



Robuste Optimierung der Bewirtschaftung von Mischbeständen

Mithilfe des hier vorgestellten Modells lassen sich sowohl die Mischungsanteile von drei Baumarten als auch die zeitliche Verteilung und Stärke der waldbaulichen Eingriffe auf Bestandesebene optimieren. Betrachtet werden Douglasie, Kiefer und Eiche. Ziel der Optimierung ist ein robustes finanzielles Ergebnis und gleichzeitig eine robuste Kohlenstoffspeicherung.

TEXT: JORGE CUEVA ORTIZ, ISABELLE JARISCH, MENGISTIE KINDU, BENJAMIN GANG, JONATHAN FIBICH, THOMAS KNOKE



Foto: J. Cueva Ortiz

Abb. 1: Hohe Wuchsleistungen bei guter Holzverwendbarkeit und moderatem Ausfallrisiko machen die Douglasie für viele Bewirtschafter zur attraktiven Baumartenoption.

Das Potenzial von Mischbeständen, Produktionsrisiken sowohl zu senken [1–3] als auch Wuchsleistungen zu steigern [4], ist in den letzten Jahrzehnten zunehmend Gegenstand forstlicher Forschung. Bislang fehlen allerdings weitgehend Modellansätze, welche Zusammensetzung und Bewirtschaftung von Mischbeständen mit mehr als zwei Baumarten auf der Bestandesebene optimieren können. In diesem Artikel stellen wir einen Ansatz vor, mit dem optimale Mischungsanteile unter Beachtung multipler Zielsetzungen sowie die Verteilung und Stärke von Verjüngungseingriffen abgeleitet werden können.

Studien zur Produktivität in gemischten Beständen berichten über Zuwachssteigerungen von 8 bis 20 % im

Schneller ÜBERBLICK

- » **Mischbestände stehen im Fokus der forstlichen Forschung**, Optimierungsansätze fehlen jedoch weitestgehend
- » **Die präsentierte Methode erlaubt die simultane, robuste Optimierung** von Baumartenanteilen und der zeitlichen Allokation von Nutzungseingriffen
- » **Mehrere Zielstellungen** können gleichrangig berücksichtigt werden
- » **Unter Einbeziehung ökonomischer und wachstumsfokussierter Indikatoren** dominiert in diesem Beispiel die Douglasie das Baumartenportfolio

Bestandesinformationen für vier Unsicherheitsszenarien

Tab. 1: Aggregierte Bestandesinformationen für vier Unsicherheitsszenarien (0 = keine Unsicherheit, 3 = große Unsicherheit). Der Shannon-Diversitätsindex misst die Diversität des jeweiligen Baumartenportfolios.

Unsicherheitsfaktor	Durchschnittlicher Vorrat [m ³ ha ⁻¹]			Durchschnittlicher C-Speicher [t ha ⁻¹]			Gesamt-Erntevolumen [m ³ ha ⁻¹]			Diversität (Shannon)
	Dgl	Ki	Ei	Dgl	Ki	Ei	Dgl	Ki	Ei	
0	418	6	13	120	1	2	998	14	15	2,05
1	412	5	14	119	1	2	993	13	13	2,05
2	380	12	18	111	3	4	906	28	28	2,34
3	169	36	61	58	10	10	477	92	81	3,35

Vergleich zu den Reinbeständen aus jeweils Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) [4]. Ebenso zeigt sich, dass Mischbestände aus Fichte (*Picea abies* L. Karst) und Buche eine geringere Ausfallwahrscheinlichkeit durch Kalamitäten aufzeigen [5]: In Mischung sind manche Nadelbaumarten resistenter gegen biotische und abiotische Störungen [1, 6, 7]. Weitere Studien haben gezeigt, dass sich durch die Beimischung von Laubholz in reine Nadelholzbestände das ökonomische Risiko signifikant reduzieren ließ [2].

Das Erreichen dieser Verbesserungen ist abhängig von der ökologischen Komplementarität der Baumarten und dem waldbaulichen Vorgehen [8] sowie von den gewählten Mischungsanteilen im Bestand [9]. Unser Optimierungsansatz konzentriert sich auf die beiden letztgenannten Aspekte: Wie sollte ein Mischbestand unter der Annahme ökologischer Komplementarität begründet und hinsichtlich der Mischungsanteile reguliert werden, um die betrachteten Zielkriterien unter unsicheren Umweltbedingungen bestmöglich zu erfüllen?

Methodik

Kern der Optimierung bildet ein robuster, multikriterieller Optimierungsansatz [10, 11]. Neben der Berücksichtigung mehrerer Zielkriterien gestattet dieser die Berücksichtigung von Unsicherheitsbereichen der verwendeten Indikatoren für die Zielkriterien: Die Optimierung für lediglich ein gewissermaßen als gesichert angesehenes, zukünftiges Szenario wird aufgegeben, stattdessen wird die Leistungsfähigkeit des Baumartenportfolios für mehrere mögliche Zukunftsszenarien optimiert. Der verwendete Ansatz ist damit robust gegenüber zukünftigen Schwankungen der verwendeten baumartenspezifischen Indikatoren; er garantiert - inner-

„Der Optimierungsansatz erlaubt die Ausgabe optimaler Artenzusammensetzungen für verschiedene Unsicherheitsszenarien, aus der Entsprechende ihrer Einstellung wählen können.“

JORGE CUEVA ORTIZ

halb des festgelegten Schwankungsbereichs - eine robuste Bereitstellung der berücksichtigten Ökosystemleistungen.

Ziel der Optimierung ist es, einen möglichst hohen Wert für jedes Zielkriterium zu erreichen. Zielkriterien werden hier durch die gleichrangigen Indikatoren Holzproduktion, Kohlenstoffspeicherung und Bodenertragswert (Kalkulationszins: 1,5 %) repräsentiert.

Dabei wird jedoch nicht der erwartete Indikatorwert, sondern der schlechteste angenommene Indikatorwert maximiert. Hierzu führt das Optimierungsprogramm eine optimale Zuweisung von Flächenanteilen zu den in Betracht gezogenen Baumarten und deren Verjüngungskohorten durch: Das Programm bestimmt für jeden Zeitschritt der Simulation die optimale Größe einer neu zu begründenden Verjüngungskohorte der einbezogenen Baumarten im Mischbestand, wobei es den jeweils pessimistischsten Indikatorwert maximiert. Die Summe der Flächenanteile der Verjüngungskohorten einer Baumart ergibt schließlich den Baumartenanteil.

Die waldbachstumskundliche Grundlage der Optimierung bilden baumartenspezifische Wachstumstabellen des Waldwachstumssimulators SILVA 2, wobei das Klimaszenario RCP 2.6 angenommen wurde. Holzpreise wurden in Abhängigkeit der Durchmesserklasse in Anlehnung an etablierte Verfahren [12] abgeleitet; die Berechnung der Kohlenstoffmengen erfolgte mittels etablierter Konversionsfaktoren [11].

Unsicherheit wird über Faktoren berücksichtigt (0-3). Je größer der Faktor gewählt wird, desto größer ist die vermutete Unsicherheit. Ein Faktor von 3 besagt beispielsweise, dass der pessimistische Indikatorwert um drei Standardabweichungen kleiner ist als der erwartete Indikatorwert. Im Falle der

Bodenertragswert in Abhängigkeit des Unsicherheitsniveaus

Tab. 2: Ökonomische Kennzahlen der Portfolios in Abhängigkeit vom angenommenen Unsicherheitsniveau

Unsicherheitsfaktor	Bodenertragswert [€ ha ⁻¹]	mittleres Gesamteinkommen [€ a ⁻¹ ha ⁻¹]
0	21.796	717,35
1	21.941	710,57
2	20.044	669,19
3	15.429	427,25



Douglasie werden zusätzlich 20 % Variationsbreite als Annahme für bisher unbekannte Unsicherheiten aufgeschlagen. Die Standardabweichung der Indikatoren wird anhand der berücksichtigten Überlebenswahrscheinlichkeiten abgeschätzt; weitere Details können den Originalpublikationen entnommen werden [10, 11]. Berücksichtigung finden drei Baumarten: Douglasie, Kiefer und Stieleiche. Als Entscheidungsvariablen stehen dem Algorithmus die jeweiligen Flächenanteile der genannten Baumarten bzw. von deren Verjüngungskohorten in den einzelnen Perioden zur Verfügung. Unsere Simulation bildet einen Zeitraum von 120 Jahren ab.

Ergebnisse

Abb. 2 zeigt die optimierte Baumartenverteilung für zunehmende Unsicherheit (0 steht für vollkommene Sicher-

heit, 3 bedeutet wie oben beschrieben, dass der pessimistische Indikatorwert um drei Standardabweichungen kleiner ist als der erwartete Indikatorwert). Deutlich wird ein zunehmender Diversifizierungseffekt bei steigender Unsicherheit: Während unter Sicherheit der Bestand von Douglasie dominiert wird (89 %) und Eiche wie Kiefer lediglich Nebenbaumarten bilden, sinkt der Douglasienanteil mit steigender angenehmer Unsicherheit ab. Mit 38 % bleibt der empfohlene Anteil der Douglasie jedoch auch unter großer Unsicherheit (Unsicherheitsfaktor = 3) auf hohem Niveau. Insgesamt empfiehlt das Optimierungsprogramm somit, die Bereitstellung der Ökosystemleistungen durch Diversifikation gegen die hohe Unsicherheit abzusichern. Aggregierte Werte für aufstockende Volumen, gespeicherten Kohlenstoff und Erntemengen können Tab. 1 entnommen wer-

den; diese enthält auch den sich aus der Baumartenzusammensetzung ergebenden Shannon-Index als Maß für die Diversität des Portfolios.

Betrachtet man die Entwicklung des stehenden Holzvolumens über den gesamten Simulationszeitraum jeweils entweder für die höchste Unsicherheitsannahme (Abb. 3b) unter Annahme von Sicherheit (Abb. 3a), so wird ein weiterer Aspekt der Diversifizierung erkennbar: Während unter Sicherheit rasch hohe Vorräte auf- und anschließend ebenso rasch abgebaut werden, empfiehlt die Optimierung unter Unsicherheit wesentlich geringere Holzvorräte.

Die analoge Betrachtung für den Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse zeichnet ein ähnliches Bild: Es wird weniger Kohlenstoff in der Periode mit maximalem Kohlenstoffspeicher akkumuliert, jedoch sind die Schwankungen des Kohlenstoffvorrates im Lauf der Zeit geringer als unter Annahmen von Sicherheit (Abb. 4a und b). In der Gesamtschau verschiebt sich das empfohlene Bewirtschaftungsregime weg von einer wenig diversifizierten, annähernd kahl-schlagsartigen Bewirtschaftung mit hoher Dominanz der Douglasie hin zu einem in der Tendenz plenterartigen Dauerwaldsystem mit relativ ausgewogenen Anteilen der drei Baumarten.

Der höchste Erwartungswert des Bodenertagswerts zeigt sich unter Ausschluss von Unsicherheit (Tab. 2). Dieser Erwartungswert fällt mit steigendem Unsicherheitsfaktor kontinuierlich ab. Die Abpufferung gegenüber steigender Unsicherheit, die den Douglasienanteil im Portfolio reduziert, erfordert somit eine Art „Versicherungsprämie“. Glei-

Optimierte Baumartenanteile in Abhängigkeit des Unsicherheitsfaktors

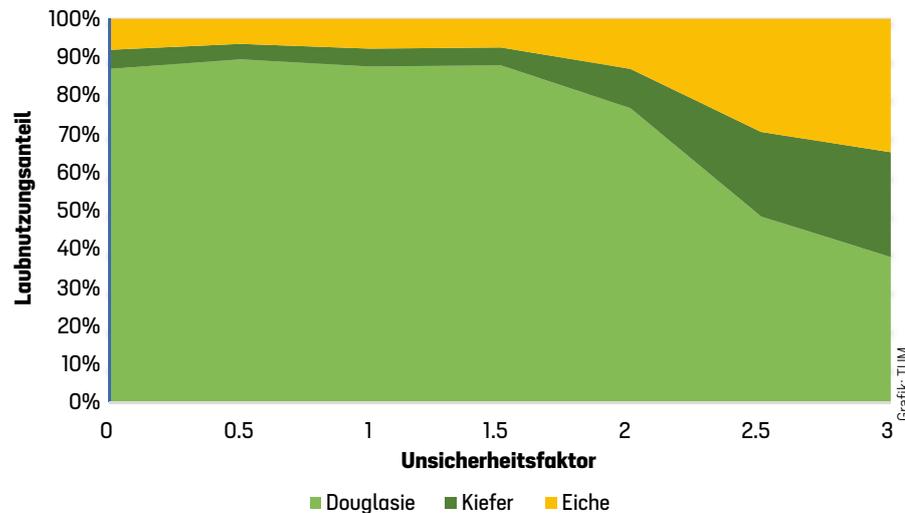


Abb. 2: Anteile von Douglasie, Kiefer und Eiche im optimierten Bestand, abhängig vom Unsicherheitsfaktor

Entwicklung der Holzmasse (ohne Unsicherheit)

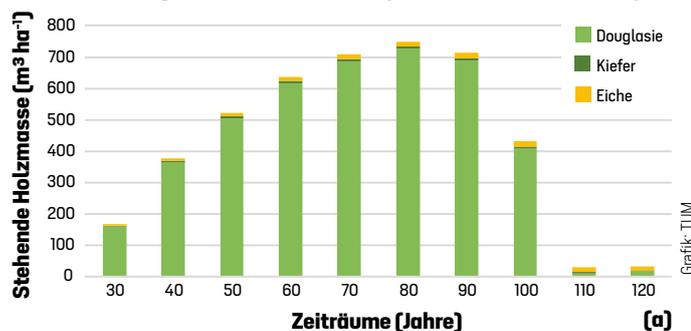


Abb. 3a: Entwicklung des stehenden Holzvolumens ohne Unsicherheitsbetrachtung: Hohe Vorräte werden rasch auf- und anschließend ebenso rasch abgebaut.

Entwicklung der Holzmasse (höchste Unsicherheit)

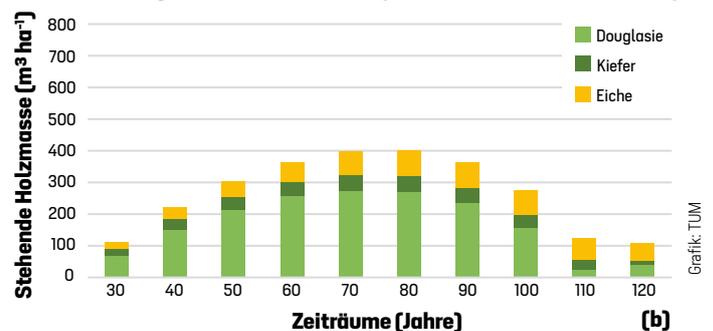


Abb. 3b: Entwicklung des stehenden Holzvolumens. Höchstes Unsicherheitsniveau: Die Optimierung empfiehlt wesentlich geringere Holzvorräte als bei 3a.

C-Speicher (ohne Unsicherheit)

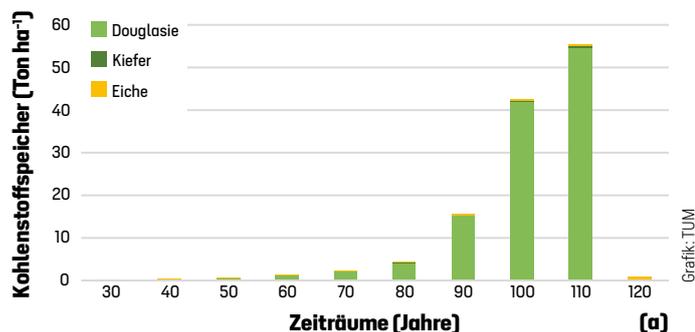


Abb. 4a: Kohlenstoffspeicher der oberirdischen Biomasse ohne Unsicherheitsbetrachtung: Es wird mehr Kohlenstoff in der Periode mit maximalem Kohlenstoffspeicher akkumuliert, die Schwankungen fallen höher aus.

C-Speicher (höchste Unsicherheit)

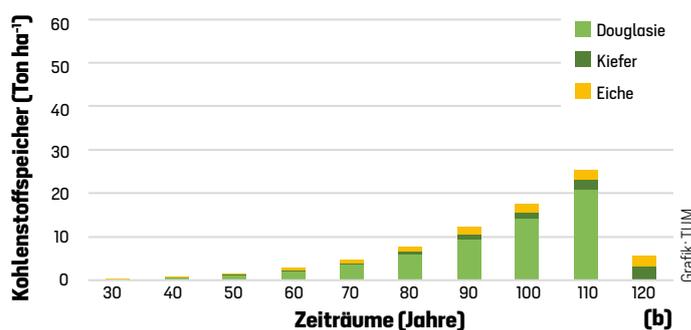


Abb. 4b: Kohlenstoffspeicher der oberirdischen Biomasse: Bei höchstem Unsicherheitsniveau wird weniger Kohlenstoff in der Periode mit maximalem Kohlenstoffspeicher akkumuliert, jedoch sind die Schwankungen geringer.

ches gilt bei zinsfreier Betrachtung des mittleren Gesamteinkommens.

Schlussfolgerungen und Diskussion

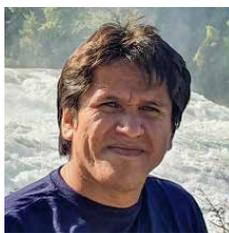
Der hier verwendete Ansatz robust-multi-kriterieller Optimierung gestattet nicht nur die Identifikation optimaler Baumartenanteile, sondern auch die Optimierung der zeitlichen Abfolge und der Größe der Verjüngungshiebe. Aus technischer Sicht sind insbesondere der geringe Rechenaufwand sowie der reduzierte Datenbedarf erwähnenswert, welche das beschriebene Verfahren auch für die praktische Anwendung interessant machen. Die Dominanz der Douglasie in sämtlichen Konstellationen ist im Wesentlichen eine Folge der verwendeten Indikatoren, welche vor allem von der Wuchsleistung beeinflusst werden. Die Wuchsleistung der Douglasie ist in unserem Falle extrem hoch. Daher haben wir noch einmal gesondert Unsicherheit insbesondere für die Douglasie berücksichtigt, um nicht ein zu optimistisches Bild zu zeichnen. Die Integration weiterer oder alternativer Indikatoren in den demonstrierten Ansatz ist ohne Weiteres möglich. Für praktische Anwendungen wäre eine Reduktion des Douglasien-Anteils durch geeignete Restriktionen eine einfache Methode, wobei bei derartigen Überlegungen stets Zielsetzung und Risikoeinstellung der Entscheidenden ausschlaggebend sein sollten. Für weitere forstplanerische Betrachtungen dieser Baumart, die auch Biodiversitätskriterien

Literaturhinweise:

Download des Literaturverzeichnisses in der digitalen Ausgabe von AFZ-DerWald (<https://www.digitalmagazin.de/marken/afz-derwald>) sowie unter: www.forstpraxis.de/downloads

explizit einschließt, verweisen wir auf den nebenstehenden Beitrag von Gang et al. Die Studie demonstriert die ökonomischen Vorteile sowie das hohe Kohlenstoffspeicherpotenzial der Douglasie, selbst unter einem gegenüber den übrigen Baumarten um 20 % erhöhten Unsicherheitsniveau. Douglasie stellt damit für Waldbesitzende nicht nur aus ökonomischer Sicht, sondern auch hinsichtlich der Kohlenstoffspeicherung eine attraktive Mischbaumart dar, was sich in der Praxis seit Längerem in steigenden Flächenanteilen niederschlägt [13]. Die hohe Ertragservartung [14–16] und die hohe klimatische Resistenz [3] geeigneter Herkünfte macht sie vielfach zu einer attraktiven Alternative zur Fichte, weshalb für die Zukunft steigende Flächenanteile vermutet werden können [13, 14].

Den skizzierten Vorteilen, die letztlich auch die Dominanz in den berechne-



Dr. Jorge Cueva Ortiz

jorge.cueva@tum.de

ist an der TU München wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Professuren für Waldinventur und nachhaltige Nutzung sowie für Waldwachstumskunde. **Isabelle Jarisch**, **Dr. Mengistie Kindu**, **Jonathan Fibich** und **Benjamin Gang** sind ebenfalls an der Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung tätig, welche von **Prof. Dr. Thomas Knoke** geleitet wird.

ten Portfolios erklärt, stehen selbstverständlich Risiken gegenüber, welche sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur unvollständig einschätzen lassen. Diese schließen etwa auch den Ko-Export problematischer Organismen ein, welche zu einem Anstieg des Ausfallrisikos führen könnten [15].

Wo der Wind weht, ist Erntezeit

Es liegt Zukunft in der Luft:

Sichern Sie sich langfristig lukrative Einnahmen durch Verpachtung oder Beteiligung. Unabhängig von Marktpreisen Wasser oder Wetter.

Tel: +49 5971-8608 49
mhladyk@cpc-germania.com



Wald, Weide, Acker...
Wir suchen Ihre Fläche



land-check.cpc-germania.com