



# Zur zukünftigen Rolle naturnaher Bestandestypen in Waldlandschaften

„Zukünftiges Bedauern minimieren“ – unter diesem Titel ließe sich ein neuartiges Optimierungsverfahren zusammenfassen, welches dazu genutzt werden kann, zukünftige Waldlandschaften unter Unsicherheit zu optimieren. Die beispielhafte Anwendung zeigt: Nicht immer können naturnahe, ungleichaltrige Mischbestände vielfältigen Zielsetzungen auf ganzer Linie gerecht werden. Die Einbeziehung gleichaltriger Bestände ist vielfach angezeigt, um die gestellten Anforderungen auf Landschaftsebene optimal zu erfüllen.

TEXT: JONATHAN FIBICH, ISABELLE JARISCH, KAI BÖDEKER, THOMAS KNOKE

**F**orstwirtschaft operiert unter erheblichen Unsicherheiten, welche sich allein schon aus den langen Produktionszeiten ergeben. Angesichts des fortschreitenden Klimawandels mit bestenfalls grob abschätzbaren Auswirkungen auf Standorts-Charakteristika, Anbau-Eignungen und Störungsdynamiken vergrößert sich dieser Unsicherheitsraum in absehbarer Zeit. In diesem Zusammenhang sind geeignete Planungsinstrumente gefragt, die idealerweise in der Lage sein sollten, diese Unsicherheiten zu integrieren und so negative Auswirkungen auf zukünftige Ökosystemleistungen im Rahmen des Möglichen zu minimieren.

## Minimierung künftigen Bedauerns

Planvolle Waldbewirtschaftung verfolgt mindestens ein, im Regelfall aber mehrere Ziele. Dazu zählen etwa die Sicherstellung eines Einkommens, die Schaffung eines Erholungswertes oder die Gewährleistung gewisser Schutzfunktionen. Die zukünftige Erfüllung dieser Ziele hängt außer von den gewählten Handlungs-Alternativen (etwa: welche Baumart oder welcher Bestandestyp, welche waldbaulichen Maßnahmen etc.) wesentlich vom eintretenden Umweltzustand ab. Umweltzustände werden z. B. durch sich ändernde Standortseigenschaften sowie die Wuchs- und Störungsdynamiken der Zukunft definiert und entziehen sich der Kontrolle der Waldbewirtschaftler. Anders als bei klassischen Risiko-Situationen (man denke in diesem Zusammenhang etwa an ein Roulette-

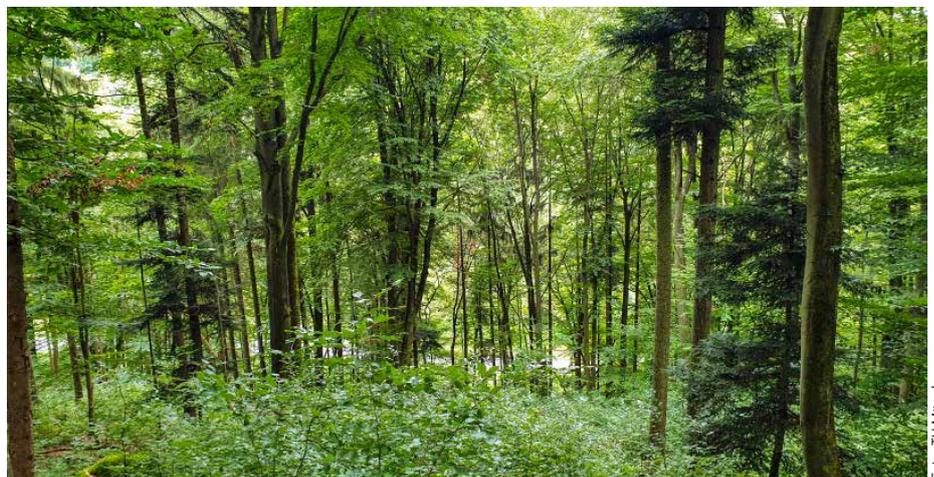


Foto: TU München

Abb. 1: Naturnahe, ungleichaltrige Mischbestände: Forstliches Optimum auf Landschaftsebene?

Spiel) ist es oft unmöglich, diesen zukünftigen Umweltzuständen Eintrittswahrscheinlichkeiten zuzuweisen: So wissen wir z. B. nicht, ob eine heute angelegte Kultur der Baumart X mit 80 % oder nur mit 20 % Wahrscheinlichkeit das Ende ihrer Umtriebszeit ungestört erreichen wird. Klassische Entscheidungskriterien für Risikosituationen sind damit für in der Waldbewirtschaftung häufig vorkommende Unsicherheitssituationen nicht anwendbar.

Als alternatives Entscheidungskriterium bietet sich stattdessen das „zukünftige Bedauern über die nicht gewählte Handlungsalternative“ an, welches konzeptionell auf der Niehans-Savage-Regel [4] aufbaut. Hierzu versetzt man sich in die Lage der Entscheidenden, unmittelbar nachdem die Konsequenzen der Entscheidung sichtbar werden: Stellt sich nun gewissermaßen in der Rückschau heraus, dass eine andere Handlungs-

alternative zu besseren Ergebnissen in Bezug auf die Zielsetzung geführt hätte, lässt sich die Differenz zwischen diesem Best-Case-Szenario und der tatsächlich gewählten Handlungsalternative als „Bedauern“ der Entscheidungsträger quantifizieren. Ziel der Entscheidenden sollte es demnach sein, das mögliche Bedauern zu antizipieren und folgerichtig jene Entscheidungsalternative zu wählen, die über alle möglichen zukünftigen Umweltzustände hinweg das geringste maximale Bedauern hervorruft.

Im Kontext einer unsicheren Zukunft ist „die Menge aller möglichen zukünftigen Umweltzustände“ natürlich ein nicht ganz unproblematisches Konzept, da in der Praxis verlässliche Abschätzungen zu optimistischen und pessimistischen Grenzen zukünftiger Entwicklungspfade meist ebenso fehlen wie die eingangs erwähnten Eintrittswahrscheinlichkeiten. Indem man die Größe des Unsicherheits-



raumes, den es bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen gilt, variabel gestaltet, kann man diese Problematik umgehen und gleichzeitig den Entscheidenden die Auswirkungen wachsender Unsicherheitsräume auf die optimale Entscheidung präsentieren. Ein pragmatischer Ansatz ist in diesem Zusammenhang die Skalierung empirischer, also historisch beobachteter Schwankungen: Wies beispielsweise der durchschnittliche Gesamtzuwachs (dGZ) einer Baumart in der Vergangenheit eine Standardabweichung von 3 Vfm/ha/a um seinen Mittelwert auf, könnte die untere Grenze seines Unsicherheitsraums geschätzt werden, indem man die zweifache Standardabweichung vom langfristigen Mittelwert abzieht. Schätzt man die Unsicherheit aus gutachterlicher Perspektive größer ein, etwa weil nur wenig lokale Erfahrungen mit der betreffenden Baumart vorliegen oder sich das Entscheidungsproblem weit in die Zukunft erstreckt, erhöht man den betreffenden Faktor.

In vielen forstlichen Kontexten sind Entscheidungsvariablen nicht binär (ja/nein) oder diskret (Option A/B/C), sondern kontinuierlich ausgeprägt: So wird mit Blick auf die Bestimmung optimaler Bestandes-Portfolios auf Landschaftsebene nicht der eine optimale Bestandestyp, sondern eine Kombination relativer Anteile verschiedener Typen gesucht. In diesem Fallbeispiel verteilt ein Opti-

## „Naturnahe, ungleichaltrige Mischbestandstypen nehmen im Optimum signifikante Anteile der Portfolios ein, dominieren dieses jedoch keineswegs.“

JONATHAN FIBICH

mierungsalgorithmus die Flächenanteile so, dass über alle Szenarien des Unsicherheitsraums hinweg die maximale Distanz (und mithin das maximale antizipierte Bedauern) zum Best-Case-Szenario minimiert wird. Eine Min-Max-Normalisierung gestattet in diesem Zusammenhang nicht nur die Einbeziehung verschiedener Indikatoren über verschiedene Skalen hinweg, sondern auch die Variation der Bewertungs-Richtung: Dies ermöglicht auch die Einbeziehung von Indikatoren mit gegenläufiger Präferenz („weniger ist besser“), wie es z. B. bei Kulturkosten oder dem Ausfall-Risiko der Fall ist. Weitere Details des Verfahrens werden in einem kürzlich erschienenen Preprint zum Thema beschrieben [1] und sind in den Veröffentlichungen Reith et al. [2] sowie Jarisch et al. [3] nachzulesen, in denen das Verfahren im Kontext (sub)tropischer Agroforst- und Landnutzungs-Systeme erprobt wurde.

### Bestandestypen und ihre Allokation als Anwendungsbeispiel

Im Folgenden soll das beschriebene Verfahren eingesetzt werden, um die optimale Zusammensetzung einer Waldlandschaft mit Blick auf verschiedene gesellschaftlich relevante Ökosystemleistungen zu ermitteln. Diese Zielsetzungen werden durch verschiedene Indikatoren repräsentiert. Ziel ist die Auswahl eines Portfolios aus Bestandestypen, das über alle Indikatoren und den gesamten Unsi-

cherheitsraum hinweg das eingangs beschriebene maximale Bedauern über die nicht gewählte Handlungsalternative minimiert. Hierzu stehen insgesamt acht Optionen zur Auswahl, welche gleichaltrig bewirtschaftete Rein- sowie ungleichaltrige und somit naturnähere Mischbestandstypen umfassen. Die Bestandestypen sowie die zugehörigen Indikatoren und ihre Werte können Tab. 1 und der Originalpublikation [1] entnommen werden.

Bereits mit Blick auf die Indikatoren wird eine wesentliche Stärke des verwendeten Ansatzes deutlich, der die Einbeziehung über verschiedene Skalen und Präferenz-Richtungen („mehr/weniger ist besser“) hinweg gestattet. Eine Vorab-Übertragung in ein einheitliches Referenzsystem, etwa eine ökonomische Bewertung aller nicht-monetärer Indikatoren mit den einhergehenden Unwägbarkeiten, ist nicht erforderlich.

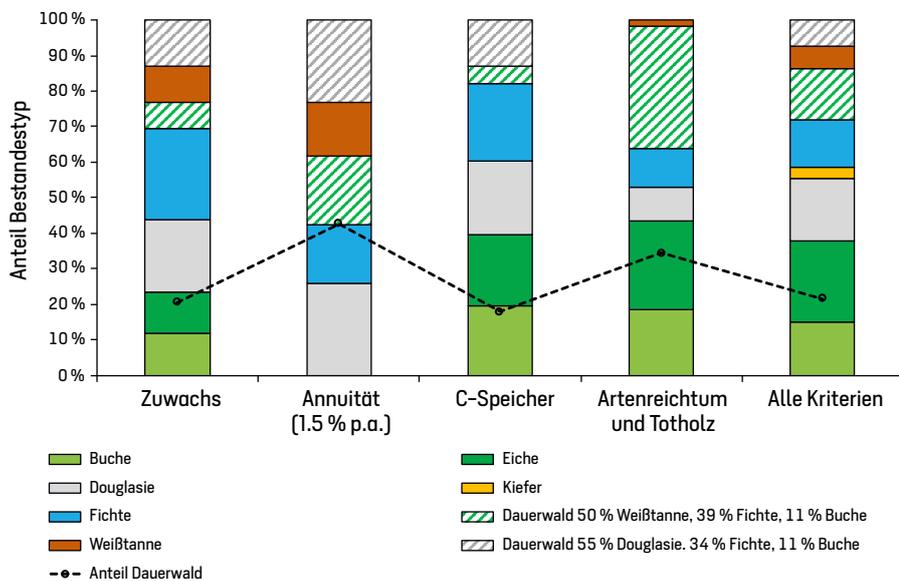
Führt man nun die Optimierung zunächst lediglich für einzelne Indikatoren bzw. für in sich ähnliche Indikatorgruppen durch, werden deutliche Schwerpunktsetzungen in den resultierenden Portfolios erkennbar. So wird beispielsweise das rein nach ökonomischen Gesichtspunkten optimierte Portfolio wenig überraschend von den produktiven Koniferen Douglasie, Fichte und Weißtanne, bzw. von durch sie dominierten Mischbeständen, gebildet (Abb. 2). Demgegenüber führt der Fokus auf Biodiversitäts-Indikatoren zu einem deutlichen Anstieg von Buchen- und Eichenbeständen. Gleichwohl ist in diesem Zusammenhang hervorzuheben, dass selbst diese auf ein einziges Ziel ausgerichteten Portfolios stets deutlich diversifiziert und keineswegs von einem einzigen Bestandestyp dominiert sind. Die angenommene Unsicherheit verhindert, dass sich ein Bestandestyp von den übrigen absetzen kann. Diversifizierung hilft also, negative Auswirkungen der Unsicherheit (und damit ein hohes relatives Bedauern) zu nivellieren, ähnlich wie bei Wertpapier-Portfolios.

Der Trend zur Diversifizierung verstärkt sich, wenn alle Indikatoren gleichrangig in die Optimierung einbezogen werden (Abb. 2, rechte Säule). Auch diese Beobachtung kann aus forstpraktischer Sicht nicht überraschen: Die Einbeziehung vieler, mitunter gegenläufiger Ziele innerhalb der gleichen Waldlandschaft zieht zwangsweise vielfältigere Zusammensetzungen nach sich.

## Schneller ÜBERBLICK

- » **Der fortschreitende Klimawandel erhöht die Unsicherheit, unter der forstplanerische Entscheidungen getroffen werden müssen**
- » **Der vorgestellte Ansatz ermöglicht die Optimierung von Portfolios, etwa von Ziel-Bestandesanteilen**
- » **Dabei können Unsicherheiten sowie verschiedene gleichrangige Zielstellungen berücksichtigt werden**
- » **Zusätzlich verdeutlichen Pareto-Kurven Synergien und Konflikte zwischen einzelnen Zielsetzungen**

## Zielkriterien und Indikatoren



**Abb. 2:** Die für einzelne Indikatoren bzw. Gruppen optimierten Portfolios sowie das Portfolio unter gleichrangiger Einbeziehung aller Zielkriterien bzw. Indikatoren

### Robuste Pareto-Kurven: Identifikation von Zielkonflikten

Außer zur vergleichenden Betrachtung einzelner Indikatoren kann der vorgestellte Ansatz auch zur Berechnung sogenannter Pareto-Kurven genutzt werden. Die Achsen der folgenden Darstellungen

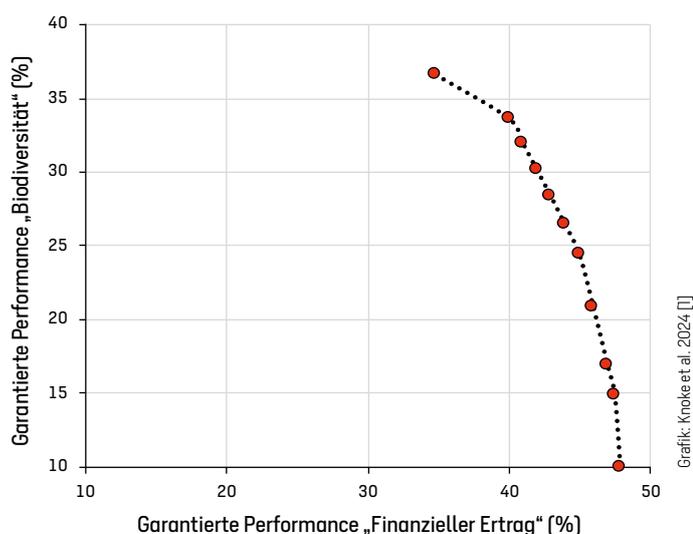
repräsentieren dabei den Erfüllungsgrad zweier Indikatoren bzw. Indikatorgruppen. Zunächst erfolgt die Optimierung mit ausschließlichem Fokus auf den Indikator der Y-Achse, im Falle der Abb. 3a etwa ausschließlich nach Biodiversitäts-Gesichtspunkten. Die Leistungsfähigkeit dieses Portfolios mit Blick auf die Indikator-

gruppe „Biodiversität“ wird auf der Y-Achse aufgetragen, der dabei gewissermaßen ungewollt im „Kielwasser“ erreichte Erfüllungsgrad des ökonomischen Indikators auf der X-Achse. Dessen geforderter Erfüllungsgrad kann unter Zuhilfenahme einer Restriktion schrittweise erhöht werden: Wiederholt man nach jeder Erhöhung des ökonomischen Anspruchsniveaus die Optimierung mit Fokus auf die Indikatorgruppe „Biodiversität“ und trägt wiederum die Leistungsfähigkeit entlang der X- und Y-Achse auf, ergibt sich ein gekrümmter Kurvenverlauf. Das Vorgehen ist mit externen, bindenden Vorgaben vergleichbar, die gegenüber dem fiktiven Forstbetrieb schrittweise erhöht werden und ihn so zu Abstrichen bei seiner eigentlichen Zielfunktion zwingen.

An ihren äußersten Punkten repräsentiert die Pareto-Kurve Portfolios, die ausschließlich mit Blick auf jeweils eine konkrete Zielsetzung (Biodiversität bzw. ökonomischer Ertrag) optimiert wurden. Das Kontinuum zwischen diesen Punkten repräsentiert dagegen undominierte Portfolios für gemischte Zielsetzungen unterschiedlicher Gewichtung. „Undominiert“ bedeutet, dass entlang dieser Pareto-effizienten Front kein Portfolio-Anteil verändert werden könnte, ohne den Erfüllungsgrad mindestens eines Indikators zu verschlechtern. Lösungen bzw. Portfolios

Grafik: Knoke et al. 2024 [1]

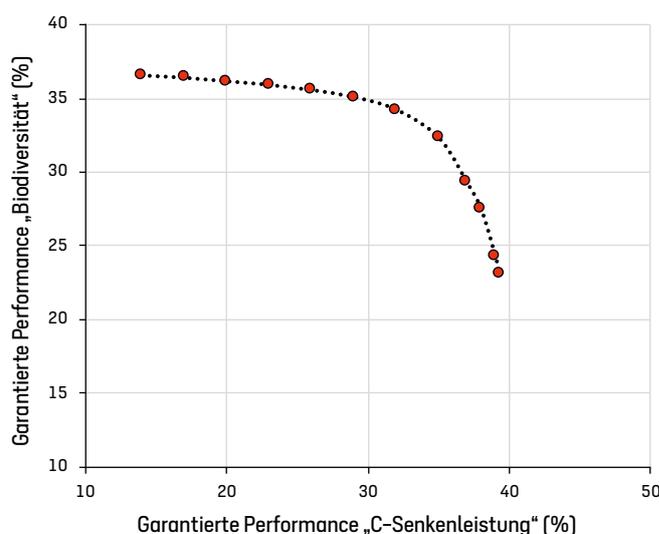
### Biodiversität vs. finanzieller Ertrag



Grafik: Knoke et al. 2024 [1]

**Abb. 3a:** Robuste Pareto-Kurven zur Identifikation von Zielkonflikten zwischen Biodiversität und Ökonomie. Mit der Biodiversität wird eine Kombination aus den Indikatoren „Artenreichtum“ und „Totholz-Zersetzungsrate“ beschrieben.

### Biodiversität vs. C-Senkenleistung



Grafik: Knoke et al. 2024 [1]

**Abb. 3b:** Robuste Pareto-Kurven zur Identifikation von Zielkonflikten zwischen Biodiversität und Kohlenstoff-Senkenwirkung. Mit der Biodiversität wird eine Kombination aus den Indikatoren „Artenreichtum“ und „Totholz-Zersetzungsrate“ beschrieben; Die C-Senkenleistung ist eine Kombination aus der „Oberirdischen Biomasse“ und der „C-Fixierungsrate“.



## Übersicht der Rein- und der Mischbestandstypen

**Tab. 1:** Verwendete Rein- und Mischbestandstypen, untersuchte Ökosystemleistungen und diese repräsentierende Indikatoren sowie verwendete Indikator-Werte einschließlich ihrer Standardabweichungen (in Klammern). Für Datenquellen und Herleitungen siehe Originalpublikation [1].

		Ökonomische Performance	Kohlenstoff-Senkenleistung		Biodiversität	
Indikator:		„Annuität (1,5 % p. a.)“	„Durchschnittlicher Volumenzuwachs“	„Durchschnittlicher oberirdischer C-Speicher“	„Anzahl assoziierter herbivorer Arten“	„Zersetzungsrate des Totholzes“
Einheit:		[€ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	[Vfm ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	[t ha <sup>-1</sup> ]	[n]	[g cm <sup>-3</sup> a <sup>-1</sup> ]
Bewertungsrichtung:		mehr ist besser	mehr ist besser	mehr ist besser	mehr ist besser	weniger ist besser
gleichaltrig	Buche	17 (3,9)	8,8 (2,0)	108 (25)	333 (53)	0,069 (0,043)
	Eiche				913 (227)	0,021 (0,021)
	Douglasie	195 (62)	11,9 (3,8)	84 (27)	33 (1)	0,002 (0,027)
	Kiefer	-38 (34)	7,0 (2,0)	47 (13)	410 (75)	0,015 (0,023)
	Fichte	136 (66)	8,5 (4,1)	53 (26)	353 (58)	0,035 (0,034)
	Weißtanne	124 (32)	8,7 (2,2)	63 (16)	207 (22)	0,02 (0,02)
ungleichaltrig	50 % Wta, 39 % Fi, 11 % Bu	128 (28)	8,0 (1,7)	76 (15)	278 (26)	0,031 (0,017)
	55 % Dgl, 34 % Fi, 11 % Bu	151 (39)	9,3 (2,3)	94 (24)	148 (17)	0,017 (0,02)

unterhalb dieser Linie sind in diesem Sinne ineffizient: Für ein jedes dieser Portfolios existiert mindestens ein weiteres, welches dieses hinsichtlich beider Erfüllungsgrade übertrifft. Oberhalb der Linie existieren keine gültigen Lösungen – dieser Teil des Lösungsraums ist unter der geltenden Zielfunktion, den einbezogenen Alternativen und den gesetzten Restriktionen nicht erreichbar.

Der Verlauf der Kurven gibt Aufschluss über Zielkonflikte zwischen den untersuchten Zielsetzungen bzw. über Synergien und/oder Trade-offs bei gleichzeitiger Verfolgung. Betrachtet man die Kurve, welche eine rein Biodiversitäts-orientierte Ausrichtung einer rein ökonomisch orientierten gegenüberstellt (Abb. 3a), so fällt zunächst auf, dass die Steigung und damit der Trade-off zwischen den Zielsetzungen keinesfalls über den gesamten Bereich hinweg konstant ist. Während ein moderates Anheben der ökonomischen Anforderungen zunächst nur geringe Verluste auf der Seite der Biodiversitäts-Indikatoren erfordert, kommt eine weitere Erhöhung der ökonomischen Leistungsfähigkeit dem Erfüllungsgrad der Biodiversität zunehmend teuer zu stehen. Die letzten Prozentpunkte ökonomischen Potenzials sind mit Blick auf die Biodiversität besonders fordernd: Eine Erhöhung des relativen Erfüllungs-Grades von 45 auf 47 % seitens der ökonomischen Zielsetzung ist

mit einem Abfall von 25 auf 10 % seitens der Biodiversität verbunden.

Weniger drastisch fallen die Zielkonflikte zwischen einer Orientierung an Biodiversität und Kohlenstoffspeicherung bzw. -fixierung aus (Abb. 3b). Zu Beginn verläuft die Kurve nahezu horizontal: Steigende Anforderungen an die Kohlenstoff-Senkenleistung des Waldes (ohne Beachtung der Speicher- und Substitutionswirkungen nach der Holznutzung) vertragen sich zunächst überaus gut mit den verwendeten Biodiversitäts-Indikatoren. Erst die letzten Erhöhungen von ca. 35 bis 39 % Erfüllungsgrad seitens der Senkenleistung fordern merklich Biodiversität ein: Die Trade-offs verlaufen folglich nicht konstant, sondern steigen jenseits eines kritischen Erfüllungsgrads der Senkenleistung sprunghaft an.

### Diskussion

Vor dem Hintergrund vielfältiger, mitunter gegenläufiger Anforderungen an bewirtschaftete Waldökosysteme und zunehmender Unsicherheiten ist der vorgestellte Ansatz geeignet, Licht ins Dunkel durch komplexer Wechselwirkungen von Zielsetzungen zu bringen – seien diese gesellschaftspolitisch oder betrieblich bedingt. Zwei wesentliche Stärken kennzeichnen dabei das Verfahren: Zum einen die relative Sparsamkeit in Bezug auf

nötige Input-Daten, zum anderen die Möglichkeit, kontinuierliche Anteile zu optimieren, anstatt lediglich aus diskreten Alternativen auszuwählen.

Die Vorteile der Datensparsamkeit liegen dabei auf der Hand: Lediglich die Werte geeigneter Indikatoren und ihrer jeweiligen Standardabweichungen sind zur Durchführung erforderlich; Werte also, für die vielfach Anhalte aus betrieblichen Daten oder der Literatur gewonnen werden können. Die unterstellten Unsicherheitsräume sind zudem, etwa je nach persönlicher Einstellung der oder des Entscheidenden oder des betroffenen Zeithorizonts, individuell anpassbar. Die Optimierung kontinuierlicher Anteile ist ebenfalls nützlich, wird doch in forstlichen Kontexten selten nach der einen überlegenen Option, etwa der Baumart, dem Bestandestyp usw., gesucht, sondern schon aus Gründen der Risikostreuung nach Portfolios bzw. Mischungen ebendieser.

Die Pareto-Kurven gestatten die detaillierte Betrachtung verschiedener Indikator-Bündel und aller sich aus ihnen ergebenden Gewichtungskombinationen: Synergien werden ebenso deutlich wie Zielkonflikte und kritische Punkte, ab denen Letztere unverkennbar auf bestimmte Zielgrößen durchschlagen. Während zwischen einigen Ökosystemleistungen weitreichende Synergien bestehen, wobei eine durchaus weitgehend im „Kiel-

wasser“ der anderen bereitgestellt werden kann (vgl. z. B. C-Senkenleistung vs. Biodiversität, Abb. 3b), sind bei anderen Paarungen wesentliche Abstriche bei der einen oder der anderen Zielsetzung erforderlich – zumindest, wenn man wie in dieser Studie die Bereitstellung auf Landschaftsebene aggregiert.

#### Literaturhinweise:

[1] KNOKE, T.; BIBER, P.; SCHULA, T.; FIBICH, J.; GANG, B. (2024): *Minimising the Relative Regret of Future Forest Landscape Compositions: The Role of Close-to-Nature Stand Types*, <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4789086>.

[2] REITH, E.; GOSLING, E.; KNOKE, T.; PAUL, C. (2022): *Exploring trade-offs in agro-ecological landscapes: Using a multi-objective land-use allocation model to support agroforestry research*. *Basic and Applied Ecology* 64, 103-19.

[3] JARISCH, I.; BÖDEKER, K.; BINGHAM, L. R.; FRIEDRICH, S.; KINDU, M.; KNOKE, T. (2022): *The influence of discounting ecosystem services in robust multi-objective optimization – An application to a forestry-avocado land-use portfolio*. *Forest Policy and Economics* 141 102761.

[4] SAVAGE, L. J. (1951): *The Theory of Statistical Decision*. *Journal of the American Statistical Association* 46, 55-67.

Betrachtet man die Portfolios in Abb. 2, welche für die einzelnen Indikatoren bzw. für eine gleich gewichtete Mischung aus allen (rechts) optimiert wurden, fällt ein weiterer Aspekt auf: Explizit naturnahe, ungleichaltrige Mischbestandstypen (gestreift) machen je nach Zielfunktion nur zwischen 20 und 40 % der jeweiligen Portfolios aus. Sie verdrängen also unter den getroffenen Annahmen bei Weitem nicht die einfachen Reinbestandssysteme, für die jeweils feste Umtriebszeiten angenommen wurden. Der Grund liegt in der hohen Spezialisierung dieser einfachen Reinbestandstypen. Die ungleichaltrigen Mischbestände erzielen über viele Indikatoren hinweg akzeptable Werte bei moderaten Schwankungen (Tab. 1). Demgegenüber weisen viele der Reinbestandstypen markantere Profile mit dezidierten Stärken auf, so beispielsweise die Eichen-Reinbestände mit überragenden Werten innerhalb der Biodiversitäts-Indikatoren. Auf diese spezialisierten Bestandestypen kann nicht vollständig verzichtet werden, wenn auf Landschaftsebene das Optimum erreicht werden soll. Der bisweilen pauschal nega-

tive Ruf gleichaltriger Reinbestände mit meist großräumigen Kronenraum-Öffnungen im Rahmen von Endnutzungsmaßnahmen ist vor diesem Hintergrund kritisch zu hinterfragen – auch mit Blick auf aktuelle Gesetzgebungsverfahren.



#### Jonathan Fibich

[jonathan.fibich@tum.de](mailto:jonathan.fibich@tum.de)

forscht an der Professur für Waldinventur und Forstplanung der TU München, welche von **Prof. Dr. Thomas Knoke** geleitet wird, zu Fragestellungen von Resilienz und Wildverbiss. **Isabelle Jarisch** und **Kai Bödeker** sind ebenfalls wissenschaftlich an der Professur tätig.

Anzeige



## ZIELE SETZEN – BÄUME FÄLLEN.

Mit FOVEA, dem Partner der palos Plattform, können Sie Holzpolter einfach und übersichtlich digitalisieren.

Finden Sie noch heute heraus, was alles möglich ist:  
[palos-platform.com](https://palos-platform.com)