

Einfluss steigender Temperaturen und CO₂-Konzentrationen auf Pflanzenphänologie und -anatomie



Diplomarbeit

angefertigt im Fachbereich Biologie
Institut für Pflanzenökologie
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von
Anita Streitfert

Gießen, November 2005

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Material und Methoden	7
2.1 Klimaerwärmung und Pflanzenphänologie	7
2.1.1 Phänologische Zeitreihen Hessens (von 1951 bis 2003)	7
2.1.1.1 Erfassung der phänologischen Daten.....	7
2.1.1.2 Auswahl und Auswertung der phänologischen Daten	7
2.1.1.2.1 Phänologische Zeigerpflanzen.....	11
2.1.1.3 Erstellung der phänologischen Uhren.....	11
2.1.2 Veränderung des Klimas am Beispiel Gießen.....	11
2.1.3 Abschätzung des Eintritts der phänologischen Phasen in der Dekade von 2041 bis 2050 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal).....	12
2.1.4 Abschätzung der Spätfrostgefahr für ausgewählte Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal).....	13
2.2 Wirkung von moderat erhöhten CO₂-Konzentrationen (+20 %) auf die Phänologie, die Anatomie und Stomatawiderstand für Wasserdampf von Pflanzen	14
2.2.1 Gießener Freiland-CO ₂ -Anreicherungsexperiment (GiFACE).....	14
2.2.2 Auswahl der Pflanzen.....	15
2.2.3 Erfassung des Blühbeginns	17
2.2.4 Bestimmung anatomischer Parameter und des Stomatawiderstandes für Wasserdampf.....	17
Stomatadichte.....	17
Blattdicke	20
Blattfläche	20
Trockengewicht	21
Blattdichte.....	21
LMA (leaf mass per area)	21
Stomatawiderstand für Wasserdampf.....	22
2.2.5 Bodenfeuchte.....	23

2.3 Statistische Auswertung und graphische Darstellung der Ergebnisse	23
2.3.1 Mann-Kendall-Trendtest	24
2.3.2 Mixed Models - Lineare gemischte Modelle	24
2.3.3 Univariate Varianzanalyse	26
2.3.4 Paariger T-Test	27
2.3.5 Wilcoxon Test	27
3 Ergebnisse	28
3.1 Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Pflanzenentwicklung im Zeitraum von 1961 bis 2000	28
3.1.1 Entwicklung phänologischer Phasen der Zeigerpflanzen in Hessen.....	28
3.1.2 "Phänologische Jahreszeiten" und Vegetationszeit.....	30
3.2 Abschätzung der Auswirkung der zukünftigen Klimaerwärmung auf die Pflanzenentwicklung im Zeitraum von 2041 bis 2050 und mögliche Konsequenzen	35
3.2.1 Veränderung des Klimas am Beispiel Gießen.....	35
3.2.2 Abschätzung des Eintritts der phänologischen Phasen in der Dekade von 2041 bis 2050 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal).....	41
3.2.2.1 Modellierung.....	41
3.2.2.2 Entwicklung des Vegetationsverlaufs im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal).....	46
3.2.3 Abschätzung der Spätfrostgefahr für ausgewählte Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal).....	48
3.3 Wirkung von moderat erhöhten CO₂-Konzentrationen (+20 %) auf die Phänologie, die Anatomie und den Stomatawiderstand für Wasserdampf von Pflanzen	49
3.3.1 Wirkung von erhöhten CO ₂ -Konzentrationen auf den Blühbeginn	49
3.3.2 Wirkung von erhöhten CO ₂ -Konzentrationen (+20 %) auf die Anatomie und den Stomatawiderstand für Wasserdampf von Pflanzen	53
Stomatadichte.....	53
Blattdicke	58
Blattdichte.....	59
LMA.....	60
Stomatawiderstand für Wasserdampf	60

4 Diskussion	63
4.1 Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Pflanzenentwicklung im Zeitraum von 1961 bis 2000	63
4.2 Abschätzung der Auswirkung der zukünftigen Klimaerwärmung auf die Pflanzenentwicklung im Zeitraum von 2041 bis 2050 und mögliche Konsequenzen ..	65
4.3 Wirkung von moderat erhöhten CO ₂ -Konzentrationen (+20 %) auf die Phänologie, die Anatomie und den Stomatawiderstand für Wasserdampf von Pflanzen	68
5 Zusammenfassung	74
6 Literaturverzeichnis	76
7 Tabellenverzeichnis	83
8 Abbildungsverzeichnis	85
9 Anhang	88

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Erdatmosphäre enthält neben Stickstoff und Sauerstoff eine Reihe von Spurengasen. Viele dieser Spurengase sind klimawirksam, d.h. sie absorbieren die langwellige von der Erdoberfläche zurückgestrahlte Wärmestrahlung, was zu einer Erwärmung der Atmosphäre führt. Die so genannten Treibhausgase verursachen einen "natürlichen Treibhauseffekt", ohne den die globale Durchschnittstemperatur 34 °C niedriger wäre (EEA 2004). Die Konzentration der natürlichen Treibhausgase wie Methan, Lachgas und Kohlenstoffdioxid zeigt, wie Daten aus Eisbohrkernen belegen, bis etwa 1750 nur geringe Schwankungen. In den letzten 255 Jahren ist jedoch ein schneller Anstieg dieser Gase zu beobachten. Die Konzentration des wichtigsten anthropogenen Treibhausgases CO₂ hat seit 1750 um 34 % auf heute 375 ppm zugenommen (EEA 2004) (Abb. 1).

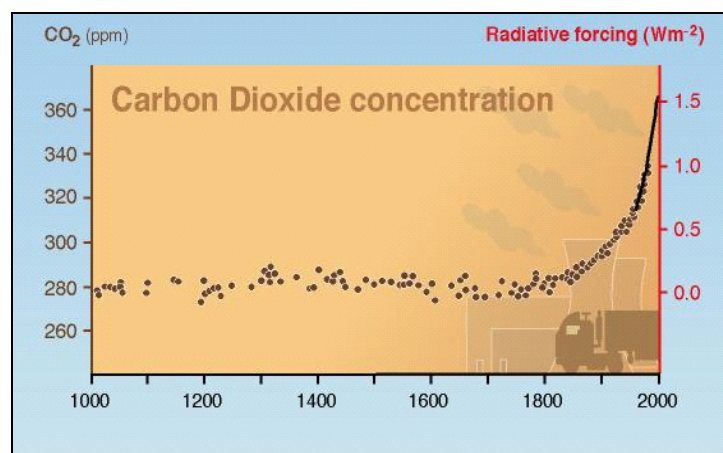


Abb. 1: Änderung der atmosphärischen CO₂-Konzentration in den letzten 1000 Jahren

Die Daten aus Eis- und Firnbohrkernen an mehreren Standorten in der Antarktis und in Grönland wurden mit Daten aus direkten atmosphärischen Proben aus den letzten paar Jahrzehnten ergänzt (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/slides/index.htm).

Die gegenwärtige CO₂-Konzentration ist die höchste während der letzten 420000 Jahre (IPCC 2001). Der starke Anstieg ist auf anthropogene CO₂-Emissionen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und Veränderung in der Landnutzung, insbesondere Entwaldung, zurückzuführen.

Der atmosphärische Anstieg der Konzentrationen der Treibhausgase führt zu einer Erwärmung des Klimas (EEA 2004). Untersuchungen von Baumringen, Korallen und Eisbohrkernen haben gezeigt, dass es in den letzten 1000 Jahren, ähnlich den Schwankungen in der Konzentration der Treibhausgase, nur geringe Schwankungen in der mittleren Erdoberflächentemperatur gab. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts hat sich das Klima jedoch stark erwärmt (Abb. 2).

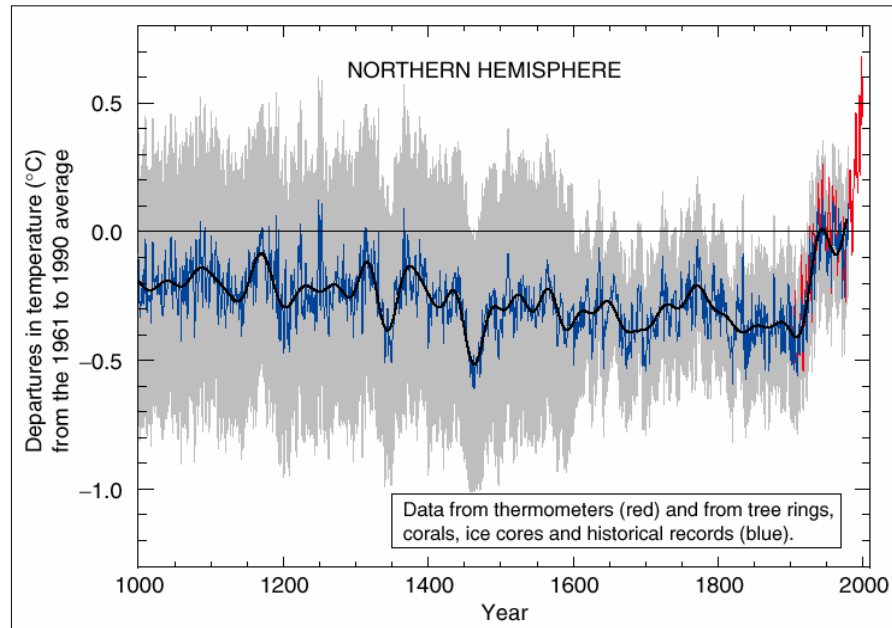


Abb. 2: Schwankungen der mittleren Erdoberflächentemperatur auf der Nordhemisphäre in den letzten 1000 Jahren
(http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/slides/index.htm)

Die durchschnittliche globale Temperatur an der Erdoberfläche ist nach Angaben des Intergovernmental Panel of Climate Change (2001) um $0,6 \pm 0,2$ °C gestiegen. Die Erwärmung erfolgte dabei vor allem in zwei Zeiträumen, von 1910 bis 1945 und von 1976 bis 2000, wobei die 90er Jahre das wärmste Jahrzehnt war (IPCC 2001). In Europa ist der Anstieg nach EEA (2004) und der dort zitierten Literatur mit $0,95$ °C noch größer. In Deutschland hat die Temperatur im 20. Jahrhundert um $0,9$ °C zugenommen. 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 (DMG, ÖGM & SGM 2003).

Die beobachtete Klimaänderung ist zum einen auf natürliche Ursachen wie Vulkanismus, Veränderungen in der Erdachse oder die Änderung der solaren Strahlungsflussdichte zurückzuführen, der Großteil der in den letzten 50 Jahren beobachteten Erwärmung ist nach Angaben des IPCC (2001) jedoch wahrscheinlich steigenden anthropogenen Treibhausgasen zuzuschreiben.

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 soll es zu Zu- oder Abnahmen von Niederschlägen und zu extrem hohen Temperaturen kommen, 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, der periodischen Wanderung von Zugvögeln und der Verbreitungsgebiete von Pflanzen und Tieren (Menzel & Fabian 1999, Ahas 1999, Parmesan et al. 1999, Menzel et al. 2001, Chmielewski & Rötzer 2002, Walther et al. 2002, EEA 2004). Dies hat Auswirkungen auf die Produktivität, Reproduktion und das Überleben von Individuen und könnte zu Schädigungen oder der Zerstörung der empfindlichen und miteinander vernetzten Lebensgemeinschaften in Ökosystemen führen (van Vliet et al. 2003, EEA 2004).

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 hauptsächlich durch den Temperaturverlauf und die Tageslänge bestimmt, in geringerem Maße aber auch durch biotische und andere abiotische Faktoren, Wasserversorgung und Genetik beeinflusst (Schnelle 1955, Defila 1991). Die Phänologie ist daher ein guter Indikator zur Untersuchung der Auswirkungen von Klimaänderungen in der Biosphäre (Menzel 2002). Sie ist die Wissenschaft von den 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.

Mit Hilfe dieser phänologischen Daten kann der Ablauf der jährlichen Pflanzenentwicklung, welche die natürliche Vegetationsperiode beschreibt, definiert und der Wachstumsrhythmus von Pflanzen festgehalten werden (Schnelle 1955).

Die Phänologie hat eine lange Geschichte. Bereits seit dem Jahre 705 werden im japanischen Kyoto die Eintrittsdaten der jährlichen Kirschblüte erfasst (Menzel 2003a). Seit 1957 werden durch das Programm "Internationale Phänologische Gärten" (IPG) (vgl. Menzel 2003a) Klima- und Witterungseinflüsse auf das Wachstum von Pflanzen an unterschiedlichen Standorten in Europa beobachtet. Die in diesem Programm verwendeten Bäume und Sträucher sind genetisch identisch, so dass der genetische Einfluss ausgeschaltet ist. Beobachtungen in den Internationalen Phänologischen Gärten weisen auf eine Verlängerung der Vegetationsperiode in Europa seit den 60er Jahren um 10,8 Tage hin, wobei der Beginn des Frühlings 6 Tage früher und der des Herbstes 4,8 Tage später eintrat (Menzel & Fabian 1999). Die Vorverlagerung des Vegetationsbeginns ist die Folge von erhöhten Temperaturen im Winter und im Frühling (Chen 1994, Chmielewski & Rötzer 2001). Verschiebungen in den phänologischen Phasen haben global und regional, über Feedback-Mechanismen des Albedo, des CO₂-Flusses und der Evaporation, wiederum Auswirkungen auf das Klimasystem selbst (Menzel 2002).

Ein Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Pflanzenentwicklung in Hessen mit Hilfe von phänologischen Daten zu untersuchen und im Hinblick auf regionale Unterschiede zu beurteilen.

In der Zukunft ist nach den Schätzungen der IPCC-SRES-Szenarien (SRES= Special Report on Emission Szenarios) mit einem weiteren Anstieg der CO₂-Konzentration bis 2100 auf 540-970 ppm zu rechnen (IPCC 2001) (Abb. 3). Nach Modellprojektionen des zukünftigen Klimas, welche vergangene und zukünftige Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen berücksichtigen, wird die globale mittlere Temperatur von 1990 bis 2100 um 1,4 °C bis 5,8 °C ansteigen (IPCC 2001) (Abb. 4).

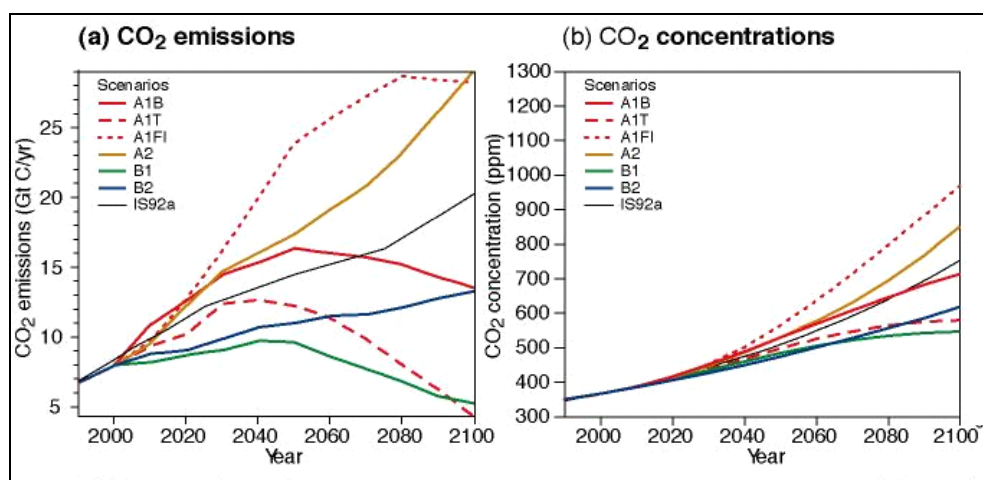


Abb. 3: CO₂-Emissionen (a) und Projektionen der CO₂-Konzentration (b) der sechs SRES-Szenarien und des SAR-Szenarios IS92a im 21. Jahrhundert (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/slides/index.htm)

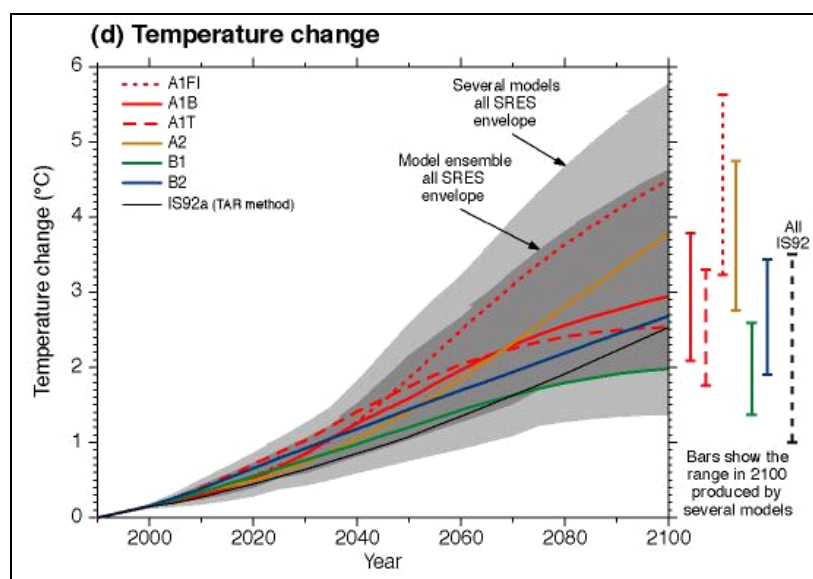


Abb. 4: Anstieg der globalen Erdoberflächenmitteltemperatur als Reaktion auf verschiedene Szenarien von Treibhausgas- und anderen vom Menschen verursachten Emissionen (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/slides/index.htm)

Für Europa wird eine Zunahme um 2 °C bis 6,3 °C angenommen (Parry zitiert in EEA 2004). Für einen globalen Temperaturanstieg von über 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau erwartet die Fachwelt großräumige Störungen der Biosphäre und des Wasserhaushalts sowie eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit abrupter Klimaänderungen. Die EU hat daher das Ziel, den Temperaturanstieg auf maximal 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen (EEA 2004). Dafür soll die CO₂-Konzentration langfristig auf 550 ppm stabilisiert werden.

Die für die Prognosen über die zukünftige Klimaentwicklung verwendeten globalen Klimamodelle lassen sich mittlerweile regionalisieren. Dies ermöglicht die Simulation von Zeitreihen täglicher Werte unterschiedlichster Wetterelemente für gewisse Zeitintervalle eines Klimaszenarios. Die täglichen Werte der simulierten Zeitreihen wie beispielsweise Temperatur oder Niederschlag können wiederum als Eingabedaten für weitere ökologische Modelle verwendet werden.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es deshalb den zukünftigen Eintritt phänologischer Phasen in Hessen anhand von Temperaturdaten eines Regionalisierungsmodells (Enke 2003) abzuschätzen, welches auf der globalen Klimamodellsimulation ECHAM4 OPYC3 B2 Szenario basiert. Das B2 Szenario zeichnet sich im Vergleich zu anderen Szenarien durch einen fast linearen Anstieg der CO₂-Emissionen bis 2100 auf ca. 13 GtC/Jahr aus (IPCC 2001).

Die CO₂-Erhöhung betrifft unabhängig vom Klimasystem auch direkt die Pflanzen, da sie seit Urzeiten von CO₂ leben. Sie verändert die Pflanzenwelt, indem sie die Artenzusammensetzung und –vielfalt beeinflusst (Körner et al. 1998). Das Pflanzenwachstum wird weniger stimuliert als anfänglich angenommen, da eine echte Düngewirkung von CO₂ nur erfolgt, wenn alle Bodennährstoffe in überreichem Maß vorhanden sind (Körner et al. 1998). Pflanzen passen sich durch anatomische und morphologische Veränderungen an erhöhte CO₂-Konzentrationen an, da die Pflanzenform für den Erwerb von Ressourcen wichtig ist (Pritchard et al. 1999). Vor allem die Blätter können sich dabei durch eine Vielfalt an struktureller Plastizität an veränderte Umweltbedingungen anpassen. In einer Vielzahl von Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass erhöhte CO₂-Konzentrationen Wirkungen auf anatomische Parameter wie Blattdicke (Radoglou & Jarvis 1990a, Rogers et al. 1983, Pritchard et al. 1999, Engloner et al. 2003), Stomatadichte (Woodward & Kelly 1995, Royer 2001), LMA (Pritchard et al. 1999, Ishizaki et al. 2003) und auf die stomatäre Leitfähigkeit (Rogers et al. 1983, Engloner et al. 2003, Reid et al. 2003) haben. Die meisten Untersuchungen wurden jedoch unter kontrollierten Bedingungen (Wachstums-kammern, Glashaus, Open-Top-Kammern) und über kurze Zeiträume durchgeführt. Über die Wirkung von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf die genannten Parameter in natürlichen Ökosystemen und über längere Zeiträume ist aufgrund des Mangels an Langzeit-Experimenten wenig bekannt (Marchi et al. 2004).

Die vorliegende Untersuchung soll daher neben der Beantwortung der bereits abgeleiteten Fragen

1. Ist es in den vergangenen 40 bis 50 Jahren zu zeitlichen Verschiebungen in der Pflanzenentwicklung in Hessen gekommen und welche regionalen Unterschiede gibt es?

und

2. Wird es zu weiteren zeitlichen Verschiebungen in der Pflanzenentwicklung infolge der für die Zukunft prognostizierten Klimaerwärmung kommen und welche Konsequenzen ergeben sich daraus (z.B. für die Spätfrostgefahr)?

auch zur Beantwortung der Frage

3. Welchen Einfluss haben moderat erhöhte CO₂-Konzentrationen (+20 %) auf die Phänologie, die Anatomie und auf den Stomatawiderstand für Wasserdampf von Pflanzen?

beitragen.

2 Material und Methoden

2.1 Klimaerwärmung und Pflanzenphänologie

In diesem Teilkapitel wird beschrieben, nach welchen Kriterien und durch welche Vorgehensweise die phänologischen Daten von Hessen für den Zeitraum von 1951 bis 2003 ausgewertet wurden. Anschließend wird die Entwicklung eines Modells zur Abschätzung des zukünftigen Eintrittes von phänologischen Phasen (2041-2050) im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) beschrieben. Zuletzt wird aufgeführt, mit welcher Methode die Spätfrostgefahr für ausgewählte Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) abgeschätzt wurde.

2.1.1 Phänologische Zeitreihen Hessens (von 1951 bis 2003)

Die phänologischen Daten von Hessen für den Zeitraum von 1951 bis 2003 wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellt. In der erhaltenen Datenbank sind für jede der 553 in Hessen geführten Beobachtungsstationen die geographischen Koordinaten (Länge und Breite), die Höhe über NN und die Gauß-Krüger Koordinaten sowie Stationskennziffer, Beobachtungsort, Landkreis, Kennziffer und Bezeichnung des Naturraums und der Naturraumgruppe angeführt.

2.1.1.1 Erfassung der phänologischen Daten

Die phänologischen Daten werden in Deutschland von ehrenamtlichen Mitarbeitern, den so genannten "phänologischen Beobachtern", welche zwei- bis dreimal pro Woche ihr "Beobachtungsgebiet" begehen, nach der "Anleitung für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes" (DWD 1991) erhoben. 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.

2.1.1.2 Auswahl und Auswertung der phänologischen Daten

Von den 553 in Hessen geführten Beobachtungsstationen wurden 170 Stationen ausgewertet (Abb. 5). Die Auswahl erfolgte nach folgenden Kriterien¹:

¹ Die genaue Begründung für die Auswahl der Stationen ist zu finden in:
<http://www.uni-giessen.de/~gf1034/Pflanzenphaenologie/Stationsauswahl.pdf>

1. Stationen, von 1961 bis 2000 mindestens sieben 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).

Dadurch wird gewährleistet, dass die Auswertung auf einer möglichst großen und fundierten Datenmenge beruht und die Ergebnisse daher repräsentativ und vergleichbar sind.



Abb. 5: Lage der berücksichtigten phänologischen Beobachtungsstationen in Hessen

Die Auswertung der phänologischen Daten erfolgte nach den Haupteinheitengruppen (Naturraumgruppen) und Haupteinheiten (Naturräumen) des Landes Hessen. Naturräume sind Gebiete mit ähnlichem Landschaftscharakter, der durch definierte geographische, hydrologische und klimatologische Merkmale beschrieben wird (Chen 1994). Die bei Klausning (1988) als Haupteinheiten bezeichneten Naturräume gleichen landschaftlichen

Charaktere werden in Haupteinheitengruppen (Naturraumgruppen) zusammengefasst. Eine Karte mit der naturräumlichen Gliederung für Hessen, d.h. der Einteilung der Landschaft in Raumeinheiten, zeigt Abb. 6.

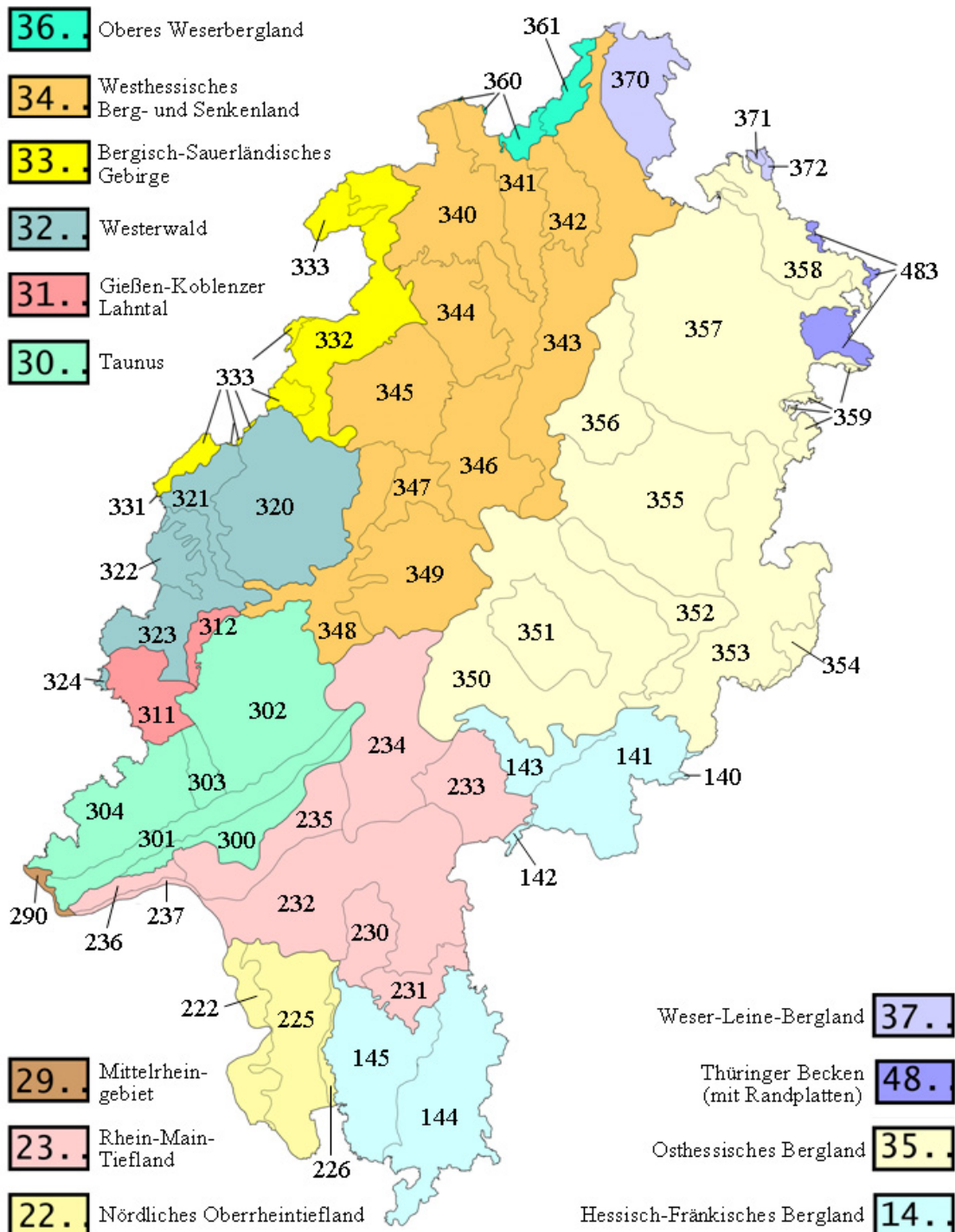


Abb. 6: Karte der naturräumlichen Gliederung Hessens²
 Dreistellige Kennziffern: Haupteinheiten, Gebiete gleicher Farbe: Haupteinheitengruppen

² 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-Leine-Bergland) sind nur durch kurze Beobachtungsreihen repräsentiert. Eine Auswertung erscheint daher nicht sinnvoll. Die Anzahl der ausgewerteten phänologischen Stationen der jeweiligen Haupteinheitengruppe ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: 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 DWD zur Verfügung gestellten Datensatz als "falsch, aber nicht korrigiert" indiziert waren und diejenigen, welche "zweifelhaft, aber nicht korrigiert" und gleichzeitig als Ausreißer identifiziert werden konnten, wurden nicht in die Auswertung mit aufgenommen.

Anschließend wurde aus den 170 Stationen erneut eine Auswahl vorgenommen, welche für jede der zehn 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 wurde der mittlere Beginn der jeweiligen phänologischen Phase in jeder Dekade und der Trend von 1961 bis 2000 mit Hilfe einer linearen Regressionsanalyse berechnet. Die Berechnung des Trends erfolgte für den Zeitraum von 1961 bis 2000, da die Datenmenge in den 50er Jahren zu gering war. Er stellt ein Maß für die Veränderung des Beginns der phänologischen Phasen im Laufe eines bestimmten Zeitraums dar (Rapp & Schönwiese 1996). Der Trend wurde für eine Zeitspanne von zehn Jahren angegeben (Kap. 3.1).

2.1.1.2.1 Phänologische Zeigerpflanzen

In der Pflanzenphänologie wird das Jahr in zehn physiologisch-biologisch begründete "phänologische Jahreszeiten" eingeteilt. Bestimmte Pflanzenarten, deren Phasen den Beginn der "phänologischen Jahreszeiten" anzeigen, werden vom DWD als so genannte Zeigerpflanzen definiert. Von den im Beobachtungsprogramm des DWD aufgeführten 167 phänologischen Phasen wurden in der vorliegenden Arbeit diejenigen 14 Arten, welche vom DWD als Zeigerpflanzen aufgeführt werden, mit insgesamt 17 Phasen ausgewertet (vgl. Tab. 2). Die Ergebnisse sind auf dem beiliegenden Datenträger dokumentiert (Arbeitsmappe "1 - Entwicklung phänologischer Phasen").

Tab. 2: Zeigerpflanzen der zehn "phänologischen Jahreszeiten" (vgl. www.dwd.de)

"Phänologische Jahreszeit"	Hauptindikatorart mit phänologischer Phase		Ersatzindikatorart mit phänologischer Phase	
Vorfrühling	Haselnuss	Blüte	Schneeglöckchen	Blüte
Erstfrühling	Forsythie	Blüte	Stachelbeere	Blattentfaltung
Vollfrühling	Apfel	Blüte	Stiel-Eiche	Blattentfaltung
Frühsommer	Schwarzer Holunder	Blüte		
Hochsommer	Sommer-Linde	Blüte	Rote Johannisbeere	Fruchtreife
Spätsommer	Frühapfel	Pflückreife	Eberesche	Pflückreife
Frühherbst	Schwarzer Holunder	Fruchtreife		
Vollherbst	Stiel-Eiche	Fruchtreife	Roskastanie	Fruchtreife
Spätherbst	Stiel-Eiche	Blattverfärbung	Roskastanie	Blattverfärbung
Vegetationsruhe	Winterweizen	Beginn des Auflaufens		

2.1.1.3 Erstellung der phänologischen Uhren

Für die Darstellung der phänologischen Uhren wurde durch Herrn Jochen Senkbeil das Programm PhänUhr mit der Programmiersprache Java entwickelt. Dabei wurden in der Regel die in Tabelle 2 aufgeführten Hauptindikatorarten zur Charakterisierung der zugehörigen "phänologischen Jahreszeit" bevorzugt, lediglich in der Naturraumgruppe 36 (Oberes Weserbergland) wurden einige Ersatzarten verwendet (siehe Arbeitsmappe "4 – Phänologische Uhren").

2.1.2 Veränderung des Klimas am Beispiel Gießen

Zur Untersuchung der Veränderung des Klimas am Beispiel Gießen wurden die Daten der Lufttemperaturen von 1961 bis 2000 der meteorologischen Station Gießen ausgewertet. Zur Abschätzung des Klimas im Zeitraum von 2041 bis 2050 wurden die von der Firma Meteo-Research (Enke 2003) modellierten Tagestemperaturen für die meteorologische Station Gießen verwendet.

2.1.3 Abschätzung des Eintritts der phänologischen Phasen in der Dekade von 2041 bis 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 von 2041 bis 2050 von der Firma Meteo-Research (Enke 2003) modellierten Tagestemperaturen für die DWD-Station Gießen. Der Datensatz wurde im Rahmen einer vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) in Auftrag gegebenen Studie erstellt.

Für die Abschätzung des Beginns der Frühjahrs- und Sommerphasen wurden 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 eine bestimmte pflanzenspezifische Temperatursumme, die oberhalb einer Basistemperatur liegt, erreicht sein muss (Chmielewski et al. 2004a).

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

(Gl. 1)

T_s = Pflanzenspezifische Temperatursumme

T_i = Tagesmitteltemperatur am Tag i

T_B = Basistemperatur

t_l = Starttag

t_n = Zeitpunkt des Auftretens einer phänologischen Phase

Zur Berechnung der pflanzenspezifischen Temperatursumme nach Gleichung 1 muss die optimale Temperaturschwelle bestimmt werden. Dazu wurde die Basistemperatur (Lufttemperatur) in 0,1 °C-Schritten von 0 °C bis 10 °C variiert (siehe beispielhaft am Blühbeginn des Schwarzen Holunders in Abb. 7). 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). Für das Modell wurde die Basistemperatur verwendet, bei welcher der mittlere Fehler zwischen berechnetem und beobachtetem Eintrittstag (RMSE, Root Mean Square Error) am kleinsten war. Die Temperatursummenmodelle wurden mit Excel 2003 erstellt.

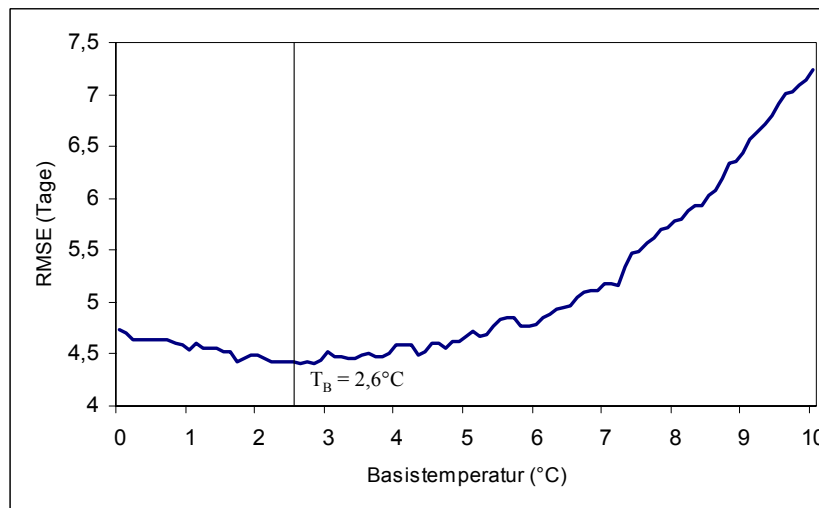


Abb. 7: Bestimmung der Basistemperatur für den Blühbeginn des Schwarzen Holunders
($T_B = 2,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 675,2 \text{ }^\circ\text{C}$, RMSE = 4,4 Tage, MAE = 3 Tage)

Die Phasen des Herbstes und die Vegetationsruhe haben jedoch einen geringeren Bezug zur Lufttemperatur. Sie wurden mit Hilfe multipler linearer Regressionsmodelle abgeschätzt, weil kein entsprechendes Temperatursummenmodell berechnet werden konnte.

Für die Abschätzung des Eintrittstermins der jeweiligen phänologischen Phase kann eine vorausgehende Phase und der Einfluss der Lufttemperatur in den nachfolgenden Monaten nach Gleichung 2 berücksichtigt werden (Chmielewski et al. 2004a).

$$P_i = a_0 + a_1 * P_{i-1} + a_2 * T_1 + a_3 * T_2 \quad (\text{Gl. 2})$$

P_i = phänologische Phase

P_{i-1} = vorausgehende phänologische Phase

T_1, T_2 = mittlere Lufttemperatur in den nachfolgenden Monaten

Die Regressionsmodelle wurden mit Hilfe der multiplen Regression und "backward selection" mit STATGRAPHICS Plus entwickelt.

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

Die Spätfrostgefahr wurde für die Obstgehölze Apfel, Birne, Sübkirsche und Sauerkirsche und die Beerensträucher Rote Johannisbeere und Stachelbeere im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) für die Zeiträume von 1961 bis 2000 und von 2041 bis 2050 abgeschätzt. Dazu wurde das Auftreten von Frost im Zeitraum zwischen Blühbeginn und zehn Tagen danach untersucht (vgl. Chmielewski et al. 2004a). Für die Auswertung des Zeitraums von

1961 bis 2000 wurden die beobachteten phänologischen Daten im Naturraum 348 und die gemessenen Tagesminimumtemperaturen der meteorologischen Station Gießen herangezogen. Die Spätfrostgefahr in der Dekade von 2041 bis 2050 wurde mit Hilfe des Blühbeginns, welcher durch Temperatursummenmodelle abgeschätzt wurde, und den von der Firma Meteor Research modellierten Tagesminimumtemperaturen für die meteorologische Station Gießen (Enke 2003) eingeschätzt. Die Auswertung erfolgte mit Excel 2003.

2.2 Wirkung von moderat erhöhten CO₂-Konzentrationen (+20 %) auf die Phänologie, die Anatomie und Stomatawiderstand für Wasserdampf von Pflanzen

2.2.1 Gießener Freiland-CO₂-Anreicherungsexperiment (GiFACE)

Das seit Mai 1998 laufende Freiland-CO₂-Anreicherungsexperiment der Universität Gießen (GiFACE) auf der "Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden" (50°32'N und 8°41,3'O) ermöglicht Untersuchungen der Reaktionen von Pflanzen eines halbnatürlichen Grünland-Ökosystems auf steigende atmosphärische CO₂-Konzentrationen. Das untersuchte Grünlandökosystem wird seit Jahrzehnten extensiv bis mäßig intensiv mit zwei Schnitten pro Jahr genutzt und mit 50-80 kg ha⁻¹ a⁻¹ Stickstoff gedüngt. Ab 1995 wurde die Düngung auf 40 kg Stickstoff ha⁻¹ a⁻¹ reduziert (Jäger et al. 2003). Der Pflanzenbestand ist ein 'Arrhenatheretum elatioris (Br.-B1) Filipendula ulmaria sub-community' (Rodwell et al. 1992) mit etwa 60 Arten, wobei die Gräser *Arrhenatherum elatius* und *Holcus lanatus*, *Alopecurus pratensis* und *Poa pratensis* dominant sind. Das dominante Kraut ist *Galium mollugo*, gefolgt von *Sanguisorba officinalis* und *Plantago lanceolata*. Leguminosen, hauptsächlich *Lathyrus pratensis*, repräsentieren weniger als 0,5 % der Biomasse (Jäger et al. 2003). Der Boden ist ein Auenboden-Pseudogley aus holozänen Auensedimenten über miozänen Tonen (FAO Klassifizierung).

Im Zeitraum von 1993 bis 1996 wurden 16 Flächen mit einer Größe von 100 m² beobachtet, um diejenigen Flächen mit den geringsten Unterschieden für die spätere Behandlung zu finden. 1997 wurden auf sechs ausgesuchten Flächen drei Ringpaare (mit einem Ringdurchmesser von 8 m) gebaut. Ein Ringpaar (Block) besteht aus einem Ring mit aktueller CO₂-Konzentration (A) und einem Ring mit erhöhter CO₂-Konzentration (E; +20 %) (Abb. 8).

Über die Blöcke zieht sich ein leichter Bodenfeuchte-Gradient (Block 1: "relativ trocken", Block 3: dazwischen liegend, Block 2: "feucht") bedingt durch die unterschiedliche Mächtigkeit der Auflage über der Tonschicht und die dadurch bedingten Unterschiede im Stauwasserspiegel (Kammann et al. 2005). Dies erklärt die Heterogenität in der Vegetation. Eine detaillierte Beschreibung des Begasungssystems und der Versuchsstation ist in Jäger et al. (2003) zu finden.



Abb. 8: Gießener Freiland-CO₂-Anreicherungsexperiment (FACE = Free Air CO₂ Enrichment)
Block 3: vorne E3, hinten A3, E: erhöhte CO₂-Konzentration, A: aktuelle CO₂-Konzentration

2.2.2 Auswahl der Pflanzen

Die Wirkung der um 20 % erhöhten CO₂-Konzentrationen auf die Phänologie wurde an jenen Pflanzenarten untersucht, welche in den drei Ringpaaren in den Jahren von 1997 bis 2001 eine Stetigkeit von über 10 % zeigten (Janze, mündliche Mitteilung) (Tab. 3).

Die Untersuchung der Wirkung von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf anatomische Parameter (Stomatadichte, Blattfläche, Blattdicke, LMA) und den Stomatawiderstand für Wasserdampf erfolgte beispielhaft an sechs Pflanzenarten (Tab. 3). Diese wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt: Neben dem Hauptbestandbildner (*Arrhenatherum elatius*) wurden Arten ausgesucht, welche nach Janze (mündliche Mitteilung) positiv (*Glechoma hederacea*, *Poa pratensis*) oder negativ (*Plantago lanceolata*, *Geranium pratense*) auf erhöhtes CO₂ reagieren (Tab. 4). *Glechoma hederacea* ist die am stärksten positiv reagierende Art, *Geranium pratense* reagiert am stärksten negativ. Als weiteres Kriterium wurde die Differenz im Blühbeginn zwischen aktuellen und erhöhten CO₂-Konzentrationen im Jahr 2004 herangezogen. *Saxifraga granulata* aus der Gruppe der schwach CO₂-reagierenden Arten zeigte im Jahr 2004 den mit drei Tagen am stärksten vorverlagerten Blühbeginn unter erhöhten CO₂-Konzentrationen (Tab. 4).

Tab. 3: In der Untersuchung berücksichtigte Arten

Arten	Beginn der Blüte	Anatomische Parameter ¹ und Stomatawiderstand für Wasserdampf
<i>Agropyron repens</i>	x	
<i>Agrostis tenuis</i>	x	
<i>Alopecurus pratensis</i>	x	
<i>Anthoxanthm odoratum</i>	x	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	x	x
<i>Bromus hordeaceus</i>	x	
<i>Cardamine pratensis</i>	x	
<i>Dactylis glomerata</i>	x	
<i>Festuca pratensis</i>	x	
<i>Festuca rubra</i>	x	
<i>Filipendula ulmaria</i>	x	
<i>Galium mollugo</i>	x	
<i>Galium verum</i>	x	
<i>Geranium pratense</i>	x	x
<i>Glechoma hederacea</i>	x	x
<i>Holcus lanatus</i>	x	
<i>Lathyrus pratensis</i>	x	
<i>Lolium perenne</i>	x	
<i>Plantago lanceolata</i>	x	x
<i>Poa pratensis</i>	x	x
<i>Poa trivialis</i>	x	
<i>Ranunculus acris</i>	x	
<i>Rumex acetosa</i>	x	
<i>Sanguisorba officinalis</i>	x	
<i>Saxifraga granulata</i>	x	x
<i>Taraxacum officinale</i>	x	
<i>Trisetum flavescens</i>	x	

¹: Stomatadichte, Blattdicke, Blattdichte, LMA (leaf mass per area)

Tab. 4: Auswahlkriterien der Arten zur Untersuchung der Wirkung von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf die Stomatadichte, den Stomatawiderstand für Wasserdampf, die Blattdichte, die Blattdicke und den LMA

Art	Auswahlkriterien		
	Hauptbestandes- bildner	Reaktion auf erhöhte [CO ₂] (Janze, mündliche Mitteilung)	Differenz im Blühbeginn zwischen aktuellen und erhöhten [CO ₂] im Jahr 2004 in Tagen
<i>Arrhenatherum elatius</i>	x	positiv	-1,0
<i>Poa pratensis</i>		positiv	0
<i>Glechoma hederacea</i>		stark positiv	-1,7
<i>Saxifraga granulata</i>		schwach negativ	-3,0
<i>Plantago lanceolata</i>		stark negativ	+1
<i>Geranium pratense</i>		stark negativ	+6,7

Negative Werte: Blühbeginn unter erhöhten [CO₂] früher

Positive Werte: Blühbeginn unter erhöhten [CO₂] später

Von einer Art wurden jene Individuen untersucht, welche im Untersuchungszeitraum den gleichen Entwicklungszustand zeigten. Als Richtgrößen dienten die Größe der Pflanze und die Anzahl der Blätter. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl der Individuen war ihr Wuchsort innerhalb des Ringes. Individuen innerhalb des 1 m-breiten Sicherheitsstreifens schienen für die Messungen aufgrund des möglichen Randeffektes nicht geeignet zu sein. Zudem wurden Pflanzen ausgesucht, welche nach Möglichkeit nicht in den Flächen für pflanzensoziologische Aufnahmen und ertragskundliche Erhebungen wuchsen. Der Wuchsort der untersuchten Pflanzen in den Ringen ist auf beiliegendem Datenträger in der Arbeitsmappe "5 – Wuchsort der Pflanzen" dargestellt.

2.2.3 Erfassung des Blühbeginns

Die Wirkung von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf den Blühbeginn der in Tab. 3 aufgeführten Pflanzenarten wurde im Zeitraum vom 20.3.2005 bis 12.6.2005 und vom 23.6.2005 bis 25.8.2005 in täglichen Rundgängen, etwa drei bis vier Stunden nach Sonnenhöchststand, beobachtet (vgl. Bruns et al. 2003). Die Daten aus dem Zeitraum vom 1.4.2004 bis 31.5.2004 und vom 10.6.2004 bis 1.9.2004 sind für die vorliegenden Untersuchungen zur Verfügung gestellt worden.

Am 1.6.2004 und 13.6.2005 wurden die Flächen abgeerntet, die Beobachtungen sind daher erst am 10.6.2004 und 23.6.2005 wieder aufgenommen worden. Der Blühbeginn dieser 27 Arten wurde nach der phänologischen Beobachteranleitung des deutschen Wetterdienstes (DWD) dokumentiert (DWD 1991). Danach tritt der Beginn der Blüte an jenem Tag ein, an welchem "an einigen (etwa 3-4) Stellen der beobachteten Pflanze die ersten normalen Blüten geöffnet" und die Staubgefäße "zwischen den entfaltenen Blütenblättern sichtbar" sind (DWD 1991). In den Ringen wurde eine Randzone von ca. 1 m nicht mit in die Beobachtungen aufgenommen. Die Eintrittstermine wurden mit Hilfe des Julianischen Kalenders dargestellt. Die Determination der Pflanzenarten erfolgte nach Schmeil & Fitschen (1996) und Klapp & von Boberfeld (1988).

2.2.4 Bestimmung anatomischer Parameter und des Stomatawiderstandes für Wasserdampf

Stomatadichte

Die Stomatadichte ist definiert als Anzahl der Spaltöffnungen pro mm² Blattfläche (Linke et al. 2005). Die Bestimmung der Dichte der Spaltöffnungen erfolgte an Negativabdrücken der Blattflächen (Engloner et al. 2003). Dazu wurde je nach Pflanzenart die Blattober- bzw. Blattunterseite mit farblosem Nagellack (Manhattan 01) bestrichen und nach dem Trocknen die Anzahl der Stomata auf jeweils fünf verschiedenen Flächen des Abdrucks gezählt (Tab. 5). Die Zählung erfolgte über ein Mikroskop der Firma Olympus (Typ CH, Seriennummer: 617537) und einer darauf aufgesetzten Digitalkamera der Firma Nikon (CoolPix885). Diese

war über eine Win TV-USB-Box (Model 40204 Rev B448 der Firma Hauppauge) mit dem Computer verbunden, so dass die Spaltöffnungen am Bildschirm mit dem Programm WinTV 2000 (Hauppauge) gezählt werden konnten. Dabei wurde die 100fache Vergrößerung des Mikroskops verwendet und mit der Digitalkamera mit Hilfe des Zooms die maximale Vergrößerung eingestellt. Die Verwendung von Gitternetzlinien durch das Programm Trenner, welches von Herrn Jochen Senkbeil mit der Programmiersprache Java entwickelt wurde, erhöhte die Genauigkeit der Zählung.

Tab. 5: Anzahl, Seite und Alter der Blätter der ausgewählten Arten zur Bestimmung der Stomatadichte

Art	Anzahl der Blätter	Blattseite	Blattalter
<i>Arrhenatherum elatius</i>	8	oben und unten	zweitjüngstes Blatt
<i>Poa pratensis</i>	4	oben und unten	zweitjüngstes Blatt
<i>Glechoma hederacea</i> ^{1,2}	8	unten	drittjüngstes Blattpaar
<i>Saxifraga granulata</i> ¹	4	unten	drittjüngstes Blatt
<i>Plantago lanceolata</i>	4	oben und unten	³
<i>Geranium pratense</i> ¹	4	unten	ältestes Blatt

¹: pro Ring waren nicht mehr Pflanzen verfügbar

²: an einer Pflanze wurden beide Blätter des Blattpaares untersucht, insgesamt also 8 Blätter an 4 Pflanzen

³: Blätter nach gleicher Länge und Breite ausgesucht

Die Stomatadichte wurde an jenen Blättern bestimmt, an denen zuvor der Stomatawiderstand für Wasserdampf gemessen wurde. Bei den Arten *Glechoma hederacea* und *Geranium pratense* konnten die Stomata nur auf der Blattunterseite gezählt werden, da diese Arten hypostomatisch sind, d.h. ihre Blätter besitzen nur auf der Unterseite Spaltöffnungen. Aufgrund des nur in geringen Mengen vorhandenen Blattmaterials von *Saxifraga granulata* konnte die Stomatadichte nur auf der Blattunterseite bestimmt werden.

Berechnung der ausgezählten Fläche

Mit Hilfe von zwei Skalen, einer Skala im Objektträger (Objektmikrometer der Firma Carl Zeiss, mit einer 5+100 mm/100 mm-Einteilung) und einer zweiten im Okular (Vertikel Mikrometer von Plano GmbH, 20 mm Durchmesser, 10 mm/0,1 mm-Einteilung), wurden mit der Digitalkamera der Firma Nikon (CoolPix885) Fotos gemacht und anhand des ausgedruckten Bildes die Größe der Fläche bestimmt. Dazu wurde zunächst nach Gleichung 3 berechnet, welcher Länge auf dem Objektträger ein Teilstrich der Okularskala entsprach.

$$X = \frac{\left(\frac{a}{b}\right) * c}{d} \quad (\text{Gl. 3})$$

X = Länge eines Teilstriches der Okularskala auf dem Objektträger [mm]

a = Länge der ausgezählten Striche der Objektträgerskala [mm]

b = Länge der Objektträgerskala auf dem Bild [cm]

c = Länge derselben Anzahl an ausgezählten Strichen der Okularskala auf dem Bild [cm]

d = Anzahl der ausgezählten Striche

Anhand der Seitenlängen des ausgedruckten Bildes (18,825 cm und 14,25 cm) und der Anzahl der Teilstriche der Okularskala konnte die Fläche des Bildes nach Gleichung 4 berechnet werden (Abb. 9).

$$F = (e * X) * \left[\left(\frac{f}{g/e} \right) * X \right] \quad (\text{Gl. 4})$$

F = ausgezählte Fläche [mm²]

e = Anzahl der Teilstriche der Okularskala auf dem Bild (Bildhöhe)

X = Länge eines Teilstriches der Okularskala auf dem Objektträger bei der jeweiligen Vergrößerung [mm]

f = Bildlänge [cm]

g = Bildhöhe [cm]

Bei der Verwendung der 100fachen Vergrößerung, wie bereits ausgeführt, betrug die Länge eines Teilstriches der Okularskala auf dem Objektträger 0,010611 mm. Daraus resultierte, dass die auf dem Bildschirm ausgezählte Fläche 0,5535 mm² groß war.

Mit der üblichen Definition übereinstimmend wurde die Stomatadichte als Anzahl der Stomata pro mm² Blattfläche angegeben.

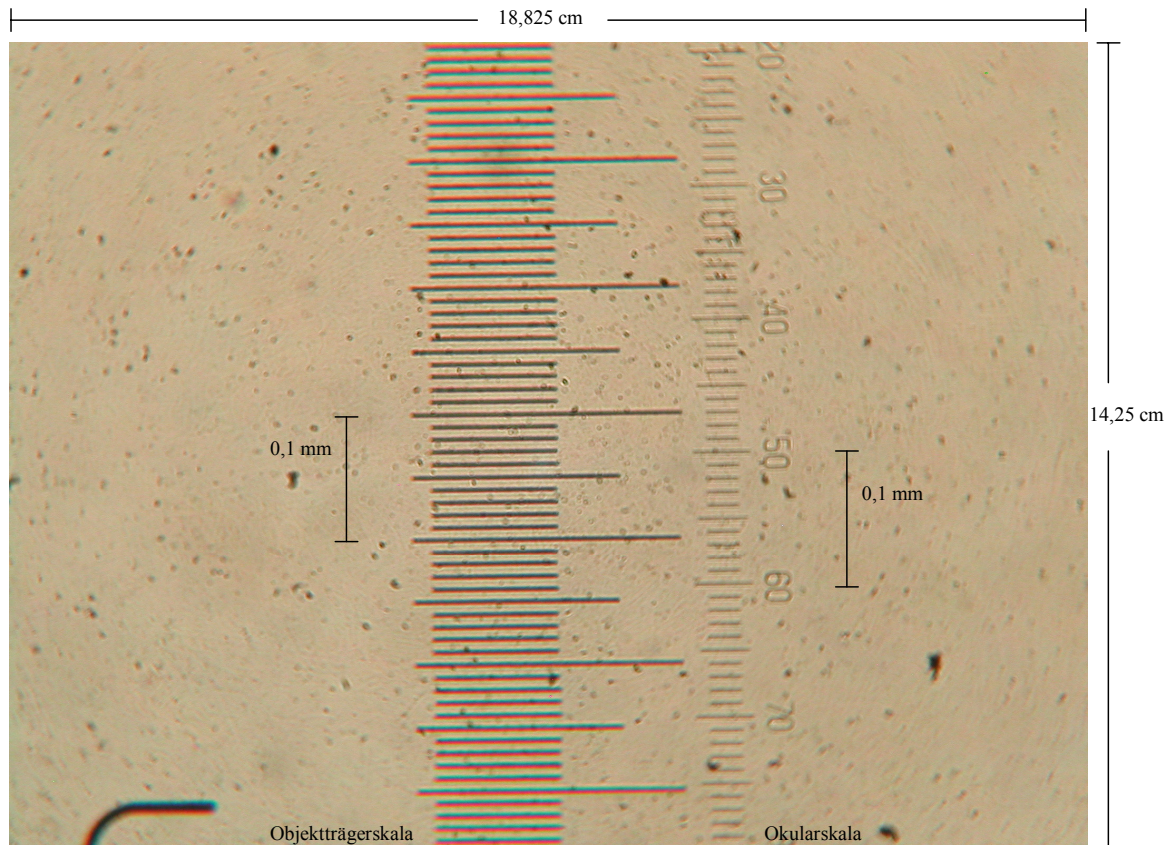


Abb. 9: Okular- und Objektträgerskala bei 100facher Vergrößerung

Blattdicke

Die Blattdicke der in Tabelle 4 dargestellten Pflanzenarten wurde mit dem Foliendickenmessgerät (Firma Käfer, Typ F1101-30-a, Skalenteilungswert 0,001 mm) durch Einspannen des Blattes zwischen zwei Druckflächen gemessen (Filella & Peñuelas 1999). Bei *Plantago lanceolata* wurden fünf Stellen pro Blatt ausgemessen, bei allen übrigen untersuchten Arten jeweils drei Stellen und daraus der Mittelwert gebildet. Durch die weiche Konsistenz der Blätter und den hohen Druck des Messgerätes liegt den Angaben der Dicke in Mikrometern ein Fehler im Bereich von 10 µm zugrunde.

Blattfläche

Die Blattfläche [cm] der untersuchten Pflanzenarten wurde mit dem Blattflächenmessgerät LI-3000A (Firma LI-COR) gemessen, indem die Blätter zwischen zwei durchsichtigen Folien durchgeschoben und von einem Laser vermessen wurden (Enríquez & Sand-Jensen 2003).

Trockengewicht

Nach der Messung der Blattflächen wurden die Blätter je nach Art 24 bis 100 Stunden im Trockenschrank der Firma Heraeus bei 100 °C getrocknet und anschließend mit der Analysenwaage der Firma Sartorius (Model BP210S) gewogen. Der Fehler des Gewichts betrug bei Angaben in Gramm 0,0001 g.

Blattdichte

Die Blattdichte ist definiert als Trockenmasse je Einheit Blattvolumen (Schulte et al. 2001). Für die Berechnung der Blattdichte wurden von den Arten *Arrhenatherum elatius* und *Poa pratensis* jeweils acht gleichaltrige Blätter, von den Arten *Geranium pratense*, *Glechoma hederacea*, *Plantago lanceolata* und *Saxifraga granulata* hingegen jeweils vier gleichaltrige Blätter untersucht.

Die Blattdichte [g cm^{-3}] wurde aus den gewonnenen Daten zur Blattdicke, Blattfläche und zum Trockengewicht nach Gleichung 5 ermittelt (Enríquez & Sand-Jensen 2003). Das Volumen wurde nach Gleichung 6 berechnet (Enríquez & Sand-Jensen 2003).

$$\boxed{\text{Blattdichte } [\text{g cm}^{-3}] = \frac{\text{Trockengewicht } [\text{g}]}{\text{Volumen } [\text{cm}^3]}} \quad (\text{Gl. 5})$$

$$\boxed{\text{Volumen } [\text{cm}^3] = \text{Blattfläche } [\text{cm}^2] \times \text{Blattdicke } [\text{cm}]} \quad (\text{Gl. 6})$$

LMA (leaf mass per area)

Der LMA (leaf mass per area) [$1/\text{SLA}$ (specific leaf area) = Blattdichte [g cm^{-2}] x Blattdicke [cm] wurde berechnet, indem die Daten zum Trockengewicht auf die Blattfläche bezogen wurden (Gl. 7) (Enríquez & Sand-Jensen 2003).

$$\boxed{\text{LMA } [\text{g cm}^{-2}] = \frac{\text{Trockengewicht } [\text{g}]}{\text{Blattfläche } [\text{cm}^2]}} \quad (\text{Gl. 7})$$

Stomatawiderstand für Wasserdampf

Der Stomatawiderstand für Wasserdampf [$s\ cm^{-1}$] wurde an gleichaltrigen Blättern der in Tabelle 6 aufgeführten Pflanzen mit dem AP4-Diffusionsporometer der Firma Delta T gemessen. Vor jeder Messung wurde das Gerät geeicht, d.h. es wurde an die Außentemperatur, den Luftdruck und die Luftfeuchtigkeit der Umgebung angepasst. Dazu ist ein Filterpapierstreifen angefeuchtet und luftdicht unter einer Eichplatte befestigt worden. Nach einer einstündigen Inkubationszeit unter Umgebungstemperatur konnten die Wasserdampf-Diffusionswiderstände der verschiedenen Poren in der Eichplatte gemessen und daraus eine Eichkurve erstellt werden.

Für die nicht destruktive Messung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf wurde ein Blatt in der Kammer befestigt. Während der Messung wird Außenluft vom Porometer angesaugt und auf 5 % relative Luftfeuchtigkeit unter die gespeicherte Außenluftfeuchtigkeit runtergetrocknet. Diese Luft gelangt in die Blattkammer, wo ein Feuchtesensor die Luftfeuchte misst. Die Luft in der Kammer wird durch die Transpiration des Blattes aufgesättigt. Anschließend wird die Zeit gespeichert, die für das Erreichen des Schwellenwertes "2,3 % über der gespeicherten Außenluftfeuchtigkeit" benötigt wird und der Stomatawiderstand für Wasserdampf anhand der Eichkurve abgelesen und vom Messgerät angezeigt.

Der Widerstand wurde pro Blattseite - mit Ausnahme von *Saxifraga granulata* - an denselben Blättern, welche später zur Bestimmung der Stomatadichte dienten, an drei verschiedenen Stellen gemessen (Tab. 6).

Tab. 6: Anzahl, Seite und Alter der Blätter der ausgewählten Arten zur Bestimmung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf

Art	Anzahl der Blätter	Blattseite	Blattalter
<i>Arrhenatherum elatius</i>	8	oben und unten	zweitjüngstes Blatt
<i>Poa pratensis</i>	4	oben und unten	zweitjüngstes Blatt
<i>Glechoma hederacea</i> ^{1,2}	8	unten	drittjüngstes Blattpaar
<i>Saxifraga granulata</i> ¹	4	oben und unten	zweitjüngstes Blatt
<i>Plantago lanceolata</i>	4	oben und unten	³
<i>Geranium pratense</i> ¹	4	unten	ältestes Blatt

¹: pro Ring waren nicht mehr Pflanzen verfügbar

²: an einer Pflanze wurden beide Blätter des Blattpaares untersucht, insgesamt also 8 Blätter an 4 Pflanzen

³: Blätter nach gleicher Länge und Breite ausgesucht

Die Messungen erfolgten erst nachmittags bei trockenem Pflanzenbestand und unter konstanten Außenbedingungen (Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Bewölkungsgrad), wobei in jedem Ringpaar die Pflanzen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen zuerst gemessen wurden. Dadurch konnte ein Tageszeiteffekt ausgeschlossen werden.

Der Stomatawiderstand für Wasserdampf der Arten *Geranium pratense* und *Glechoma hederacea* wurde lediglich auf der Blattunterseite gemessen, da diese beiden Arten hypostomatische Blätter besitzen. Für die übrigen vier Arten (Tab. 6) konnte aufgrund der Messung beider Blattseiten und der dabei als parallel geschaltet betrachteten Widerstände der Gesamt-Stomatawiderstand für Wasserdampf (Stomatawiderstand des ganzen Blattes) nach Gleichung 8 berechnet werden.

$$R_{ges} = \frac{R_o * R_u}{R_o + R_u} \quad (Gl. 8)$$

R_{ges} = Gesamt-Stomatawiderstand für Wasserdampf [s/cm]

R_o = Stomatawiderstand für Wasserdampf der Blattoberseite [s/cm]

R_u = Stomatawiderstand für Wasserdampf der Blattunterseite [s/cm]

2.2.5 Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte wird einmal täglich über vier fest installierte TDR-Sensoren in jedem Ring in der Höhe von 0-15 cm Tiefe gemessen. In die Auswertung sind die Bodenfeuchte-Werte jener Tage eingegangen, an denen die Messungen des Stomatawiderstandes für Wasserdampf erfolgten.

2.3 Statistische Auswertung und graphische Darstellung der Ergebnisse

Die Daten der untersuchten phänologischen und anatomischen Parameter sowie des Stomatawiderstandes für Wasserdampf wurden mit Hilfe von Excel 2003, STATGRAPHICS Plus und SPSS 12.0.1 für Windows ausgewertet. Die Graphiken wurden mit SigmaPlot 2001 erstellt.

Mit Excel 2003 erfolgte die Berechnung von Mittelwerten, Standardabweichungen und die Signifikanz nach dem Mann-Kendall-Trendtest, mit SPSS 12.0.1 wurden Mixed Models Analysen, Univariate Varianzanalysen, T-Tests und Wilcoxon-Tests durchgeführt. STATGRAPHICS Plus diente ebenfalls zur Durchführung von Univariaten Varianzanalysen. Daten, welche nicht der Normalverteilung folgten, wurden ln-transformiert. Ausreißer und Extremwerte wurden aufgrund der geringen Anzahl der Proben in der Auswertung belassen. Der Einfluss von Variablen mit einem p-Wert $\leq 0,05$ oder $\leq 0,01$ (Irrtumswahrscheinlichkeit $\leq 5\%$ oder $\leq 1\%$) gelten in der Regel als signifikant, d.h. die Nullhypothese "der Faktor hat keinen Einfluss" wird verworfen (vgl. Bortz 1979). Muss die Hypothese jedoch beibehalten werden, besteht ein Risiko unbekannter Größenordnung der unberechtigten Beibehaltung (Fehler 2. Art, Sachs 1974, 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 (Fehler 1. Art), wie die fälschliche Aussage, es lag ein Effekt vor (Fehler 2. Art). In der vorliegenden Diskussion über den Einfluss der globalen Klimaänderung auf die phänologischen, morphologischen und physiologischen Eigenschaften der Pflanzen und auf die phänologische Entwicklung der Vegetation fanden deshalb auch tendenzielle Effekte ($0,1 \geq p > 0,05$) Berücksichtigung. Ein Ergebnis wird in der vorliegenden Studie deshalb ab einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % ($p > 0,1$) als nicht signifikant bezeichnet.

Befunde mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 10 % ($p \leq 0,1$) werden durch die folgende Sternsymbolik gekennzeichnet (vgl. z.B. Sachs 1974, Filion et al. 2000): (*): $0,1 \geq p > 0,05$ (Tendenz), *: $0,05 \geq p > 0,01$ (signifikant), **: $0,01 \geq p > 0,001$ (hoch signifikant), ***: $p \leq 0,001$ (höchst signifikant).

Zur Darstellung der Box-Plots (Kap. 3.2.1) wurden Indizes (a-d) verwendet, um signifikante Unterschiede zwischen den Dekaden zu zeigen.

2.3.1 Mann-Kendall Trendtest

Nicht alle Daten, einschließlich der phänologischen Beobachtungen, folgen der Normalverteilung (Runge & Schönwiese 1986). Daher wurde der Mann-Kendall-Trendtest durchgeführt³, ein nach Rapp & Schönwiese (1996) geeignetes Verfahren zur Abschätzung der Signifikanz eines Trends, ohne dass eine Normalverteilung oder die Linearität des Trends vorausgesetzt wird. Dieser Test bewertet daher nur ein relatives Ansteigen oder Abfallen der Werte über die Zeit (Rapp & Schönwiese 1996). Der Multivariate Mann-Kendall Trendtest (Version Sept. 2003)³ wurde mit den Jahresmittelwerten der Eintrittsdaten durchgeführt.

Der Mann-Kendall Trendtest wurde verwendet um

- die Signifikanz des Trends in den phänologischen Daten im Zeitraum von 1961 bis 2000

zu prüfen.

2.3.2 Mixed Models – Lineare gemischte Modelle

Lineare gemischte Modelle lassen die Entwicklung einer Vielzahl varianzanalytischer Modelle zu. Dazu gehören Modelle mit festen und zufälligen Effekten sowie verschiedene Designs für Messwiederholungen und Kovariaten (Bühl & Zöfel 2005).

Die Mixed Model Analysen wurden angewendet, da die untersuchten Individuen einer Art als Wiederholungen innerhalb eines Ringes und damit als begrenzte Wiederholungen angesehen

³ siehe: <http://www.mai.liu.se/~cllib/welcome/PMKtest.html>

werden können. Mit Hilfe der linearen gemischten Modelle ist es möglich, die Ergebnisse vielfältig zu untersuchen, so dass nicht nur die Mittelwerte der Daten, sondern auch ihre Varianzen und Kovarianzen analysiert werden können. Vor allem der Einfluss des Faktors Wasser, dargestellt durch die Faktoren Block, BF1 und BF2 (siehe nächster Abschnitt), kann durch das Modell auf vielfältige Weise untersucht werden. Dabei wird angenommen, dass die abhängige Variable sich linear zu den festen Faktoren, Zufallsfaktoren und Kovariaten verhält.

Die Mixed Model Analysen wurden mit den Mittelwerten der Blätter durchgeführt. Die untersuchten Blätter innerhalb eines Ringes wurden als Inner-Subjekt-Wiederholung betrachtet, die Ringe als Subjekte. Die Art der wiederholten Kovarianz war AR1, autoregressiv 1. Ordnung. Feste Faktoren waren die CO₂-Behandlung und der Block (längerfristige Bodenfeuchte, Ringpaar 1, 2 oder 3). Der Einfluss der Bodenfeuchte wurde bei den Untersuchungen des Stomatawiderstandes für Wasserdampf genauer überprüft, indem die kurzfristige Bodenfeuchte neben dem festen Faktor CO₂ als Kovariate einging. Dabei wurden zwei verschiedene Verfahren verwendet. Zum einen wurde der Einfluss der gemittelten Bodenfeuchte der 4 TDR-Sonden eines Ringes auf den Stomatawiderstand für Wasserdampf getestet (BF1), zum anderen der Effekt jener Bodenfeuchte der TDR-Sonde in der Nähe der untersuchten Pflanze berechnet (BF2).

Zusätzlich wurde eine Analyse mit CO₂ als einzigem festen Faktor durchgeführt. Die Ergebnisse gleichen denen des paarigen T-Tests, daher sind im Ergebnisteil nur diejenigen des klassischen Analyseverfahrens (paariger T-Test) aufgeführt.

Bei den Untersuchungen der Stomatadichte, der Blattdichte, des LMA (leaf mass per area) und der Blattdicke wurden die Mixed Model Analysen mit CO₂ und Block als festen Faktoren gerechnet.

Zeigten Untersuchungen des Stomatawiderstandes für Wasserdampf, der Stomatadichte, der Blattdichte, des LMA und der Blattdicke eine nicht signifikante Interaktion von CO₂*Block, CO₂*BF1 oder CO₂*BF2, wurden die Daten erneut getestet, jedoch ohne die Interaktion. Im Ergebnisteil sind im Falle nicht signifikanter Interaktionen die Ergebnisse der Analyse ohne den Test auf Interaktion dargestellt. Vorhandene signifikante Interaktionen sind in der Fußnote der Tabelle angegeben.

Die Mixed Model Analyse wurde verwendet um folgende Einflüsse zu überprüfen:

- Einfluss der CO₂-Konzentration und der längerfristigen Bodenfeuchte (als Block) sowie der Bodenfeuchte am Tag der Widerstandsmessung (als BF1 und BF2) auf den Stomatawiderstand für Wasserdampf
- Einfluss der CO₂-Konzentration und der Bodenfeuchte (als Block) auf die Stomatadichte
- Einfluss der CO₂-Konzentration und der Bodenfeuchte (als Block) auf die Blattdichte
- Einfluss der CO₂-Konzentration und der Bodenfeuchte (als Block) auf den LMA
- Einfluss der CO₂-Konzentration und der Bodenfeuchte (als Block) auf die Blattdicke

2.3.3 Univariate Varianzanalyse

Mit Hilfe der Univariaten Varianzanalyse ist es möglich, den Einfluss von einer oder mehreren unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable zu untersuchen. Dabei werden mehrere Mittelwerte einer normalverteilten Grundgesamtheit verglichen.

Die Variablen lassen sich in abhängige und unabhängige Parameter einteilen. Im Fall der Untersuchung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf war die abhängige Variable der Widerstand, die unabhängige Variable (mit nominalem Charakter) war der Faktor CO₂. Die unabhängige Einflussvariable Bodenfeuchte (BF1) war metrisch und konnte als Kovariate in die Analyse aufgenommen werden, um deren isolierten Einfluss auf die abhängige Variable zu prüfen.

Die Univariate Varianzanalyse wurde für die Untersuchungen des Widerstandes mit den Mittelwerten der Ringe gerechnet.

Die Ergebnisse sind nicht im Ergebnisteil dargestellt, da dieses Verfahren eine Sonderform der linearen gemischten Modelle ist (Bühl & Zöfel 2005) und die Ergebnisse denen der Mixed Model Analyse weitgehend glichen.

Mit Hilfe der Univariaten Varianzanalyse wurde außerdem getestet, ob die Eintrittsdaten der phänologischen Phasen in Hessen in den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2000 signifikante Unterschiede aufzeigten. Die Untersuchung wurde mit den mittleren Eintrittsterminen der Jahre durchgeführt, die unabhängigen Variablen waren die beiden Zeiträume. Die Ergebnisse sind nicht im Ergebnisteil dargestellt, sie befinden sich auf dem beiliegenden Datenträger (Arbeitsmappe "2 – Zusammenfassung - Entwicklung phänologischer Phasen").

Dieses Verfahren wurde ebenfalls verwendet, um mögliche Unterschiede in der Lufttemperatur, der Anzahl von Frosttagen, Eistagen, Sommertagen, heißen Tagen, im Beginn, Ende und Länge der thermischen Vegetationsperiode zu untersuchen. Die Analysen wurden mit den Jahresmittelwerten durchgeführt, wobei die unabhängige Variable die Dekade war.

Die Univariate Varianzanalyse wurde verwendet um folgende Einflüsse und Zusammenhänge zu prüfen:

- Einfluss des CO₂-Konzentration und der Bodenfeuchte (als BF1) auf den Stomatawiderstand für Wasserdampf
- Unterschiede zwischen den Eintrittsterminen der phänologischen Phasen in Hessen in den Zeiträumen von 1961 bis 1990 und von 1991 bis 2000
- Unterschiede in der Lufttemperatur, der Anzahl von Frosttagen, Eistagen, Sommertagen, heißen Tagen, im Beginn, Ende und Länge der thermischen Vegetationsperiode

2.3.4 Paariger T-Test

Zur Untersuchung des Einflusses der unabhängigen Variable CO_2 auf die abhängigen Variablen Stomatawiderstand für Wasserdampf, Stomatadichte, Blattdichte, LMA und Blattdicke wurde der T-Test bei gepaarten Stichproben verwendet, da die Blöcke 1, 2 und 3 jeweils ein Paar darstellen. Beim Vergleich der Mittelwerte von zwei abhängigen Gruppen werden die Einzelwerte paarweise aus denselben Fällen zweier Variablen entnommen. Als Wertepaar dienten jeweils die Mittelwerte eines Blockes, gruppiert nach erhöhten und aktuellen CO_2 -Konzentrationen.

Der paarige T-Test wurde verwendet um folgende Einflüsse zu überprüfen:

- Einfluss der CO_2 -Konzentration auf den Stomatawiderstand für Wasserdampf
- Einfluss der CO_2 -Konzentration auf die Stomatadichte
- Einfluss der CO_2 -Konzentration auf die Blattdichte
- Einfluss der CO_2 -Konzentration auf den LMA
- Einfluss der CO_2 -Konzentration auf die Blattdicke

2.3.5 Wilcoxon Test

Mit Hilfe des Wilcoxon Tests kann der Einfluss der unabhängigen Variable CO_2 auf die abhängigen Variablen Stomatawiderstand für Wasserdampf, Stomatadichte, Blattdichte, LMA und Blattdicke untersucht werden. Er ist ein nichtparametrischer Test für zwei verbundene Stichproben und vergleicht die Verteilung zweier Variablen anhand der Differenz zwischen den Wertepaaren. Dabei werden die Differenzen berechnet und nach ihrer absoluten Größe in eine Rangordnung gebracht. Danach werden die mittleren Rangzahlen der positiven und negativen Differenzen ermittelt. Der Wilcoxon Test wurde zusätzlich zum paarigen T-Test durchgeführt, da aufgrund der geringen Anzahl der Mittelwerte einer CO_2 -Behandlung (je 3 Mittelwerte) ein Test auf Normalverteilung eine sehr geringe Aussagekraft hat. Als Wertepaar dienten ebenfalls jeweils die Mittelwerte eines Blockes, sortiert nach erhöhten und aktuellen CO_2 -Konzentrationen.

Der Wilcoxon Test wurde verwendet um folgende Effekte zu überprüfen:

- Einfluss der CO_2 -Konzentration auf den Stomatawiderstand für Wasserdampf
- Einfluss der CO_2 -Konzentration auf die Stomatadichte
- Einfluss der CO_2 -Konzentration auf die Blattdichte
- Einfluss der CO_2 -Konzentration auf den LMA
- Einfluss der CO_2 -Konzentration auf die Blattdicke

3 Ergebnisse

3.1 Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Pflanzenentwicklung im Zeitraum von 1961 bis 2000

3.1.1 Entwicklung phänologischer Phasen der Zeigerpflanzen in Hessen

In der Pflanzenphänologie dienen phänologische Phasen von Zeigerpflanzen zur Charakterisierung der zehn "phänologischen Jahreszeiten" eines Jahres. Abbildung 10 zeigt den Trend des mittleren Eintrittsdatums von phänologischen Phasen in Hessen, welche vom DWD zur Charakterisierung des Beginns der vier Hauptjahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst und Winter bevorzugt werden. Zu erkennen ist, dass es in den letzten 50 Jahren in Hessen zu zeitlichen Verschiebungen in der Pflanzenentwicklung gekommen ist. Der Beginn der untersuchten phänologischen Phasen hat sich von 1961 bis 2000 im Mittel zwischen 2,5 Tage/Dekade bis 5,5 Tage/Dekade verfrüht (Tab. 7, Abb. 10). Diese Verfrühtung der phänologischen Phasen konnte in Hessen überwiegend ab dem Beginn der 1990er Jahre beobachtet werden, beim Winterweizen jedoch schon ab den 1980er Jahren.

Die Ergebnisse aller ausgewerteten Phasen der Haupt- und Ersatzindikatoren sind sowohl auf der Ebene des Bundeslandes (Arbeitsmappe "3 – Zeigerpflanzen - Entwicklung phänologischer Phasen") als auch auf der Ebene der Haupteinheitengruppen (Arbeitsmappe "4 – Phänologische Uhren") auf beiliegendem Datenträger zusammengestellt. Auf der Ebene des Bundeslandes traten in der Dekade von 1991 bis 2000 im Vergleich zum Zeitraum von 1961 bis 1990 Verfrühtungen zwischen 0,4 Tage/Dekade (Beginn der Pflückreife des Frühapfels) bis 5,5 Tage/Dekade (Blühbeginn der Haselnuss) auf.

Tab. 7: Mittlere Eintrittstage der phänologischen Phasen in Hessen und ihr Trend pro Dekade im Zeitraum 1951-2000 zur Charakterisierung des Beginns der Hauptjahreszeiten

Dekade	Tag im Jahr			
	Haselnuss Beginn der Blüte	Schwarzer Holunder Beginn der Blüte	Schwarzer Holunder Beginn der Fruchtreife	Winterweizen Beginn des Auflaufens
1951-1960	61	156	245	302
1961-1970	66	158	246	301
1971-1980	54	158	245	304
1981-1990	60	155	242	298
1991-2000	46	148	237	295
Trend (Tage/10 Jahre)	-5,5	-3,1	-2,8	-2,5

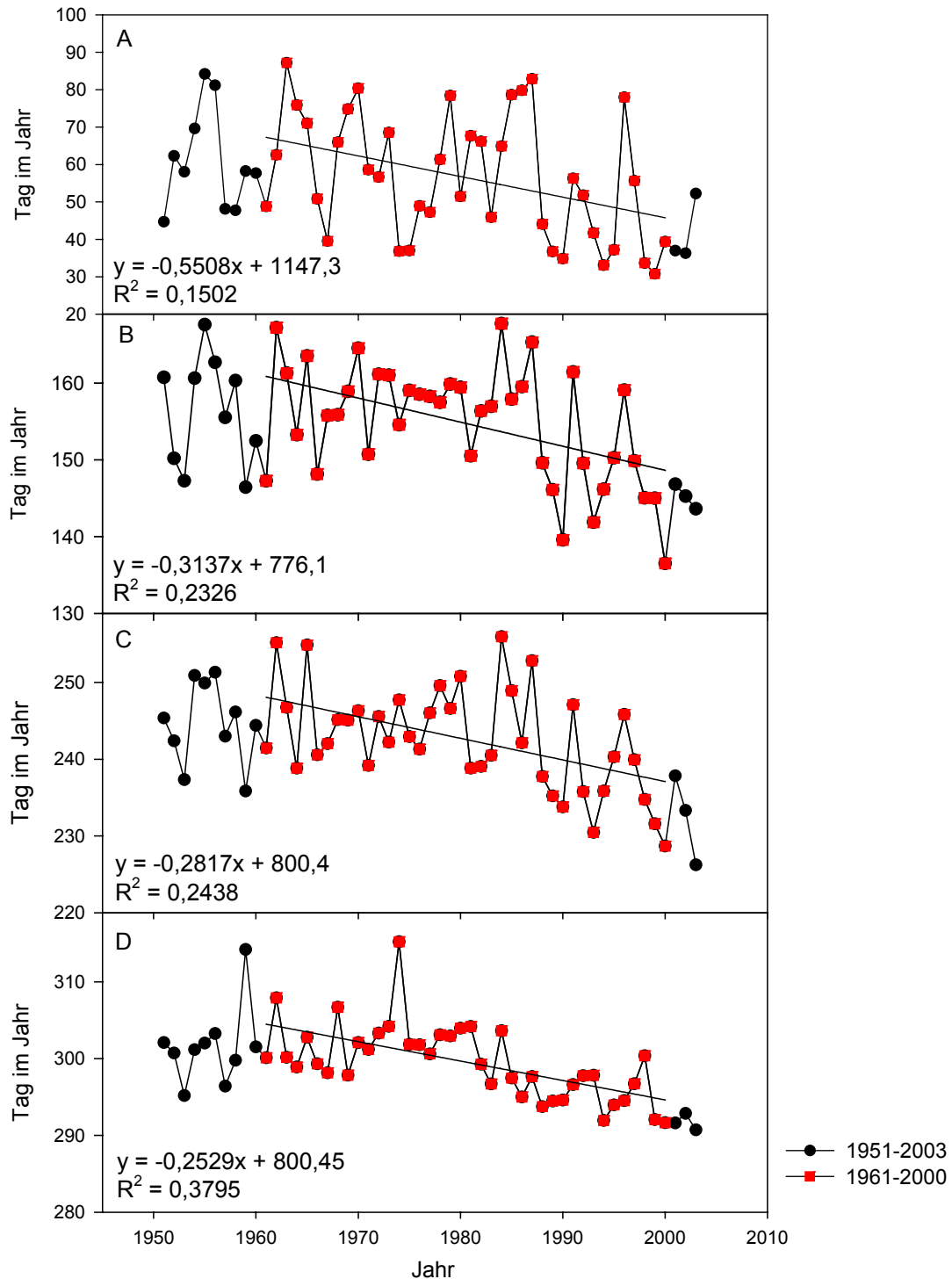


Abb. 10: Mittlere Eintrittstage der phänologischen Phasen in Hessen im Zeitraum 1951-2003 zur Charakterisierung des Beginns der Hauptjahreszeiten
 A: Haselnuss – Blüte; Beginn des Vorfrühlings, B: Schwarzer Holunder – Blüte; Beginn des Frühlommers, C: Schwarzer Holunder – Fruchtreife; Beginn des Frühherbstes, D: Winterweizen – Auflaufen; Beginn der Vegetationsruhe

Nicht alle Pflanzen zeigten aber eine Verfrüfung in ihrer Entwicklung. So verspätete sich der Beginn der Blattverfärbung der Stiel-Eiche, den Beginn des Spätherbstes anzeigend, in Hessen mit 0,5 Tage/Dekade tendenziell. Die Verschiebung dieser Phase ist in den einzelnen

Regionen Hessens jedoch sehr unterschiedlich ausgeprägt: So verfrühte sich der Beginn der Blattverfärbung der Stiel-Eiche in der Dekade von 1991 bis 2000 im Vergleich zu 1961 bis 1990 im Hessisch-Fränkischen Bergland und im Taunus, zeigte keine Veränderung im Nördlichen Oberrheintiefland, im Westerwald und im Osthessischen Bergland und verspätete sich in den anderen Haupteinheitengruppen Hessens zwischen zwei bis sechs Tagen (Tab. 8).

Tab. 8: Eintrittsdatum der Blattverfärbung der Stiel-Eiche im Zeitraum 1961-1990 und 1991-2000 in den verschiedenen Haupteinheitengruppen Hessens

Haupteinheiten- gruppe	Bezeichnung	Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ)	
		1961- 1990	1991 - 2000
14	Hessisch-Fränkisches Bergland	290	287
22	Nördliches Oberrheintiefland	294	294
23	Rhein-Main-Tiefland	292	294
30	Taunus	288	287
31	Gießen-Koblenzer-Lahntal	287	292
32	Westerwald	288	288
33	Bergisch-Sauerländisches Gebirge	284	288
34	Westhessisches Berg- und Senkenland	286	289
35	Osthessisches Bergland	289	289
36	Oberes Weserbergland	279	285
48	Thüringer Becken mit Randplatten	286	290

JTZ: Jahrestagszahl des Julianischen Kalenders

3.1.2 "Phänologische Jahreszeiten" und Vegetationszeit

Der mittlere Trend der Eintrittstermine jener phänologischen Phasen der Hauptindikatorarten beträgt in Hessen (überwiegend signifikant) +0,5 Tage/Dekade bis -5,5 Tage/Dekade (Tab. 9). Die graphische Darstellung in Form der so genannten doppelten phänologischen Uhr illustriert diese Verschiebungen der Jahreszeiten im Zeitraum von 1991 bis 2000 (innerer Ring) im Vergleich zur Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 (äußerer Ring) (Abb. 11). Es sind erhebliche Differenzen zur klimatologischen Jahreszeit, welche durch die schwarzen und weißen Flächen in der Mitte der Uhr symbolisiert wird, zu verzeichnen.

Das Maß der Verfrühung der Jahreszeiten nahm im Laufe des Jahres ab, d.h. der Beginn des Frühlings war stärker nach vorne verlagert als der des Sommers, Herbstes und der Vegetationsruhe. Der Spätherbst hat sich, wie bereits ausgeführt, verzögert: Er begann 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. 9).

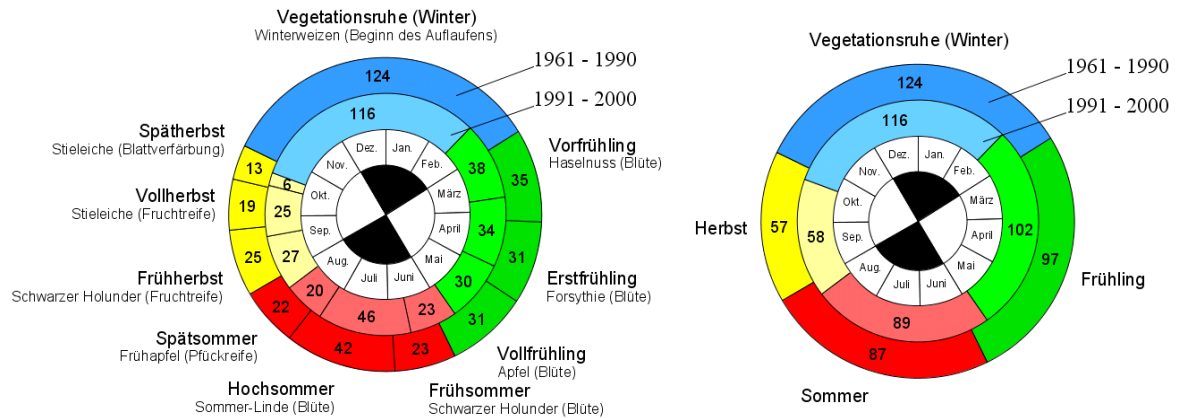


Abb. 11: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für Hessen

Tab. 9: Beginn der "phänologischen Jahreszeit" für Hessen gemittelt für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2000

"Phänologische Jahreszeit"	Zeigerpflanze und phänologische Phase	Anzahl der Stationen	Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ)		Trend (Tage/10a)	Signifikanz
			1961-1990	1991-2000		
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; $p \leq 0,001$

JTZ: Jahrestagszahl des Julianischen Kalenders

Die frühen phänologischen Phasen der einzelnen Hauptjahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst und Winter haben sich stärker vorverlagert als die jeweils späteren. Die stärkste und damit auffälligste Verfrühung zeigte der Vorfrühling mit 14 Tagen, gefolgt vom Erstfrühling mit elf Tagen (Tab. 9). Der Frühsommer und der Hochsommer begannen in der Dekade von 1991 bis 2000 je neun Tage früher als in der Periode von 1961 bis 1990, der Frühherbst sieben Tage. Der Beginn der Vegetationsruhe hat sich um sechs Tage verfrüht.

Zusätzlich zur Verschiebung der Jahreszeiten hat sich auch ihre Dauer verändert. Der Frühling hat sich im Zeitraum von 1991 bis 2000 im Vergleich zur Klimanormalperiode mit fünf Tagen am stärksten verlängert (Abb. 11, rechts). Die Länge des Sommers hat, vergleicht man den inneren mit dem äußeren Ring der doppelten phänologischen Uhr, um zwei Tage, die

des Herbstes hat um einen Tag zugenommen. Im Gegensatz dazu hat sich die Vegetationsruhe im Zeitraum von 1991 bis 2000 gegenüber 1961 bis 1990 um acht Tage verkürzt. Dies war hauptsächlich durch die Vorverlagerung und Verlängerung des Frühlings bedingt. Innerhalb der Jahreszeiten war eine Tendenz zur Verlängerung der frühen und Verkürzung der späten Phasen zu beobachten (Abb. 11, links).

Die Folge der Veränderung der Dauer der Jahreszeiten war eine Verlängerung der Vegetationsperiode in der Dekade von 1991 bis 2000 um acht Tage (Abb. 11, rechts). Die Verlängerung basierte dabei zum Großteil auf einem früheren Beginn der Vegetationsperiode und nicht auf einer Verspätung des Vegetationsendes. Der Herbst endete sogar etwas früher als im Zeitraum von 1961 bis 1990 (Tab. 9, Abb. 11).

Bei Betrachtung der einzelnen Naturraumgruppen Hessens konnten ähnliche Trends beobachtet werden. Daher sind im Folgenden die Ergebnisse beispielhaft von nur drei Naturraumgruppen, dem Hessisch-Fränkischen Bergland (Abb. 12, Tab. 10), dem Bergisch-Sauerländischen Gebirge (Abb. 13, Tab. 11) und dem Gießen-Koblenzer-Lahntal (Abb. 14, Tab. 12), dargestellt. Die Ergebnisse aller Naturraumgruppen befinden sich auf dem beiliegenden Datenträger in der Arbeitsmappe "4 – Phänologische Uhren".

Generell zeigte sich eine Verlängerung von Frühling und Herbst und eine Verfrühung der phänologischen Phasen, welche im Jahresverlauf kleiner wurde. Der Frühling hat sich in allen Naturraumgruppen am stärksten vorverlagert. Regionale Unterschiede konnten im Beginn des Spätherbstes beobachtet werden. Dieser trat in vielen Regionen verzögert ein (siehe beispielhaft Abb. 13, Tab. 11). Im Hessisch-Fränkischen Bergland (Abb. 12, Tab. 10) und im Taunus (Arbeitsmappe "4 – Phänologische Uhren" auf beiliegendem Datenträger) hingegen verfrühte sich dessen Eintritt.

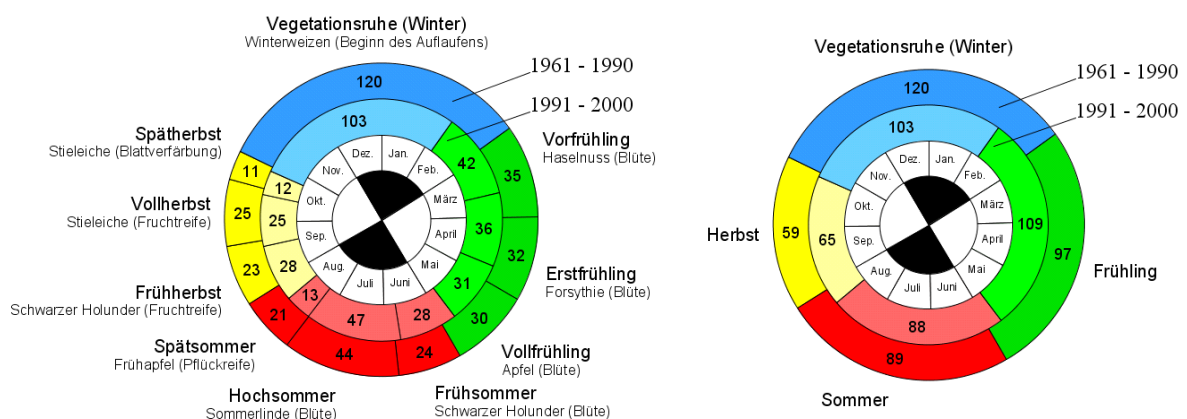


Abb. 12: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 14 - Hessisch-Fränkisches Bergland

Tab. 10: Beginn der "phänologischen Jahreszeit" für das Hessisch-Fränkische Bergland gemittelt für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2000

"Phänologische Jahreszeit"	Zeigerpflanze und phänologische Phase	Anzahl der Stationen	Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ)		Trend (Tage/10a)	Signifikanz
			1961-1990	1991-2000		
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; $p \leq 0,001$

JTZ: Jahrestagszahl des Julianischen Kalenders

Regionale Unterschiede zeigten sich auch in der Dauer des Sommers und der Vegetationsperiode. Im Bezug auf die Länge des Sommers konnten sowohl Verlängerungen (Abb. 13) als auch Verkürzungen (Abb. 14) beobachtet werden.

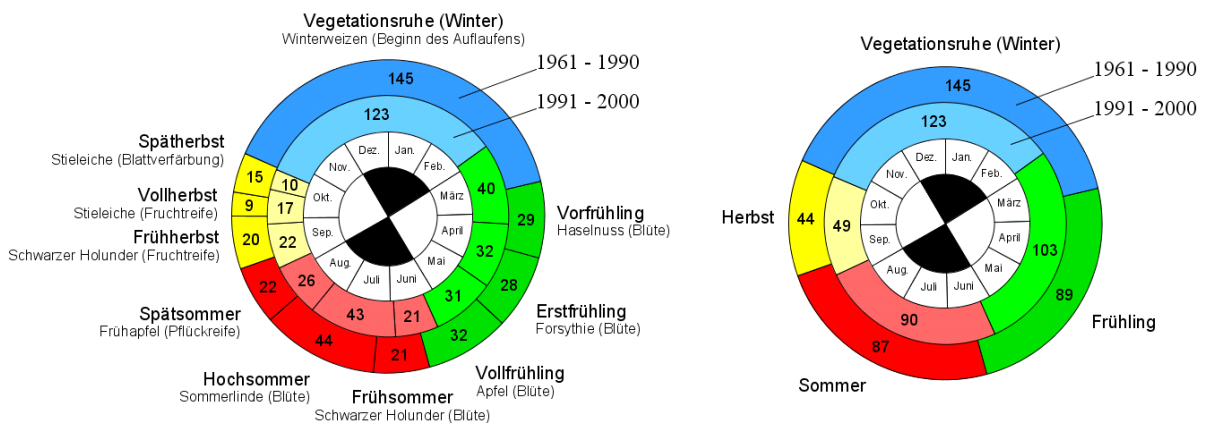


Abb. 13: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 33 - Bergisch-Sauerländisches Gebirge

Tab. 11: Beginn der "phänologischen Jahreszeit" für das Bergisch-Sauerländische Gebirge gemittelt für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2000

"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; $0,10 \geq p > 0,05$, *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$, **: hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$, ***: höchst signifikant; $p \leq 0,001$
 JTZ: Jahrestagszahl des Julianischen Kalenders

Regional gegensätzliche Trends zeigten sich bei Betrachtung der Dauer der Vegetationsruhe. Im Bergisch-Sauerländischen Gebirge hat sich die Dauer der Vegetationsruhe, bedingt durch die Verlängerung von Frühling, Sommer und Herbst, um drei Wochen verkürzt (Abb. 13). Demgegenüber hat sich die Vegetationsruhe im Gießen-Koblenzer-Lahntal aufgrund einer verkürzten Sommerphase um zwei Tage verlängert (Abb. 14).

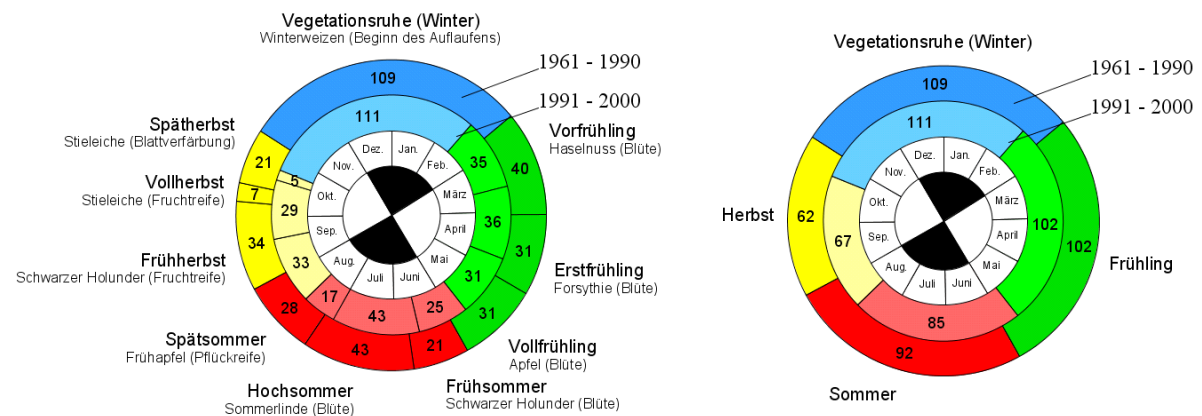


Abb. 14: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 31 - Gießen-Koblenzer-Lahntal

Tab. 12: Beginn der "phänologischen Jahreszeit" für das Gießen-Koblenzer-Lahntal gemittelt für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2000

"Phänologische Jahreszeit"	Zeigerpflanze und phänologische Phase	Anzahl der Stationen	Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ)		Trend (Tage/10a)	Signifikanz
			1961 - 1990	1991 - 2000		
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; $0,10 \geq p > 0,05$, *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$

** : hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$, ***: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

JTZ: Jahrestagszahl des Julianischen Kalenders

Der Beginn der Vegetationsperiode hat sich in allen Naturraumgruppen Hessens im Zeitraum von 1991 bis 2000 im Vergleich zu 1961 bis 1990 verfrüht (Abb. 15). Das Ausmaß der Verfrühtung war regional unterschiedlich und betrug zwischen drei Tagen (Taunus) und 22 Tagen (Oberes Weserbergland). Das Ende der Vegetationszeit hat sich ebenfalls verfrüht, im Mittel zwischen einem Tag (Bergisch-Sauerländisches Gebirge, Nördliches Oberrheintiefland) und 21 Tagen (Oberes Weserbergland). Im Bezug auf die Dauer der Vegetationsperiode konnten gegensätzliche Trends in benachbarten Naturräumen beobachtet werden. Während sich die Vegetationszeit in den meisten Regionen im Zeitraum von 1991 bis 2000 gegenüber 1961 bis 1990 verlängerte, ist sie in einigen wiederum unverändert geblieben. Im Gießen-Koblenzer-Lahntal hat sie sich sogar verkürzt (Abb. 14 und 15).

3.2 Abschätzung der Auswirkung der Klimaerwärmung auf die zukünftige Pflanzenentwicklung im Zeitraum von 2041 bis 2050 und mögliche Konsequenzen

3.2.1 Veränderung des Klimas am Beispiel Gießen

Das Jahresmittel der Lufttemperatur hat sich in Gießen im Zeitraum von 1961 bis 2000 um $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ signifikant erhöht (Abb. 16). 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 von 2041 bis 2050 auf $11,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu rechnen (Abb. 16).

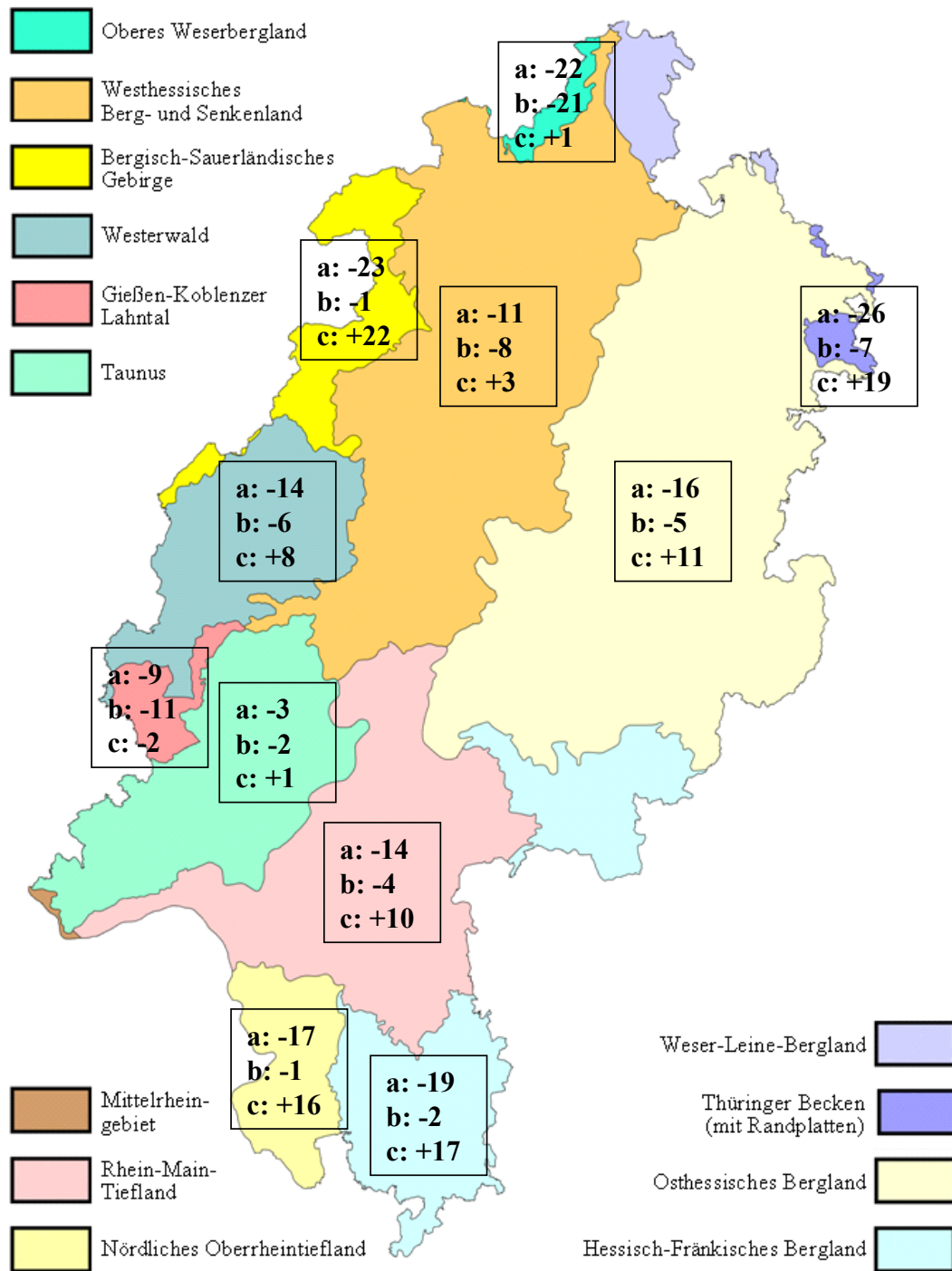


Abb. 15: Zeitliche Verschiebung der Vegetationsperiode in Hessen (Vergleich der Zeiträume 1961-1990 mit 1991-2000)

a: Beginn der Vegetationsperiode, b: Ende der Vegetationsperiode, c: Länge der Vegetationsperiode, negative Werte zeigen eine Verfrühung in der Dekade 1991-2000, positive Werte eine Verspätung

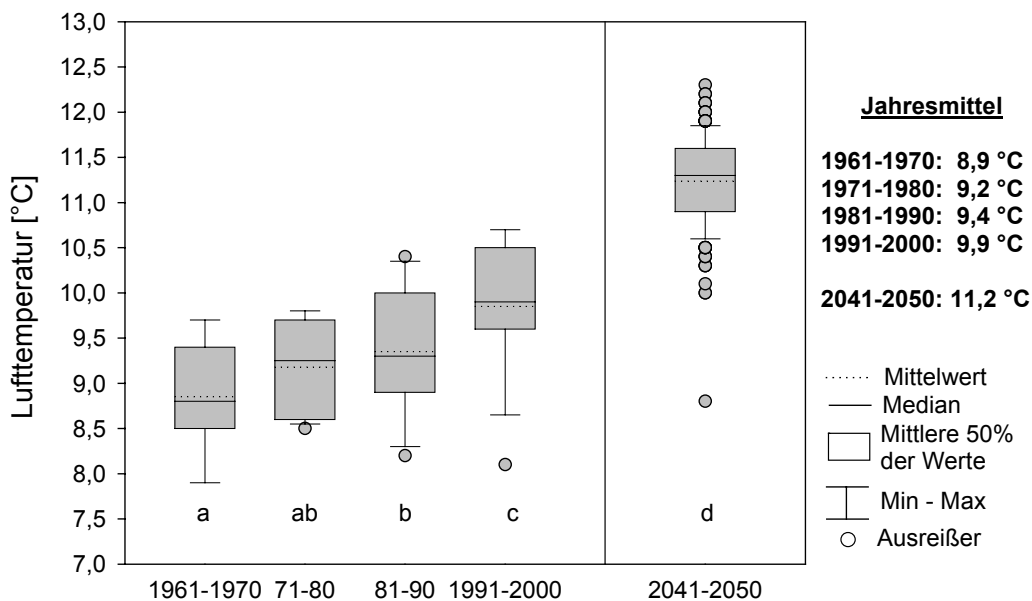


Abb. 16: Jahresmittel der Lufttemperatur in 2 m über Grund im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
 Gleiche Indizes bedeuten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dekaden.

Die Anzahl der Frosttage ($T_{\min} < 0\text{ °C}$) wird sich in Gießen von 69 Tagen in der Periode von 1991 bis 2000 auf 45 Tage in der Dekade von 2041 bis 2050 signifikant verringern (Abb. 17).

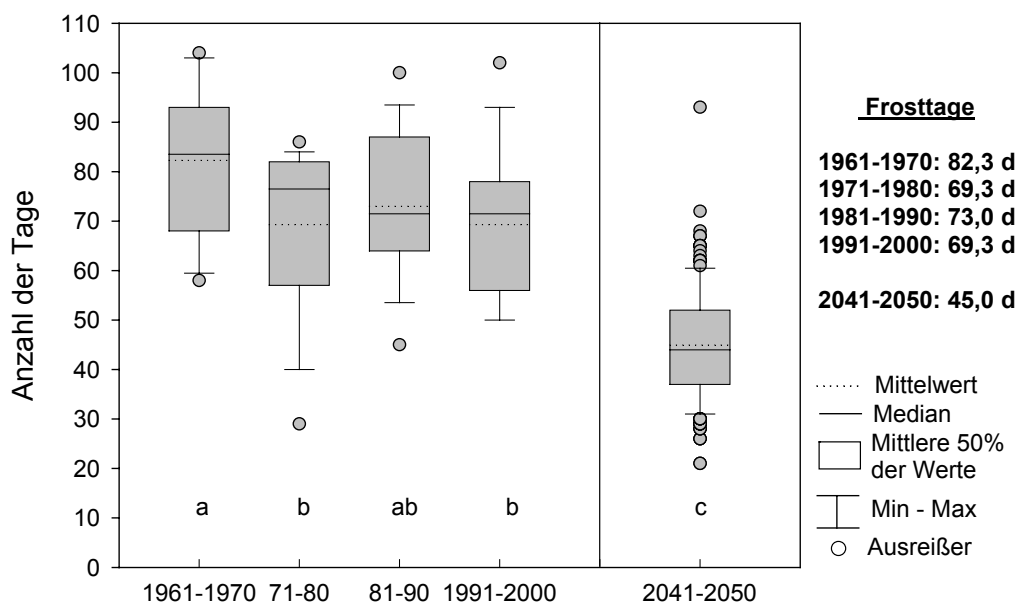


Abb. 17: Anzahl der Frosttage ($T_{\min} < 0\text{ °C}$) im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
 Gleiche Indizes bedeuten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dekaden.

Ein Vergleich der beiden Zeiträume von 1961 bis 2000 und von 2041 bis 2050 zeigt, dass sich die Anzahl der Frosttage am stärksten in den ersten zwei Monaten des Jahres vermindert (Tab.

13). Die Gefahr von Spätfrösten ist deshalb auch in der Zukunft gegeben. Für den Mai deutet sich sogar eine leichte Verstärkung der Spätfrostgefahr an.

Tab. 13: Anzahl der Frosttage in den Monaten Januar bis Mai im Zeitraum 1961-2000 und 2041-2050 in Gießen

Zeitraum	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

Zusätzlich zur Anzahl der Frosttage hat auch die Anzahl der Eistage ($T_{\max} < 0\text{ °C}$) abgenommen (Abb. 18), in den letzten 40 Jahren insgesamt um zehn Tage. Auch dieser Trend setzt sich in der Zukunft fort. In der Dekade von 2041 bis 2050 wird sich die Anzahl der Eistage im Vergleich zu 1991 bis 2000 um weitere neun Tage signifikant verringern.

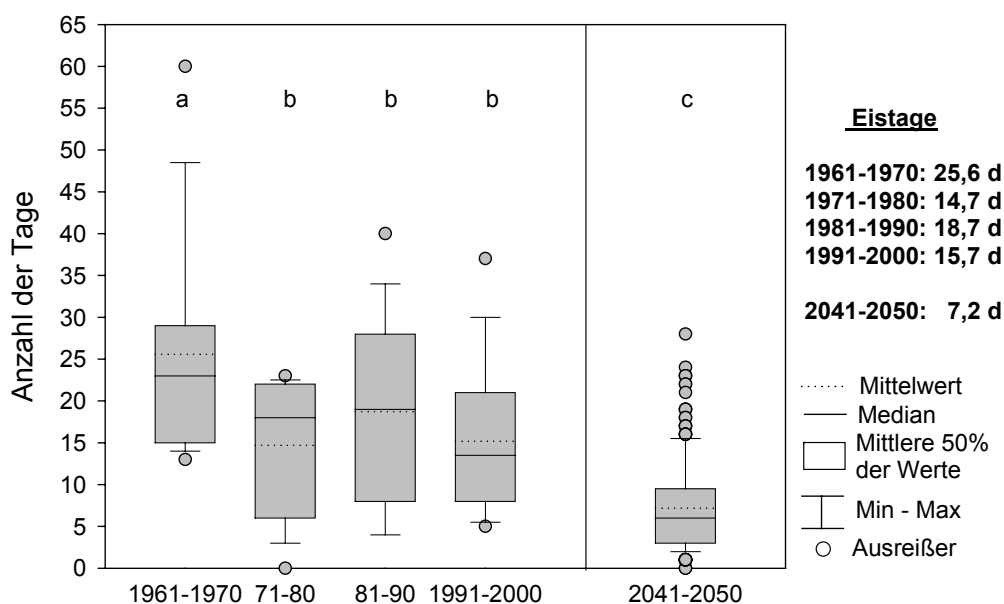


Abb. 18: Anzahl der Eistage ($T_{\max} < 0\text{ °C}$) im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
 Gleiche Indizes bedeuten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dekaden.

Einhergehend mit der Abnahme der Frost- und Eistage stieg die Zahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$) und heißen Tage ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) in dem Zeitraum von 1961 bis 2000. Für die Dekade von 2041 bis 2050 wird eine weitere Erhöhung der Sommertage auf 61 Tage pro Jahr und der heißen Tage auf 12 Tage pro Jahr prognostiziert (Abb. 19 und 20).

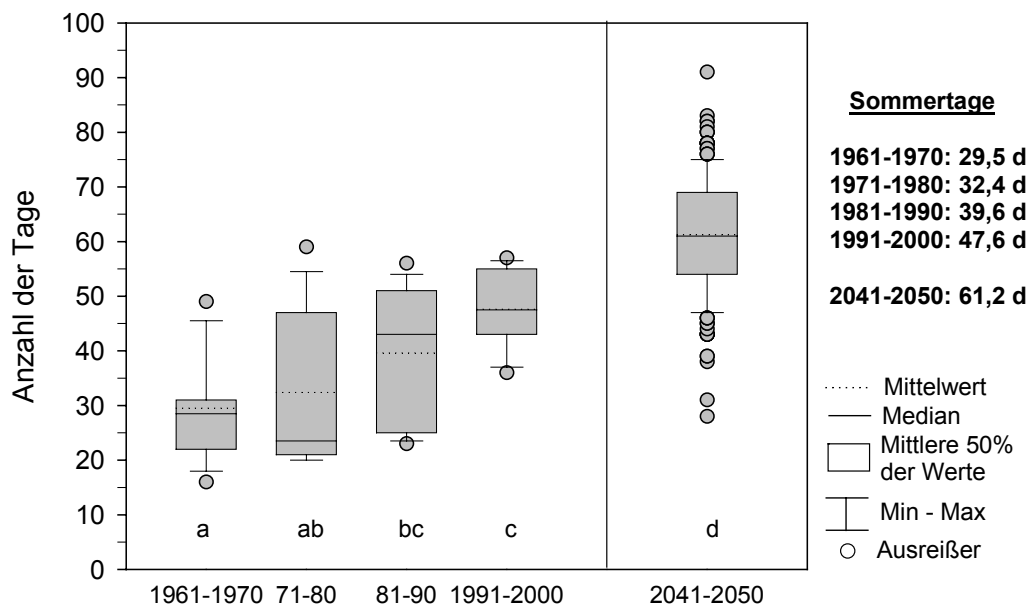


Abb. 19: Anzahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
 Gleiche Indizes bedeuten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dekaden.

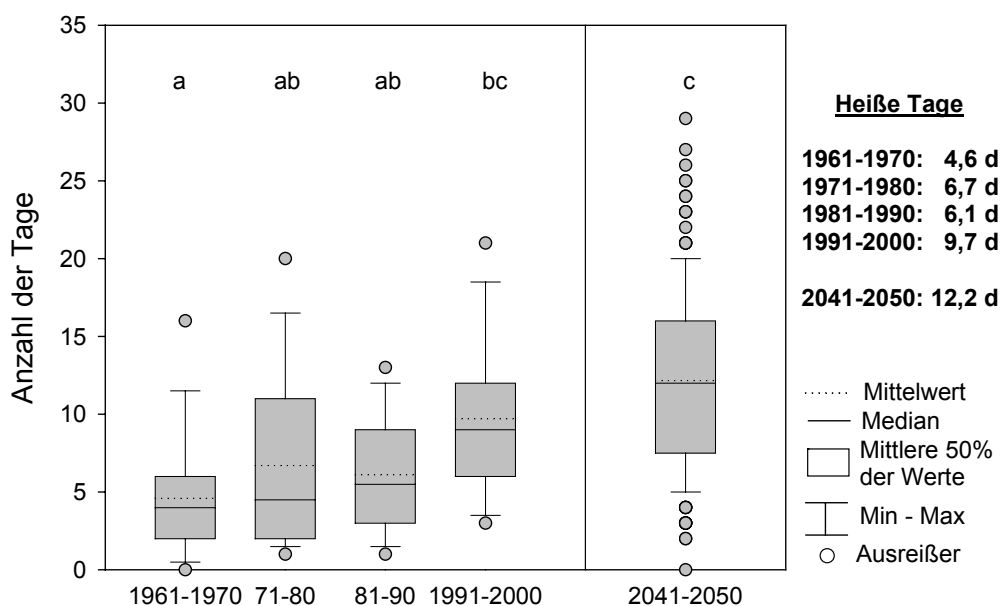


Abb. 20: Anzahl der heißen Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
 Gleiche Indizes bedeuten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dekaden.

Die Veränderungen der Lufttemperatur haben sowohl Auswirkungen auf den Beginn als auch auf die Dauer der thermischen Vegetationsperiode. Die thermische Vegetationsperiode beginnt, wenn das Tagesmittel der Lufttemperatur die 5 °C -Schwelle nachhaltig überschreitet und endet mit der Unterschreitung der 5 °C -Schwelle (Chmielewski & Köhn 2000).

Im Untersuchungszeitraum von 1961 bis 2000 war eine Verfrüfung des Beginns der thermischen Vegetationsperiode um fast zwei Wochen zu verzeichnen (Abb. 21). Diese war

jedoch aufgrund der hohen Streuung der Daten der Dekade von 1961 bis 1970 nicht signifikant. Für die Dekade von 2041 bis 2050 wird sich der Beginn der thermischen Vegetationsperiode signifikant verfrühen, im Mittel auf den 31.1. (Abb. 21).

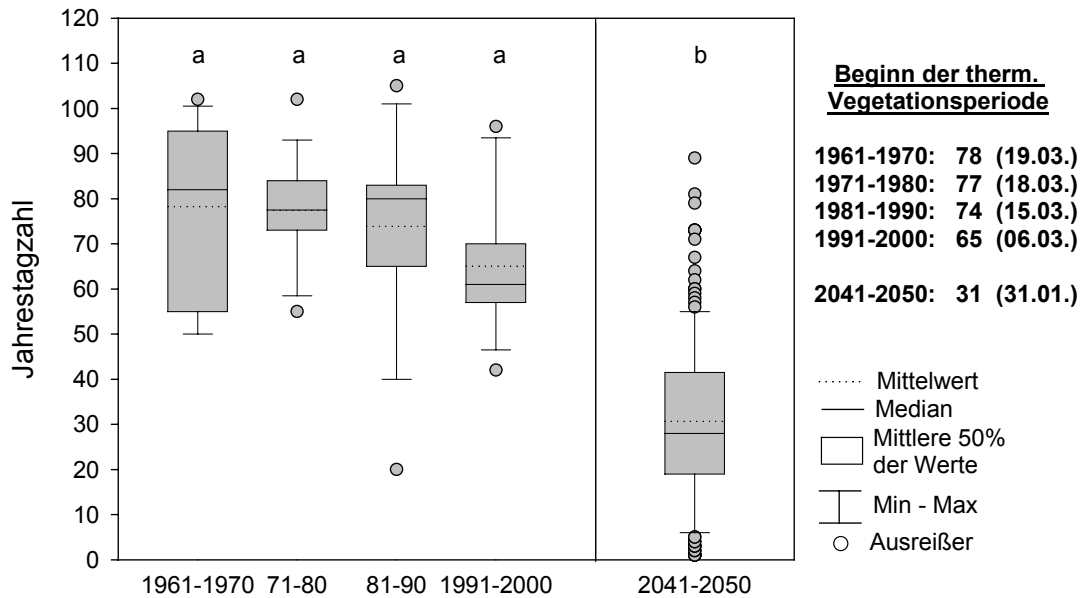


Abb. 21: Beginn der thermischen Vegetationsperiode im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
 Gleiche Indizes bedeuten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dekaden.

Betrachtet man das Ende der thermischen Vegetationsperiode, ist für den Zeitraum von 1961 bis 2000 keine eindeutige Tendenz zu erkennen (Abb. 22).

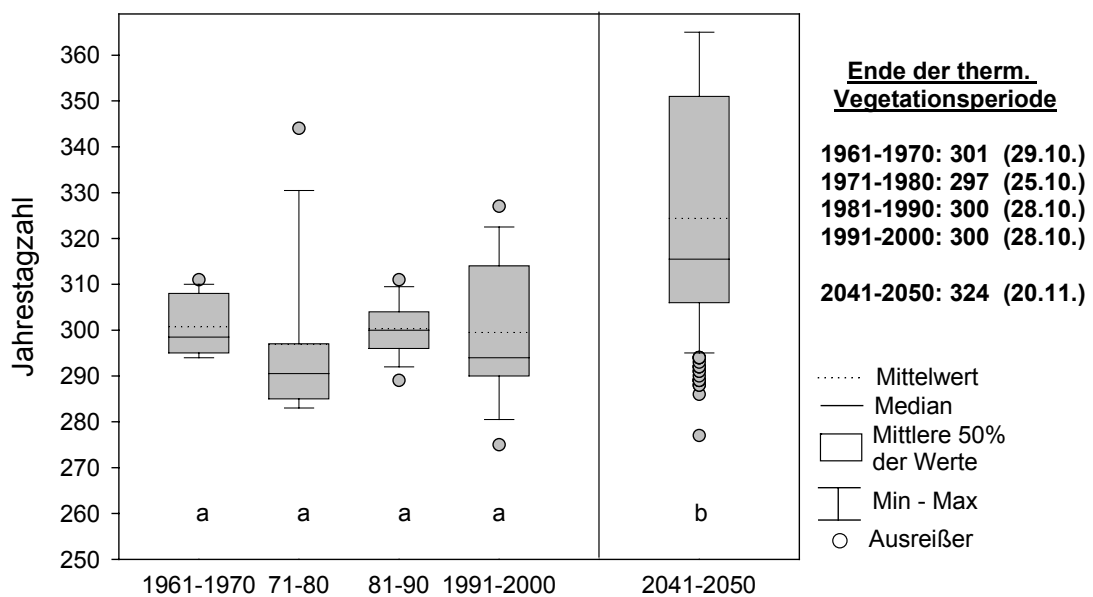


Abb. 22: Ende der thermischen Vegetationsperiode im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
 Gleiche Indizes bedeuten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dekaden.

In der Dekade von 2041 bis 2050 wird sich das Ende der thermischen Vegetationsperiode im Mittel um drei Wochen verzögern, was insgesamt zu einer signifikanten Verlängerung der thermischen Vegetationsperiode von 235 Tagen im Zeitraum von 1991 bis 2000 auf 294 Tage in der Periode von 2041 bis 2050 führen wird (Abb. 23). Im Zeitraum von 1961 bis 2000 hat sich die thermische Vegetationsperiode um fast zwei Wochen verlängert (Abb. 23).

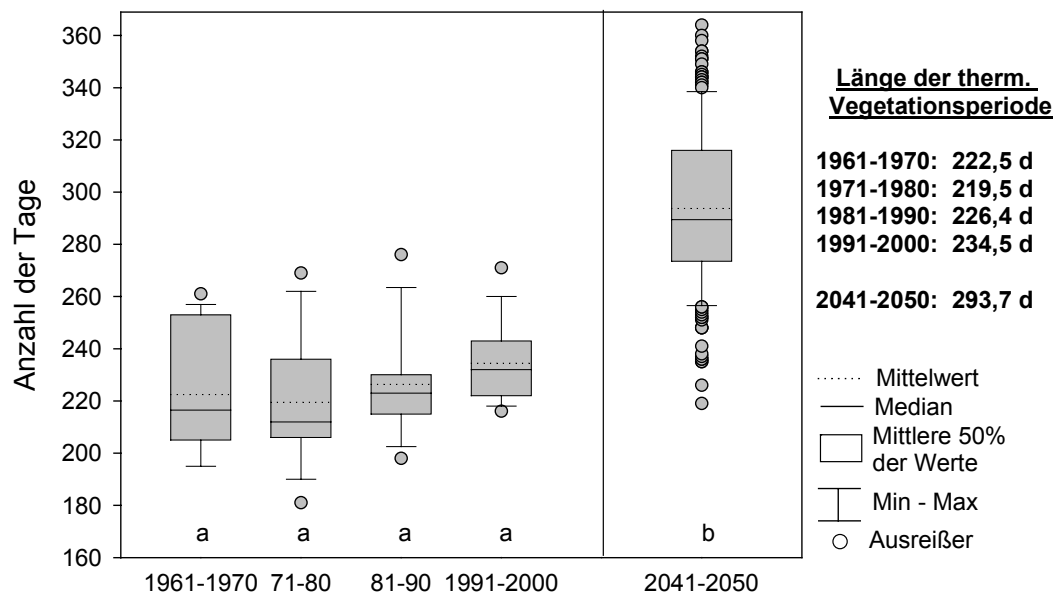


Abb. 23: Länge der thermischen Vegetationsperiode im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen
Gleiche Indizes bedeuten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dekaden.

3.2.2 Abschätzung des Eintritts der phänologischen Phasen in der Dekade von 2041 bis 2050 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

3.2.2.1 Modellierung

Die Frühlingsphase wurde durch den Blühbeginn der Haselnuss charakterisiert. Das optimale Temperatursummenmodell ($R^2 = 0,80$) berechnete sich für eine Basistemperatur von 0 °C und einer effektiven Temperatursumme von $112,4\text{ K}$ mit einem mittleren Modellfehler (RMSE) von $9,2$ Tagen und einem mittleren absoluten Fehler (MAE, Mean Absolute Error) von $7,3$ Tagen (Abb. 24).

Die Modellierung der Sommerphase, repräsentiert durch den Blühbeginn des Schwarzen Holunders, erfolgte ebenfalls mit Hilfe des Temperatursummenmodells. Bei einer Basistemperatur von $2,6\text{ °C}$ und einer Temperatursumme von $675,2\text{ K}$ war der mittlere Modellfehler (RMSE) mit $4,4$ Tagen am kleinsten (Kap. 2.1.3, Abb. 7). Die beobachteten und durch das Modell berechneten Eintrittstermine des Blühbeginns des Schwarzen Holunders zeigen nur geringe Differenzen auf (Abb. 25).

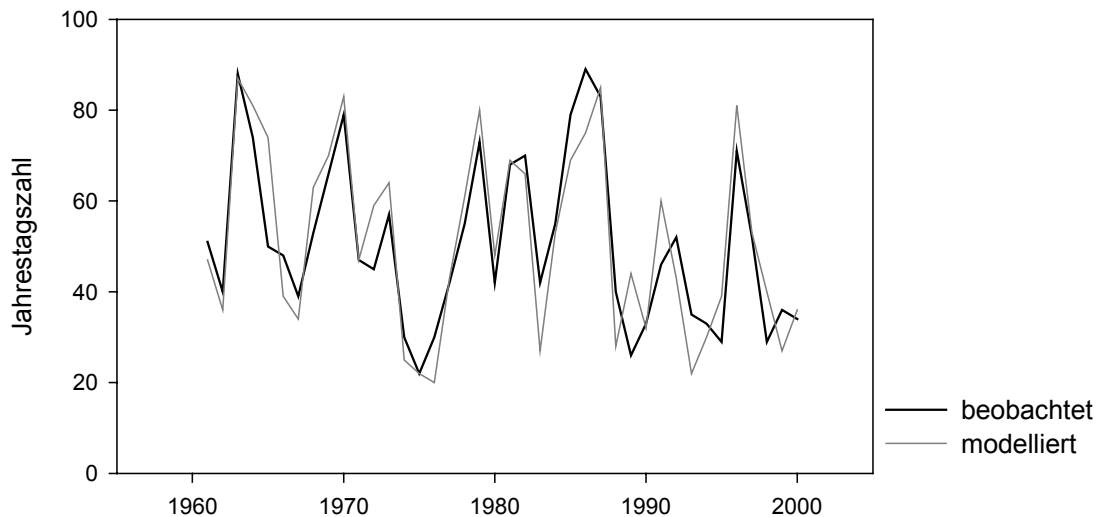


Abb. 24: Beobachteter und mittels Temperatursummenmodell abgeschätzter Blühbeginn der Haselnuss im Zeitraum 1961-2000 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener- Lahntal) ($T_B = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 112,4 \text{ K}$, $\text{RMSE} = 9,2 \text{ Tage}$, $\text{MAE} = 7,3 \text{ Tage}$, $R^2 = 0,80$)

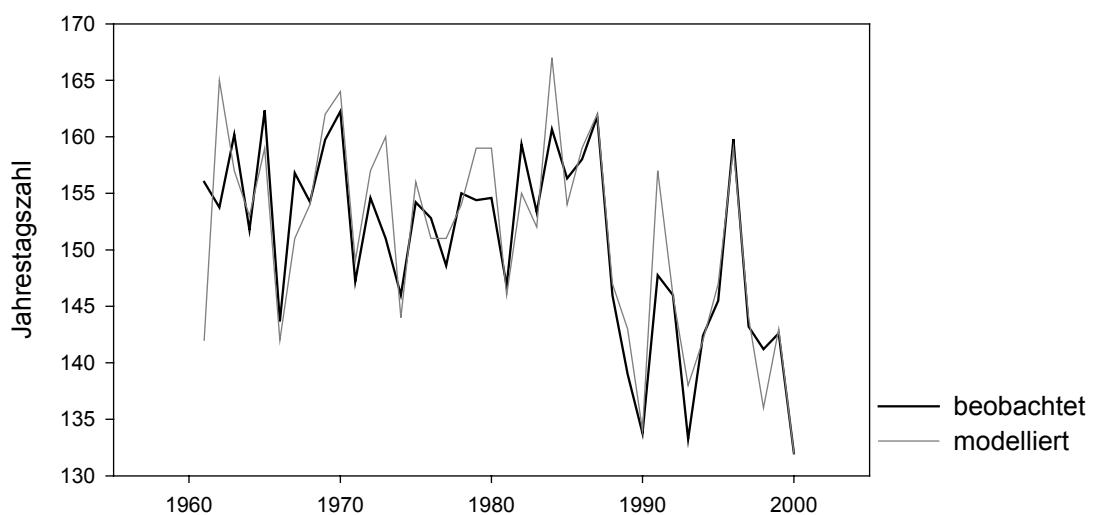


Abb. 25: Beobachteter und mittels Temperatursummenmodell abgeschätzter Blühbeginn des Schwarzen Holunders im Zeitraum 1961-2000 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) ($T_B = 2,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_S = 675,2 \text{ K}$, $\text{RMSE} = 4,4 \text{ Tage}$, $\text{MAE} = 3 \text{ Tage}$, $R^2 = 0,76$)

Beide 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 %.

Auch der Beginn der Herbst- und Winterphasen wurde zunächst versuchsweise mit Regressionsmodellen abgeschätzt. 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 das Bestimmtheitsmaß jeweils größer.

Der Beginn des Früh- und Vollherbstes konnte erfolgreich durch den Beginn der Fruchtreife des Schwarzen Holunders charakterisiert werden (Abb. 26). Dabei wurde der Blühbeginn des Schwarzen Holunders von 1971 bis 2000 berücksichtigt, der über das Temperatursummenmodell ermittelt wurde.

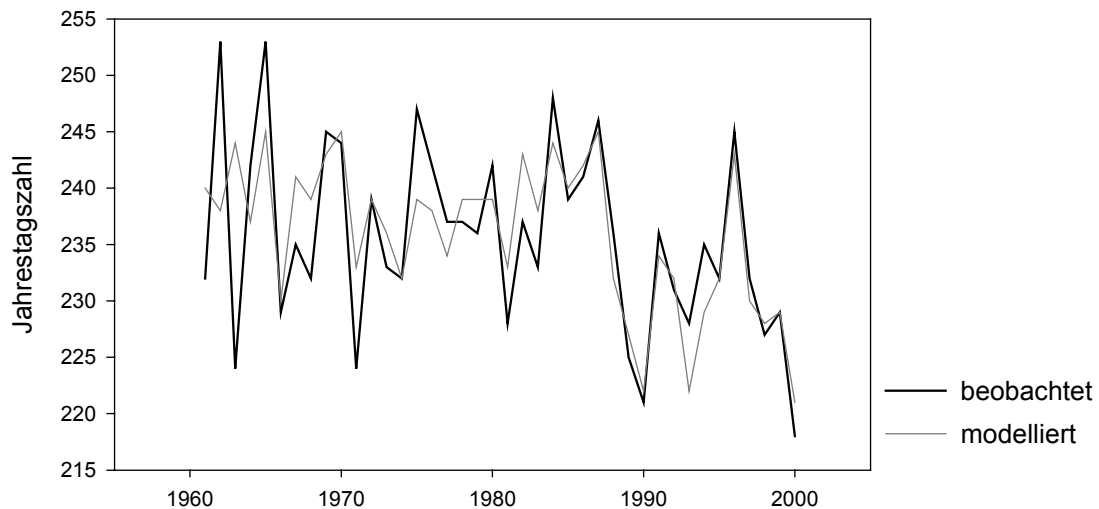


Abb. 26: Beobachteter und mittels Regressionsmodell abgeschätzter Beginn der Fruchtreife des Schwarzen Holunders im Zeitraum 1961-2000 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

$$\text{(Fruchtreife (Schwarzer Holunder))} = 115,541 + 0,799005 * \text{Blühbeginn (Schwarzer Holunder)},$$

RMSE = 3,9 Tage, MAE = 3 Tage, $R^2 = 0,74$)

Nach diesem Verfahren konnte auch der Beginn des Spätherbstes/der Vegetationsruhe abgeschätzt werden, jedoch wurde das Regressionsmodell über den Blühbeginn des Schwarzen Holunders im Zeitraum von 1961 bis 2000 berechnet. Als Indikatorphase für den Spätherbst/das Vegetationsende wurde nach Menzel et al. (2001) der Beginn der Blattverfärbung der Stiel-Eiche gewählt, da die Modellierung über die drei 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), werden in Hessen erst seit 1991 beobachtet. Dieser Beobachtungszeitraum von zehn Jahren ist für die Entwicklung eines Modells zu kurz.

Der mittlere Modellfehler betrug fünf Tage. Die Prognose des Beginns des Spätherbstes/des Vegetationsendes ist mit großer Unsicherheit behaftet, denn das Modell beschreibt die Variabilität lediglich zu 27 % (Abb. 27). Das Modell für den Beginn des Früh- und Vollherbstes ist dagegen befriedigend, da es zu 74 % die Variabilität in den Eintrittsterminen erklärt (Abb. 26).

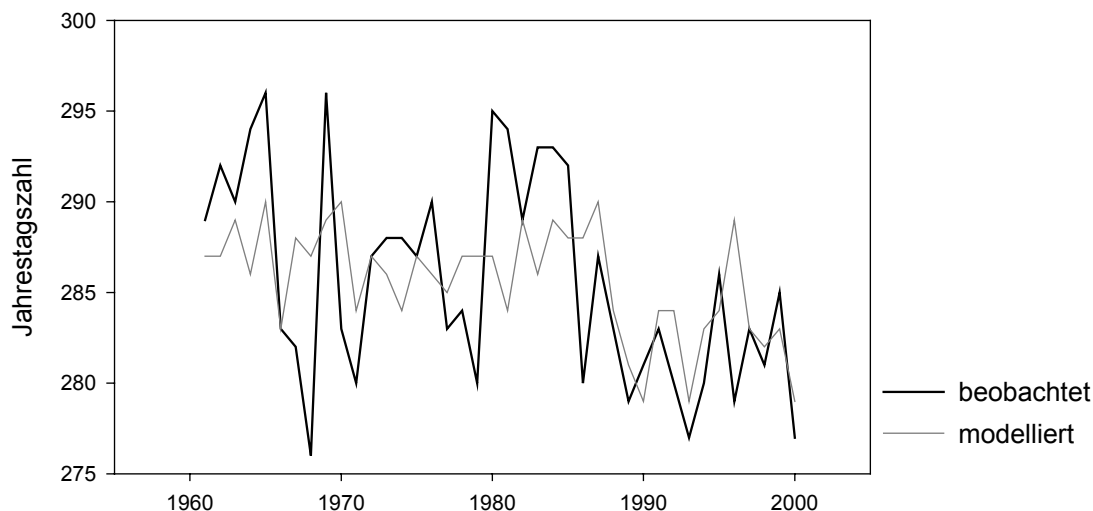


Abb. 27: Beobachteter und mittels Regressionsmodell abgeschätzter Beginn der Blattverfärbung der Stiel-Eiche im Zeitraum 1961-2000 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)
 (Blattverfärbung (Stiel-Eiche) = $231,195 + 0,360337 \cdot \text{Blühbeginn (Schwarzer Holunder)}$),
 RMSE = 5 Tage, MAE = 3,9 Tage, $R^2 = 0,27$)

Die Modelle wurden für die beiden Zeiträume von 1961 bis 1990 und von 1991 bis 2000 getestet. Für den Zeitraum von 1961 bis 1990 betrug die Differenz zwischen beobachteten und modellierten Eintrittsterminen maximal einen Tag (Tab. 14).

Tab. 14: Beobachtete und modellierte Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1961-1990 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Jahreszeit	Zeigerpflanze	Eintrittsdatum der Phänophase 1961-1990 (JTZ)	
		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

JTZ: Jahrestagszahl des Julianischen Kalenders

Dies führte dazu, dass sich die Länge der Jahreszeiten anhand der modellierten Daten von jener der beobachteten Daten um einen Tag unterschieden. Die Abweichungen in der Dauer des Früh- und Vollherbstes betragen aufgrund der "unsicheren Prognose" für den Beginn des Spätherbstes und der Vegetationsruhe zwei Tage (Abb. 28).

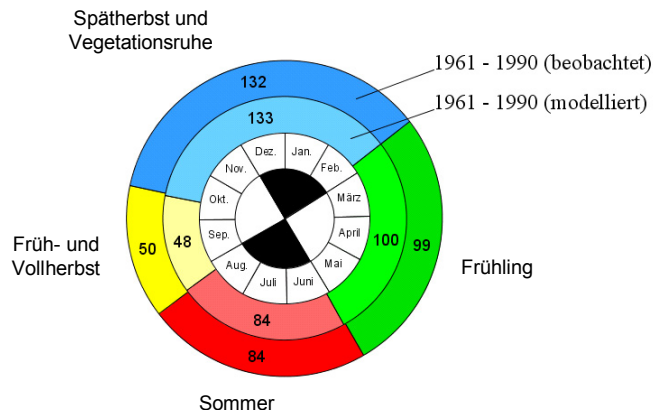


Abb. 28: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr mit beobachteten und modellierten Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1961-1990 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Für den Zeitraum von 1991 bis 2000 betrug die Abweichungen der modellierten Eintrittstage zu den beobachteten maximal zwei Tage (Tab. 15).

Tab. 15: Beobachtete und modellierte Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1991-2000 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Jahreszeit	Zeigerpflanze	Eintrittsdatum der Phänophase 1991-2000 (JTZ)	
		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

JTZ: Jahrestagszahl des Julianischen Kalenders

Im Bezug auf die Länge der Jahreszeiten entstanden dadurch Unterschiede von ein bis zwei Tagen (Abb. 29). Die Differenz für die Dauer des Früh- und Vollherbstes betrug drei Tage, da dessen Länge durch die "unsichere Prognose" für den Beginn des Spätherbstes und der Vegetationsruhe bestimmt wurde.

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

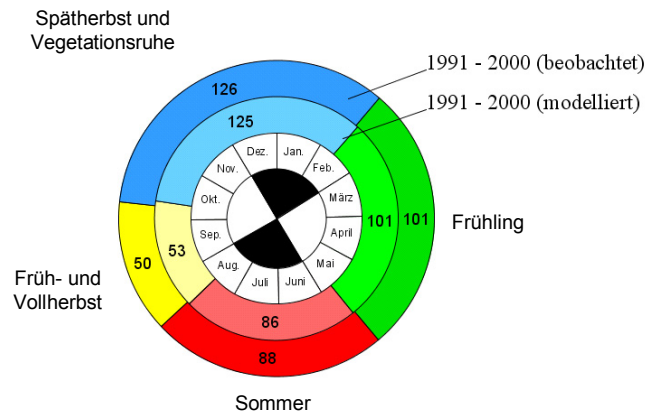


Abb. 29: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr mit beobachteten und modellierten Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1991-2000 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

3.2.2.2 Entwicklung des Vegetationsverlaufs im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Im Marburg-Gießener-Lahntal haben sich alle Jahreszeiten, wie generell in Hessen, im Zeitraum von 1991 bis 2000 im Vergleich zu 1961 bis 1990 vorverlagert (Tab. 16, Abb. 30). Der Beginn des Frühlings hat sich mit fast zwei Wochen am stärksten verfrüht. Das frühere Eintreten der Jahreszeiten nahm im Jahresverlauf ab, der Spätherbst und die Vegetationsruhe begannen in der Dekade von 1991 bis 2000 lediglich etwa eine Woche früher.

Tab. 16: Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1961-1990 und 1991-2000 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Jahreszeit	Zeigerpflanze	Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ)	
		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

JTZ: Jahrestagszahl des Julianischen Kalenders

Beim Vergleich der Jahreszeiten bezogen auf die Dauer zeigte sich, dass sich der Frühling und der Sommer im Zeitraum von 1991 bis 2000 gegenüber 1961 bis 1990 um einige Tage verlängert haben (Abb. 30). Während der Früh- und Vollherbst in ihrer Dauer unverändert geblieben sind, haben sich der Spätherbst und die Vegetationsruhe um etwa sechs Tage verkürzt. Die Vegetationsperiode hat sich folglich durch die Verlängerung des Frühlings und des Sommers ausgedehnt.

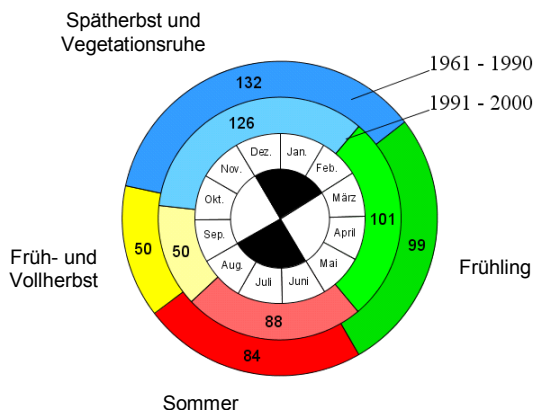


Abb. 30: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr im Zeitraum 1961-2000 (beobachtet) für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Diese Trends setzen sich auf der Basis der modellierten phänologischen Eintrittstermine in der Zukunft weiter fort (Tab. 17, Abb. 31).

Tab. 17: Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1991-2000 (beobachtet) und 2041-2050 (modelliert) für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Jahreszeit	Zeigerpflanze	Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ)	
		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

JTZ: Jahrestagszahl des Julianischen Kalenders

In der Dekade von 2041 bis 2050 wird sich der Beginn des Frühlings gegenüber 1991 bis 2000 im Mittel um weitere zwei Wochen auf den 27. Januar verfrühen und sich um sechs Tage verlängern. 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 nimmt die Dauer der Vegetationsperiode um insgesamt zwei Wochen zu.

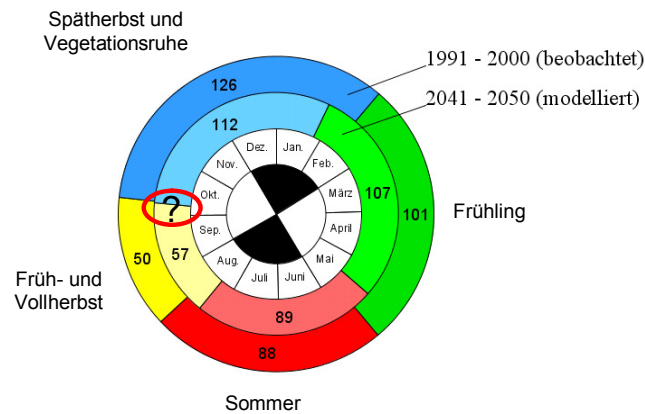


Abb. 31: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr im Zeitraum 1991-2000 (beobachtet) und 2041-2050 (modelliert) für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal). Das Fragezeichen in der inneren Uhr symbolisiert die unsichere Prognose des Beginns von Spätherbst und Vegetationsruhe.

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

Der Blühbeginn der untersuchten Obstarten (Apfel, Birne, Süßkirsche, Sauerkirsche, Rote Johannisbeere, Stachelbeere) hat sich in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts um sechs bis neun Tage pro Dekade im Vergleich zur Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 verfrüht (Tab. 18). Dieser Trend setzt sich in der Zukunft fort. Im Zeitraum von 2041 bis 2050 werden diese phänologischen Phasen im Vergleich zu der Dekade von 1991 bis 2000 um weitere 15 bis 19 Tage früher einsetzen (Tab. 18).

Tab. 18: Blühbeginn verschiedener Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

Dekade	Apfel	Birne	Süßkirsche	Sauerkirsche	Rote Johannisbeere	Stachelbeere
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

* modellierte Daten

Die Anzahl der Jahre mit Spätfrost pro Dekade hat sich in den vergangenen 40 Jahren kaum verändert (Tab. 19). In der Dekade von 2041 bis 2050 erhöht sich die Gefahr durch Spätfrost ($T_{\min} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$) für den Apfel besonders stark (Tab. 19): Während in den letzten 40 Jahren

lediglich zwei Jahre mit Spätfrostereignissen beobachtet werden konnten, werden für die Dekade von 2041 bis 2050 im Mittel ca. drei Jahre mit Spätfrost prognostiziert. Bei Birne und Sauerkirsche erhöht sich im Vergleich zur Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 ebenfalls die Spätfrostgefahr in der Zukunft, bei allen übrigen untersuchten Arten bleibt sie nahezu unverändert (Tab. 19).

Tab. 19: Gefahr von Spätfrost ($T_{\min} < 0 \text{ °C}$) bei verschiedenen Obstgehölzen und Beerensträuchern im Zeitraum zwischen Blühbeginn und zehn Tagen danach im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

	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

Eine Differenzierung zwischen Spätfrost verschiedener Stärke zeigt in der Dekade von 2041 bis 2050 unabhängig von der Referenzperiode eine deutliche Zunahme der Gefahr durch leichten Spätfrost bei Apfel, Birne und Sauerkirsche (Tab. 20). 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. 20). 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.

3.3 Wirkung von moderat erhöhten CO₂-Konzentrationen (+20 %) auf die Phänologie, die Anatomie und den Stomatawiderstand für Wasserdampf von Pflanzen

3.3.1 Wirkung von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf den Blühbeginn

In diesem Abschnitt ist der Blühbeginn nur derjenigen Arten dargestellt, welche in allen sechs untersuchten Ringen geblüht haben. Im Jahr 2005 konnten im Vergleich zu 2004 aufgrund der späteren Ernte zusätzlich der Blühbeginn von *Lathyrus pratensis*, *Trisetum flavescens* und *Festuca rubra* erfasst werden. Weitere beobachtete Arten (Kapitel 2.2.2, Tab. 3), welche in einigen Ringen nicht wuchsen, werden im folgenden Ergebnisteil nicht aufgeführt.

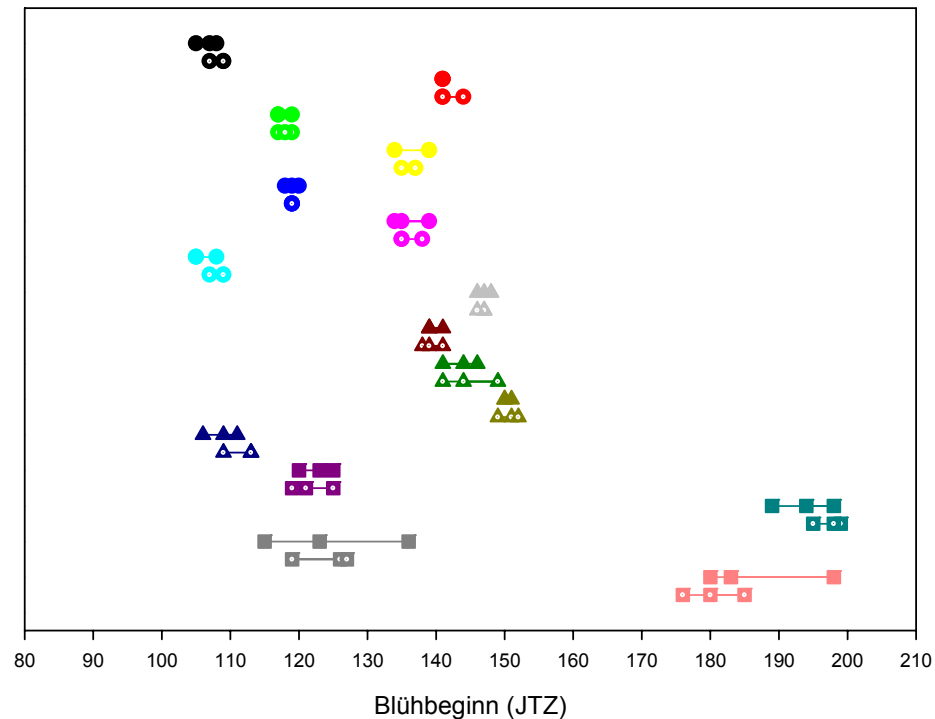
Tab. 20: Gefahr von Spätfrost unterschiedlicher Stärke bei verschiedenen Obstgehölzen und Beerensträuchern im Zeitraum zwischen Blühbeginn und zehn Tagen danach im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)

	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

Ein Vergleich des mittleren Blühbeginns im Jahr 2004 zwischen erhöhten und aktuellen CO₂-Konzentrationen zeigte bei der überwiegenden Anzahl der untersuchten Arten trotz der geringen Erhöhung der CO₂-Konzentration (+20 %) eine Verschiebung der Eintrittstermine um -3 (*Saxifraga granulata*) bis +7 Tage (*Geranium pratense*) (Abb. 32). Dabei konnte bei sieben von 16 Arten eine Verfrühung beobachtet werden, fünf Arten blühten unter erhöhten CO₂-Konzentrationen später, manche Arten zeigten keine Verschiebung im Blühbeginn. Ein signifikanter Einfluss ($p=0,035$) der CO₂-Konzentration auf den Blühbeginn konnte nur bei *Saxifraga granulata* (E: 109 (JTZ), A: 112 (JTZ)) beobachtet werden.

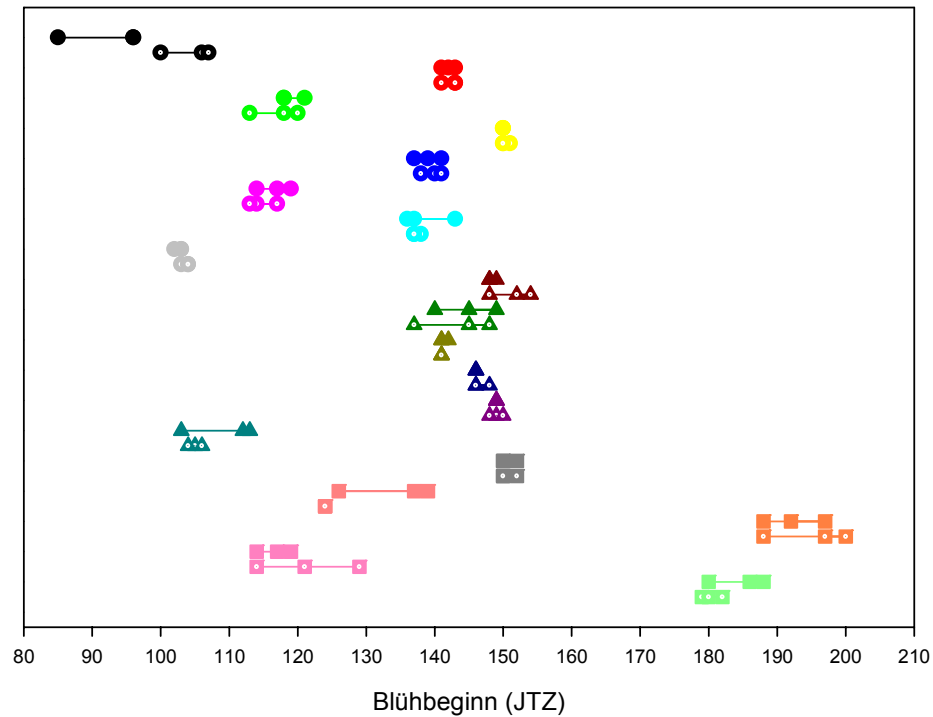
Im Jahr 2005 hingegen zeigte *Glechoma hederacea* mit einer Differenz von 12 Tagen eine signifikante Verfrühung ($p=0,016$) des Blühbeginns unter erhöhten CO₂-Konzentrationen (Abb. 32). Im Vergleich zu 2004 wurden 2005 größere Schwankungen im Zeitpunkt des Blühbeginns beobachtet. Sie betragen im Mittel -12 Tage bei *Glechoma hederacea* bis +10 Tage bei *Plantago lanceolata*, wobei bei einigen Arten keine Unterschiede im Blühbeginn beobachtet werden konnten. Die zeitlichen Verschiebungen der Eintrittstermine der Blüten waren mit Ausnahme von *Glechoma hederacea* allerdings nicht signifikant (Abb. 33).



	mittlerer Blühbeginn (JTZ)		Signifikanz	
	erhöhte [CO ₂]	aktuelle [CO ₂]		
—●—	positive CO ₂ Antwort Gruppe - erhöhte [CO ₂]			
—○—	positive CO ₂ Antwort Gruppe - aktuelle [CO ₂]			
—▲—	schwach negative CO ₂ Antwort Gruppe - erhöhte [CO ₂]			
—△—	schwach negative CO ₂ Antwort Gruppe - aktuelle [CO ₂]			
—■—	stark negative CO ₂ Antwort Gruppe - erhöhte [CO ₂]			
—□—	stark negative CO ₂ Antwort Gruppe - aktuelle [CO ₂]			
—	<i>Glechoma hederacea</i>	107	108	n.s.
—	<i>Arrhenatherum eliatum</i>	141	142	n.s.
—	<i>Alopecurus pratensis</i>	118	118	n.s.
—	<i>Holcus lanatus</i>	137	136	n.s.
—	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	119	119	n.s.
—	<i>Poa pratensis</i>	136	136	n.s.
—	<i>Cardamine pratensis</i>	106	108	n.s.
—	<i>Poa trivialis</i>	147	147	n.s.
—	<i>Galium mollugo</i>	140	139	n.s.
—	<i>Dactylis glomerata</i>	144	145	n.s.
—	<i>Festuca pratensis</i>	150	151	n.s.
—	<i>Saxifraga granulata</i>	109	112	*
—	<i>Plantago lanceolata</i>	123	122	n.s.
—	<i>Sanguisorba officinalis</i>	194	197	n.s.
—	<i>Rumex acetosa</i>	125	124	n.s.
—	<i>Geranium pratense</i>	187	180	n.s.

Abb. 32: Beginn der Blüte verschiedener Arten im Jahr 2004

Signifikanz des paarigen T-Tests, *: $0,05 \geq p > 0,01$, n.s.: nicht signifikant: $p > 0,1$. Der nichtparametrische Test (Wilcoxon Test) zeigte keine signifikanten Ergebnisse. Arten, die nicht in allen 6 Ringen gewachsen sind oder geblüht haben, werden nicht dargestellt.



	mittlerer Blühbeginn (JTZ)		Signifikanz
	erhöhte [CO ₂]	aktuelle [CO ₂]	
—●— <i>Glechoma hederacea</i>	92	104	*
—●— <i>Arrhenatherum eliatum</i>	142	142	n.s.
—●— <i>Alopecurus pratensis</i>	119	117	n.s.
—●— <i>Trisetum flavescens</i>	150	150	n.s.
—●— <i>Holcus lanatus</i>	139	140	n.s.
—●— <i>Anthoxanthum odoratum</i>	117	115	n.s.
—●— <i>Poa pratensis</i>	139	137	n.s.
—●— <i>Cardamine pratensis</i>	103	104	n.s.
—●— <i>Festuca rubra</i>	148	151	n.s.
—●— <i>Poa trivialis</i>	145	143	n.s.
—●— <i>Galium mollugo</i>	141	141	n.s.
—●— <i>Dactylis glomerata</i>	146	147	n.s.
—●— <i>Festuca pratensis</i>	149	149	n.s.
—●— <i>Saxifraga granulata</i>	109	105	n.s.
—●— <i>Lathyrus pratensis</i>	151	151	n.s.
—●— <i>Plantago lanceolata</i>	134	124	n.s.
—●— <i>Sanguisorba officinalis</i>	192	195	n.s.
—●— <i>Rumex acetosa</i>	117	121	n.s.
—●— <i>Geranium pratense</i>	185	180	n.s.

Abb. 33: Beginn der Blüte verschiedener Arten im Jahr 2005

Signifikanz des paarigen T-Tests, *: $0,05 \geq p > 0,01$, n.s.: nicht signifikant: $p > 0,1$. Der nichtparametrische Test (Wilcoxon Test) zeigte keine signifikanten Ergebnisse. Arten, die nicht in allen 6 Ringen gewachsen sind oder geblüht haben, werden nicht dargestellt.

Ein Vergleich beider Jahre zeigt, dass der Blühbeginn der Arten *Glechoma hederacea*, *Cardamine pratensis*, *Dactylis glomerata* und *Sanguisorba officinalis* unter erhöhten CO₂-Konzentrationen in beiden Jahren verfrüht war und bei den Arten *Plantago lanceolata* und *Geranium pratense* verspätet eingetreten ist (Abb. 32 und 33).

Die Verfrüfung betrug bei *Glechoma hederacea* im Jahr 2004 einen Tag, 2005 12 Tage. Bei *Plantago lanceolata* verspätete sich der Eintritt der Blüte unter erhöhten CO₂-Konzentrationen um einen Tag im Jahr 2004 und um zehn Tage im Jahr 2005. Der erheblich frühere Eintritt der Blüte von *Glechoma hederacea* im Jahr 2005 ist wahrscheinlich auf die vorangegangene Wärmeperiode zurückzuführen. Womöglich führte die anschließend auftretende Kältephase zu der großen Differenz im Blühbeginn unter erhöhten und aktuellen CO₂-Konzentrationen (Abb. 34). Bei *Plantago lanceolata* hingegen ist der Einfluss der Witterung als mögliche Ursache der Unterschiede nicht so eindeutig wie bei *Glechoma hederacea*.

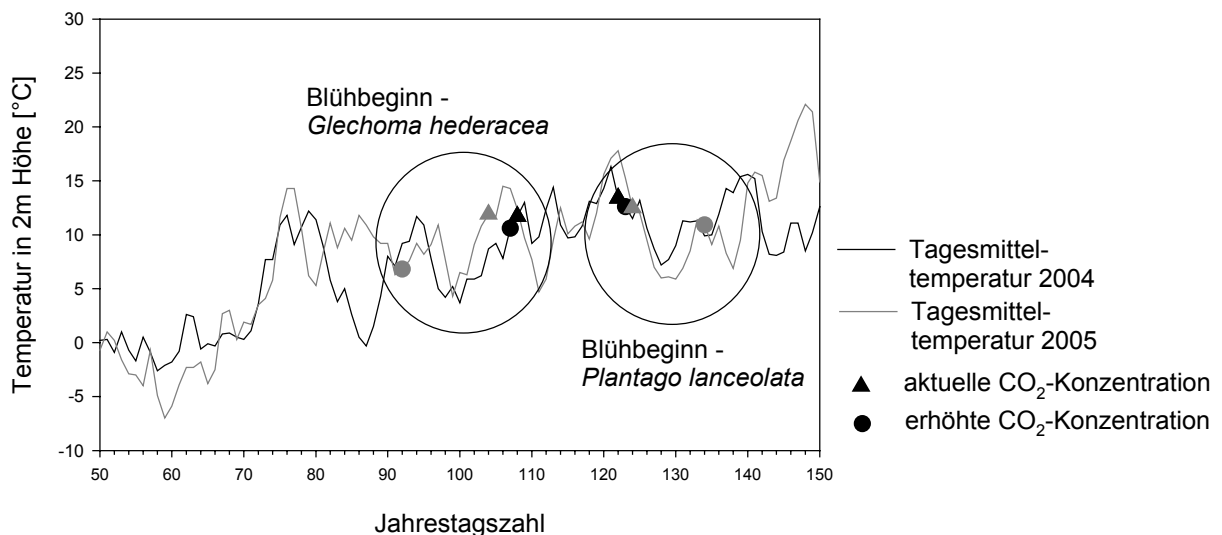


Abb. 34: Verlauf der Tagesmitteltemperaturen vom 50. bis zum 150. Tag im Jahr in 2 m Höhe, gemessen von der meteorologischen Station Linden

3.3.2 Wirkung von moderat erhöhten CO₂-Konzentrationen (+20 %) auf die Anatomie und den Stomatawiderstand für Wasserdampf von Pflanzen

Im Folgenden wird die Wirkung von moderat erhöhten CO₂-Konzentrationen (+20 %) auf die Stomatadichte, die Blattdichte, die Blattdicke, den LMA (leaf mass per area) und den Stomatawiderstand für Wasserdampf beschrieben.

Stomatadichte

Die beiden Gräser *Arrhenatherum elatius* und *Poa pratensis* sind amphistomatisch, d.h. sie haben auf beiden Seiten der Blätter Spaltöffnungen. Diese sind in parallel zur Längsachse des

Blattes verlaufenden Reihen angeordnet, wobei auch die Schließzellen und der von ihnen umschlossene Spalt genau in der Längsachse liegen. Parallel zu den Schließzellen verlaufen Reihen mit Papillen, zapfenförmigen Zellwandverdickungen der Epidermiszellen. Die Schließzellen (SZ) sind beiderseits von langgestreckten Nebenzellen (NZ) umgeben, so dass ein bei Gräsern typischer Spaltöffnungsapparat des Poaceen-Typus, wie Abbildung 35A beispielhaft für das Gras *Arrhenatherum elatius* zeigt, vorliegt. Die vier untersuchten Kräuter hingegen haben bohnenförmige Schließzellen des Helleborus-Typus, zwischen denen sich der Spalt befindet. Beispielhaft ist hier nur das Kraut *Glechoma hederacea* dargestellt (Abb. 35B). Die Stomata sind bei diesem und den anderen Kräutern quer über die Blätter verteilt. *Glechoma hederacea* und *Geranium pratense* sind hypostomatisch, d.h. die Spaltöffnungen liegen nur in der Epidermis der Blattunterseite.

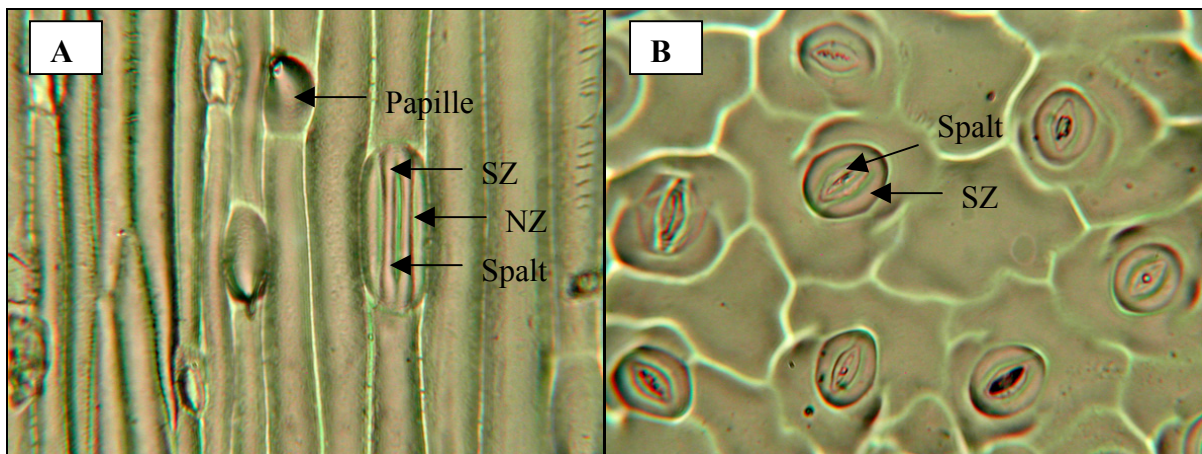


Abb. 35: Stomata von *Arrhenatherum elatius* (Poaceen-Typus, A) und *Glechoma hederacea* (Helleborus-Typus, B)

Mikroskop: 400fache Vergrößerung, Digitalkamera: Zoom bis zur maximalen Vergrößerung
SZ: Schließzellen, NZ: Nebenzellen

Unter erhöhten CO₂-Konzentrationen zeigten *Arrhenatherum elatius* und *Poa pratensis* auf dem ganzen Blatt eine geringere Stomatadichte (Abb. 36, Tab. 21, Arbeitsmappe "6 – Stomatadichte" auf beiliegendem Datenträger).

Die Unterschiede in der Anzahl der Stomata auf dem ganzen Blatt (gesamt: E hat 13 % weniger Stomata als A) und auf der Blattoberseite (E hat 13 % weniger Stomata als A) (Tab. 21) von *Arrhenatherum elatius* waren mit der Mixed Model Analyse signifikant, tendenzielle Effekte konnten auf dem ganzen Blatt (gesamt: E hat 9 % weniger Stomata als A) und auf der Blattunterseite (E hat 13 % weniger Stomata als A) von *Poa pratensis* beobachtet werden. *Saxifraga granulata* zeigte auch eine deutliche, aber nicht signifikante Verringerung der Stomatadichte auf der Blattunterseite (E hat 13 % weniger Stomata als A). Eine geringe Reduktion in der Anzahl der Stomata unter erhöhten CO₂-Konzentrationen konnte bei *Glechoma hederacea* und *Geranium pratense* festgestellt werden, *Plantago lanceolata* hingegen zeigte keine Differenzen auf (Tab. 21).

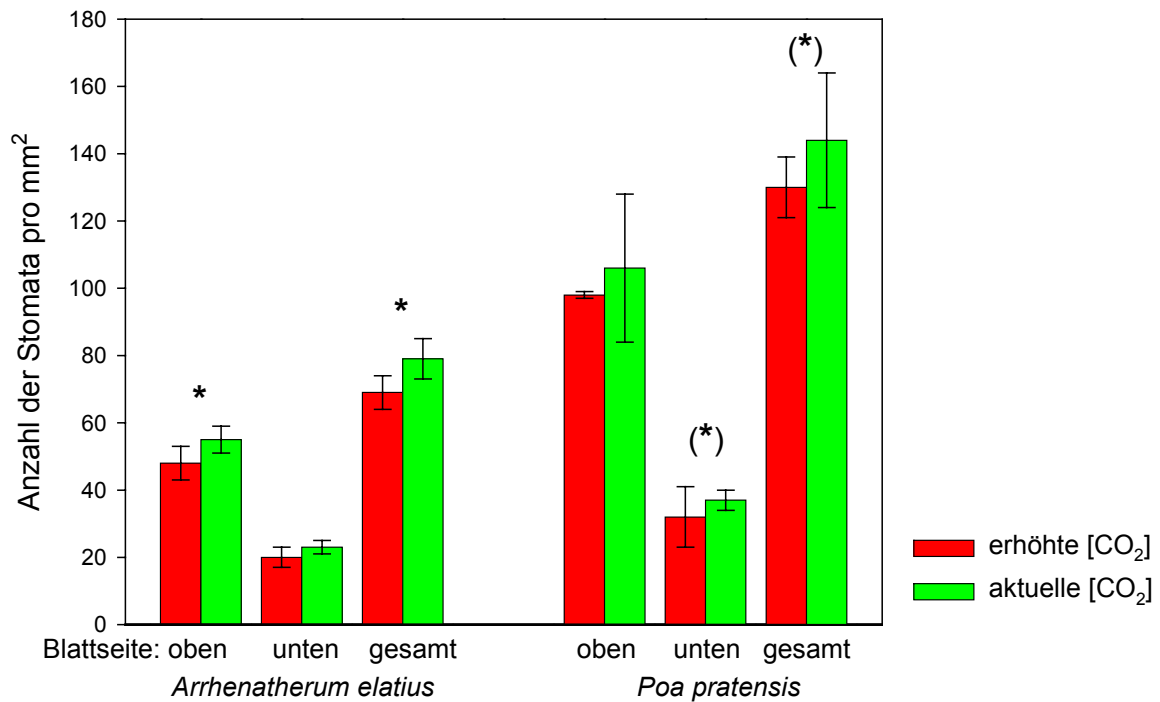


Abb. 36: Stomatadichte [Anzahl mm⁻²] von *Arrhenatherum elatius* und *Poa pratensis* unter aktuellen [CO₂] und erhöhten [CO₂]

(*): Tendenz; 0,1 ≥ p > 0,05, *: signifikant; 0,05 ≥ p > 0,01 nach Mixed Models

Tab. 21: Stomatadichte [Anzahl mm⁻²] für ausgewählte Arten unter erhöhten [CO₂] (E) und aktuellen [CO₂] (A)

Art	Blattseite	Mixed Models ^a		paariger T-Test CO ₂	Mittelwert ± Stabw		E in % A
		CO ₂	Block		E	A	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	gesamt	0,028	0,721	0,213 ^b	69 ± 5	79 ± 6	87,5
	oben	0,033	0,169	0,184 ^b	48 ± 5	55 ± 4	87,2
	unten	0,102	0,249	0,383 ^b	20 ± 3	23 ± 2	88,0
<i>Poa pratensis</i>	gesamt	0,091	0,007	0,159 ^b	130 ± 9	144 ± 20	90,7
	oben	0,230 ^c	0,027 ^c	0,569 ^b	98 ± 1	106 ± 22	92,1
	unten	0,058 ^c	0,056 ^c	0,507 ^b	32 ± 9	37 ± 3	86,7
<i>Glechoma hederacea</i>	unten	0,567	0,040	0,674 ^b	113 ± 10	117 ± 17	96,9
<i>Saxifraga granulata</i>	unten	0,142	0,124	0,242 ^b	46 ± 9	53 ± 6	86,3
<i>Plantago lanceolata</i>	gesamt	0,901	0,539	1,000 ^b	185 ± 9	184 ± 4	100,1
	oben	0,144	0,062	0,272 ^b	87 ± 4	89 ± 1	96,9
	unten	0,651	0,311	0,739 ^b	98 ± 13	95 ± 3	103,1
<i>Geranium pratense</i>	unten	0,591	0,020	0,594 ^b	144 ± 12	148 ± 20	97,4

Signifikanz der Mixed Models und des paarigen T-Tests: n.s.: nicht signifikant,

(*): Tendenz; 0,1 ≥ p > 0,05, *: signifikant; 0,05 ≥ p > 0,01, **: hoch signifikant; 0,01 ≥ p > 0,001,

***: höchst signifikant; p ≤ 0,001

^a Die Mixed Model Analysen wurden mit den Mittelwerten der Blätter durchgeführt. Damit wurde die Einwirkung von CO₂ und Block als feste Faktoren getestet.

^b nichtparametrischer Test (Wilcoxon Test) zeigt keine signifikanten Ergebnisse

^c Interaktion CO₂*Block: p ≤ 0,1

Bei einigen Arten konnte ein signifikanter Einfluss der längerfristigen Bodenfeuchte (Block) auf die Stomatadichte beobachtet werden (Tab. 21): *Glechoma hederacea* beispielsweise zeigte einen signifikanten Block-Effekt auf die Stomatadichte und bei differenzierter Betrachtung der Blöcke einen signifikanten bzw. tendenziellen CO₂-Effekt (Abb. 37).

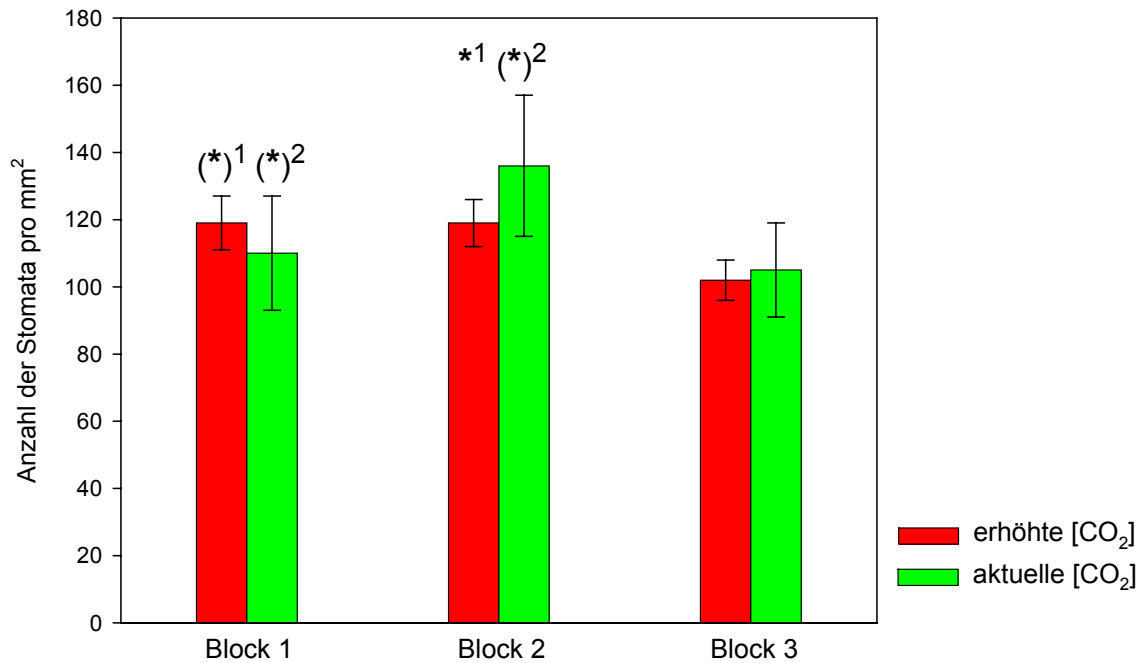


Abb. 37: Stomatadichte [Anzahl mm⁻²] von *Glechoma hederacea* unter aktuellen [CO₂] und erhöhten [CO₂]

(*): Tendenz; $0,1 \geq p > 0,05$, *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$, ¹: Ergebnisse des T-Tests, ²: Ergebnisse des Wilcoxon Tests, Block 1: "relativ trocken", Block 2: "feucht", Block 3: zwischen Block 1 und 2 liegen

Unter feuchten Bedingungen (Block 2) war die Anzahl der Stomata auf der Blattunterseite unter erhöhten CO₂-Konzentrationen um 12 % signifikant (paariger T-Test: $p=0,047$) bzw. tendenziell (Wilcoxon Test: $p=0,069$) verringert (Abb. 38, Tab. 22).

Tab. 22: Stomatadichte [Anzahl mm⁻²] von *Glechoma hederacea* unter erhöhten [CO₂] (E) und aktuellen [CO₂] (A)

Block Faktor	paariger T-Test	Wilcoxon Test	Mittelwert ± Stabw		E in % A
	CO ₂	CO ₂	E	A	
1	0,073	0,069	119 ± 8	110 ± 17	108,2
2	0,047	0,069	119 ± 7	136 ± 21	87,6
3	0,623	0,674	102 ± 6	105 ± 14	97,1

Signifikanz des paarigen T-Tests und des Wilcoxon Tests: n.s.: nicht signifikant,

(*): Tendenz; $0,1 \geq p > 0,05$, *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$, **: hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$, ***: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

Block 1: "relativ trocken", Block 2: "feucht", Block 3: zwischen Block 1 und 2 liegend

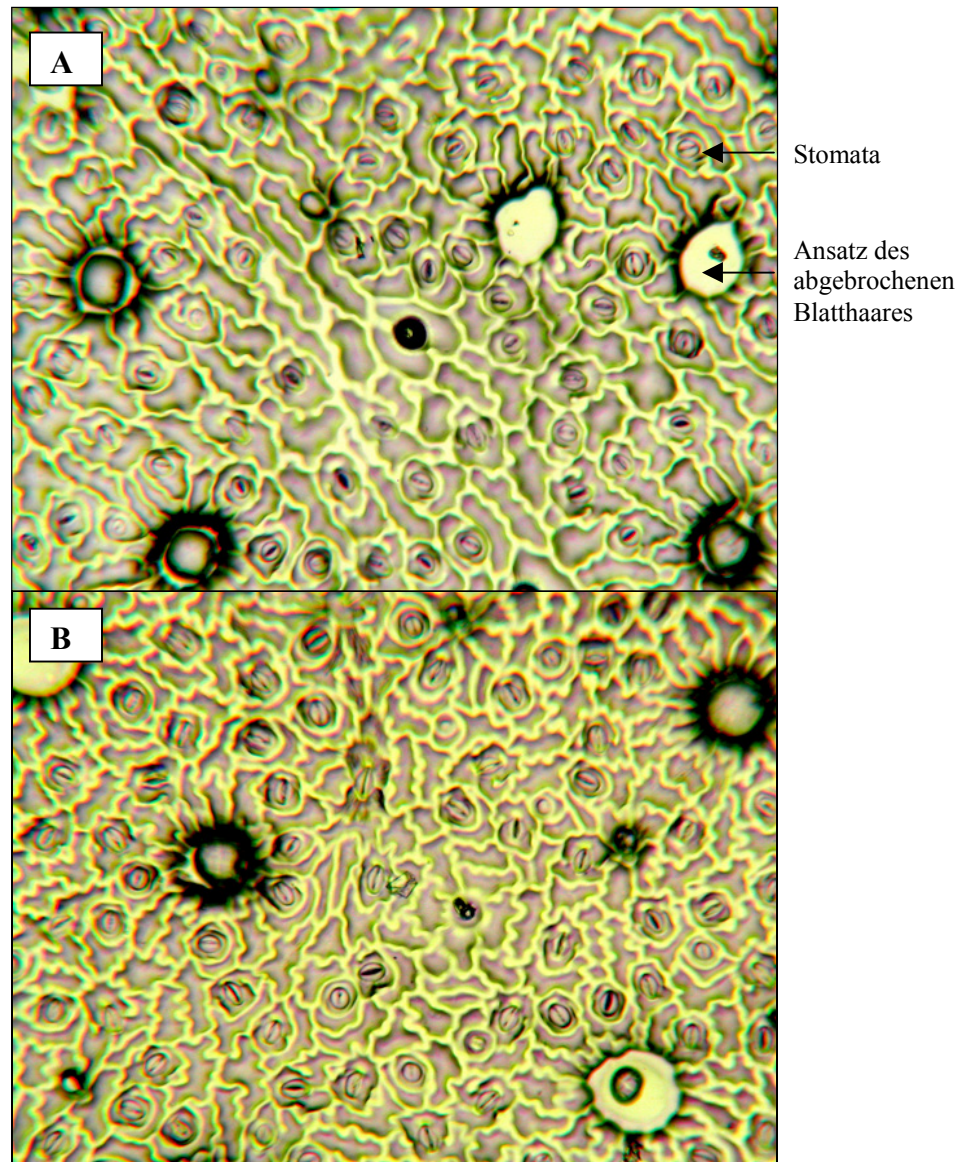


Abb. 38: Anzahl der Stomata pro $0,5535 \text{ mm}^2$ auf der Blattunterseite von *Glechoma hederacea* unter "feuchten" Bodenverhältnissen

A: Ring E2, B: Ring A2, Mikroskop: 100fache Vergrößerung, Digitalkamera: Zoom bis zur maximalen Vergrößerung

Ein gegensätzlicher CO_2 -Effekt konnte hingegen unter relativ trockenen Bedingungen beobachtet werden. In Block 1 war die Stomatadichte unter erhöhten CO_2 -Konzentrationen um 8 % tendenziell erhöht (Abb. 39, Tab. 22). Block 3, in welchem die Bodenfeuchte zwischen der in Block 1 und in Block 2 liegt, zeigte unter diesen Bedingungen eine sehr kleine, nicht signifikante Abnahme der Stomatadichte um 3 %.

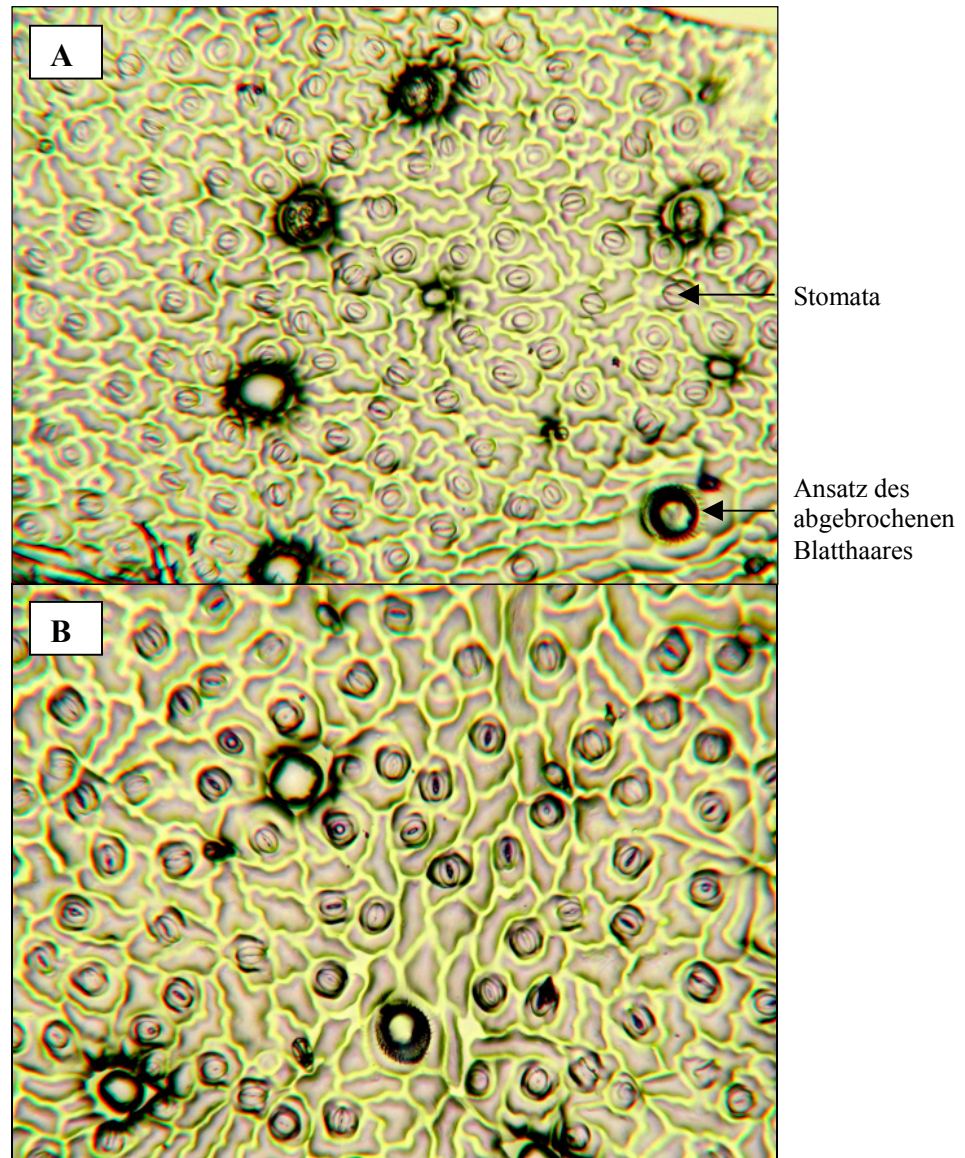


Abb. 39: Anzahl der Stomata pro $0,5535 \text{ mm}^2$ auf der Blattunterseite von *Glechoma hederacea* unter "relativ trockenen" Bodenverhältnissen
 A: Ring E1, B: Ring A1, Mikroskop: 100fache Vergrößerung, Digitalkamera: Zoom bis zur maximalen Vergrößerung

Blattdicke

Unter erhöhten CO_2 -Konzentrationen war die Blattdicke bei *Glechoma hederacea* um 17 %, allerdings nicht signifikant, erhöht (Tab. 23). Verringerungen um 10 bis 20 % zeigten *Saxifraga granulata* (nicht signifikant), *Poa pratensis* (nicht signifikant) und *Arrhenatherum elatius* (Mixed Models: $p=0,001$, paariger T-Test: $p=0,077$). Bei *Geranium pratense* und *Plantago lanceolata* konnten keine großen Differenzen beobachtet werden.

Tab. 23: Blattdicke [μm] für ausgewählte Arten unter erhöhten [CO_2] (E) und aktuellen [CO_2] (A)

Art Modelle/Faktor:	Mixed Models ^a		paariger T-Test	Mittelwert \pm Stabw		E in % A
	CO_2	Block	CO_2	E	A	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	0,001	0,267	0,077 ^b	198,67 \pm 8,62	240,14 \pm 19,61	82,7
<i>Poa pratensis</i>	0,165	0,507	0,350 ^b	136,94 \pm 13,98	155,36 \pm 16,26	88,1
<i>Glechoma hederacea</i>	0,278	0,278	0,414 ^b	315,72 \pm 69,55	269,08 \pm 16,62	117,3
<i>Saxifraga granulata</i>	0,108	0,192	0,031 ^b	559,11 \pm 36,78	626,56 \pm 56,48	89,2
<i>Plantago lanceolata</i>	0,899	0,638	0,810 ^b	773,78 \pm 58,13	781,27 \pm 17,59	99,0
<i>Geranium pratense</i>	0,250	0,174	0,345 ^b	336,39 \pm 12,37	321,39 \pm 24,21	104,7

Signifikanz der Mixed Models und des paarigen T-Tests: n.s.: nicht signifikant, (*): Tendenz; $0,1 \geq p > 0,05$, *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$, **: hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$, ***: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

^a Die Mixed Model Analysen wurden mit den Mittelwerten der Blätter durchgeführt. Damit wurde die Einwirkung von CO_2 und Block als feste Faktoren getestet.

^b nichtparametrischer Test (Wilcoxon Test) zeigt keine signifikanten Ergebnisse

Blattdichte

Eine Zunahme der Blattdichte unter erhöhten CO_2 -Konzentrationen konnte bei *Arrhenatherum elatius*, *Poa pratensis* und *Glechoma hederacea* beobachtet werden (Tab. 24). Bei *Poa pratensis* war die Erhöhung um 10 % signifikant (Mixed Models: $p=0,047$), bei *Arrhenatherum elatius* war die Zunahme um 23 % höchst signifikant (Mixed Models: $p=0,001$) bzw. tendenziell (paariger T-Test: $p=0,068$). *Plantago lanceolata* zeigte unter diesen Bedingungen eine geringere Blattdichte (Tab. 24).

Tab. 24: Blattdichte [g cm^{-3}] für ausgewählten Arten unter erhöhten [CO_2] (E) und aktuellen [CO_2] (A)

Art Modelle/Faktor:	Mixed Models ^a		paariger T-Test	Mittelwert \pm Stabw		E in % A
	CO_2	Block	CO_2	E	A	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	0,000	0,023	0,068 ^b	24,09 \pm 2,19	19,58 \pm 2,18	123,0
<i>Poa pratensis</i>	0,047 ^c	0,025 ^c	0,390 ^b	35,06 \pm 0,79	32,06 \pm 4,98	109,4
<i>Glechoma hederacea</i>	0,327	0,503	0,413 ^b	9,97 \pm 1,15	9,20 \pm 0,20	108,4
<i>Saxifraga granulata</i>	0,747	0,699	0,954 ^b	6,21 \pm 0,18	6,18 \pm 0,69	100,5
<i>Plantago lanceolata</i>	0,327	0,096	0,409 ^b	6,40 \pm 0,60	6,89 \pm 1,13	92,9
<i>Geranium pratense</i>	0,889	0,017	0,994 ^b	15,03 \pm 0,73	15,02 \pm 1,27	100,0

Signifikanz der Mixed Models und des paarigen T-Tests: n.s.: nicht signifikant, (*): Tendenz; $0,1 \geq p > 0,05$, *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$, **: hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$, ***: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

^a Die Mixed Model Analysen wurden mit den Mittelwerten der Blätter durchgeführt. Damit wurde die Einwirkung von CO_2 und Block als feste Faktoren getestet.

^b nichtparametrischer Test (Wilcoxon Test) zeigt keine signifikanten Ergebnisse

^c Interaktion CO_2 *Block: $p \leq 0,1$

LMA (leaf mass per area)

Bei *Glechoma hederacea* konnte ein tendenzieller CO₂-Effekt auf den LMA (Mixed Models: p=0,061, paariger T-Test: p=0,061) beobachtet werden (Tab. 25). Unter erhöhten CO₂-Konzentrationen war der LMA um 17 % gestiegen. Abnahmen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen zeigten die Arten *Saxifraga granulata* und *Plantago lanceolata*.

Tab. 25: LMA [g cm⁻²] für ausgewählte Arten unter erhöhten [CO₂] (E) und aktuellen [CO₂] (A)

Art Modelle/Faktor:	Mixed Models ^a		paariger T-Test	Mittelwert ± Stabw		E in % A
	CO ₂	Block	CO ₂	E	A	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	0,126	0,000	0,081 ^b	0,0047 ± 0,0003	0,0046 ± 0,0003	103,7
<i>Poa pratensis</i>	0,678 ^c	0,218 ^c	0,865 ^b	0,0048 ± 0,0006	0,0049 ± 0,0003	98,1
<i>Glechoma hederacea</i>	0,061	0,169	0,061 ^b	0,0029 ± 0,0003	0,0025 ± 0,0001	116,9
<i>Saxifraga granulata</i>	0,204	0,561	0,140 ^b	0,0034 ± 0,0002	0,0038 ± 0,0002	90,0
<i>Plantago lanceolata</i>	0,377	0,400	0,459 ^b	0,0049 ± 0,0006	0,0054 ± 0,0008	90,8
<i>Geranium pratense</i>	0,161	0,798	0,030 ^b	0,0050 ± 0,0001	0,0048 ± 0,0000	104,9

Signifikanz der Mixed Models und des paarigen T-Tests: n.s.: nicht signifikant, (*): Tendenz; $0,1 \geq p > 0,05$, *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$, **: hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$, ***: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

^a Die Mixed Model Analysen wurden mit den Mittelwerten der Blätter durchgeführt. Damit wurde die Einwirkung von CO₂ und Block als feste Faktoren getestet.

^b nichtparametrischer Test (Wilcoxon Test) zeigt keine signifikanten Ergebnisse

^c Interaktion CO₂*Block: $p \leq 0,1$

Stomatawiderstand für Wasserdampf

Die Art *Glechoma hederacea* zeigte unter erhöhten CO₂-Konzentrationen zum Zeitpunkt der Messung im Mittel eine Verdopplung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf auf der Blattunterseite (Abb. 40, Tab. 26). Der CO₂-Effekt war bei allen durchgeführten Mixed Models Varianten und beim paarigen T-Test signifikant (Tab. 26). Auf der Blattoberseite war der Stomatawiderstand für Wasserdampf unendlich groß, da *Glechoma hederacea* auf dieser Seite keine Stomata hat.

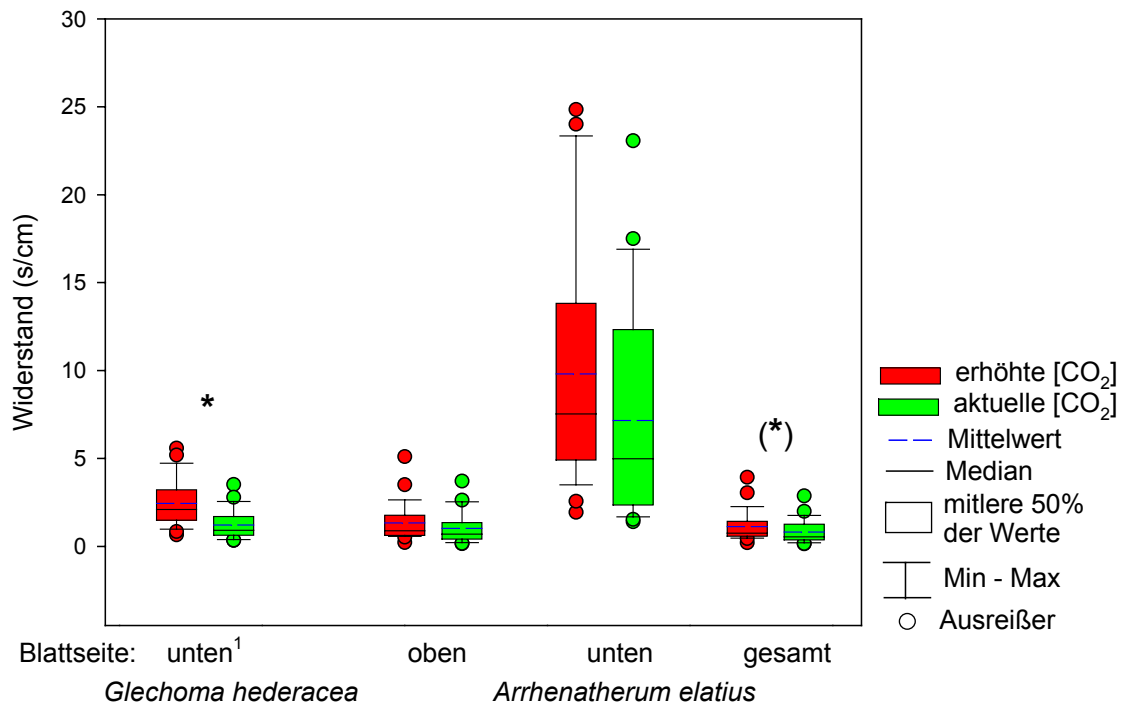


Abb. 40: Mittlerer Stomatawiderstand für Wasserdampf [$s\text{ cm}^{-1}$] von *Glechoma hederacea* und *Arrhenatherum elatius* unter aktuellen [CO_2] und erhöhten [CO_2]

(*): Tendenz; $0,1 \geq p > 0,05$, *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$ nach Mixed Models, Variante 1,
¹: Stomata nur auf der Blattunterseite

Bei *Arrhenatherum elatius* konnte ein tendenzieller CO_2 -Effekt auf den Gesamt-Stomatawiderstand für Wasserdampf beobachtet werden (E: $1,13 \pm 0,37$, A: $0,82 \pm 0,59$, $p=0,081$ nach Mixed Models Variante 1) (Abb. 40, Tab. 26). Auf der Blattunterseite war in den Mixed Models bei Einbeziehung der Bodenfeuchte (BF1 und BF2) der CO_2 -Effekt tendenziell; durch den paarigen T-Test wurde ein signifikanter CO_2 -Effekt ($p=0,037$) berechnet (Tab. 26). Zusätzlich konnte auf dem gesamten Blatt ein Effekt der langfristigen Bodenfeuchte (Block, signifikant) und der kurzfristigen Bodenfeuchte (BF1, hoch signifikant und BF2, tendenziell) beobachtet werden (Tab. 26).

Saxifraga granulata und *Poa pratensis* zeigten auch eine Zunahme des Stomatawiderstandes für Wasserdampf unter erhöhten CO_2 -Konzentrationen, ausgenommen der Stomatawiderstand auf der Blattoberseite von *Poa pratensis* (Tab. 26). Bei dieser Art wurde ein signifikanter bzw. hoch signifikanter Einfluss der Bodenfeuchte gefunden. Eine Verringerung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf unter diesen Bedingungen zeigten lediglich die Arten *Geranium pratense* und *Plantago lanceolata* (Tab. 26).

Tab. 26: Stomatawiderstand für Wasserdampf [$s\text{ cm}^{-1}$] unter erhöhten $[\text{CO}_2]$ (E) und aktuellen $[\text{CO}_2]$ (A)

Art	Blattseite	Mixed Models ^a						paariger T-Test	Mittelwert \pm Stabw		E in % A
		I) CO_2	Block II)	CO_2	BF 1	III) CO_2	BF 2		E	A	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	gesamt ^b	0,081	0,023	0,049 ^f	0,010	0,073	0,052	0,154 ^c	1,13 \pm 0,37	0,82 \pm 0,59	138,1
	oben ^b	0,126	0,022	0,077 ^f	0,010	0,109	0,065	0,227 ^c	1,33 \pm 0,50	1,03 \pm 0,78	129,8
	unten ^b	0,109	0,378	0,085 ^f	0,238 ^f	0,075	0,256	0,037 ^c	9,81 \pm 1,90	7,16 \pm 2,32	137,1
<i>Poa pratensis</i>	gesamt	0,883	0,007	0,755 ^f	0,005	0,905	0,007	0,498 ^c	1,55 \pm 0,58	1,51 \pm 0,62	102,8
	oben	0,351	0,017	0,582 ^f	0,004	0,465	0,005	0,412 ^c	2,54 \pm 0,83	3,00 \pm 1,61	84,6
<i>Glechoma hederacea</i>	unten	0,314	0,013	0,209 ^f	0,013	0,289	0,018	0,083 ^c	4,35 \pm 1,79	3,48 \pm 1,38	125,1
	unten	0,011	0,075	0,017 ^f	0,092 ^f	0,030	0,501	0,031 ^c	2,44 \pm 0,76	1,22 \pm 0,59	200,7
<i>Saxifraga granulata</i>	gesamt ^b	0,631	0,373	0,721 ^f	0,611 ^f	0,079 ^d	0,349 ^d	0,260 ^c	0,90 \pm 0,47	0,52 \pm 0,11	173,0
	oben ^b	0,122	0,070	0,272 ^f	0,437 ^f	0,042 ^d	0,151 ^d	0,103 ^c	2,45 \pm 1,00	1,41 \pm 0,38	173,3
	unten ^b	0,824	0,563	0,859 ^f	0,779 ^f	0,095 ^d	0,440 ^d	0,376 ^c	1,53 \pm 0,83	0,93 \pm 0,27	163,6
<i>Plantago lanceolata</i>	gesamt	0,375	0,147	0,484 ^f	0,701 ^f	0,280 ^e	0,946 ^e	0,289 ^c	1,38 \pm 1,46	2,16 \pm 1,25	63,9
	oben	0,448	0,187	0,470 ^f	0,584 ^f	0,231 ^e	0,923 ^e	0,272 ^c	3,57 \pm 4,24	5,09 \pm 3,00	70,0
	unten ^b	0,270	0,210	0,037 ^{df}	0,698 ^d	0,373	0,879	0,518 ^c	2,99 \pm 3,10	4,60 \pm 2,78	64,8
<i>Geranium pratense</i>	unten	0,616	0,211	0,521 ^f	0,111 ^f	0,138	0,018	0,673 ^c	0,66 \pm 0,14	0,84 \pm 0,67	79,3

Signifikanz der Mixed Models und des paarigen T-Tests: n.s.: nicht signifikant, (*): Tendenz; $0,1 \geq p > 0,05$, *: signifikant; $0,05 \geq p > 0,01$, **: hoch signifikant; $0,01 \geq p > 0,001$, ***: höchst signifikant; $p \leq 0,001$

^a Die Mixed Model Analysen wurden mit den Mittelwerten der Blätter durchgeführt. Es wurden drei Varianten durchgerechnet:

I) Test des Einwirkung von CO_2 und Block als feste Faktoren

II) Test des Einwirkung von CO_2 als fester Faktor und BF1 (gemittelte Bodenfeuchte aus 4 Sensoren im Ring) als Kovariate

III) Test des Einwirkung von CO_2 als fester Faktor und BF1 (Bodenfeuchte des Sensors in der Nähe der Pflanze) als Kovariate

^b Daten der Mixed Model Analysen wurden In-transformiert, damit Normalverteilung gegeben ist

^c Nichtparametrischer Test (Wilcoxon Test) zeigt keine signifikanten Ergebnisse

^d Interaktion CO_2 *Block, CO_2 *BF1, CO_2 *BF2: $p \leq 0,1$

^e Daten der Mixed Model Analyse Variante III) wurden In-transformiert, um eine Normalverteilung der Residuen zu erhalten

^f Die Univariate Varianzanalyse zeigt keine signifikanten Ergebnisse

4 Diskussion

Die CO₂-Konzentration ist seit 1750 von 280 ppm auf heute 375 ppm angestiegen (EEA 2004) und wird sich bis 2100 weiter auf 540-970 ppm erhöhen (IPCC 2001). Die CO₂-Erhöhung wirkt sich indirekt über die Erwärmung der Atmosphäre als auch direkt auf die Pflanzen aus. Daher war das Ziel dieser Arbeit zum einen die Auswirkung der Klimaerwärmung in den letzten 50 Jahren und der zukünftigen Klimaerwärmung auf die Pflanzenentwicklung und zum anderen die Wirkung von moderat erhöhten CO₂-Konzentrationen (+20 %) auf die Phänologie, die Anatomie und den Stomatawiderstand von Pflanzen zu untersuchen.

4.1 Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Pflanzenentwicklung im Zeitraum von 1961 bis 2000

Das Klima übt unter allen Umweltfaktoren den stärksten Einfluss auf die Entwicklung der Pflanzen aus (Schnelle 1955). In unseren Breiten, mit einer Vegetationsruhe im Winter und einer aktiven Wachstumsphase im Sommer, hängt die Pflanzenphänologie hauptsächlich von der Temperatur ab. Phänologische Beobachtungen sind daher sensitive Indikatoren zur Untersuchung der Frage, wie Pflanzenarten auf regionale Klimabedingungen und Klimaänderungen reagieren. Bisher konnte mehrfach, europaweit und regional, nachgewiesen werden, dass die phänologischen Frühlingsphasen stark von der Temperatur im Winter und im Frühling abhängen (Chen 1994, Chmielewski & Rötzer 2001, Chmielewski et al. 2004b). Mit steigenden Temperaturen im Mai und im Juni nähert sich die Mitteltemperatur dem Optimum für die Pflanzenentwicklung, so dass die Pflanzen in den nachfolgenden Monaten weniger sensitiv auf Temperaturänderungen reagieren (Chmielewski et al. 2004b). Im Herbst können höhere Temperaturen die physiologischen Prozesse der Pflanze aufrechterhalten. Sommertrockenheit kann jedoch zu frühzeitiger Blattverfärbung und Blattfall führen (Chmielewski et al. 2004a).

Das Klima hat sich nachweislich verändert. In Hessen ist die mittlere Lufttemperatur im Zeitraum von 1951 bis 2000 um 0,9 °C gestiegen (Schönwiese et al. 2005). Am Beispiel von Gießen konnte durch die Auswertung der Temperaturdaten der meteorologischen Station Gießen gezeigt werden, dass die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur im Zeitraum von 1961 bis 2000 um 1 °C gestiegen sind und damit verbunden die Anzahl der Sommertage und der heißen Tage zugenommen und die der Frosttage und Eistage abgenommen hat. Die thermische Vegetationsperiode hat sich infolge eines früheren Vegetationsbeginns um 12 Tage verlängert (Kap. 3.2.1).

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass es in dem genannten Zeitraum zu Verschiebungen in der Pflanzenentwicklung gekommen ist. Die Pflanzen, sowohl die natürliche Vegetation als auch Obstgehölze und landwirtschaftliche Kulturen, haben folglich auf die Klimaerwärmung reagiert. Im Zeitraum von 1961 bis 2000 hat sich der Beginn der untersuchten phänologischen

Phasen in Hessen im Mittel zwischen 0,4 Tage/Dekade bis 5,5 Tage/Dekade verfrüht, wobei die Frühjahrsphasen den stärksten Trend zeigten (Kap. 3.1.1): Sie reagierten sehr deutlich auf die höheren Temperaturen in den Wintermonaten. In Hessen war im Zeitraum von 1951 bis 2000 der Temperaturanstieg im Winter gegenüber den anderen Jahreszeiten mit 1,4 °C am stärksten (Schönwiese et al. 2005). Die Verfrühung der phänologischen Phasen nahm im Jahresverlauf ab, was darauf zurückzuführen ist, dass die Erwärmung im Frühling und im Sommer nicht so stark wie im Winter war (Schönwiese et al. 2005). Diese Beobachtungen in Hessen stehen mit den für ganz Deutschland gezeigten Trends in Einklang: Eine Auswertung der phänologischen Daten der Internationalen Phänologischen Gärten (IPG) in Deutschland für den Zeitraum von 1951 bis 1996 zeigte, dass sich die Frühlingsphasen am stärksten vorverlagert haben und dass es im Vegetationsverlauf zu einer Abnahme der Vorverlagerung gekommen ist (Menzel et al. 2001).

Die klimatischen Veränderungen haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Pflanzen. Nicht alle phänologischen Phasen reagieren mit einer früheren Entwicklung. Der Eintritt der Blattverfärbung der Stiel-Eiche hat sich in Hessen im Mittel um 0,5 Tage/Dekade verspätet, was eine Folge milder Witterung sein könnte. Nach Angaben von Menzel (2003b) führen hohe Temperaturen im Frühling und im Frühsommer zur Verfrühung der Blattverfärbung, während hohe Herbsttemperaturen diese verzögern. Generelle Verfrühungen der phänologischen Phasen mit einem verspäteten Eintritt der Blattverfärbung der Stiel-Eiche zeigten bisher auch Untersuchungen in ganz Deutschland (Menzel et al. 2001). Anhand der Daten des IPG konnte für Deutschland nachgewiesen werden, dass sich die phänologischen Phasen im Zeitraum von 1951 bis 1996 im 30-jährigen Mittel um -0,18 Tage/Jahr bis +0,23 Tage/Jahr verschoben haben. Die Blattverfärbung der Stiel-Eiche verzögerte sich dabei um 0,1 Tage/Jahr (Menzel et al. 2001).

In Hessen zeigte sich eine Verfrühung der phänologischen Phasen überwiegend ab dem Beginn der 1990er Jahre (Kap. 3.1.1). Eine Verfrühung der phänologischen Phasen seit dem Ende der 1980er Jahre ist für viele Pflanzenarten in Deutschland nachgewiesen worden (Chmielewski et al. 2004a). Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die 1990er Jahre die wärmste Dekade in Europa war (EEA 2004). Nach Angaben von Enke (2003) zeichneten sich in Hessen die Dekaden von 1981 bis 1990 und von 1991 bis 2000 gegenüber den vergangenen Jahrzehnten durch eine erhöhte Häufigkeit warmer Wetterlagen aus.

Die Verschiebungen der phänologischen Phasen in Hessen in den 1990er Jahren sind besonders deutlich in der so genannten doppelten phänologischen Uhr zu sehen, in welcher die Dekade von 1991 bis 2000 mit der Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 verglichen wird (Kap. 3.1.2). Die doppelte phänologische Uhr zeigt die zehn "phänologischen Jahreszeiten", welche durch den Beginn der phänologischen Phasen von so genannten Zeigerpflanzen charakterisiert werden. Eine Verschiebung in der Pflanzenentwicklung und damit im Auftreten der phänologischen Phasen bedeutet daher auch eine Verschiebung der "phänologischen Jahreszeiten". Durch die bereits erwähnte (überwiegend signifikante) Verfrühung der phänologischen Phasen traten die "phänologischen Jahreszeiten" in Hessen früher ein. Eine Ausnahme stellt der Beginn des Spätherbstes dar, welcher sich aufgrund des

späteren Eintritts der Blattverfärbung der Stiel-Eiche (nicht signifikant) verzögerte. Der Beginn des Vorfrühlings hat sich mit 14 Tagen am stärksten verfrüht. Dadurch und vor allem infolge der Verlängerung des Frühlings um fünf Tage hat sich die Vegetationsperiode um acht Tage verlängert. Das Vegetationsende trat sogar einen Tag früher ein.

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 in den 1990er Jahren verspätet eintrat. Das Ausmaß der Verkürzung der Vegetationsruhe gleicht dem in Hessen. In Rheinland-Pfalz war die Vegetationsruhe in der Dekade von 1991 bis 2000 im Vergleich zu 1951 bis 1960 neun Tage kürzer, in Hessen waren es im Vergleich sowohl zum Zeitraum von 1961 bis 1990 als auch zur Dekade von 1951 bis 1960 acht Tage. Dabei basierte die Verkürzung der Vegetationsperiode ebenfalls auf einem früheren Vegetationsbeginn und nicht auf einer Verspätung des Vegetationsendes (Henniges et al. 2005).

Obwohl in den einzelnen Naturraumgruppen ähnliche Trends, wie beispielsweise die Verfrühung der phänologischen Phasen, die stärkste Verfrühung der Frühlingsphasen, die Abnahme im Maß der Verfrühung im Jahresverlauf oder die Verlängerung von Frühling und Herbst beobachtet werden konnten, hatte die Klimaerwärmung, wie diese Arbeit zeigt, regional unterschiedliche Auswirkungen auf die Entwicklung der Pflanzen (Kap. 3.1.2). Die Blattverfärbung der Stiel-Eiche beispielsweise setzte in vielen Regionen Hessens später ein, im Hessisch-Fränkischen Bergland und im Taunus verfrühte sie sich jedoch. So konnten in benachbarten Naturräumen sogar gegensätzliche Trends beobachtet werden. Dies spiegelt sich auch im Bezug auf die Dauer der Vegetationsperiode wider. Während sich die Vegetationszeit in manchen Regionen verlängert hat, am stärksten mit 22 Tagen im Bergisch-Sauerländischen Gebirge, ist sie wiederum in anderen unverändert geblieben. Im Gießen-Koblenzer-Lahntal konnte sogar eine Verkürzung der Vegetationsperiode um zwei Tage beobachtet werden.

4.2 Abschätzung der Auswirkung der zukünftigen Klimaerwärmung auf die Pflanzenentwicklung im Zeitraum von 2041 bis 2050 und mögliche Konsequenzen

Der Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) spiegelt in der Verschiebung der Pflanzenentwicklung aufgrund der Klimaerwärmung das Bild für Gesamthessen wider (Kap. 3.2.2.2). Alle Jahreszeiten haben sich verfrüht, die Vegetationsperiode hat sich, übereinstimmend mit den Beobachtungen der thermischen Vegetationsperiode, verlängert. Daher wurde die Pflanzenentwicklung in der Dekade von 2041 bis 2050 beispielhaft für diesen Naturraum untersucht.

Die zukünftige Klimaänderung konnte am Beispiel für Gießen durch die Auswertung der von der Firma Meteo-Research (Enke 2003) modellierten Temperaturdaten für die meteorologische Station Gießen gezeigt werden (Kap. 3.2.1). Demnach wird sich in der Dekade von 2041 bis 2050 die mittlere Lufttemperatur in Gießen im Vergleich zu den 1990er Jahren um 1,3 °C erhöhen. Dies führt zu einer weiteren Zunahme der Anzahl der

Sommertage und heißen Tage und einer Reduzierung der Anzahl der Frost- und Eistage. Folglich wird auch die Länge der thermischen Vegetationsperiode zunehmen, und zwar um 59 Tage. Die Ursache hierfür liegt sowohl in der Verfrühung des Vegetationsbeginns als auch, im Gegensatz zum Zeitraum von 1961 bis 2000, in der Verspätung des Vegetationsendes. Ähnliche Trends wurden von Chmielewski et al. (2004a) auch für Sachsen prognostiziert. Dort hat sich die thermische Vegetationsperiode im Zeitraum von 1961 bis 2000, hauptsächlich durch die Verfrühung des Vegetationsbeginns, um 2,2 Tage/Jahrzehnt verlängert. In der Dekade von 2041 bis 2050 wird die thermische Vegetationsperiode in Sachsen im Vergleich zu 1981 bis 2000 um 31 Tage zunehmen.

Mit Hilfe von Modellen, auf der Datengrundlage der Prognose von Enke (2003) basierend, konnte beispielhaft für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) aufgezeigt werden, dass sich der Eintritt der Jahreszeiten in der Dekade von 2041 bis 2050 weiter verfrühen wird (Kap. 3.2.2.2). Der Frühlingsbeginn wird im Vergleich zur Dekade von 1991 bis 2000 im Mittel zwei Wochen früher erfolgen, voraussichtlich am 27. Januar. Der Trend zur Verlängerung der Vegetationsperiode, hauptsächlich auf dem früheren Vegetationsbeginn basierend, wird sich, unter der Annahme, dass der Beginn des Spätherbstes richtig abgeschätzt wurde, in der Zukunft weiter verstärken. Während die in dieser Arbeit entwickelten Modelle für den Beginn des Frühlings, des Sommers und des Früh- und Vollherbstes die Variabilität in der Datengrundlage zu 74-80 % erklären, ist das Modell für den Beginn des Spätherbstes/der Vegetationsruhe mit großer Unsicherheit behaftet; es erklärt die Variabilität in den Daten lediglich zu 27 % (Kap. 3.2.2.1). Dabei werden die Mittel der Dekaden hinreichend genau wiedergespiegelt; der prognostizierte Beginn der phänologischen Phase in den einzelnen Jahren weist jedoch größere Abweichungen auf. Der Grund hierfür ist, dass die Reaktion der Blattverfärbung auf die Klimaerwärmung sehr komplex ist.

Die Modelle zur Abschätzung der zukünftigen Pflanzenentwicklung beinhalten zudem noch eine weitere unsichere Komponente. Ihnen liegen die von der Firma Meteo-Research modellierten Temperaturdaten für Gießen (Enke 2003) zugrunde, welche wiederum auf dem B2 Szenario (IPCC 2001) basieren. Dieses ist jedoch nur eines von vielen möglichen Szenarien, die eintreten könnten. Die in dieser Arbeit entwickelten Modelle und angefertigten Prognosen stellen daher nur eine von vielen möglichen Varianten dar, welche in der Zukunft eintreten könnte.

Die Verschiebungen in der Pflanzenentwicklung als Reaktion auf die Klimaerwärmung bringen verschiedene Folgen mit sich. Durch den früheren Vegetationsbeginn können die Pflanzen nach Menzel (2002) möglicherweise durch ein höheres Risiko von Frostschäden gefährdet sein. In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass für verschiedene Obstkulturen im Naturraum 348 durch den früheren Eintritt der Blüte trotz der prognostizierten Klimaerwärmung die Gefahr von Spätfrost auch in der Zukunft vorhanden ist (Kap. 3.2.3). Dies liegt daran, dass, obwohl die Anzahl der Spätfröste in der Zukunft abnehmen wird, sich die Anzahl der in den Monaten März und April auftretenden Spätfröste jedoch kaum vermindern und im Mai wahrscheinlich sogar leicht erhöhen wird. Für die Arten Apfel, Birne und Sauerkirsche wird sich die Gefahr von Spätfrost in der Dekade von 2041 bis

2050 wahrscheinlich noch verstärken. Dabei wird vor allem die Gefahr durch leichte Spätfröste ($0\text{ °C} > T_{\min} \geq -2\text{ °C}$) steigen. Während in den letzten 40 Jahren im Zeitraum der Blüte der untersuchten Arten keine strengen Spätfröste ($T_{\min} < -4\text{ °C}$) zu beobachten waren, ist für die Zukunft die Tendenz des Auftretens von strengen Spätfrösten während der Blütezeit zu erwarten. Die Gefahr von Spätfrost ist vor allem für den Obst-, Gemüse- und Weinbau von besonderer Bedeutung, da einzelne Frostnächte während der Blüte zu völligen Ertragsausfällen führen können. Dabei haben, neben der Stärke, der Dauer und dem Zeitpunkt des Frostes, die Pflanzenart und die Resistenz der Sorte eine große Bedeutung (Chmielewski et al. 2004a, Schumacher 1989). Auch die vorliegende Untersuchung zeigt, dass für die Gefahr von Spätfrost die Pflanzenart eine entscheidende Rolle spielt. Während die Gefahr von Spätfrost in der Dekade von 2041 bis 2050 im Vergleich zur Klimanormalperiode (1961-1990) für Apfel, Birne und Sauerkirsche ansteigen wird, bleibt sie für Süßkirsche, Rote Johannisbeere und Stachelbeere nahezu unverändert. Um das Risiko von Spätfrost genauer abschätzen zu können, sind weitere Untersuchungen an mehr Arten nötig. 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 °C , für die offenen Blüten bereits Temperaturen unter -2 °C kritisch (Schumacher 1989). Eine Zunahme der Spätfrostgefahr für verschiedene Obstarten wird auch für Sachsen prognostiziert (Chmielewski et al. 2004a). Dabei sind vor allem die Kirsch- und die Apfelbäume stark betroffen. Die Gefahr durch Spätfrost stellt folglich auch zukünftig nicht nur in der hier untersuchten Region in Hessen, sondern auch in anderen Teilen Deutschlands ein Problem dar.

Nach Menzel (2002), Menzel & Fabian (1999) und EEA (2004) können die Pflanzen von einer Verlängerung der Vegetationsperiode profitieren, da die verlängerte Wachstumsphase, vor allem in Regionen, in denen die Temperatur ein limitierender Faktor für das Pflanzenwachstum ist, zu einer Erhöhung der Biomasse führt. Veränderungen in der Vegetationsperiode können auch die Artenzusammensetzungen beeinflussen. Neue Tier- und Pflanzenarten können einwandern, alte aussterben (Menzel 2002, EEA 2004). Als weitere Folgen der Klimaerwärmung und der prognostizierten Veränderung der Niederschläge könnten in unseren Breiten verschlechterte Wachstum- und Entwicklungsbedingungen zu erwarten sein (EEA 2004). Trockenheit könnte zur vorzeitigen Reife von Obst und Getreide und zu einer geringeren Biomasseproduktion oder sogar zum Absterben von Bäumen führen. Zudem könnte es durch milde Witterung zur Massenvermehrung und infolge dessen zu stärkerem Schädlingsbefall in Wäldern und in der Landwirtschaft kommen. Diese durch die Klimaerwärmung bedingten globalen und, wie in dieser Arbeit gezeigt, regionalen Veränderungen bedürfen der Berücksichtigung bei zukünftigen Planungen sowohl im Bereich der Forst- und Landwirtschaft als auch im Naturschutz. Als mögliche Anpassungsmaßnahmen werden in einer Studie über den Klimawandel in Sachsen (Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft 2005) der Anbau von neuen, besser angepassten Kulturen und trockenoleranten Bäumen diskutiert. Auch neue angepasste Aussaat- und Pflanztermine sind

zu bedenken. Des Weiteren könnte durch eine Intensivierung und Ausweitung der Bewässerung sowie bodenschonende Maßnahmen und standortangepasste Bewirtschaftungsformen die Nährstoffverfügbarkeit auch in niederschlagsarmen, d.h. trockenen Zeiten gewährleistet werden und das Risiko von Ertragseinbußen dadurch minimiert werden.

Verschiebungen in der Pflanzenentwicklung infolge der Klimaänderung haben nicht nur Auswirkungen auf die Tier- und Pflanzenwelt, sondern auch auf das Klimasystem selbst. Der phänologische Zyklus beeinflusst den Blattflächenindex LAI, welcher wiederum Auswirkungen auf verschiedene Oberflächenparameter, wie den Albedo, den latenten und fühlbaren Wärmestrom, den CO₂-Fluss und die Netto-Abstrahlung hat (Menzel 2002). Daher ist es von Bedeutung, phänologische Beobachtungen auszuweiten und in der Zukunft weiter durchzuführen.

4.3 Wirkung von moderat erhöhten CO₂-Konzentrationen (+20 %) auf die Phänologie, die Anatomie und den Stomatawiderstand für Wasserdampf von Pflanzen

Neben der indirekten Wirkung der klimarelevanten Spurengase auf die Temperatur können auch direkte Wirkungen beobachtet werden. Vielfach wurde ein CO₂-Düngungseffekt auf die Ertragsleistung wiedergegeben (Nowak et al. 2004, Kammann et al. 2005). Erhöhte CO₂-Konzentrationen können zudem die Phänologie von Knospen und Blüten (Rusterholz & Erhardt 1998, Jach et al. 2001) als auch die Pflanzenstruktur beeinflussen (Pritchard et al. 1999). Nach Körner et al. (1998) reagieren die einzelnen Pflanzenarten jedoch sehr unterschiedlich auf erhöhte CO₂-Konzentrationen. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen dieser Arbeit.

In Untersuchungen zur Phänologie verschiedener Arten des untersuchten Grünlandbestandes 'Arrhenatheretum elatioris (Br.-B1) Filipendula ulmaria sub-community' (Rodwell et al. 1992) zeigte erstaunlicherweise die überwiegende Anzahl der Arten trotz der nur moderat erhöhten CO₂-Konzentration Verschiebungen im mittleren Blühbeginn. Dabei traten Verfrühungen und Verspätungen im Blühbeginn bei Gräsern und Kräutern gleichermaßen auf. Ähnliche CO₂-Effekte konnten auch in Untersuchungen an anderen Pflanzenarten beobachtet werden (Rusterholz & Erhardt 1998, Miglietta et al. 1998, Wagner et al. 2001), wobei in Freiland-CO₂-Anreicherungsexperimenten überwiegend ein früherer Blühbeginn unter erhöhten CO₂-Konzentrationen festgestellt wurde. Miglietta et al. (1998) konnte zeigen, dass bereits eine CO₂-Erhöhung auf 460 ppm, das entspricht etwa einer Erhöhung um 23 %, zu einer drei- bis fünftägigen Verfrühung im Blühbeginn führte.

In der vorliegenden Arbeit konnten lediglich im Jahr 2005 bei *Glechoma hederacea* und im Jahr 2004 bei *Saxifraga granulata* eine signifikante Verfrühung im Blühbeginn unter erhöhten CO₂-Konzentrationen beobachtet werden. In beiden Untersuchungsjahren verfrühte sich der Eintritt der Blüte von *Glechoma hederacea*, *Cardamine pratensis*, *Dactylis*

glomerata und *Sanguisorba officinalis* und verspätete sich bei *Plantago lanceolata* und *Geranium pratense*, andere Arten zeigten unterschiedliche Trends (Tab. 27).

Tab. 27: Eintritt des Blühbeginns der untersuchten Arten in den Jahren 2004 und 2005 unter erhöhten [CO₂] im Vergleich zu aktuellen [CO₂]

Reaktion auf erhöhte [CO ₂]	Pflanzenarten
Verfrühung	<i>Cardamine pratensis</i> , <i>Dactylis glomerata</i> , <i>Glechoma hederacea</i> , <i>Sanguisorba officinalis</i>
Verspätung	<i>Geranium pratense</i> , <i>Plantago lanceolata</i>
Indifferent	<i>Anthoxanthum odoratum</i> , <i>Alopecurus pratensis</i> , <i>Arrhenatherum elatius</i> , <i>Festuca pratensis</i> , <i>Galium mollugo</i> , <i>Holcus lanatus</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Poa trivialis</i> , <i>Rumex acetosa</i> , <i>Saxifraga granulata</i>

Die vorverlagerten Blühtermine könnten die Folge der schnelleren Knospenentwicklung unter erhöhten CO₂-Konzentrationen sein (Miglietta et al. 1998). Das mehrjährige immergrüne Kraut *Glechoma hederacea* (Hutchings & Price 1999) und die immergrüne Art *Cardamine pratensis* (Klotz et al. 2002) profitieren möglicherweise von den auch in den Wintermonaten erhöhten CO₂-Konzentrationen im GiFACE und reagieren mit einer schnelleren Entwicklung im Frühling. Demgegenüber sind die beiden Kräuter *Plantago lanceolata* und *Geranium pratense*, welche in beiden Untersuchungsjahren unter erhöhten CO₂-Konzentrationen später blühten, sommergrün (Klotz et al. 2002). Sie scheinen nicht von der CO₂-Erhöhung zu profitieren und reagieren nach Janze (mündliche Mitteilung) auf diesen veränderten Umweltfaktor stark negativ.

Beim Vergleich der Jahre 2004 und 2005 konnten große Differenzen im Blühbeginn unter erhöhten und aktuellen CO₂-Konzentrationen beobachtet werden. Bei *Glechoma hederacea* betrug die Verfrühung im Jahr 2004 einen Tag, 2005 hingegen 12 Tage und bei *Plantago lanceolata* vergrößerte sich der verspätete Eintritt der Blüte von einem Tag im Jahr 2004 auf zehn Tage im Jahr 2005. Pflanzen reagieren neben erhöhten CO₂-Konzentrationen und veränderten Niederschlagsmengen stark auf die Lufttemperaturen (Defila & Müller-Ferch 2003, EEA 2004). Diese großen Unterschiede im Zeitpunkt des Blühbeginns könnten eine Folge des Einflusses der Witterung sein. Die auftretende Kälteperiode nach dem Blühbeginn von *Glechoma hederacea* könnte möglicherweise die weitere Entwicklung der Knospen negativ beeinflusst haben. In Untersuchungen an Ahorn (*Acer saccharum* und *Acer rubrum*) konnte Norby et al. (2003) zeigen, dass durch das Auftreten von Spätfrost junge Knospen in ihrer phänologischen Entwicklung zurückgesetzt wurden.

In dieser Arbeit durchgeführte Untersuchungen des Stomatawiderstandes für Wasserdampf und der Stomatadichte haben gezeigt, dass die Arten sehr unterschiedlich auf erhöhte CO₂-Konzentrationen reagieren. Dennoch konnten die untersuchten Arten anhand ihrer Reaktionsmuster in drei verschiedene Gruppen eingeteilt werden (Tab. 28).

Tab. 28: Reaktion im Stomatawiderstand für Wasserdampf und in der Stomatadichte der untersuchten Pflanzenarten auf erhöhte [CO₂]

Gruppe	Arten	Stomatawiderstand für Wasserdampf [s cm ⁻¹]	Stomatadichte [Anzahl mm ⁻²]
1	<i>Glechoma hederacea</i>	↑	-
2	<i>Arrhenatherum elatius</i> , <i>Saxifraga granulata</i>	(↑)	↓ oder (↓)
3	<i>Poa pratensis</i> , <i>Geranium pratense</i> , <i>Plantago lanceolata</i>	- oder ↓	↓ oder -

Einteilung der Arten nach dem CO₂-Effekt der Mixed Models, Variante 1(CO₂ und Block als feste Faktoren):

↑: signifikante Erhöhung ($p \leq 0,05$)

↓: signifikante Verringerung ($p \leq 0,05$)

(): tendenziell ($p > 0,05$); ab einer Veränderung über 5 % unter erhöhten [CO₂] im Vergleich zu aktuellen [CO₂]

-: Veränderung unter erhöhten [CO₂] im Vergleich zu aktuellen [CO₂] unter 5 %

Die Arten der Gruppe 1 und 2 reagierten auf erhöhte CO₂-Konzentrationen mit einer Erhöhung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf. Diese Reaktion konnte an anderen Pflanzenarten bereits mehrfach beobachtet werden (Rogers et al. 1983, Radoglou & Jarvis 1990b, Reid et al. 2003, Marchi et al. 2004). Durch die Abnahme der Transpirationsrate wird die Wassernutzungseffizienz, d.h. der Kohlenstoffgewinn pro Wasserverlust, erhöht (Tuba et al. 1994), was ein höheres Wachstumspotential bei nicht zu stark limitierter Wasserversorgung impliziert (Amthor 1995). Die Verringerung der stomatären Leitfähigkeit kann wichtige Folgen für die Fähigkeit der Pflanzen haben Wasserstress zu vermeiden (Bettarini et al. 1998). Diese Reaktion hat einen Vorteil für Pflanzen an trockenen Standorten. Sie kommt aber, wie in dieser Arbeit zu sehen, auch bei Pflanzen an feuchteren Standorten vor. Die Arten, welche den Stomatawiderstand für Wasserdampf erhöhen, können wahrscheinlich von der CO₂-Anreicherung profitieren und selbst bei erhöhtem Stomatawiderstand, zum Zweck der Wasserersparnis durch verringerte Transpiration, noch ausreichend Photosynthese machen.

Zusätzlich konnte bei einigen Arten ein Effekt der langfristigen Bodenfeuchte (Block) und der kurzfristigen Bodenfeuchte (BF1 und BF2) auf den Stomatawiderstand für Wasserdampf beobachtet werden. Der Stomatawiderstand für Wasserdampf war auf feuchterem Boden im Vergleich zu jenem auf trockenerem Boden höher. Für *Arrhenatherum elatius* konnte auf der Blattunterseite bei Einbeziehung der kurzfristigen Bodenfeuchte sogar ein tendenzieller CO₂-Effekt beobachtet werden. Dies zeigt, dass der Stomatawiderstand für Wasserdampf neben der CO₂-Konzentration auch von der Bodenfeuchte abhängig ist. Dabei spielt sowohl die langfristige als auch die zum Zeitpunkt der Messung vorhandene Bodenfeuchte eine wichtige Rolle.

Die Erhöhung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf erfolgte bei der Gruppe 1 wahrscheinlich ausschließlich durch eine Reduzierung der Öffnungsweite. Dies steht im Einklang mit Untersuchungen an anderen Arten (Rogers et al. 1983, Radoglou & Jarvis 1990b, Reid et al. 2003, Marchi et al. 2004). Das Reaktionsmuster der Gruppe 1 zeigte die Art *Glechoma hederacea*, welche unter erhöhten CO₂-Konzentrationen den Stomatawiderstand

für Wasserdampf um 100 % signifikant erhöhte. Ein signifikanter bzw. tendenzieller CO₂-Effekt auf die Stomatadichte konnte in Abhängigkeit der längerfristigen Bodenfeuchte beobachtet werden. Auf feuchterem Untergrund war die Anzahl der Stomata auf der Blattunterseite unter erhöhten CO₂-Konzentrationen um 12 % (signifikant bzw. tendenziell) verringert und auf trockenerem Boden um 8 % (tendenziell) erhöht. Solche Unterschiede konnten jedoch nur bei dieser Art beobachtet werden und lassen keine eindeutige Beurteilung zu.

Bei den Arten der Gruppe 2 ist die Erhöhung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf größtenteils auf eine Verringerung der Stomatadichte zurückzuführen. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass auch eine Änderung der Öffnungsweite stattgefunden hat. Ähnliche Beobachtungen konnten an *Elymus repens* gemacht werden, welche sieben Jahre unter erhöhten CO₂-Konzentrationen wuchs (Engloner et al. 2003). Diese Reaktion ist bisher nur in mehrjährigen CO₂-Experimenten beschrieben worden.

Eine signifikante oder tendenzielle Verringerung der Stomatadichte, wie sie in der vorliegenden Arbeit für die Arten *Arrhenatherum elatius* und *Poa pratensis* nachgewiesen werden konnte, war aufgrund der nur moderat erhöhten CO₂-Konzentration erstaunlich. Mit der überwiegenden Anzahl der Erkenntnisse aus kontrollierten Bedingungen übereinstimmend (Woodward & Bazzaz 1988, Beerling & Woodward 1995, Bettarini et al. 1998, Woodward et al. 2002, Woodward & Kelly 1995, Engloner et al. 2003) - in einigen Untersuchungen blieb die Stomatadichte unverändert (Thomas & Harvey 1983, Rodoglou & Jarvis 1990b, Bettarini et al. 1998, Marchi et al. 2004) oder erhöhte sich sogar (Thomas & Harvey 1983) - unterscheidet sich die Reaktion dieser Arten von anderen Untersuchungen unter Freiland-CO₂-Anreicherungsbedingungen. Reid et al. (2003) und Estiarte et al. (1994) konnten bei anderen Arten keine signifikante Reduzierung der Stomatadichte nachweisen, obwohl die erhöhte CO₂-Konzentration im Gegensatz zu dieser Arbeit (450 ppm) 550 ppm betrug. Ein möglicher Grund hierfür könnte die Dauer der CO₂-Anreicherung sein. Während in der vorliegenden Arbeit die Pflanzen acht Jahre unter erhöhten CO₂-Konzentrationen gewachsen sind, betrug die Versuchsdauer bei Reid et al. (2003) lediglich fünf Monate und Estiarte et al. (1994) vier Jahre. Die Dauer der CO₂-Anreicherung scheint für die Anpassung an erhöhte CO₂-Konzentrationen durch eine Änderung der Anzahl der Stomata wichtiger zu sein als die Konzentration des Gases. Auch Marchi et al. (2004) vermuten, dass der CO₂-Effekt auf die Stomatadichte wahrscheinlich erst über längere Zeit sichtbar wird.

In der vorliegenden Arbeit konnte bei *Geranium pratense* und *Plantago lanceolata* (Gruppe 3) eine Verringerung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf unter erhöhten CO₂-Konzentrationen beobachtet werden. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu allen anderen Untersuchungen, in denen eine Erhöhung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf nachgewiesen wurde (Rogers et al. 1983, Engloner et al. 2003, Reid et al. 2003, Marchi et al. 2004). Ein Unterschied besteht darin, dass in diesem Versuch nur moderat erhöhte CO₂-Konzentrationen (etwa 450 ppm) verwendet wurden, während in den anderen Untersuchungen die CO₂-Konzentration jedoch 520-910 ppm betrug. Doch trotz dieser Differenz reagierten die anderen in dieser Arbeit untersuchten Arten mit einer Erhöhung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf. Unterschiede in abiotischen Faktoren wie der Bodenfeuchte, der

Lufttemperatur oder dem Bewölkungsgrad, die möglicherweise auch einen Einfluss auf den gemessenen Stomatawiderstand haben, konnten zwischen diesen beiden Arten und den übrigen untersuchten Pflanzenarten nicht gefunden werden. Bei genauerer Betrachtung der Werte fällt jedoch auf, dass die Standardabweichungen der Stomatawiderstände für Wasserdampf bei *Geranium pratense* unter aktuellen CO₂-Konzentrationen relativ hoch und bei *Plantago lanceolata* unter erhöhten CO₂-Konzentrationen sogar höher als die Messergebnisse sind. Eine mögliche Ursache liegt in der Blattanatomie, denn die von der Blattspitze zum Blattgrund dicker werdenden Blattnerven erschwerten die Messungen und stellen somit eine Fehlerquelle dar. Die Erhöhung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf unter aktuellen CO₂-Konzentrationen ist wahrscheinlich hauptsächlich auf die Veränderung der Öffnungsweite der Stomata zurückzuführen, da die Stomatadichte unverändert blieb. Im Bezug auf die anatomischen Parameter LMA, Blattdicke und Blattfläche der in dieser Arbeit untersuchten Arten war eine neue Gruppierung nötig (Tab. 29).

Tab. 29: Reaktion im LMA, in der Blattdicke und in der Blattfläche der untersuchten Pflanzenarten auf erhöhte [CO₂]

Gruppe	Arten	LMA [g cm ⁻²]	Blattdicke [µm]	Blattdichte [g cm ⁻³]
4	<i>Glechoma hederacea</i>	(↑)	(↑)	(↑)
5	<i>Arrhenatherum elatius</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Geranium pratense</i> ,	-	↓, (↓) oder -	↑ oder -
6	<i>Plantago lanceolata</i> , <i>Saxifraga granulata</i>	↓	↓ oder -	↓ oder -

Einteilung der Arten nach dem CO₂-Effekt der Mixed Models:

↑: signifikante Erhöhung ($p \leq 0,05$)

↓: signifikante Verringerung ($p \leq 0,05$)

(): Tendenzuell ($p > 0,05$); ab einer Veränderung über 5 % unter erhöhte [CO₂] im Vergleich zu aktuellen [CO₂]

-: Veränderung unter erhöhten [CO₂] im Vergleich zu aktuellen [CO₂] unter 5 %

Dabei zeigte die Art *Glechoma hederacea*, wie bereits in der Reaktion des Stomatawiderstandes, mit einer Erhöhung des LMA, der Blattdicke und der Blattdichte die stärkste Reaktion. Dies steht im Einklang mit Untersuchungen an anderen Arten (Ishizaki et al. 2003, Miglietta et al. 1998), in denen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen eine Zunahme des LMA bzw. eine Abnahme dessen Kehrwertes SLA beobachtet werden konnte. Die Abnahme des SLA korreliert nach Miglietta et al. (1998) signifikant mit der Erhöhung der Menge an löslichen Zuckern und Stärke. Die tendentielle Zunahme des LMA beruht wahrscheinlich auf einer Erhöhung des Stärkegehalts im Mesophyll und der damit verbundenen verstärkten Wasseraufnahme, um dem ansteigenden osmotischen Potential entgegenzuwirken (Madsen 1973). Diesen Sachverhalt zu klären könnte daher das Ziel weiterer Untersuchungen sein. Eine Zunahme des LMA unter erhöhten CO₂-Konzentrationen ist für die Pflanzen von Vorteil, da er zu einer Steigerung der Photosyntheseraten und zur Wachstumserhöhung beiträgt (Ishizaki et al. 2003, Miglietta et al. 1998).

Die meisten untersuchten Arten zeigten jedoch unter erhöhten CO₂-Konzentrationen keine Veränderungen im LMA (Gruppe 5) oder sogar eine Reduzierung des LMA (Gruppe 6). Auch

Pritchard et al. (1999) beschreibt eine Reaktionsbreite in der Veränderung des LMA anderer Arten unter erhöhten CO₂-Konzentrationen: So konnten in insgesamt 49 Untersuchungen in 78 % der Fälle eine Erhöhung des LMA beobachtet werden, in 18 % der Fälle wurden keine signifikanten Unterschiede und 4 % eine Verringerung gefunden.

Die in dieser Arbeit untersuchten Arten reagierten sehr unterschiedlich auf erhöhte CO₂-Konzentrationen und ließen sich nicht in das Gruppen-Schema nach Janze (mündliche Mitteilung), welches als ein Auswahlkriterium diente (siehe Tab. 4 in Kap. 2.2.2), einteilen.

Lediglich das Kraut *Glechoma hederacea* war diesem Schema zuzuordnen. Die positive Reaktion auf pflanzensoziologischer Ebene stimmt mit den in dieser Arbeit gezeigten Reaktionen auf anatomischer Ebene und der des Stomatawiderstandes für Wasserdampf überein. Unter erhöhten CO₂-Konzentrationen zeigte *Glechoma hederacea* zudem als einzige Art eine signifikante Verfrühung im Blühbeginn koinzident mit einer signifikanten Erhöhung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf. Die Erhöhung des stomatären Widerstandes kann nach Amthor (1995) zu erhöhten Blatt- und Bestandestemperaturen infolge von reduziertem latentem Wärmeaustausch führen. Die Bestandestemperatur könnte, vermutet Amthor (1995), auch ohne den generellen Anstieg der globalen Temperatur, durch höhere CO₂-Konzentrationen erhöht werden. Möglicherweise trägt dies über schneller ablaufende chemische Prozesse bei höheren Temperaturen, neben anderen Einflussfaktoren, auch zu einer schnelleren Entwicklung und folglich zu einem früheren Blühbeginn bei. Zur genaueren Beleuchtung dieser Zusammenhänge sind jedoch weitere Untersuchungen nötig.

Für die anderen untersuchten Arten ist eine Einteilung in das Gruppen-Schema nach Janze (mündliche Mitteilung) nicht eindeutig, da die Unterschiede zwischen den Arten nur minimal sind. Dies liegt wahrscheinlich an der geringen Anzahl der untersuchten Individuen, denn Signifikanzen können nur bei größeren Unterschieden auftreten.

Zusammenfassend betrachtet lässt sich sagen, dass sowohl erhöhte Lufttemperaturen als auch erhöhte CO₂-Konzentrationen die Phänologie beeinflussen und erhöhte CO₂-Konzentrationen zudem einen Einfluss auf die Anatomie und den Stomatawiderstand für Wasserdampf haben. Erhöhte CO₂-Konzentrationen könnten über die Erhöhung des Stomatawiderstandes und der damit bedingten Verringerung der Transpiration zu Temperaturerhöhungen auf Blattebene führen und damit auch Auswirkungen auf die Phänologie haben, so dass die Klimaerwärmung und der CO₂-Effekt nicht trennbar sind. Die vorgestellte Prognose des zukünftigen Eintritts der phänologischen Phasen berücksichtigt nicht den möglichen direkten Effekt erhöhter CO₂-Konzentrationen auf die Blattemperatur.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde zum einen die Auswirkung der Klimaerwärmung in den letzten 50 Jahren und der zukünftigen Klimaerwärmung auf die Pflanzenentwicklung und zum anderen die Wirkung von moderat erhöhten CO₂-Konzentrationen (+20 %) auf die Phänologie, die Anatomie und den Stomatawiderstand für Wasserdampf von Pflanzen untersucht.

Anhand der Auswertung pflanzenphänologischer Daten der Jahre von 1951 bis 2003 von 170 Stationen des DWD in Hessen zu landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, Obstgehölzen und wildwachsenden Pflanzen konnte gezeigt werden, dass es in diesem Zeitraum zu Verschiebungen in der Pflanzenentwicklung gekommen ist. In Hessen verfrühte sich der Eintritt phänologischer Phasen im Mittel zwischen 0,4 Tage/Dekade bis 5,5 Tage/Dekade. Die Frühjahrsphasen zeigten dabei den stärksten Trend. Sie reagierten sehr deutlich auf die höheren Temperaturen in den Wintermonaten. Die Verfrühung der phänologischen Phasen nahm im Jahresverlauf ab, wahrscheinlich aufgrund einer schwächeren Erwärmung von Frühling und Sommer. Ein früheres Eintreten der phänologischen Phasen konnte in Hessen überwiegend ab dem Beginn der 1990er Jahre beobachtet werden.

Die klimatischen Veränderungen hatten allerdings regional unterschiedliche Auswirkungen auf die Pflanzen, denn nicht alle phänologischen Phasen reagierten mit einer früheren Entwicklung. So setzte der Eintritt der Blattverfärbung der Stiel-Eiche in vielen Regionen Hessens, wahrscheinlich infolge milder Witterung, später ein. Regionale Unterschiede und gegensätzliche Trends in benachbarten Naturräumen zeigten sich auch in der Dauer der Vegetationsperiode. Während sich die Vegetationszeit in manchen Regionen verlängert hat, ist sie wiederum in anderen unverändert geblieben. Im Gießen-Koblenzer-Lahntal konnte sogar eine Verkürzung der Vegetationsperiode um zwei Tage beobachtet werden.

Mit Hilfe von entwickelten Modellen, basierend auf den Temperaturdaten eines Regionalisierungsmodells für die meteorologische Station Gießen, konnte beispielhaft für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) gezeigt werden, dass es aufgrund der prognostizierten Klimaerwärmung in der Dekade von 2041 von 2050 zu weiteren Verfrühungen in der Pflanzenentwicklung und zur Verlängerung der Vegetationsperiode kommen wird. Dies hat zur Folge, dass die Gefahr von Spätfrösten auch in der Zukunft vorhanden ist und für einige Obstarten wie Apfel, Birne und Sauerkirsche wahrscheinlich noch ansteigt, denn obwohl für die Zukunft eine Abnahme der Anzahl der Spätfröste prognostiziert wird, wird sich die Anzahl der in den Monaten März bis Mai auftretenden Spätfröste kaum vermindern.

Neben erhöhten Lufttemperaturen beeinflussen jedoch auch erhöhte CO₂-Konzentrationen die Phänologie. So zeigte die überwiegende Anzahl der untersuchten Pflanzenarten eines Grünlandbestandes trotz der nur moderat erhöhten CO₂-Konzentration im GiFACE-Experiment Verschiebungen im mittleren Blühbeginn, wobei sowohl Verfrühungen als auch Verspätungen auftraten. Eine signifikante Verfrühung unter erhöhten CO₂-Konzentrationen konnte lediglich bei *Glechoma hederacea* und bei *Saxifraga granulata* beobachtet werden.

Des Weiteren verfrühte sich der Eintritt der Blüte von *Glechoma hederacea*, *Cardamine pratensis*, *Dactylis glomerata* und *Sanguisorba officinalis* und verspätete sich bei *Plantago lanceolata* und *Geranium pratense*. Dies deutet darauf hin, dass immergrüne Arten möglicherweise von der ganzjährigen CO₂-Anreicherung profitieren und mit einer schnelleren Entwicklung im Frühling reagieren. Große Unterschiede im Zeitpunkt des Blühbeginns ließen vermuten, dass die Witterung auch einen Einfluss hat: Kälteperioden haben wahrscheinlich die Knospenentwicklung einiger Arten verzögert.

Die Auswirkungen von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf anatomische Parameter und den Stomatawiderstand für Wasserdampf wurde in dieser Arbeit beispielhaft an sechs Arten untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Pflanzen bereits auf moderat erhöhte CO₂-Konzentrationen reagieren, wobei die Reaktion je nach Art variiert: Die Arten *Arrhenatherum elatius* und *Saxifraga granulata* erhöhten den Stomatawiderstand für Wasserdampf hauptsächlich durch die Verringerung der Stomatadichte, *Glechoma hederacea* hingegen überwiegend durch eine Reduzierung der Öffnungsweite der Stomata. Im Bezug auf die Blattdicke, die Blattfläche und den LMA (leaf mass per area) zeigte *Glechoma hederacea* generell positive Reaktionen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen. Im Gegensatz dazu konnten bei den anderen untersuchten Arten (*Arrhenatherum elatius*, *Poa pratensis*, *Saxifraga granulata*, *Plantago lanceolata* und *Geranium pratense*) Erhöhungen, Verringerungen sowie keine Reaktionen in den anatomischen Parametern beobachtet werden.

Insgesamt betrachtet stimmt die eindeutige Reaktion von *Glechoma hederacea* auf Bestandesebene mit den in dieser Arbeit gezeigten Reaktionen auf anatomischer Ebene und der des Stomatawiderstandes für Wasserdampf überein. Zudem zeigte sie in der vorliegenden Arbeit unter erhöhten CO₂-Konzentrationen als einzige Art eine signifikante Verfrüfung im Blühbeginn koinzident mit einer signifikanten Erhöhung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf. Verringerungen der Transpiration könnten zu erhöhten Blatt- und Bestandestemperaturen führen und damit Auswirkungen auf die Phänologie haben, so dass die Klimaerwärmung und der CO₂-Effekt nicht trennbar sind.

6 Literaturverzeichnis

- Ahas, R. (1999): Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological time-series analyses in Estonia. *International Journal of Biometeorology* 42, 119-123.
- Amthor, J.S. (1995): Terrestrial higher-plant response to increasing atmospheric [CO₂] in relation to the global carbon cycle. *Global Change Biology* 1, 243-274.
- Beerling, D.J. & Woodward, F.I. (1995): Stomatal responses of variegated leaves to CO₂ enrichment. *Annales of Botany* 75, 507-511.
- Bettarini, I., Vaccari, F.P. & Miglietta, F. (1998): Elevated CO₂ concentrations and stomatal density: observations from 17 plant species growing in a CO₂ spring in central Italy. *Global Change Biology* 4, 17-22.
- 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.
- Bühl, A. & Zöfel, P. (2005): *SPSS 12. Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows*. 9. Aufl., Pearson Studium, München.
- Chen, X. (1994): Untersuchung 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. & Köhn, W. (2000): Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. *Agricultural and Forest Meteorology* 102, 253-261.
- Chmielewski, F.-M. & Rötzer, T. (2001): Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 108, 101-112.
- Chmielewski, F.-M. & Rötzer, T. (2002): Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Climate Research* 19, 257-264.

- Chmielewski, F.-M., Müller, A. & Küchler, W. (2004a): *Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen*. Eigenverlag HU Berlin, 5-14.
- Chmielewski, F.-M., Müller, A. & 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.
- Defila, C. (1991): *Pflanzenphänologie der Schweiz*. Inaugural-Dissertation an der Universität Zürich.
- Defila, C. & Müller-Ferch, G. (2003): Erste Spuren der Klimaänderung in der Pflanzen- und Tierwelt. *Climate-Press* 16/Juni 2003.
<<http://www.proclim.ch/Products/ClimatePress/ClimatePress16D.pdf>> (23.11.2005).
- 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 & Schweizerische Meteorologische Gesellschaft (2003): *Klimastatement*. Homepage der DMG.
<http://www.met.fu-berlin.de/dmg/dmg_home> (10.5.2005).
- EEA – European Environment Agency (ed) (2004): *Impacts of Europe`s changing climate. An indicator-based assessment*. Denmark, Nr. 2, 1-100. <<http://www.eea.eu.int>> (24.11.2005).
- Engloner, A.I., Kovács, D., Balogh, J. & Tuba, Z. (2003): Anatomical and eco-physiological changes in leaves of couch-grass (*Elymus repens* L.), a temperate loess grassland species, after 7 years growth under elevated CO₂ concentration. *Photosynthetica* 41, 185-189.
- 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.
- Enríquez, S. & Sand-Jensen, K. (2003): Variation in light absorption properties of *Mentha aquatica* L. as a function of leaf form: implications for plant growth. *International Journal of Plant Science* 164, 125-136.
- Estiarte, M., Peñuelas, J., Kimball, B.A., Idso S.B., LaMorte, R.L., Pinter Jr, P.J., Wall, G.W. & Garcia, R.L. (1994): Elevated CO₂ effects on stomatal density of wheat and sour orange trees. *Journal of Experimental Botany* 45, 1665-1668.

- Filella, I. & Peñuelas, J. (1999): Altitudinal differences in UV absorbance, UV reflectance and related morphological traits of *Quercus ilex* and *Rhododendron ferrugineum* in the Mediterranean region. *Plant Ecology* 145, 157-165.
- Filion, M., Dutilleul, P. & Potvin, C. (2000): Optimum experimental design for free-air carbon dioxide enrichment (FACE) studies. *Global Change Biology* 6, 843-854.
- Gornik, W. & Scharrer, H. (1994): *Naturräumliche Gliederung für die Bundesrepublik Deutschland*. Offenbach/Main: DWD.
- Grünhage, L., Hertstein, U., Dämmgen, U., Schlecht-Pietsch, S., Küsters, A., Haenel, H.-D. & Jäger, H.-J. (1992): Beschreibung der Versuchsfläche, der eingesetzten Meßeinrichtungen sowie der Analyseverfahren. In: Grünhage, L. & Jäger, H.-J. (Hrsg.): *Auswirkungen luftgetragener Stoffe auf ein Grünlandökosystem - Ergebnisse siebenjähriger Ökosystemforschung - Teil I*. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 128, 33-126.
- Henniges, Y., Danzeisen, H. & Zimmermann, R.-D. (2005): Regionale Klimatrends mit Hilfe der phänologischen Uhr, dargestellt am Beispiel Rheinland-Pfalz. *UWSF-Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxologie* 17, 28-34.
- Hutchings, M.J. & Price, E.A.C. (1999): *Glechoma hederacea* L. (*Nepeta glechoma* Benth., *N. hederacea* (L.) Trev.). *Journal of Ecology* 87, 347-364.
- IPCC - Intergovernmental Panel of Climate Change (ed) (2001): *The scientific basis. Summary for policymakers and technical summary of the working group I report*. Cambridge 2001, 1-83. <<http://www.ipcc.ch>> (7.10.2005).
- Ishizaki, S., Hikosaka, K. & Hirose, T. (2003): Increase in leaf mass per area benefits plant growth at elevated CO₂ concentration. *Annales of Botany* 91, 905-914.
- Jach, M.E., Ceulemans, R. & Murray, M.B. (2001): Impacts of greenhouse gases on the phenology of forest trees. In: Karnosky, D.F., Ceulemans, R., Scarascia-Mugnozza, G.E. & Innes, J.L. (Hrsg.): *The impact of carbon dioxide and other greenhouse gases on forest ecosystems*. Wallingford: CABI Publishing, 193-235.
- 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.

- Kammann, C., Grünhage, L., Grüters, U., Janze, S. & Jäger, H.-J. (2005): Response of aboveground grassland biomass and soil moisture to moderate long-term CO₂ enrichment. *Basic and Applied Ecology* 6, 351-365.
- Klapp, E. & von Boberfeld, W.O. (1988): *Gräserbestimmungsschlüssel für die häufigsten Grünland- und Rasengräser*. Verlag Paul Parey, Berlin, Hamburg.
- Klausing, O. (1988): Die Naturräume Hessens. *Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt*, Heft Nr. 67.
- Klotz, S., Kühn, I. & Durka, W. (2002): BIOFLOR – Eine Datenbank mit biologisch-ökologischen Merkmalen zur Flora von Deutschland. *Schriftenreihe für Vegetationskunde*, Heft Nr. 38.
- Körner, C., Führer, J., Gobat, J.-M. & Nösberger, J. (1998): CO₂-Erhöhung verändert die Pflanzenwelt. *Climate-Press* 3/Nov. 1998.
<<http://www.proclim.ch/Press/ClimatePress03D.html>> (23.9.2005).
- Linke, R.B., Bolhär-Nordenkampf, H.R. & Meister, M.H. (2005): Kulturpflanzen im Klimawandel - Einfluss erhöhter CO₂-Konzentration und Temperatur (+3 °C) auf Photosynthese und Wasserhaushalt von *Triticum durum* L. *Ländlicher Raum*, Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich, 1-12. < http://gpool.lfrz.at/dev/cgi-bin/bizzhoo2/main.cgi?catid=14531&rq=cat&tfqs=catt&catt=_main> (2.11.2005).
- Madsen, E. (1973): Effect of CO₂-concentration on the morphological, histological and cytological changes in tomato plants. *Acta Agriculturae Scandinavica* 23, 241-246.
- Marchi, S., Tognetti, R., Vaccari, F.P., Lanini, M., Kaligarič, M., Miglietta, F. & Raschi, A. (2004): Physiological and morphological responses of grassland species to elevated atmospheric CO₂ concentrations in FACE-systems and natural CO₂ springs. *Functional Plant Biology* 31, 181-194.
- Menzel, A. (2002): Phenology: Its importance to the global change community. *Climatic Change* 54, 379-385.
- Menzel, A. (2003a): 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. (2003b): Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change* 57, 243-263.

- Menzel, A., Estrella, N. and Fabian, P. (2001): Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology* 7, 657-666.
- Menzel, A. & Fabian, P. (1999): Growing season extended in Europe. *Nature* 397, 659.
- Miglietta, F., Magliulo, V., Bindi, M., Cerio, L., Vaccari, F.P., Loduca, V. & Peressotti, A. (1998): Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.): development, growth and yield. *Global Change Biology* 4, 163-172.
- Norby, R.J., Hartz-Rubin, J.S. & Verbrugge, M.J. (2003): Phenological responses in maple to experimental atmospheric warming and CO₂ enrichment. *Global Change Biology* 9, 1792-1801.
- Nowak, R.S., Ellsworth, D.S. & Smith, S.D. (2004): Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂ – do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytologist* 162, 253-280.
- Parmesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill, J.K., Thomas, C.D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, W.J., Thomas, J.A. & Warren, M. (1999): Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature* 399, 579-583.
- Pritchard, S.G., Rogers, H.H., Prior, S.A. & Peterson, C.M. (1999): Elevated CO₂ and plant structure: a review. *Global Change Biology* 5, 807-837.
- Radolgov, K.M. & Jarvis, P.G. (1990a): Effects of CO₂ enrichment on four poplar clones. I. Growth and leaf anatomy. *Annales of Botany* 65, 617-626.
- Radolgov, K.M. & Jarvis, P.G. (1990b): Effects of CO₂ enrichment on four poplar clones. II. Leaf surface properties. *Annales of Botany* 65, 627-632.
- Rapp, J. & Schönwiese, C.-D. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B Meteorologie und Geophysik, Band 5*.
- Reid, C.D., Maherali, H., Johnson, H.B., Smith, S.D., Wullschleger, S.D. & Jackson, R.B. (2003): On the relationship between stomatal characters and atmospheric CO₂. *Geophysical Research Letters* 30, HLS1-1-HLS1-4.

- Rodwell, J.S., Pigott, C.D., Ratcliffe, D.A., Malloch, A.J., Birks, H.J.B., Proctor, M.C.F., Shimwell, D.W., Huntley, J.P., Radford, E., Wigginton, M.J. & Wilkins, P. (1992): *British plant communities. Volume 3: Grasslands and montane communities*. Cambridge: University Press.
- Rogers, H.H., Thomas, J.F. & Bingham, G.E. (1983): Response of agronomic and forest species to elevated atmospheric carbon dioxide. *Science* 220, 428-429.
- Royer, D.L. (2001): Stomatal density and stomatal index as indicators of paleoatmospheric CO₂ concentration. *Review of Palaeobotany and Palynology* 114, 1-28.
- Runge, K. & Schönwiese, C.-D. (1986): Statistik phänologischer Zeitreihen Europas. Einige Charakteristika und klimatologische Zusammenhänge. *Arboreta Phaenologica* 31, 51-60.
- Rusterholz, H.P. & Erhardt, A. (1998): Effects of elevated CO₂ on flowering phenology and nectar production of nectar plants important for butterflies of calcareous grasslands. *Oecologia* 113, 341-349.
- Sachs, L. (1974): *Angewandte Statistik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.) (2005): *Klimawandel in Sachsen. Sachstand und Ausblick*.
<http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/document/Klimawandel_ges.pdf> (14.11.2005).
- Schmeil, O. & Fitschen, J. (1996): *Flora von Deutschland und angrenzender Länder: ein Buch zum Bestimmen der wildwachsenden und häufig kultivierten Gefäßpflanzen*. 90. Aufl., Quelle & Meyer Verlag, Wiesbaden.
- Schnelle, F. (1955): *Pflanzen-Phänologie*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Porting K.-G., Leipzig.
- Schönwiese, C.-D., Staeger, T., Steiner, H. & Brinckmann, S. (2005): *Analyse der Klimaveränderungen in Hessen für den Zeitraum 1901 bis 2003. Vorläufiger Kurzbericht zu den Analyseergebnissen*. Institut für Atmosphäre und Umwelt. Universität Frankfurt/Main.
- Schulte aufm Erley, G., Rademacher, I. & Kühbauch, W. (2001): Die Blattanatomie eines schnell und eines langsam wachsenden Grases in Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung. *Journal of Agronomy & Crop Science* 187, 231-239.

- Schumacher, R. (1989): *Die Fruchtbarkeit der Obstgehölze: Ertragsregulierung und Qualitätsverbesserung*. Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart.
- Thomas, J.F. & Harvey, C.N. (1983): Leaf anatomy of four species grown under continuous CO₂ enrichment. *Botanical Gazette* 144, 303-309.
- Tuba, Z., Szente, K. & Koch, J. (1994): Response of photosynthesis, stomatal conductance, water use efficiency and production to long-term elevated CO₂ in winter wheat. *Journal of Plant Physiology* 144, 661-668.
- van Vliet, A.J.H., de Groot, R.S., Bellens, Y., Braun, P., Bruegger, R., Bruns, E., Clevers, J., Estreguil, C., Flechsig, M., Jeanneret, F., Maggi, M., Martens, P., Menne, B., Menzel, A. & Sparks, T. (2003): The european phenology network. *International Journal of Biometeorology* 47, 202-212.
- Wagner, J., Lüscher, A., Hillebrand, C., Kobald, B., Spitaler, N. & Larcher, W. (2001): Sexual reproduction of *Lolium perenne* L. and *Trifolium repens* L. under free air CO₂ enrichment (FACE) at two levels of nitrogen application. *Plant, Cell and Environment* 24, 957-965.
- Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O. & Bairlein, F. (2002): Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 389-395.
- Woodward, F.I. & Bazzaz, F.A. (1988): The responses of stomatal density to CO₂ partial pressure. *Journal of Experimental Botany* 39, 1771-1781.
- Woodward, F.I. & Kelly, C.K. (1995): The influence of CO₂ concentration on stomatal density. *New Phytologist* 131, 311-327.
- Woodward, F.I., Lake, J.A. & Quick, W.P. (2002): Stomatal development and CO₂: ecological consequences. *New Phytologist* 153, 477-484.

Quellen im Internet

<http://www.dwd.de> (5.4.2005)

http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/slides/index.htm (5.11.2005)

<http://www.mai.liu.se/~cllib/welcome/PMKtest.html> (20.9.2004)

<http://www.uni-giessen.de/~gf1034/Pflanzenphaenologie/Stationsauswahl.pdf> (10.8.2005)

7 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Naturräumliche Gliederung 3. Ordnung in Hessen (Nomenklatur nach Klausling 1988) und Anzahl der ausgewerteten Stationen der jeweiligen Haupteinheitengruppe	10
Tab. 2: Zeigerpflanzen der zehn "phänologischen Jahreszeiten" (vgl. www.dwd.de).....	11
Tab. 3: In der Untersuchung berücksichtigte Arten	16
Tab. 4: Auswahlkriterien der Arten zur Untersuchung der Wirkung von erhöhten CO ₂ -Konzentrationen auf die Stomatadichte, den Stomatawiderstand für Wasserdampf, die Blattdichte, die Blattdicke und den LMA.....	16
Tab. 5: Anzahl, Seite und Alter der Blätter der ausgewählten Arten zur Bestimmung der Stomatadichte	18
Tab. 6: Anzahl, Seite und Alter der Blätter der ausgewählten Arten zur Bestimmung des Stomatawiderstandes für Wasserdampf	22
Tab. 7: Mittlere Eintrittstage der phänologischen Phasen in Hessen und ihr Trend pro Dekade im Zeitraum 1951-2000 zur Charakterisierung des Beginns der Hauptjahreszeiten	28
Tab. 8: Eintrittsdatum der Blattverfärbung der Stiel-Eiche im Zeitraum 1961-1990 und 1991-2000 in den verschiedenen Haupteinheitengruppen Hessens	30
Tab. 9: Beginn der "phänologischen Jahreszeit" für Hessen gemittelt für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2000	31
Tab. 10: Beginn der "phänologischen Jahreszeit" für das Hessisch-Fränkische Bergland gemittelt für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2000	33
Tab. 11: Beginn der "phänologischen Jahreszeit" für das Bergisch-Sauerländische Gebirge gemittelt für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2000	34
Tab. 12: Beginn der "phänologischen Jahreszeit" für das Gießen-Koblenzer-Lahntal gemittelt für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2000	35
Tab. 13: Anzahl der Frosttage in den Monaten Januar bis Mai im Zeitraum 1961-2000 und 2041-2050 in Gießen.....	38
Tab. 14: Beobachtete und modellierte Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1961-1990 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal).....	44
Tab. 15: Beobachtete und modellierte Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1991-2000 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal).....	45
Tab. 16: Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1961-1990 und 1991-2000 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)	46
Tab. 17: Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1991-2000 (beobachtet) und 2041-2050 (modelliert) für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal).....	47
Tab. 18: Blühbeginn verschiedener Obstgehölze und Beerensträucher im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal).....	48

Tab. 19: Gefahr von Spätfrost ($T_{\min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) bei verschiedenen Obstgehölzen und Beerensträuchern im Zeitraum zwischen Blühbeginn und zehn Tagen danach im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)	49
Tab. 20: Gefahr von Spätfrost unterschiedlicher Stärke bei verschiedenen Obstgehölzen und Beerensträuchern im Zeitraum zwischen Blühbeginn und zehn Tagen danach im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)	50
Tab. 21: Stomatadichte [Anzahl mm^{-2}] für ausgewählte Arten unter erhöhten $[\text{CO}_2]$ (E) und aktuellen $[\text{CO}_2]$ (A)	55
Tab. 22: Stomatadichte [Anzahl mm^{-2}] von <i>Glechoma hederacea</i> unter erhöhten $[\text{CO}_2]$ (E) und aktuellen $[\text{CO}_2]$ (A)	56
Tab. 23: Blattdicke [μm] für ausgewählten Arten unter erhöhten $[\text{CO}_2]$ (E) und aktuellen $[\text{CO}_2]$ (A)	59
Tab. 24: Blattdichte [g cm^{-3}] für ausgewählte Arten unter erhöhten $[\text{CO}_2]$ (E) und aktuellen $[\text{CO}_2]$ (A)	59
Tab. 25: LMA [g cm^{-2}] für ausgewählte Arten unter erhöhten $[\text{CO}_2]$ (E) und aktuellen $[\text{CO}_2]$ (A)	60
Tab. 26: Stomatawiderstand für Wasserdampf [s cm^{-1}] unter erhöhten $[\text{CO}_2]$ (E) und aktuellen $[\text{CO}_2]$ (A)	62
Tab. 27: Eintritt des Blühbeginns der untersuchten Arten in den Jahren 2004 und 2005 unter erhöhten $[\text{CO}_2]$ im Vergleich zu aktuellen $[\text{CO}_2]$	69
Tab. 28: Reaktion im Stomatawiderstand für Wasserdampf und in der Stomatadichte der untersuchten Pflanzenarten auf erhöhte $[\text{CO}_2]$	70
Tab. 29: Reaktion im LMA, in der Blattdicke und in der Blattfläche der untersuchten Pflanzenarten auf erhöhte $[\text{CO}_2]$	72

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Änderung der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration in den letzten 1000 Jahren	1
Abb. 2: Schwankungen der mittleren Erdoberflächentemperatur auf der Nordhemisphäre in den letzten 1000 Jahren	2
Abb. 3: CO ₂ -Emissionen (a) und Projektionen der CO ₂ -Konzentration (b) der sechs SRES-Szenarien und des SAR-Szenarios IS92a im 21. Jahrhundert.....	4
Abb. 4: Anstieg der globalen Erdoberflächenmitteltemperatur als Reaktion auf verschiedene Szenarien von Treibhausgas- und anderen vom Menschen verursachten Emissionen.....	4
Abb. 5: Lage der berücksichtigten phänologischen Beobachtungsstationen in Hessen.....	8
Abb. 6: Karte der naturräumlichen Gliederung Hessens	9
Abb. 7: Bestimmung der Basistemperatur für den Blühbeginn des Schwarzen Holunders...	13
Abb. 8: Gießener Freiland-CO ₂ -Anreicherungsexperiment (FACE = Free Air CO ₂ Enrichment)	15
Abb. 9: Okular- und Objektträgerskala bei 100facher Vergrößerung.....	20
Abb. 10: Mittlere Eintrittstage der phänologischen Phasen in Hessen im Zeitraum 1951-2003 zur Charakterisierung des Beginns der Hauptjahreszeiten	29
Abb. 11: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für Hessen	31
Abb. 12: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 14 - Hessisch-Fränkisches Bergland	32
Abb. 13: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 33 - Bergisch-Sauerländisches Gebirge	33
Abb. 14: Vollständige doppelte phänologische Uhr (links) und vereinfachte doppelte phänologische Uhr (rechts) für die Naturraumgruppe 31 - Gießen-Koblener-Lahntal.....	34
Abb. 15: Zeitliche Verschiebung der Vegetationsperiode in Hessen (Vergleich der Zeiträume 1961-1990 mit 1991-2000)	36
Abb. 16: Jahresmittel der Lufttemperatur in 2 m über Grund im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen.....	37
Abb. 17: Anzahl der Frosttage ($T_{\min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen	37
Abb. 18: Anzahl der Eistage ($T_{\max} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen	38
Abb. 19: Anzahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen.....	39

Abb. 20: Anzahl der heißen Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen	39
Abb. 21: Beginn der thermischen Vegetationsperiode im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen	40
Abb. 22: Ende der thermischen Vegetationsperiode im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen	40
Abb. 23: Länge der thermischen Vegetationsperiode im Zeitraum 1961-2000 (gemessen) und 2041-2050 (modelliert) in Gießen	41
Abb. 24: Beobachteter und mittels Temperatursummenmodell abgeschätzter Blühbeginn der Haselnuss im Zeitraum 1961-2000 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)	42
Abb. 25: Beobachteter und mittels Temperatursummenmodell abgeschätzter Blühbeginn des Schwarzen Holunders im Zeitraum 1961-2000 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)	42
Abb. 26: Beobachteter und mittels Regressionsmodell abgeschätzter Beginn der Fruchtreife des Schwarzen Holunders im Zeitraum 1961-2000 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)	43
Abb. 27: Beobachteter und mittels Regressionsmodell abgeschätzter Beginn der Blattverfärbung der Stiel-Eiche im Zeitraum 1961-2000 im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)	44
Abb. 28: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr mit beobachteten und modellierten Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1961-1990 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)	45
Abb. 29: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr mit beobachteten und modellierten Eintrittsdaten der Phänophasen im Zeitraum 1991-2000 für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)	46
Abb. 30: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr im Zeitraum 1961-2000 (beobachtet) für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal)	47
Abb. 31: Vereinfachte doppelte phänologische Uhr im Zeitraum 1991-2000 (beobachtet) und 2041-2050 (modelliert) für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) ..	48
Abb. 32: Beginn der Blüte verschiedener Arten im Jahr 2004	51
Abb. 33: Beginn der Blüte verschiedener Arten im Jahr 2005	52
Abb. 34: Verlauf der Tagesmitteltemperaturen vom 50. bis zum 150. Tag im Jahr in 2 m Höhe, gemessen von der meteorologischen Station Linden	53
Abb. 35: Stomata von <i>Arrhenatherum elatius</i> (Poaceen-Typus, A) und <i>Glechoma hederacea</i> (Helleborus-Typus, B)	54
Abb. 36: Stomatadichte [Anzahl mm^{-2}] von <i>Arrhenatherum elatius</i> und <i>Poa pratensis</i> unter aktuellen $[\text{CO}_2]$ und erhöhten $[\text{CO}_2]$	55
Abb. 37: Stomatadichte [Anzahl mm^{-2}] von <i>Glechoma hederacea</i> unter aktuellen $[\text{CO}_2]$ und erhöhten $[\text{CO}_2]$	56

Abb. 38: Anzahl der Stomata pro $0,5535 \text{ mm}^2$ auf der Blattunterseite von <i>Glechoma hederacea</i> unter "feuchten" Bodenverhältnissen.....	57
Abb. 39: Anzahl der Stomata pro $0,5535 \text{ mm}^2$ auf der Blattunterseite von <i>Glechoma hederacea</i> unter "relativ trockenen" Bodenverhältnissen	58
Abb. 40: Mittlerer Stomatawiderstand für Wasserdampf [s cm^{-1}] von <i>Glechoma hederacea</i> <i>Arrhenatherum elatius</i> unter aktuellen [CO_2] und erhöhten [CO_2].....	61

9 Anhang

Inhalt des beiliegenden Datenträgers

Ordner: Klimawandel und Pflanzenphänologie

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 (Mittelwerte und ihre Signifikanz in Hessen sowie Mittelwerte, 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 - Zeigerpflanzen - Entwicklung phänologischer Phasen"

mit Graphiken und Tabellen zum Beginn der phänologischen Phasen aller untersuchten Zeigerpflanzen in Hessen

4. Arbeitsmappe: "4 - Phänologische Uhren"

mit den phänologischen Uhren der ausgewerteten Haupteinheitengruppen Hessens

Ordner: Gießener Freiland-CO₂-Anreicherungsexperiment

1. Arbeitsmappe: "5 - Wuchsort der Pflanzen"

mit Angaben zum Standort der untersuchten Pflanzen im Gießener Freiland-CO₂-Anreicherungsexperiment

2. Arbeitsmappe: "6 - Stomatadichte"

mit Fotos von Negativabdrücken der Blätter der untersuchten Gräser und Kräuter im Gießener Freiland-CO₂-Anreicherungsexperiment

Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. H.-J. Jäger für die Überlassung des Themas, die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes und die hilfreichen Anregungen danken.

Dem Deutschen Wetterdienst danke ich für die Bereitstellung der phänologischen Daten und der Klimadaten der Jahre 1961-2000 von Hessen.

Ich danke dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) für die Bereitstellung der von der Firma Meteo Research prognostizierten Klimadaten für den Zeitraum von 2041 bis 2050.

Großer Dank gilt Dr. Claudia Kammann für die Hinweise zur statistischen Auswertung.

Meiner Schwester Franziska danke ich für die wertvollen Tipps und das Korrekturlesen meiner Diplomarbeit.

Ute Hänsch danke ich für die vielen hilfreichen Gespräche und für das aufmerksame Korrekturlesen der Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Pflanzenökologie, insbesondere bei Birte Lenz für die freundliche und hilfreiche Unterstützung während meiner Arbeit bedanken.

Bedanken möchte ich mich bei Alice Borth, Ute Hänsch, Henriette Dahms, Grit Rasch und Sonja Leidenberger für die schöne Zeit meines Studiums in Gießen.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern für die außerordentliche Unterstützung während meines gesamten Studiums und darüber hinaus.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Anita Streitfert, geboren am 01.06.1981 in Kronstadt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen Quellen benutzt habe und die Stellen, die in anderen Werken im Wortlaut oder im Sinne nach entnommen sind mit Quellenangaben kenntlich gemacht habe.

Linden, den 30.11.2005 Anita Streitfert

Ort, Datum, Unterschrift