

Auswirkungen des Klimawandels auf Wälder

Der aktuelle Klimawandel verändert unsere Wälder. Die Erforschung der Auswirkung des Klimawandels auf Schlüsselprozesse ist deshalb notwendig, um durchdachte Managementstrategien zu entwickeln. Ein Ansatz hierfür ist die Modellierung der Standorteignung forstwirtschaftlich genutzter Baumarten.

Von Klara Dolos und Ulrike Märkel, Karlsruhe

Eine nachhaltige Waldbewirtschaftung trägt entscheidend zum Schutz der biologischen Vielfalt bei, verringert Kohlendioxidemissionen aufgrund von Entwaldung und Waldschädigung und erhält gleichzeitig den sozialen und wirtschaftlichen Wert des Waldes. Bäume sind die Schlüsselorganismen in Wäldern und bieten Schutz und Nahrung für Tiere wie große Herbivoren, kleinere Säugtiere, Vögel und Insekten. Zudem sind sie der Lebensraum von Pflanzen, Pilzen und Bodenorganismen. Schätzungen der globalen Artenvielfalt in Wäldern liegen zwischen 60.000 (Grandtner 2005) und 100.000 Arten (Oldfield et al. 1998). Neben dem intrinsischen Wert der Biodiversität und ihrer Bedeutung für ökologische Stabilität stellen Wälder der Gesellschaft wichtige Ökosystemdienstleistungen bereit. Sie beeinflussen unter anderem die Grundwasserneubildung und -qualität, filtern die Luft, verringern Bodenerosion, mindern die Gefahren von Naturkatastrophen (beispielsweise Überschwemmungen und Lawinen) und produzieren Nahrung, Bau- und Feuerholz. Nicht zuletzt bieten sie Raum für Erholung und Freizeitaktivitäten.

Der aktuelle Klimawandel wird vermutlich die Produktivität der Wälder und ihre Artenzusammensetzung verändern. Das Management von langlebigen Ökosystemen muss mit den unsicheren Zukunftsprognosen der Klimaveränderung umgehen, während langfristige Entscheidungen getroffen werden müssen. Insbesondere im Falle des Klimawandels können Managemententscheidun-

gen, die zwar auf langjährigen Erfahrungen beruhen, aber eines tieferen Verständnisses der Ökosystemprozesse entbehren, nicht die dynamischen Veränderungen von Ökosystemprozessen und biotischen Interaktionen berücksichtigen (Korzukhin et al. 1996).

Motiviert durch die Notwendigkeit, die Wälder für die Zukunft vorzubereiten und dabei Biodiversität und Ökosystemdienstleistungen aufrecht zu erhalten, wird in der Klimafolgenforschung versucht, unser Verständnis von Schlüsselprozessen der Walddynamik zu verbessern. Am Karlsruher Institut für Geographie und Geoökologie (IfGG) liegt ein Forschungsschwerpunkt auf der Ableitung der Standorteignung forstlich relevanter Baumarten für Deutschland. Dabei werden Methoden der biogeographischen Modellierung angewendet.

Biogeographische Modellierung

Modelle dienen als Werkzeuge, um konzeptionelle Ideen zu erweitern und Zusammenhänge in Ökosystemen zu verstehen. Aus der Sicht eines Ökologen können Modelle verwendet werden, um

- Hypothesen über das Funktionieren von Ökosystemen zu testen,
- das Systemverhalten unter verschiedenen (klimatischen) Bedingungen zu untersuchen,
- Szenarien durchzuspielen, die unmöglich in der Realität überprüfbar sind,
- Feldversuche zu motivieren und Aufnahmedesigns zu unterstützen und

- Wissenslücken zu identifizieren und neue Hypothesen zu bilden.

Wie jedes wissenschaftliche Vorhaben folgt die Modellierung den Grundprinzipien der Wissenschaft. Beobachtungen sollten der Anfang jeder ökologischen Forschung sein, auch in der Modellierung. Beobachtungen können dabei Daten aus Feldstudien oder Experimenten sein, die ein interessantes Muster aufweisen. Ein Verständnis des Ökosystems und der Prozesse ist sehr wichtig, jedoch sollte ein unvollständiges Verständnis nicht davon abhalten, ein Modell zu entwickeln. Basierend auf Systemverständnis, Theorie und präzise formulierten Forschungshypothesen kann ein Modell entwickelt werden. Dabei muss von dem echten Ökosystem abstrahiert werden, um die Komplexität unter Berücksichtigung der Hypothesen zu reduzieren (Wissel 1989; Grimm 1999). In der Erforschung der Walddynamik unter Klimawandel werden vor allem zwei Richtungen der Modellierung verwendet: die statistisch-empirische Modellierung, auf die im Folgenden Bezug genommen wird und die dynamische, prozessorientierte Modellierung.

Statistische Modelle

In der Naturressourcenplanung werden Modelle typischerweise verwendet, um Prognosen für die zukünftige Entwicklung zu erhalten, die dann wiederum Entscheidungsprozesse unterstützen. Eine traditionelle Methode, um Waldwachstum und Ertrag zu bestimmen, sind Ertragstafeln, die Beobachtungen

unter bestimmten klimatischen und edaphischen Bedingungen sowie Managementregimen interpolieren (Assmann und Franz 1972). Heutige statistische Modelle für Artverbreitung, Wachstum und Produktivität sind jedoch flexibler als Ertragstabellen und basieren auf viel größeren Datensätzen (Falk and Mellert 2011; Hanewinkel et al. 2014; Dolos et al. 2015).

Es gibt eine große Fülle an statistischen Modellansätzen, die alle eines gemein haben: Sie folgen dem Prinzip, Schlüsse auf der Grundlage von Daten zu ziehen, die einer Zufallsvariation unterliegen. Statistische Modelle helfen, den Einfluss von Umweltvariablen wie Temperatur und Niederschlag auf die beobachtete Artverbreitung und das Baumwachstum zu erkennen und geben so eine phänomenologische Beschreibung der Ökosystemantwort. Eine möglichst genaue Prognose ist dabei oft eines der wichtigsten Ziele der statistischen Modellierung, insbesondere wenn sie zur Unterstützung von Managemententscheidungen herangezogen werden sollen. Dies ist besonders unter stabilen Bedingungen erfolgreich, während bei Extrapolationen die Unsicherheit der Prognosen sehr hoch sein kann. Dies ist

eine Schwäche statistischer Modelle, vor allem bei ihrer Anwendung in der Klimafolgenforschung, bei der Prognosen unter zukünftigen, noch unbeobachteten Klimabedingungen berechnet werden. Nichtsdestotrotz tragen statistische Modelle wesentlich dazu bei, Klimafolgen abzuschätzen und unterstützen so die Entwicklung von Anpassungsstrategien.

Standorteignung im Klimawandel

In Anbetracht der erwarteten Klimaveränderungen stehen Forstpraktiker vor der schwierigen Entscheidung, welche Baumarten nicht nur aktuell, sondern auch in Zukunft für die jeweiligen Standorte geeignet sein werden. Zur Zeit wird in vielen Projekten daran gearbeitet, aus dem Vorkommen von Baumarten auf ihre Standorteignung zu schließen (Falk and Mellert 2011; Hanewinkel et al. 2014). Allerdings wird dabei die Bedeutung der Produktivität neben dem Anbaurisiko als Kriterium der Standorteignung vernachlässigt. Da die Walddynamik vor allem durch das Zusammenspiel der demographischen Prozesse bestimmt wird, ist es sinnvoll,

diese in die Ableitung der Standorteignung einzubeziehen. Die wichtigsten demographischen Prozesse in Bezug auf Baumarten sind Ausbreitung, Etablierung, Wachstum und Mortalität. Klima, Boden und exogene Störungen sind die wichtigsten abiotischen Treiber. Hinzu kommt Konkurrenz um die Ressourcen Licht und Wasser zwischen benachbarten Bäumen und anderen Organismen. Das Zusammenspiel aller Prozesse bedingt das Vorkommen und das Anbaurisiko sowie die forstwirtschaftliche Produktivität einer Art an einem bestimmten Standort.

Im Projekt „Modellierung der klimatischen Standorteignung forstlich relevanter Baumarten“ am IfGG werden aktuell statistische Modelle für Baumwachstum (relativer Grundflächenzuwachs), Mortalität und Artverbreitung für Fichte, Buche, Weißtanne, Waldkiefer, Traubeneiche und Stieleiche für Deutschland entwickelt (c.f. Dolos et al. 2015). Baumwachstum und -mortalität sowie die Artverbreitung wurden aus der deutschen Bundeswaldinventur (BWI) abgeleitet, die regelmäßig durchgeführt wird (Polley et al. 2010). Zur Charakterisierung der Standortbedin-

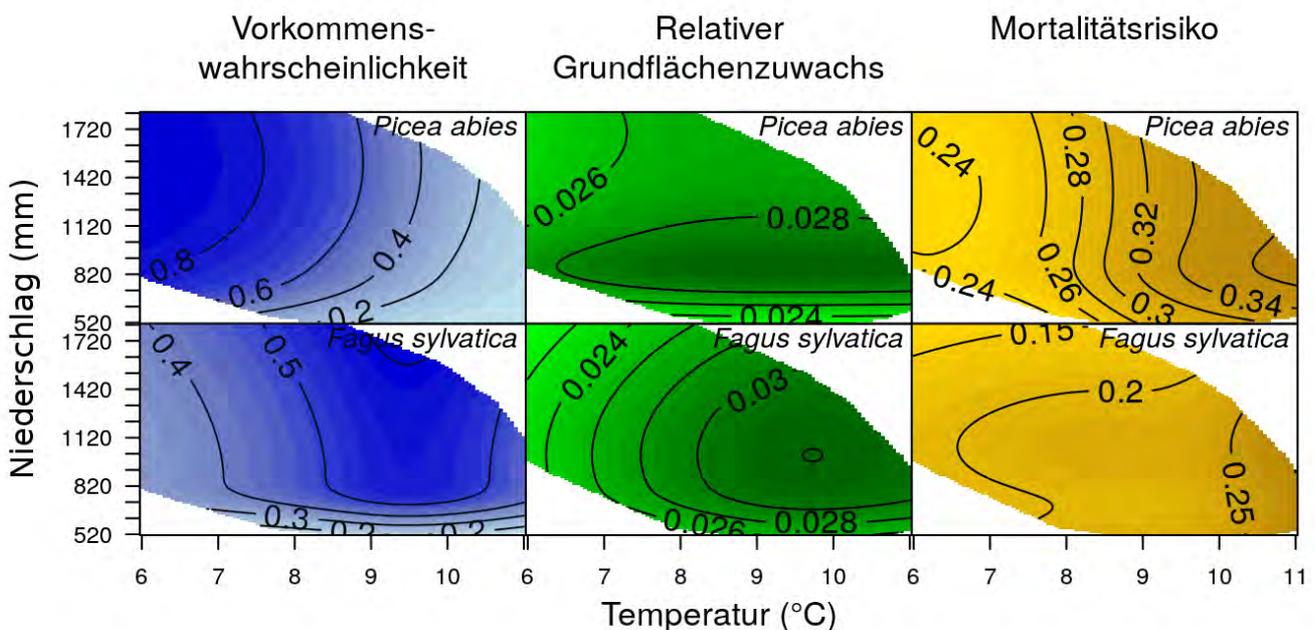


Abbildung 1: Artantwortkurven der Fichte (oben; *Picea abies*) und der Buche (unten; *Fagus sylvatica*) für Jahresdurchschnittstemperatur und -niederschlagssumme. Links: Modellierte Vorkommenswahrscheinlichkeiten für die BWI 3 (Bundeswaldinventur 3 um das Jahr 2012). Mitte: Modelliertes Wachstum (relativer Grundflächenzuwachs, c.f. Dolos et al. 2015) für den Zeitraum zwischen BWI 2 (um das Jahr 2002) und 3 (2012). Rechts: Modelliertes Mortalitätsrisiko für den Zeitraum zwischen BWI 2 und 3.

gungen wurden Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes und Bodentypen auf Basis der Bodenübersichtskarte BÜK1000 verwendet.

Die Modelle lieferten bereits interessante Erkenntnisse dazu, welche der untersuchten Baumarten möglicherweise vom Klimawandel profitieren und welche in Zukunft weniger gut geeignet sein könnten (Abb. 1). Für die Fichte zeichnete sich beispielsweise ab, dass hohe Vorkommenswahrscheinlichkeiten nicht unbedingt mit starkem Wachstum einhergehen. So wurde hohes Vorkommen für Gebiete mit kühlen und feuchten Bedingungen modelliert, starkes Wachstum aber für Gebiete mit einem Jahresniederschlag um 900 mm und einer Jahresmitteltemperatur ab 8 °C. Geringeres Wachstum bei sehr niedrigen Temperaturen lässt sich mit einem Energiedefizit erklären, geringeres Wachstum bei höheren Temperaturen und geringem Niederschlag ist auf Hitze- und Trockenstress zurückzuführen. Geringeres Vorkommen bei wärmeren Temperaturen wird durch das vermehrte Auftreten von Borkenkäfern bedingt. Schädlinganfälligkeit und negative Auswirkungen von Trockenperioden sowie Konkurrenz durch unter anderem die Buche zeigen sich in Form einer deutlich erhöhten Mortalität der Fichte bei Temperaturen über 8 bis 9 °C. Für die Fichte lässt sich damit die Aussage treffen, dass an heutigen klimatischen Grenzstandorten eine Erwärmung zu einer deutlichen Erhöhung des Anbaurisikos führt, wohingegen die Produktivität weniger sensitiv ist.

Die Buche ist ein gutes Beispiel einer Art, für die hohes Vorkommen und gutes Wachstum stärker zusammenhängen (Abb. 1). Sie weisen beide geringere Werte bei niedrigeren Temperaturen und viel Niederschlag auf und hohe Werte bei höheren Temperaturen und relativ wenig Niederschlag. Allerdings ist der Kernbereich ihrer Verbreitung im Vergleich zum Wachstumsoptimum eher hin zu kühleren und feuchteren Bedingungen verschoben. Die Mortalität wiederum ist im warm-trockenen Klimabereich höher als unter mittleren

Bedingungen. Dies wird möglicherweise unter anderem durch häufigere und längere Trockenperioden verursacht. Das Verbreitungsmuster, das für die Buche modelliert wurde, kann ebenso wie das für die Fichte als Ergebnis des Zusammenspiels von Wachstum und Mortalität verstanden werden. Um eine Empfehlung für das Management unter Klimawandel auszusprechen, muss für die Buche zwischen Produktivität und Risiko abgewogen werden. Eine moderate Erwärmung scheint die Produktivität der Buche zu steigern, solange die Jahresniederschläge über 800 mm liegen. Jedoch nimmt ihre Mortalität und damit das Anbaurisiko ebenfalls zu, wenn auch weniger als für die Fichte.

Die Zusammenführung von Informationen zu den Standortansprüchen von Baumarten aus Daten zu Artverbreitung, Wachstum und Mortalität erweitert durch eine solche Interpretation nicht nur unser ökologisches Wissen, sondern auch die Wissensgrundlage, auf der Strategien für die Anpassung der heutigen Wälder an den Klimawandel beruhen (Dolos et al. 2015). Solche Studien liefern dadurch einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der nachhaltigen Forstwirtschaft.

Fazit

Die hier beschriebene Studie zur Ableitung der Standorteignung forstlich relevanter Baumarten ist nur eines von vielen Beispielen für die Erforschung der Auswirkungen des Klimawandels auf Wälder. Insbesondere die oben erwähnten Schwächen der statistischen Modellierung bei der Extrapolation erfordern die Weiterentwicklung von prozessorientierten Wald- und Landschaftsmodellen (etwa LandClim und SILVA) und ihren Einsatz bei der Entwicklung von Managementstrategien für die Klimafolgenanpassung. Neben den Möglichkeiten der Modellierung liefern auch Experimente und paläoökologische Studien wertvolle Einsichten in mögliche Veränderungen in Wäldern und anderen Ökosystemen, auf die sich die Gesellschaft einstellen muss. Daher ist die

Klimafolgenforschung ein sehr breit gefasstes und vielfältiges Betätigungsfeld, das besonders Geoökologinnen und Geoökologen eine gute Möglichkeit bietet, ihr fächerübergreifendes Wissen einzubringen.

Literatur

- Assmann, E., Franz F. (1972) Vorläufige Fichten - Ertragstafel für Bayern, 2. Auflage. Institut für Ertragskunde der Forstlichen Forschungsanstalt, München
- Dolos, K., Bauer, A., Albrecht S (2015) Site suitability for tree species: Is there a positive relation between a tree species' occurrence and its growth? *Eur J For Res.* doi: 10.1007/s10342-015-0876-0
- Falk, W., Mellert, KH (2011) Species distribution models as a tool for forest management planning under climate change: Risk evaluation of *Abies alba* in Bavaria. *J Veg Sci* 22:621–634. doi: 10.1111/j.1654-1103.2011.01294.x
- Grandtner, M.M. (2005) Elsevier's Dictionary of Trees, 1: North America. Elsevier, Burlington
- Grimm, V. (1999) Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we learned and what could we learn in the future? *Ecol Model* 115:129–148. doi: 10.1016/S0304-3800(98)00188-4
- Hanewinkel, M., Cullmann, D.A., Michiels, H-G., Kändler, G. (2014) Converting probabilistic tree species range shift projections into meaningful classes for management. *J Environ Manage* 134:153–165. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.01.010
- Korzukhin, M.D., Ter-Mikaelian, M.T., Wagner RG (1996) Process versus empirical models: which approach for forest ecosystem management? *Can J For Res* 26:879–887. doi: 10.1139/x26-096
- Oldfield, S., Lusty, C., MacKinven, A. (1998) The world list of threatened trees. World Conservation Press, Cambridge and UK
- Polley, H., Schmitz, F., Hennig, P., Kroihner, F. (2010) Germany. In: Tomppo E, Gschwantner T, Lawrence M, McRoberts RE (eds) National Forest Inventories - Pathways for Common Reporting. Springer, 233 Spring Street, New York, Ny 10013, United States, New York
- Wissel, C. (1989) Goals and possibilities of theoretical ecology, as illustrated by the island theory. *Verhandlungen Ges Fuer Oekologie* 18:483–490



Nach ihrem Biologiestudium in Tübingen fertigte **Ulrike Märkel** ihre Diplomarbeit im Nationalpark Bayerischer Wald im Rahmen eines Luchs-Projekts an. Danach arbeitete sie in mehreren Projekten an der forstlich orientierten Hochschule Rottenburg. Momentan ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am IfGG.

Ulrike Märkel

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Geographie und Geoökologie
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe

Tel.: +49 721 608-43829

[ulrike.maerkel\(at\)kit.edu](mailto:ulrike.maerkel(at)kit.edu)



Nach ihrem Geoökologiestudium in Karlsruhe ging **Klara Dolos** nach Bayreuth und promovierte an der Juniorprofessur für Biogeographische Modellierung bei Prof. Dr. Björn Reineking. Seit 2013 ist sie am IfGG als wissenschaftliche Mitarbeiterin angestellt.

Dr. Klara Dolos

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Geographie und Geoökologie
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe

Tel.: +49 721 608-44391

[dolos\(at\)kit.edu](mailto:dolos(at)kit.edu)

Von Flughunden und Drohnen

Von Fabian Fassnacht und Teja Kattenborn, Karlsruhe

Einleitung

Am 30. März 2015 um 16:00 Uhr Ortszeit kommen Teja Kattenborn, dem Mitarbeiter des Instituts für Geographie und Geoökologie (IfGG), auf Tanna Island im Südpazifik auf einem Feldweg fünf Halbwüchsige entgegen. Einer der drei Jungs schultert stolz einen Flughund, den sie vor wenigen Minuten mit ihren Schleudern erlegt haben (Abb.1). Tagsüber ist die Jagd auf die nachtaktiven

Flughunde normalerweise kaum möglich, doch vor wenigen Tagen hatte der Wirbelsturm „Pam“ den Inselstaat Vanuatu, zu dem auch Tanna Island gehört, stark getroffen. Aufgrund der nun vielerorts stark geschädigten Bäume liegen deren Blüten und Früchte, von denen sich die Flughunde ernähren, auf dem Boden. Dort können die Tiere sie jedoch nur schwer finden. Daher sind sie gezwungen, auch am Tag auf Nahrungssuche zu gehen und werden damit zu einem leichten Ziel für die Schleudern der lokalen Jugendlichen. Für die

Jugendlichen sind nicht nur die wohlschmeckenden Flughunde eine außergewöhnliche Erscheinung am Taghimmel, sondern auch die kleinen, brummenden Flugobjekte, die sie seit dem Wirbelsturm vermehrt am Himmel beobachtet haben. Aus dem Radio wissen die Jungs, dass es sich dabei um Drohnen handelt, die die durch „Pam“ verursachten Schäden kartieren sollen (Abb.2). Ebenfalls aus dem Radio wissen sie, dass sie diese Drohnen möglichst nicht mit Ihren Schleudern attackieren sollten. Genau das war wenige Tage zuvor