



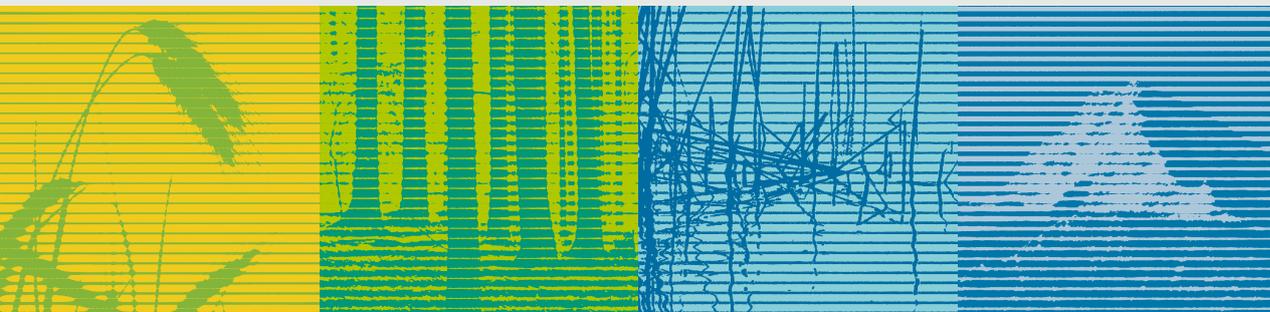
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft, Forschung und Kunst

Klimaforschung in Bayern

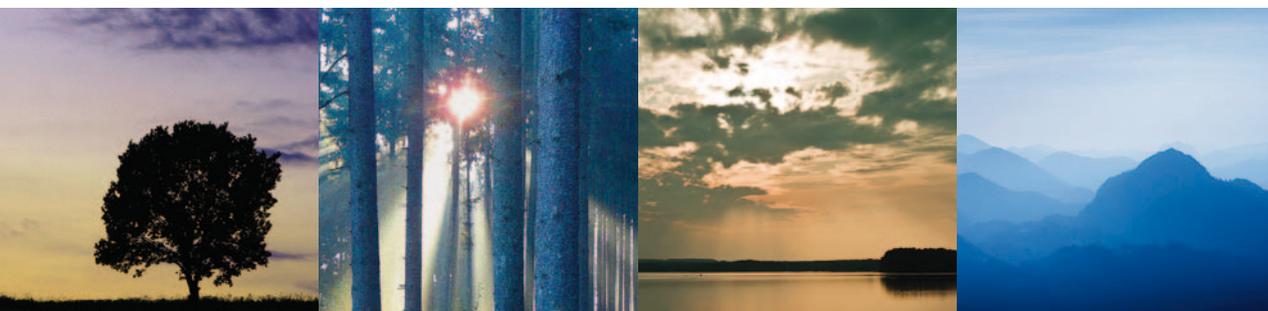
Ergebnisse des Forschungs- verbundes FORKAST



Auswirkungen des Klimas auf Ökosysteme und
klimatische Anpassungsstrategien

Universität Bayreuth
Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

www.klima.bayern.de



Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München (StMUG)

Internet: www.stmug.bayern.de
E-Mail: poststelle@stmug.bayern.de
Gestaltung: Worm und Linke, München
Druck: ulenspiegel druck, Andechs

Bildnachweis: Andreas Linke (Illustrationen Titelseite, S. 29 und U2/U4).;
istockphoto.com: Richard Schmidt-Zuper (S. 9 und U2/U4), Andy Nowack (S. 23),
xyno (S. 49 und U2/U4), mediaphotos (S. 66), Izzet Noyan Yilmaz (S. 67);
fotolia.com: Ewald Fröch (S. 43 und U2/U4);
Alle anderen Bilder: Bildrechte, falls nicht anders angegeben,
bei den teilnehmenden Institutionen.

Stand: April 2013

© StMUG, alle Rechte vorbehalten

Klimaneutral gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier

Klimaforschung in Bayern

Ergebnisse des Forschungs- verbundes FORKAST

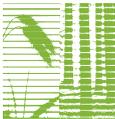
Auswirkungen des Klimas auf Ökosysteme und
klimatische Anpassungsstrategien

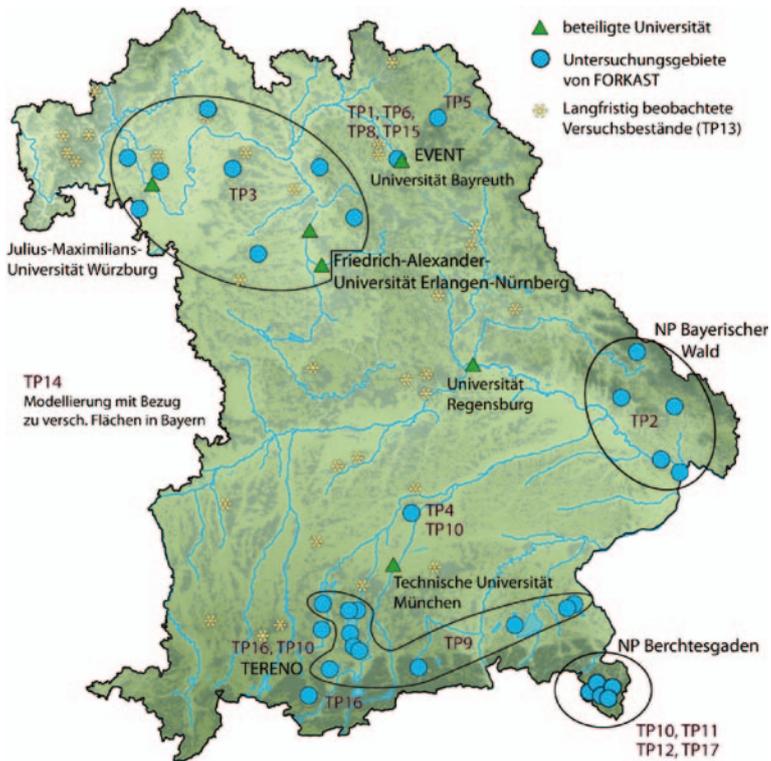
Universität Bayreuth

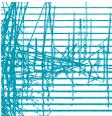
Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

Inhalt

		Editorial	6	
		Einleitung	7	
FORKAST Teilprojekte				
Grünland		FORKAST Teilprojekt 4	Wie wirkt der Klimawandel auf Moore? Reaktion von Ökosystemfunktionen in Grundwassermooren auf Temperaturerhöhung und Wasserstandsanhhebung <i>Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Vegetationsökologie</i>	11
		FORKAST Teilprojekt 5	Extensiv genutzte Wiesen als Kohlenstoffspeicher Ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz <i>Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie</i>	13
		FORKAST Teilprojekt 6	Pflanzen oder Mikroorganismen – Wer gewinnt das Rennen um Nährstoffe bei extremer Trockenheit? <i>Universität Bayreuth, Lehrstuhl Bodenphysik</i>	15
		FORKAST Teilprojekt 8	Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf Funktionen eines Ökosystems in experimentellen und natürlichen Pflanzengemeinschaften <i>Universität Bayreuth, Störungsökologie</i>	17
		FORKAST Teilprojekt 15	Auswirkungen von extremen Witterungsereignissen auf Ökosystemdienstleistungen von Böden Unsichtbar und doch wichtig – wie reagiert die Bodenmikroflora auf extreme Trockenheit? <i>Technische Universität München, Lehrstuhl für Bodenökologie und Abteilung für Umweltgenomik</i>	19
Grünland/ Wald		FORKAST Teilprojekt 1	Innerartliche Unterschiede in der Reaktion auf Klimaextreme und ihre Bedeutung zur Anpassung an ungewollte Folgen des Klimawandels <i>Universität Bayreuth, Lehrstuhl Biogeografie</i>	25
Wald		FORKAST Teilprojekt 2	Artenwandel im Höhengradienten als Modell für Veränderungen der Biodiversität im Klimawandel Naturwaldreservate liefern Hinweise auf die zukünftige Waldentwicklung <i>Technische Universität München, Fachgebiet Geobotanik</i>	31
		FORKAST Teilprojekt 3	Auswirkungen extremer Dürrejahre auf Waldökosysteme in Nordbayern Reaktionen von Rotbuche und Traubeneiche auf Trockenstress <i>Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Physische Geographie</i>	35
		FORKAST Teilprojekt 13	Wie Dürre-resistent sind Bayerns Wälder? Wie Forschung die Reaktion von Wäldern auf Dürre misst und Empfehlungen für die Praxis ableitet <i>Technische Universität München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde</i>	37



	FORKAST Teilprojekt 14	Waldentwicklung im Klimawandel	39
		Modellierung als wertvolle Grundlage für Prognosen und Handlungsempfehlungen <i>Universität Bayreuth, Juniorprofessur Biogeographische Modellierung</i>	
Gewässer	 FORKAST Teilprojekt 9	Klimawandel begünstigt invasive Wasserpflanzen	45
		Schmalblättrige Wasserpest (<i>Elodea nuttallii</i>), Nixkraut (<i>Najas marina</i>) und Wasserpflanzen aus wärmeren Regionen breiten sich in bayerischen Seen aus <i>Technische Universität München, Limnologie</i>	
Gebirge	 FORKAST Teilprojekt 10	Dem Klimawandel auf der Spur	51
		Wie manipulative Experimente und phänologische Aufzeichnungen den Klimawandel aufzeigen <i>Technische Universität München, Fachgebiet für Ökoklimatologie</i>	
	FORKAST Teilprojekt 11	Bestäuber und Blüten im Klimawandel	55
		Gefährdung von Interaktionen zwischen Arten durch jahreszeitliche Verschiebungen <i>Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie</i>	
	FORKAST Teilprojekt 12	Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der alpinen Stufe	57
		eine funktionelle Analyse <i>Universität Regensburg, Lehrstuhl Botanik</i>	
	FORKAST Teilprojekt 16	Auswirkung des Klimawandels auf die Treibhausgasflüsse in alpinem Grünland	59
		Ein Freilandexperiment im Ammer Einzugsgebiet <i>Technische Universität München, Lehrstuhl für Atmosphärische Umweltforschung, Lehrstuhl für Bodenkunde und Institute of Meteorology and Climate Research - Atmospheric Environmental Research (KIT IMK-IFU)</i>	
	FORKAST Teilprojekt 17	Klimawandel gefährdet alpine Artenvielfalt	61
		Auswirkungen von Klimaerwärmung und klimatischen Extremereignissen auf Pflanzen, Insekten und ökologische Wechselbeziehungen <i>Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie</i>	
Anhang		Strategien zur Anpassung an den Klimawandel	66
		Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsverbundes FORKAST	
		Beteiligte Institutionen	69
		Glossar	70

Editorial

Die Anpassung an die unvermeidlichen Folgen des anthropogenen Klimawandels ist eine Aufgabe von gesellschaftlicher Dimension. Frühzeitige Weichenstellungen und weitsichtige Entscheidungen sind gefordert. Insbesondere indirekte ökologische Konsequenzen des Klimawandels wie z. B. biologische Wechselwirkungen sind derzeit nur bedingt abzuschätzen. Gerade diese sind aber für den Menschen entscheidend. Es muss für Bayerns landschaftsprägende Ökosysteme wie Wälder, Grasland, Moore und Gewässer deshalb erforscht werden, ob deren natürlicher Bestand und damit auch deren Ökosystemdienstleistungen in Zeiten des Klimawandels gewährleistet bleiben oder ob Handlungsempfehlungen für Anpassungsmaßnahmen notwendig sind.

Die Komplexität der Materie erfordert dabei eine Verknüpfung verschiedener Ansätze. Neben der Analyse historischer Entwicklungen und der Etablierung eines effizienten und langfristigen Monitorings werden realitätsnahe Modelle benötigt, welche einen Einblick in die möglichen zukünftigen ökologischen Abläufe und Reaktionen vermitteln. Um tragfähige Aussagen treffen zu können, müssen Modelle durch gezielte Experimente ergänzt werden, in welchen sich als vernünftig darstellende, aber nicht bewiesene Hypothesen getestet werden können. Diese Verknüpfung gelang im bayerischen Forschungsverbund FORKAST („Auswirkungen des Klimas auf Ökosysteme und klimatische Anpassungsstrategien“).

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Ergebnisse des Forschungsverbundes vorgestellt. Der Verbund ist in seiner Art bislang einzigartig, nicht nur bezüglich der disziplinären Breite, sondern auch auf Grund seiner Fokussierung auf die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis. Es können konkrete Anpassungsstrategien erarbeitet werden und Aussagen zur Zukunft bayerischer Ökosysteme und deren Pflanzen und Tierarten getroffen werden. Es ist ein Beitrag von FORKAST, dass diese Zukunft möglichst effizient und ressourcenschonend gestaltet werden kann. Der Erhalt der Biodiversität und des Funktionierens von Ökosystemen spielt hierbei eine zentrale Rolle.

Im Zuge der Zusammenarbeit mit den Bayerischen Staatsministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst (StMWFK), für Umwelt und Gesundheit (StMUG) sowie für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) ist es uns nun eine große Freude, Ihnen mit dieser Broschüre unsere Erkenntnisse und Anregungen vorzulegen.

Ihre

**Prof. Dr. Carl Beierkuhnlein,
Dr. Camilla Wellstein
und Andreas Gohlke**
(Koordination FORKAST)

Auswirkungen des Klimas auf Ökosysteme und klimatische Anpassungsstrategien

Forschungsverbund FORKAST – Ergebnisse aus dreieinhalb Jahren interdisziplinärer Klimafolgenforschung

Camilla Wellstein, Andreas Gohlke, Carl Beierkuhnlein
Leitung und Koordination FORKAST, Universität Bayreuth

Wälder, Graslandschaften und Seen bedecken einen Großteil Bayerns und spielen wirtschaftlich eine bedeutende Rolle für den Freistaat. Talräume, Mittelgebirge und die Alpen verkörpern großflächig relevante Landschaftsräume in Bayern. Um Klimafolgen für diese Ökosysteme und Landschaften besser einschätzen zu können, rief das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst 2009 den Bayerischen Forschungsverbund FORKAST ins Leben. Fachlich involviert waren das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit sowie das Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten mit den zugehörigen Fachoberbehörden, dem Bayerischen Landesamt für Umwelt und der Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft. Zum Ende seiner Laufzeit legt der Verbund in dieser Broschüre Ergebnisse seiner Arbeit vor und gibt Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger in Politik und Verwaltung, Verantwortliche in Nationalparks und Naturparks, Landschaftspflegeverbänden, Naturschutzverbände, Privatpersonen sowie für die interessierte Öffentlichkeit.

FORKAST setzte sich mit einer gemeinschaftlichen, interdisziplinären und institutsübergreifenden Strategie für die Verbesserung des ökologischen Verständnisses zum Klimawandel ein. Dreieinhalb Jahre untersuchten 60 Wissenschaftler die Belastbarkeit, Resilienz und Anpassungsfähigkeit von Organismen, Ökosystemen und funktionellen Prozessen unter Klimaveränderungen. Der große Vorteil des Verbundes FORKAST liegt in der fachübergreifenden Bearbeitung komplexer Systeme und Probleme. Nur in einem interdisziplinären Verbund können Antworten auf derartige Fragestellungen und Herausforderungen gefunden werden. Ergebnisse aus

unserer Klimawandelforschung brachten teils positive, aber auch negative Überraschungen mit sich. Entscheidend für den Erfolg war auch die enge Zusammenarbeit zwischen der Gesamt-Koordination und den Teilprojekten. Mit der wissenschaftlichen Arbeit entwickelte sich eine Netzwerk-Struktur bayerischer Kompetenzen in der Ökosystemforschung, auf die in der Zukunft zurückgegriffen werden kann. Neben einzelnen Detailfragestellungen gewann der Forschungsverbund übertragbare und allgemeine Erkenntnisse zum Verhalten wichtiger Ökosystemfunktionen und Prozesse:

- Biomasseproduktion in Land- und Forstwirtschaft
- Haushalt von Treibhausgasen
- Biologische Vielfalt
- Reaktionen invasiver Arten

Aus den gewonnenen Forschungsergebnissen können sinnvolle und tragfähige Anpassungsstrategien für verschiedene Gesellschaftsbereiche abgeleitet werden. Diese finden Sie zusammengefasst im letzten Kapitel der Broschüre. Darüber hinaus haben sie dazu beigetragen, auch in der nationalen und internationalen Klimaforschung entscheidende Schritte voranzubringen.

Die biologische Vielfalt aus der Vergangenheit ist eine Risikoversicherung für heute und morgen. Die Erhaltung der Vielfalt heute und morgen ist eine Risikoversicherung für eine Zukunft mit unbekanntem Wandel.



FORCAST Teilprojekte 4|5|6|8|15

Grünland



▲
Klimawirksamkeit von Niedermoorgrasland –
Untersuchungsvarianten im Freisinger Moos
(Foto: M. Drösler)

FORKAST Teilprojekt 4	Wie wirkt der Klimawandel auf Moore?
Forschungseinrichtung	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Vegetationsökologie
Ansprechpartner	Prof. Dr. Matthias Drösler
E-Mail	matthias.droesler@hswt.de
Bearbeiter/Autoren	Matthias Drösler und Jan Heinichen



Wie wirkt der Klimawandel auf Moore?

Reaktion von Ökosystemfunktionen in Grundwassermooren auf Temperaturerhöhung und Wasserstandsanhhebung

Prognosen für den Klimawandel in Bayern gehen von einer Temperaturerhöhung von mindestens 1,0 Grad Celsius Mitteltemperatur bis Mitte des Jahrhunderts aus. Es wurde untersucht, wie sich experimentell erhöhte Temperaturen auf die Ökosystemfunktionen eines Grundwassermoors auswirken und ob eine Wasserstandsanhhebung als Anpassungsmaßnahme gegen den Klimawandel geeignet ist.

Was haben Moore mit dem Klima zu tun?

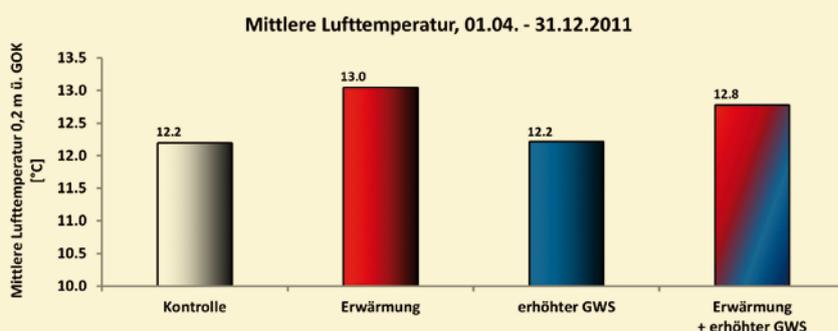
Das Funktionsprinzip von Mooren ist die Kohlenstoff-Bindung. Der Kohlenstoffspeicher (Torf-Boden) bildet sich aus, weil durch den natürlicherweise hohen Wasserstand nahe der Bodenoberfläche der Abbau der organischen Substanz gehemmt ist. Unter ungestörten Bedingungen ist hier eine Vegetation ausgebildet, die hohe Wasserstände toleriert. Das Ökosystem Moor kann kontinuierlich und dauerhaft Kohlenstoff in deutlichen Mengen aufnehmen. In Bayern sind nach aktuellen Erhebungen ca. 200.000 Hektar (ha) organischer Boden vorhanden. Nach eigenen Abschätzungen sind darin mindestens 100 Mio. Tonnen Kohlenstoff gebunden. Damit führte die Photosynthese der Moorvegetation, gepaart mit dem geringen Abbau der organischen Substanz, zu einer erheblichen Kohlenstoffsенке in bayerischen Böden.

Durch Entwässerung und Landnutzung werden die Stoffflüsse dieser organischen Böden umgedreht: Der Abbau der organischen Substanz erfolgt wegen der Durchlüftung des Bodens schneller als die Einbindung über die Photosynthese. Dadurch wird aus der Kohlenstoffsенке eine erhebliche Kohlenstoffquelle. Ein Hektar eines entwässerten und als intensiv bewirtschaftetes Grünland genutzten Moores emittiert im Mittel ca. 35 t \rightarrow CO₂-Äquivalente pro Jahr, während für die natur-

nahen Moor-Flächen klimaneutrales Verhalten (d. h. Aufnahme und Abgabe klimarelevanter Spurengase stehen im Gleichgewicht) nachgewiesen wurde (Drösler et al. 2012). Hochrechnungen für Deutschland kommen zu Emissionen von 45 Mio. t CO₂-Äquivalenten pro Jahr (UBA 2010) aus den organischen Böden. Die entwässerten Moore sind damit eine Hauptquelle der Klimabelastung und liegen in der Größenordnung des bundesdeutschen Flugverkehrs.

Wie wirkt der Klimawandel auf die Ökosystemfunktionen der Moore?

Ein bestimmender Faktor für die Abbaugeschwindigkeit der organischen Substanz im Boden ist die Temperatur: Je höher die Temperatur, desto effizienter können die Mikroorganismen im Boden die organische Substanz abbauen und damit CO₂ freisetzen. Je tiefer ein Moorstandort entwässert ist, desto mehr durchlüftetes Bodenvolumen steht für die Beschleunigung der Abbauraten zur Verfügung. Dadurch besteht die Gefahr, dass die Emissionen aus den Mooren mit dem Klimawandel noch weiter steigen und die Kohlenstoffspeicher noch schneller abgebaut werden. Um die Rolle der beiden Faktoren, Temperaturerhöhung und Wasserstandsanhhebung, in Bezug zu den Ökosystemfunktionen (Austausch klimarelevanter Spurengase, wie z. B.



◀ Abbildung 1
Mittlere Lufttemperatur im Betrachtungszeitraum auf den verschiedenen Varianten

Abbildung 2 ►
Mittlerer Grundwasserstand
auf den verschiedenen Varianten

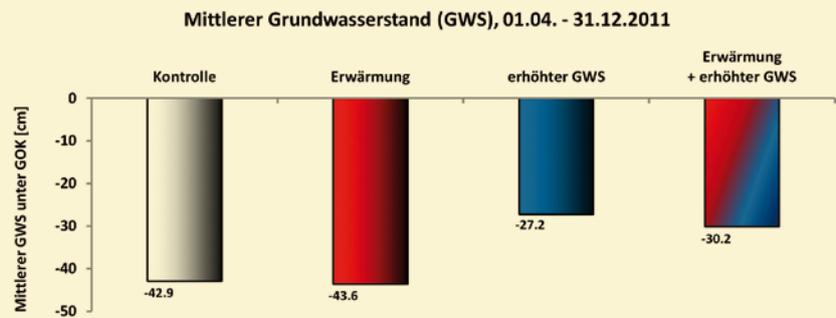
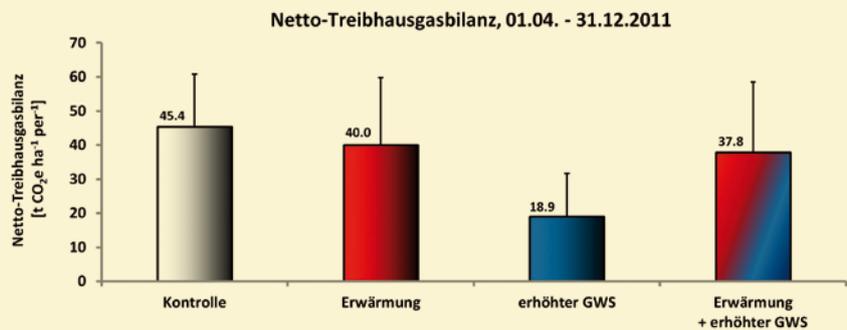


Abbildung 3 ►
Klimawirksamkeit
(Kohlendioxid + Methan*21 + Lachgas*310)
in Tonnen CO₂-Äquivalente.



Kohlendioxid [CO₂], Methan [CH₄] und Lachgas [N₂O])
→ Produktivität und Biodiversität herauszufinden, wurde ein Experiment im Freisinger Moos (Niedermoor-Gebiet) durchgeführt.

Untersuchungsansatz und Hypothesen

Auf einer Grünland-Fläche wurden drei Untersuchungs-Varianten angelegt: eine Erwärmungs-Variante (mit sogen. open top chambers, nach oben offenen kleinen „Gewächshäusern“), eine Wasserstands-anhebungs-Variante (mit Spundwänden und Pumpen), eine Kombination aus beiden und eine Kontrollfläche. Über 2 Jahre wurde der Austausch klimarelevanter Spurengase, die Vegetationsentwicklung und die Produktivität in den Varianten untersucht. Die Hypothesen waren, dass die Erwärmungs-Variante die höchste Klimabelastung durch Emission klimarelevanter Spurengase erreicht, die Variante der Wasserstands-anhebung die geringste Klimabelastung aufweist und die Kombination aus beiden besser abschneidet als die Erwärmungsvariante, da die erhöhte Abbaurrate durch eine Verringerung des durchlüfteten Bodens ausgeglichen werden sollte.

Ergebnisse

- Temperaturerhöhung: Es ist gelungen, die Temperatur in den Erwärmungs-Varianten im Mittel um 0,6 bis 0,8 Grad Celsius über die Kontrollvariante anzuheben (Abb. 1). Wasserstands-anhebung: Die Wasserstand-anhebung führte zu Anhebungen von 13 bis 16 cm über der Kontrolle im Mittel des Betrachtungszeit-raums (Abb. 2).
- Klimawirksamkeit: Hinsichtlich der Klimawirksamkeit → (CO₂*1+CH₄*21+N₂O*310) schneidet die Kontrolle am schlechtesten ab. Die Variante der Wasserstands-anhebung weist die geringste Klimabelastung auf. Die beiden Erwärmungsvarianten unterscheiden sich kaum voneinander, liegen aber unter der Kontrolle (Abb. 3).

Diskussion und Anpassungsmaßnahmen

- Management des Wasserstandes kann zu einer deutlichen Reduktion der Klimabelastung beitragen. Eine ausgeprägtere Anhebung in natürliche Niveaus (-10 cm) sollte zu einer noch besseren Anpassung an den Klimawandel führen.
- Die Erwärmungsvariante hat nicht zu einer höheren Klimawirksamkeit als in der Kontrollvariante geführt. Grund dafür ist, dass die im Jahreslauf vorzeitigere Biomasseentwicklung auf den Erwärmungsvarianten zu einer effizienteren Photosyntheseleistung führt. Diese hat die erhöhten Verluste durch → Bodenatmung ausgeglichen.

Fazit ist, dass die Anpassungsmaßnahme Wasserstands-anhebung im Vergleich zur Kontrolle eindeutig positive Effekte aufweist, die kurzfristige Reaktion der Biomasse in den Erwärmungsvarianten den Effekt der Wasserstands-anhebung aber maskiert. Durch Renaturierung können die Moore fit für den zukünftigen Klimawandel gemacht werden und kann der Kohlenstoff weiterhin im Torf gebunden werden.

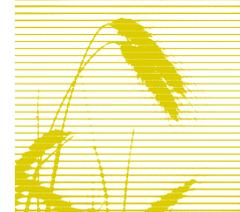
Literatur

Matthias Drösler, Lena Schaller, Jochen Kantelhardt, Manuel Schweiger, Daniel Fuchs, Bärbel Tiemeyer, Jürgen Augustin, Marc Wehrhan, Christoph Förster, Lindsey Bergmann, Alois Kapfer und Gerd-Michael Krüger (2012):

Beitrag von Moorschutz- und -revitalisierungsmaßnahmen zum Klimaschutz am Beispiel von Naturschutzgroßprojekten. Natur und Landschaft, 87, Heft 02, pp 70–76, OP-978-3-00-153144-5

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2010): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2008, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2010, Climate Change Nr. 03/2010, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3957.pdf>

FORCAST Teilprojekt 5	Extensiv genutzte Wiesen als Kohlenstoffspeicher
Forschungseinrichtung	Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie
Ansprechpartner	Prof. Dr. Thomas Foken
E-Mail	thomas.foken@uni-bayreuth.de
Bearbeiter/Autoren	Michael Riederer, Yakov Kuzyakov, Thomas Foken



Extensiv genutzte Wiesen als Kohlenstoffspeicher

Ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz

Um die Klimaerwärmung durch anthropogene Ursachen auf dem derzeitigen Niveau zu halten, sind die Reduktion von Treibhausgasemissionen und die Ergreifung von Anpassungsmaßnahmen von erheblicher Bedeutung. Die Möglichkeit der Speicherung von Kohlendioxid durch wachsende Pflanzen kann einen weiteren wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. In diesem Zusammenhang wird die Bedeutung von Wäldern hervorgehoben. Die Wissenschaft ist sich jedoch nicht einig, welche Funktion Wiesen bezüglich der Kohlenstoffbilanz haben. Bayern verfügt über ausgedehnte, extensiv genutzte Wiesen in den mittleren und höheren Lagen der Mittelgebirge, denen eine Kohlenstoffspeicherfunktion zugesprochen wird, deren Ausmaß jedoch noch nicht quantifiziert ist. Gegenstand der nachfolgend beschriebenen Untersuchung ist der experimentelle Nachweis dieser Speicherfunktion sowie deren Quantifizierung.

Für diese Untersuchungen wurde die Klimastation des Bayreuther Zentrums für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER) nahe Weißenstadt im Fichtelgebirge (Abb. 1) ausgewählt. Mit hohem experimentellem Aufwand forschten Meteorologen und Bodenkundler gemeinsam von August 2009 bis November 2011. Zur Bestimmung des Kohlendioxidaustausches zwischen der Atmosphäre und der extensiv genutzten Wiese – die Kohlendioxid (CO_2) durch Photosynthese aufnimmt, aber durch Atmung in der Nacht auch

wieder abgibt – müssen mit einer zeitlichen Auflösung von Zehntelsekunden Wind, Temperatur, Luftfeuchte und CO_2 -Konzentration mit der → Eddy-Kovarianz-Methode gemessen werden. Der Bodenkundler dagegen verfolgt den Weg des CO_2 in Pflanze und Boden, indem er den Pflanzen für nur wenige Stunden ein mit dem stabilen Kohlenstoffisotop (Molekulargewicht 13) angereichertes CO_2 zur → Assimilation anbietet (Abb. 2). Dessen Verbleib in Pflanze und Boden wird dann einen Monat lang durch Probennahme und Analyse untersucht.



▲ Abbildung 1
Messstation „Voitsumra“ nahe Weißenstadt im Fichtelgebirge im Sommer 2010
links: Messturm zur Bestimmung der Verdunstung und des Kohlendioxidaustausches (→ Eddy-Kovarianz-Methode),
Mitte: Langzeit-Messstation zur Bestimmung klimatischer Randbedingungen,
rechts: Dächer zur Simulation von Dürre

▲ Abbildung 2
In diesen → Isotopenmarkierungskammern werden die Pflanzen ca. 2 Stunden einer mit $^{13}\text{CO}_2$ angereicherten Atmosphäre ausgesetzt. Diese nehmen den markierten Kohlenstoff durch Photosynthese auf und bringen ihn so in das Ökosystem ein.

Abbildung 3 ►

Austausch von Kohlenstoff im untersuchten Ökosystem Wiese in Jahr 2010; der zweimalige Grasschnitt (rote Pfeile) während der Vegetationsperiode zeigt sich deutlich in einer Reduktion der CO₂-Aufnahme. Blau sind Zeiten mit starker CO₂-Aufnahme durch das Ökosystem (Assimilation) und rot sind Zeiten mit starker CO₂-Abgabe (Atmung) gekennzeichnet.

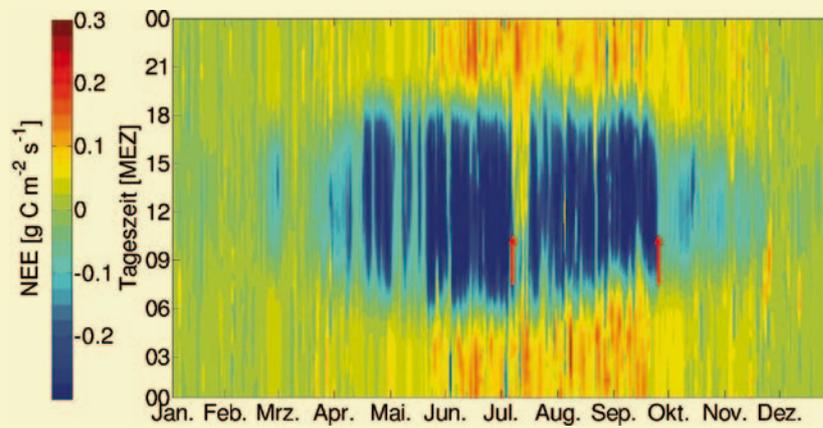
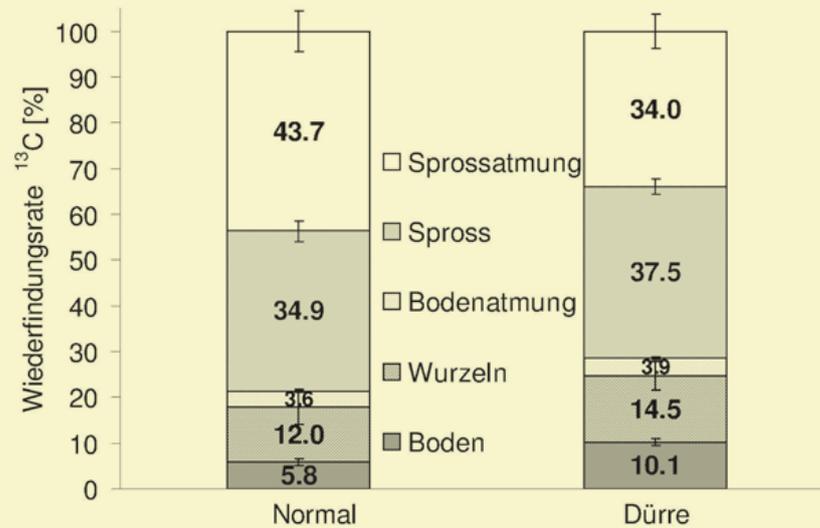


Abbildung 4 ►

Eintrag von Kohlenstoff durch Photosynthese, ermittelt über Wiederfindungsraten des eingebrachten ¹³C-Isotopes. Verglichen werden natürliche Bedingungen und Bedingungen nach einer 38tägigen Frühjahrsdürre.



Von besonderem Interesse ist die jährliche CO₂-Aufnahme eines Ökosystems. Der jährliche Verlauf des Netto-Ökosystemaustausches (d. h. → Atmung minus Photosyntheseleistung) zeigt Abb. 3. Neben dem Jahresgang sind auch der Tagesgang und die Perioden geringer CO₂-Aufnahme nach den Mahden gut zu erkennen. Die im Jahresgang akkumulierte CO₂-Aufnahme betrug im Jahr 2010 ca. -91 g C m⁻² a⁻¹. Bei diesem Wert ist schon berücksichtigt, dass dem System 158 g C m⁻² a⁻¹ durch Mahd entnommen und über Fütterung dem Kohlenstoffkreislauf wieder zugeführt wurden. Die Jahre 2009 und 2011 zeigten einen ähnlichen Verlauf.

Ein Schwerpunkt der Untersuchungen war die Quantifizierung der Kohlenstoffspeicherung in unterschiedlichen Bereichen des Wiese. Dabei wurde die Verlagerung des markierten Kohlenstoffs in Wurzeln, Boden, Boden- und → Sprossatmung über mehrere Wochen verfolgt und mit den natürlich vorkommenden Anteilen verglichen. Nach etwa drei Wochen stellte sich überall ein Gleichgewicht ein, das die Grundlage für die Bestimmung der Verteilung bot. Die Untersuchungen wurden für natürliche Flächen und für Flächen, die einer 38-tägigen Frühjahrsdürreperiode ausgesetzt waren,

durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die Menge der Kohlenstoffaufnahme in verschiedenen Bereichen der untersuchten Wiese. Eine höhere C-Aufnahmerate im Boden und eine geringere Sprossatmung bei Dürre sind nachweisbar.

Ein wissenschaftlich neuartiges Ergebnis war die Abschätzung des Kohlenstoffeintrages in natürlichen Wiesenbereichen, die durch die Zusammenarbeit von Meteorologen und Bodenkundlern möglich wurde. Demnach werden im Spross 2,7 g C m⁻² Tag⁻¹ und in Wurzel und Boden 1,4 g C m⁻² Tag⁻¹ aufgenommen. Dem stehen 3,7 g C m⁻² Tag⁻¹ wieder veratmeter Kohlenstoff gegenüber.

Es konnte gezeigt werden, dass extensiv genutzte Wiesenflächen in Mittelgebirgslagen (ein- bis zweimalige Mahd im Jahr) eine Kohlenstoffsénke darstellen. Dieser Landnutzungstyp trägt positiv zur Kohlenstoffbilanz in Bayern bei. Landnutzungsänderung und Umbruch dieser Flächen würden dagegen zu einer Freisetzung von Kohlendioxid führen.

FORKAST Teilprojekt 6	Pflanzen oder Mikroorganismen – Wer gewinnt das Rennen um Nährstoffe bei extremer Trockenheit?
Forschungseinrichtung	Universität Bayreuth, Lehrstuhl Bodenphysik
Ansprechpartner	Prof. Dr. Bruno Glaser
E-Mail	bruno.glaser@landw.uni-halle.de
Bearbeiter/Autoren	Bruno Glaser, Marco Lara, Bernd Huwe



Pflanzen oder Mikroorganismen – Wer gewinnt das Rennen um Nährstoffe bei extremer Trockenheit?

In Europa sind nährstoff-limitierte → Ökosysteme, wie z. B. Sandstandorte weit verbreitet. Es ist zu erwarten, dass insbesondere solche Standorte sensibel auf klimatische Veränderungen, wie z. B. Trockenheit und Starkregenereignisse reagieren. Allerdings ist noch wenig bekannt über den Einfluss von extremer Dürre oder Starkregen auf den → Bodenwasser- und Nährstoffhaushalt in solchen sensiblen Ökosystemen. Extrem-Wetterereignisse zeigen sich in unterschiedlicher Form und Stärke, deshalb stellt die Untersuchung der Auswirkungen auf Ökosysteme eine besondere Herausforderung dar. Bei Experimenten, in denen ein bestimmtes Klima simuliert wird, ist dabei die Frage besonders wichtig, was extremes Wetter ist und wie gut Ökosysteme dieses puffern können.

Problemstellung

Die Intensivierung von Wetterextremen ist gegenwärtig eine der gravierendsten Folgen des Klimawandels (IPCC, 2007). Zum Beispiel ist die Wahrscheinlichkeit von extremen Regenereignissen in Zentraleuropa von 4 % im Jahr 1901 auf 25 % im Jahr 2003 angestiegen (Glaser et al. 2012). Über die ökologischen Effekte von Extremwetterereignissen ist bisher wenig bekannt oder es gibt widersprüchliche Aussagen. Daher wurde weltweit mit einer Reihe von Experimenten begonnen, um diese Effekte zu untersuchen.

Das Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, ob gängige experimentelle Extrem-Wettermanipulationen überhaupt die natürliche Wettervariabilität übersteigen. Darüber hinaus wurde gemessen, wie sich die Manipulationen auf den → Bodenwasser- und Nährstoffhaushalt auswirken bzw. ob die Pflanzen Trockenstress ausgesetzt waren oder ob die untersuchten Ökosysteme dies abpuffern können, z. B. durch die Speicherung von Wasser im Boden.



▲ Abbildung 1
Trockendächer und Beregnungsanlagen zur Untersuchung von Extrem-Trockenheit bzw. Extrem-Niederschlag im Ökologisch-Botanischen Garten der Universität Bayreuth (Glaser et al. 2012).

Jahr	Niederschlag während der Vegetationsperiode (mm)	Intervall (Jahre)	
		Trocken	Nass
2005	366	4.0	1.3
2006	472	1.4	3.7
2007	509	1.2	5.8
2008	422	1.9	2.1
2009	479	1.3	4.0
1998	651		39
2003	233	7492	

◀ Abbildung 2

Intervalle für die in den Versuchsjahren gemessenen Niederschläge. Zusätzlich zu den Versuchsjahren sind die extremsten Jahre dargestellt (Glaser et al. 2012).

Untersuchungsmethoden

Über einen Zeitraum von 5 Jahren wurden in einem Experiment im Ökologisch-Botanischen Garten der Universität Bayreuth extreme Trockenheit durch den Aufbau von Dächern bzw. extreme Niederschläge durch zusätzliche Beregnung erzeugt (Abb. 1). Als extreme Wetterereignisse wurden in den ersten drei Jahren (2005–2007) lokale 100-jährige → Extremtrockenheit bzw. -Niederschlag und in den letzten beiden Jahren (2008–2009) lokale 1000-jährige → Extremwetterereignisse eingestellt (Tabelle 1). Die extremste Trockenheit dauerte 33 Tage im Juni und Juli 1976 und der extremste Dauerregen betrug 152 mm Niederschlag über 14 Tage im Juni 1977. Durchschnittswerte wären 10 Regentage pro Monat und 45 – 86 mm Niederschlag pro Monat.

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass in Mitteleuropa extreme Dürre bzw. extremer Niederschlag keine gravierenden Folgen für die untersuchte Graslandschaft haben. Erklärungen hierfür sind die Pufferfähigkeit des Bodens hinsichtlich der Speicherung von Wasser und die Tatsache, dass die jahreszeitliche Niederschlagsschwankung größer ist als jene von Jahr zu Jahr (Tabelle Abb. 2).

Effekte von Extremwetterereignissen auf die Konkurrenz um Nährstoffe zwischen Pflanzen und Mikroorganismen im Boden

Starkregenereignisse hatten keine Auswirkungen auf den Stickstoffkreislauf und auf die Biomasseproduktion von Pflanzen und Bodenmikroorganismen. Extreme Trockenheit vermindert die mikrobielle → Biomasse im Boden und führt zu einer Anreicherung von mineralischem Stickstoff im Boden, da dieser aufgrund des

fehlenden Wasserflusses nicht von Pflanzen aufgenommen werden kann. Da das Pflanzenwachstum aber nicht negativ beeinflusst war, führt dies zu einer Abnahme der Stickstoffkonzentrationen in den Pflanzen. Dies könnte z. B. den → Proteingehalt von Nahrungspflanzen negativ beeinflussen. Ferner werden Arten gefördert, die widerstandsfähig gegen Trockenheit sind, wie z. B. Pilze.

Anpassungsstrategien

Die Ergebnisse zeigen, dass die jahreszeitliche Schwankung von Trockenheit und Niederschlag wesentliche größer ist als jene von Jahr zu Jahr. Daher sind intakte mitteleuropäische Ökosysteme bestens an den Klimawandel angepasst. Diese Anpassung wird unterstützt von der natürlichen Pufferfunktion des Bodens. Die beste Anpassungsstrategie ist es, die natürlichen Puffermöglichkeiten der Ökosysteme zu erhalten bzw. zu fördern z. B. durch Humusaufbau, Vermeidung von Bodenverdichtung und Erhaltung der natürlichen Biodiversität.

Literatur

IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis.

Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.

Glaser B, Jentsch A, Kreyling J, Beierkuhnlein C (2013)

Soil moisture change caused by experimental extreme summer drought is similar to natural inter-annual variation in a loamy sand in Central Europe. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, DOI:10.1002/jpln.201200188.

FORKAST Teilprojekt 8	Auswirkungen von extremen Wetterereignissen auf Funktionen eines Ökosystems
Forschungseinrichtung	Universität Bayreuth, Störungsökologie
Ansprechpartner	Prof. Dr. Anke Jentsch
E-Mail	anke.jentsch@uni-bayreuth.de
Bearbeiter/Autoren	Anke Jentsch, Jürgen Kreyling, Carl Beierkuhnlein, Kerstin Grant, Laura Nagy, Roman Hein, Julia Walter



Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf Funktionen eines Ökosystems

in experimentellen und natürlichen Pflanzengemeinschaften

Um langfristig die Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation zu untersuchen, wurden im Jahre 2005 und 2008 im Ökologisch-Botanischen Garten der Universität Bayreuth zwei Freilandexperimentflächen angelegt. Das 2005 begonnene Experiment besteht aus gepflanzten Pflanzengemeinschaften von unterschiedlicher funktioneller Vielfalt. Es wurde unter stark kontrollierten Bedingungen durchgeführt (homogenisierter Bodenaufbau, gleiche Anzahl etablierter Individuen). Das zweite Experiment erfolgte in natürlich gewachsenen Grünlandbeständen, die unterschiedlich gedüngt und gemäht wurden.

Beide Flächen wurden alljährlich im Frühsommer (Juni) experimentellen Extremwetterereignissen ausgesetzt, wie Dürre (42 Tage) und Starkregen (260 mm m⁻², 3 Wochen). Im Fokus des wissenschaftlichen Interesses stand einerseits die oberirdische Biomasseproduktion, d. h. wie stark wuchsen die Pflanzen, als wichtigster Parameter für die landwirtschaftliche Nutzung, und andererseits die → Blühphänologie, d. h. wann begannen die Pflanzen zu blühen, als der bedeutendste ökologische Anzeiger für klimatisch bedingte Veränderungen in Ökosystemen.

Effekte von Dürre und Starkregen auf die Biomassenproduktion

Die experimentellen Grünlandgemeinschaften konnten sich nach extremen Wetterereignissen gut erholen, d. h. sie erwiesen sich als erstaunlich → resilient. Weder im Jahre 2009 noch im Jahr 2010 fanden sich Effekte der Wettermanipulationen auf die Biomasseproduktion oder auf die Wurzellänge. Andererseits erwies sich die → Biodiversität, d. h. die Artenvielfalt, als sehr bedeutsam für die Pufferung der Auswirkungen extremer Wetterereignisse. Es zeigte sich, dass die ober- und unterirdische Biomasseproduktion sowie die Pflanzendeckung bei der höchsten Vielfalt von Arten und funktionellen Gruppen, d. h. Kräuter, Gräser und Luftstickstoff fixierende Leguminosen, am höchsten lag.



◀ Abbildung 1
Experimentelle Simulation eines Starkregenerereignisses in Grünlandvegetation

Abbildung 2 ►
Experimentell angelegte
Grünlandgemeinschaft von
hoher funktioneller Diversität



Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine möglichst hohe Artenvielfalt mit einem Nebeneinander verschiedener Wuchsformen in Pflanzengemeinschaften für die Produktivität von Vorteil ist. Artenreiche Gemeinschaften verhalten sich erstaunlich stabil und leistungsfähig selbst unter dem Einfluss von Dürre und Starkregen. In natürlichen, extensiv genutzten Wiesen ging die Biomasseproduktion allerdings mit zunehmender zeitlicher Niederschlagsvariabilität zurück. Darüber hinaus ergab sich in den Jahren 2009 bis 2011, dass die viermal gemähten Gemeinschaften insgesamt weniger Biomasse produzierten als die zweimal gemähten, was jedoch von den Wettermanipulationen nicht weiter beeinflusst wurde. Die Zugabe von Dünger aus Stickstoff, Phosphor und Kalium führte zum Ende der Vegetationsperiode zu einem Anstieg der Biomasseproduktion. Bei der Bewertung von Landnutzungspraktiken, wie Mahd und Düngung, ergab sich, dass zwar beides förderlich für die Produktivität des Grünlandes ist, jedoch die Effekte der extremen Niederschlagsbehandlungen auf die Produktivität nicht wesentlich beeinflusst.

Effekte von Dürre und Starkregen auf die Blühphänologie

Bei mehreren weit verbreiteten Grünland-Arten zeigten die extremen Wetterbehandlungen einen erheblichen Einfluss auf die Blühphänologie. Obwohl keine der gegenüber den Wetterbehandlungen sensiblen Arten starke Veränderungen zeigte, konnte für einzelne Arten eine Verspätung des Blühbeginns um mehrere Wochen nachgewiesen werden. Für hochspezifische → Blüte-Bestäuber-Interaktionen muss deshalb davon ausgegangen werden, dass eine zukünftige und klimabedingte Veränderung der Niederschlagsereignisse (Intensität und Häufigkeit) einen massiven Einfluss auf das Leben der Bestäuber und ihre Wechselwirkungen mit Blütenpflanzen haben wird. Ob ein konkretes Gefährdungspotential für einzelne Bestäuber oder Pflanzen besteht, ist ein wichtiges Thema zukünftiger Forschungsaktivitäten.

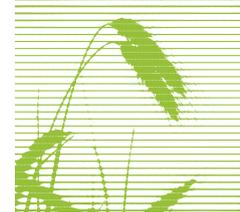
- Viermalige Mahd führte bei krautigen Arten wie z. B. Scharfer Hahnenfuß oder Wiesen-Sauerampfer zu einer kürzeren Blühphase und zu einer geringeren Anzahl an Blüten.
- Die untersuchten Grasarten wie Glatthafer oder Wolliges Honiggras waren nicht relevant für Bestäuber, jedoch im Hinblick auf die Biomasse die bedeutendsten Arten des Grünlandes.
- Hinsichtlich der Blühphänologie konnte kein Zusammenhang zwischen Mahdhäufigkeit und Wetterextremen gefunden werden.

Insgesamt stellt sich heraus, dass Grünlandgemeinschaften eine überraschend große Resilienz gegenüber extremen Niederschlagsereignissen besitzen. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere Gräser in der Lage sind, auf wiederholte Dürre mit angepassten Strategien zu reagieren. Das hohe Anpassungspotential der Grünlandgemeinschaften bezüglich der Produktivität lässt keine starken und dauerhaften Einbußen ihrer Leistungsfähigkeit unter längeren Dürren befürchten. Eine verstärkte zeitliche Variabilität im Auftreten von Niederschlag bei gleichbleibender Gesamtsumme könnte dagegen zu Ertrageinbußen führen. Um den Erhalt des Blütenangebotes zu gewährleisten, wäre eine seltenere Mahd in Jahren mit besonders hoher Niederschlagsvariabilität empfehlenswert. Eine Erhöhung der genetischen Vielfalt, z. B. durch Einbringen von dürreresistenterer Populationen einer Art von verschiedener → Herkunft, und Artenvielfalt kann zusätzlich dazu beitragen, langfristige, negative Effekte erhöhter klimatischer Variabilität auszugleichen.

Literatur:

- Jentsch A, Kreyling J, Elmer M et al. (2011) Climate extremes initiate ecosystem regulating functions while maintaining productivity. Journal of Ecology, 99, 34–40.*
- Walter J, Grant K, Beierkuhnlein C, Kreyling J, Weber M, Jentsch A (2012) Increased rainfall variability reduces biomass and forages quality of temperate grassland largely independent of mowing frequency. Agriculture, Ecosystems & Environment, 148, 1–10.*
-

FORCAST Teilprojekt 15	Auswirkungen von extremen Witterungsereignissen auf Ökosystemdienstleistungen von Böden
Forschungseinrichtung	Technische Universität München, Lehrstuhl für Bodenökologie und Abteilung für Umweltgenomik
Ansprechpartner	Prof. Dr. Michael Schloter
Bearbeiter	Michael Schloter, Verena Hammerl, Karin Pritsch, Jean Charles Munch
E-Mail	schloter@helmholtz-muenchen.de
Autoren	Michael Schloter, Verena Hammerl, Karin Pritsch, Jean Charles Munch



Auswirkungen von extremen Witterungsereignissen auf Ökosystemdienstleistungen von Böden

Unsichtbar und doch wichtig – wie reagiert die Bodenmikroflora auf extreme Trockenheit?

Ökosystemdienstleistungen von Böden bilden eine wichtige Grundlage für das Leben auf der Erde. Hierzu zählen neben globalen Stoffkreisläufen und der Speicherung von Kohlenstoff, auch der Erhalt der Biodiversität oder der Abbau von Schadstoffen und somit der Schutz von ober- und unterirdischen Gewässern. Daneben ist die Produktionsfunktion von pflanzlicher Biomasse gerade im Hinblick auf landwirtschaftliche Nutzung von großer Bedeutung.

Ziel dieses Projektes war es daher, zu untersuchen,

- wie sich extreme Witterungsereignisse wie z. B. langanhaltende Dürrephasen auf die Funktionen von Böden auswirken und
- inwieweit sich Lebewesen im Boden an diese Bedingungen anpassen können, um Managementempfehlungen abzuleiten, die diesen Adaptationsprozess positiv beeinflussen können.

Bodenmikroorganismen als Motor von Bodenfunktionen:

Die Eigenschaften von Böden werden maßgeblich durch die Zusammensetzung und Aktivität der Bodenmikroflora geprägt, die fast alle wichtigen Prozesse im Boden katalysiert. So ist Pflanzenwachstum in Böden ohne die Mobilisierung von Nährstoffen durch Mikroorganismen und symbiotische Wechselwirkungen im Wurzelraum nicht vorstellbar; ebenso werden der Abbau von Schadstoffen oder die Kohlenstoffakkumulation im Boden durch die Mikroorganismen gesteuert. Daher wurde in

den letzten Jahren der Begriff „genetische Bodenschätze“ geprägt, welcher die Bedeutung der Bodenmikroflora für die Qualität und Funktionalität von Böden unterstreichen soll (Wall, 2012).

Blackbox „Bodenmikroflora“ ?

Die Charakterisierung mikrobieller Gemeinschaften im Boden ist allerdings nach wie vor sehr schwierig. Dies ist einerseits durch die enorme Vielfalt an Mikroorganismen im Boden und deren unterschiedlichen ökophysiologischen Eigenschaften bedingt (Schätzungen gehen davon aus, dass in 1 g Boden bis zu einer Million unterschiedliche Arten von Bakterien, Pilzen und Archaea [„Urbakterien“] leben, deren Biodiversität und Funktionen durch klassische mikrobiologische Verfahren nicht erfasst werden können). Andererseits werden Mikroorganismengemeinschaften durch eine Vielzahl von Faktoren, wie z. B. Vegetation, Jahreszeit oder Änderungen von Bodeneigenschaften, beeinflusst und zeigen



◀ **Abbildung 1**
 Im Vordergrund: Erholung von Grünlandflächen nach einer Frühjahrstrockenperiode im Jahr 2009
 Im Hintergrund: Simulierte Sommerdürre durch die Nutzung von fahrbaren Zelten im Rahmen des EVENT II Experiments in Bayreuth



◀ Abbildung 2

Unmittelbare Effekte einer simulierten Sommerdürre von 42 Tagen auf Grünlandflächen im Rahmen des EVENT II Experiments in Bayreuth.

hierbei eine hohe räumliche und zeitliche Dynamik ihrer Zusammensetzung und ihrer Funktionen.

Somit ist eine gezielte Steuerung einzelner Funktionsträger nach wie vor sehr schwierig. Aber auch die Frage, inwieweit Szenarien des globalen Klimawandels einzelne (Mikro-)organismengruppen im Boden besonders betreffen und daher als (Frühwarn-)indikatoren für bestimmte Änderungen im Boden genutzt werden können, ist bis dato unbeantwortet. Letztendlich ist auch immer noch unklar, ob allgemeine ökologische Prinzipien der Ökologie auf mikrobielle Gemeinschaften übertragbar sind und zum Beispiel funktionelle Vielfalt von Mikroorganismen im Boden mit Resilienz bzw. Stabilität gegenüber Störungen korrelierbar ist.

Durch den Einsatz neuer Verfahren der Molekularbiologie und Biochemie in den letzten Jahren hat im Bereich der mikrobiellen Ökologie ein Paradigmenwechsel stattgefunden, da Funktionen von Mikroorganismen ohne deren Kultivierung erfassbar werden und somit viele der oben genannten Fragen nun zu bearbeiten sind.

Einfluss von Klimaveränderungen auf die Zusammensetzung und Aktivität der Bodenmikroflora an Grünlandstandorten:

Während Temperatur-Veränderungen im Boden die Zusammensetzung der Bodenmikroflora insbesondere im Frühjahr und Sommer in unserem Breiten kaum direkt beeinflussen, zeigen die Ergebnisse des Projektes, dass

- insbesondere Veränderungen im Wasserhaushalt des Bodens (bedingt durch langanhaltende Dürrephasen bzw. Starkregenereignisse) die Funktionalität der Bodenmikroflora an Grünlandstandorten stark beeinflussen können.

Hierbei spielen direkte Effekte (Nährstofftransport; Redoxbedingungen; Wasserversorgung) genauso eine wichtige Rolle wie auch indirekte Einflussgrößen (d. h. z. B. reduzierte Photosyntheseraten der Pflanzen während längerer Trockenperioden und damit einhergehende verringerte Ausscheidungen von Kohlenhydraten in den Boden).

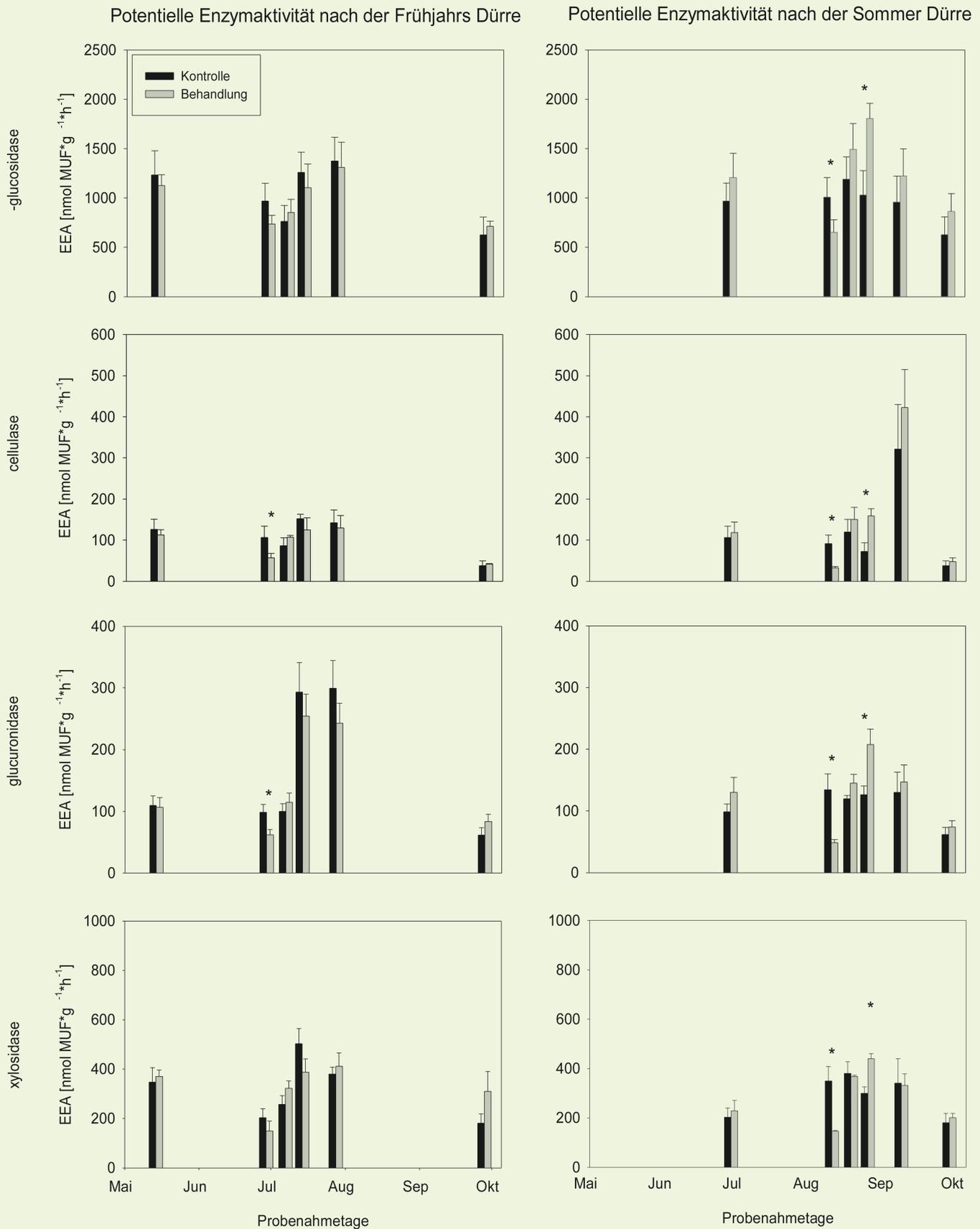
Eine Regeneration der Bodenmikroflora und deren Aktivität ist in den hier untersuchten Szenarien jeweils wenige Woche nach Ende der jeweiligen Simulation der Klimaveränderung erfolgt.

- Interessanterweise hatte der Zeitpunkt innerhalb der Vegetationsperiode, an dem die Klimaveränderung simuliert wurde, einen deutlichen Einfluss auf das unmittelbare Ausmaß der Veränderungen innerhalb der Bodenmikroflora und dadurch auch auf die Regenerationsdauer. So hatten z. B. Dürreperioden im Frühjahr weniger deutliche Auswirkungen auf die untersuchten Parameter im Vergleich zu Dürreperioden im Sommer. Wiederholte Simulationen der gleichen Klimaveränderung am gleichen Standort führten weder zu einer verbesserten Anpassung noch zu einer nachhaltigen Schädigung der Bodenmikroflora, sodass ein „Memoryeffekt“ nicht beobachtet wurde. Aus diesen Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass auch
 - Managementmaßnahmen im Grünland (z. B. Ernte von Biomasse oder Düngung) während der Regenerationsphasen nach Dürreperioden oder Starkregenereignissen nicht oder nur in sehr beschränktem Umfang durchgeführt werden sollten, um zusätzliche Stressfaktoren zu vermeiden.

Eine Übertragung der Ergebnisse auf stark genutzte Ökosysteme (z. B. landwirtschaftlich genutzte Flächen), wo durch die Bewirtschaftung (Monokulturen; Düngereintrag) eine starke Anpassung der Mikroflora und Reduktion der Biodiversität stattgefunden hat, oder forstliche Ökosysteme, wo durch entsprechende Klimaveränderungen nachhaltige Schädigungen des Baumbestandes induziert werden können, ist auf Basis dieser Daten nicht möglich, sollte aber in zukünftigen Forschungsprojekten berücksichtigt werden.

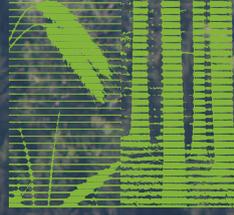
Literatur

Wall, D.H. (2012) Soil Ecology and Ecosystem Services; Oxford University Press



▲ **Abbildung 3**

Potentielle Aktivität wichtiger Enzyme, welche die Umsetzung von Kohlenstoff im Boden katalysieren (2009). Vergleich der jeweiligen unbehandelten Kontrollvariante mit der Simulation einer Frühjahrsdürre (links) und mit einer Sommerdürre (rechts). Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,5$) an einem Probenahmetag von Behandlung und Kontrolle wurden mit * gekennzeichnet.



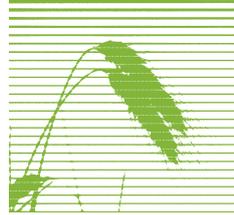
FORCAST Teilprojekte 2|3|13|14

Grünland/Wald



▲ Abbildung 1
Frostschaden an
einer Rotbuche
(Foto: Jürgen Kreyling)

FORKAST Teilprojekt 1	Innerartliche Unterschiede in der Reaktion auf Klimaextreme
Forschungseinrichtung	Universität Bayreuth, Lehrstuhl Biogeografie
Ansprechpartner	Prof. Dr. Carl Beierkuhnlein
E-Mail	carl.beierkuhnlein@uni-bayreuth.de
Bearbeiter/Autoren	Carl Beierkuhnlein, Jürgen Kreyling, Monika Konnert, Gerhard Huber, Anke Jentsch, Daniel Thiel, Laura Nagy, Camilla Wellstein



Innerartliche Unterschiede in der Reaktion auf Klimaextreme

und ihre Bedeutung für die Anpassung an ungewollte Folgen des Klimawandels

Mitteuropäische Ökosysteme werden oft von wenigen → Schlüsselarten geprägt. Folglich ist es dringend erforderlich, zu wissen, wie diese Schlüsselarten auf den Klimawandel und auf klimatische Extremereignisse reagieren werden. 2009 wurde im Botanischen Garten der Universität Bayreuth ein Experiment mit verschiedenen → Herkünften ausgewählter Schlüsselarten von landwirtschaftlicher und forstwirtschaftlicher Bedeutung durchgeführt. Ziel war es, zu prüfen, ob bestimmte Herkünfte besonders geeignet sind, zum Erhalt flächig bedeutsamer Ökosysteme in Bayern beizutragen. Mit Hilfe regionaler Klimamodelle konnten Regionen innerhalb des Verbreitungsgebietes der ausgewählten Pflanzenarten identifiziert werden, welche heute bezüglich ausgewählter Klimafaktoren den künftig in Nordbayern zu erwartenden Bedingungen entsprechen.

Es wurden für Grünland folgende vier typischen Grasarten ausgewählt: Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*), Wiesen-Schwingel (*Festuca pratensis*), Wolliges Honiggras (*Holcus lanatus*) und Wiesen-Fuchsschwanzgras (*Alopecurus pratensis*). Für Waldökosysteme wurden die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) als natürlicherweise dominante Baumart, die Schwarzkiefer (*Pinus nigra*) sowie die Flaumeiche (*Quercus pubescens*) als künftig bedeutsame Arten gewählt. Um die Reaktion der Herkünfte auf Extremereignisse zu untersuchen, wurden diese im Experiment Wärme, Trockenheit, einer Kombination aus Trockenheit und Wärme sowie künstlich erzeugtem Frost ausgesetzt.

Reaktionen ausgewählter Gräser auf Extremereignisse

Die Grasherkünfte stammten aus Schweden, Deutschland, Ungarn, Bulgarien, Italien und Spanien. Die Untersuchungen zeigten für alle Arten:

- Herkünfte unterscheiden sich hinsichtlich ihrer → Biomasseproduktion. Diese Unterschiede sind innerhalb der untersuchten Arten nahezu ebenso groß, wie zwischen den Arten (Beierkuhnlein et al. 2011).
- Beim Wolligen Honiggras wurden herkunftsspezifische Empfindlichkeiten gegenüber Sommerdürre festgestellt (ungarische und bulgarische Herkunft).
- Die Erwärmung hat kaum Auswirkung auf die → Produktivität der Gräser. Gräser aus der Region und Herkünfte von der nördlichen Verbreitungsgrenze (Schweden) waren nicht weniger wüchsig als Herkünfte aus dem Süden Europas.



▲ Abbildung 2
Vermessung einer Schwarzkiefer



◀ **Abbildung 3**
Gras- und Schwarzkiefernherkünfte
unter Kontrollbedingungen (weißer
Boden, keine weitere Erwärmung)

- Erstmals konnte für Gräser gezeigt werden, dass Spätfrost (Mai) die Biomasseproduktion um 20 % verringert. Dabei zeigten sich Unterschiede zwischen den Herkünften bei drei von vier Arten (Kreyling et al. 2012a).

Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass bestimmte Grasherkünfte eine höhere Anpassungsfähigkeit an extreme Klimabedingungen und damit an den Klimawandel im Allgemeinen aufweisen. Aus den heutigen Klimabedingungen der einzelnen Herkünfte konnte aber nur für Spätfrost, nicht für Dürre oder Erwärmung, auf die Reaktion im Experiment geschlossen werden. Das heißt, dass die beobachteten Unterschiede zwischen Herkünften nur sehr bedingt aus den Klimabedingungen der Herkünfte abgeleitet werden können. Eine Auswahl geeigneter, klimastabiler Herkünfte nur anhand geographischer Aspekte ist damit nicht möglich, sondern detaillierte Anbauversuche bleiben nötig.

Reaktionen der Rotbuche auf Extremereignisse

Die Rotbuche ist der dominante Baum in heimischen Laubmischwäldern. Sie gewährleistet wichtige Ökosystemfunktionen, wie z. B. Produktivität und ist für die charakteristische Artenzusammensetzung und -vielfalt maßgeblich verantwortlich.

Die im Experiment berücksichtigten Buchenherkünfte stammten aus Deutschland, Polen, Bulgarien und Spanien. Es zeigte sich:

- Verschiedene Herkünfte der Rotbuche unterscheiden sich in ihrem Wachstum und speziell in ihrer Dürre- und Spätfrosttoleranz (Kreyling et al. 2012b).
- Der Zusammenhang zwischen Frostschädigung und der niedrigsten Lufttemperatur im Mai am Herkunfts-ort deutet für die Rotbuche auf Anpassung an das teilweise Auftreten von Spätfrost hin. Besonders interessant ist, dass eine vorausgehende Wärmebehandlung die Spätfrostschäden verringern kann. Diese so behandelten Pflanzen trieben früher aus und erreichten bis zum Zeitpunkt des Frostereignisses

schon die Blattrife. Eine Erwärmung der Lufttemperatur kann die Empfindlichkeit für Spätfrost der Buche jedoch nicht generell verringern.

Reaktionen der Schwarzkiefer auf Extremereignisse

Die Schwarzkiefer ist eine → submediterran verbreitete Baumart, die insbesondere auf Trockenstandorten in Deutschland eine Alternative zur Waldkiefer sein könnte. Die hier genutzten Schwarzkieferherkünfte stammten aus Deutschland, Österreich, Frankreich, Italien und Serbien. Allgemeine Unterschiede der Herkünfte in Wuchslleistung und Wuchsform konnten gezeigt werden. Interessanterweise reagierten junge Pflanzen nicht bereits im Jahr des Dürrestresses, sondern erst verzögert im darauffolgenden Jahr. Es fanden sich keine lokalen Anpassungen unter Erwärmung und Dürre. Jedoch ließen sich Unterschiede zwischen den Herkünften bezüglich der Frosthärte zum kältesten Zeitpunkt des Jahres nachweisen. Herkünfte aus Gebieten mit kälteren Wintern wiesen eine erhöhte Frosttoleranz auf.

Reaktionen der Flaumeiche auf Extremereignisse

Die Flaumeiche ist eine submediterran weit verbreitete Baumart, die in Mitteleuropa unter aktueller Klimaerwärmung zunehmend in den Wäldern gefunden wird. Ebenso wie die Schwarzkiefer bietet sie sich als waldbauliche Alternative auf Trockenstandorten an. Die untersuchten Herkünfte aus Deutschland, Ungarn, Bulgarien und Italien zeigten Unterschiede in der Reaktion ihrer Wuchslleistung und im Überleben bei extremer Dürre. Lokale Anpassung an Erwärmung sowie in der Frosthärte konnten festgestellt werden. Herkünfte aus Gebieten mit kälterem Frühjahr wiesen eine erhöhte Spätfrosttoleranz auf.

Fazit und Anpassungsstrategien

Innerhalb des Verbreitungsgebietes mitteleuropäischer Schlüsselarten unterscheiden sich Herkünfte teils erheblich, z. B. in der Wuchslleistung. Lokale Anpassungen in Herkunftsgebieten wurden besonders bei Auftreten von



◀ Abbildung 4
Gras- und Buchenherkünfte unter erwärmten Bedingungen (schwarzer Boden, zusätzliche Infraroterwärmung)

Frost und Spätfrost gefunden. Im Hinblick auf die erwartete Erwärmung und sommerliche Trockenheit besteht noch Forschungsbedarf. Unterschiede zwischen Arten bezüglich ihrer innerartlichen Variabilität sind erheblich und ein geographischer Bezug zeichnet sich kaum ab.

Die gezielte Nutzung innerartlicher Vielfalt kann ein Werkzeug zur Vermeidung ungewünschter Folgen des Klimawandels in der Land- und Forstwirtschaft sein. Die untersuchten Schlüsselarten besitzen innerhalb ihrer Verbreitungsgebiete ein erhebliches Potential, um heimische Ökosysteme auch unter verändertem Klimabedingungen zu erhalten bzw. anzupassen. Zum jetzigen Zeitpunkt können noch keine Aussagen zur gezielten Auswahl geeigneter Populationen gegeben werden. Es wird empfohlen, die genetische Vielfalt innerhalb von Arten zu erhalten. Die Biodiversität stellt einen Schlüssel zur Anpassung von Wald- und Wiesen-Ökosystemen an klimatische Veränderungen dar.

Veröffentlichungen

Beierkuhnlein, C, Thiel D, Jentsch A, Willner E, Kreyling J (2012)

Ecotypes of European grass species respond specifically to warming and extreme drought. *Journal of Ecology* 99: 703–713

Kreyling J, Thiel D, Simnacher K, Willner E, Jentsch, A, Beierkuhnlein C (2012a) Ecotypic differentiation and past climatic experience influence the response to late spring frost in four common grass species of Central Europe. *Ecography* 35: 268–275

Kreyling J, Thiel D, Nagy I, Huber G, Konnert M, Jentsch, A, Beierkuhnlein C (2012b) Late frost tolerance of juvenile *Fagus sylvatica* is affected by preceding air temperature and differs between southern Germany and Bulgaria. *European Journal of Forest Research* 131: 717–725



▲ Abbildung 5
Simulation von Dürre und Erwärmung im Experiment (Universität Bayreuth)
(Foto: Carsten Schaller)



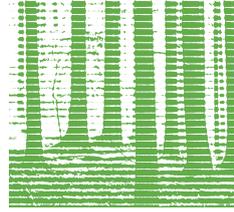
FORCAST Teilprojekte 2|3|13|14

Wald



Abbildung 1 ►
Oberhalb von 1100 m ü.NN
findet man im Bayerischen
Wald noch die typische
natürliche Ausprägung des
Fichten-Hochlagenwaldes
(Foto: Blaschke, LWF).

FORCAST Teilprojekt 2	Artenwandel im Höhengradienten als Modell für Veränderungen der Biodiversität im Klimawandel
Forschungseinrichtung	Technische Universität München, Fachgebiet Geobotanik
Ansprechpartner	Prof. Dr. Anton Fischer
E-Mail	a.fischer@wzw.tum.de
Bearbeiter/Autoren	Markus Blaschke, Johannes Bradtka, Heinz Bußler, Hagen Fischer, Stefan Müller-Kroehling, Helge Walentowski, Anton Fischer



Artenwandel im Höhengradienten als Modell für Veränderungen der Biodiversität im Klimawandel

Naturwaldreservate liefern Hinweise auf die zukünftige Waldentwicklung

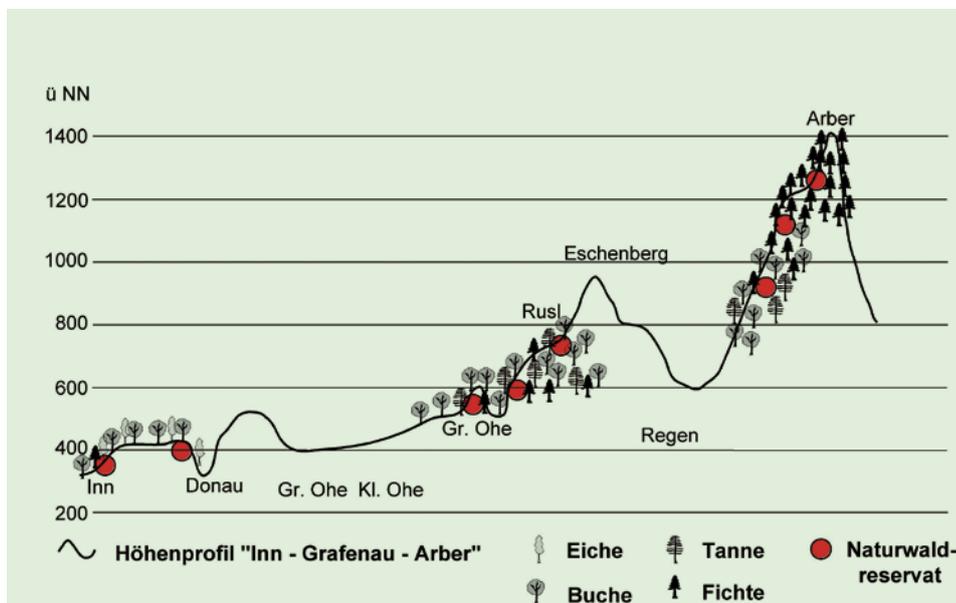
Eine Vorstellung der Auswirkung des Klimawandels auf die Verbreitung von Arten erhält man, wenn man die Änderung der Artenzusammensetzung im Höhengradienten betrachtet. Am Beispiel einer Reihe von Naturwaldreservaten im Bayerischen Wald wird deutlich, dass Arten unserer Breiten bislang in den regionalen kühleren Bereichen der höheren Berglagen leben, in Zukunft vermutlich „nach oben“ wandern werden. Generell werden viele Arten in die Gebirge zurückgedrängt; für viele der bisher dort lebenden wird der Lebensraum möglicherweise knapp.

Naturwaldreservate als ungenutzte Wälder dienen als Grundlage für die Anlage eines Höhengradienten im Bayerischen Wald von den Tieflagen an Donau und Inn bis in die Hochlagen am Großen Arber. Auf jeweils sechs Probekreisen in acht ausgewählten Naturwaldreservaten wurden die vorkommenden Arten aus sieben verschiedenen Artengruppen erfasst: von den sehr „mobilen“ Vögeln über die nur eingeschränkt beweglichen Laufkäfer, holzbesiedelnden Käfer und Schnecken bis zu den fest verankerten Pflanzen, Flechten und Holzpilzen. An ökologischen, für diese Organismen essentiellen Umweltvariablen wurden vor Ort Bodenparameter (z. B. pH-Wert), Waldstandesparameter (z. B. Baumartenzusammensetzung und Totholzmenge) sowie Witterungsdaten (z. B. Lufttemperatur und Luftfeuchte) erhoben. Mittels Modellen lassen sich aus großräumigen Klimaparametern (z. B. des Deutschen

Wetterdienstes) detaillierte Witterungsdaten für den jeweiligen Probekreis ableiten.

Die Naturwaldreservate sind ein gutes Abbild des natürlichen Waldkleides

Die Baumarten auf den zufällig ausgewählten Probepunkten in den im Höhengradienten angeordneten Naturwaldreservaten spiegeln die klassische Baumartenzusammensetzung und damit die Waldtypen mit ansteigender Meereshöhe exakt wider: in den Lagen unterhalb 500 m ü.NN der typische Laubmischwald mit Dominanz der Buche und mit Beimischungen von Eiche und Esche, zwischen 500 und 1100 m ü.NN der Bergmischwald mit Buche, Fichte und Tanne, in den Hochlagen, z. B. am Arber, der Fichtenwald mit wenig eingestreuter Vogelbeere.



◀ Abbildung 2
Die Lage der untersuchten Naturwaldreservate im Höhengradienten des Bayerischen Waldes.

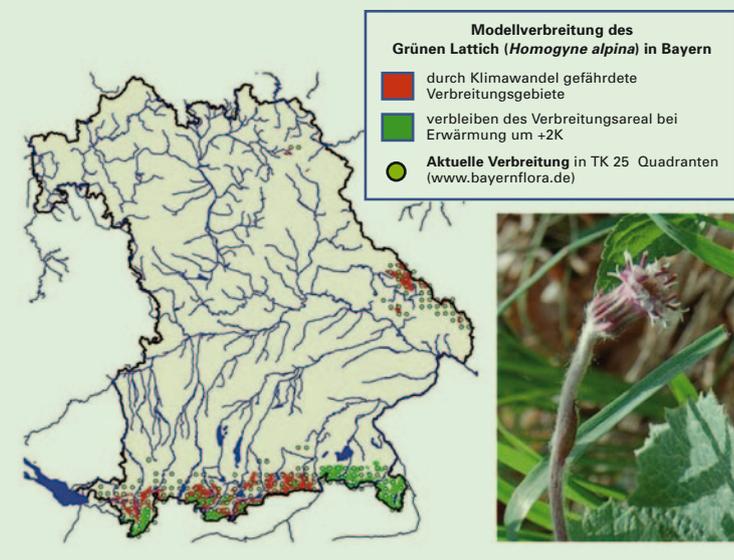
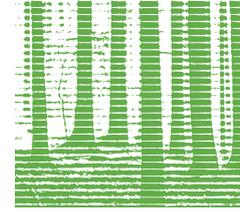


Abbildung 3 ▲
Die Steife Koralle (*Ramaria stricta*) gehört zu den auffälligeren Pilzen unter den Holzersetzer im Höhengradienten (Foto: Blaschke, LWF).

Abbildung 4 ►
Die Berg-Troddeblume (*Sodanella montana*) wird sicher zu den Verlierern des Klimawandels zählen (Foto: Blaschke, LWF).

Abbildung 6 ▼
Das Naturwaldreservat Seeloch reicht vom kleinen Arbersee bis unter den Gipfel des Arbers (Foto: Blaschke, LWF).





◀ **Abbildung 5**
Modellhafte Verbreitung nach den Erhebungen im Höhengradient Bayerischer Wald für den Grünen Alpenlattich (*Homogyne alpina*) im Vergleich zu den vorhandenen Kartierungsergebnissen für Bayern (Foto: Blaschke, LWF, Grafik: LWF).

Alle Artengruppen haben ihre Klimazeiger

Alle Artengruppen konnten artenreich nachgewiesen werden: die Holzpilze mit 265 Arten, die holzbesiedelnden Käfer mit 170, die Vögel mit 55, die Schnecken mit 46, die Laufkäfer mit 40 Arten, die Gefäßpflanzen mit 90 und die Flechten mit 79 Arten. Bei den meisten Organismengruppen (holzbesiedelnde Pilze, Vögel, Schnecken und Laufkäfer) nimmt die Gesamtartenzahl je Probestfläche mit zunehmender Höhenlage bzw. abnehmender Temperatur ab. Eine Zunahme mit der Höhe ist nur bei den epiphytischen Flechten und epigäischen Moosen festzustellen. Derartige Biodiversitätsmuster (insgesamt abnehmende Artenzahlen, aber zunehmende Vielfalt bei den auf hohe Luftfeuchte angewiesenen Moosen und Flechten) sind auch in anderen Vegetationszonen der Erde zu beobachten und wurden z. B. auch bei Höhengradienten-Forschungen in tropischen Waldökosystemen festgestellt (Fischer et al. 2011). Über den ganzen Höhengradienten gleichmäßig verteilt waren die Artenzahlen auf den Probestflächen bei den Gefäßpflanzen und den holzbesiedelnden Käfern. In allen Gruppen fanden sich Arten, die innerhalb des Höhengradienten eine mehr oder weniger deutliche Vorkommengrenze entweder nach oben oder nach unten haben; diese Arten lassen sich im Rahmen von Wiederholungsaufnahmen bzw. bei Modellierungen zukünftiger Temperaturzustände als Klimazeiger heranziehen.

Beispiele für solche Klimazeiger in unseren Breiten sind bei den Pflanzen der Siebenstern (*Trientalis europaea*), der Grüne Alpenlattich (*Homogyne alpina*) und die Berg-Trodelblume (*Soldanella montana*), bei den Flechten *Parmeliopsis hyperopta* bei den Schnecken die Gefleckte Schüsselschnecke (*Discus rotundatus*), bei den Pilzen der Grünblättrige Schwefelkopf (*Hypholoma fasciculare*) und unter den Vogelarten die Blaumeise (*Cyanistes caeruleus*). Aus den ermittelten Klimagrenzen lassen sich auch Verbreitungsmodelle für die Arten für größere Regionen erstellen.

Nicht nur die Verbreitung einzelner Arten ist an bestimmte Höhenstufen gebunden. Eine Verschneidung statistischer Analysen zur Untersuchung von Ähnlichkeitsstrukturen mit erklärenden Parametern macht deutlich, dass sich die untersuchten Organismengruppen zusammen in ihrer Artenzusammensetzung ändern, und zwar in erster Linie abhängig von der Höhe über dem Meeresniveau bzw. der damit eng verbundenen Jahresdurchschnittstemperatur.

Eine Anpassung ist notwendig, muss aber behutsam erfolgen

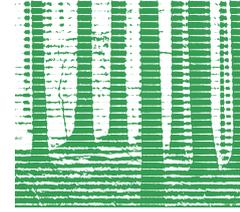
Im Wirtschaftswald, in dem der Waldbesitzer nutzend eingreift, sind diese Zukunftsprognosen angemessen zu berücksichtigen, insbesondere bei der Baumartenwahl in einer vom Klimawandel geprägten Umwelt. Dabei sollte bei der Verjüngung von Waldbeständen den nachrückenden Arten Raum zur Ausbreitung gegeben werden. Aber auch die Baumarten der aktuellen potentiell natürlichen Vegetation sind immer noch in den entsprechenden Höhenlagen zu berücksichtigen, um den daran hängenden Arten eine Möglichkeit zu geben, sich an die Veränderungen anzupassen.

Literatur

- Blaschke, M. & Bußler, H. (2012): Borkenkäfer und baumschädigende Holzpilze in einem Höhengradienten des Bayerischen Waldes, Forstschutz-aktuell (54), S. 10–15
- Bußler, H.; Blaschke, M. & Walentowski, H. (2010): Bemerkenswerte xylobionte Käfer in Naturwaldreservaten des Bayerischen Waldes (*Coleoptera*), Entomologische Zeitschrift, 120 (6), S. 263–268
- Fischer A.; Blaschke, M. & Bässler, C. (2011): Altitudinal gradients in biodiversity research: the state of the art and future perspectives under climate change aspects, Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz, 8 (11), S. 35–47

Abbildung 1 ►
Bohrkern-Entnahme
an einer Eiche (Quelle:
Cathrin Meinardus)





FORCAST Teilprojekt 3	Auswirkungen extremer Dürrejahre auf Waldökosysteme in Nordbayern
Forschungseinrichtung	Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Physische Geographie
Ansprechpartner	Prof. Dr. Achim Bräuning
E-Mail	abraeuning@geographie.uni-erlangen.de
Bearbeiter/Autoren	Cathrin Meinardus und Achim Bräuning

Auswirkungen extremer Dürrejahre auf Waldökosysteme in Nordbayern

Reaktionen von Rotbuche und Traubeneiche auf Trockenstress

Dürreereignisse werden in Zentraleuropa in Zukunft häufiger auftreten und extremer ausgeprägt sein. Diese Klimaveränderungen können sich auch auf die Artenzusammensetzung und die Bewirtschaftung der heimischen Wälder auswirken. Es wurde mit → dendroökologischen Methoden untersucht, wie Rotbuchen und Traubeneichen auf extreme Trockenereignisse reagiert haben und wie viel Zeit sie jeweils benötigen, um sich von Dürreereignissen zu erholen.

Durch den Klimawandel werden sich die Wuchsbedingungen für die heimischen Wälder deutlich verändern. Klimamodelle prognostizieren, dass sich im Laufe des nächsten Jahrhunderts nicht nur die Temperaturen weiter erhöhen werden, es wird auch häufiger zu trockeneren und wärmeren Sommern kommen.

Fragestellung

Die häufigeren Trockenstressbedingungen werden sich vermutlich negativ auf die Vitalität, Stabilität und Produktivität der europäischen Wälder auswirken, wobei besonders das Anpassungspotential der Rotbuche kontrovers diskutiert wird (z. B. Suttmöller et al. 2008). Es wurde daher untersucht, wie sich extreme Dürrejahre in der Vergangenheit auf die beiden Baumarten Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Traubeneiche (*Quercus petraea*) ausgewirkt haben und wie viel Zeit Buchen und Eichen benötigen, um sich von einem Dürrejahr zu erholen. Damit soll eingeschätzt werden, ob diese wichtigen Nutzbaumarten unter den zukünftigen Klima-

bedingungen weiterhin an Trockenstandorten gedeihen können oder welche der beiden Arten möglicherweise einen → Konkurrenzvorteil aus den veränderten Klimabedingungen ziehen kann.

Methoden

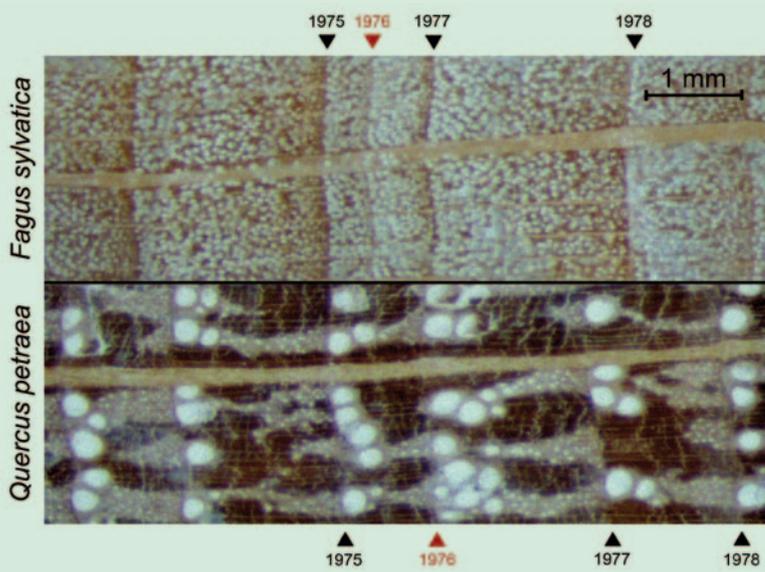
In den Jahrringen von Bäumen sind Informationen über die Wachstumsbedingungen zum Zeitpunkt der Jahrringbildung gespeichert. Über die Analyse verschiedener Holzparameter (u. a. Jahrringbreite, maximale Spätholzdichte, holzanatomische Merkmale) kann die Reaktion eines Baumes auf klimatische Extremjahre untersucht werden. So spiegeln sich ungünstige Wachstumsbedingungen, z. B. durch Dürrejahre verursacht, häufig in schmalen Jahresringen wider. Im Rahmen des Projektes wurden Buchen und Eichen an neun Standorten in Nordbayern untersucht (Abb. 1 und 2). Das monatliche Dickenwachstum der Bäume wurde über zwei Jahre mit Band-Dendrometer gemessen (Abb. 3).

Abbildung 2 ►
Untersuchungsstandort Ebrach
(Quelle: Cathrin Meinardus)



Abbildung 3 ►►
Band-Dendrometer an einer Eiche
(Quelle: Cathrin Meinardus)





◀ Abbildung 4

Vergleich der Erholungsreaktion von Rotbuche und Traubeneiche nach dem Trockenjahr 1976 (Meinardus und Bräuning 2011, verändert)

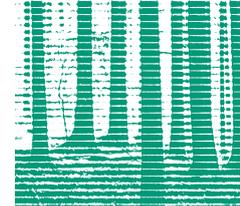
Ergebnisse und Anpassungsstrategien

- Die Jahrringbreiten-Chronologien zeigen, dass Buchen und Eichen an den verschiedenen Standorten eine hohe Übereinstimmung innerhalb ihrer Art aufweisen. Zwischen den beiden Baumarten sind jedoch deutliche Unterschiede zu erkennen.
- Die Übereinstimmung markanter Wachstumseinbrüche ist gering, was auf eine artspezifische Reaktion auf Trockenstress schließen lässt. Extreme Dürrejahre, wie z. B. 1976, sind jedoch in den Chronologien beider Baumarten als deutliche Wachstumseinbrüche zu erkennen (Abb. 4).
- Statistische Analysen zeigen, dass die Buche viel empfindlicher auf Trockenheit reagiert als die Eiche. Während das durchschnittliche Wachstum der Eichen in Dürre Jahren kaum geringer ist als in normalen Jahren, zeigt die Buche in extrem trockenen Jahren und/oder im Folgejahr an den meisten Standorten einen deutlichen Wachstumseinbruch. Ihr ursprüngliches Wachstumsniveau erreicht die Buche erst wieder im zweiten Folgejahr nach dem Dürreereignis (Abb. 4), während die Eiche bereits im Jahr nach einem Trockenereignis wieder normale Zuwachsraten aufweist (Lasermann & Bräuning 2011).
- Aufgrund des künftig erhöhten Vorkommens und der Intensität von Trockenjahren in Zentraleuropa erscheint es empfehlenswert, an trockenheitsgefährdeten Standorten zukünftig eher Eichen als Buchen anzupflanzen.
- Mischbestände würden die Stabilität von Waldökosystemen zusätzlich fördern. Dabei sind einerseits Bestände gemeint, die sich aus verschiedenen trockenheitsresistenten Baumarten zusammensetzen, andererseits könnte auch eine Mischung verschiedener Herkünfte der gleichen Baumart zu einer höheren Anpassungsfähigkeit und somit zu einer höheren Stabilität des Ökosystems beitragen.

Literatur

- Lasermann B, Bräuning A (2011) The manifestation of drought events in tree rings of beech and oak in northern Bavaria (Germany). TRACE 9, S. 42–47.
- Meinardus C, Bräuning A (2011) Zur Trockenstresstoleranz von Eichen und Buchen. Erholungsreaktionen der Rotbuche und der Traubeneiche nach Dürre Jahren. LWF aktuell 85, S. 9–11.
- Sutmöller J, Spellmann H, Fiebiger C, Albert M (2008) Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Buchenwälder in Deutschland. Beiträge aus der NW-FVA 3, S. 135–158.

FORCAST Teilprojekt 13	Wie Dürre-resistent sind Bayerns Wälder?
Forschungseinrichtung	Technische Universität München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde
Ansprechpartner	Prof. Dr. Hans Pretzsch
E-Mail	hans.pretzsch@lrz.tu-muenchen.de
Bearbeiter/Autoren	Tobias Mette, Thomas Rötzer, Hans Pretzsch



Wie Dürre-resistent sind Bayerns Wälder?

Wie Forschung die Reaktion von Wäldern auf Dürre misst und Empfehlungen für die Praxis ableitet

Der Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der TU München setzt sich seit Jahren verstärkt mit den Folgen des Klimawandels für den Waldstandort Bayern auseinander. Einen Schwerpunkt, der hier an drei Beispielen jüngster Forschung aufgezeigt wird, bildet die Reaktion unserer Bäume und Wälder auf Extremereignisse, wie Dürren.

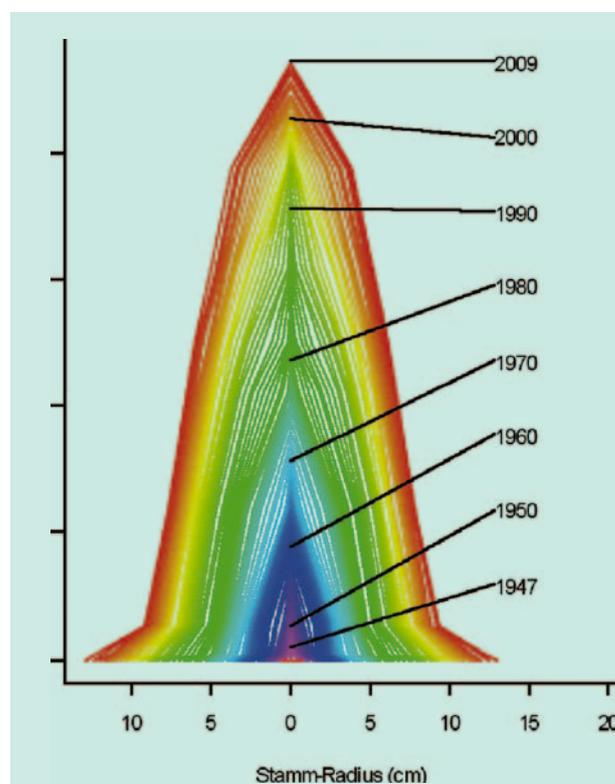
Wie kein zweiter Wirtschaftszweig ist die Forstwirtschaft durch ihre langen Produktionszeiträume zu vorausschauendem Handeln aufgerufen und braucht dazu wissenschaftliche Begleitung. Zunehmende Trockenheit und Dürren können beispielsweise die Struktur und Zusammensetzung unserer Wälder und damit ihre Produktivität stark verändern. Schreckens-Szenarien, wie sie im Zuge der Waldschadensdiskussion in den 1980/90ern an die Wand gemalt wurden, sind glücklicherweise bislang ausgeblieben. Allerdings ist dies kein Grund zur Ruhe, und die Forstwissenschaft bemüht sich schon heute, die Herausforderungen des zukünftigen Klimas zu verstehen und ihnen zu begegnen.

In zwei der drei folgenden Studien wird die Dürre-Resilienz von Baumarten in Rein- und Mischwäldern Bayerns untersucht. Auch wenn sich diese Wälder als derzeit relativ stabil darstellen, können diesbezüglich Unterschiede zwischen den Arten und Waldtypen aufgezeigt werden. Wie wichtig diese Unterschiede für zukünftige Klima-Szenarien sind, wird in der dritten Studie deutlich, die mithilfe eines Waldwachstumsmodells die Entwicklung von Eichen-Buchenwäldern in Nordwestbayern bis 2100 zeigt.

Stammanalysen aus Ostbayern zeigen: das Dürre-Jahr 2003 wurde gut verkraftet

Die Stammanalyse ist eine Methode der Waldwachstumskunde, in der über Jahrring-Messungen in verschiedenen Höhenabschnitten der dreidimensionale Zuwachs eines Baums zurückverfolgt werden kann (siehe Abb. 1). Schlechte, z. B. trockene Jahre bilden nur schmale Jahrringe und sind bei gestressten Bäumen im unteren Stammabschnitt stärker ausgeprägt als im Kronenraum.

Untersucht wurden insgesamt 113 Fichten, Kiefern und Buchen aus den Regionen Kelheim, Regensburg und Weiden hinsichtlich ihrer Zuwachsreaktion im extremen Dürre-Sommer 2003. Diese Probestämme wiesen Zuwachseinbrüche von bis zu 50 % im Jahr 2003 auf, wobei Fichte im Durchschnitt stärker betroffen war als Buche und Kiefer. Sowohl die Tatsache, dass der Ein-



▲ Abbildung 1

Stammanalysen erlauben eine dreidimensionale Rekonstruktion des Stammwachstums durch Jahrring-Messungen in verschiedenen Höhenabschnitten. Bei der Darstellung wird der Durchmesser gegenüber der Höhe stark vergrößert und verleiht dem Stamm ein „patronenhaftes“ Aussehen.



◀ **Abbildung 2**
Ca. 120-jähriger Eichen-Buchen
Mischbestand im Spessart
(© L. Steinacker)

bruch im unterem Stammabschnitt nicht stärker war als in der Krone, als auch die gute Erholungsreaktion sind allerdings Indikatoren, dass die → Dürre-Resilienz unserer Bäume unter den derzeitigen Klimabedingungen mit vereinzelt Trockenjahren noch relativ hoch ist.

Sind Mischbestände weniger Dürre-empfindlich?

Baumarten in Mischbeständen weisen eine weitaus komplexere Wuchsdynamik auf als in Reinbeständen. Trotz eines großen Wissensdefizits werden Mischbestände als eine Versicherung gegen ungewisse Klimarisiken empfohlen gemäß dem Grundsatz: „Diversität stabilisiert.“ Dabei ist es allerdings auch denkbar, dass der zwischenartliche Konkurrenzdruck unter verstärktem Klimastress zu Produktivitätseinbußen führt.

Um die Widerstandsfähigkeit von Fichte, Buche und Eiche gegenüber Dürre im Mischbestand und Reinbestand zu vergleichen, wurde in einer Jahrring-Studie die Dürre-Empfindlichkeit von insgesamt 559 Fichten, Buchen und Eichen gemessen. Dabei stellte sich heraus, dass die Empfindlichkeit von Fichte und Eiche im Reinbestand und in Mischung mit Buche unverändert blieb. Buche jedoch profitierte von einer Mischung mit Fichte und besonders mit Eiche im Vergleich zum Reinbestand. In Bezug auf die Eichen-Buchen-Mischung wird vermutet, dass die höhere Wasserverfügbarkeit der tiefwurzelnden Eiche auch der Buche zugute kommt.

Waldwachstumsmodelle bilden schon heute das zukünftige Wachstum ab

Waldwachstumsmodelle sind heute ein Standardwerkzeug der Forstbetriebsplanung. Sie bilden Wachstum und Mortalität von Einzelbäumen und Beständen in Abhängigkeit von Klima und Boden und der Konkurrenzsituation ab. In einer projektübergreifenden Studie wurde das Modell SILVA des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde dazu verwendet, die Entwicklung von Eichen-Buchen-Mischbeständen in der heute schon warm-trockenen Region um Schweinfurt unter zukünftige Klimaszenarien darzustellen.

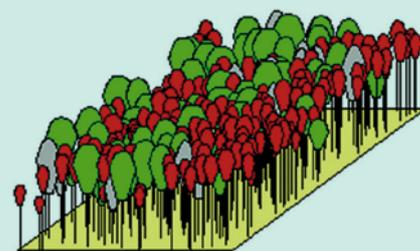
Die Modell-Ergebnisse zeigen, dass bei zunehmender Trockenheit zwar die Eichen im Vorteil gegenüber den Buchen sind. Allerdings sind auch sie keine wirklichen Gewinner und müssen Verluste in Produktivität und → Standort-Tragkraft hinnehmen. An solchen Standorten ist mittelfristig sicherlich die weitere Förderung der Eiche mit Einbringung trocken-resistenter Mischungsarten, wie Hainbuche, Elsbeere, Winterlinde oder auch Esskastanie, zu empfehlen.

Literatur

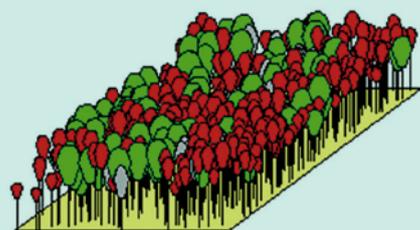
Mette T, Pretzsch H, Rötzer T (2012). Modellierung der Mortalität der Hauptbaumarten auf Individual- und Bestandesebene in Abhängigkeit von Umweltbedingungen (TP13). Endbericht zum Forschungsverbund FORKAST (TP 13), 169–186

Pretzsch H, Schütze G, Uhl E (2012). Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by interspecific facilitation. *Plant Biology*, DOI: 10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x

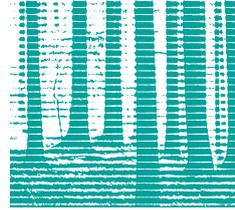
Abbildung 3 ▶
Modellhafte Entwicklung eines Eichen-Buchen-Mischbestands bei Schweinfurt unter dem heutigen und zukünftigen Klima (Waldwachstumsmodell SILVA: Eichen in rot, Buchen in grün, Nebenbaumarten in grau).



Im Vergleich zum heutigen Klima resultiert die Simulation unter dem zukünftigen Klima in deutlich geringeren Baumdimensionen und mehr Eichenanteil.



FORCAST Teilprojekt 14	Waldentwicklung im Klimawandel
Forschungseinrichtung	Universität Bayreuth, Juniorprofessur Biogeographische Modellierung
Ansprechpartner	Prof. Dr. Björn Reineking
E-Mail	klara.dolos@uni-bayreuth.de, bjoern.reineking@uni-bayreuth.de
Bearbeiter/Autoren	Klara Dolos, Björn Reineking



Waldentwicklung im Klimawandel

Modellierung als wertvolle Grundlage für Prognosen und Handlungsempfehlungen

Das Verständnis des Waldwachstums unter Berücksichtigung von innerartlicher Variabilität und → Störungsinteraktionen stellt eine Herausforderung für die Prognose der zukünftigen Entwicklung des Waldes im Klimawandel dar. Modellierungsstudien bilden dabei eine wertvolle Grundlage für ein besseres Verständnis und unterstützen eine wissenschaftlich basierte Ableitung von Handlungsempfehlungen.

Wälder sind zeitlich dynamische Ökosysteme. Ihre Struktur und Artzusammensetzung werden hauptsächlich von Umweltfaktoren, wie Klima und Boden, sowie dem Eintreten von Störungen bestimmt. Die Fähigkeit eines Waldes, auf Umweltveränderungen zu reagieren und seine Ökosystemdienstleistungen aufrecht zu erhalten, werden durch die Eigenschaften der vorkommenden Organismen beeinflusst. Für eine Einschätzung der Auswirkungen von Umweltveränderungen auf eine Art wird meist von durchschnittlichen Eigenschaften von z. B. Dürre- und Schattentoleranz ausgegangen.

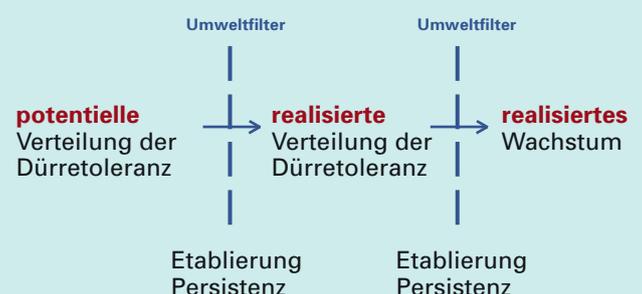
- Es wurde daher zuerst die Abhängigkeit des Baumzuwachses vom Klima, aber auch Konkurrenz, anhand von Waldinventurdaten modelliert.
- Da sich in realen Ökosystemen jedoch Individuen auch innerhalb derselben Art voneinander unterscheiden, war es ein weiteres Ziel, herauszufinden, wie sich Prognosen hinsichtlich der zukünftigen Waldentwicklung verändern, wenn innerartliche Variabilität berücksichtigt wird.
- Störungsregime, wie z. B. Borkenkäferkalamitäten und Feuer, sowie insbesondere ihre Interaktionen stellen den dritten Themenkomplex dar, der innerhalb des Projektes bearbeitet wurde. Denn neben mittel- und längerfristigen Schwankungen der Umweltbedingungen prägen insbesondere durch Borkenkäfer, Windwurf, Dürre und in Zukunft voraussichtlich verstärkt auch durch Feuer hervorgerufene Störungsregime die Dynamik → temperater Wälder.

Waldwachstum in Bayern

Der Zuwachs eines Baumes ist Zeichen für dessen Vitalität und Leistungsfähigkeit. Er stellt für die Ökologie eine wichtige Größe dar, die die Überlebens- und Konkurrenzfähigkeit eines Baums widerspiegelt. Die Entwicklung des Wachstums in der Zukunft kann durch statistische Modelle prognostiziert werden, welche vor allem in der Forstwirtschaft als Entscheidungsgrundlage dienen. Zunächst wurde die Klimaabhängigkeit des Baumwachstums anhand bayerischer → Inventurdaten modelliert. Es zeigte sich, dass aufgrund der großen individuellen Variabilität des Baumwachstums ein größerer Datensatz notwendig ist, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten. Daher wurde die deutschlandweite Bundeswaldinventur II in die Berechnungen einbezogen, um Zuwachskarten für das Gebiet Bayerns für das aktuelle Klima und ein ausgewähltes, zukünftiges Klimaszenario zu erstellen.

▼ Abbildung 1

Eine Art besitzt eine potentielle Variabilität, die sich aus genetischer und *phänotypischer* Variabilität zusammensetzt. Durch Umwelteinflüsse werden während der Anwachsphase angepasste Individuen selektiert. Der Prozess der Selektion setzt sich während der gesamten Lebenszeit des Organismus fort und hat Auswirkungen auf weitere Arteeigenschaften, z. B. das Wachstum.



In einer Kooperation mit den FORKAST-Partnern wurden außerdem das Waldwachstum und mögliche Auswirkungen des Klimawandels durch ein verändertes Dürreregime auf das Konkurrenzverhältnis von Buche (*Fagus sylvatica*) und Eiche (*Quercus petraea*) mit einem ganz anderen Ansatz untersucht (Mette et al. eingereicht). Dazu wurde für die Umgebung des Standorts „Schweinfurt“ der Bestand unter dem aktuellen Klima und ausgewählten Klimaszenarien mit dem Landschaftsmodell LandClim und dem Wachstumsmodell SILVA simuliert. Auf Basis dieser Studie lässt sich die Handlungsempfehlung ableiten, schon heute an von Dürrestress gekennzeichneten Grenzstandorten der Buche vermehrt die Eiche zu fördern.

Innerartliche Variabilität

Für eine Einschätzung der Auswirkungen von Umweltveränderungen, wie sie der Klimawandel verursacht, werden oftmals mittlere Arteigenschaften (z. B. Dürretoleranz, Wärmeansprüche) herangezogen. In realen Wäldern unterscheidet sich jedoch jeder einzelne Baum vom anderen. Bisher wurde innerartliche Variabilität in Modellierungsansätzen auf Landschaftsebene kaum berücksichtigt und das Potential dieser Variabilität für die Anpassung bestehender Wälder an das für die Zukunft prognostizierte Klima nur unzureichend bewertet.

- Der Effekt innerartlicher Variabilität auf Modellprognosen wird derzeit mittels des Landschaftsmodells LandClim am Beispiel der Dürretoleranz untersucht. Die bayerischen Populationen der Buche (*Fagus sylvatica*) und Fichte (*Picea abies*) dienen in einer Simulationsstudie als Modellarten. Durch Einbeziehung der Variabilität in die Modellierung wird die Biomasse entlang eines Dürrestress-Gradienten stabilisiert. Negative Konsequenzen von Veränderungen des Dürreregimes können so abgemildert werden.

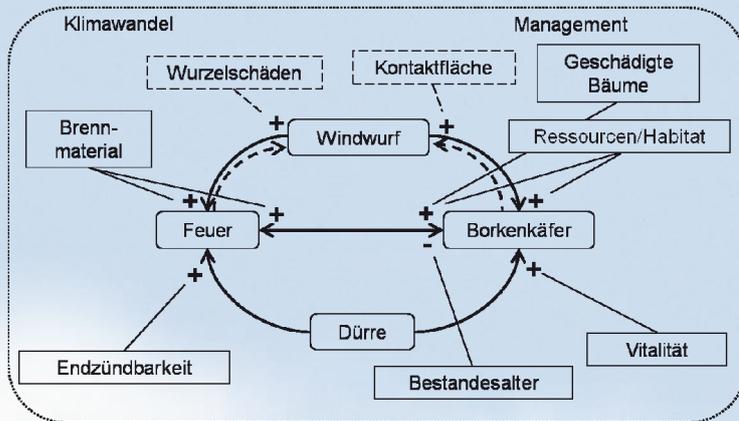
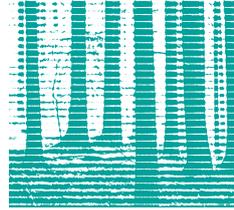
Interaktionen zwischen Waldstörungsregimen

Jedes Waldökosystem besitzt ein eigenes → Störungsregime, das Waldstruktur und Verjüngung wesentlich beeinflusst. Interaktionen zwischen einzelnen Störungen und mögliche positive wie negative Rückkoppelungen machen eine Abschätzung von Risiken für Wälder unter dem zukünftig erwarteten Klima zu einer Herausforderung.

- Auf der Basis bisheriger Studien wurde ein Konzept der Interaktionen zwischen den vier wichtigsten Störungsregimen Borkenkäfer, Windwurf, Dürre und Feuer entworfen (Abb. 2 und 3). Dieses wurde im Rahmen eines mathematischen Modells formuliert (Dolos & Reineking eingereicht). Dabei zeigte sich, dass auch dann ein stabiles Gleichgewicht zwischen Waldbestand und Störungsflächen entstehen konnte, wenn sich alle Störungen gegenseitig verstärken. Die vorgestellten Studien zu den Themenkomplexen Waldwachstum, innerartliche Variabilität und Störungsregime verdeutlichen, dass die Untersuchung vergangener und aktueller Walddynamik im Hinblick auf die zukünftige Waldentwicklung ein spannendes Forschungsfeld darstellt.
- Diese Themen haben einen fundamentalen Einfluss auf die Prognose zukünftiger Walddynamik im Klimawandel. Sie sind von zentraler Bedeutung für ein verbessertes Verständnis dieser Prozesse und die Ableitung sinnvoller Handlungsempfehlungen.

Literatur

- Dolos K, Reineking B (eingereicht) Towards a better understanding of forest disturbance interactions: Lessons from a strategic mathematical model.
- Mette T, Dolos K, Meinardus C, Bräuning A, Reineking B, Blaschke M, Pretzsch H, Beierkuhnlein C, Gohlke A, Wellstein C (eingereicht) Climatic turning point for beech and oak under predicted climate change in Central Europe.
-



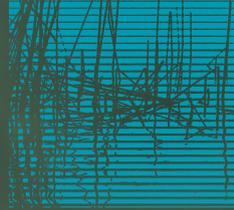
◀ Abbildung 2

Auf Grundlage einer Literaturstudie wurde ein konzeptionelles Störungsinteraktionsmodell entworfen. Es zeigt, dass positive Interaktionen überwiegen und dass zwei Feedback-Schleifen bestehen. In einem zweiten Schritt wurde das konzeptionelle Modell in ein strukturell einfaches, mathematisches Modell umgesetzt.



◀ Abbildung 3

Windwurf am „Lotharpfad“ an der Schwarzwaldhochstraße.



FORCAST Teilprojekt 9

Gewässer

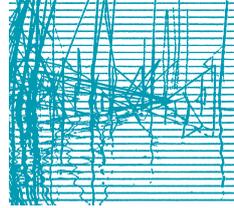


▲ **Abbildung 1**
Die Schmalblättrige Wasserpest
(*Elodea nuttallii*)



◀ **Abbildung 2**
Das Nixkraut
(*Najas marina*)

FORCAST Teilprojekt 9	Klimawandel begünstigt invasive Wasserpflanzen
Forschungseinrichtung	Technische Universität München, Limnologie
Ansprechpartner	Prof. Dr. Arnulf Melzer
E-Mail	arnulf.melzer@wzw.tum.de
Bearbeiter/Autoren	Arnulf Melzer, Uta Raeder, Markus Hoffmann, Tobias Klein, Stefan Zimmermann



Klimawandel begünstigt invasive Wasserpflanzen

Schmalblättrige Wasserpest (*Elodea nuttallii*), Nixkraut (*Najas marina*) und Wasserpflanzen aus wärmeren Regionen breiten sich in bayerischen Seen aus

In Gewässern beeinflussen die durch den Klimawandel bedingten erhöhten durchschnittlichen Wassertemperaturen die → aquatischen Lebensgemeinschaften nachhaltig. Im Uferbereich von Seen profitieren bestimmte Wasserpflanzen wie z. B. die Schmalblättrige Wasserpest und das Nixkraut von der Erwärmung. Dadurch werden die Struktur und das Nahrungsnetz und damit die Ökologie dieses Lebensraums empfindlich gestört. Die Ausbreitung dieser Wasserpflanzen wirkt sich auch wirtschaftlich auf die Schifffahrt, die Fischerei und den Erholungsverkehr aus.

Klimawandel wirkt sich in Seen anders aus als an Land

Der durch den Menschen verursachte Klimawandel ist eine weltweit zu beobachtende Tatsache und seine Auswirkung auf die Biozönosen unbestritten (IPCC 2007). In Zukunft werden zunehmend extreme Wetterereignisse erwartet. Es muss vermehrt mit langanhaltender Trockenheit, mit extremen Windereignissen und mit Hochwassern gerechnet werden.

Im Gegensatz zu Landökosystemen sind Gewässer allerdings sehr gut gegen klimatische Extreme gepuffert. In stehenden Gewässern spielen vor allem erhöhte Mittelwerte der Wassertemperaturen eine große Rolle. Zahlreiche Studien belegen, dass die mittleren Wassertemperaturen von Seen seit ca. Mitte der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts stiegen (z. B. Dokulil et al. 2006). Da für das 21. Jahrhundert stärkere Erwärmungen erwartet werden, wird sich dieser Effekt noch verstärken. Die Erwärmung wirkt sich u. a. auf die Zusammensetzung der Wasserpflanzen im Uferbereich von Seen aus, die wichtige Aufgaben für die aquatischen Lebensgemeinschaften übernehmen. Die Unterwasservegetation dient sowohl als Strukturbildner für den Lebensraum als auch als Nahrungsgrundlage für zahlreiche Tierarten, wie z. B. für Insektenlarven, Schnecken, Muscheln, Amphibien und Reptilien, sowie für Fische.

Derzeit breiten sich zwei Wasserpflanzen rasant in bayerischen Gewässern aus, die in unterschiedlicher Weise durch den Klimawandel gefördert werden.

Schmalblättrige Wasserpest (*Elodea nuttallii*) profitiert von höheren Wassertemperaturen im Winter

Die Schmalblättrige Wasserpest wurde Mitte des letzten Jahrhunderts in Europa eingeschleppt und breitet sich seitdem intensiv aus (Abb. 1). Es gelangten allerdings

nur weibliche Pflanzen nach Europa, so dass die Verbreitung rein auf vegetativer Teilung beruht. Die Regenerationsfähigkeit der Schmalblättrigen Wasserpest ist extrem groß. Selbst aus kleinsten Sprosstücken entstehen wieder neue Pflanzen, die auch bei niedrigen Temperaturen und vergleichsweise schlechten Lichtverhältnissen wachsen können. Aufgrund dieser Tatsachen profitiert diese Wasserpflanzenart von den höheren mittleren Wassertemperaturen im Winter. Viele Seen frieren nur noch kurz oder gar nicht mehr zu. Auch wenn die Schmalblättrige Wasserpest ihr Wachstum und ihre vegetative Vermehrung bei niedrigeren Temperaturen verlangsamt, gedeiht sie weiterhin. Auf diese Weise kann sie sich in der Konkurrenz durchsetzen, da die Schmalblättrige Wasserpest bereits große Bestände ausbilden kann, bevor im Frühsommer das Wachstum anderer Wasserpflanzen einsetzt.

Nixkraut (*Najas marina*) wird durch wärme Gewässer im Sommer gefördert

Das Nixkraut (*Najas marina*) ist eine heimische, wärme-liebende Art (Abb. 2). Es ist eine einjährige Wasserpflanze, die zweihäusig ist. D. h. männliche und weibliche Blüten entwickeln sich auf verschiedenen Pflanzen. Damit sich das Nixkraut vermehren kann, müssen in einer Vegetationsperiode Samen auskeimen und sich zu männlichen und weiblichen Pflanzen entwickeln. Der Pollen der männlichen Pflanzen muss erfolgreich auf die Blüten der weiblichen Pflanzen übertragen werden und die befruchteten Blüten müssen schließlich zu neuen Samen heranreifen. Die Untersuchungen in Laborexperimenten und im Freiland durch Forschungstaucher (Abb. 3) haben gezeigt, dass die Samen erst ab einer Wassertemperatur von 15 °C auskeimen und ab 20 °C

deutlich besser wachsen (Abb. 4) und früher Blüten ausbilden. Aus befruchteten Blüten reifen nur dann keimfähige Samen heran, wenn die Wassertemperatur lange genug über 20 °C liegt.

Früher erwärmten sich nur wenige bayerische Seen über einen längeren Zeitraum auf entsprechende sommerliche Wassertemperaturen, so dass das Nixenkraut zu den seltenen und geschützten Arten zählte. Infolge des Klimawandels verlängern sich die Vegetationsperioden in Seen und zunehmend mehr Gewässer erreichen Temperaturen, die ein Gedeihen des wärmeliebenden Nixkrauts ermöglichen. Inzwischen ist diese Wasserpflanze in bayerischen Seen weit verbreitet und bildet z. T. sehr große Bestände aus.

Förderung invasiver Wasserpflanzen durch den Klimawandel – ökologische und wirtschaftliche Bedeutung

Beide Arten, die Schmalblättrige Wasserpest und das Nixkraut, gelten als sogenannte invasive Arten, die bei optimalen Bedingungen zu Massenvorkommen neigen. Häufig bilden sie Reinbestände aus und verdrängen zu Ungunsten der Artenvielfalt viele andere Wasserpflanzen. Dadurch stören sie das ökologische Gleichgewicht im Uferbereich von Seen empfindlich. Die Massenvorkommen dieser Wasserpflanzen rufen wirtschaftliche Probleme für die Schifffahrt und die Fischerei hervor. Zusätzlich schränkt das Vorkommen des Nixkrauts den Erholungswert von Seen drastisch ein, da diese Wasserpflanze durch kräftige Stacheln bewehrt ist und eine Nutzung als Badegewässer unmöglich macht.

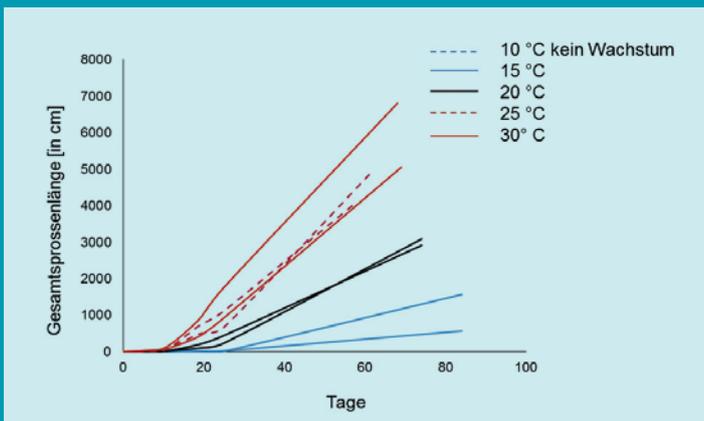
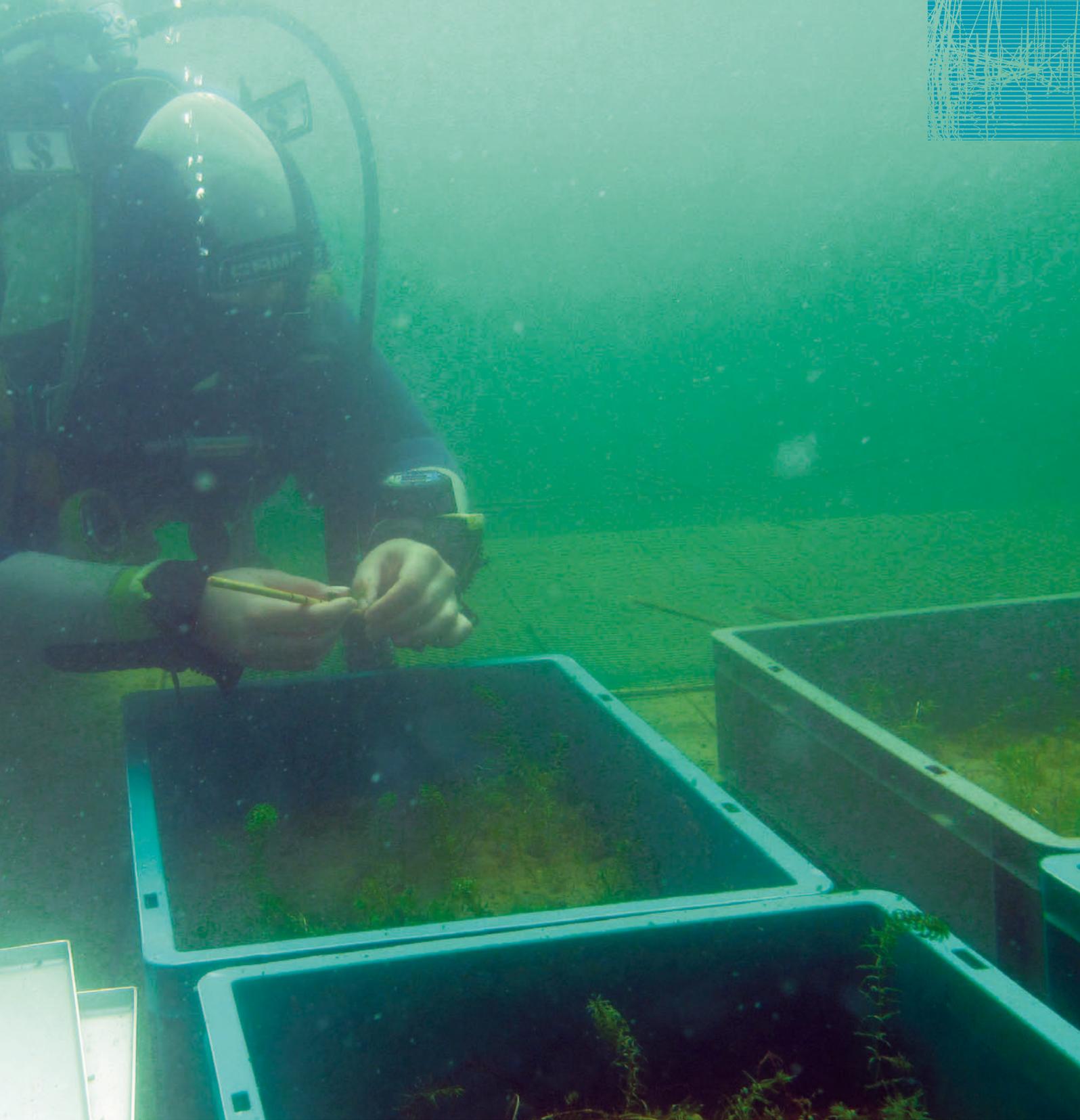
Ergänzend soll erwähnt werden, dass derzeit weitere fremde Wasserpflanzenarten (*Neophyten*) aus wärmeren Klimazonen in bayerische Gewässer einwandern. In der Regel ist der Mensch für diese Entwicklung verantwortlich, denn diese Neophyten werden durch Freizeitaktivitäten, wie Tauchen und Bootsfahren, vor allem aber aus Aquarien in heimische Gewässer eingeschleppt. Das Vorkommen des Nixkrauts in einem See ist ein Hinweis darauf, dass das entsprechende Gewässer gefährdet ist, durch weitere wärmeliebende Arten besiedelt zu werden.

Literatur

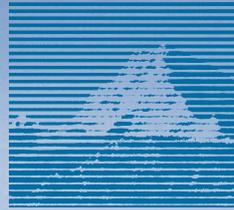
- Dokulil, M.T., Jagsch, A., George, G.D., Anneville, O., Jankowski, T., Wahl, B., Lenhart, B., Blenckner, T. & Teubner, K. (2006): Twenty years of spatially coherent deepwater warming in lakes across Europe related to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography*, 51, 2787–2793.
- IPCC (2007): Zwischenstaatliche Sachverständigengruppe für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change), Klimaänderungen 2007, 4. Sachstandsbericht, Universität Stuttgart
-



▲ Abbildung 3
Forschungstaucher bei der Arbeit unter Wasser

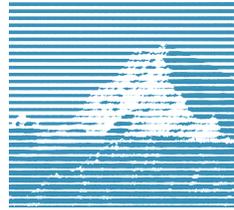


◀ Abbildung 4
Wachstum des Nixkrauts in
Aquarien bei verschiedenen
Temperaturen



FORCAST Teilprojekte 10 | 11 | 12 | 16 | 17

Gebirge



Dem Klimawandel auf der Spur

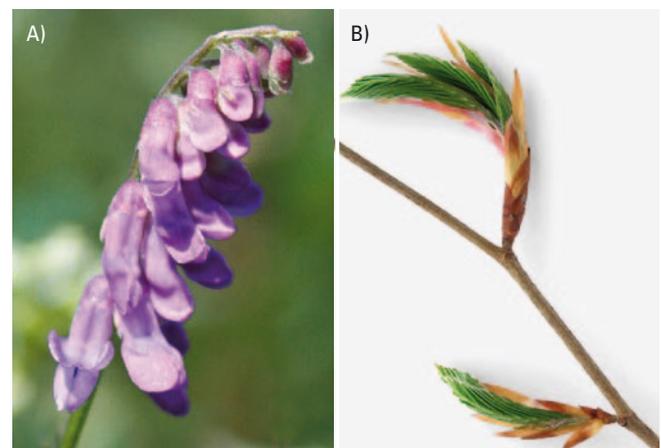
Wie manipulative Experimente und phänologische Aufzeichnungen den Klimawandel aufzeigen

Die Phänologie als Wissenschaft der regelmäßig wiederkehrenden Ereignisse in der Natur spielt eine zentrale Rolle bei der Erkennung von Veränderungen in Ökosystemen, die auf den Klimawandel zurückzuführen sind. In vielen Forschungsarbeiten wurde demonstriert, dass die Phänologie verschiedener Tier- und Pflanzenarten vor allem im Frühjahr und Sommer von der Temperatur gesteuert wird. So wurde gezeigt, dass der bereits gemessene Temperaturanstieg sich deutlich in einer sich verfrühenden Phänologie widerspiegelt (Menzel et al. 2006). Um phänologische Veränderungen in ihrer Reaktion auf veränderte Umweltbedingungen besser verstehen zu können, werden sowohl phänologische Langzeitreihen als auch phänologische Beobachtungen aus Experimenten untersucht. Auswirkungen können sich entweder über Veränderungen im Mittel oder über die Anzahl und Stärke von Extremereignissen bemerkbar machen. Ziel der Studien war es, phänologische Änderungen im Zuge des Klimawandels zu erkennen, zu verstehen und sich daraus ergebende ökologische Auswirkungen zu interpretieren.

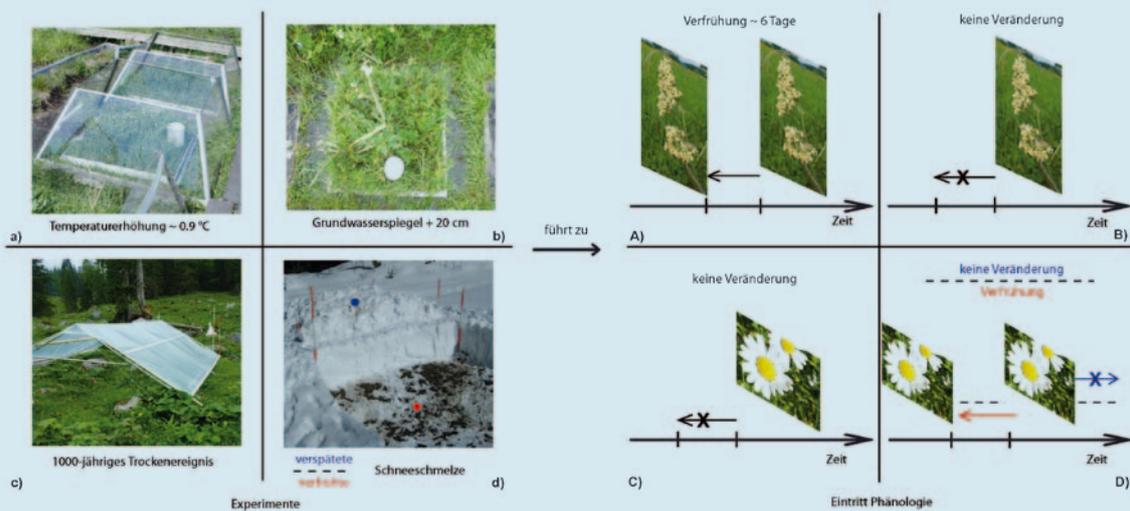
Spurensuche mithilfe von manipulativen Experimenten

Im Nationalpark Berchtesgaden und im Freisinger Moos wurde von 2009 bis 2011 die phänologische Entwicklung, z. B. Beginn der Blüte, Vollblüte, Beginn der Blattentfaltung (Abb.1), von 17 krautigen Arten beobachtet. Die Aufnahmen wurden auf insgesamt 27 Experimentalflächen einmal pro Woche durchgeführt. Manipulative Experimente, wie z. B. Erhöhung der Temperatur, Verschiebung des Zeitpunkts der Schneeschmelze oder Auftreten von Dürreperioden, erlaubten eine Simulation von Umweltveränderungen, wie sie durch den Klimawandel zu erwarten sind. So wurden im Freisinger Moos nach oben geöffnete Plexiglas-Kammern aufgestellt, um die Temperatur zu erhöhen (Abb. 2a). Temporäre Abdeckungen im Nationalpark Berchtesgaden simulierten eine Dürreperiode, umfangreiches Umschneefeln von Schnee von einer Teil- zur nächsten Teilfläche schaffte Bedingungen mit verfrühter bzw. verspäteter Schneeschmelze (Abb. 2c/d). Zudem wurde im Freisinger Moos der Grundwasserspiegel mithilfe eines Pumpsystems angehoben (Abb. 2b).

Die Ergebnisse der manipulativen Experimente bestätigen, dass die Phänologie der Pflanzen maßgeblich von der Temperatur beeinflusst wird. Schon ein Temperaturanstieg von 1 °C führte zu einer Verfrühung des Blühzeitpunktes um 6 – 7 Tage (Abb. 2A). Ein erhöhter Grundwasserspiegel in bayerischen Torfmooren, wie auch ein 1000-jähriges Dürreereignis in den bayerischen Alpen haben hingegen keinen nennenswerten Einfluss auf die Phänologie der Pflanzen (Abb. 2B/C). Auf den



▲ **Abbildung 1**
Beispiele phänologischer Phasen.
A) Vogel-Wicke (*Vicia cracca* L.) Beginn der Blüte (weniger als 50 % der Blüten geöffnet)
B) Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) Beginn Blattentfaltung.
Bildquellen: Cornelius, Henneken.



◀ **Abbildung 2**
 Übersicht über die manipulativen Experimente im Freisinger Moos und im Nationalpark Berchtesgaden (a–d) und deren jeweiliger Einfluss auf die Phänologie der Pflanzen (A–D).
 Bildquellen:
 Cornelius, Leingärtner.

experimentellen Untersuchungsflächen in Berchtesgaden setzte nach verfrühter Schneeschmelze auch die Blüte deutlich früher ein. Allerdings konnte auf den Flächen mit verspäteter Schneeschmelze keine Veränderung des Blühzeitpunkts beobachtet werden (Abb. 2D).

Spurensuche mit Hilfe von Langzeitdaten

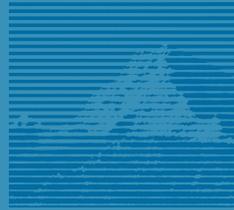
Im Nationalpark Berchtesgaden werden seit 1994 phänologische Beobachtungen an 21 verschiedenen Arten entlang eines Höhengradienten durchgeführt. Auch hier zeigen die Ergebnisse eine starke Abhängigkeit zwischen Pflanzenphänologie und Lufttemperatur. Pro 100 m zunehmender Höhe verzögert sich die Entwicklung um ca. 4 Tage.

Bayernweite Langzeitreihen des Deutschen Wetterdienstes von Maitrieb (Nadelentfaltung) und Blatentfaltung an acht Waldbaumarten erlauben ergänzend die Untersuchung von extremen Ereignissen bzw. Veränderungen. Auch anhand von 14 weiteren Indikatorpflanzenarten, die jeweils verschiedene Jahreszeiten repräsentieren, konnten vergleichbare Studien durchgeführt werden.

Frühere Blüte und Austrieb im Klimawandel – treten dabei häufiger und /oder verstärkt Extreme auf? Diese Frage galt es mit modernen Methoden der Extremwertstatistik zu beantworten. In den letzten beiden Jahrzehnten ist bei den meisten Waldbaumarten die Wahrscheinlichkeit eines Extremereignisses stark angestiegen: Alle 50 Jahre ist mit einem um mindestens 1 Monat verfrühten Austrieb zu rechnen. Somit kann, im Extremfall, der Maitrieb alle 50 Jahre zu einem Märztrieb werden. Besonders stark und häufig werden sich voraussichtlich Arten verfrühen, die normalerweise später im Jahr austreiben bzw. blühen. So liegt im Sommer die Wahrscheinlichkeit für ein extrem frühes Ereignis (z. T. mit mehr als 1-monatigen Verfrühungen) bei 17%. Das würde bedeuten, dass alle sechs Jahre eine solche extreme Verfrühung zu verzeichnen wäre.

Schädlinge im Weinbau- veränderte Anpassungen?

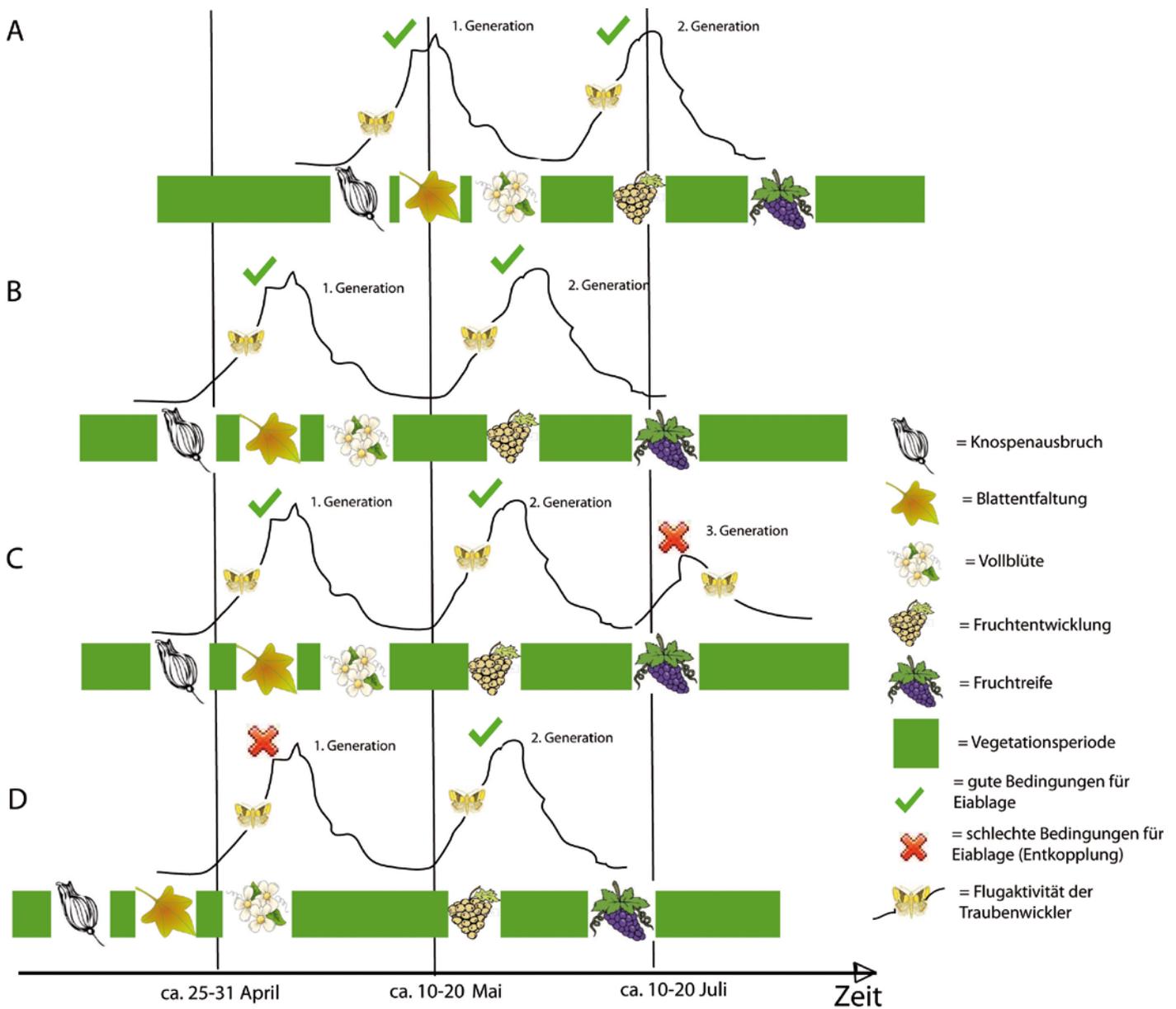
Um die Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme an einem Beispiel genauer zu studieren, wurden Daten von der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, zu Wirt-Parasit-Beziehung in Weinbaukulturen ausgewertet. Der einbändige und der bekreuzte Traubenwickler bevorzugen in der ersten Generation zur Eiablage Weinreben, die gerade ihre Blätter entfalten bzw. ihre Blüten entwickeln. Die zweite Generation hingegen legt ihre Eier an reifwerdenden Früchten ab. Die Ergebnisse zeigen, dass die Entwicklung beider Traubenwicklerarten meistens zeitlich gut an die entsprechenden Pflanzenstadien der Weinrebe gekoppelt ist (Abb. 3 A). Über die letzten 13 Jahre verkürzte sich allerdings die Entwicklungszeit des Traubenwicklers im Sommer um ca. 0,5 Tage/Jahr. Die ersten Falterflüge der ersten und zweiten Generation verfrühten sich insbesondere in den extrem warmen Jahren 2000, 2003 und 2007. In den Jahren 2000 und 2003 war die phänologische Entwicklung der Weinrebe ebenfalls um mehr als zwei Wochen extrem verfrüht, was eine Entkopplung zwischen Traubenwickler und Wirtspflanzenentwicklung verhinderte (Abb. 3 B). Im Jahr 2003 bildete der bekreuzte Traubenwickler sogar eine zusätzliche 3. Generation (Abb. 3 C). Ist jedoch die Verschiebung bei Traubenwickler und Weinrebe aufgrund sich verändernder Umweltbedingungen unterschiedlich stark, kann es zu einer Entkopplung des eingespielten Wirt-Parasit-Systems kommen. Eine solche Fehlanpassung gab es im Jahr 2007, in dem Blatentfaltung und Blüte der Weinrebe deutlich früher als die ersten Falterflüge des Traubenwicklers auftraten (Abb. 3 D). In Zukunft könnte sich der Traubenwickler mit seiner raschen Generationsfolge schnell an sich ändernde Umwelt- und Wirtsbedingungen anpassen.



▼ Abbildung 3

Beispiele verschiedener Anpassungen der Wirt/Weinrebe – Parasit/Traubenwickler Beziehungen.

- A) Die Traubenwickler- und Weinrebenphänologie in einem durchschnittlichen Jahr ist genau synchronisiert.
- B) Verfrühte, aber dennoch synchronisierte Traubenwickler- und Weinrebenphänologie in einem besonders warmen Jahr wie z. B. 2000 und 2003. Wirt und Parasit passen sich gleichermaßen an.
- C) Entwicklung von drei Traubenwickler-Generationen im extrem warmen und trockenen Jahr 2003.
- D) Extrem verfrühte Knospen- und Blütenentwicklung in der 1. Hälfte des Jahres 2007. Traubenwickler finden weniger geeignete Orte zur Eiablage.





◀ **Abbildung 4**
Frühfrostscha-
den
im Wald (2011).
Bildquelle: Henneken

Folgen phänologischer Veränderungen

Eine extreme Verfrühung der Phänologie kann weitreichende Folgen haben. So setzen sich Pflanzen, die früher im Jahr austreiben oder blühen, einer hohen Gefahr, aus durch Spätfröste geschädigt zu werden (Abb. 4). Verschiebt sich der Blühzeitpunkt, ändert sich gleichzeitig auch die Pollensaison, was direkte Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen hat. Außerdem kann es zu zeitlichen Entkopplungen von sonst abgestimmten Beziehungen in Ökosystemen kommen wie z. B. zwischen Blüte und Bestäuber. Wirt-Parasit Beziehungen können, wie im obigen Beispiel gezeigt, ebenfalls durch eine Verschiebung der Pflanzenphänologie gestört werden.

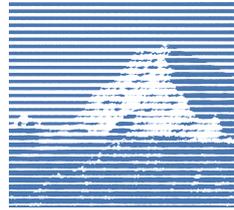
Vom phänologischen Standpunkt aus kann eine Erhöhung des Grundwasserspiegels in Torfmoorgebieten auf ein Niveau, das sowohl die Kohlenstofffreisetzung minimiert als auch eine kommerzielle Nutzung

ermöglicht, befürwortet werden. Weiterhin ist zu erwarten, dass ein 1000-jähriges Dürreereignis in den Alpen keine schwerwiegenden Auswirkungen auf die Blühphänologie der Pflanzen haben wird. Folglich sind vor allem Temperatur und Schneeschmelze die Haupteinflussfaktoren, die Veränderungen in der Phänologie der Pflanzen unter künftigen Klimabedingungen bestimmen. Das Ausmaß der Veränderung wird allerdings stark von der jeweiligen Art abhängen.

Literatur

Menzel, A., T. H. Sparks, N. Estrella, E. Koch, A. Aasa, R. Ahas, K. Alm-Kubler, P. Bissolli, O. Braslavska, A. Briede, F. M. Chmielewski, Z. Crepinsek, Y. Curnel, A. Dahl, C. Defila, A. Donnelly, Y. Filella, K. Jatcza, F. Mage, A. Mestre, O. Nordli, J. Penuelas, P. Pirinen, V. Remisova, H. Scheifinger, M. Striz, A. Susnik, A. J. H. Van Vliet, F. E. Wielgolaski, S. Zach, and A. Züst. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12: 1969–1976.

FORCAST Teilprojekt 11	Bestäuber und Blüten im Klimawandel
Forschungseinrichtung	Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie
Ansprechpartner	Prof. Dr. Hans-Joachim Poethke
E-Mail	poethke@biozentrum.uni-wuerzburg.de
Bearbeiter/Autoren	Nico Blüthgen, Gita Benadi, Thomas Hovestadt, Hans-Joachim Poethke



Bestäuber und Blüten im Klimawandel

Gefährdung von Interaktionen zwischen Arten durch jahreszeitliche Verschiebungen

Der Klimawandel kann sich in sehr unterschiedlicher Weise auf die Beziehungen zwischen Tier- und Pflanzenarten in einer Gemeinschaft auswirken. Dies wird am Beispiel von Blüten und Bestäubern deutlich (Abb. 1). Eine große Zahl von Pflanzenarten benötigt Insekten als Bestäuber, und eine noch größere Zahl solcher Blütenbesucher benötigt Nektar und Pollen von diesen Blüten. In einem solchen → Mutualismus entsteht eine gegenseitige Abhängigkeit – umso mehr, je spezialisierter einzelne Arten auf wenige mögliche Partnerarten sind.

Klimastress: Mögliche Einflüsse

Wenn bestimmte Partner unter Einfluss des Klimawandels seltener werden oder aus einem Lebensraum ganz verschwinden, können spezialisierte Partner in Mitleidenschaft geraten. Störungen durch den Klimawandel können sich direkt auf einen oder beide Partner auswirken, zum Beispiel durch Hitze- oder Trockenstress. Von Klimaveränderungen profitierende Gegenspieler oder Konkurrenten können zunehmen und ansässige Arten zurückdrängen. Besonders relevant können aber auch räumliche oder zeitliche Verschiebungen sein, wenn nicht beide Partner gleichermaßen darauf reagieren.

Areal-Verschiebungen von Tier- und Pflanzenarten sind in den vergangenen Jahrzehnten gut dokumentiert worden und mit den mittlerweile um etwa 1 °C gestiegenen globalen Temperaturen erklärbar. Auch die Zeitpunkte (Phänologie) verschiedener Prozesse, wie Blattaustrieb und Blühen von Pflanzen, sowie Schlupf und Reproduktion von Tieren haben sich bereits maßgeblich verändert. Verschiebungen im Raum gingen in Richtung höherer Breitengrade oder höhere Berglagen und in der Phänologie hin zu früheren Zeitpunkten im Jahresverlauf, bedingt durch mildere Frühjahrsbedingungen.

Die Untersuchung zielte darauf ab, eine Einschätzung klimabedingter, räumlicher Verschiebungen anhand eines Höhengradienten vorzunehmen. Da mit der Höhe im Gebirge die Durchschnittstemperatur und Länge der Saison abnimmt, spiegelt sie mögliche Klimaveränderungen wider. Eine Tier- oder Pflanzenart in einer bestimmten Höhenstufe wird in Zukunft Bedingungen erfahren, die tiefer liegenden Zonen entsprechen. Der Höhengradient soll daher als Modell für mögliche Auswirkungen zukünftiger Klimaerwärmung dienen. Verschieben sich die Phänologien von assoziierten Bestäubern und Blüten eher zusammen (synchron) oder sind Entkopplungen durch Asynchronie zu erwarten?

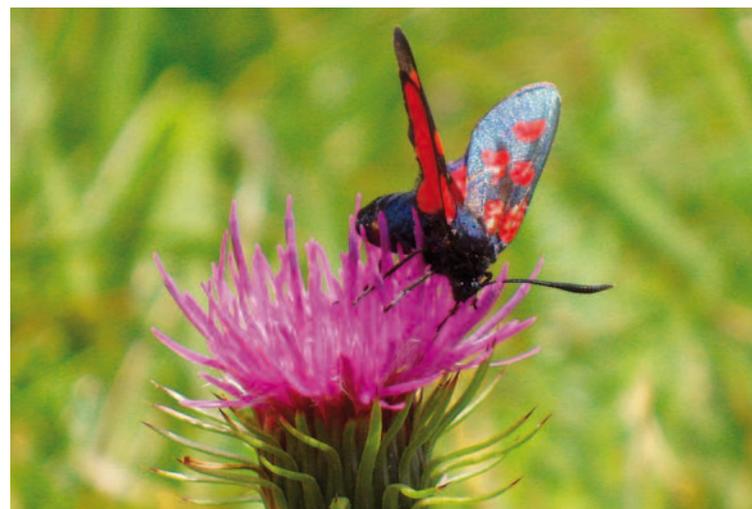


Abbildung 1 ►
Widderchen (*Zygaena* sp.) auf einer Blüte der Bergdistel (*Carduus defloratus*). Foto: Gita Benadi.

Befunde aus dem Wimbachtal

Im Wimbachtal (Berchtesgaden) wurden an sechs blütenreichen Standorten über einen Höhengradienten von mehr als 1000 m insgesamt 444 Insektenarten an den Blüten von 166 Pflanzenarten beobachtet (Abb. 2). Die Bestäuber umfassen 45 Bienenarten, 326 Arten von Fliegen und 73 Schmetterlinge. Die meisten häufiger beobachteten Insekten waren auf mehreren Pflanzenarten zu finden, und jede Pflanze hatte mehrere Arten von Bestäubern. Die hohe Diversität und ein mittlerer Grad an Spezialisierung stellen bereits eine wichtige Versicherung dieses Ökosystem gegen Störungen dar. Diese sogenannte → „Redundanz“ in der Funktion von Arten lässt erwarten, dass der Ausfall einzelner Bestäu-

Abbildung 3 ▶
 Verschiebung des zeitlichen Auftretens (Phänologie) der Ackerhummel (*Bombus pascuorum*) und der von ihr besuchten Blüten von einer höher gelegenen Untersuchungsfläche zu einer tiefer gelegenen Fläche. Gestrichelte Linien zeigen den nach Häufigkeit gewichteten Mittelwert des zeitlichen Auftretens auf einer Fläche. Die Länge der roten Pfeile symbolisiert die Stärke der Verschiebung. Fotos: *B. pascuorum*: Mark Burnett; Blütenbeispiele: Alpen-Distel (*Carduus defloratus*): Teun Spaans. Geflecktes Johanniskraut (*Hypericum maculatum*): James K. Lindsey.

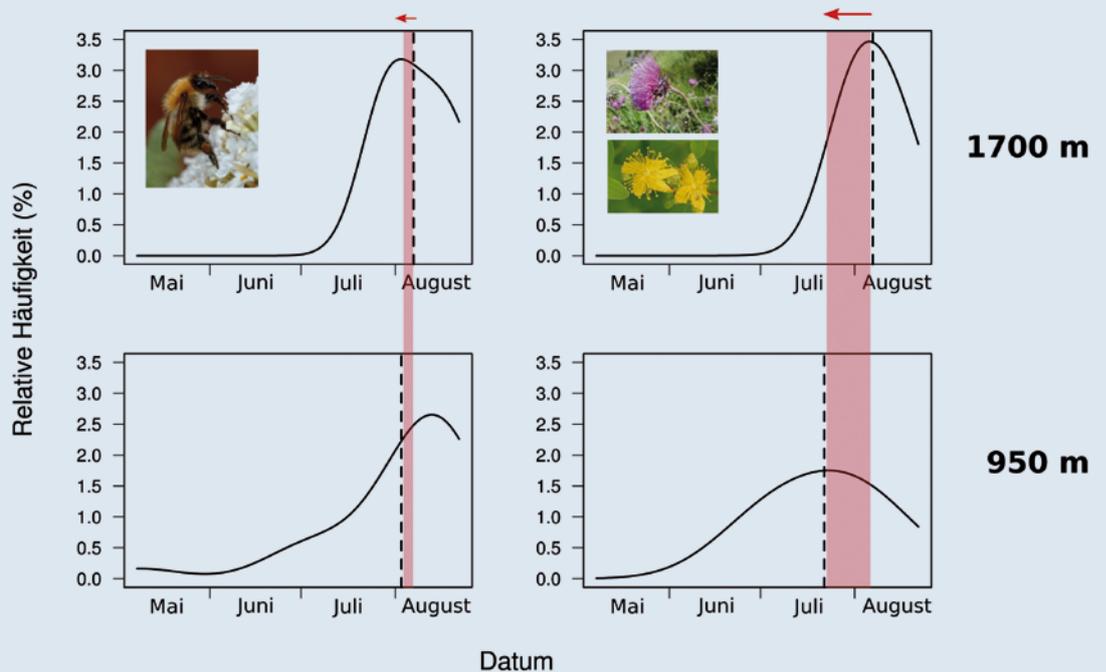
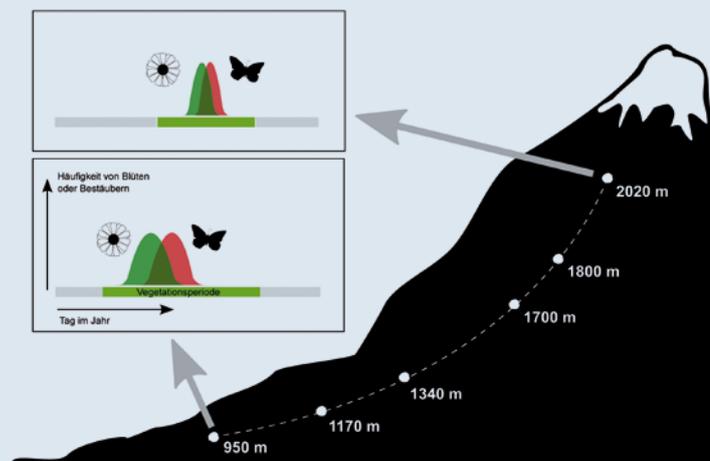


Abbildung 2 ▶
 Abb. 2. Verteilung der Untersuchungsflächen auf die Höhenstufen im Wimbachtal (Nationalpark Berchtesgaden) und Illustration der Veränderung des zeitlichen Auftretens (Phänologie) von Blüten und Bestäubern mit zunehmender Höhe. In größerer Höhe im Gebirge verkürzt sich die Vegetationsperiode, Blüten und Bestäuber treten später im Jahr und in einem engeren Zeitfenster auf (s. Kästen).



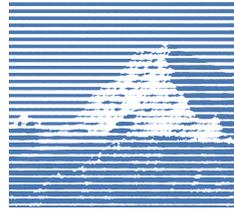
ber- oder Blütenarten teilweise durch andere ausgeglichen werden kann. Zudem ließ sich zumindest für die häufigeren Arten feststellen, dass diese Arten offenbar nicht auf die Synchronisierung mit bestimmten Blütenpflanzen angewiesen sind. Insofern zeigt das System eine hohe Anpassungsfähigkeit und Flexibilität. Dennoch müssen erst eingehendere Studien zeigen, ob dies auch für relativ rasche Veränderungen im Klimawandel gilt, bei denen sich Arten möglicherweise weniger schnell anpassen können.

Für spezialisierte und seltene Arten kann der Effekt sehr viel stärker sein als für die untersuchten häufigeren Arten, für die genügend Daten vorliegen. Computersimulationen untermauerten die hohe Empfindlichkeit solcher Gemeinschaften von Bestäubern und Pflanzen, bei denen das Aussterben einzelner Arten durch die Abhängigkeit von wenigen Partnern oder durch Konkurrenz mit anderen Arten nach wenigen Generationen erfolgen kann. Während man also beginnt, die relevanten Faktoren zu verstehen, auf denen diese Interaktionen langfristig basieren, sind noch langfristige Untersuchungen notwendig, um das tatsächliche Gefährdungspotential des Klimawandels abzuschätzen.

Der Schutz einer hohen Biodiversität zur Abpufferung von klimabedingten Veränderungen ist zur Stabilisierung von Ökosystemen entscheidend. Erste Anzeichen für starke Einbußen durch Entkopplungen zeigen sich bereits in anderen Systemen. Bei der Ernährung von Vögeln durch nur kurzfristig auftretende Beute gibt es starke Indizien für solche Probleme des Klimawandels – bei Trauerschnäppern führten Entkopplungen bereits zu starken Rückgängen der Populationen.

Literatur

- Benadi G, Blüthgen N, Hovestadt T, Poethke HJ (2012) Population dynamics of interacting plant and pollinator communities: stability reconsidered. *American Naturalist* 179, S. 157–168
- Benadi G, Blüthgen N, Hovestadt T, Poethke HJ (2013) Contrasting specialization-stability relationships in plant-animal mutualistic systems. *Ecological Modelling* 258, S. 65–73
- Blüthgen N, Klein AM (2011) Functional complementarity and specialisation: The role of biodiversity in plant-pollinator interactions. *Basic and Applied Ecology* 12, S. 282–291



Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der alpinen Stufe

Eine funktionelle Analyse

Die mit dem Klimawandel einhergehende Erwärmung hat in jüngster Zeit zur Ausbreitung zahlreicher Pflanzen und Tiere in bisher nicht besiedelte Regionen geführt. Besonders deutlich waren und sind diese Veränderungen in den Hochgebirgen. So haben österreichische Wissenschaftler bereits Anfang der 90er Jahre eine Zunahme der Artenvielfalt auf den Gipfeln der Alpen dokumentiert (Grabherr et al. 1994).

Das Projekt am Lehrstuhl für Botanik der Universität Regensburg hatte zum Ziel, die Mechanismen der Pflanzen, die einerseits ihre Verbreitung entlang eines Höhengradienten limitieren und andererseits ihnen unter den aktuellen Bedingungen die Ausbreitung in größere Höhen ermöglichen, aufzuklären.

Temperatur als limitierender Faktor

Dafür wurden in einem ersten Schritt insbesondere temperaturabhängige Parameter im Lebenszyklus und Wachstum der Pflanze untersucht.

Eine der wesentlichen Anpassungen, die bisher unbekannt waren, ist, dass der Pollen und der Pollenschlauch bei Arten höherer Lagen bereits bei wesentlich tieferen Temperaturen keimt und wächst als bei Arten tieferer Lagen. Damit sind alpine Arten in der Lage, trotz der in hohen Lagen verkürzten Vegetationsperiode befruchtete Samen zu bilden. Verlängert sich aufgrund der Erwärmung jetzt die Vegetationsperiode, ist dieser Faktor für Arten tieferer Lagen nicht mehr limitierend, sie können nun auch in höheren Lagen erfolgreich Nachkommen bilden. Im Gegensatz dazu ist die Höhe der Temperatur für die Samenkeimung nicht limitierend, allerdings die Dauer von tiefen Temperaturen. Bestimmte Arten, wie der Stängellose Enzian, benötigen häufig bis zu sechs Monaten Kälte, damit die → Dormanz der Samen gebrochen wird, d. h. dass sie dann erst überhaupt keimbereit sind. Dagegen keimen Samen alpiner Arten eher bei höheren Temperaturen, da erst dann, wenn diese auftreten, in den Alpen Wetterbedingungen herrschen, die eine erfolgreiche Etablierung von Keimlingen ermöglichen (Walck et al. 2011, Poschlod et al. 2012).

Ein weiterer limitierender Faktor ist das Überleben von Keimlingen in diesen Lagen, der in den Alpen in geringerem Maße garantiert ist als im Flachland. Dies gleichen die Alpenpflanzen mit einem höheren Alter aus.

Die Untersuchungen zeigten, dass Pflanzen – selbst innerhalb derselben Art – in der alpinen Stufe bis zu dreimal so alt werden wie im Alpenvorland oder auf der Fränkischen Alb im Raum Regensburg. Im Tiefland sind dagegen alpine Pflanzen wegen ihrer um etwa die Hälfte geringeren Wuchsgröße und des langsameren Wachstums nur an Sonderstandorten, wie Felsen konkurrenzfähig.

Ausbreitung als limitierender Faktor

Ein wesentlicher limitierender Faktor für die Ausbreitung von Pflanzenarten bei veränderten Klimabedingungen ist ihr Ausbreitungspotential, d. h. wie viele Samen oder Früchte einer Art über eine bestimmte, größere Distanz ausgebreitet werden (Poschlod et al. 2013). Während Arten der offenen Gletschervorfelder an die Ausbreitung

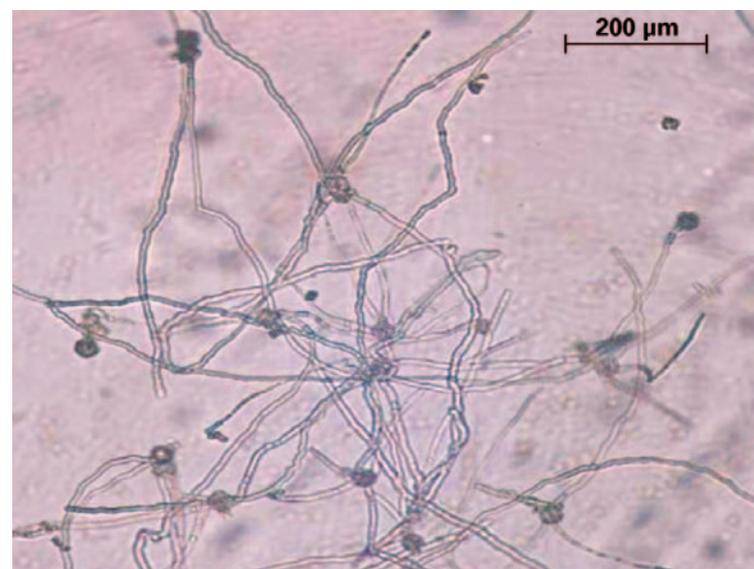


Abbildung 1 ▲
Gekeimte Pollen des stängellosen Enzians.



◀ Abbildung 2
Der stängellose Enzian

durch Wind angepasst sind, gilt das nur in eingeschränktem Maße für die Arten der alpinen Grasland-Ökosysteme. Sie sind wahrscheinlich erst mit den → Großherbivoren nach der letzten Eiszeit eingewandert (Poschlod & Bonn 1998), die heute entweder ausgestorben sind oder nur mehr in geringen Dichten in unseren Alpen leben.

Manche Arten der tieferen Lagen dürften aber erst mit der Almwirtschaft, die nachweislich seit der Bronzezeit um ca. 1.800 v. Chr. existiert, eingewandert sein (Poschlod 2013). Auch viele Arten der Grünlandlebensräume im Tiefland stammen wahrscheinlich aus den alpinen Graslandökosystemen und sind mit der seit der Sesshaftwerdung praktizierten Fernweidewirtschaft (Transhumanz) in unser Grünland transportiert worden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Almwirtschaft mit Rindern bzw. Milchkühen die Ausbreitung von etwa 25 % des Artenpotentials unterstützt, die Transhumanz mit Schafen, die heute nur noch in den Südalpen praktiziert wird, sogar über 60%. Im Rahmen des Projektes konnte auch nachgewiesen werden, dass heute der Alpentourismus, d. h. der Mensch, zu einem zusätzlichen Faktor geworden ist, der das eingeschränkte Ausbreitungspotential verbessert.

Limitierende Mechanismen des Vegetationswandels

Der Vergleich von Erhebungen der Vegetation der alpinen Graslandökosysteme aus den 1960er Jahren und heute bestätigte die Befunde der österreichischen Kollegen. Erstmals konnte aber nachgewiesen werden, dass die Veränderungen durch die Arten bedingt sind, die aufgrund der Temperaturen in der Bildung → fertiler Samen, der Zeitdauer kühler Temperaturen zum Brechen der → Dormanz der Samen und in ihrer Wachstumsgeschwindigkeit sowie ihrem Ausbreitungspotential limitiert sind. Damit ist in Zukunft eine bessere Vorhersage der Veränderung der Pflanzenvielfalt in den Alpen aufgrund des Klimawandels möglich.

Literatur:

Grabherr, G., Gottfried, M. & Pauli, H. (1994)

Climate effects on mountain plants. *Nature*, 369, 448.

Poschlod, P. (2012): Verlorene Paradiese? Erhalt des Artenreichtums in den Alpen gefährdet. *Der Almbauer*, Heft 6 (2012), 3–4.

Poschlod, P. (2013): Geschichte der Kulturlandschaft. Stuttgart: Ulmer.

Poschlod, P. & Bonn, S. (1998): Changing dispersal processes in the central European landscape since the last ice age – an explanation for the actual decrease of plant species richness in different habitats. *Acta Bot. Neerl.* 47: 27–44.

Poschlod, P., Abedi, M., Bartelheimer, M., Drobnik, J., Rosbakh, S. & Saatkamp, A. (2012) Seed ecology and assembly rules in plant communities. *Vegetation Ecology* (eds van der Maarel, E. & Franklin, J.), pp. 164–202. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.

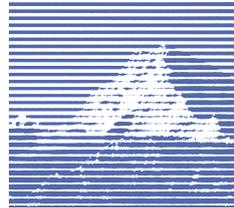
Walck, J.L., Hidayati, S.N., Dixon, K.W., Thompson, K. & Poschlod, P. (2011) Climate change and plant regeneration from seed. *Global Change Biology*, 17, 2145–2161.

Abbildung 3 ▼

Die traditionelle Landnutzung in den Alpen hat wesentlich zu ihrer Artenvielfalt beigetragen.



FORKAST Teilprojekt 16	Auswirkung des Klimawandels auf die Treibhausgasflüsse in alpinem Grünland
Forschungseinrichtung	Technische Universität München, Lehrstuhl für Atmosphärische Umweltforschung, Lehrstuhl für Bodenkunde und Institute of Meteorology and Climate Research - Atmospheric Environmental Research (KIT IMK-IFU)
Ansprechpartner	Prof. Dr. Hans Papen
E-Mail	Hans.Papen@imk.fzk.de
Bearbeiter/Autoren	Sebastian Unteregelsbacher, Olivia Kreyling, Ludwig Lipp, Rainer Gasche, Michael Dannenmann, Ingrid Kögel-Knabner, Hans Peter Schmid, Hans Papen



Auswirkung des Klimawandels auf die Treibhausgasflüsse in alpinem Grünland

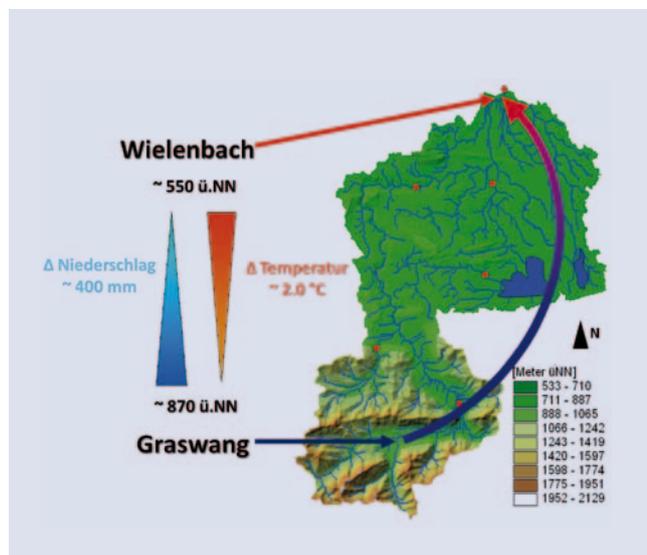
Ein Freilandexperiment im Ammer Einzugsgebiet

Etwa ein Drittel der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern ist Grünland. Da Grünlandgebiete erhebliche Kohlenstoff- und Stickstoffspeicher darstellen, kommt ihnen eine große Bedeutung beim Klimaschutz zu. Welche Auswirkungen die Klimaänderung auf die Kohlenstoff- und Stickstoffspeicher von alpinem Grünland hat, ist bisher nicht bekannt. Deshalb wurde ein Experiment im Freiland des Ammer-Einzugsgebiets durchgeführt, in dem u. a. die Veränderung der → Quell- und Senkenstärken von Treibhausgasen (CO_2 , CH_4 , N_2O) erfasst werden sollte.

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf den Treibhausgasaustausch in einem Freilandexperiment simulieren und erfassen zu können, wurden Grünland-Bodenkerne mit Vegetation (→ Minilysimeter) entlang eines natürlich gegebenen Höhengradienten (siehe Abbildung 1 und 2) im Ammer-Einzugsgebiet von einem hoch gelegenen Standort (Graswang) zu einem deutlich niedriger gelegenen Standort (Wielenbach) versetzt. Aus dem Höhengradienten von ca. 320 m resultiert ein Niederschlags- und Temperaturgradient, mit im Jahresmittel um ca. 2 °C höheren Temperaturen und ca. 400 mm niedrigeren Niederschlagsmengen am Standort Wielenbach (Abbildung 1). Außerdem wurden als Kontrollen zusätzlich Minilysimeter am Standort Graswang entnommen und

an diesem Standort wieder eingegraben, um reine Versetzungseffekte auf den Treibhausgasaustausch ausschließen zu können.

Um den Austausch der Treibhausgase CH_4 , N_2O und CO_2 zwischen den Minilysimetern und der Atmosphäre erfassen zu können, wurde die sogenannte „closed chamber-Technik“ eingesetzt (Butterbach-Bahl et al. 1997) und zu den jeweiligen Messzeitpunkten den Minilysimetern gasdichte Hauben aufgesetzt (Abbildung 3). Die Konzentrationsänderung dieser Gase mit der Zeit wurde mithilfe verschiedener Messinstrumente in „geschlossenen Kammern“ erfasst. Mit Berücksichtigung des bedeckten Bodenareals, des Kammervolumens, des Luftdrucks und der Lufttemperatur konnte der Treibhausgasaustausch berechnet werden.



▲ Abbildung 2
Höhengradient für Temperatur und Niederschlag zwischen den beiden Untersuchungsstandorten Graswang und Wielenbach im Ammer-Einzugsgebiet.



▲ Abbildung 2
Installation der Mini-Lysimeter vom Standort Graswang am Standort Wielenbach

Abbildung 3 ►
Mini-Lysimeter mit auf-
gesetzten Mess-Kammern zur
Bestimmung der Flussraten
von CO₂, N₂O und CH₄.



Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Ein statistischer Signifikanztest (unter Verwendung der Mittelwerte über die gesamte Messperiode: Tabelle 1) ergab eindeutig, dass

- die Bodentemperaturen und Bodenfeuchte in den getesteten Tiefen in Wielenbach signifikant höher waren als in Graswang und
- die Methanaufnahmeraten in Wielenbach signifikant höher waren als in Graswang. Dieser Effekt dürfte durch höhere Temperaturen sowie geringeren Bodenwassergehalt und damit bessere Boden-Diffusions-eigenschaften in den an den Standort Wielenbach transferierten Minilysimetern bedingt sein.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass der zu erwartende Klimawandel zu einer größeren Senkenstärke dieses Ökosystems für das potente Treibhausgas Methan führen wird. Hingegen konnten über den bisherigen Untersuchungszeitraum weder für die CO₂- noch auch die N₂O-Flussraten signifikante Unterschiede nachgewiesen werden.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse aus diesem Experiment legen den Schluss nahe, dass die erwartete Klimaänderung zu keiner deutlichen Änderung in der Höhe der N₂O-Flussraten und CO₂-Flussraten (Ökosystem-Atmung) in alpinen Grünlandökosystemen führen wird, jedoch zu einer erhöhten Senkenstärke für das Treibhausgas CH₄, was unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes positiv zu werten ist. Die Resultate des Projektes weisen bisher nicht auf die Notwendigkeit von speziellen Anpassungsstrategien an Folgen des Klimawandels hinsichtlich des Treibhausgasaustausches im Grünland hin.

Literatur

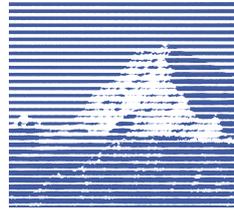
Butterbach-Bahl K, Gasche R, Breuer L, Papen H (1997) Fluxes of NO and N₂O from temperate forest soils: impact of forest type, N-deposition and of liming on the NO and N₂O emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 48, S. 79–90.

	Graswang	Wielenbach
Bodentemperatur [°C] (4 cm Tiefe)	9,4 ± 0,1	11,9 ± 0,1 ***
Bodentemperatur [°C] (15 cm Tiefe)	10,5 ± 1,4	12,2 ± 0,02 **
Bodenfeuchte [%] (15 cm Tiefe)	25,0 ± 0,4	21,7 ± 0,4 ***
CH ₄ [µg C m ⁻² h ⁻¹]	-12,5 ± 0,6	-20,8 ± 0,7 ***
N ₂ O [µg N m ⁻² h ⁻¹]	3,5 ± 0,4	2,5 ± 0,3
CO ₂ [mg C m ⁻² h ⁻¹]	122,3 ± 7,0	163,6 ± 16,8

▲ Tabelle 1

Mittelwerte über die gesamte Messperiode für Bodentemperatur, Bodenfeuchte und die CH₄-, N₂O-, CO₂- Flussraten an den Untersuchungsstandorten Graswang und Wielenbach. Signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Parametern sind durch Sterne gekennzeichnet: ** hoch signifikanter Unterschied; *** höchst signifikanter Unterschied“.

FORCAST Teilprojekt 17	Klimawandel gefährdet alpine Artenvielfalt
Forschungseinrichtung	Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie
Ansprechpartner	Prof. Dr. Ingolf Steffan-Dewenter
E-Mail	ingolf.steffan@uni-wuerzburg.de
Bearbeiter/Autoren	Bernhard Hoiss, Annette Leingärtner, Jochen Krauss, Ingolf Steffan-Dewenter



Klimawandel gefährdet alpine Artenvielfalt

Auswirkungen von Klimaerwärmung und klimatischen Extremereignissen auf Pflanzen, Insekten und ökologische Wechselbeziehungen

Der fortschreitende Klimawandel führt in den Alpen zu einer überdurchschnittlichen Temperaturerhöhung und zu häufigeren klimatischen Extremereignissen. Es wurde untersucht, wie Pflanzen, Wildbienen und Schmetterlinge auf den Klimawandel reagieren und welche Folgen dies für ökologische Wechselbeziehungen hat. Artenerfassungen und Experimente entlang eines Höhen- und Klimagradienten im Nationalpark Berchtesgaden zeigen, dass Artengemeinschaften in alpinen Lebensräumen aufgrund ihrer speziellen Anpassungsstrategien durch den Klimawandel besonders gefährdet sind.

Die Alpen zählen zu den weltweit besonders schützenswerten „Hotspots“ der Artenvielfalt. Hier kommt ein hoher Anteil → endemischer Tier- und Pflanzenarten vor, die sich an die klimatischen Bedingungen in den Alpen angepasst haben und weltweit einzigartig sind. Die Erwärmung des Klimas hat in den letzten Jahrzehnten zu einem deutlichen Anstieg der mittleren Temperaturen und zu häufigeren klimatischen Extremereignissen mit sehr frühem oder spätem Beginn der Vegetationsperiode, Spätfrösten und Dürrephasen geführt. In der Vergangenheit wurde gezeigt, dass sich als Folge der Klimaerwärmung die Verbreitungsgrenzen von Pflanzen- und Tierarten von tieferen in höhere Lagen verschieben. Auf den ersten Blick kommt es dadurch zu einer Steigerung der Artenvielfalt in alpinen Lebensräumen. Offen ist jedoch, wie sich die Neankömmlinge auf die vorhandenen Artengemeinschaften auswirken.

Durch Klimaerwärmung und klimatische Extremereignisse kommt es nicht nur zu geographischen Verschiebungen, sondern auch zu zeitlichen Veränderungen in der saisonalen Phänologie vieler Arten. Wenn Pflanzen und Insekten unterschiedlich auf Klimafaktoren reagieren, kann es beispielsweise zu einer phänologischen Entkopplung der Blüh- und Aktivitätsphasen von Pflanzen und Bestäubern kommen, mit möglicherweise fatalen Folgen für die Bestäubung und das langfristige Überleben von Pflanzenpopulationen (Bartomeus et al. 2011). Klimawandel führt damit sowohl zu einer räumlichen, wie auch zeitlichen Neukombination von Arten, mit unbekanntem Konsequenzen für Konkurrenzverhältnisse, Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen und Tieren und das langfristige Bestehen der einzigartigen alpinen Lebensgemeinschaften. In diesem Projekt soll

der Kenntnisstand zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die alpine Artenvielfalt und insbesondere mögliche Wechselwirkungen zwischen einzelnen Gefährdungsfaktoren unter Einbeziehung experimenteller Versuchsansätze verbessert werden. So lassen sich wissenschaftlich fundierte Naturschutzkonzepte und Anpassungsstrategien an den Klimawandel entwickeln.

Als zentraler Versuchsansatz wurden Freilandhebungen und Experimente auf Grünlandflächen entlang eines Klimagradienten im Nationalpark Berchtesgaden in den Bayerischen Alpen durchgeführt. Im ersten Teil des Projektes wurden Basisdaten zur Höhenverbreitung und Phänologie von Pflanzen, Bienen und Tagschmetterlingen erhoben, die eine genaue Abschätzung künftiger geographischer und saisonaler Verschiebungen erlauben. Durch die Erfassung funktioneller → Artmerkmale werden Anpassungsstrategien an die spezifischen Umweltbedingungen und die durch den Klimawandel zu erwartenden Änderungen und Gefährdungen der Artengemeinschaften abgeschätzt. Im zweiten Teil des Projektes wurden klimatische Extremereignisse entlang eines Höhengradienten simuliert, um die Auswirkungen auf die Phänologie und Interaktionen zwischen Pflanzen und Insekten zu untersuchen.

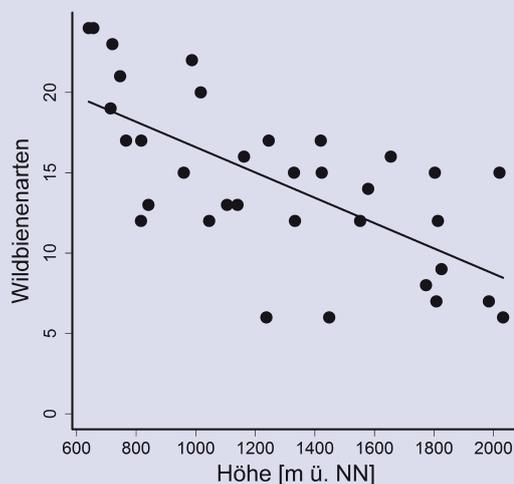
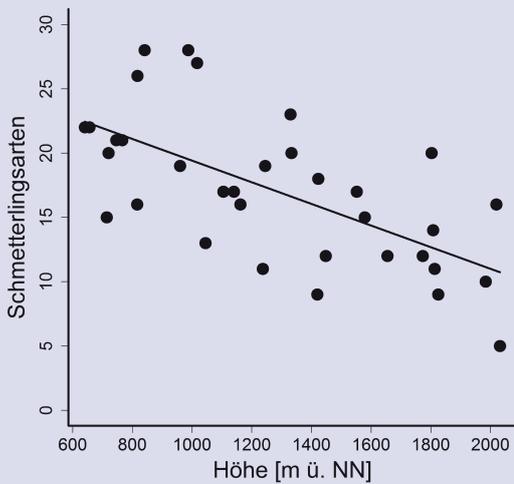
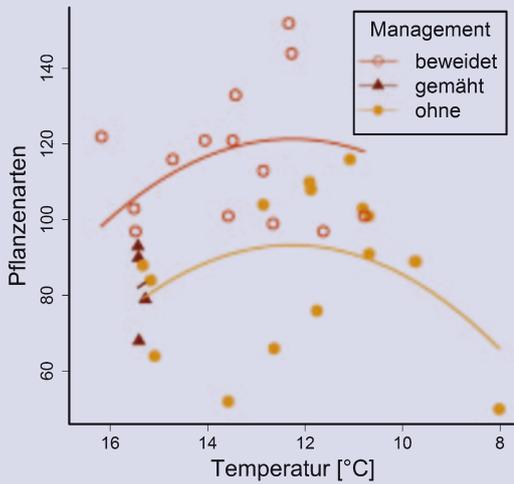
Artenvielfalt und Bestäubungstypen von Pflanzen

Die botanischen Aufnahmen auf 34 Offenlandflächen zwischen 600 und 2000 m Höhe belegen den Artenreichtum der alpinen Vegetation im Nationalpark Berchtesgaden:

Auf Flächen von nur 4 m² Größe wurden bis zu 53 Arten gefunden, insgesamt kamen 484 Gefäßpflanzenarten auf den Untersuchungsflächen vor (Hoiss et al. 2013).

▼ **Abbildung 1**

Artenzahlen für Pflanzen, Tagfalter und Wildbienen entlang des Höhen-/ Temperaturgradienten im Nationalpark Berchtesgaden.



Extensive Beweidung, wie sie im Nationalpark Berchtesgaden durchgeführt wird, erhöhte die Artenvielfalt von Pflanzen im Vergleich zu nicht genutzten Flächen deutlich. Dies unterstreicht die Notwendigkeit eines weiteren Nutzungsmanagements zur Offenhaltung dieser Flächen. Auf beweideten, wie auch auf brachliegenden Wiesen, trat die maximale Artenzahl von Pflanzen in mittleren Höhenlagen auf (Abb. 1). Ein Andauern der Klimaerwärmung könnte diese Zone maximaler Pflanzendiversität weiter nach oben verschieben. Deshalb ist es wichtig, dass auch in höheren Regionen geeignete Offenlandhabitate zur Verfügung stehen, in denen konkurrenzschwächere, alpine Arten überdauern können.

In einem zweiten Schritt wurde der Anpassungswert unterschiedlicher Bestäubungstypen von Gefäßpflanzen untersucht. Der Anteil windbestäubter Arten im Verhältnis zu insektenbestäubten Arten nahm mit sinkenden Temperaturen ab. Die windbestäubten Arten in den Höhenlagen dominierten jedoch die Pflanzengesellschaften. Daraus lässt sich folgern, dass für die große Mehrzahl der selteneren alpinen Pflanzenarten nur durch Insektenbestäubung eine erfolgreiche Fortpflanzung gesichert ist, auch wenn einige dominante Grasarten Windbestäubung als alternative Strategie nutzen. Beweidung erhöhte die Anzahl windbestäubter Arten stärker als die Anzahl insektenbestäubter Pflanzenarten.

Der Wandel von Management und Klima lässt also Veränderungen in der Pflanzengesellschaft erwarten. In künftigen Projekten soll untersucht werden, ob der Samenansatz und damit die Reproduktion alpiner Arten durch die Verfügbarkeit von Bestäubern begrenzt ist.

Hohe Artenvielfalt von Bienen und Schmetterlingen

Parallel zu den Vegetationsaufnahmen wurden auf den 34 Untersuchungsflächen zwei ökologisch und für den Naturschutz wichtige Insektengruppen, Bienen und Schmetterlingen, aufgenommen.

Insgesamt konnten 87 Bienenarten (*Hymenoptera* [Hautflügler], *Apiformes* [Bienen]) nachgewiesen werden, darunter eine Reihe alpiner Spezialisten wie



◀ **Abbildung 2**
Die alpine Hummelart *Bombus monticola* (Berglandhummel) auf *Trifolium pratense* (Wiesen-Klee).

Andrena lapponica (Lappländische Sandbiene), *Bombus gerstaeckeri* (Eisenhuthummel), *Bombus mendax* (Trughummel), *Bombus pyrenaicus* (Pyrenäenhummel), *Bombus sichelii* (Höhenhummel), *Dufourea alpina* und *Lasioglossum bavaricum*, die nur auf Standorten über 1500 m Höhe vorkamen (Abb. 2).

Der Artenreichtum von Wildbienen und die Zahl der Individuen waren auf den niedriger gelegenen, warmen Flächen ungefähr zwei- bis dreimal größer als auf den Wiesen der Hochlagen. Im Unterschied zu den Vegetationsdaten zeigte sich hier eine lineare Abnahme der Artenvielfalt mit zunehmender Höhe (Abb. 1) (Hoiss et al. 2012).

Ein ganz ähnliches Muster zeigten die Schmetterlinge, die mit insgesamt 67 Tagfalterarten und 43 tagaktiven Nachtfalterarten, darunter vielen seltene Arten mit alpinem Verbreitungsschwerpunkt, vertreten waren (Abb. 1).

Insgesamt belegen die faunistischen Aufnahmen die große Artenvielfalt und den Wert des Nationalparks Berchtesgaden für den Erhalt dieser Artengruppen. Eine Wiederholung der Aufnahmen in 5–10 Jahren wird eine genaue Dokumentation in der Verschiebung des Artenspektrums an den einzelnen Standorten ermöglichen.

Anpassung an alpine Lebensräume geht auf Kosten der Konkurrenzstärke

Bisher gibt es sehr wenige Untersuchungen, die das Auftreten bestimmter Körpermerkmale und Arteeigenschaften in Lebensgemeinschaften vergleichen, die sich an unterschiedliche klimatische Bedingungen angepasst haben. So können Anpassungsstrategien an alpine Klimazonen besser verstanden werden. In der Untersuchung traten in den Artengemeinschaften, die unter kälteren Bedingungen leben, eine Reihe von Merkmalen gehäuft auf.

In höheren Lagen dominieren Bienenarten mit sozialer Lebensweise sowie Arten, die unterirdische Nester anlegen, was möglicherweise das Überwinterungsrisiko verringert.

Sowohl Bienen wie Schmetterlingsarten, die in höheren Lagen vorkamen, waren im Mittel größer als Arten, deren Verbreitungsareal auf tiefere Lagen begrenzt war. Körpergröße ist ein Merkmal, das sowohl mit öko-physiologischen Anpassungen an kältere Bedingungen als auch mit einer besseren Ausbreitungsfähigkeit in Zusammenhang steht (Hodkinson 2005).

Als weitere Anpassungsstrategien der Tagfalter an alpine Bedingungen wurden eine erhöhte Eizahl und eine kürzere Eireifezeit im Vergleich zu Arten, die nicht an alpine Bedingungen angepasst sind, identifiziert.

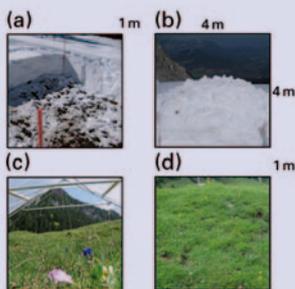
Es konnte gezeigt werden, dass Tagfalter- und Bienenpopulationen, die auf höheren Flächen vorkamen, kleinere Populationen und auch eine geringere Verbreitung über Europa hatten.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann man schließen, dass alpine Schmetterlinge und Bienen durch den Klimawandel besonders gefährdet sind, weil ihre Populationsgrößen kleiner sind und sie ein sehr begrenztes Verbreitungsgebiet haben.

Die Auswertungen ergeben, dass ein weiterer, bisher wenig berücksichtigter Faktor zur Gefährdung der alpinen Spezialisten beiträgt:

Die evolutionären Anpassungen an widrige klimatische Bedingungen im Gebirge gehen, wie eine Analyse der Verwandtschaftsstrukturen zeigt, auf Kosten der Konkurrenzstärke. Daher kommt der Großteil der alpinen Arten nur in den höheren Lagen vor, obwohl die potentiellen Verbreitungsgebiete auch in tiefere Lagen reichen könnten. Diese reduzierte Konkurrenzkraft könnte den Spezialisten zum Verhängnis werden, wenn mit zunehmender Temperaturerhöhung die dominanteren, wärmeliebenderen Arten die alpinen Lebensräume und Regionen in hohen Breitengraden erobern.

Aus Naturschutzsicht ist zu überlegen, ob es Maßnahmen gibt, die einen Konkurrenzausschluss schützenswerter alpiner Insektenarten verhindern, z. B. durch das Management der Vegetation oder der Nisthabitate.



◀ **Abbildung 3**

Experimentelle Simulation von Extremwetterereignissen entlang eines Höhengradienten im Nationalpark Berchtesgaden:

- a) verfrühte Schneeschmelze,
- b) verspätete Schneeschmelze,
- c) Dürre,
- d) Kontrolle.

Fotos: Annette Leingärtner, Bernhard Hoiß

Extremereignisse verändern Pflanze-Tier-Interaktionen

Im zweiten Teil des Projektes wurde das Auftreten klimatischer Extremereignisse simuliert. Insbesondere war von Interesse, ob Reaktionen auf Extremereignisse von den umgebenden klimatischen Bedingungen abhängen. So könnte es sein, dass Extremereignisse in alpinen Klimazonen andere Konsequenzen für die Blühphänologie und Pflanzeninhaltsstoffe, sowie die Aktivität von Bestäubern und pflanzenfressenden Insekten haben als in den gemäßigten Klimazonen tieferer Lagen, in denen bisherige Klima-Experimente stattfanden. Deshalb wurden entlang des Höhengradienten im Nationalpark Berchtesgaden an 15 Standorten experimentelle Klimamanipulationen durchgeführt, um die Folgen von Extremereignissen in unterschiedlichen Klimaten zu untersuchen. Bei den simulierten Klimaextremen handelte es sich um extreme Dürre im Frühjahr sowie verfrühte bzw. verspätete Schneeschmelze (Abb. 3), also um Ereignisse, die nach den aktuellen Klimamodellen in der Zukunft gehäuft auftreten werden. Jede der Experimentierflächen war 16 m² groß. Eine vierte Fläche gleicher Größe wurde als Kontrolle ausgewählt und nicht manipuliert. Auf jeder der 60 Flächen wurden die folgenden Parameter erfasst, um die Auswirkungen der simulierten Extremereignisse entlang des Klimagradienten auf ökologische Wechselbeziehungen analysieren zu können: 1) Blühphänologie der Pflanzen, 2) Schlupfphänologie im Boden nistender Insekten, 3) Nährstoffgehalt von Pflanzen, 4) Blattfraß durch Insekten, 5) Bestäubernetzwerke.

Erste Ergebnisse zeigen, dass keine Änderungen hinsichtlich der Futterqualität (Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis) auftraten und legen nahe, dass der Fraßschaden an Pflanzen durch die simulierten Extremereignisse nicht verändert wurde. Entlang des Höhengradienten konnten jedoch Unterschiede in der Futterqualität festgestellt werden. Hinsichtlich der Wechselbeziehungen zwischen Blütenpflanzen und Bestäubern deuten erste Ergebnisse darauf hin, dass alpine Systeme für Störungen durch Extremereignisse anfälliger sind als Bestäu-

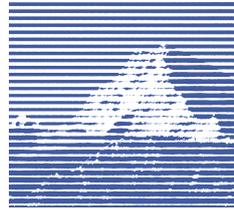
bernetzwerke in tiefer gelegenen Klimazonen. So verringerten Trockenstress und verfrühte Schneeschmelze in dem Experiment signifikant die Anzahl von Insektenarten, die als Bestäuber für eine Pflanzenart zur Verfügung standen.

Schlussfolgerungen und Anpassungsstrategien

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Klimawandel und klimatische Extremereignisse viele alpine Arten in den bayerischen Alpen gefährden. Viele alpine Arten könnten auch unter wärmeren Klimabedingungen existieren, wenn sie nicht durch überlegene Konkurrenten verdrängt würden. Die höhere Anfälligkeit von Pflanze-Bestäuber-Beziehungen in der alpinen Klimazone deutet auf zusätzliche Risiken für die Vegetation hin. Da von jeder Pflanzenart zahlreiche Insektenarten abhängen, gefährdet das Aussterben von Pflanzenarten auch die Existenz der assoziierten Insektenlebensgemeinschaften.

Die komplexen Folgen des Klimawandels sind jedoch noch lange nicht verstanden und vorhersagbar. Weitere Untersuchungen, die Wechselbeziehungen, wie Konkurrenz und Bestäubung, sowie evolutive Anpassungsmechanismen berücksichtigen, sind erforderlich. Neben der generellen Prämisse, den Klimawandel global einzudämmen, gibt es auf regionaler Ebene wie z. B. im Nationalpark Berchtesgaden nur begrenzte Möglichkeiten die negativen Folgen des Klimawandels in den Alpen aufzuhalten. Sinnvoll erscheint ein Diversitätsförderndes Management der Grünlandflächen in den Hochlagen, z. B. durch extensive Beweidung. Insbesondere sollte die mikroklimatische Unterschiedlichkeit in den Alpen genutzt werden, um z. B. durch Offenhaltung von nordexponierten Flächen auch künftig Lebensräume für Kälte-adaptierte Arten bereit zu stellen.

Langfristig kann der Erhalt der alpinen Biodiversität nicht in einzelnen Schutzgebieten geleistet werden, sondern es muss ein ökologisches Netzwerk über den gesamten Alpenraum entwickelt werden, das den Austausch zwischen Populationen und Arealverschiebungen unter veränderten Klimabedingungen erleichtert.



Literatur

- Bartomeus I., Ascher J.S., Wagner D., Danforth B.N., Colla S., Kornbluth S., Winfree R. (2011)* Climate-associated phenological advances in bee pollinators and bee-pollinated plants. *PNAS* 108, 20645-20649
- Hodkinson I.D. (2005)* Terrestrial insects along elevation gradients: species and community responses to altitude. *Biological Reviews* 80, 489-513
- Hoiss B., Krauss J., Potts S. G., Roberts, S., Steffan-Dewenter I. (2012)* Altitude acts as an environmental filter on phylogenetic composition, traits and diversity in bee communities. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences* 279, 4447 – 4456. (doi:10.1098/rspb.2012.1581)
- Hoiss B., Gaviria J., Leingärtner A., Krauss J., Steffan-Dewenter I. (2013)* Combined effects of climate and management on plant diversity and pollination type in alpine grasslands. *Diversity and Distributions* (DOI: 10.1111/j.1472-4642.2012.00941.x).
-

Strategien zur Anpassung an den Klimawandel

Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsverbundes FORKAST

Camilla Wellstein

Koordination FORKAST, Universität Bayreuth

In einer sich ständig verändernden Welt („Panta rhei – alles fließt“, Heraklit) ist Wandel allgegenwärtig und Anpassung nötig. Von Seiten der Wissenschaft werden zum Thema Klimawandel zwei Dimensionen der Anpassung beleuchtet. Zum einen soll versucht werden zu verstehen, wie sich die Natur selbst an den Klimawandel anpasst. Zum anderen soll erforscht werden, wie sich die menschliche Gesellschaft im Einklang mit der Umwelt vorausschauend an die zu erwartenden Klimafolgen anpassen kann. Die Ergebnisse aus FORKAST belegen, welche Anpassungsstrategien nachhaltig und zielführend sind, jedoch besteht weiterer Klärungsbedarf, wo und in welchem Umfang diese eingesetzt werden sollen.



Wälder

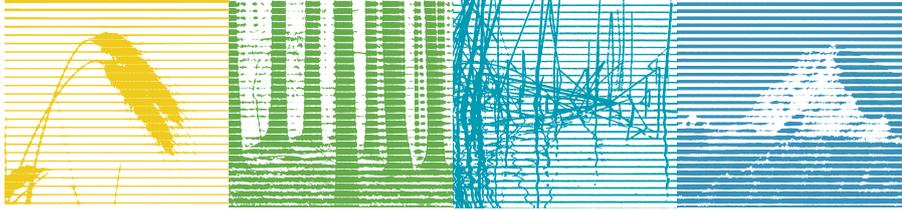
„Wie kein zweiter Wirtschaftszweig ist die Forstwirtschaft aufgrund der langen Lebensspanne von Bäumen zu vorausschauendem Handeln aufgerufen“

Nutzung der innerartlichen Vielfalt

Genetische Vielfalt innerhalb heimischer Baumarten ermöglicht ein hohes Anpassungspotential. Insbesondere sollten lokal angepasste Populationen verwendet werden, beispielsweise von nahegelegenen Trockenstandorten. Ein weiteres Anpassungspotential besteht durch die genetische Vielfalt innerhalb einer Art im gesamten Verbreitungsgebiet - bei den meisten heimischen Baumarten ist das Europa. Schließlich gibt es die Möglichkeit Herkünfte zu kombinieren, dies kann im Sinne einer Risikostreuung erfolgen, bei genauerer Kenntnis der Populationen bietet sich eine gezielte Auswahl an. Dabei sollte in jedem Fall die genetische Vielfalt der jeweiligen Herkunft betrachtet werden, um solche mit geringer Vielfalt, die beispielsweise durch Gründereffekte (eine Population gründete sich aus wenigen Individuen und ist daher wenig vielfältig) entstehen können, auszuschließen. Zur zukünftigen genetischen Entwicklung bei einer forstlichen Neukombination der Herkünfte besteht aus Sicht des Forschungsverbundes FORKAST weiterer Forschungsbedarf.

Nutzung der Artenvielfalt

Insbesondere auf Grenzstandorten können Baumarten, die dem Klimawandel nicht mehr gewachsen sind, durch andere Baumarten ersetzt werden. Beispielsweise kann die Fichte auf gefährdeten Standorten durch Laubbäume ersetzt werden; an extremen Trockenstandorten empfiehlt es sich, eher Eiche als Buche zu pflanzen. An Standorten, die in Zukunft für die Buche zu trocken werden (wie Modellanalysen für den Schweinfurter-Würzburger Raum zeigen), ist die Förderung von Eichen-Mischwäldern mit Hainbuche, Linde, Elsbeere oder auch Esskastanie ratsam. Auch nachrückenden Arten wie die Wärme und Trockenheit liebende Schwarzkiefer oder



Flaumeiche sollte Raum zur Verbreitung gegeben werden, denn diese können in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Insgesamt wird aus Sicht des Forschungsverbundes FORKAST dringend empfohlen, vorhandene und neue Schädlinge zu beachten sowie die Entwicklung von Mischbeständen zu erforschen.

Grünland

„Wirtschaftsgrünland der Tieflagen bleibt unter Klimawandel stabil“

Ergebnisse des Forschungsverbundes FORKAST zeigen, dass die Artenvielfalt der wesentliche Faktor ist, um die ökologische Stabilität der Grünlandflächen im gemäßigten Klima Bayerns aufrecht zu erhalten. Die Artenvielfalt trägt mehr zur Resilienz von Grünland gegen Wetterextreme bei als die Art der Landnutzung. Durch Düngung ergibt sich keine weitere Steigerung der Resilienz von Grünland nach langanhaltender Dürre.

Im Grünland sollte deshalb aus Sicht des Forschungsverbundes FORKAST auf die Erhaltung der Artenvielfalt geachtet und auf den Einsatz intensiver Nutzungsmethoden verzichtet werden. Insbesondere in Jahren mit hoher Niederschlagsvariabilität sollte die Nutzung verringert werden. Auch ist es sinnvoll nach Dürreereignissen eine Erholungszeit zu gewähren, z. B. durch spätere Durchführung von Düngung oder Ernte.

„Bodenqualität erholt sich nach Dürre“

Die Qualität von Böden wird maßgeblich durch die Aktivität von Bakterien, Pilzen und Archaeen („Ur-Bakterien“) bestimmt. Sie zersetzen organisches Material und reichern den Boden dadurch mit Nährstoffen an, welche die Basis für Pflanzenwachstum bilden. Unter extremer Dürre vermindert sich die Leistungsfähigkeit von Böden in Abhängigkeit des Dürrezeitpunktes teilweise deutlich. Eine Regeneration des Bodens setzt schnell wieder ein, sobald Niederschlagsereignisse stattfinden. Starkregenereignisse haben kaum Auswirkungen auf die Aktivitäten der Mikroorganismen und damit auf die Nährstoffkreisläufe.

Die Nutzung neuartiger Pflanzenarten, wie auch das Einwandern von invasiven Arten, muss vermieden werden, da diese ober- und unterirdisch die biologische Vielfalt verringern und damit die Stabilität von Böden vermindern. Daher sollte die Erhaltung der pflanzlichen Vielfalt große Beachtung finden und intensive Landnutzung vermieden werden.

„Handlungsbedarf in den Alpen“

Artenvielfalt und die Vielfalt der Interaktion zwischen Pflanzenarten und Bestäubern, wie Insekten und Schmetterlingen, stellen eine wichtige Absicherung der alpinen Ökosysteme im Hinblick auf klimatische Umweltänderungen dar. So können beim „Ausfall“ von Arten, beispielsweise Bestäubern, andere Arten eine funktionelle Redundanz bieten, d.h. diese Aufgaben zum Teil übernehmen. Die Ergebnisse des Forschungsverbundes FORKAST belegen, dass eine extensive Nutzung des Grünlands (z. B. Beweidung, Mahd) in den Alpen zur Stärkung der Artenvielfalt und der biotischen Interaktion in den Graslandökosystemen der Alpen beiträgt. Hinsichtlich der Erstellung von Gefährdungsanalysen für seltene Arten besteht weiterer Forschungsbedarf, um spezifische Schutzstrategien zu erarbeiten. Dazu gehören auch alpine Schmetterlinge und Bienen, die in kleinen Populationen leben und eine begrenzte Verbreitung haben. Diese alpinen Arten leisten jedoch einen wichtigen Beitrag zur Bestäubung der Alpenflora. Das Einwandern konkurrenzstärkerer Arten muss im Rahmen von Monitoringmaßnahmen weiter beobachtet werden.

Landschaftsvielfalt

Die Ergebnisse des Forschungsverbundes FORKAST belegen, dass die Vielfalt der Landschaft von wesentlicher Bedeutung für die Existenz und das Überleben von Arten und Ökosystemen in Zeiten des Klimawandels ist. Eine vielfältige Landschaft zeichnet sich durch verschiedene Höhenstufen, Expositionen sowie Reliefbildung des Geländes aus. Diese Heterogenität ermöglicht

Pflanzen- und Tierarten, vor Ort weiterzubestehen, indem sie durch Wanderung über geringe Entfernung geeignete Bedingungen wiederfinden. Diese sogenannten klimatischen Refugien sollten erkannt, erhalten und auch neu geschaffen werden. Insbesondere für Arten, welche durch Nischenverlust gefährdet sind, ist diese Schutzstrategie von großer Bedeutung. Dies gilt für alle hier vorgestellten Ökosysteme, also für Baumarten ebenso wie für alpine Gräser und Kräuter. Da gerade einzelne alpine Arten stark durch den Verlust ihrer Kälte-Nische gefährdet sind, ist auf die Verfügbarkeit entsprechender kälterer Landschaftsbereiche zu achten. Gerade in Naturschutzgebieten und Nationalparks bestehen in Bayern heterogene Landschaften mit hoher Artenvielfalt.

Treibhausgas Austausch

„Klimawandel birgt Gefahren und Chancen.“

Grünland stellt auf entwässerten Niedermoorböden eine erhebliche CO₂-Quelle dar. Obwohl eine experimentelle Erwärmung solcher Flächen um knapp 1° C nicht zu einer signifikanten Steigerung der Treibhausgas-Emissionen führte, sind gezielte und fachlich gut durchgeführte Wiedervernässungen eine sinnvolle Maßnahme der Anpassung an die Folgen des Klimawandels. In den untersuchten Mooren führte eine Anhebung des Wasserstands um 10–15 cm zu einer Reduktion der Klimabelastung durch emittiertes CO₂. Die Ergebnisse von FORKAST belegen außerdem, dass extensiv genutzte Wiesen im Mittelgebirge als Kohlenstoffsänke zu schützen sind bzw. deren Fortbestehen gesichert werden sollte. Die Förderung der Artenvielfalt u. a. durch eine Verringerung der Nutzungsintensität ist hier förderlich.

Gewässer

„Invasive Pflanzenarten kontrollieren.“

Invasive heimische und auch neophytische Wasserpflanzen bilden in Seen unter optimalen Umweltbedingungen Massenvorkommen aus, welche mit wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Problemen einhergehen, beispielsweise für die Fischerei, die Schifffahrt und den Badetourismus. Nicht-invasive Arten und die Vielfalt der heimischen Wasserpflanzen sollten vor einer Verdrängung durch invasive und neophytische Arten im Zug der Anpassung an die Folgen des Klimawandels geschützt werden. Auf diese Weise wird auch das ökologische Gleichgewicht gestärkt, welches eine Voraussetzung für die Erhaltung der vorhandenen Vielfalt ist. Eine gezielte Förderung heimischer, nicht-invasiver Pflanzen durch wasserwirtschaftliche Managementmaßnahmen bietet sich an. Voraussetzung ist ein langfristig angelegtes Monitoring der Wasserpflanzen in bayerischen Seen. Als Anpassungsmaßnahme bei bereits ausgebreiteten invasiven Arten fördert das Ausbringen von Matten aus Jutegewebe heimische Arten, welche trotzdem ungehindert wachsen. Wie sich im Experiment gezeigt hat, werden invasive Arten (Wasserpest und Nixkraut) jedoch unterdrückt.

Schlussfolgerungen

1. Die **Biologische Vielfalt** stabilisiert die natürlichen Funktionen und Prozesse von Ökosystemen bei Veränderungen durch den Klimawandel.
2. Die **Vielfalt der Landschaft** ist von sehr großer Bedeutung für das Fortbestehen der heimischen Vielfalt unter einem sich ändernden Klima.
3. Das natürliche Potential der Ökosysteme soll mit **Landnutzungsstrategien kombiniert** werden, um negative Auswirkungen bzw. Konflikte bereits frühzeitig zu identifizieren und auszugleichen.
4. Anpassungspotentiale der Natur sollen gleichzeitig für die **Stabilisierung der Ökosystemdienstleistungen** genutzt werden (Biomasseproduktion, Biologische Vielfalt, Treibhausgase, Erholungswert), um so tragfähige und sich selbst verstärkende Schutzmaßnahmen zu erhalten.

Beteiligte Institutionen

FORCAST Teilprojekt 4	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT), Professur für Vegetationsökologie Am Hofgarten 4, 85354 Freising
FORCAST Teilprojekt 5	Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie Universitätsstr. 30, 95440 Bayreuth
FORCAST Teilprojekt 6	Universität Bayreuth, Abteilung Bodenphysik Universitätsstr. 30, 95440 Bayreuth
FORCAST Teilprojekt 8	Universität Bayreuth, Professur für Störungsökologie Universitätsstr. 30, 95440 Bayreuth
FORCAST Teilprojekt 15	Technische Universität München, Lehrstuhl für Bodenökologie Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg Helmholtz Zentrum München, Abteilung für Umweltgenomik Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH) Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg
FORCAST Teilprojekt 1	Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Biogeografie Universitätsstr. 30, 95440 Bayreuth Bayerisches Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht (ASP) Forstamtsplatz 1, 83317 Teisendorf
FORCAST Teilprojekt 2	Technische Universität München, Fachgebiet Geobotanik Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising
FORCAST Teilprojekt 3	Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Physische Geographie Kochstr. 4/4, 91054 Erlangen
FORCAST Teilprojekt 13	Technische Universität München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising
FORCAST Teilprojekt 14	Universität Bayreuth, Juniorprofessur Biogeographische Modellierung Universitätsstr. 30, 95440 Bayreuth
FORCAST Teilprojekt 9	Technische Universität München, Fachgebiet für Limnologie Limnologische Station Iffeldorf, Hofmark 1–3, 82393 Iffeldorf
FORCAST Teilprojekt 10	Technische Universität München, Fachgebiet für Ökolog klimatologie Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising
FORCAST Teilprojekt 11	Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie Biozentrum, Am Hubland, 97074 Würzburg Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Ökologische Station Fabrikschleichach Glashüttenstr. 5, 96181 Rauhenebrach
FORCAST Teilprojekt 12	Universität Regensburg, Lehrstuhl für Botanik Institut für Botanik, 93040 Regensburg
FORCAST Teilprojekt 16	Technische Universität München, Lehrstuhl für Atmosphärische Umweltforschung Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising Technische Universität München, Lehrstuhl für Bodenkunde Emil-Raman-Str. 2, 85354 Freising Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU) Kreuzeckbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen
FORCAST Teilprojekt 17	Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie Biozentrum, Am Hubland, 97074 Würzburg

A **Aquatisch:** bezeichnet man in der Biologie die Lebensweise von Organismen, die ihren Lebensmittelpunkt im Wasser haben (TP 9).

Assimilation: Im Allgemeinen Umwandlung von körperfremden in körpereigene Stoffe. Im Speziellen Synthese organischer Substanzen aus Kohlendioxid und Wasser bei der → Photosynthese. (TP5)

Atmung: Abbau organischer Substanz zu anorganischen Endprodukten im Stoffwechsel zum Zweck der Energiegewinnung. Bei Pflanzen findet der umgekehrte Prozess wie bei der → Photosynthese statt: Organischer Kohlenstoff wird in anorganischen (CO₂) umgewandelt; das CO₂ wird an die Atmosphäre abgegeben. (TP5)

B **Bayerische Inventurdaten:** Waldinventuren werden durchgeführt, um großräumige Waldverhältnisse und forstliche Produktionsmöglichkeiten zu erfassen. Die Inventur erfolgt stichprobenartig; hierbei werden unter anderem Baumarten und Baumdurchmesser erfasst. Anhand wiederholter Durchführungen kann das Baumwachstum ermittelt werden (TP 14).

Biodiversität: Biologische Vielfalt an Arten, Genen, Lebensräumen oder Funktionen im Ökosystem; gemäß der Biodiversitäts-Konvention definiert als „die Variabilität unter lebenden Organismen jeglicher Herkunft, darunter unter anderem Land-, Meeres- und sonstige aquatische Ökosysteme und die ökologischen Komplexe, zu denen sie gehören“ (TP 8).

Biodiversitätsmuster: Veränderungen der Artenzusammensetzung von ausgewählten Artengruppen entlang von bestimmten Gradienten, z. B. der Höhenlage, eines Niederschlagsgradienten oder der Jahresdurchschnittstemperatur (TP 2).

Biomasseproduktion: Erzeugung stofflicher Masse durch Lebewesen, z. B. Pflanzen (TP 1).

Biozönose: ist eine Gemeinschaft von Organismen verschiedener Arten in einem abgrenzbaren Lebensraum bzw. Standort (TP 9).

Blüte-Bestäuber-Interaktion: funktionelle Beziehung zwischen Blütenpflanzen und den an sie angepassten Bestäubern (TP 8).

Blühphänologie: zeitliche Abfolge und Entwicklung (Phänologie) für den Blühbeginn von Pflanzen eines Gebietes (TP 8).

Bodenatmung: Atmung der im Boden lebenden Mikroorganismen und der Pflanzenwurzeln; durch die Bodenatmung wird CO₂ produziert, das vom Boden in die Atmosphäre entweicht; der Anteil der Mikroben an der Bodenatmung wird auf 70 %, jener der Wurzeln auf 30 % geschätzt; je höher der Anteil der organischen Substanz im Boden ist, desto mehr CO₂ kann von den Mikroorganismen beim Abbau dieser organischen Substanz unter Vorhandensein von Sauerstoff (d. h. im nicht wassergesättigten Boden, z. B. entwässerten Moorböden) erzeugt werden (TP 4).

Bodenwasser- und Nährstoffhaushalt: Summe des Ein- und Austrags von Wasser und Nährstoffen im Boden oder in bestimmten Umweltausschnitten (TP 6).

C **CO₂-Äquivalente:** siehe GWP (TP 4).

D **Dendroökologie:** umfasst alle Teilgebiete der Jahrringforschung (Dendrochronologie), die Umweltinformationen aus den Jahrringen von Bäumen ablesen lässt (TP 3).

Dormanz: bedeutet „Samenruhe“. Sie bezeichnet die Eigenschaft eines Samens, entweder direkt nach der Samenreife oder trotz geeigneter Umweltbedingungen nicht zu keimen. Sie kann physiologisch, physikalisch (wasserundurchlässige Samenschale) oder

morphologisch (noch unreifer Embryo) bedingt sein. Sie wird z. B. durch eine Kälteperiode oder Verletzung der Samenschale gebrochen oder geht nach der Reifung des Embryo verloren. Sie dient dazu, zur richtigen Jahreszeit (z. B. im Frühling, wenn die Streu zersetzt ist und ein vergleichsweise hoher Anteil offenen Bodens zur Verfügung steht) zu keimen oder der Pflanzenart einen Puffer in Form einer Samenbank im Boden zu erhalten (TP 12).

E Eddy-Kovarianz-Methode: Mikrometeorologische Methode zur direkten Bestimmung des Austausches an Energie und Beimengungen zwischen der Atmosphäre und der Unterlage. Da die Atmosphäre in vielen kleineren und größeren Luftkörpern mit geringfügigen Dichteunterschieden (für den Betrachter nicht sichtbar) organisiert ist, kann man zeitlich hoch aufgelöste Messungen bestimmter Eigenschaften (Temperatur, Feuchte, Kohlendioxidgehalt) und der Vertikalgeschwindigkeit des Windes dazu nutzen, mittels statistischer Auswertung die Austauschströme zu ermitteln (TP 5).

Emissionen: aus dem Lateinischen: *emittere* = ausschicken; Aussendung von Störfaktoren in die Umwelt; hier bezogen auf die Emission von Treibhausgasen vom Ökosystem in die Atmosphäre (TP 4).

Endemisch: Pflanzen- oder Tierarten, die ausschließlich in einer räumlich klar abgegrenzten Region vorkommen, sind in diesem Gebiet endemisch (TP 17).

Epigäische Moose: Unmittelbar auf dem Bodensubstrat lebende Moosarten (TP 2).

Epiphytische Flechten: Symbiosen von Pilzen und Algen, die als Standorte Pflanzenteile, z. B. die Rinde von Baumstämmen oder Ästen, besiedeln. Die Flechten bilden drei verschiedene Wuchs-

formen: flache Krustenflechten, die ein blattartiges Lager bildenden Blattflechten und die von den Zweigen herunterhängenden verzweigten Strauchflechten (TP 2).

Extremereignis: Seltene klimatische oder Witterungsereignisse, die markant vom Durchschnittswert abweichen und deshalb außerordentlich sind. Sie müssen nicht unmittelbar mit Schäden verbunden sein (TP 10).

Extremwertstatistik: Statistische Theorien, Techniken und Modelle für sehr seltene Beobachtungen (= Extremereignisse). (TP 10).

F Fertil: sind Samen, wenn sie einen Embryo enthalten und lebens- bzw. keimfähig sind (TP12).

Flussrate: Bewegung einer Stoffmenge pro Zeiteinheit (TP 16)

Funktionelle Artmerkmale: Merkmale einer Art, die sich durch natürliche Selektion entwickelt haben und der Art das Überleben in ihrer spezifischen Umgebung ermöglichen (TP 17).

Funktionelle Diversität/Vielfalt: Begriff aus der Ökologie, der alle Prozesse umfasst, die durch eine Interaktion der Mitglieder einer Gemeinschaft geprägt sind, z. B. Konkurrenz, Räuber-Beute-Beziehungen, Parasitismus oder Symbiosen und die optimale Ressourcennutzung durch Nahrungsketten oder -netze (TP 8).

G Genetische und phänotypische Variabilität: Als genetische Variabilität wird die Unterschiedlichkeit von Individuen bezeichnet, soweit sie auf Unterschieden in den Erbanlagen beruht. Die phänotypische Variabilität fasst Unterschiede zusammen, die auf der Anpassung der Erscheinungsform (z. B. Wachstum) eines Individuums an Umwelteinflüsse beruhen (TP 14).

GOK: Geländeoberkante (TP 4).

Großherbivoren: ist die Bezeichnung für große Säugertiere, die sich ausschließlich oder vorwiegend von Pflanzen ernähren. In den Alpen sind dies z. B. Gämse und Steinbock oder Rinder, Schafe oder Ziegen (TP 12).

GWP: Abkürzung für den englisch sprachigen Begriff „Global Warming Potential“ = Treibhausgaspotential bzw. CO₂-Äquivalente (CO₂e); beschreibt wie stark ein Treibhausgas über einen bestimmten Zeitraum im Vergleich zu CO₂ zum Treibhauseffekt beiträgt; für einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP100) ist beispielsweise eine Tonne Methan (CH₄) 21-mal und eine Tonne Lachgas (N₂O) 310-mal so klimawirksam, wie dieselbe Menge CO₂; hier angegeben als t CO₂e ha⁻¹ per-1 (Tonnen CO₂-Äquivalente pro Hektar und Betrachtungszeitraum/Periode) (TP 4).

GWS: Abkürzung für Grundwasserstand (TP 4).

H Herkunft: Samen, Pflanzen oder Bäume aus einer als autochthon (in einem betrachteten Gebiet entstanden oder lange präsent gewesen) angenommenen Population, die im Allgemeinen durch mehrere Generationen genetische Kontinuität zeigen; auch als Provenienz bezeichnet (TP 8).

I Indikatorart: Pflanzenarten mit ausgewählten Phasen, anhand derer physiologisch-biologisch begründet phänologische Jahreszeiten definiert werden (TP 10).

Isotopenmarkierungskammer: Folienhaube, die über dem Boden luftdicht verschlossen ist und deren Luft mit Gasen angereichert wird, die eine andere Isotopenzusammensetzung als natürliche Luft haben, z. B. Kohlendioxid nahezu ausschließlich mit dem Kohlenstoffisotop 13 (TP 5).

K Klimawirksamkeit/Klimabelastung: siehe GWP (TP 4).

Kohlenstoffsенke: ein Reservoir (hier das Ökosystem), das zeitweise oder dauerhaft Kohlenstoff aufnimmt und speichert; natürliche Moore mit einem hohen Grundwasserstand gelten als Kohlenstoffsенken, da die Moorvegetation pro Jahr mehr Kohlenstoff in Form von CO₂ aus der Atmosphäre aufnimmt, der als organischer Kohlenstoff (abgestorbene Pflanzenteile) im Moor gespeichert wird, als das Moor an Kohlenstoff (z. B. durch Bodenatmung) verliert; eine Kohlenstoffsенke wirkt der Erderwärmung entgegen, da sie das Treibhausgas CO₂ aus der Atmosphäre aufnimmt (TP 4).

Konkurrenzvorteil: Stärkung einer Art gegenüber einer anderen im Wettbewerb um Ressourcen oder Wuchsraum (TP 3).

L Lokale 100-jährige Extremtrockenheit: Trockenheit, wie sie nur alle 100 Jahre in einem bestimmten Gebiet vorkommt (TP 6).

Lokale 1000-jährige Extremwetterereignisse: Extremwetterereignis, wie es nur alle 1000 Jahre in einem bestimmten Gebiet vorkommt. (TP 6).

M Maitrieb: Neuer, hellgrüner Trieb bei Nadelbäumen (TP 10).

Mikrobielle Biomasse: Masse aller Mikroorganismen (hier: im Boden) (TP 6).

Minilysimeter: ein mit einem intakten Boden-/Pflanzensystem gefüllter Edelstahlzylinder zum Studium von Biosphäre-Atmosphäre-Hydrosphäre-Austauschprozessen umweltrelevanter Stoffe (TP 16).

Mutualismus: Eine Form der Wechselbeziehung zwischen den Lebewesen zweier Arten, die (im Gegensatz z. B. zur Konkurrenz oder zum Parasitismus) für beide Arten von Vorteil ist. Diese findet sich z. B. zwischen Pflanzen und Bestäubern. Bestäuber bekommen als Gegenleistung meist Nektar oder Pollen (TP 11).

N Neophyten: Pflanzen, die sich – ohne oder mit menschlicher Einflussnahme – in einem Gebiet etabliert haben, in dem sie zuvor nicht heimisch waren (TP 9).

Nährstoff-limitierte Ökosysteme: Eine Umwelt, die generell nährstoffarm ist oder in der ein Nährstoff (meist Stickstoff oder Phosphor) im Mangel ist. Der am wenigsten vorhandene Nährstoff begrenzt das Pflanzenwachstum auch dann, wenn alle anderen Nährstoffe im Überfluss vorhanden sind (TP 6).

O Ökosystemfunktionen: Vielzahl verschiedener Prozesse des Transports, der Umwandlung und Speicherung von Stoffen und Energie, die aus den Wechselwirkungen zwischen den lebenden und nicht lebenden Ökosystemteilen resultieren; hierzu zählen u. a. die Produktion von Biomasse, biogeochemische Kreisläufe (z. B. Kohlenstoff-, Stickstoffkreislauf), die Bodenbildung und die Filterung und Speicherung von Wasser (TP 4).

Open top chamber (OTC): nach oben hin geöffnetes Klein-Gewächshaus (TP 4).

Organische Substanz: hauptsächlich aus Kohlenstoff in Kombination mit Wasser gebildete Stoffe; der Begriff der organischen Bodensubstanz wird meist synonym mit dem Begriff Humus verwendet, da sich die organische Substanz im Boden zu etwa

85 % aus abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe und deren Umwandlungsprodukten, als dem Humus und nur zu ca. 15 % aus lebenden Pflanzenwurzeln sowie Bodenorganismen zusammensetzt (TP 4).

P Parasit: (griechisch: para „neben“, sitos „gemästet“) Schmarotzer, welcher zum Ressourcenerwerb bzw. Steigerung der eigenen Fitness einen Organismus (Wirt) nutzt. Dabei wird der Wirt geschädigt, bleibt aber meist am Leben (TP 10).

Phänologie: (griechisch: phainos „erscheinen“, logos „Lehre“) Wissenschaft, die sich mit den im Jahresablauf wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen in der Natur (z. B. Blattentfaltung, Blüte, Vogelzug) befasst (TP 10).

Photosynthese: biochemischer Prozess, bei dem Pflanzen, Algen und einige Bakteriengruppen mit Hilfe lichtabsorbierender Stoffe (meist Chlorophyll) aus energiearmen anorganischen Stoffen, hauptsächlich Kohlendioxid und Wasser, energiereiche organische Verbindungen (Kohlenhydrate) erzeugen, die zum Bestandteil des Photosynthese betreibenden Lebewesens werden (TP 4).

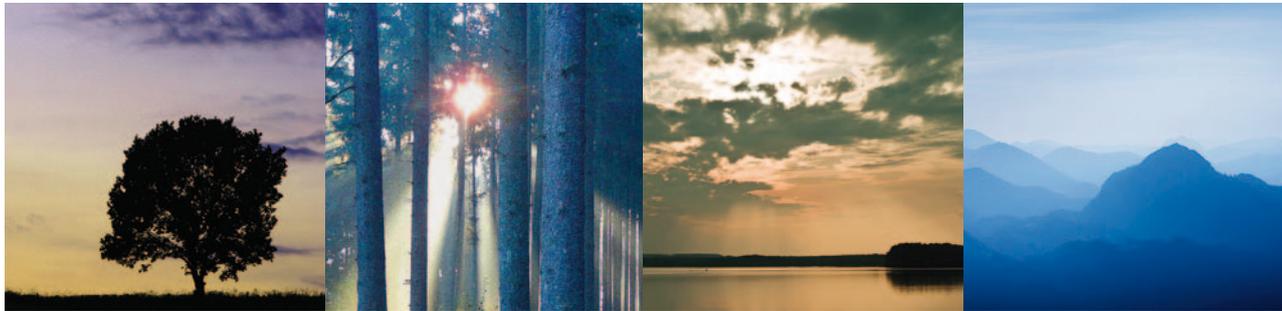
Pollen: Blütenstaub (TP 10).

Pollensaison: Jahreszeit, in der Pflanzen ihren Pollen entlassen. Meist sind windverbreitete Pollen gemeint, die allergische Reaktionen beim Menschen hervorrufen (TP 10).

Produktivität: Menge an Biomasse, die das Ökosystems, hauptsächlich in Form von Pflanzenbiomasse, erzeugt (siehe Ökosystemfunktionen) (TP 4).

Proteingehalt: Menge an Protein in der Pflanze. (TP 6).

- Q Quellstärke (von Böden für Treibhausgase):** die Menge an Treibhausgasen, die auf Zeit und Fläche bezogen aus einem Boden in die Atmosphäre freigesetzt (emittiert) wird (TP 16).
- R Redundanz:** Wenn mehrere Arten in einem Ökosystem die gleiche Funktion ausüben (z. B. eine Pflanzenart bestäuben), gelten sie als funktionell redundant. Durch eine höhere Zahl redundanter Arten wird diese Funktion in der Regel über längere Zeitspannen stabilisiert (TP 11).
- Regenerationsfähigkeit:** Fähigkeit eines Organismus, verloren gegangene Teile zu ersetzen (TP 9).
- Resilienz bzw resilient:** die Fähigkeit eines (Öko-)Systems, nach Störung in den Ausgangszustand zurückzukehren und seine grundlegende Organisationsweise zu erhalten (TP 8).
- S Schädling:** Organismen, welche den wirtschaftlichen Erfolg des Menschen negativ beeinflussen (z. B. Reblaus) (TP 10).
- Schlüsselart:** Pflanzenart, die ein Ökosystem prägt und einen großen Einfluss auf deren Funktionieren hat. (TP 1).
- Senkenstärke (von Böden für Treibhausgase):** die Menge an Treibhausgasen, die auf Zeit und Fläche bezogen aus der Atmosphäre in den Boden aufgenommen (deponiert) wird (TP 16).
- Spätfrost:** Frostereignis (Minimumtemperatur unter 0 °C), das bis Mai/Juni auftreten kann. Kann bei empfindlichen Pflanzen zu Absterbeerscheinungen von neuem Laub/Blüten führen (TP 10).
- Sprossatmung:** Atmung der oberirdischen Pflanzenteile. Durch die Atmung wird CO₂ produziert, das in die Atmosphäre entweicht. (TP5)
- Standort-Tragkraft:** wird gemessen an der Größe einer Population, die von einem Standort nachhaltig versorgt werden kann. Neben den Klimafaktoren Strahlung, Temperatur und Niederschlag, kann auch die Nährstoffversorgung des Bodens ausschlaggebend sein (TP 13).
- Störungsinteraktionen:** Beeinflussung der Eintretenswahrscheinlichkeit einer Störung, z. B. Feuer, durch das vorherige Eintreten der gleichen oder einer anderen Störung, z.B. Feuer oder Borkenkäfer (TP 14).
- Störungsregime:** Unter einem Störungsregime versteht man die Summe aller Störungen in einem räumlich abgegrenzten Gebiet und deren Wechselwirkungen (TP 14).
- Stofffluss:** Transport einer Stoffmenge pro Zeit- und Flächeneinheit. TP 4.
- Submediterran:** bezeichnet die Übergangszone zwischen der Mittelmeerregion und der Laubwaldzone (TP 1).
- T Temperate Wälder:** Europa liegt größtenteils in der temperaten Ökozone, auch nemorale Zone, feuchte Mittelbreiten oder feucht-gemäßigte Zone genannt. Es herrschen Mischwälder und sommergrüne Laubwälder vor (TP 14).
- U Unterwasservegetation:** Gesamtheit der Pflanzen, die unter der Wasseroberfläche wachsen, Wasserpflanzen (TP 9).
- V Vegetativ:** ungeschlechtliche Vermehrung (TP 9).
- Vegetationsperiode:** Sich jährlich wiederholender Jahresteil, in dem eine Pflanze aktiv wächst, sich entfaltet sowie Blüten und Samen bildet (TP 9, 10).



Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars erbeten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Publikation wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Der Inhalt wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.