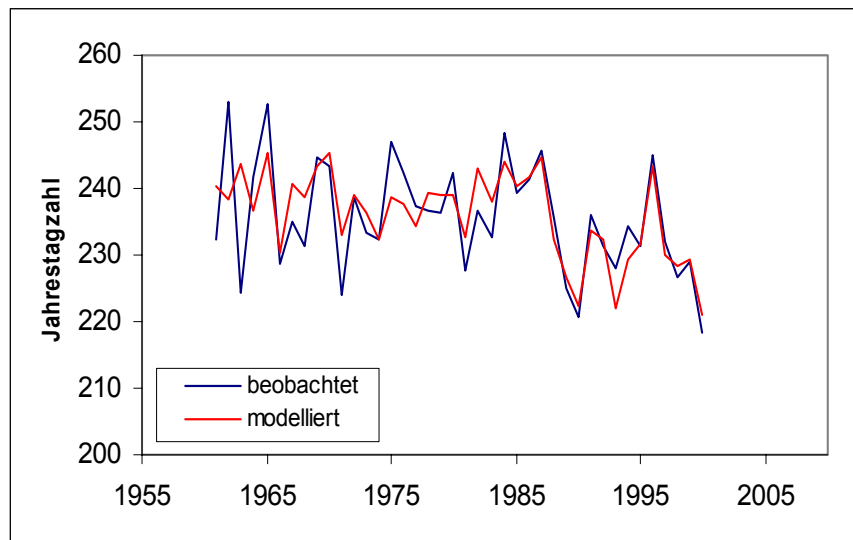


Abb. 43: Berechneter (rote Linie) und beobachteter (blaue Linie) Beginn der Fruchtreife des Schwarzen Holunders im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal),
 (Fruchtreife (Schwarzer Holunder) = $115,541 + 0,799005 \cdot \text{Blühbeginn (Schwarzer Holunder)}$)
 RMSE = 3,9 Tage, MAE = 3 Tage, $R^2 = 0,74$)

Nach diesem Verfahren konnte auch der Beginn des Spätherbstes und der Vegetationsruhe abgeschätzt werden, jedoch wurde das Regressionsmodell über den Blühbeginn des Schwarzen Holunders im Zeitraum 1961 bis 2000 berechnet. Der Spätherbst und das Vegetationsende wurden durch den Beginn der Blattverfärbung der Stiel-Eiche dargestellt (Menzel et al. 2001), da die Modellierung über die 3 Phasen, mit denen der Beginn der Vegetationsruhe in der Regel charakterisiert wird, nicht möglich war: Der Winterweizen (Beginn des Auflaufens) erscheint für die Modellierung aufgrund der sich immer wieder ändernden Sortenwahl und möglichen Änderungen im Management wenig geeignet zu sein. Die anderen beiden Zeigerpflanzen für den Beginn der Vegetationsruhe, Apfel spätreifend (Blattfall) und Stiel-Eiche (Blattfall), wurden in Hessen erst seit 1991 beobachtet. Dieser Beobachtungszeitraum von 10 Jahren war für die Entwicklung eines Modells zu kurz.

In dem entwickelten Modell ist die Variabilität des Vegetationsendes zu 27 % ($R^2=0,27$) durch den Blühbeginn des Schwarzen Holunders erklärbar. Der mittlere Modellfehler beträgt 5 Tage (Abb. 44).

Das Modell für den Früh- und Vollherbst ist gut, da es zu 74 % die Variabilität in den Eintrittsterminen erklärt (Abb. 43). Der Beginn des Spätherbstes und das Vegetationsende hingegen sind sehr unsicher. Das Modell beschreibt die Variabilität lediglich zu 27 % (Abb. 44).

Die Modelle wurden für die beiden Zeiträume 1961-1990 und 1991-2000 getestet. Im Zeitraum 1961-1990 beträgt die Differenz zwischen beobachteten und modellierten Eintrittsterminen maximal einen Tag (Tab. 34). Dies führt dazu, dass sich die Länge der Jahreszeiten anhand der modellierten Daten lediglich um 2 Tage für den Früh- und Vollherbst, dessen Länge durch die "unsichere Prognose" für den Beginn des Spätherbstes und der Vegetationsruhe bestimmt wird, von jener der beobachteten Daten unterscheidet (Abb. 45).

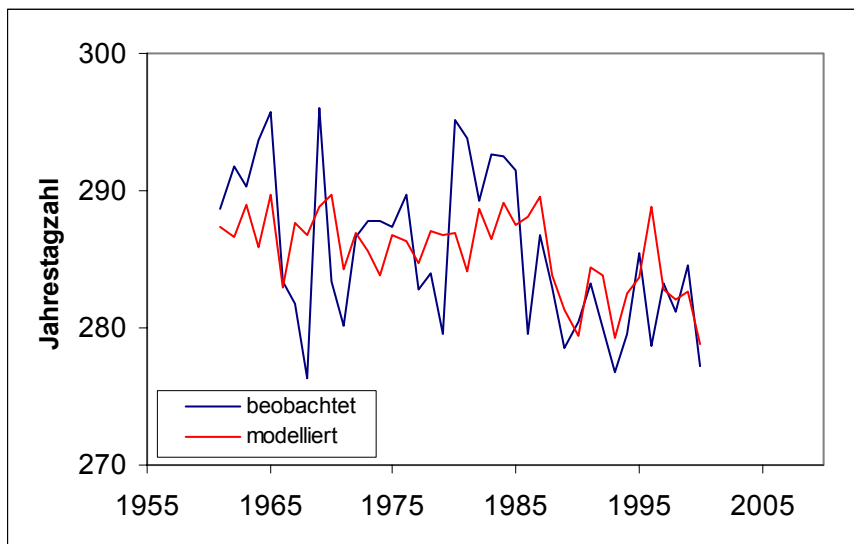


Abb. 44: Berechneter (rote Linie) und beobachteter (blaue Linie) Beginn der Blattverfärbung der Stiel-Eiche im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal),
 (Blattverfärbung (Stiel-Eiche) = $231,195 + 0,360337 \cdot \text{Blühbeginn (Schwarzer Holunder)}$)
 RMSE = 5 Tage, MAE = 3,9 Tage, $R^2 = 0,27$)

Tab. 34: Vergleich von beobachteten und modellierten phänologischen Eintrittsterminen im Zeitraum 1961-1990 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

| Jahreszeit | verwendete Zeigerpflanze | Eintrittsdatum der Phänophase 1961-1990 | |
|--------------------------------|----------------------------------|---|------------|
| | | beobachtet | modelliert |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 54 | 54 |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 153 | 154 |
| Früh- und Vollherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 237 | 238 |
| Spätherbst und Vegetationsruhe | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 287 | 286 |

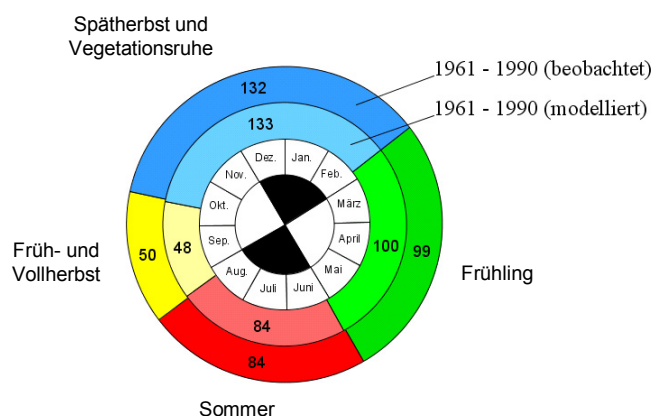


Abb. 45: Phänologische Uhr mit beobachteten und modellierten phänologischen Eintrittsterminen im Zeitraum 1961-1990 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

In dem Zeitraum 1991-2000 betragen die Abweichungen der modellierten Eintrittstage zu den beobachteten maximal 2 Tage (Tab. 35). Im Bezug auf die Länge der Jahreszeiten entstehen dadurch Unterschiede von 1-2 Tagen (Abb. 46). Die Differenz für die Dauer des Früh- und Vollherbstes beträgt 3 Tage, da dessen Länge durch die "unsichere Prognose" für den Beginn des Spätherbstes und der Vegetationsruhe bestimmt wird.

Tab. 35: Vergleich von beobachteten und modellierten phänologischen Eintrittsterminen im Zeitraum 1991-2000 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

| Jahreszeit | verwendete Zeigerpflanze | Eintrittsdatum der Phänophase 1991-2000 | |
|--------------------------------|----------------------------------|---|------------|
| | | beobachtet | modelliert |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 42 | 43 |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 143 | 144 |
| Früh- und Vollherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 231 | 230 |
| Spätherbst und Vegetationsruhe | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 281 | 283 |

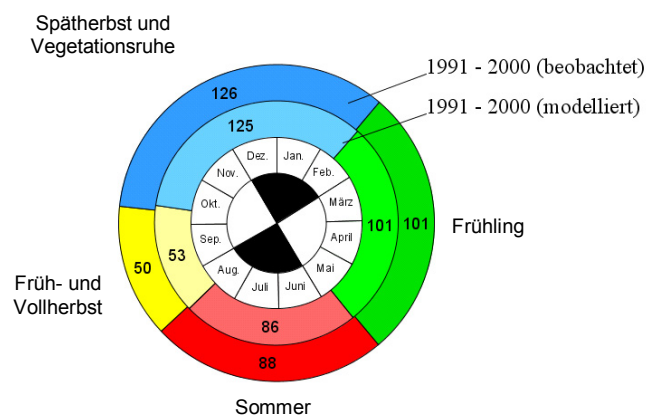


Abb. 46: Vergleich der beobachteten und modellierten phänologischen Eintrittstermine im Zeitraum 1991-2000 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Die sehr geringen Abweichungen der modellierten zu den beobachteten Daten lassen eine Prognose für die Dekade 2041-2050 sinnvoll erscheinen.

Für die Abschätzung des mittleren Beginns des Frühlings und des Sommers wurden die in den Temperatursummenmodellen über den Zeitraum 1961-2000 berechnete Basistemperatur und Temperatursumme für die jeweilige phänologische Phase und die von der Firma Meteor-Research (Enke 2003) modellierten Tagesmitteltemperaturen für die meteorologische Station Gießen für die Dekade 2041-2050 verwendet. Aufgrund der 10 Simulationen mit je 20 Realisationen erhielt man für die Dekade 2041-2050 200 mögliche Eintrittsdaten, welche gemittelt wurden.

Der mittlere Beginn des Früh- und Vollherbstes und des Spätherbstes und der Vegetationsruhe wurden abgeschätzt, indem die modellierten Daten des Blühbeginns des Schwarzen Holunders in die jeweilige Regressionsgleichung eingegangen sind.

4.4.2 Entwicklung des Vegetationsverlaufs in der Dekade 2041-2050 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Im Marburg-Gießener-Lahntal haben sich alle Jahreszeiten im Zeitraum 1991-2000 im Vergleich zu 1961-1990 vorverlagert (Tab. 36, Abb. 47). Der Beginn des Frühlings hat sich mit 2 Wochen am stärksten verfrüht. Das frühere Eintreten der Jahreszeiten nimmt im Jahresverlauf ab, der Spätherbst und die Vegetationsruhe beginnen in der Dekade 1991-2000 lediglich eine Woche früher.

Beim Vergleich der Jahreszeiten bezogen auf die Dauer zeigt sich, dass sich Frühling und Sommer um einige Tage verlängert haben. Während der Früh- und Vollherbst in ihrer Dauer unverändert geblieben sind, haben sich der Spätherbst und die Vegetationsruhe um etwa 6 Tage verkürzt. Die Vegetationsperiode hat sich folglich durch die Verlängerung des Frühlings und des Sommers ausgedehnt.

Tab. 36: Vergleich von phänologischen Eintrittsterminen im Zeitraum 1961-1990 und 1991-2000 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

| Jahreszeit | verwendete Zeigerpflanze | Eintrittsdatum der Phänophase | |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------|
| | | 1961-1990 | 1991-2000 |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 54 | 42 |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 153 | 143 |
| Früh- und Vollherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 237 | 231 |
| Spätherbst und Vegetationsruhe | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 287 | 281 |

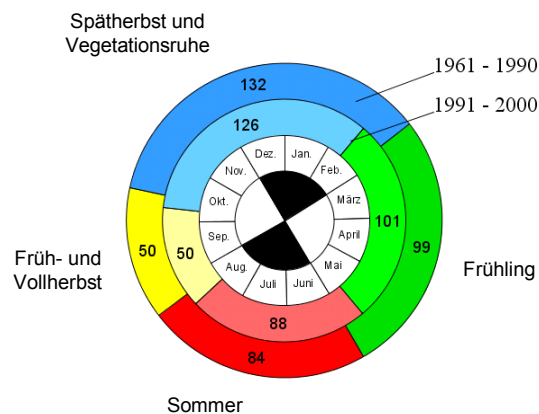


Abb. 47: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr für den beobachteten Zeitraum 1961-2000 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Diese Trends setzen sich in der Zukunft weiter fort (Tab. 37, Abb. 48). In der Dekade 2041-2050 verfrüht sich der Beginn des Frühlings gegenüber 1991-2000 im Mittel um weitere 2 Wochen auf den 27. Januar und verlängert sich um 6 Tage. Die Eintrittstermine von Sommer und Frühherbst werden sich ebenfalls weiter vorverlagern. Unter der Annahme, dass der Beginn des Spätherbstes richtig abgeschätzt wurde (mit Fragezeichen markiert), verlängern sich der Früh- und der Vollherbst im Mittel um eine Woche. Damit verlängert sich die Vegetationsperiode um insgesamt 2 Wochen.

Tab. 37: Vergleich von phänologischen Eintrittsterminen im Zeitraum 1991-2000 (beobachtet) und 2041-2050 (modelliert) für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

| Jahreszeit | verwendete Zeigerpflanze | Eintrittsdatum der Phänophase | |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | | 1991-2000 (beobachtet) | 2041-2050 (modelliert) |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 42 | 27 |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 143 | 134 |
| Früh- und Vollherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 231 | 223 |
| Spätherbst und Vegetationsruhe | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 281 | 280 |

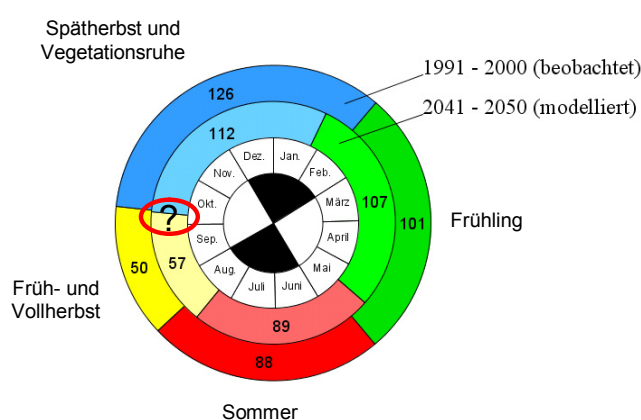


Abb. 48: Modellierte vereinfachte doppelte phänologische Uhr für den beobachteten Zeitraum 1991-2000 und den modellierten Zeitraum 2041-2050 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)
(Das Fragezeichen in der inneren Uhr symbolisiert die unsichere Prognose des Beginns von Spätherbst und Vegetationsruhe)

Ähnliche Verschiebungen in der Dekade 2041-2050 zeigt auch die thermische Vegetationsperiode. Ihr Beginn wird sich in dem genannten Zeitraum im Mittel auf den 31. Januar verfrühen (Abb. 37). Dadurch und in Folge eines verzögerten Endes wird sich die thermische Vegetationsperiode in der Dekade 2041-2050 gegenüber 1991-2000 um fast 8 Wochen verlängern. Eine Verlängerung der Vegetationsperiode um 2 Wochen ist daher durchaus möglich. Abweichungen zeigen sich lediglich im Bezug auf das Ende der Vegetation. Während das Modell keine Verschiebungen im Vegetationsende prognostiziert, wird sich das Ende der thermischen Vegetationsperiode bis 2050 um 3 Wochen verzögern (Abb. 38).

4.5 Abschätzung der Spätfrostgefahr für ausgewählte Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Für den Obst-, Gemüse- und Weinbau ist vor allem der Spätfrost von besonderer Bedeutung, 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 (Chmielewski 2004, Schumacher 1989). Die Frostempfindlichkeit hängt vom phänologischen Stadium ab und steigt mit voranschreitendem Entwicklungszustand der Blüten, da die empfindlichen Reproduktionsorgane weniger gegen Umwelteinflüsse geschützt sind. Für die geschlossenen Knospen des Apfels sind beispielsweise erst Temperaturen unter $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, für die offenen Blüten bereits Temperaturen unter $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ kritisch (Schumacher 1989).

Da sich die Anzahl der Spätfröste in der Zukunft in den Monaten März bis Mai kaum vermindern (Tab. 33), der Vegetationsbeginn aber früher einsetzt, ist eine potentielle Spätfrostgefahr für Pflanzen wahrscheinlich. Daher wurde für einige ausgewählte Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348 das Auftreten von Frost im Zeitraum von 10 Tagen vor und nach dem Zeitpunkt des Blühbeginnes untersucht. Für die Auswertung des Zeitraums 1961-2000 wurden die beobachteten phänologischen Daten und die gemessenen Temperaturdaten der meteorologischen Station Gießen herangezogen. Der Blühbeginn in der Dekade 2041-2050 wurde mit Hilfe von Temperatursummenmodellen und mit den von der Firma Meteo-Research modellierten Tagesminimumtemperaturen für die meteorologische Station Gießen (Enke 2003) abgeschätzt.

Der Blühbeginn der untersuchten Obstarten hat sich in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts um 6 bis 9 Tage pro Dekade im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 verfrüht. Dieser Trend setzt sich in der Zukunft fort. Im Zeitraum 2041-2050 wird diese phänologische Phase im Vergleich zu der Dekade 1991-2000 um weitere 15 bis 19 Tage früher einsetzen (Tab. 38).

Tab. 38: Blühbeginn verschiedener Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348

| | Apfel | Birne | Süß- kirsche | Sauer- kirsche | Rote Johannis- beere | Stachel- beere |
|---------------|---|--------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Dekade | mittlerer Beginn der Blüte (Tag im Jahr) | | | | | |
| 1961-1970 | 124 | 120 | 115 | 120 | 111 | 108 |
| 1971-1980 | 122 | 116 | 112 | 117 | 108 | 104 |
| 1981-1990 | 123 | 116 | 112 | 117 | 108 | 106 |
| 1991-2000 | 115 | 111 | 104 | 112 | 101 | 100 |
| 1961-1990 | 123 | 117 | 113 | 118 | 109 | 106 |
| 2041-2050 * | 100 | 93 | 86 | 94 | 82 | 81 |

* modelliert

Betrachtet man den Zeitraum von 10 Tagen vor und nach Blühbeginn, so zeigt sich, dass insbesondere in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts die Gefahr durch Spätfröste zugenommen hat (Tab. 39). Diese Gefährdung der Vegetation ist auch in der Zukunft vorhanden. In der Dekade 2041-2050 treten im Mittel je nach Obstart 6 bis 9 Jahre mit Spätfrost zur Zeit des Blühbeginns (± 10 Tage) auf. In der Gesamtschau sind im Vergleich zu den letzten 40 Jahren keine gravierenden Änderungen zu beobachten (Tab. 39): Ein Vergleich der Dekade 2041-2050 mit dem Zeitraum 1991-2000 zeigt eine leichte Abnahme der Anzahl der Jahre mit Spätfrost, ein Vergleich dieser Dekade mit der Klimanormalperiode 1961-1990 dagegen eine leichte Zunahme der Spätfrostgefahr. Für den Apfel nimmt die Gefahr bei dieser

Betrachtungsweise durch die annähernde Verdopplung der Anzahl der Jahre mit Spätfrost im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 deutlich zu (Tab. 39).

Tab. 39: Gefahr von Spätfrost ($T_{\min} < 0\text{ °C}$) bei verschiedenen Obstarten im Zeitraum von 10 Tagen vor und nach Blühbeginn im Naturraum 348

| | Apfel | Birne | Süß- kirsche | Sauer- kirsche | Rote Johannis- beere | Stachel- beere |
|---------------|---------------------------------------|-------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| Dekade | Jahre mit Spätfrost pro Dekade | | | | | |
| 1961-1970 | 3 | 5 | 6 | 5 | 8 | 8 |
| 1971-1980 | 4 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 |
| 1981-1990 | 3 | 5 | 6 | 5 | 7 | 6 |
| 1991-2000 | 8 | 9 | 10 | 8 | 9 | 10 |
| 1961-1990 | 3,3 | 6,0 | 6,7 | 6,0 | 7,3 | 7,3 |
| 2041-2050 * | 6,3 | 7,4 | 8,1 | 7,4 | 8,4 | 8,7 |

* berechnet aus 10 Simulationen mit je 20 Realisationen

Eine Differenzierung zwischen Spätfrost verschiedener Stärke zeigt in der Dekade 2041-2050 im Vergleich zur Periode 1991-2000 eine leichte Gefährdungsabnahme durch leichte Spätfroste, jedoch eine Zunahme der Gefahr durch mittlere und strenge Spätfroste (Tab. 40). Ein Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 hingegen deutet auch eine Gefährdungszunahme durch leichte Spätfroste an.

Tab. 40: Gefahr von Spätfrost verschiedener Stärke bei verschiedenen Obstarten im Zeitraum 10 Tagen vor und nach Blühbeginn im Naturraum 348

| | Apfel | Birne | Süß- kirsche | Sauer- kirsche | Rote Johannis- beere | Stachel- beere |
|---------------|--|-------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| Dekade | Jahre mit Spätfrost pro Dekade | | | | | |
| | leichter Spätfrost ($0\text{ °C} > T_{\min} \geq -2\text{ °C}$) | | | | | |
| 1961-1970 | 3 | 5 | 5 | 5 | 8 | 8 |
| 1971-1980 | 4 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 |
| 1981-1990 | 3 | 5 | 6 | 5 | 7 | 6 |
| 1991-2000 | 8 | 9 | 10 | 8 | 8 | 9 |
| 1961-1990 | 3,3 | 6,0 | 6,3 | 6,0 | 7,3 | 7,3 |
| 2041-2050 * | 6,2 | 7,3 | 7,5 | 7,3 | 7,8 | 8,0 |
| | mittlerer Spätfrost ($-2\text{ °C} > T_{\min} \geq -4\text{ °C}$) | | | | | |
| 1961-1970 | 0 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 |
| 1971-1980 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 |
| 1981-1990 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 1991-2000 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 1961-1990 | 0,7 | 1,7 | 2,0 | 1,0 | 2,7 | 3,3 |
| 2041-2050 * | 1,5 | 2,7 | 3,6 | 2,5 | 4,7 | 5,2 |
| | strenger Spätfrost ($T_{\min} < -4\text{ °C}$) | | | | | |
| 1961-1970 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1971-1980 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1981-1990 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1991-2000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1961-1990 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,3 |
| 2041-2050 * | 0,3 | 0,5 | 0,9 | 0,5 | 1,6 | 1,4 |

* berechnet aus 10 Simulationen mit je 20 Realisationen

Besonders auffällig ist, dass von den strengen Spätfrösten, welche in den letzten 40 Jahren sehr selten auftraten und nur für einige Obstarten eine Gefahr darstellten, in der Dekade 2041-2050 trotz der Temperaturerwärmung für alle untersuchten Obstarten ein stärkeres Gefahrenpotential ausgeht (Tab. 40).

Betrachtet man nur den Zeitraum nach Beginn der Blüte, so erhöht sich die Gefahr durch Spätfrost ($T_{\min} < 0 \text{ °C}$) besonders stark für den Apfel (Tab. 41): Während in den letzten 40 Jahren lediglich 2 Jahre mit Spätfrostereignissen beobachtet werden konnten, werden für die Dekade 2041-2050 im Mittel ca. 3 Jahre mit Spätfrost prognostiziert. Bei Birne und Sauerkirsche erhöht sich im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 ebenfalls die Spätfrostgefahr in der Zukunft, bei allen übrigen untersuchten Arten bleibt sie nahezu unverändert.

Tab. 41: Gefahr von Spätfrost ($T_{\min} < 0 \text{ °C}$) bei verschiedenen Obstgehölzen und Beerensträuchern im Zeitraum zwischen Blühbeginn und 10 Tagen danach im Naturraum 348

| | Apfel | Birne | Süß- kirsche | Sauer- kirsche | Rote Johannis- beere | Stachel- beere |
|---------------|---------------------------------------|-------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| Dekade | Jahre mit Spätfrost pro Dekade | | | | | |
| 1961-1970 | 1 | 2 | 2 | 1 | 5 | 6 |
| 1971-1980 | 0 | 3 | 6 | 3 | 5 | 6 |
| 1981-1990 | 1 | 2 | 4 | 1 | 5 | 3 |
| 1991-2000 | 0 | 2 | 7 | 3 | 6 | 6 |
| 1961-1990 | 0,7 | 2,3 | 4,0 | 1,7 | 5,0 | 5,0 |
| 2041-2050 * | 2,6 | 4,4 | 4,9 | 4,4 | 4,8 | 5,3 |

* berechnet aus 10 Simulationen mit je 20 Realisationen

Die Gefahr durch leichten Spätfrost nimmt bei einigen Arten, wie beispielsweise Apfel, Birne und Sauerkirsche deutlich zu, unabhängig von der Referenzperiode. Der Einfluss der mittleren Spätfröste hingegen bleibt in der Zukunft nahezu unverändert. In den letzten 40 Jahren waren im Zeitraum der Blüte keine strengen Spätfröste zu beobachten. Es ist jedoch die Tendenz erkennbar, dass diese in der Zukunft während der Blütezeit auftreten können (Tab. 42).

Insgesamt zeigt sich, dass bei allen untersuchten Obstarten trotz der prognostizierten Klimaerwärmung durch die Verfrühung der Blüte die Gefahr von Spätfrösten auch in der Zukunft vorhanden ist.

5 Zusammenfassende Bewertung

Das Klima in Hessen hat sich in dem Untersuchungszeitraum (1961-2000) nachweislich verändert. Am Beispiel von Gießen konnte gezeigt werden, dass die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur um 1 °C in den letzten 4 Dekaden gestiegen sind und damit verbunden die Anzahl der Sommertage und der heißen Tage zugenommen und die der Frosttage abgenommen hat. Die thermische Vegetationsperiode hat sich infolge eines früheren Vegetationsbeginns um 12 Tage verlängert.

Tab. 42: Gefahr von Spätfrost verschiedener Stärke bei verschiedenen Obstgehölzen und Beerensträuchern im Zeitraum zwischen Blühbeginn und 10 Tagen danach im Naturraum 348

| | Apfel | Birne | Süß- kirsche | Sauer- kirsche | Rote Johannis- beere | Stachel- beere |
|---------------|--|-------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| Dekade | Jahre mit Spätfrost pro Dekade | | | | | |
| | leichter Spätfrost ($0^{\circ}\text{C} > T_{\min} \geq -2^{\circ}\text{C}$) | | | | | |
| 1961-1970 | 1 | 2 | 2 | 1 | 5 | 6 |
| 1971-1980 | 0 | 3 | 6 | 3 | 5 | 6 |
| 1981-1990 | 1 | 2 | 4 | 1 | 5 | 3 |
| 1991-2000 | 0 | 2 | 7 | 3 | 6 | 6 |
| 1961-1990 | 0,7 | 2,3 | 4,0 | 1,7 | 5,0 | 5,0 |
| 2041-2050 * | 2,6 | 4,4 | 4,6 | 4,4 | 4,4 | 4,8 |
| | mittlerer Spätfrost ($-2^{\circ}\text{C} > T_{\min} \geq -4^{\circ}\text{C}$) | | | | | |
| 1961-1970 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1971-1980 | 0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 |
| 1981-1990 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1991-2000 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 1961-1990 | 0,3 | 0,3 | 0,7 | 0,3 | 1,3 | 1,3 |
| 2041-2050 * | 0,3 | 1,0 | 1,4 | 1,0 | 1,8 | 2,1 |
| | strenger Spätfrost ($T_{\min} < -4^{\circ}\text{C}$) | | | | | |
| 1961-1970 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1971-1980 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1981-1990 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1991-2000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1961-1990 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 2041-2050 * | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,4 |

* berechnet aus 10 Simulationen mit je 20 Realisationen

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Pflanzen auf die Klimaänderung in Hessen reagiert haben. In der Pflanzenentwicklung konnten - wie nochmals in Tab. 43 zusammengefasst - in den letzten 40 Jahren zeitliche Verschiebungen beobachtet werden.

Der Eintritt der phänologischen Phasen hat sich verfrüht, wobei die Frühjahrsphasen den stärksten Trend zeigen. 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 manchen Regionen sogar verzögert, was eine Folge milder Witterung sein könnte.

Die klimatischen Veränderungen haben folglich unterschiedliche Auswirkungen auf die Pflanzen. Nicht alle Pflanzenphasen reagieren mit einer früheren Entwicklung. Die Blattverfärbung der Stiel-Eiche setzt in vielen Regionen Hessens später ein. Am Beispiel dieser Phase wird deutlich, dass sich die Pflanzen regional unterschiedlich entwickelt haben. Dadurch kommt es zu gegensätzlichen Trends in benachbarten Naturräumen. Dies spiegelt sich auch im Bezug auf die Dauer der Vegetationsperiode wider. Während sich die Vegetationszeit in manchen Regionen verlängert hat, ist sie wiederum in anderen unverändert geblieben. Im Taunus konnte sogar eine Verkürzung der Vegetationsperiode beobachtet werden.

Tab. 43: Beginn der phänologischen Jahreszeiten in Hessen

| Phänologische Jahreszeit | Zeigerpflanze und phänologische Phase | Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ) | | | Trend | |
|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 1961 - 1990 | 1991 - 2000 | Signifikanz | Tage/Dekade | Signifikanz |
| Vorfrühling | Haselnuss (Blüte) | 60 | 46 | * | -5,5 | ** |
| Erstfrühling | Forsythie (Blüte) | 95 | 84 | * | -3,9 | * |
| Vollfrühling | Apfel (Blüte) | 126 | 118 | ** | -2,2 | * |
| Frühsommer | Schwarzer Holunder (Blüte) | 157 | 148 | ** | -3,1 | ** |
| Hochsommer | Sommer-Linde (Blüte) | 180 | 171 | *** | -2,8 | ** |
| Spätsommer | Frühapfel (Pflückreife) | 222 | 217 | * | -0,4 | n.s. |
| Frühherbst | Schwarzer Holunder (Fruchtreife) | 244 | 237 | ** | -2,8 | ** |
| Vollherbst | Stiel-Eiche (Fruchtreife) | 269 | 264 | ** | -1,8 | ** |
| Spätherbst | Stiel-Eiche (Blattverfärbung) | 288 | 289 | n.s. | 0,5 | n.s. |
| Vegetationsruhe | Winterweizen (Beginn des Auflaufens) | 301 | 295 | *** | -2,5 | *** |

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

Bei Betrachtung der phänologischen Uhr für Hessen (Abb. 49) zeigt sich, dass sich die innere Uhr mit den Eintrittsdaten für die Dekade 1991-2000 im Vergleich mit der äußeren Uhr (1961-1990) entgegen den Uhrzeigersinn gedreht hat.

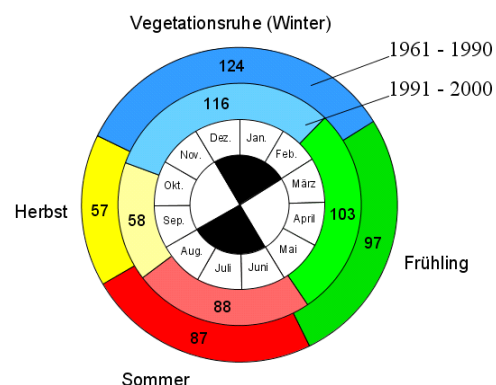


Abb. 49: Vereinfachte phänologische Uhr für das Bundesland Hessen

Die beobachteten Veränderungen in der Pflanzenentwicklung setzen sich auch in der Zukunft fort. Beispielhaft konnte für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) mit Hilfe von Modellen aufgezeigt werden, dass sich der Eintritt der Jahreszeiten weiter verfrühen wird. Der Frühling wird in der Dekade 2041-2050 im Mittel bereits am 27.01. beginnen. Der Trend zur Verlängerung der Vegetationsperiode, hauptsächlich auf dem früheren Vegetationsbeginn basierend, wird sich in der Zukunft weiter verstärken, wie in Abb. 50 nochmals illustriert.

Für den Obstbau ist der Spätfrost von besonderer Bedeutung, da Frost während der Obstblüte zu völligen Ertragsausfällen führen kann. Durch den früheren Beginn der Vegetationsperiode und damit zeitigeren Austrieb der Pflanzen wird diese Gefahr in der Zukunft trotz der prognostizierten Klimaerwärmung weiterhin bestehen: Die Anzahl der Frosttage in den ersten

5 Monaten des Jahres wird zwar in der Zukunft insgesamt weiter abnehmen, jedoch verringern sie sich hauptsächlich in den ersten 2-3 Monaten des Jahres (vgl. Tab. 33). Die Abschätzung des Auftretens von Spätfrösten zur Zeit des Blühbeginns (± 10 Tage) von ausgewählten Obstgehölzen (Apfel, Birne, Süß- und Sauerkirsche) und Beerensträuchern (Rote Johannisbeere, Stachelbeere) in der Dekade 2041-2050 zeigt, dass im Mittel je nach Obst 6 bis 9 Jahre mit Spätfrost auftreten könnten (Tab. 39). In der Gesamtschau sind im Vergleich zu den letzten 40 Jahren keine gravierenden Änderungen zu beobachten: Ein Vergleich der Dekade 2041-2050 mit dem Zeitraum 1991-2000 zeigt eine leichte Abnahme der Anzahl der Jahre mit Spätfrost, ein Vergleich dieser Dekade mit der Klimanormalperiode 1961-1990 dagegen eine leichte Zunahme der Spätfrostgefahr. Für den Apfel nimmt die Gefahr bei dieser Betrachtungsweise durch die annähernde Verdopplung der Anzahl der Jahre mit Spätfrost im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 deutlich zu. Betrachtet man nur den Zeitraum nach Beginn der Blüte, so erhöht sich - im Vergleich zur Klimanormalperiode - die Gefahr durch Spätfrost für Apfel, Birne und Sauerkirsche (Tab. 41).

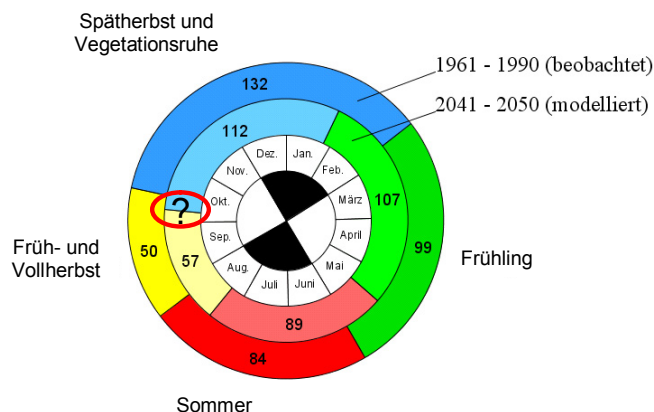


Abb. 50: Vereinfachte phänologische Uhr für die Dekaden 1961-1990 und 2041-2050 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)
(Das Fragezeichen in der inneren Uhr symbolisiert die unsichere Prognose des Beginns von Spätherbst und Vegetationsruhe)

Erhöhte Temperaturen und verminderte Niederschläge im Sommer bzw. längere Trockenperioden haben vielfältige Auswirkungen auf Pflanzen in ihren Ökosystemen zur Folge. Verallgemeinernd lässt sich sagen, dass die sich verschlechternden Wachstums- und Entwicklungsbedingungen in geringerer Biomasseproduktion resultieren könnten. Eine lang anhaltende Trockenheit im Sommer kann eine vorzeitige Reife bei Obst und Getreide verursachen, was ebenfalls Ertragseinbußen zur Folge haben könnte. Diese könnten durch den Anbau von besser angepassten Kulturen minimiert werden. Daneben sind evtl. neu angepasste Bestandesdichten, Aussaat- und Pflanztermine zu bedenken. Auch Intensivierung und Ausweitung der Bewässerung sowie bodenschonende Maßnahmen und standortangepasste Bewirtschaftungsformen zur Gewährleistung der Nährstoffverfügbarkeit auch in niederschlagsarmen, d.h. trockenen Zeiten, kann das Ertragsrisiko minimieren. Eine trocken warme Witterung kann zudem zu Massenvermehrungen und damit zu starkem Schädlingsbefall in Wäldern, aber auch in der Landwirtschaft führen. Erosionsmindernde Anbauverfahren, die das Bodengefüge schützen und damit eine gute Durchwurzelung, d.h.

gute Wasseraufnahme gewährleisten, können die Folgen von Starkniederschlagsereignissen abmildern.

Für die Wälder sind besonders die Folgen der Trockenheit problematisch. Geringe Niederschläge führen zu Wachstumsschäden und Absterben der Bäume. Diesem könnte durch Pflanzung von trockenoleranteren Arten entgegengewirkt werden.

Erhöhte Niederschläge in den Wintermonaten - wie von Enke (2003) für Hessen prognostiziert - könnten darüberhinaus Folgen für die Bestellung von Ackerflächen nach sich ziehen.

Literatur

- Ahas, R. (1999): Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological time-series analyses in Estonia. *International Journal of Biometeorology* 42, 119-123.
- 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.
- Chen, X. (1994): Untersuchungen zur zeitlich-räumlichen Ähnlichkeit von phänologischen und klimatologischen Parametern in Westdeutschland und zum Einfluss geökologischer Faktoren auf die phänologische Entwicklung im Gebiet des Taunus. *Berichte des deutschen Wetterdienstes*, Nr. 189, Offenbach am Main.
- Chmielewski, F.-M. und Köhn, W. (2000): Impact of weather on yield and yield components of winter rye. *Agricultural and Forest Meteorology* 102, 253-261
- Chmielewski, F.-M., Müller, A. und Küchler, W. (2004a): Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen. *Eigenverlag HU Berlin*, 5-14.
- Chmielewski, F.-M., Müller, A. und Bruns, E. (2004b): Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 69-78.
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (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 (2003): *Der Rekordsommer 2003*. http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/spezial/temp/Rekordsommer_2003.pdf
- 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.
- 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.
- Gornik, W. & Scharrer, H. (1994): *Naturräumliche Gliederung für die Bundesrepublik Deutschland*. Offenbach/Main: DWD.
- IPCC - Intergovernmental Panel of Climate Change (ed) (2001): *Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger*. <www.ipcc.de>
- Jäger, H.-J., Schmidt, S.W., Kammann, C., Grünhage, L., Müller, C. & Hanewald, K. (2003): The University of Giessen free-air carbon dioxide enrichment study: description of the experimental site and of a new enrichment system. *Journal of Applied Botany* 77, 117-127.
- Klausing, O. (1988): *Die Naturräume Hessens*. Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt, Heft Nr. 67.
- 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. und Fabian, P. (1999): Growing season extended in Europe. *Nature* 397, 659.
- 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.
- Runge, K. und Schönwiese, C.-D. (1986): Statistik phänologischer Zeitreihen Europas. Einige Charakteristika und klimatologische Zusammenhänge. *Arboreta 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. und Carey, P. D. (1995): The responses of species to climate over two centuries: an analysis of the Marsham phonological record, 1736-1947. *Journal of Ecology* 83, 321-329.

Quellen im Internet

<http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/nkdz/fachdatenbank/datenkollektive/phaenologie/index.htm>

<http://www.agrar.hu-berlin.de/pflanzenbau/agrarmet/ipg.html>

<http://www.agrar.hu-berlin.de/pflanzenbau/agrarmet/gpm.html>

Anhang: Inhalt des beiliegenden Datenträgers

1. Arbeitsmappe: "1 - Entwicklung phänologischer Phasen"

mit folgenden Daten für jede untersuchte Indikatorphase:

- Originaldaten des DWD ("DWD-Daten")
- Korrigierte Daten ("kor. Daten")
- Berechnung des Mittelwertes, des Medians und des Trends der Phase bezogen auf Mittelwert und Median für jede Naturraumgruppe und jeden Naturraum
- Angaben zur Signifikanz des Trends (Mann-Kendall-Test) für jede Naturraumgruppe und jeden Naturraum
- Angaben zur Signifikanz der Eintrittstermine der Phasen für ganz Hessen

2. Arbeitsmappe: "2 - Zusammenfassung - Entwicklung phänologischer Phasen"

mit den Ergebnissen (Mittelwert, Trend und dessen Signifikanz) sortiert nach den Naturraumgruppen Hessens. Die Angaben in der Datei "Zusammenfassung.xls" sind die Grundlage zur Erstellung der phänologischen Uhren.

3. Arbeitsmappe: "3 - Modelle_PhänUhr"

mit den Modellen zur Erstellung der phänologischen Uhr für die Dekade 2041-2050

4. Arbeitsmappe: "4 - Spätfrostgefahr"

mit den Temperatursummenmodellen zur Abschätzung der Spätfrostgefahr in der Dekade 2041-2050 sowie der Datei "Frostgefahr_Ergebnisse.xls"