

Mögliche Konsequenzen des Klimawandels für Pflanzenareale in Deutschland

Potential consequences of climate change for plant species ranges in Germany

Sven Pompe, Silje Berger, Gian-Reto Walther, Franz Badeck, Jan Hanspach, Sabrina Sattler, Stefan Klotz und Ingolf Kühn

Zusammenfassung

Natürliche Systeme werden bereits durch den anthropogenen Klimawandel beeinflusst. Schutzbemühungen und Landnutzungseffekte überdecken dabei möglicherweise aktuelle Klimasignale in den Artarealen. Bei fortschreitender Klimaänderung könnten sich die Verbreitungsgebiete der Florenelemente in Deutschland maßgeblich verändern. Selbst bei moderater Klimaänderung (ca. +2,2 °C bis 2080) reduzieren sich für ca. 60 % der untersuchten Arten die Gebiete mit klimatisch geeigneten Bedingungen in Deutschland erheblich. Der Rückgang eines Teils der aktuell vorkommenden Arten und die Verbesserung der Bedingungen für andere Arten (auch aus angrenzenden Regionen Europas) führen in den Modellsimulationen zur Veränderung der lokalen Artenzusammensetzung.

1 Einleitung

Das Klima spielt eine bedeutende Rolle bei der Ausbildung von Pflanzenarealen. Klimainduziert sind in der Geschichte der Erde immer wieder pflanzengeographische Veränderungen aufgetreten. In Verbindung mit der globalen Klimaerwärmung wurden seit den 1990er-Jahren weltweit zunehmend Veränderungen in der Natur festgestellt, wie beispielsweise die Verschiebung von Blühzeitpunkten und Veränderungen von Arealgrenzen (WALTHER et al. 2002; ROOT et al. 2003; PARMESAN 2006). Insbesondere aus Sicht des Naturschutzes bleibt zu untersuchen, inwieweit sich bei anhaltendem Erwärmungstrend aktuelle Entwicklungen fortsetzen und bestimmte Arten durch klimainduzierte Verkleinerung ihres Areals gefährdet werden könnten (IPCC 2007). Dabei gewinnen regionalisierte Untersuchungen an Bedeutung, einerseits um die Veränderungen in der Natur zu dokumentieren, andererseits aber auch, um durch die Kombination mit Szenarien langfristige Handlungsoptionen ableiten zu können.

Hierzu wurden in den vergangenen Jahren u. a. so genannte bioklimatische Modelle entwickelt, die die Verbreitung von Arten (ihr Areal) mit klimatischen (z. T. auch weiteren) Umweltfaktoren in Beziehung setzen und Auswirkungen möglicher veränderter Bedingungen abschätzen (KÜHN et al. in diesem Heft, S. 8 ff.). Die auf Grund von Modellannahmen berechneten Arealveränderungen wurden bislang jedoch nur selten mit Felddaten kombiniert, um u. a. diese mit Aussagen von Szenarien zu vergleichen.

Im Rahmen des Projekts „Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora“ wurden unterschiedliche Reaktionen von Arten in Deutschland auf den Klimawandel untersucht (vgl. Abb. 1). Dazu wurden sowohl Informationen über die rezente Entwicklung von Pflanzenvorkommen gesammelt als auch durch Modellrechnungen mögliche klimainduzierte Konsequenzen für die Flora ermittelt. Die Feldstudien konzentrierten sich auf Arealränder, sei es, um neue Vorposten als Zeichen von Areal-

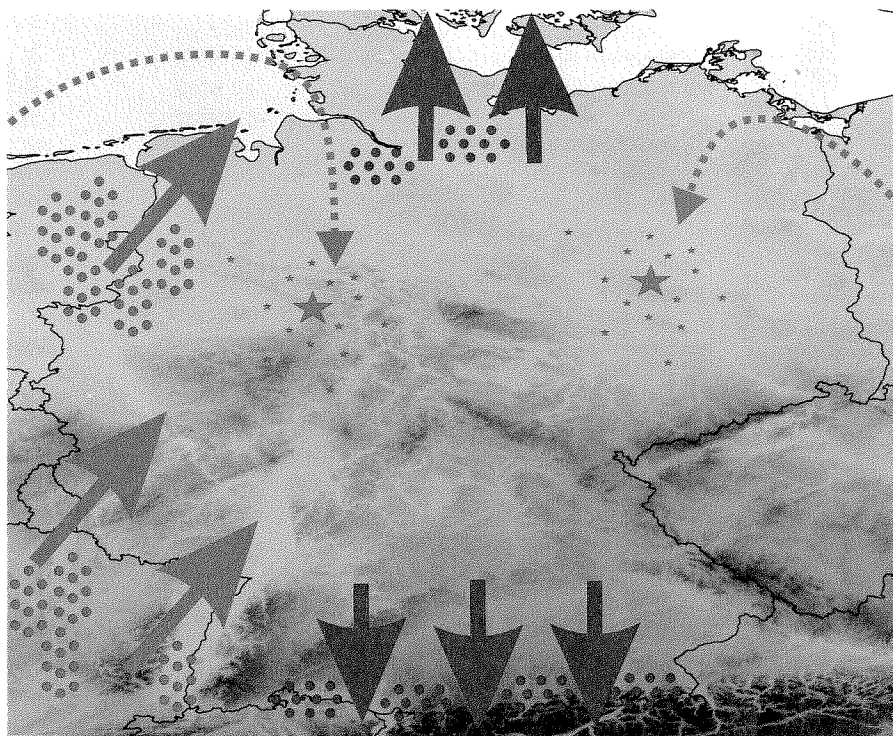


Abb. 1: Schematische Darstellung möglicher Trends von Arealverschiebungen. An Kälte angepasste (arktisch-alpine) Arten ziehen sich in kühlere Regionen im Norden oder in Gebirgen zurück (rot), Wärme liebende Arten wandern aus benachbarten Gebieten ein (grün), bzw. weiten ihr bestehendes Areal in Deutschland aus. „Neue“, aus fernen Regionen stammende Arten (blau) finden den Weg nach Deutschland bzw. werden eingeführt und können sich in neu klimatisch geeigneten Nischenräumen etablieren.

Fig. 1: Some potential climate change impacts on plant distribution patterns. Cold-adapted (arctic-alpine) species retreat to northern regions and higher elevations (red), warm-adapted/cold-sensitive species expand their existing ranges within Germany or immigrate from other neighbouring regions (green). New species are introduced and spread as new climatically suitable areas develop (blue).

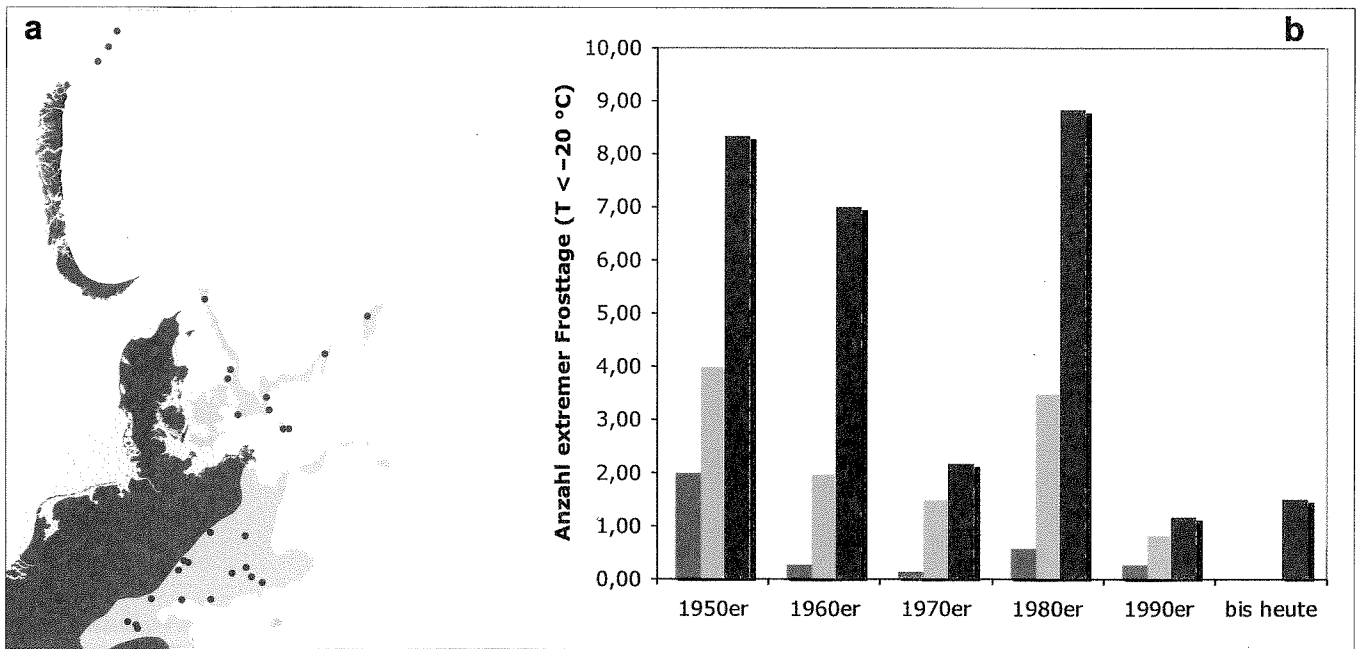


Abb. 2: a) Historische (dunkelgrün) und modellierte gegenwärtige (hellgrün) Verbreitung der Stechpalme (*Ilex aquifolium*), sowie im Freiland verifizierte neue Vorkommen (rote Punkte) (Quelle: WALTHER et al. 2005, verändert und aktualisiert); b) durchschnittliche Anzahl der Tage pro Winter mit Temperaturen unter -20 °C in Deutschland (Quelle: DEUTSCHER WETTERDIENST, DWD) innerhalb des historischen Verbreitungsgebiets (grün), an der Verbreitungsgrenze (gelb) und außerhalb des historischen Verbreitungsareals (rot) der Stechpalme im Vergleich

Fig. 2: a) Historical (dark green) and modelled current (light green) distribution of European Holly (*Ilex aquifolium*), as well as new occurrences verified in the field (red), (source: WALTHER et al. 2005, modified); b) mean number of very cold winter days in Germany ($< -20\text{ °C}$, source: GERMAN WEATHER SERVICE, DWD) within the historical range (green), at the margins of the historical range (yellow) and outside the historical range of the European Holly (red)

ausweitungen zu dokumentieren, oder um den Zustand von Populationen im Hinblick auf mögliche Anzeichen einer Arealverringerng durch den Klimawandel zu erfassen.

2 Beobachtungen klimainduzierter Veränderungen der Flora

Wie die folgenden Beispiele belegen, lassen sich bereits klimainduzierte Veränderungen in der Natur ablesen. Eine Arealerweiterung über das gut dokumentierte historische Verbreitungsgebiet hinaus wurde für die Stechpalme (*Ilex aquifolium*) in Skandinavien festgestellt und anhand eines Vergleichs mit historischen Verbreitungs- und Klimadaten (IVERSEN 1944) auf gestiegene Wintertemperaturen zurückgeführt (WALTHER et al. 2005). Auch für Deutschland wurden im Rahmen des Projekts zahlreiche Vorkommen jenseits der historischen Verbreitungsgrenze der Stechpalme verzeichnet. Vor allem gestiegene mittlere Januartemperaturen und weniger extreme Frostereignisse haben die Arealerweiterung der kälteempfindlichen Art ermöglicht (vgl. Abb. 2). Gleiches ist für die Lorbeerkirsche (*Prunus laurocerasus*) anzunehmen. Sie konnte in den letzten 10–20 Jahren in zahlreichen Gebieten Deutschlands ver-

wildern, zunächst im Saarland, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, inzwischen auch in großen Teilen Nordwestdeutschlands. Schon seit längerer Zeit ist das Verwildern von *Prunus laurocerasus* aus südlichen Teilen Europas bzw. aus dem wintermilden Großbritannien bekannt (z. B. PERRING u. WALTERS 1962; JÄGER 1975). Ein Vergleich mit der klimatischen Situation im Heimatgebiet legt nahe, dass die Art in Deutschland zunehmend günstige Bedingungen vorfindet und sich somit auch außerhalb der Gärten etablieren kann. Hierbei ist neben den Wintertemperaturen auch die Länge der Vegetationsperiode entscheidend (BERGER et al. 2007). Ein weiterer Neuzugang der deutschen Flora ist der Meerfenchel (*Crithmum maritimum*). Die kälteempfindliche Art, die zur Keimung bestimmte Mindesttemperaturen im Frühjahr benötigt (OKUSANYA 1977), hatte lange Zeit ihre nördlichsten Vorkommen an der Küste des europäischen Festlands in den Niederlanden. Inzwischen wurde sie auf Helgoland nachgewiesen (KREMER u. WAGNER 2000). Die Population an diesem für Deutschland ersten Fundort nimmt seither zu (LÜBBERT et al. 2008). Beispiele von Arealausweitungen gibt es auch unter selteneren Arten. Das Affen-Knabenkraut (*Orchis simia*) war bis vor wenigen Jahren nur aus den allerwärmsten Gebieten Deutschlands bekannt. Im Rahmen

des Projekts ergaben Literaturrecherche, Expertenbefragung und Feldbegehungen den Beleg für neu etablierte Vorkommen nördlich der ehemaligen Verbreitungsgrenze. Diese Vorkommen befinden sich in unter Schutz stehenden Gebieten, in denen bereits andere Orchideenarten anzutreffen sind. Für diese wird ein gezieltes Management betrieben, von dem auch der Neuankömmling profitiert. Untersuchungen aus den Niederlanden haben gezeigt, dass für den Überlebens- und Reproduktionserfolg von *Orchis simia* vor allem an der Nordgrenze der Verbreitung klimatische Parameter ausschlaggebend sind. Lang anhaltende, harte Winter setzen der Art zu (WILLEMS 2002). Arten der Gebirge könnten Szenarien zufolge besonders sensibel auf Klimaveränderungen reagieren (THUILLER et al. 2005). Vor diesem Hintergrund wurde die aktuelle Verbreitung des Edelweißes (*Leontopodium alpinum*) in Deutschland untersucht. Besonders für Populationen in unteren Höhenlagen wäre ein negativer Einfluss des Klimawandels zu erwarten. Gegenwärtig zeigt sich jedoch kein klimabedingter Rückzug im deutschen Alpenraum; die Feld- und Literaturstudien belegen eine positive Bilanz der Schutzbemühungen um das Edelweiß. Viele der tiefer gelegenen Populationen, die vor allem durch das Pflücken vor einigen Jahrzehnten be-

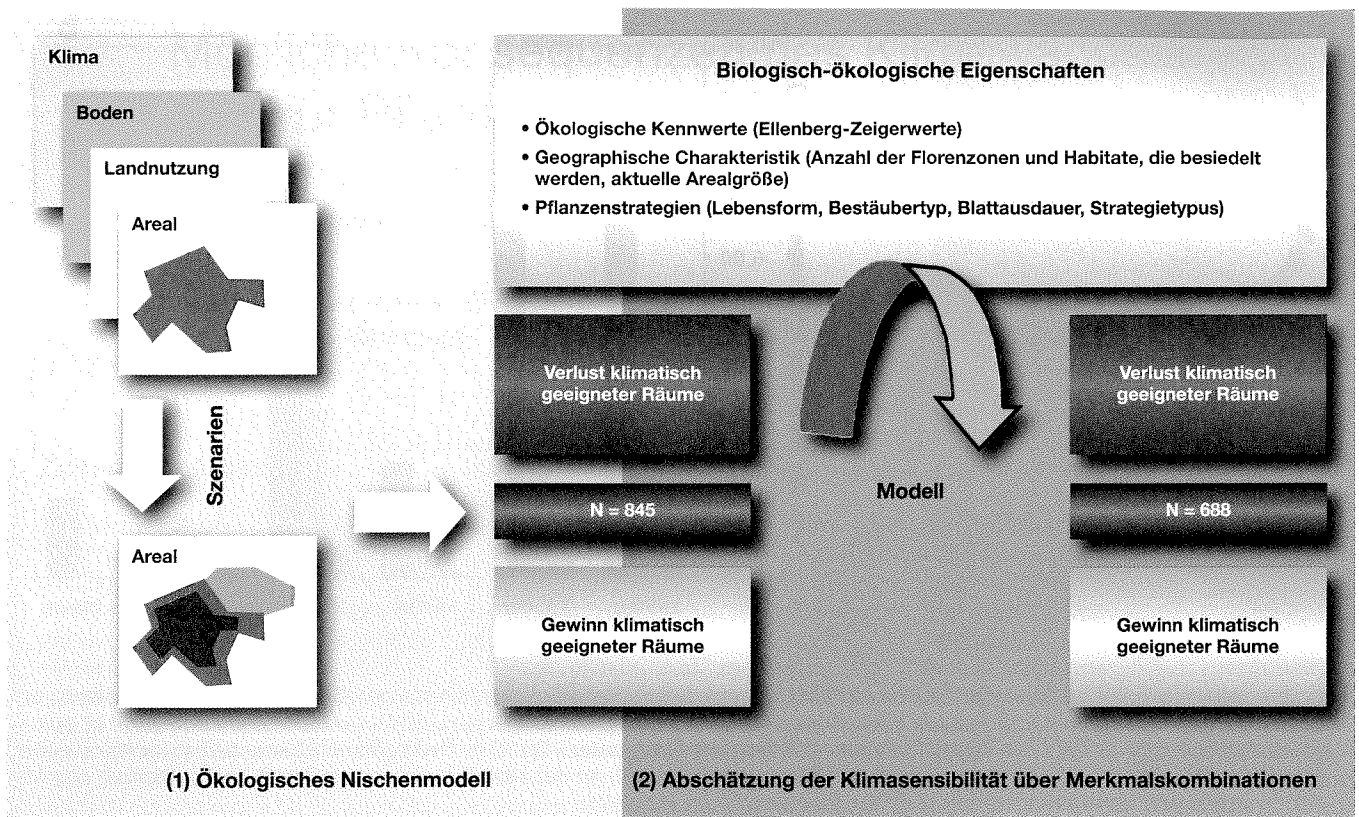


Abb. 3: Kombination von zwei Ansätzen: **(1) Ökologisches Nischenmodell** ($n = 845$): Informationen über die Umweltansprüche von Arten und Szenarien der Klima- und Landnutzungsänderung werden eingesetzt, um Änderungen der potenziellen Wuchsorte (Areal) zu simulieren (vgl. Text). **(2) Abschätzung der Klimasensibilität über Merkmalskombinationen:** Die durch das ökologische Nischenmodell ermittelten Trends der Arealentwicklung (Verlust, Gewinn) werden mit biologisch-ökologischen Eigenschaften der Arten in Beziehung gesetzt. Mit Hilfe der hieraus gewonnenen Informationen wird auf mögliche klimabedingte Reaktionen anderer Arten mit ähnlichen Eigenschaften geschlossen. (Graphik nach Autorenvorlage W. Kohlhammer GmbH/S. Mailänder)

Fig. 3: Combination of two statistical approaches: **(1) Ecological niche modelling** ($n = 845$): Spatial projection of species distribution using statistical relationships between distribution (species' range) and environmental variables. **(2) Ecological determinants of climate sensitivity:** Under the assumption that species-level traits are good correlates of range change (range loss, range gain), we used regression models to predict range change from a series of species traits.

droht waren, konnten stabilisiert werden. Auch bei dem ebenfalls im Freiland untersuchten Felsen-Leimkraut (*Silene rupestris*) konnte kein eindeutiger Rückgang der Populationen in niedrigen Höhenlagen im Schwarzwald nachgewiesen werden. In diesem Fall ist es jedoch möglich, dass ein eventuelles Klimasignal auf Grund der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Vergleichsdaten nicht zu erkennen war. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Einwanderung oder Ausbreitung von Arten in Deutschland gegenwärtig auffälliger sind als der Rückgang von Arten, der sich vermutlich zunächst in Abundanzänderungen äußern dürfte.

3 Analyse der potenziellen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Flora

Neben der Aufklärung bereits erfolgter klimainduzierter Veränderungen war es

Ziel des Projekts, mittels Modellen potenzielle zukünftige Effekte des Klimawandels auf Pflanzenareale zu erfassen. Mit Hilfe von Verbreitungsdaten und biologisch-ökologischen Eigenschaften wurden mögliche Reaktionsmuster von ungefähr 1200 Pflanzenarten Deutschlands in folgenden zwei Schritten untersucht (vgl. Abb. 3):

3.1 Abschätzung der Klimasensibilität über ökologische Nischenmodelle

Unter der Annahme, dass die möglichen Wuchsorte einer Art durch bestimmte Umweltparameter (wie Klima, Boden, Landnutzung) begrenzt sind, und dass die Beziehungen zwischen Wuchsort und Umwelt auch in Zukunft konstant bleiben, lassen sich auf der Grundlage von Szenarien mögliche künftige Verbreitungsgebiete projizieren (KÜHN et al. in diesem Heft, S. 8 ff.). Im Projekt wurden die europäischen Verbreitungsgebiete von 845 Arten (550 in Deutschland

nachgewiesen laut FLORKART, <http://www.floraweb.de>, 295 aus angrenzenden Gebieten Europas) nach dem „Atlas Florae Europaeae“ (COMMITTEE FOR MAPPING THE FLORA OF EUROPE U. SOCIETAS BIOLOGICA FENNICA VANAMO 1972–2007) analysiert. Die Berücksichtigung des europäischen Areals ist nötig, um die klimatischen Leistungsgrenzen einer Art gut abschätzen zu können (KÜHN et al. in diesem Heft, S. 8 ff.). Zur Auswertung der Areal-Umwelt-Beziehungen wurden drei unterschiedliche statistische Verfahren kombiniert: Generalisierte Lineare Modelle, Generalisierte Additive Modelle und Random Forests (vgl. dazu THUILER 2003; POMPE et al. 2008). Im Projekt wurden Szenarien der Klima- und Landnutzungsänderung aus dem EU-Projekt ALARM eingesetzt, die auf Abschätzungen von alternativen sozio-ökonomischen Entwicklungen basieren (SETTELE et al. 2005; SPANGENBERG 2007). Stark vereinfacht spiegeln die als Ausgangspunkt der Modellierung gewählten drei Entwicklungspfade bis 2080 eine moderate (ca.

+2,2 °C), mittlere (ca. +2,9 °C) bis starke (ca. +3,8 °C) Erwärmung im Vergleich zu den Temperaturen des ausgehenden 20. Jahrhunderts wider (vgl. POMPE et al. 2008). Ziel der Untersuchungen war es, die daraus resultierenden Verschiebungen klimatisch geeigneter Gebiete in Deutschland auszuwerten. Dafür wurden die Modellaussagen für die rezenten Umweltbedingungen mit denen der Szenarien verglichen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass nach dem gegenwärtigen Entwicklungsstand der Modelle keine Aussagen darüber gemacht werden können, ob neue potenziell geeignete Wuchsorte tatsächlich erreicht werden können. Landnutzung, Habitatfragmentierung und Verbreitung durch menschlichen Einfluss spielen für die Wanderungsgeschwindigkeit und das Vorhandensein potenzieller Wuchsorte von Pflanzen eine wichtige Rolle.

3.2 Abschätzung der Klimasensibilität über Merkmalskombinationen

Wegweiser möglicher Artreaktionen unter Klimawandel können u. a. biologisch-ökologische Eigenschaften der Arten sein (BROENNIMANN et al. 2006). Die Flexibilität einer Art kann sich z. B. dadurch äußern, dass diese mehrere Florenzonen besiedelt. An Trockenheit und Wärme angepasste Arten könnten zudem bei einer generellen Temperaturerhöhung und Zunahme trockener Sommer eher positiv beeinflusst werden. Die Modellaussagen zu Veränderungen in den klimatisch geeigneten Gebieten in Szenarien eignen sich, um Zusammenhänge mit Eigenschaften der Pflanzen zu identifizieren. Die daraus erkannten Muster für die

Merkmalsausprägung der Arten und ihr Verhalten unter dem Klimawandel wurden eingesetzt, um mögliche klimabedingte Reaktionen für weitere 688 Arten, über deren europäisches Areal keine auswertbaren Informationen vorliegen, abzuschätzen (vgl. Abb. 3).

Beide angewendeten Methoden sind mit Unsicherheiten behaftet. Dennoch können sie einer ersten Abschätzung möglicher Gefahren für die Flora dienen. Um die Ergebnisse der Projektionen zu überprüfen, sind u. a. zeitlich lang angelegte Feldstudien erforderlich, da Abweichungen zu tatsächlichen Verbreitungsmustern auch durch menschlichen Eingriff auftreten können. Zur Diskussion über weitere Limitationen von Modellierungsverfahren wird auf den Beitrag von KÜHN et al. in diesem Heft, S. 8 ff., verwiesen.

4 Ergebnisse der Szenarien

Die Modellsimulationen deuten auf erhebliche Veränderungen in den potenziellen Verbreitungsgebieten von Arten und damit auch der gebietstypischen Artenzusammensetzung hin. Letztere könnten vor allem in Nordost- und Südwestdeutschland auftreten (vgl. POMPE et al. 2008). Dabei ist ein positiver Effekt auf Wärme liebende bzw. durch Kälte limitierte Arten zu beobachten. Stellvertretend sind zum Beispiel die Walnuss (*Juglans regia*) oder die Flaum-Eiche (*Quercus pubescens*) zu nennen, die in Deutschland gemäß der Szenarien zukünftig vermehrt geeignete klimatische Bedingungen vorfinden könnten. Erste Anzeichen für entsprechende Entwicklungen bei der Walnuss liegen aus Österreich und Deutschland bereits vor (LOACKER et al. 2007; ADOLPHI 2008). Zusätzlich weisen

die Szenarien darauf hin, dass auch Pflanzen aus angrenzenden Regionen Mittel- und Südeuropas klimainduziert zunehmend begünstigt sein könnten (POMPE et al. 2008). Neben derartigen Beispielen für Arealvergrößerung zeigen die Untersuchungen, dass sich mit der weiteren Verschiebung der Klimabedingungen in Deutschland für die Mehrzahl der derzeit hier vorkommenden Pflanzenarten klimatisch geeignete Räume verkleinern, und zwar unabhängig von den eingesetzten statistischen Verfahren (vgl. POMPE et al. 2008). Bereits bei moderater Klimaänderung wird für 60 % der untersuchten Arten (n = 550) der Verlust an potenziellen Wuchsorten nicht durch Zugewinn ausgeglichen. Bei mittleren bis starken Änderungen erhöht sich dieser Anteil der Arten auf 62 % bzw. 68 %. Die durch Analogieschluss auf Grund der biologisch-ökologischen Merkmalskombinationen ermittelten Werte weisen in die gleiche Richtung und ergeben bei starker Klimaänderung für die Mehrzahl der nach dem zweiten Ansatz (s. o.) getesteten Arten (ca. 73 %, n = 688) einen Verlust geeigneter klimatischer Räume in Deutschland (Abb. 4).

Zu diesen Arten zählen u. a. montane Vertreter wie das Alpen-Hornkraut (*Cerastium alpinum*), die Alpen-Gänsekresse (*Arabis alpina*) oder der Berg-Blasenfarn (*Cystopteris montana*), deren klimatisch passender Raum sich in den Simulationen insgesamt reduziert, obwohl sie womöglich ihre Höhengrenzen verschieben könnten. Wie zu erwarten, steigt der Anteil der Arten, die große Teile ihres gegenwärtigen Raums verlieren, mit dem Grad der simulierten Klimaänderung (Abb. 5, S. 6). Während bei moderatem Klimawandel ca. 7 % der untersuchten Arten mehr als drei Viertel ihres aktuellen Raums verlieren, sind es bei starker Klimaänderung bereits 20 % (POMPE et al. 2008). Zu den Arten, die bei starker Klimaänderung in eine höhere Risikogruppe aufsteigen (vgl. Abb. 5, S. 6) zählen u. a. Fichte (*Picea abies*) und Wasser-Ampfer (*Rumex aquaticus*). Erste Anzeichen, dass die Fichte besonders empfindlich reagiert, sind bereits zu erkennen (KÖLLING u. AMMER 2006). Fichtenbestände unterhalb der natürlichen Höhengrenze und in trocken-warmen Gebieten sind dabei einem erhöhten Risiko ausgesetzt. Trockenstress kann zusätzlich die Empfindlichkeit der Fichte gegenüber Schädlingen erhöhen.

Eine weitere Analyse zu den Eigenschaften negativ betroffener Arten gibt Hinweise darauf, dass insbesondere bereits gefährdete Arten wie die Sumpfsternmiere (*Stellaria palustris*, RL-D 3) oder die Trollblume (*Trollius europaeus*, RL-D 3+) durch den Klimawandel zusätzlich beeinträchtigt werden könnten.

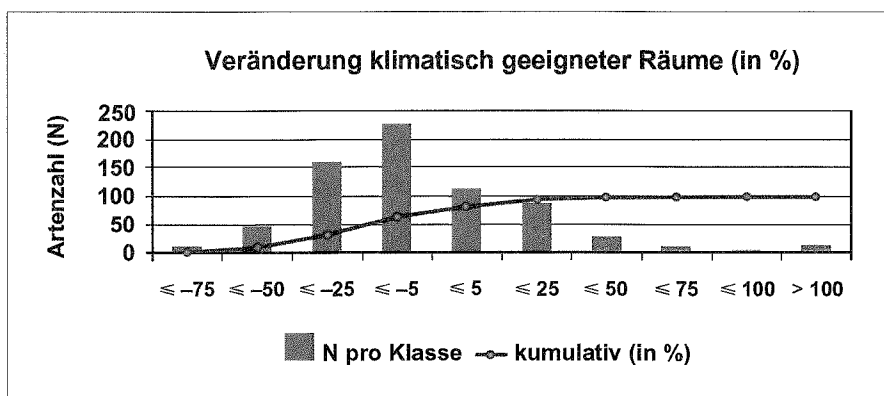


Abb. 4: Veränderung klimatisch geeigneter Räume (in %) von 688 Pflanzenarten in Deutschland, als Differenz zwischen modelliertem Gewinn und Verlust an klimatisch geeignetem Raum. Die Berechnungen erfolgten für das +3,8-°C-Szenario (2080). Anzahl der Arten nach Klassen entsprechend dem Grad der Änderung von negativen (links) bis positiven (rechts) Effekten sortiert. (Graphik nach Autorenvorlagen W. Kohlhammer GmbH/S. Mailänder)

Fig. 4: Change of bioclimatic range [%] for 688 plant species quantified from modelled gains and losses of bioclimatic range. Information was used from the +3.8 °C scenario (2080). Number of species per class ordered from negative (left) to positive (right) effect on range change.

Für die Analyse wurden Arten aus der Gesamtmenge der getesteten Pflanzen (n = 550) nach ihrem Status in der Roten Liste Deutschlands gruppiert (KORNECK et al. 1996). Viele dieser Arten (n = 74) besiedeln innerhalb ihres Areals nur besondere Standorte. Die Analysen zu aktuell klimatisch geeigneten Räumen in Deutschland ergeben, dass diese für die o. g. Arten nachweislich kleiner sind als für nicht gefährdete Arten. Die Arten mit Gefährdungsstatus verlieren bereits bei moderater Klimaänderung im Mittel (\pm Standardabweichung über die drei eingesetzten statistischen Verfahren) ungefähr 32 % (± 7) der geeigneten klimatischen Räume, während Arten ohne Gefährdungsstatus nur ca. 22 % (± 1) ihres potenziellen Areals in Deutschland einbüßen (für +2,9 °C sind die entsprechenden Werte 34 % [± 9] versus 26 % [± 2], für +3,8 °C 43 % [± 11] versus 39 % [± 3]). Die Unterschiede sind jedoch statistisch nicht signifikant.

In der Realität werden Schutzbemühungen und Landnutzungseffekte möglicherweise Klimasignale in den Artarealen überdecken, da Überlebenschancen vieler Arten direkt von bestimmten Bewirtschaftungsformen abhängig sind. Gleichzeitig führen Eingriffe in die hydrologischen Verhältnisse oder vermehrte Nährstoffeinträge zu starken Gefährdungen. Insbesondere für Schutzgebiete und Schutzgebietsziele werden Faktoren wie Habitateignung und Habitatveränderungen daher auch unter dem Klimawandel eine wichtige Rolle spielen (BADECK et al. 2007).

5 Fazit

Wie die o. g. Beispiele belegen, können bei weiterer Erwärmung sowohl negative als auch positive Effekte auf die Flora erwartet werden. Ein allein klimabedingter Rückzug von Arten ist gegenwärtig für Deutschland schwer nachzuweisen. Längerfristig könnten jedoch negative Effekte (hier: Verkleinerung klimatisch geeigneter Räume in Deutschland) überwiegen, die mit dem Grad der Klimaänderung zunehmen. Zahlenwerte können dabei nur einen ersten Eindruck möglicher Folgen vermitteln. Langzeitbeobachtungen sind deshalb an Klimafragen anzupassen, um u. a. über Bioindikatoren die in Modellen gefundenen Effekte im Gelände zu überprüfen.

6 Summary

Human-induced climate change has already affected natural systems. The effects of current patterns of land use as well as conservation efforts may mask the impacts of climate change on species. However, future climate change could alter the current distribution patterns of

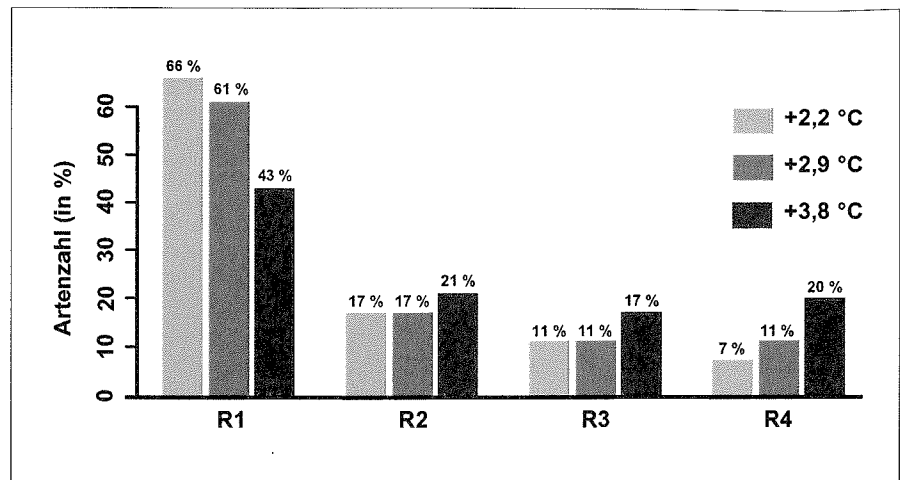


Abb. 5: Anteil der Arten [%] deren bioklimatisch geeignete Räume zurückgehen, unterteilt in Risikogruppen von R1 bis R4 (R1 < 25 % Arealverlust, 25 % \leq R2 < 50 %, 50 % \leq R3 < 75 %, R \geq 75 %). Die Berechnungen basieren auf der Grundlage von drei Szenarien (+2,2 °C, +2,9 °C, +3,8 °C) und unter Berücksichtigung von drei statistischen Verfahren (Mittelwerte aus Generalisierten Linearen Modellen GLM, Generalisierten Additiven Modellen GAM, Random Forests RF, vgl. POMPE et al. 2008) für 550 Arten in Deutschland (Graphik nach Autorenvorlage W. Kohlhammer GmbH/S. Mailänder)

Fig. 5: Proportion of species [%] with loss of bioclimatic range, classified into risk categories R1 to R4 (R1 < 25 % range loss, 25 % \leq R2 < 50 %, 50 % \leq R3 < 75 %, R \geq 75 %). Estimates were quantified under three alternative scenarios: +2.2 °C, +2.9 °C, +3.8 °C and three statistical approaches (averages from generalized linear models GLM, generalized additive models GAM, random forests RF, cf. POMPE et al. 2008) using 550 species in Germany

the German flora. Even under a moderate scenario (approx. +2.2 °C by 2080) about 60 % of the species analysed are projected to lose considerable proportions of their potential ranges. The combination of range losses for some species with gains for others (including some originating from other European regions) may result in changes in local species composition.

7 Literatur

ADOLPHI, K. (2008): Kurze Anmerkungen zu sich ausbreitenden Arten an Verkehrswegen. http://www.ruderal-vegetation.de/epub/adolphi_bs.pdf. Zuletzt aufgerufen am 22. 4. 2008.

BADECK, F.-W.; BÖHNING-GAESE, K.; CRAMER, W.; IBISCH, P.; KLOTZ, S.; KÜHN, I.; KREFT, S.; VOHLAND, K. u. ZANDER, U. (2007): Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel – Risiken und Handlungsoptionen. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 46: 149–166.

BERGER, S.; SOEHLKE, G.; WALTHER, G.-R. u. POTT, R. (2007): Bioclimatic limits of cold-hardy evergreen broad-leaved species at their northern distributional limit in Europe. *Phytocoenologia* 37: 523–539.

BROENNIMANN, O.; THUILLER, W.; HUGHES, G.; MIDGLEY, G. F.; ALKEMADE, J. M. R. u. GUIGAN, A. (2006): Do geographic distribution, niche property and life form explain

plants' vulnerability to global change. *Global Change Biology* 12: 1079–1093.

COMMITTEE FOR MAPPING THE FLORA OF EUROPE u. SOCIETAS BIOLOGICA FENNICA VANAMO (1972–2007): *Atlas Florae Europaeae*. Helsinki.

IPCC (2007): Fourth Assessment Report (AR4) Climate Change (2007): Synthesis Report, Summary for Policymakers: http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf. Zuletzt aufgerufen am 5. 12. 2007.

IVERSEN, J. (1944): *Viscum, Hedera* and *Ilex* as climate indicators. *Geologiska Föreningens Förhandlingar* 66 (3): 463–483.

JÄGER, E. (1975): Wo liegen die Grenzen der Kulturareale von Pflanzen? *Wissensch. Beitr. der Martin-Luther-Univers. Halle-Wittenberg* 1975/6 (P 4): 101–107.

KÖLLING, C. u. AMMER, C. (2006): Waldumbau unter den Vorzeichen des Klimawandels. *AFZ – Der Wald* 20: 1086–1089.

KORNECK, D.; SCHNITTLER, M. u. VOLLMER, I. (1996): Rote Liste der Farn- und Blütenpflanzen (Pteridophyta et Spermatophyta) Deutschlands. *Schriftenreihe für Vegetationskunde* 28: 21–187.

KREMER, B. P. u. WAGNER, A. (2000): *Crithmum maritimum* L. – Neu für Deutschland. *Floristische Rundbriefe* 34 (1): 1–8.

LOACKER, K.; KOFLER, W.; PAGITZ, K. u. OBERHUBER, W. (2007): Spread of walnut (*Juglans regia* L.) in an Alpine valley is cor-

related with climate warming. *Flora* 202: 70–78.

LÜBBERT, J.; BERGER, S. u. WALTHER, G.-R. (2008): Klimatisch bedingt treten neue Pflanzenarten auf. In: LOZÁN et al.: Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken. Wissenschaftliche Auswertungen. Hamburg: 82–85.

OKUSANYA, O. (1977): Effect of sea-water and temperature on germination behaviour of *Crithmum maritimum*. *Physiologia Plantarum* 41 (4): 265–267.

PARMESAN, C. (2006): Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 37: 637–669.

PERRING, F. H. u. WALTERS, S. M. (1962): Atlas of the British Flora, 2. Aufl. Thomas Nelson and Sons. London. 432 S.

POMPE, S.; HANSPACH, J.; BADECK, F.; KLOTZ, S.; THUILLER, W. u. KÜHN, I. (2008): Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany. *Biol. Lett.* 4: 564–567.

ROOT, T. L.; PRICE, J. T.; HALL, K. R.; SCHNEIDER, S. H.; ROSENZWEIG, C. u. POUNDS, J. A. (2003): Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421: 57–60.

SETTELE, J.; HAMMEN, V.; HULME, P.; KARLSON, U.; KLOTZ, S.; KOTARAC, M.; KUNIN, W.; MARION, G.; O'CONNOR, M.; PETANIDOU, T.; PETERSON, K.; POTTS, S.; PRITCHARD, H.; PYSEK, P.; ROUNSEVELL, M.; SPANGENBERG, J.; STEFFAN-DEWENTER, I.; SYKES, M.; VIGHI, M.; ZOBEL, M. u. KÜHN, I. (2005): ALARM: Assessing LArge scale environmental Risks for biodiversity with tested Methods. GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society 14: 69–72.

SPANGENBERG, J. H. (2007): Biodiversity pressure and the driving forces behind. *Ecological Economics* 61: 146–158.

THUILLER, W. (2003): BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* 9: 1353–1362.

THUILLER, W.; LAVOREL, S.; ARAUJO, M. B.; SYKES, M. T. u. PRENTICE, I. C. (2005): Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proc. Nat. Acad. Sciences* 102: 8245–8250.

WALTHER, G.-R.; POST, E.; CONVEY, P.; MENZEL, A.; PARMESAN, C.; BEEBEE, T. J. C.; FROMENTIN, J.-M.; HOEGH-GULDBERG, O. u. BAIRLEIN, F. (2002): Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389–395.

WALTHER, G.-R.; BERGER, S. u. SYKES, M. T. (2005): An ecological 'footprint' of climate change. *Proc. R. Soc. B.* 272: 1427–1432.

WILLEMS, J. H. (2002): A founder population of *Orchis simia* in The Netherlands: a 30-year struggle for survival. In: KINDLMANN, P.; WILLEMS, J. H. u. WHIGHAM, D. F.: Trends and fluctuations and underlying mechanisms in terrestrial orchid populations. Backhuys Publishers. Leiden: 23–32.

Sven Pompe
• Korrespondierender Autor •
Helmholtz-Zentrum
für Umweltforschung (UFZ)
Dept. Biozönoseforschung
Theodor-Lieser-Straße 4
06120 Halle (Saale)
E-Mail: sven.pompe@ufz.de



Geboren im Jahr 1977, studierte Diplom-Biologie in Jena; nach Tätigkeit am Forschungszentrum Jülich (Programmgruppe Mensch, Umwelt, Technik) /co/ Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC) Berlin seit September 2005 Wissenschaftler am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Halle (Department Biozönoseforschung).

Dr. Silje Berger
Leibniz Universität Hannover
Institut für Geobotanik
Nienburger Straße 17
30167 Hannover
E-Mail: silje.berger@googlemail.com

PD Dr. Gian-Reto Walther
Universität Bayreuth
Lehrstuhl für Pflanzenökologie
95440 Bayreuth
E-Mail: gian-reto.walther@uni-bayreuth.de

Dr. Franz Badeck
Potsdam-Institut für
Klimafolgenforschung (PIK)
Postfach 60 12 03
14412 Potsdam
E-Mail: badeck@pik-potsdam.de

Jan Hanspach
Helmholtz-Zentrum
für Umweltforschung (UFZ)
Dept. Biozönoseforschung
Theodor-Lieser-Straße 4
06120 Halle (Saale)
E-Mail: jan.hanspach@ufz.de

Sabrina Sattler
Universität Bayreuth
Lehrstuhl für Pflanzenökologie
95440 Bayreuth
E-Mail: binzala@gmx.de

Dr. Stefan Klotz
Helmholtz-Zentrum
für Umweltforschung (UFZ)
Dept. Biozönoseforschung
Theodor-Lieser-Straße 4
06120 Halle (Saale)
E-Mail: stefan.klotz@ufz.de

Dr. Ingolf Kühn
Helmholtz-Zentrum
für Umweltforschung (UFZ)
Dept. Biozönoseforschung
Theodor-Lieser-Straße 4
06120 Halle (Saale)
E-Mail: ingolf.kuehn@ufz.de



www.dnI-online.de

Die
Literatur-
datenbank
des
Bundesamtes
für
Naturschutz

