

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 167 (2016)
Heft: 1

Artikel: Waldertrag und Anbaurisiko in einer unsicheren Klimazukunft
Autor: Kölling, Christian / Mette, Tobias / Knoke, Thomas
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097419>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Walderntrag und Anbaurnisiko in einer unsicheren Klimazukunft

Christian Kölling Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Abteilung Boden und Klima (DE)*
Tobias Mette Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Abteilung Boden und Klima (DE)
Thomas Knoke Technische Universität München, Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung (DE)

Walderntrag und Anbaurnisiko in einer unsicheren Klimazukunft

Die durch den Klimawandel verursachte Änderung der klimatischen Rahmenbedingungen führt zu einer deutlichen, aber unsicheren Änderung des Waldwachstums und des naturalen Risikos beim Anbau der Baumarten. Der finanzielle Erfolg als wichtiges Kriterium betrieblicher Entscheidungen wird vom naturalen Ertrag und Risiko wesentlich beeinflusst. Diese Studie stellt ein neues Konzept vor, wie die zukünftige Entwicklung (potenzieller) Erträge und Risiken durch Verwendung überregionaler Daten abgeschätzt werden kann. Dadurch lassen sich beliebige Bestände in einem Ertrags-Risiko-Koordinatensystem verorten; ihre zukünftige Entwicklung wird durch Trajektorien im Ertrags-Risiko-Raum abgebildet. Diese streng analytische Herangehensweise kann der Praxis die betriebliche Entscheidung nicht abnehmen, sie kann sie aber erleichtern und objektivieren. Die Anwendung bewährter ökonomischer Prinzipien wie des Vorsichtsprinzips oder des Grundsatzes der Flexibilität knüpft an die Betrachtungen von Ertrag und Risiko an und zeigt erweiterte Handlungsspielräume klimaangepasster stabiler Mischwaldwirtschaft auf.

Keywords: site index, probability of occurrence, generalized linear models, trajectories, climatic space, Sharpe ratio

doi: 10.3188/szf.2016.0029

* Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1, DE-85354 Freising, E-Mail christian.koelling@wlf.bayern.de

Der Klimawandel wird in der Forstwirtschaft als besonders einflussreich angesehen (z.B. Hanewinkel et al 2013). Dies hängt damit zusammen, dass die forstwirtschaftliche Produktion in besonderem Masse von der Gunst des Klimas abhängig ist, dass die Produktionszeiträume lang sind und dass man Produktionsstätten weder verlegen noch vor den Einflüssen des Klimas abschirmen kann. Anpassungsmassnahmen werden umso dringender, je mehr der Klimawandel in das Gefüge aus Ertrag und Risiko eingreift. Dies betrifft sowohl die naturale als auch die ökonomische Seite der forstwirtschaftlichen Produktion (Kölling et al 2010). Im Folgenden wird unter naturalem Risiko die Wahrscheinlichkeit des Scheiterns des Anbaus oder die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Mortalität (Ausfall der Baumart) verstanden, naturaler Ertrag meint das unter der Bedingung des Überlebens realisierbare oberirdische Wuchspotenzial. Im Zuge des Klimawandels werden nicht nur Veränderungen im Waldwachstum erwartet, sondern auch solche der Risikostruktur. Gerechnet wird mit neuen Anbaurnisiken für die bislang mit Erfolg verwendeten Baumarten, aber auch mit neuen Anbaumöglichkeiten für bisher wenig im Fokus stehende Spezies. Diese durch

den Klimawandel erzeugte neue Dynamik in der naturalen Produktion hat zwangsläufig auch Auswirkungen auf den ökonomischen Erfolg. Seit Langem ist es üblich, ökonomischen Erfolg als Wechselspiel von finanziellem Ertrag und finanziellem Risiko zu betrachten (z.B. Sharpe 1964). Ziel des ökonomischen Handelns ist es, eine optimale Balance zwischen diesen Grössen herzustellen. Hohe Risiken werden nur dann akzeptiert, wenn sie von einer entsprechenden Ertragserswartung begleitet sind. Umgekehrt wird auch bei niedrigen Risiken ein gewisser Mindestertrag erwartet. Die Anpassung an den Klimawandel in der Forstwirtschaft sollte, sofern sie in wirtschaftenden Betrieben stattfindet, so gestaltet werden, dass sie zu einer vom Wirtschaftler akzeptierten Ertrags- und Risikostruktur des Betriebs führt. Dies bedeutet nicht, dass immer das Risikominimum auch das Optimum ist. Letzten Endes müssten dann die meisten Wirtschaftsbetriebe schliessen, denn wirtschaftlicher Erfolg ganz ohne Risiken ist kaum möglich.

Die Wege zu einem vorteilhaften Verhältnis von ökonomischem Ertrag und Risiko können durchaus vielfältig sein. Neben dem Baumartenwechsel im klimagerechten Waldbau gibt es auch wald-

bauliche Möglichkeiten wie die Verkürzung der Umtriebszeit oder die vermehrte Mischung innerhalb der Bestände und zwischen ihnen. Die folgenden konzeptionellen Ausführungen sollen dazu dienen, das Problem im Umgang mit dem Klimawandel in der Forstwirtschaft zu analysieren und Lösungswege anzubieten.

Modellierung von naturalem Ertrag und Anbaorisiko

Ziel unserer Analysen ist die exemplarische Aufdeckung des Wechselspiels von Ertrag und Risiko an zwei grossen überregionalen Datensätzen. Es wurden Daten der zweiten deutschen Bundeswaldinventur BWI (BMELV 2005) und die Daten des europäischen Level-I-Programms (Fischer et al 2010) verwendet. Aus den Alters- und Höhendaten der BWI errechneten sich mittels Quantilenregression Schätzwerte für die Oberhöhe der Baumarten Fichte, Tanne und Buche im Alter 100 (Oberhöhenbonitäten) als Proxy für die naturale Produktionskraft eines Standorts. Für jede Baumart wurden alle Bonitäten eines BWI-Trakts zu einem einzigen Mittelwert verdichtet, um stark autokorrelierte Werte für die nur 150 m auseinander liegenden maximal vier Traktecken zu vermeiden. Der europäische Datensatz Level I fand Verwendung, um über ganz Europa hinweg Präsenz- und Absenzdaten für die gleichen Baumarten zu erhalten. Diese Vorkommensdaten dienten als erste Schätzung (Proxy) des Anbaorisikos, indem geringe Vorkommenswahrscheinlichkeiten mit hohem naturalem Risiko gleichgesetzt wurden. Dort, wo in Europa ein fichtenfeindliches Klima herrscht, ist auch die Vorkommenswahrscheinlichkeit gering, das Mortalitätsrisiko und das Anbaorisiko hingegen

sind hoch. Die Daten wurden anhand der Vegetationskarte von Europa (Bohn et al 2003) um vortgetäuschte, d.h. nicht auf klimatischen Gründen beruhende Absenzen bereinigt. Ausserdem wurde die Vorkommenswahrscheinlichkeit an der Prävalenz (der durchschnittlichen Vorkommenshäufigkeit) skaliert, wodurch die unterschiedlichen Ausgangshäufigkeiten der Arten korrigiert werden (Falk & Hempelmann 2013). Beide Datensätze wurden mit den frei erhältlichen WORLDCLIM-Klimadaten (Hijmans et al 2005) verbunden, aus denen die Grössen Sommertemperatur (mittlere Temperatur in den Monaten Juni–August), Wintertemperatur (mittlere Minimaltemperatur im Januar) und Sommer-niederschlag (Niederschlagssumme Juni–August) extrahiert und einer Hauptkomponentenanalyse unterworfen wurden. Die eigentliche Modellierung erfolgte abschliessend unter Verwendung der ersten beiden Hauptkomponenten als Prädiktoren und Oberhöhenbonitäten sowie Vorkommenswahrscheinlichkeiten als Zielgrössen mit einfachen generalisierten linearen Modellen (GLM). Alle Berechnungen und Grafikdarstellungen führten wir im Statistikprogramm R (R Core Team 2014) durch, die geografischen Analysen und die Kartendarstellungen mit ArcMap, Version 10.0, von ESRI.

Der Naturalertrag hängt vom Klima ab

Um den Einfluss eines sich verändernden Klimas auf Naturalertrag und -risiko abschätzen zu können, ist ein Blick über die nationalen Grenzen auf einen europäischen Klimakontext hilfreich. Abbildung 1 zeigt die geografische Lage des 7569 Datenpunkte umfassenden Datensatzes des Level-I-Programms (Fischer et al 2010). Diesem europäischen Datensatz stellen wir beispielhaft den in der Nähe des Bodensees gelegenen Plot 171 der BWI gegenüber. Jedem nationalen und europäischen Datenpunkt weisen wir mithilfe des GIS die am Punkt herrschenden Klimabedingungen zu. Dies ermöglicht es, ein neues Koordinatensystem aufzuspannen, das die Datenpunkte nun in den zwei Dimensionen der beiden Hauptkomponenten «Wärme» und «Feuchte» darstellt (Abbildung 2). Dabei verwenden wir dimensionslos skalierte standardisierte Daten, die den Mittelpunkt 0 und die Standardabweichung 1 haben. Das ursprüngliche, durch die Hauptkomponentenanalyse transformierte Koordinatensystem mit der Sommertemperatur, der Wintertemperatur und dem Sommerniederschlag ist mit drei Pfeilen dargestellt. Die Achse «Wärme» ist mit den Sommer- und Wintertemperaturen positiv korreliert, die Achse «Feuchte» mit den Sommerniederschlägen und den Wintertemperaturen. Die Inventurpunkte des europäischen Datensatzes ergeben kondensiert eine blaue Wolke, zur besseren Orientierung sind die Städte aus Abbil-

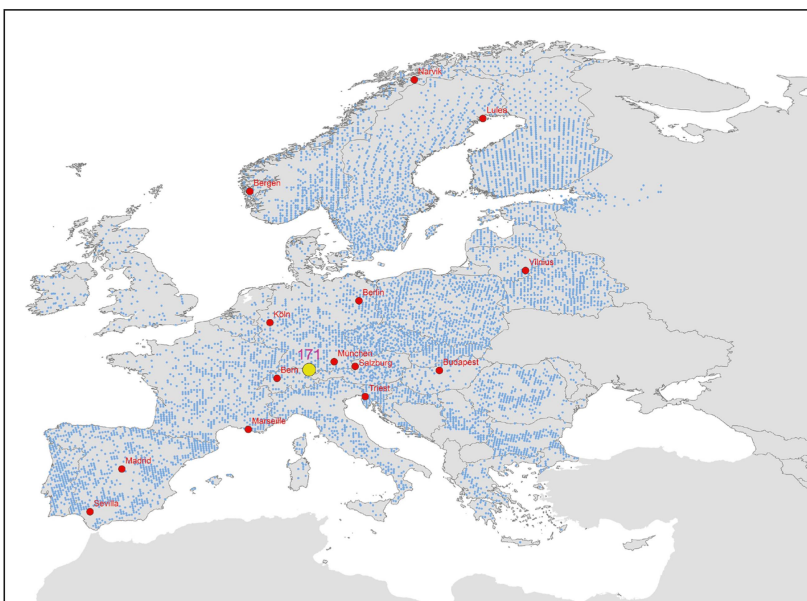


Abb 1 Inventurpunkte des europäischen Level-I-Programms (Fischer et al 2010) und der beispielhaft ausgewählte Inventurplot 171 der Bundeswaldinventur (BMELV 2005).

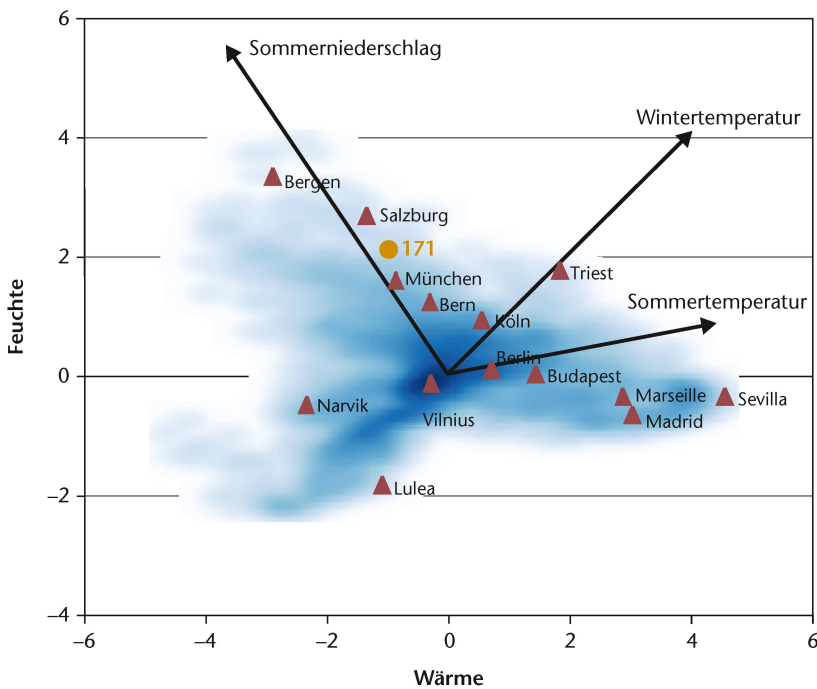


Abb 2 Verknüpfung von räumlichen Klimainformationen mit den Inventurpunkten aus Abbildung 1 in einem neuen Koordinatensystem, das den europäischen Klimaraum umfasst. Die Summe der Inventurpunkte ist als Dichtewolke eingezeichnet, der gelbe Punkt markiert die Lage des Inventurpunkts 171 der Bundeswaldinventur. Die Pfeile stellen die Bedeutung der originalen Klimadaten dar (Sommerniederschlag: Niederschlagssumme Juni–August, Sommertemperatur: mittlere Temperatur in den Monaten Juni–August, Wintertemperatur: mittlere Minimaltemperatur im Januar).

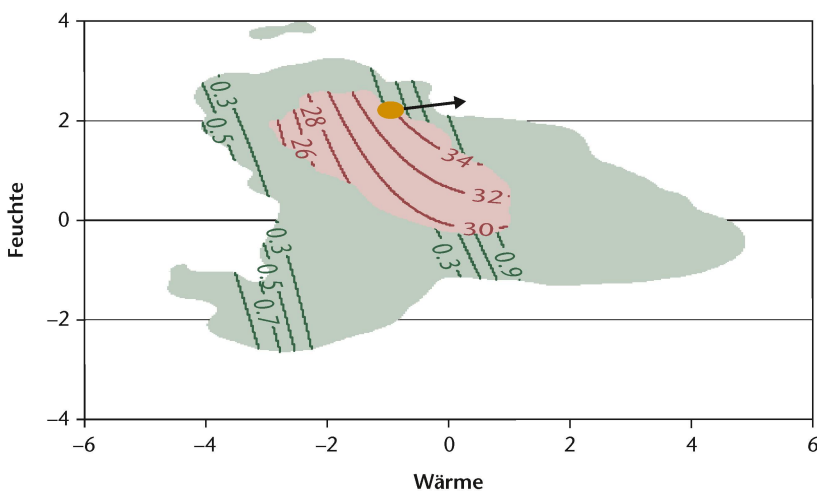


Abb 3 Modellierung von Oberhöhenbonität (im Alter 100; rote Isolinien) und natürlichem Risiko (grüne Isolinien) für die Fichte. Hinzugefügt ist eine mögliche Klimawandeltrajektorie für den Punkt 171 der Bundeswaldinventur (mittlere Entwicklung im Szenario RCP 4.5). Die Trajektorie verlässt den Klimabereich, für den das Bonitätsmodell entwickelt und kalibriert wurde (rot), und später auch den Bereich des Risikomodells (grün).

derung 1 ebenso wie der Plot 171 der BWI klimatisch verortet. Innerhalb dieses neuen Koordinatensystems, das den europäischen Klimaraum definiert, kann nun das Modell dargestellt werden, das die Abhängigkeit der Oberhöhenbonität vom Alter beschreibt. Das Vorgehen hier ist ähnlich wie das von Albert & Schmidt (2010). Die roten Isolinien in Abbildung 3 geben ähnlich wie Höhenlinien auf einer

topografischen Karte die geschätzte Baumhöhe am Beispiel der Baumart Fichte im Alter 100 wieder. Aussagen über die Baumhöhen können nur für den roten Kalibrationsbereich des Bonitätsmodells gemacht werden. Optimale Wuchsbedingungen herrschen im warm-feuchten Klima, die kühlen Klimate und auch die warm-trockenen zeigen deutlich geringere Baumhöhen. Am Inventurplot 171 wird durch das Modell aufgrund der Klimabedingungen eine gute Oberhöhenbonität von 33.8 m ermittelt.

Auch das Naturalrisiko hängt vom Klima ab

In der gleichen Abbildung 3 sind innerhalb des grünen Kalibrationsbereiches auch die Ergebnisse des Modells der Vorkommenswahrscheinlichkeit wiedergegeben. Nischen- und Artverbreitungsmodelle für die Bestimmung der Vorkommenswahrscheinlichkeit sind seit mehreren Jahren auch in der Forstwirtschaft im Einsatz (Iverson 2008, Falk & Mellert 2011, Hanewinkel et al 2013). Diese Modelle verbinden das Verhältnis von Präsenzen und Absenzen in Vorkommensdaten mit den dazu gehörenden Klimadaten. Wir verwendeten hier ein einfaches quadratisches logistisches GLM mit Wechselwirkung. Um aus der Vorkommenswahrscheinlichkeit als Output des Nischenmodells einen Proxy für das Naturalrisiko des Anbaus zu machen, wurde die Skala umgekehrt, so dass hohe Werte auch ein hohes Risiko bedeuten. Die Skaleneinteilung wurde so normalisiert, dass 0.5 einen Schwellenwert für unterdurchschnittliche Vorkommenswahrscheinlichkeit darstellt. Jenseits der 0.5-Isolinie steigt das Anbaurisiko stark an, bis jenseits der 0.9-Isolinie kaum noch Vorkommen beobachtet werden können. Wir gehen davon aus, dass die Überlebensbedingungen am Rand des Baumartenvorkommens so ungünstig sind, dass dauerhaft keine wirtschaftlich nutzbaren Populationen mehr existieren können. Jedes beliebige Vorkommen in Europa hat nun neben seinen geografischen Koordinaten zusätzlich zwei klimatische Koordinaten und darüber hinaus auch noch jeweils einen modellierten Näherungswert für den Naturalertrag (Oberhöhenbonität) und einen für das Naturalrisiko des Anbaus (abgeleitet aus der Vorkommenswahrscheinlichkeit).

Der Klimawandel verändert die Produktionsbedingungen

Mit den in den zwei vorangegangenen Abschnitten geschilderten Rechenoperationen haben wir die Voraussetzung dafür geschaffen, den Einfluss des Klimawandels auf die Forstwirtschaft in seiner Auswirkung auf Ertrag und Risiko simultan abbilden zu können. Dazu ermitteln wir für unseren beispiel-

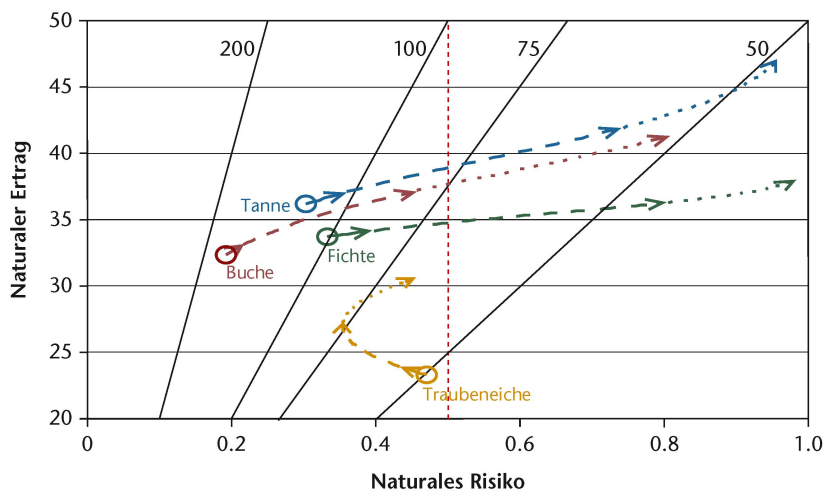


Abb 4 Trajektorien der Entwicklung von naturalem Ertrag (Oberhöhenbonität) und naturalem Risiko für den Punkt 171 der Bundeswaldinventur und die vier Baumarten Fichte, Tanne, Buche und Traubeneiche. Durchgezogene Pfeillinien liegen innerhalb des Kalibrierungsbereichs des Bonitätsmodells, durchbrochene innerhalb des Kalibrierungsbereichs des Risikomodells und punktierte ausserhalb des Kalibrierungsbereichs beider Modelle. Die rote Linie markiert den Risikoschwellenwert von 0.5. Die Isolinien (schwarz) verbinden Punkte des gleichen Verhältnisses von naturalem Ertrag und naturalem Risiko. Diese Verhältnisse geben an, wie viel Ertrag je eingesetzte Risikoeinheit erzielt werden kann.

haften BWI-Punkt 171 eine regionale Projektion des zukünftigen Klimas. Wir wählen das Szenario RCP 4.5, das zweitmildeste der vier dem 5. IPCC-Report (IPCC 2013) zugrunde liegenden RCP-Szenarien, in 19 verschiedenen Realisationen unterschiedlicher globaler Zirkulationsmodelle (GCM). Im Durchschnitt ändern sich am ausgewählten BWI-Plot innerhalb von 100 Jahren die Temperaturen im Winter um 3.3 und im Sommer um 3.5 °C. Innerhalb des europäischen Klimaraums in Abbildung 3 ergibt sich dadurch die durch den Pfeil dargestellte Zugbahn oder Trajektorie. Sie stellt im Klimaraum die klimatische Veränderung dar, die ein herausgegriffener Punkt in Europa durch den Klimawandel erfährt. Im Beispiel des Punkts 171 ergibt sich unter dem gewählten Szenario eine deutliche Zunahme der Wärme. Dank des Ertragsmodells und des Risikomodells ist es nun möglich, die klimatischen Veränderungen in Veränderungen von Naturalertrag und -risiko zu übersetzen. Im Beispiel der Fichte verändert sich die Oberhöhenbonität von 33.8 m um gut vier Meter auf 38.0 m. Das relative Anbaurisiko hingegen erhöht sich von 0.33 auf 0.98. Allerdings wird dabei bereits der Kalibrierungsbereich beider Modelle überschritten, dies ist aus der Abbildung 3 ersichtlich. Einer prädierten Wachstumssteigerung steht demnach eine deutliche Zunahme des Anbaurisos gegenüber. Beide Ergebnisse sind durchaus realistisch und entsprechen der erwarteten Reaktion am Beispielstandort. So beobachten Pretzsch et al (2014) auch bei fortschreitender Klimaerwärmung steigende Zuwächse. Das Wachstum der Fichte ist in vielen Fällen, so auch am Punkt 171, trotz sonst sehr guten Umweltbedingungen, immer noch wärmeli-

mitiert. Bei annähernd gleicher Feuchte führt daher zusätzlicher Wärmegenuss zu einer Verlängerung der Vegetationszeit und damit zu einer Erhöhung des Ertrags. Die Steigerung der Wärmesumme verändert aber gleichzeitig das Gleichgewicht der Parasit-Wirt-Beziehung bei Schadorganismen, insbesondere beim Borkenkäfer. So werden vermehrt Ausfälle erwartet, das Mortalitätsrisiko steigt. Auch dies ist eine Erkenntnis der forstlichen Klimawandelforschung der letzten Jahre (Seidl et al 2008, Allen et al 2010). Der Klimawandel führt unter den gemachten Annahmen zur scheinbar paradoxen Situation der gleichzeitigen Zunahme von Ertrag und Risiko (Kölling et al 2013). Zusätzliche Erträge werden erkauft mit der Zunahme des Risikos, sodass diese Erträge durch vorzeitigen Bestandsausfall zumindest teilweise gar nicht mehr realisiert werden können. Das gewählte Beispiel des Inventurplots 171 macht auch das Extrapolationsproblem deutlich, das entsteht, wenn man für ein beschränktes Gebiet Modelle entwickelt, die auf einen neuartigen Wertebereich jenseits der zur Kalibration verwendeten Werte angewendet werden. Wie Abbildung 3 ausweist, führt die Klimawandeltrajektorie zu neuen, von den Modellen bisher nicht abgedeckten Klimakombinationen. In unserem Fall erlauben wir eine Funktionskontinuität des GLM für nahe Extrapolationsbereiche. Ein Wunsch der Forschung ist es, diese Extrapolationen dadurch weiter zu vermindern, dass grossräumige europäische oder gar globale Datensätze verwendet werden, in denen auch die durch den Klimawandel erzeugten und bei uns neuartigen Klimatypen mit grösserer Wahrscheinlichkeit enthalten sind.

Wirtschaftlich arbeiten im Spannungsfeld von Ertrag und Risiko

Die Spannung, die durch die gleichzeitige klimawandelbedingte Änderung von naturalem Ertrag und naturalem Risiko entsteht, lässt sich optimal dadurch visualisieren und analysieren, dass wir ein weiteres Koordinatensystem aufspannen. Es besteht aus den Ergebnissen des Ertrags- und des Risikomodells und ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Isolinien ergeben sich aus dem Verhältnis von Ertrag zu Risiko. In die Alltagssprache übersetzt besagt das Verhältnis von Ertrag zu Risiko Folgendes: Welche Menge an Ertrag erhalte ich, wenn ich eine Einheit Risiko einsetze? Günstige Kombinationen aus Risiko und Ertrag liegen im Diagramm links oben: hoher Ertrag bei geringem Risikoeinsatz. Weniger günstig sind die Kombinationen rechts im Diagramm. Hohe Erträge, die mit hohem Risiko verbunden sind (rechts oben), erscheinen noch günstiger als die denkbar schlechteste Kombination aus niedrigen Ertragserwartungen mit hohem Risiko (rechts unten). Das schon aus Abbildung 3 bekannte Prinzip der Trajek-

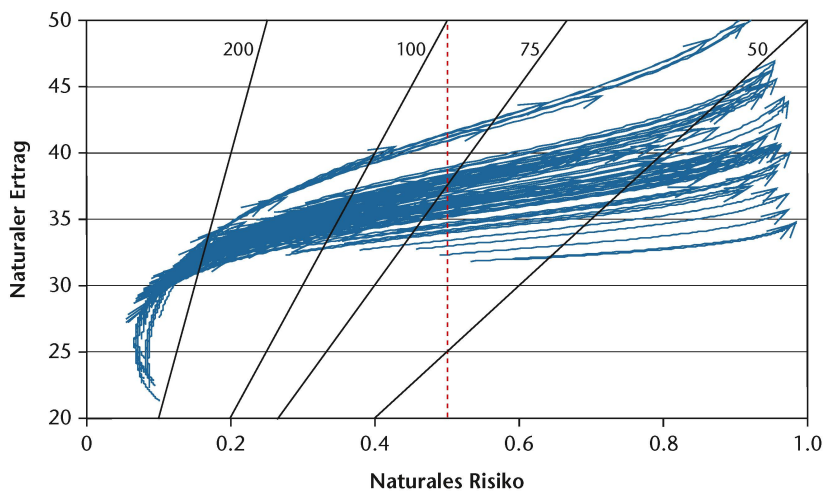


Abb 5 Trajektorien nach dem Muster der Abbildung 4 für alle 201 Tannenplots der Bundeswaldinventur. Je nach Ausgangssituation und wahrscheinlicher Klimaentwicklung ergibt sich ein charakteristischer Verlauf der Trajektorien. Die Endpunkte der Trajektorien in den höheren Risikobereichen sind durch Extrapolationsfehler verzerrt. Oberhalb eines bestimmten Risikowertes ist es fraglich, ob natürlicher Ertrag überhaupt erzielt werden kann. Mangels vorhandener Tannenbestände ist in diesen Bereichen auch keine Kalibration der Bonitätsmodelle mehr möglich.

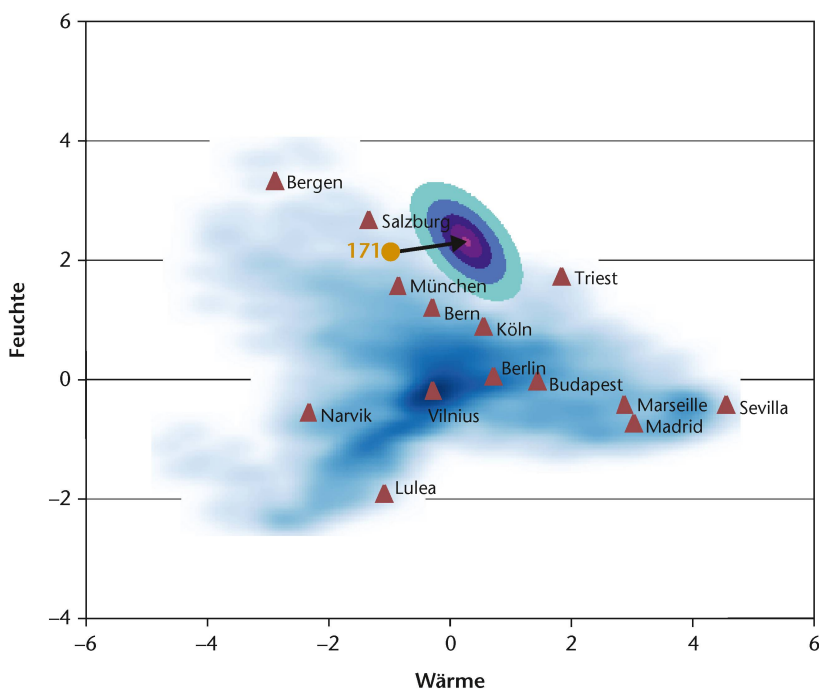


Abb 6 «Wahrscheinlichkeitsellipsen» als Hilfsmittel zum Fassen der Unsicherheit der Klimaentwicklung an einem Standort: Unter Annahme des Szenarios RCP 4.5 entwickelt sich mit 75% Wahrscheinlichkeit das jetzige Klima am Punkt 171 der Bundeswaldinventur hin zu einem Klima innerhalb der eingefärbten Wahrscheinlichkeitsellipse. Die schwarze Trajektorie ergibt sich aus einer Erhöhung der Sommertemperatur um 3.5 °C, der Wintertemperatur um 3.3 °C und einer Abnahme der Sommerniederschläge um 28 mm (Durchschnittswert aus 19 Realisationen).

torien kann auch in diesem Diagrammtyp wirkungsvoll eingesetzt werden. Für die Fichte ergibt sich die schon beschriebene Zunahme von Ertrag und Risiko. Dabei verringert sich der Index Ertrag: Risiko von 101 auf 39. Diese durch die Abnahme des Indexwerts angezeigte deutliche Verschlechterung der Produktionsbedingungen könnte den Wirtschaftler zur Su-

che nach Alternativen hinsichtlich Baumarten oder auch Bestandestypen veranlassen. Im Falle der Baumarten geben die ebenfalls für den Punkt 171 ermittelten und in Abbildung 4 zusätzlich dargestellten Trajektorien für Tanne, Buche und Traubeneiche eine Entscheidungshilfe: Auch bei Tanne und Buche wird eine starke Risikozunahme prädictiert, es wird jedoch als Endpunkt ein im Vergleich günstigerer Indexwert erreicht. Nur bei der Traubeneiche zeigt sich zunächst eine Abnahme des Risikos bei gleichzeitiger Ertragssteigerung. Der Indexwert spiegelt diese Entwicklung mit einer deutlichen Erhöhung wider. Am Endpunkt der Trajektorie wird für diese Baumart der mit 68 vergleichsweise höchste Indexwert erreicht. Die Wahl der Eichenoption würde eine Ertragssteigerung zusammen mit einer moderaten Risikoabnahme zur Folge haben. Ein Wechsel zu dieser Baumart könnte daher vorteilhaft werden (wobei natürlich auch andere ökonomische Aspekte wie Kulturkosten berücksichtigt werden müssen). Mit dem Hilfsmittel der Trajektorien im Raum von natürlichem Ertrag und natürlichem Risiko ist es möglich, für konkrete Waldorte die Folgen des Klimawandels baumartenweise darzustellen, natural zu bewerten und in einem späteren Schritt auch die ökonomischen Folgerungen daraus zu ziehen. Abbildung 5 demonstriert an den 201 Tannenpunkten der BWI, dass solche Trajektorien für jeden Waldort konstruiert und in Informationssystemen dargestellt werden könnten. Je nach Ausgangssituation und Stärke des Klimawandelsignals ergeben sich in Abhängigkeit von der Charakteristik der Modelle durchaus sehr verschiedene Trajektorien. Das viel beschworene eiserne Gesetz des Standörtlichen gilt ganz besonders auch für die Betrachtung der Entwicklungen im Klimawandel. In vielen Fällen wird man als Forstbetrieb bei einer als ungünstig prädictierten Entwicklung von Ertrag und Risiko die Option des Waldumbaus ergreifen und sukzessive, ganz oder teilweise, die Baumartenzusammensetzung innerhalb der Bestände und innerhalb des Betriebs ändern und an die neuen klimatischen Rahmenbedingungen anpassen.

Handeln in Unsicherheit

Alle Betrachtungen der Zukunft werden stets von Skepsis begleitet. Bei der Frage der Anpassung an den Klimawandel in der Forstwirtschaft werden die Unsicherheiten in der Beurteilung künftiger Erträge und Risiken schlimmstenfalls als Vorwand für eine abwartende, passive Haltung gebraucht. Unter Unsicherheit verstehen wir hier den Zustand mangelhafter Information: Wir wissen erstens nicht genau, wie sich der Klimawandel entwickeln wird, und zweitens sind auch die Ertrags- und Risikomodelle selbst unsicher, weil sie nicht auf vollständigen und perfekten Daten, sondern auf Stichproben beruhen.

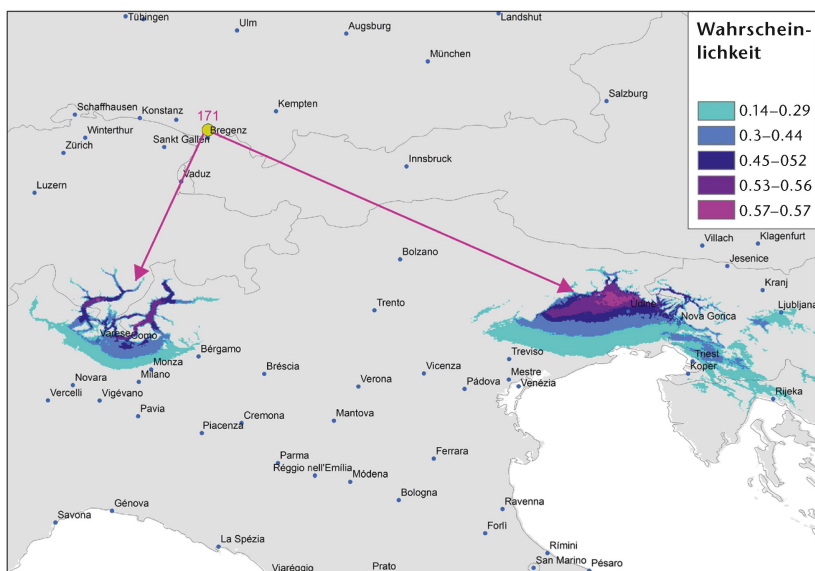


Abb 7 Analogregionen zur Klimaprojektion des Jahrs 2100 am Punkt 171 der Bundeswaldinventur. Dargestellt ist die räumliche Repräsentation der Wahrscheinlichkeitsellipse aus Abbildung 6.

In Abbildung 6 ist dargestellt, dass man mit dem Zustand der Unwissenheit umgehen kann, auch wenn man sich nicht auf eine einzige exakte Klimawandelprojektion festlegt. Vielmehr kann man auch mit einer Vielzahl möglicher Entwicklungen, die man für unterschiedlich wahrscheinlich hält, arbeiten. Anstatt nur den festen Änderungsbetrag, wie er durch die Trajektorie vorgegeben zu sein scheint, zu verwenden, kann man auch den Strauss von Trajektorien nutzen, der in die gefärbte Wahrscheinlichkeitsellipse in Abbildung 6 mündet. Man wird dann feststellen, dass auch die Ergebnisse im Raum aus Ertrag und Risiko entsprechend variieren werden. Es liegt dann im Ermessen des Wirtschafters, aus der Variabilität der Ergebnisse die entscheidende Information herauszufiltern und auch den Faktor Zeit bei seiner Übergangstrategie klug zu berücksichtigen. Die erste und eine bedeutende Quelle der Unsicherheit ist daher der nicht sicher vorhersagbare Verlauf des Klimawandels.

Die zweite Unsicherheitsquelle besteht in der Unvollkommenheit der Modelle für Risiko und Ertrag. Um ihr zu begegnen, kann man das Prinzip der Analogklimate anwenden. Hierzu betrachtet man Regionen, in denen die zukünftigen Klimakombinationen, wie sie in der Wahrscheinlichkeitsellipse in Abbildung 6 zusammengefasst sind, bereits heute verwirklicht sind. Wenn man die in der Wahrscheinlichkeitsellipse zusammengefassten Endpunkte der Klimawandeltrajektorien aus dem klimatischen Raum wieder zurück in das geografische Koordinatensystem projiziert, dann ergeben sich die Regionen, in denen die Analogklimate für den Beispielpunkt 171 schon heute verwirklicht sind. Es sind im betrachteten Beispiel Gegenden an den Tessiner und den oberitalienischen Seen sowie in der italienischen Region Friaul/Julisch Venetien (Abbildung 7).

Aus den abstrakten Trajektorien werden nun quasi Reiserouten, die ein räumliches Äquivalent zu den zeitlichen Zugbahnen im Klimaraum darstellen. Um Sicherheit zu gewinnen, kann man die Produktionsbedingungen dieser Regionen betrachten und sich über Erträge und Risiken der Baumarten dort informieren. Schnell wird man merken, dass sich die Möglichkeiten der Forstwirtschaft zwischen dem Ausgangsort und dem Zielgebiet mehr oder weniger stark unterscheiden. Aus diesen Unterschieden lassen sich Schlüsse für Handlungsoptionen am Ausgangsort ziehen und in Planungsoptionen einbauen.

Die ökonomische Seite

Weltweit werden forstökonomische Entscheidungen oft lediglich anhand der erwarteten Rentabilität getroffen, ohne dabei die mit den Entscheidungen einhergehenden Risiken zu beachten (vgl. beispielsweise Cubbage et al 2007 für eine Beurteilung der Rentabilität verschiedener Baumarten). Ähnlich ist dies auch bei einer rein naturalen, waldertragskundlichen Betrachtung zu sehen, wo häufig allein die Produktivität im Vordergrund steht. Bei den in Mitteleuropa üblichen langen Produktionszeiten werden waldbauliche Entscheidungen jedoch sehr stark von Unsicherheiten überlagert. Aus forstökonomischer Sicht bieten sich verschiedene Strategien im Umgang mit diesen Unsicherheiten an:

Grundlegende und im forstlichen Bereich mit Erfolg praktizierte Strategie ist das sogenannte «Vorsichtsprinzip», durch welches sich die Waldbesitzer gegen die Auswirkungen eventueller negativer Entwicklungen versichern können. Darüber hinaus kann Forschung helfen, den Grad der Unsicherheit zu senken. Eine weitere Strategie ist schliesslich die Schaffung von Flexibilitätsspielräumen. Nachfolgend versuchen wir, die Verknüpfung mit der obigen naturalen Betrachtung herzustellen.

Anwendung des Vorsichtsprinzips

Schon unter den heutigen standörtlichen Bedingungen ist das Ergebnis ökonomischer Bewertungen verschiedener Baumarten sehr variabel und stark von den naturalen Wuchsbedingungen abhängig. Leider existieren bislang nur wenige forstökonomische Studien, welche auf diesen Aspekt eingehen (die wenigen Ausnahmen schliessen die Studien von Kroth 1983 sowie Brandl 1988, 1989 ein). Auch eine neuere Studie von Clasen & Knoke (2013) macht die Abhängigkeit des ökonomischen Ertrags von den Wuchsbedingungen am Beispiel Bayerns deutlich (Abbildung 8). Hier zeigt sich unter rezenten Klimabedingungen lediglich in einem Wuchsgebiet, der Untermainebene mit warm-trockenem Klima, eine deutliche ökonomische Unterlegenheit der Fichte im Vergleich mit der Buche. Gemäss Vorsichtsprinzip

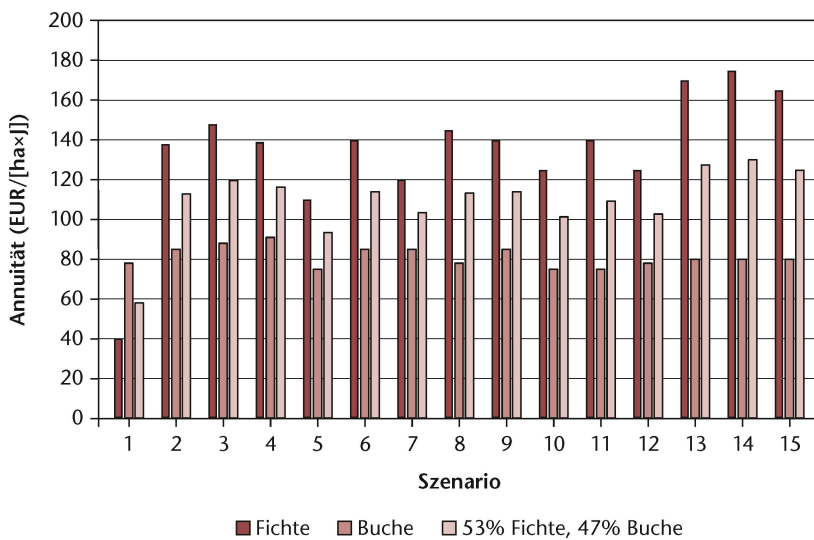


Abb 8 Durchschnittliche Annuitäten (aus dem Kapitalwert unter Verwendung eines Zinssatzes von 2% abgeleitete Jahresdurchschnittsbeträge) für Fichte und Buche sowie einen großflächig gemischten Bestand aus 53% Fichte und 47% Buche in den Wuchsgebieten Bayerns (verändert nach Clasen & Knoke 2013). Die verschiedenen Ergebnisse werden im Sinne des Prinzips der Analogregionen als mögliche Zukunftsszenarien bei geändertem Klima interpretiert.

gehen wir nun in einer theoretischen Betrachtung davon aus, dass die Bandbreite der abgebildeten Wuchsbedingungen einen guten Anhaltspunkt für mögliche zukünftige Wuchsbedingungen in jedem einzelnen Wuchsgebiet darstellt. Diese Überlegung folgt der Idee der oben schon erwähnten «Analogregionen». Dies würde bedeuten, dass auch in anderen Wuchsgebieten die Wuchsbedingungen zukünftig denen in der Untermainebene ähneln könnten. Aus Gründen der Vorsicht könnten die Waldbesitzer daher heute Bestände begründen, die unter allen betrachteten Wuchsbedingungen ein akzeptables, möglichst gutes ökonomisches Ergebnis erbringen, denn man weiß ja nicht, welche Wuchsbedingungen tatsächlich eintreten werden. Aus einer linearen Optimierung lässt sich unter dieser Anforderung eine Baumartenmischung ableiten, die bei jedem Szenario mindestens 74% der jeweils möglichen maximalen Annuität erbringt. Den Prozentwert (74%) erhält man aus einer Kalibrierung, indem man mit einem relativ niedrigen geforderten Prozentanteil vom maximal möglichen Ertrag beginnt und dann den geforderten Mindestertrag für jedes Wuchsszenario durch Anheben des Prozentsatzes schrittweise steigert. Dies führt man so lange fort, bis das lineare Optimierungsprogramm keine Baumartenmischung mehr findet, welche den Mindestertrag für jedes Wuchsszenario erbringt. In unserem Beispiel war bei 74% des Maximalertrags für jedes Szenario ein Ende erreicht; 75% des Maximalertrages in jedem Wuchsszenario konnte durch keine Baumartenmischung erreicht werden.

Durch dieses Vorgehen minimieren wir automatisch den maximalen Abstand zur jeweils höchsten erreichbaren Annuität in jedem Szenario. Dies

entspricht der Zielfunktion einer Variante der sogenannten Zielwertprogrammierung, welche ebenfalls den maximalen Abstand zu vordefinierten Zielwerten minimiert (Minimax-Prinzip; vgl. auch Tamiz et al 1998). Bezogen auf die relativen Abstände wird also nach derjenigen Bestandeszusammensetzung gesucht, welche unter sehr ungünstigen Bedingungen noch einen maximalen relativen Vorteil erbringt. Unter Zugrundelegung eines Wahrscheinlichkeitsansatzes könnte man nun natürlich argumentieren, dass man beim Anbau von 100% Fichte im Durchschnitt statt 80% nach dem Vorsorgeprinzip (siehe unten) 97% des Maximalertrages erzielt. Aber hierin besteht gerade die Krux, denn mit Eintrittswahrscheinlichkeiten für bestimmte Szenarien können wir vor dem Hintergrund des Klimawandels mit gutem Gewissen kaum arbeiten. Der demonstrierte Ansatz ist daher bewusst ein nicht stochastischer.

Ein Bestand, der 74% des Maximalertrages für jedes Wuchsszenario erreicht, besteht durchschnittlich aus 53% Fichte und 47% Buche (Abbildung 8). Im Durchschnitt würden bei dieser Mischung nicht nur die erwähnten 74% des Maximalertrages anfallen (dies wäre der garantierte Mindestertrag), sondern 80%. Die Waldbesitzer würden also, falls sich nichts an den Wuchsbedingungen in ihrem Gebiet ändern sollte, gegenüber der Begründung reiner Fichtenbestände eine durchschnittliche «Versicherungsprämie» von 17% zahlen – dies freilich nur, wenn wir jedem Szenario dieselbe Eintrittswahrscheinlichkeit zuordnen.

Unsere Betrachtung setzt voraus, dass beide Baumarten natürlich, also mit sehr geringen Kosten für die Bestandesbegründung, verjüngt werden können. Entfällt diese Voraussetzung, können Buchenanteile in der genannten Höhe aus forstökonomischer Sicht nur noch schwer favorisiert werden. Die Ergebnisse des Vorsichtsprinzips sind folglich als konservativ zu bewerten und können mit sehr hohen Kosten verbunden sein. Unter der Annahme sehr unsicherer Informationen spricht aber dennoch vieles für die Anwendung des Vorsichtsprinzips.

Verminderung der Unsicherheit durch Forschung

Am Beispiel der Forschung zum Einfluss der Mischung auf die Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte kann gezeigt werden, dass durch verbesserte Modelle eine deutliche Reduktion der «Versicherungsprämien» erreicht werden kann. So entwarfen Roessiger et al (2011) einen «risikominimalen» hypothetischen Bestand aus 42% Fichte und 58% Buche mit einem sehr lang gestreckten Verjüngungsgang (Beginn im Alter 50, Ende im Alter 120). Dieser Bestand erbrachte die besten «worst-case»-Ergebnisse. Allerdings lag seine durchschnittliche Annuität um 65 Euro pro Hektar und Jahr unterhalb der maximalen durchschnittlichen Annuität (bei reiner

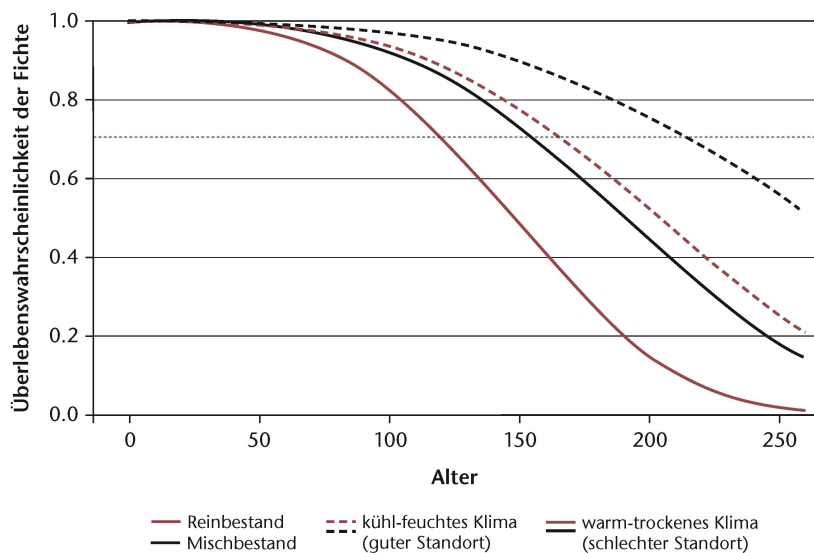


Abb 9 Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte im Reinbestand (durchgezogene Linien) und im Mischbestand (gestrichelt) unter kühl-feuchten (schwarz) und warm-trockenen Klimabedingungen (rot). Die Mischbestände setzen sich etwa zu 50% aus Fichte und zu 50% aus Buche zusammen. Abgeleitet aus Daten zur Erhebung des Waldzustandes in Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern mit gegen 40 000 ausgewerteten Bäumen; nach Neuner et al (2015).

Fichte mit Umtriebszeit 80 Jahre). In einer Folgestudie (Rossiger et al 2013) konnte jedoch gezeigt werden, dass durch Berücksichtigung der Stabilisierung der Fichte in Mischbeständen durch Beimischung von Buchen (vgl. Griess et al 2012) der Buchenanteil auf 20% und die «Versicherungsprämie» auf 27 Euro pro Hektar und Jahr gesenkt werden konnten. Dies zeigt deutlich, dass die Effizienz der Forstwirtschaft durch Forschung und verbesserte Informationen gesteigert werden kann.

Allerdings berücksichtigen diese Ergebnisse noch nicht den möglichen Einfluss eines veränderten Klimas auf die Überlebenswahrscheinlichkeiten unserer Baumarten. Hier deutet sich ein sehr günstiger Effekt in Mischbeständen an, welche allerdings einen sehr grossen Buchenanteil enthalten (rund 50%). So konnten Neuner et al (2015) zeigen, dass Fichten in Mischbeständen bei warm-trockenem Klima noch in etwa dieselben Überlebenswahrscheinlichkeiten erreichen wie Fichten in Reinbeständen in kühl-feuchtem Klima (Abbildung 9). Diese Überlebenskurven müssen jedoch noch mit ökonomischen Betrachtungen verknüpft werden, um Aussagen darüber treffen zu können, wie sich das finanzielle Ertrags-Risiko-Verhältnis bei geändertem Klima verschieben würde. Hier besteht noch Forschungsbedarf.

Erhöhung der Flexibilität

Es klang schon an, dass Forstwirtschaft hinsichtlich möglicher Verschiebungen der Produktionsstandorte durch wenig Flexibilität gekennzeichnet ist. Allerdings bietet sie hinsichtlich der Wahl der Zeitpunkte von Holzeinschlagsmassnahmen

eine gewisse Flexibilität, welche sich durchaus auf ihren ökonomischen Erfolg auswirken kann. Denn auch wenn der Einschlag aufgeschoben wird, nimmt das Holz durch sein Wachstum an Wert zu. Durch einen marktangepassten Holzeinschlag kann die Rentabilität der Waldwirtschaft daher gehoben werden. So konnten Knoke & Wurm (2006) zeigen, dass sich die Ertragswerte von Fichte und Buche nennenswert steigern lassen, indem der Zeitpunkt der Verjüngungsnutzung von der Holzmarktlage abhängig gewählt wird. Der Holzeinschlag wurde nur dann simuliert, wenn Holzpreisszenarien einen Holzpreis auswiesen, der den mittleren historischen Holzpreis übertraf. Dabei wurde das durch Warten steigende Ausfallrisiko mithilfe entsprechender Überlebenswahrscheinlichkeiten berücksichtigt. Die Ausnutzung dieser Flexibilität hat natürlich in grossen Betrieben ihre Grenzen, denn es soll ja nicht zu einem aussetzenden Betrieb kommen und langfristige Kundenbeziehungen wollen gepflegt werden. Zudem ist klar, dass Flexibilität im Holzeinschlag nur in stabilen Beständen ausgenutzt werden kann. Dies unterstreicht die Vorteile des stabilen Mischwaldes, in dem der Zeitpunkt der Ernte vom Wirtschaftler bestimmt und nicht von Naturereignissen diktiert wird. Flexibilität wurde bislang aber nur selten in forstökonomischen Studien berücksichtigt.

Fazit

Die naturale und ökonomische, verbundene Betrachtung von Ertrag und Risiko ist sehr reizvoll, denn es erscheint auch im Bereich der Forstwirtschaft sehr sinnvoll, Ertrag und Risiko einander gegenüberzustellen, sie auszubalancieren und in Abhängigkeit von den klimatischen Wuchsbedingungen zu analysieren. Leider kommt die Betrachtung der Ertragssituation in bisherigen Studien eher etwas zu kurz. Dies kann auch als Folge eines einseitig angewendeten Vorsichtsprinzips gesehen werden, welches Ertragspotenziale mitunter etwas vernachlässigt. Formale Ansätze zur Kopplung von ökonomischem Ertrag und Risiko existieren bereits in umfangreicher Literatur für andere Bereiche als die Forstökonomie. So hat beispielsweise Sharpe (1966, 1994) vorgeschlagen, die Vorteilhaftigkeit von Investmentfonds anhand eines Vergleichs mit einer sicheren «Benchmark» und dem für den Investmentfonds zu akzeptierenden Risiko zu beurteilen. Natürlich kann auch an so einer Beurteilung mancherlei Kritik geübt werden, doch wollen wir uns dem Urteil Sharpes anschliessen, welcher folgert: *Sicherlich erfordert jeder Index, der versucht, mit einer einzigen Zahl eine unverzerrte Vorhersage des Anlageerfolgs zusammenzufassen, eine beträchtliche Menge von Annahmen zu seiner Rechtfertigung. In der Praxis sind diese Annahmen bestenfalls annähernd gegeben. [...] Ungeachtet dieser Vorsichts-*

regeln spricht viel dafür, einen solchen Index zu empfehlen, der mindestens sowohl das Risiko als auch den erwarteten Ertrag berücksichtigt, anstatt nur auf den Letzteren abzielen (Sharpe 1994: 57; eigene Übersetzung).

Daher ist die Forschung in der Forstökonomie zukünftig in diese Richtung weiterzuentwickeln. Veränderungen der Ertragssituation bei gleichzeitiger Risikodynamik im Klimawandel stellen sowohl die Forschung als auch die Praxis vor neue Herausforderungen.

Limitationen

Der hier aufgezeigte Ansatz verdeutlicht anhand relativ einfach formulierter Modelle, wie sich forstwirtschaftliche Baumartenentscheidungen im Spannungsfeld zwischen naturalem Risiko und naturalem Ertrag darstellen. Er zeichnet modellbedingt ein relativ optimistisches Szenario bezüglich der Ertragerwartung bei höheren Temperaturen. Erstens können nur solche Vorkommen bonitiert werden, in denen die betrachtete Baumart tatsächlich noch die höchste Kronenschicht bildet beziehungsweise sich daran beteiligen kann. Zweitens ist zu erwarten, dass sich die Beziehungen zwischen Oberhöhenbonität und Ertrag im Hochrisikobereich entkoppeln, da Mortalitätsverluste nur begrenzt in die Alters-Höhen-Beziehung einfließen. Man begeht also einen «Überlebensirrtum» (Kölling & Schmidt 2013), weil nur die überlebenden Bäume für die Kalibration verwendet werden können. Drittens kann sich die Interaktion zwischen Temperatur und Niederschlag im hohen Temperaturbereich stärker negativ auswirken als von unserer Modellstruktur «erlaubt». So zeigten zum Beispiel Brandl et al (2014), dass in Fichtenbeständen durch die sich verschlechternde klimatische Wasserbilanz bei höheren Temperaturen mit Ertragseinbussen zu rechnen ist. Mäkelä et al (2000) argumentieren, dass nur eine prozessbasierte Modellierung die Interaktionen zwischen Standort und Wachstum auch im Extrapolationsbereich abbilden kann. Hier liegen denn auch die Felder künftiger Modellierung der Beziehung zwischen Klima, Ertrag und Risiko. Gegenwärtig existiert das Bonitätsmodell nur für Deutschland, eine Erweiterung in den warmen Extrapolationsbereich mithilfe von Daten der französischen Forstinventur ist jedoch geplant. ■

Eingereicht: 24. April 2015, akzeptiert (mit Review): 21. August 2015

Dank

Diese Studie wurde gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und das Bundesministerium für Umwelt, Na-

turschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) im Rahmen des Waldklimafonds-Projekts «Waldproduktivität – Kohlenstoffspeicherung – Klimawandel».

Literatur

- ALBERT M, SCHMIDT M (2010) Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). For Ecol Manage 259: 739–749.
- ALLEN CD, MACALADY AK, CHENCHOUNI H, BACHELET D, McDOWELL N ET AL (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. For Ecol Manage 259: 660–684.
- BMELV (2005) Die zweite Bundeswaldinventur BWI2. Berlin: Bundesministerium Ernährung Landwirtschaft. 231 p.
- BOHN U, NEUHÄUSL R, GOLLUB G, HETTWER C, NEUHÄUSLOVA Z ET AL (2003) Map of the natural vegetation of Europe, scale 1 : 2 500 000. Parts 1–3. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag. 656 p.
- BRANDL H (1988) Entwicklung der Ertragslage der vier Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche im Staatsforstbetrieb von Baden-Württemberg und ihr Einfluss auf die waldbauliche Planung. Allg Forst- Jagdztg 163: 164–170.
- BRANDL H (1989) Ergänzende Untersuchungen zur Ertragslage der Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche in Baden-Württemberg. Allg Forst- Jagdztg 164: 91–98.
- BRANDL S, FALK W, KLEMMT HJ, STRICKER G, BENDER A ET AL (2014) Possibilities and limitations of spatially explicit site index modelling for spruce based on national forest inventory data and digital maps of soil and climate in Bavaria (SE Germany). Forests 5: 2626–2646.
- CLASEN C, KNOKE T (2013) Site conditions have an impact on compensation payments for the loss of tree species in mixed forests. Forestry 86: 533–542.
- CUBBAGE F, MAC DONAGH P, SAWINSKI JÚNIOR J, RUBILAR R, DONOSO P ET AL (2007) Timber investment returns for selected plantations and native forests in South America and the Southern United States. New Forests 33: 237–255.
- 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.
- FALK W, HEMPELMANN N (2013) Species favourability shift in Europe due to climate change – a case study for *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. based on climate data ensemble. Int J Climatol. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/787250>
- FISCHER R, LORENZ M, KÖHL M, MUES V, GRANKE O ET AL (2010) The condition of forests in Europe. 2010 Executive Report. Hamburg: ICP Forests. 21 p.
- GRIESS VC, ACEVEDO R, HÄRTL F, STAUPENDAHL K, KNOKE T (2012) Does mixing tree species enhance stand resistance against natural hazards? A case study for spruce. For Ecol Manage 267: 284–296.
- HANEWINKEL M, CULLMANN DA, SCHELHAAS MJ, NABUURS GJ, ZIMMERMANN NE (2013) Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. Nat Clim Change 3: 203–207.
- HIJMANS RJ, CAMERON SE, PARRA JL, JONES PG, JARVIS A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Int J Climatol 25: 1965–1978.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ Press. 1535 p.
- IVERSON RL, PRASAD AM, MATTHEWS SN, PETERS M (2008) Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios. For Ecol Manage 254: 390–406.

- KNOKE T, WURM J (2006) Mixed forests and a flexible harvest policy: A problem for conventional risk analysis? *Eur J For Res* 125: 303–315.
- KÖLLING C, BEINHOFER B, HAHN A, KNOKE T (2010) «Wer streut, rutscht nicht». Wie soll die Forstwirtschaft auf neue Risiken im Klimawandel reagieren? *AFZ/Der Wald* 65 (5): 18–22.
- KÖLLING C, BINDER F, FALK W (2013) Risiko und Ertrag in ungewisser Zukunft: Der Klimawandel fordert die Generationengerechtigkeit heraus. *Freising: Bayer Landesanst Wald Forstwirtschaft, LWF Wissen* 72: 54–58.
- KÖLLING C, SCHMIDT O (2013) Die Lüge der Überlebenden. Wie unsere Urteile über Chancen und Risiken verzerrt werden können. *Freising: Bayer Landesanst Wald Forstwirtschaft, LWF aktuell* 96: 22–24.
- KÖLLING C, ZIMMERMANN L (2014) Klimawandel gestern und morgen. Neue Argumente können die Motivation zum Waldumbau erhöhen. *Freising: Bayer Landesanst Wald Forstwirtschaft, LWF aktuell* 99: 27–31.
- KROTH W (1983) Ökonomische Aspekte der Kiefernwirtschaft. *Forstwiss Cent.bl* 102: 36–50.
- MÄKELÄ A, LANDSBERG J, EK AR, BURK TE, TER-MIKAELIAN M ET AL (2000) Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiol* 20: 289–298.
- NEUNER S, ALBRECHT A, CULLMANN D, ENGELS F, GRIESS VC ET AL (2015) Survival of Norway spruce remains higher in mixed stands under a dryer and warmer climate. *Glob Chang Biol* 21: 935–946.
- NOTHDURFT A, WOLF T, RINGELER A, BÖHNER J, SABOROWSKI J (2012) Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. *For Ecol Manage* 279: 97–111.
- PRETZSCH H, BIBER P, SCHÜTZE G, UHL E, RÖTZER T (2014) Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nat Commun* 5: 4967.
- R CORE TEAM (2014) R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. www.R-project.org (7.9.2015).
- ROESSIGER J, GRIESS V C, KNOKE T (2011) May risk aversion lead to near-natural forestry? A simulation study. *Forestry* 84: 527–537.
- ROESSIGER J, GRIESS VC, HÄRTL F, CLASEN C, KNOKE T (2013) How economic performance of a stand increases due to decreased failure risk associated with the admixing of species. *Ecol Model* 255: 58–69.
- SEIDL R, RAMMER W, JÄGER D, LEXER MJ (2008) Impact of bark beetle (*Ips typographus* L.) disturbance on timber production and carbon sequestration in different management strategies under climate change. *For Ecol Manage* 256: 209–220.
- SHARPE WF (1964) Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk. *J Finance* 19: 425–442.
- SHARPE WF (1966) Mutual fund performance. *J Business* 39: 119–138.
- SHARPE WF (1994) The Sharpe ratio. *J Portfolio Manage* 21: 49–58.
- TAMIZ M, JONES D, ROMERO C (1998) Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. *Eur J Oper Res* 111: 569–581.

Productivité forestière et risque de cultivation dans un contexte climatique futur incertain

L'évolution des conditions climatiques due au changement climatique occasionne des modifications de la croissance et du risque naturel lors de la cultivation des essences forestières. Le résultat économique, en tant qu'important critère de décision au niveau de la gestion, est influencé de manière essentielle par la productivité naturelle et le risque. Cette étude présente un nouveau concept, dans lequel les développements futurs des revenus (potentiels) et des risques peuvent être estimés par l'utilisation de données suprarégionales. Pour cela, tout peuplement peut être placé dans un système de coordonnées «productivité-risque»; leur développement futur est représenté sous forme de trajectoire dans l'espace productivité-risque. Cette approche très analytique ne peut se substituer aux décisions entrepreneuriales, mais peut les faciliter et les rendre objectives. L'utilisation de principes économiques avérés tels que le principe de précaution ou de flexibilité se rajoute aux considérations de production et de risque et démontre les marges de manœuvre élargies d'une gestion de forêts mélangées stables et adaptées au climat.

Forest productivity and cultivation risk in an uncertain climate future

Changes in climate conditions will lead to strong yet uncertain changes concerning forest growth and cultivation risk. Economic success as an important criterion for management decisions depends on both aspects, natural yield and risk. This study presents a new concept how (potential) yield and risk can be estimated from large-scale inventory data. As a result, any stand can be plotted in a yield-risk coordinate system and its future yield expectancy can be described by a trajectory in the yield-risk space. This strictly analytical approach cannot take over silvicultural decisions, but facilitates them from an objective basis. The implementation of approved economic guidelines such as the caution principle or the principle of flexibility builds upon the yield-risk approach and demonstrates benefits of climate-adapted stable mixed forest silviculture.