

# Simulation verschiedener Waldumbauszenarien im Bergmischwald und deren Effekte auf verschiedene Waldfunktionen

---

*T. Hilmers<sup>1)</sup>, P. Biber<sup>1)</sup>, Th. Knoke<sup>2)</sup>, H. Pretzsch<sup>1)</sup>*

*<sup>1)</sup> Lehrstuhl f. Waldwachstumskunde, TU München*

*<sup>2)</sup> Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung, TU München*

## Zusammenfassung

Der Klimawandel beeinträchtigt aufgrund der Höhenzonierung im Besonderen die Vitalität von Bergwäldern. Um aber die Ökosystemdienstleistungen derselben auch in Zukunft zu gewährleisten, wird eine Überführung in naturnahe Dauerwälder mit ausgewogenen Alters- und Baumartenmischungen vielerorts diskutiert. Der vorliegende Beitrag zeigt, wie Simulationsmodelle zur Entwicklung von Überführungskonzepten beitragen können. Am Beispiel von Fichtenbeständen in den Bayerischen Flyschvorbergen wurden solche Umwandlungen in naturnahe Bergmischwälder mit Hilfe modellgestützter Szenarioanalysen demonstriert. Zu diesem Zweck wurde der Einzelbaumsimulator SILVA durch die Module „Verjüngung“ (Pflanzungen und natürliche Verjüngung), „waldbauliche Behandlungskonzepte“ (bspw. Loch-, Femel-, Schirmhieb) und „Erschließungsmöglichkeiten“ (z.B. Seilkran und Seiltrassen) ergänzt. Auf Grundlage forstlicher Inventurdaten wurden charakteristische Fichtenreinbestände konstruiert die den Ausgangszustand für die Simulation bildeten. Da besonders die Verjüngungsphasen ausschlaggebende Informationen für die Waldumbaukonzepte beinhalten, wurden die Szenarioanalysen über eine Zeitspanne von 150 Jahren angelegt. Die Ergebnisse wurden in Bezug auf Produktivität, Stabilität, Ökonomie, Biodiversität und Kohlenstoff-Sequestration hin ausgewertet. Insgesamt wurden 7 verschiedene Szenarien analysiert. Fünf der sieben analysierten Szenarien sind für einen Waldumbau geeignet. Vier Szenarien erreichen einen „steady state“ in Bezug auf laufender Zuwachs und Vorrat über einen langen Zeitraum. Diese Tatsache lässt vermuten, dass diese Szenarien geeignet sind, den Waldumbau auch langfristig sicher zu stellen. Ergebnisse der multikriteriellen Analyse lassen die Aufteilung der sieben Szenarien in drei Gruppen zu. Während die Nullvariante in nur einer Kategorie (Biodiversität) die vergleichsweise besten Ergebnisse liefert, zeigen drei andere Szenarien vergleichsweise gute Ergebnisse in mehreren Kategorien und schlechte in anderen Kategorien. Drei Szenarien zeigen in allen Kategorien vergleichsweise gute Ergebnisse. Durch die multikriterielle Analyse war es möglich die waldbaulichen Möglichkeiten solcher hochkomplexen Wälder differenziert zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen den Nutzen von räumlich explizit aufgelösten Einzelbaumsimulatoren für die Entwicklung von waldbaulichen Pflege Richtlinien für die Forstwirtschaft.

## 1 Einleitung

Bergmischwälder (500-1400m Höhe) machen neben Buchenwäldern den größten (potenziellen) Anteil an natürlichen Wäldern in Südmitteleuropa aus (MONING & MÜLLER 2008). Allein in Deutschland deckt dieser Waldtyp ca. 32.000 km<sup>2</sup> ab (EL KATEB et al. 2004). In Bayern bestehen etwa 10 % der gesamten Waldfläche aus Bergwald. Da die Fichte äußerst produktiv ist, ersetzt sie in Zentraleuropa vielerorts die natürlichen Standorte von Bergmischwäldern. Allerdings sind diese sekundären Reinbestände aus Fichte anfällig gegenüber Insekten und Krankheitserregern (e.g. KLIMO, HAGER & KULHAVÝ 2000) was durch ein wärmeres und möglicherweise trockeneres Klima (e.g., MATULLA et al. 2002; LEXER et al. 2002) noch begünstigt wird. Hinzukommt, dass sich der wiederholte Anbau von Fichtenreinbeständen negativ auf die Bodenfruchtbarkeit auswirkt (SEIDL et al. 2007). Um diesen Problemen zu begegnen, werden alternative Bewirtschaftungsmethoden intensiv diskutiert (e.g., REININGER 2000; SPIECKER et al. 2004). Eine mögliche Option um die Bestandesstabilität und –resilienz gegenüber abiotischen und biotischen Störfaktoren zu verbessern sowie die Produktivität zu steigern, ist der Umbau von Fichtenreinbeständen in standortgerechte (Berg)Mischwälder (z.B. SPIECKER et al. 2004; PRETZSCH, FORRESTER & BAUHUS 2017, vgl.

Abb. 1). Vor diesem Hintergrund wurde von den Bayerischen Staatsforsten AÖR (BaySF) eine neue Pfliegerichtlinie zur Bewirtschaftung von Berg(misch)wäldern erarbeitet (BAYERISCHE STAATSFORSTEN AÖR, in Arbeit). Da jedoch kaum existierende Praxisbeispiele dieser neuen Pfliegerichtlinie vorhanden sind, dienten Simulationen mit SILVA als unterstützendes Werkzeug zur Erarbeitung dieser neuen Richtlinie. Die Simulationsergebnisse liefern belastbare Ergebnisse zur Evaluierung der neuen Pfliegerichtlinie. Neben den neu entwickelten Waldbausystemen der BaySF sollten aber noch weitere Waldbausysteme (Lochhieb, Streifenkahlschlag) multikriteriell miteinander verglichen und analysiert werden. Neben zahlreichen Studien zu ökonomischen Belangen eines Waldumbaus (HANEWINKEL 2001; KNOKE et al. 2008), untersuchten wir in einem ganzheitlichen Ansatz die nutzungsbedingten Auswirkungen des Waldumbaus auf den Lebensraumkomplex der Bergmischwälder. Je nach Managementziel können unterschiedliche Bewirtschaftungsoptionen in Bergmischwäldern praktiziert werden. In diesem Sinne widmet sich der vorliegende Beitrag einer multikriteriellen Analyse verschiedener Waldumbausysteme (vgl. Tabelle 2) sekundärer Fichtenbestände unter Berücksichtigung der Kriterien Waldwachstum, Ökonomie, Biodiversität, Stabilität und Kohlenstoffspeicher.

Leitfragen:

- 1) Ist ein Waldumbau in naturnahe Dauerwälder mit ausgewogenen Alters- und Baumartenmischungen mit den dargestellten Szenarien möglich?
- 2) Sind die untersuchten Bewirtschaftungsverfahren geeignet den Waldumbau langfristig zu sichern?
- 3) Wie unterscheiden sich die Szenarien in Bezug auf Produktivität, Kohlenstoffspeicher, Ökonomie, Biodiversität und Stabilität?

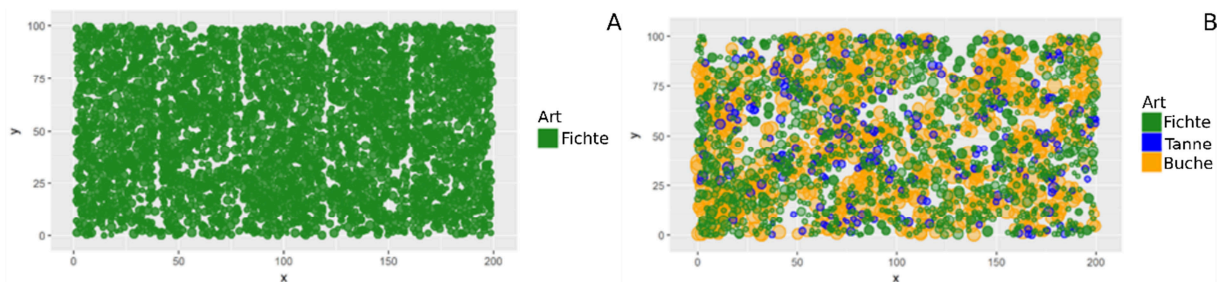


Abbildung 1: Kronenkarten eines sekundären Reinbestands aus Fichte (A) und eines naturnahen Bergmischwalds aus Fichte, Tanne und Buche (B)

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Simulation der Behandlungskonzepte

Die von den Bayerischen Staatsforsten AÖR (BaySF) entwickelte Pfliegerichtlinie zur Bewirtschaftung von Berg(misch)wäldern (BAYERISCHE STAATSFORSTEN AÖR, in Arbeit) hat zum Ziel, Fichtenreinbestände in Bergwaldlagen in naturnahe Dauerwälder mit ausgewogenen Alters- und Baumartenmischungen umzuwandeln. In diesem Verfahren werden im Zuge der ersten Durchforstungsphase im Wachstumsstadium (Förderung von ca. 100 Bäumen/ha) Seiltrassen in einem Abstand von ca. 40 m angelegt. In der folgenden Durchforstung werden in jeder zweiten Trasse Verjüngungsschlitze (Vgl. Abbildung 3) mit einer Breite von ca. 8-15m und einer Länge von 20 – 40 m angelegt. Nach der vollständigen bzw. teilweisen Entnahme der Altbäume in den Verjüngungsschlitzen wird die Naturverjüngung bzw. Pflanzung eingeleitet. Nach etwa 20 Jahren folgt die Anlage weiterer Verjüngungsschlitze, sowie die Nachlichtung über der Verjüngung und eine mäßige Strukturpflege bzw. Zielstärkennutzung im Zwischenfeld. Neue Verjüngungsschlitze sowie die Bearbeitung und die Behandlung des Zwischenfeldes werden nach demselben Verfahren auf den jeweilig versetzten Seillinien angelegt. Die Versetzung der Seillinien stellt si-

cher, dass diese über einen langen Zeitraum genutzt werden können. Ähnlich dem Lochhiebverfahren wo durch das wechseln der Seiltrassen eine langfristige Nutzung derselben sichergestellt wird. Um die von der BaySF entwickelten Behandlungskonzepte (BAYERISCHE STAATSFORSTEN AÖR, in Arbeit) zu validieren, wurde die multikriterielle Analyse auch auf die konventionellen Bewirtschaftungsmethoden wie Streifenkahlschlag und Lochhieb (MOSANDL 1984) angewendet (Tabelle 2 und Abbildung 3). Den Ausgangspunkt für die Simulation der unterschiedlichen Bewirtschaftungskonzepte (Tab. 2) bildeten insgesamt 30, in ihrer Struktur verschiedene, mit dem Strukturgenerator STRUGEN (PRETZSCH 1997) generierte Fichtenreinbestände, deren Daten auf forstlichen Inventurdaten der bayerischen Staatsforsten basierten. Alle Bestände umfassten je 2 ha mit einem Alter von 30 bis 40 Jahren auf Standorten der „Oberbayerischen Flyschvorpalen“ (800-1200 m ü. N. N., gute Standortbedingungen, vgl. Tab. 1 und Abb. 2). Alle Modellrechnungen zur Bestandsentwicklung und Holzmengenproduktion wurden mit dem Waldwachstumsmodell SILVA 2.3 (Pretzsch, Biber & Ďurský 2002) modelliert. Da besonders die Verjüngungsphase ausschlaggebende Informationen für die Waldumbaukonzepte liefert, beinhaltet SILVA zusätzlich ein Verjüngungsmodul (BIBER 2004). Zudem wurden die Szenarioanalysen über eine Zeitspanne von 150 Jahren angelegt. Somit kann die Entwicklung eines gesamten Bestandzyklus simuliert werden. Darüber hinaus wurden für die vorliegende Analyse noch die Module „waldbauliche Behandlungskonzepte“ (bspw. Loch-, Femel-, Schirmhieb) und „Erschließungsmöglichkeiten“ (z.B. Seilkran und Seiltrassen) ergänzt. Die Ergebnisse zur Holzsortierung wurden mit dem Programm SorSim (LEMM, HOLM & THEES 2013) berechnet. Die Anlage von Seiltrassen, Femellöchern und Pflanzung basiert auf Berechnungen mit der Software R (R CORE TEAM 2016). Die gespeicherten Kohlenstoffmengen in Holzprodukten sowie die Substitution des gespeicherten Kohlenstoffs durch die energetische Nutzung von Biomasse wurden mit einem Harvested Wood Products Model (HWP) von KLEIN et al. (2013) berechnet. Schließlich wurde für die Zusammenfassung aller Ergebnisse erneut R (R CORE TEAM 2016) verwendet.

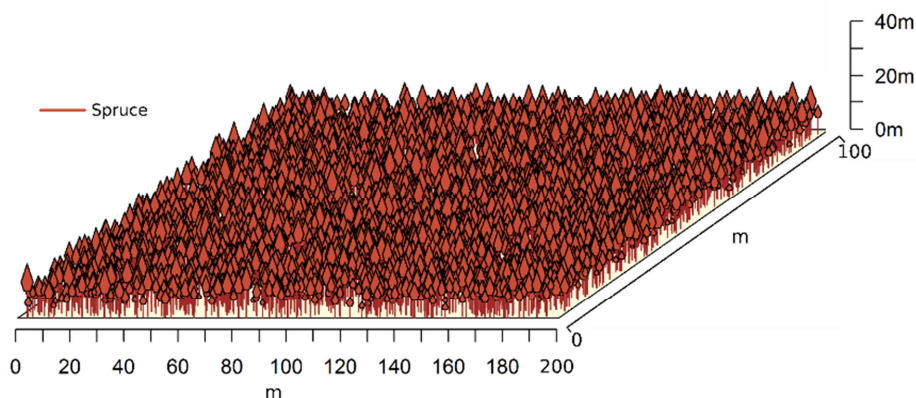


Abbildung 2: Beispiel eines mit dem Strukturgenerator STRUGEN (PRETZSCH 1997) generierten Initialbestandes auf Grundlage von Inventurdaten der Bayerischen Staatsforsten AÖR. Standort: Oberbayerische Flyschvorpalen. Höhenlage 1000m ü.NN.

Tabelle 1: Waldwachstumskundliche Kennzahlen eines Simulationsbestandes. N: Anzahl Bäume; hg: Höhe des Grundflächenmittelstammes; dg: Grundfläche des Grundflächenmittelstammes; H100: Oberhöhe der 100 stärksten Bäume; G: Grundfläche; V: Vorrat.

Art	Alter	N	hg	dg	H100	G	V
	Jahre	n/ha	m	cm	m	m <sup>2</sup> /ha	m <sup>3</sup> /ha
Fichte	30	2628	12,23	12,64	16,12	33	181,68

Tabelle 2: Simulationsszenarien, deren Kurzbeschreibung und Quellen für detaillierte Informationen der simulierten Waldumbauszenarien.

Szenario	Kurzbeschreibung	Verjüngung	Quelle
Null	Keine Behandlung	Nvj.	
Schlitz_Nvj	Räumung von schlitzartigen Femeln (B: 15m, L: 30m). Wechsel der Seiltrassen im 20 Jahre Intervall. Erster Eingriff im Alter von 35 Jahren.	Nvj	Bayerische Staatsforsten AÖR (in Arbeit)
Schlitz_Pfl	Räumung von schlitzartigen Femeln (B: 15m, L: 30m). Wechsel der Seiltrassen im 20 Jahre Intervall. Erster Eingriff im Alter von 35 Jahren.	Pfl. in Schlitzten + Nvj	Bayerische Staatsforsten AÖR (in Arbeit)
Schirm_Nvj	Teilweise Räumung von schlitzartigen Femeln (B: 30, L:25). Wechsel der Seiltrassen im 20 Jahre Intervall. Erster Eingriff im Alter von 35 Jahren.	Nvj	Bayerische Staatsforsten AÖR (in Arbeit)
Schirm_Pfl	Teilweise Räumung von schlitzartigen Femeln (B: 30, L:25). Wechsel der Seiltrassen im 20 Jahre Intervall. Erster Eingriff im Alter von 35 Jahren.	Pfl. unter Schirm in Femeln + Nvj	Bayerische Staatsforsten AÖR (in Arbeit)
Streifenkahlschlag	Streifenweise Räumung des Bestandes. Streifenbreite 30m, Abstand zwischen den Streifen 120m, erste Eingriff im Alter 80, Intervall zwischen Eingriffen 20 Jahre.	Nvj	
Lochhieb	Räumung von Löchern mit einem Radius von 30m. Wechsel der Seiltrassen im 20 Jahre Intervall. Erster Eingriff im Alter von 35 Jahren. Anschließend Streifenweise Räumung des Bestandes.	Pfl. in Löchern + Nvj	MOSANDL (1984)

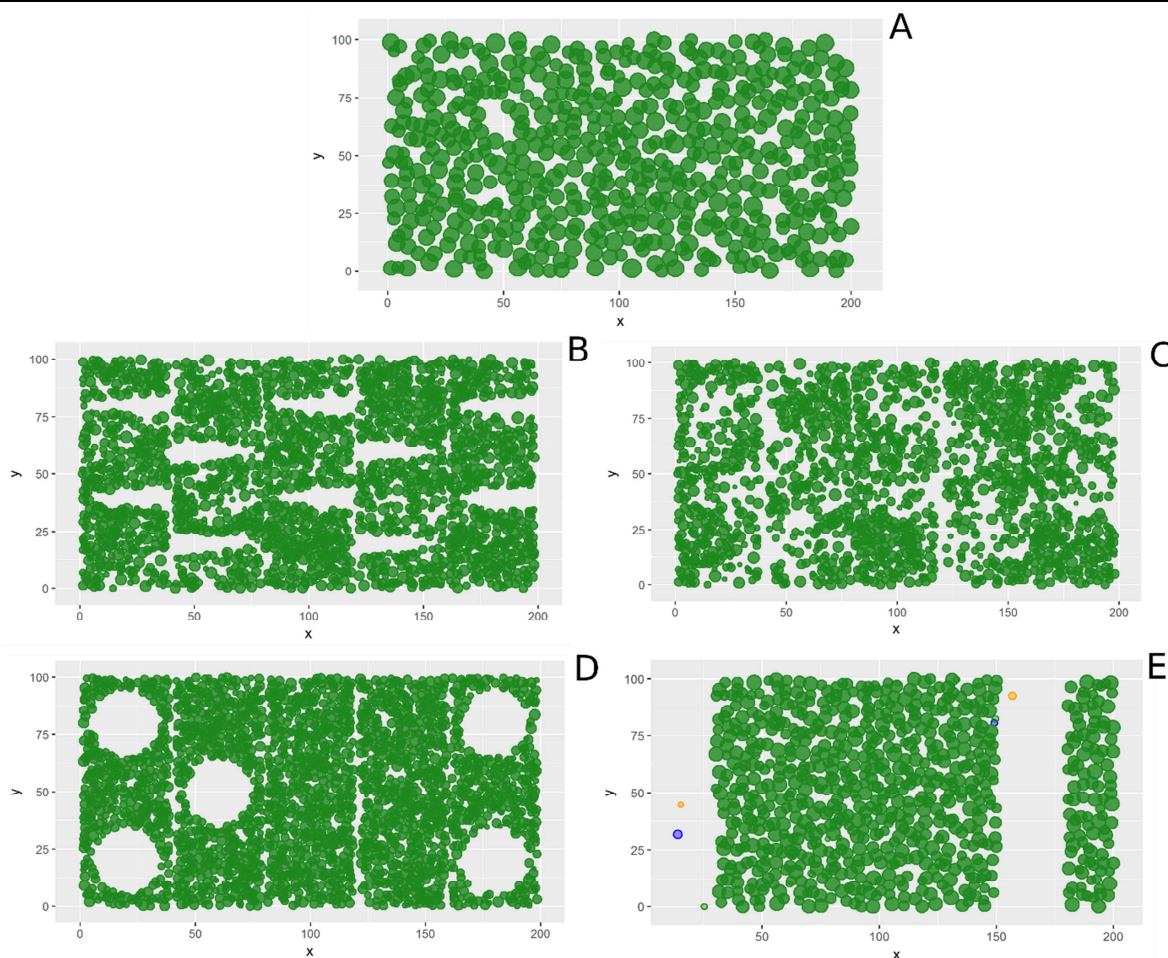


Abbildung 3: Kronenkarten der Waldumbauszenarien. A: Nullvariante; B: Schlitzverfahren; C: Schirmverfahren; D: Lochhiebverfahren; E: Streifenkahlschlagverfahren. Vgl. Tabelle 2 für detaillierte Informationen.

## 2.2 Multikriterielle Analyse

Um die Szenarioanalysen aller Behandlungskonzepte (Tab. 2) hinsichtlich verschiedener Bewirtschaftungsziele differenziert diskutieren zu können, wurden fünf Kriterien festgelegt. Anhand derer die Ergebnisse jedes Behandlungskonzepts normalisiert (beste:1, schlechteste: 0) dargestellt werden. Jedes Kriterium setzt sich wiederum aus verschiedenen Faktoren zusammen (vgl. Tab. 3). Schließlich ist jedes Behandlungskonzept das Ergebnis der aufsummierten Punktzahl aus den Kriterien Ökonomie, Kohlenstoffspeicher, Biodiversität (Artendichte), Stabilität der Fichte sowie Waldwachstum. Um ein Maß der Stabilität zwischen den Kategorien anzugeben, wurde zudem die Standardabweichung für jedes Waldumbauszenario ermittelt.

*Tabelle 3: Übersicht über die zum Vergleich der verschiedenen Waldumbauszenarien festgelegten Kategorien sowie deren Faktoren. Jeder Faktor ging ohne Gewichtung in die Bewertung der jeweiligen Kategorie ein.*

Kriterium	Ökonomie (Barwert)	Ökologie (Artendichte)	Kohlenstoffspeicher	Waldwachstum	Stabilität
1 %		Flora	In situ + Speicher in	GWL	Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichten * po-
2 %		Fauna	Holzprodukten +	Mortalität	tentielles Schadholz
3 %		Fungi	Substitution fossiler Brennstoffe	Standardabweichung der Baumhöhen	Fichtenanteil in der letzten Simulationsperiode

## 2.3 Ökonomie/Barwert

Der ausscheidende Bestand wurde, ohne den Totholzanteil, nach jeder Simulationsperiode mit Hilfe von SorSim (LEMM et al. 2013) sortiert. Die Erlöse wurden mithilfe von gemittelten Holzpreisen, bereitgestellt von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), aus den Jahren 2010-2015 berechnet. Die Erntekosten wurden mit 48 €/m<sup>3</sup>, die Pflanzkosten mit 1600 €/ha für Fichte, mit 2700 €/ha für Tanne sowie mit 6400 €/ha für Buche kalkuliert. Die Berechnung des Barwertes ist mit drei verschiedenen Zinsfüßen: 1%, 2% und 3 % in die multikriterielle Analyse eingegangen. Die Ergebnisse sind einschließlich des potenziellen Liquidationswertes des Bestandes am Ende des Simulationszeitraums dargestellt.

## 2.4 Kohlenstoffspeicherung

Um die gespeicherten in situ Kohlenstoffmengen der Simulationsergebnisse abzubilden, wurde sowohl die oberirdische Biomasse anhand von artspezifischen Biomasseformeln (PRETZSCH et al. 2014) als auch die unterirdische Biomasse mit einem Wurfelfaktor (root/shoot) nach OFFENTHALER & HOCHBICHLER (2006) geschätzt. Die ex situ Kohlenstoffmenge in Holzprodukten als auch die Substitutionsmengen infolge stofflicher und fossiler Brennstoffsubstitution durch Bioenergie aus dem Wald wurden mit Hilfe eines Harvested Wood Products Model (HWP) von KLEIN et al. (2013) berechnet.

## 2.5 Biodiversität/Artenvielfalt

Bereits seit längerem wird intensiv über die Vereinbarkeit der Ziele von Waldwachstum, Holzproduktion, Kohlenstoffspeicherung und des Schutzes der Biodiversität diskutiert (z.B. MATTHEWS, O'CONNOR & PLANTINGA 2002; HUSTON & MARLAND 2003; CAPARRÓS & JACQUEMONT 2003; BOSCOLO & VINCENT 2003). Daher wurden als Beispiel für eine Nichtholzwaldfunktion die Artendichten von (i) Flora, (ii) Fauna und (iii) Fungi als Indikatoren ausgewählt.

Um die Artendichten von Flora, Fauna und Fungi zu ermitteln, wurde jeder der 30 Bestände in 12,5 x 12,5 m große Raster eingeteilt. Jedes Raster wurde anschließend nach einem Flussdiagramm von ZENNER et al. (2016) einer von 9 Waldentwicklungsphase (Lücke, Verjüngung, Etablierung, frühe Optimal-

phase, mittlere Optimalphase, späte Optimalphase, Plenter, Terminal und Zerfall) zugeordnet. Schließlich konnten auf Grundlage der Ergebnisse von HILMERS et al. (in Arbeit) die Artendichten von Flora, Fauna und Fungi den einzelnen Waldentwicklungsstadien zugeordnet werden. Um die zeitliche Komponente mit einzubeziehen wurden gleitende Mittelwerte an fünf verschiedenen Simulationszeitpunkten ( $25 \pm 10$ ,  $50 \pm 10$ ,  $75 \pm 10$ ,  $100 \pm 10$  und  $125 \pm 10$  Jahre) berechnet. Jeder der fünf Werte floss ohne Gewichtung mit in die multikriterielle Analyse ein.

## 2.6 Stabilität

Die Berechnungen der Bestandsstabilität gegenüber Wind und Kalamitäten wurden anhand eines von ROESSIGER et al. (2013) entworfenen Modells berechnet. Hierin wird in einem Mischbestand die Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte mittels einer Weibullfunktion (WEIBULL 1951) in Abhängigkeit vom Fichtenanteil und Alter berechnet. Überlebenswahrscheinlichkeiten der Buche und Tanne wurde als unabhängig vom Fichtenanteil in einem Bestand angenommen.

Mit Hilfe des gleitenden Mittelwertes wurden die Überlebenswahrscheinlichkeiten an 5 verschiedenen Simulationszeitpunkten (s.o.) berechnet. Sie flossen dann als eigene Faktoren ohne Gewichtung mit in die Bewertung ein. Ferner wurde der Flächenanteil der Fichten in der letzten Simulationsperiode als ein weiterer Faktor herangezogen. Grund dafür war die Annahme, dass die Bestände zum Ende der Simulation entweder wegen des jungen Alters der Fichten stabil sein können, oder wegen eines geringen Fichtenanteils. Da diejenigen Bestände mit hohem Fichtenanteil und jungem Alter in Zukunft wieder instabil werden, wurden diejenigen Bestände mit geringerem Fichtenanteil als besser bewertet.

## 2.7 Waldwachstum

Das Kriterium Waldwachstum setzt sich aus den Faktoren Gesamtwuchsleistung, Mortalität über den gesamten Simulationszeitraum und aus der Standardabweichung der Baumhöhen als Proxy für einen Unterstand im Falle einer Störung zusammen. Standardabweichungen wurden auch wieder über ein gleitendes Mittel an fünf verschiedenen Simulationszeitpunkten berechnet (s.o.).

## 2.8 Validierung der Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse der sechs Behandlungskonzepte sowie der Nullvariante wurden schließlich mit Daten von langfristigen Versuchsflächen des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde (TUM) validiert.

# 3 Ergebnisse

Grundsätzlich eignen sich bis auf die Verfahren Streifenkahlschlag und Nullvariante alle Verfahren für den Waldumbau in naturnahe Dauerwälder mit ausgewogenen Alters- und Baumartenmischungen. Im Streifenkahlschlagverfahren ist zwar immer wieder natürliche Verjüngung von Buche und Tanne vorhanden, in der weiteren Entwicklung der Bestände dominiert aber die Fichte das Waldbild. In der Nullvariante läuft keine bzw. nur sehr wenig Naturverjüngung auf (Abbildung 4). Unterschiede zwischen Schirm-, Schlitz und Lochhiebverfahren zeigen sich hinsichtlich ihrer einzelnen Kriterien (Abbildung 7).

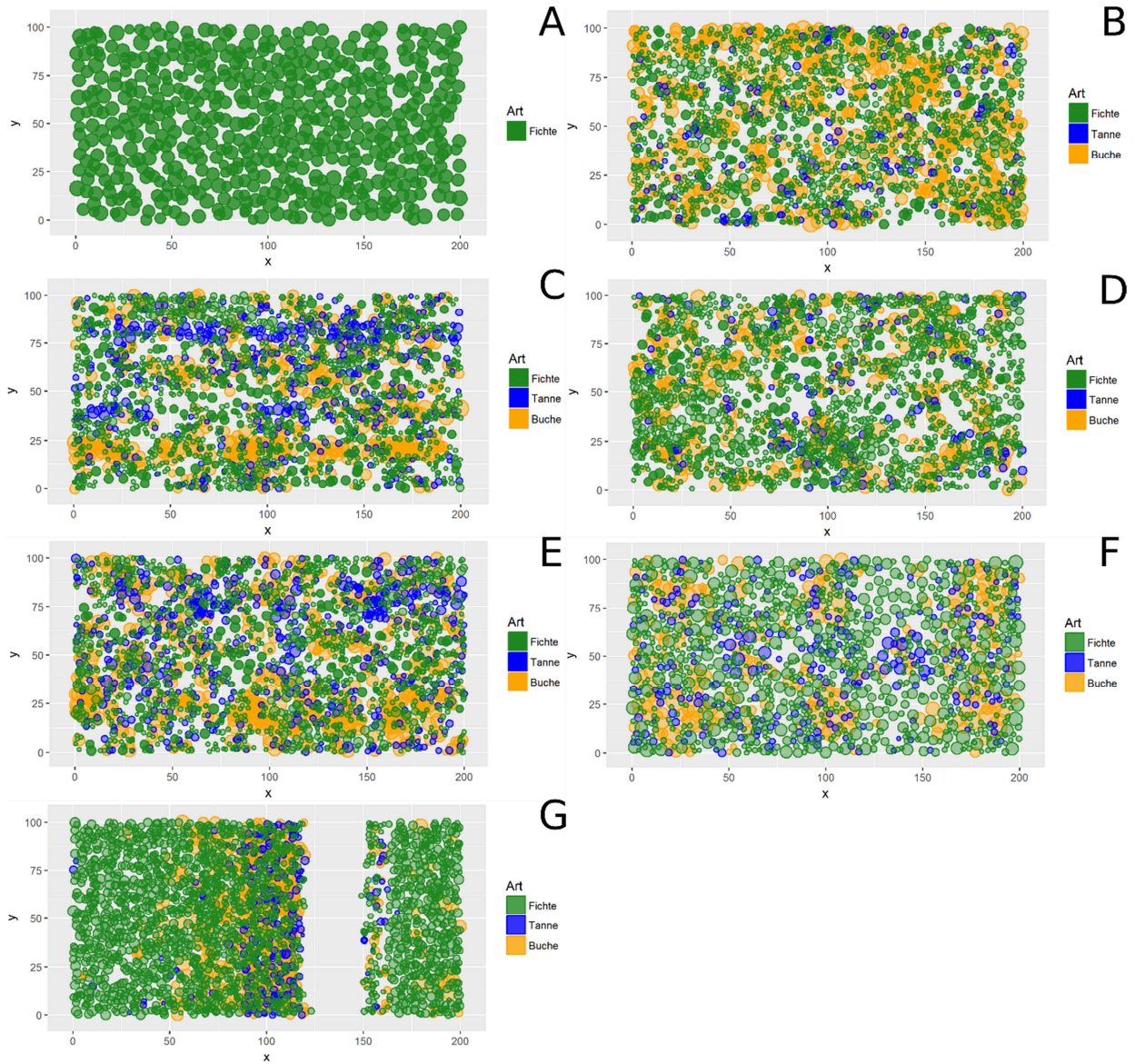


Abbildung 4: Kronenkarten der verschiedenen Waldumbauszenarien in der letzten Simulationsperiode. A: Nullvariante; B: Schlitzverfahren mit Naturverjüngung; C: Schlitzverfahren mit Pflanzung von Tanne und Buche; D: Schirmverfahren mit Naturverjüngung; E: Schirmverfahren mit Pflanzung von Tanne und Buche; F: Lochhiebverfahren mit Pflanzung von Tanne und Buche; G: Streifenkahlschlagverfahren mit Naturverjüngung.

### 3.1 Waldwachstum

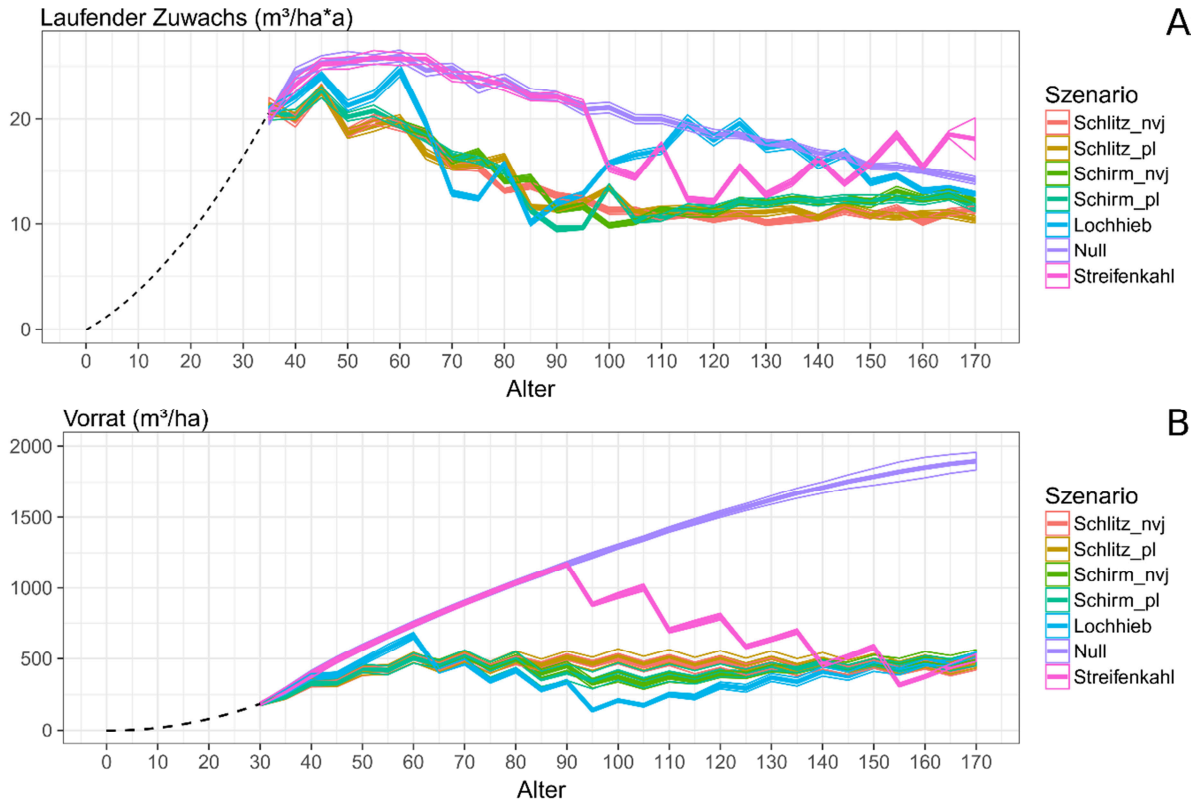


Abbildung 5: Laufender Zuwachs (A) und Vorrat (B) mit Standardfehlern über dem Bestandesalter. Gestrichelte Linien zeigen nicht simulierte Werte.

Der laufende Zuwachs der Schlitz- und Schirmhiebverfahren stabilisiert sich ab einem Bestandesalter von circa 80 Jahren auf einen Wert von ca. 10 m³/ha\*a und bildet bis zum Ende der Simulation einen Steady State. Der laufende Zuwachs des Nullszenarios liegt auf Grund hoher Dichten innerhalb der Bestände über den gesamten Simulationszeitraum über den anderen Szenarien. Beim Vorrat und laufenden Zuwachs ähnelt das Streifenkahlschlagszenario dem des Nullszenarios bis zum Zeitpunkt des ersten Eingriffs.

Die Vorräte der Bestände in den Schlitz- und Schirmhiebverfahren pendeln sich rasch zwischen 400 und 500 Vorratsfestmetern ein. Das Lochhiebverfahren zeigt analog zum Vorrat auch beim laufenden Zuwachs die größten Schwankungen.

### 3.2 Validierung der Simulationsergebnisse

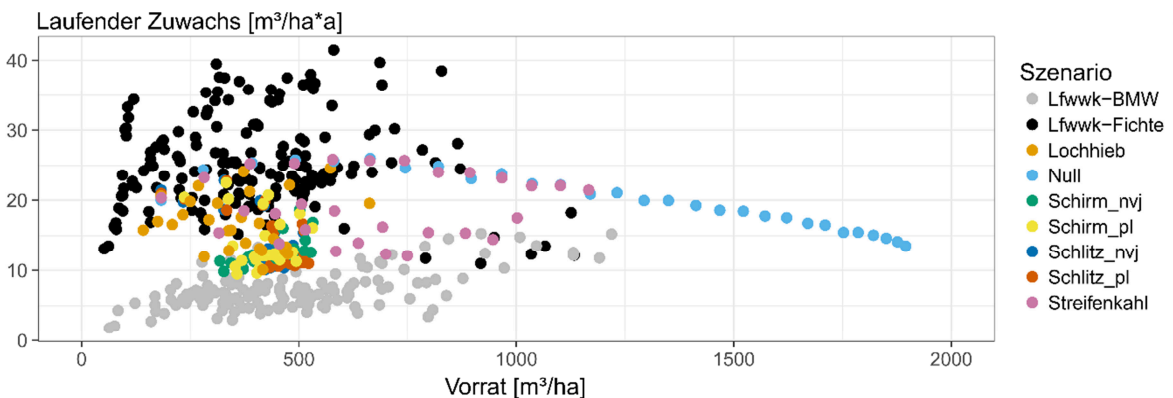


Abbildung 6: Darstellung des laufenden Zuwaches über dem Vorrat (verbleibender Bestand). Schwarze Punkte zeigen Ergebnisse von langfristigen Versuchsflächen des Lehrstuhl für Waldwachstumskunde (TUM) aus reiner Fichte; graue Punkte zeigen Ergbnisse aus langfristigen Versuchsflächen aus Fichte, Tanne und Buche. Farbige punkte zeigen die Simulationsergebnisse der verschiedenen Waldumbauszenarien (Erläuterung Tabelle 2).



Abbildung 6 zeigt den laufenden Zuwachs über dem Vorrat des verbleibenden Bestands jeder Simulationsperiode. Die Ergebnisse der Nullvariante zeigen, dass Versuchsflächen aus reiner Fichte (schwarz) bei gleichem Vorrat höhere Zuwächse zeigen als Versuchsflächen aus der Bergmischwaldzone (Fichte, Tanne, Buche) (grau). Die Ergebnisse aus den Simulationen liegen für alle Varianten zwischen den Ergebnissen der langfristigen Versuchsflächen.

### 3.3 Multikriterielle Analyse

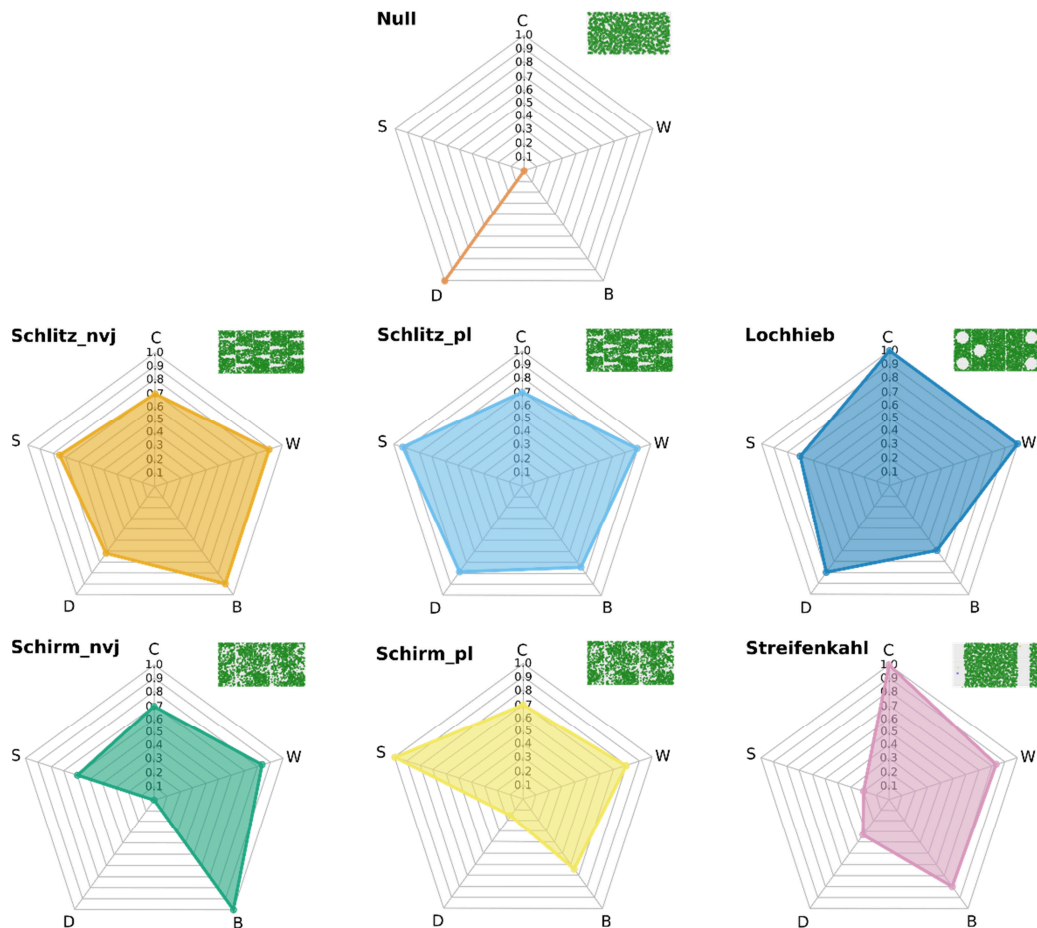


Abbildung 7: Radarchart der multikriteriellen Analyse. C: Carbon-Sequestration; W: Waldwachstum; B: Barwert; D: Artendichte; S: Stabilität. Dargestellt sind die normalisierten Ergebnisse der jeweiligen Faktoren eines jeden Kriteriums (Erläuterung siehe Tabelle 3). Die Ergebnisse wurden zwischen 0 und 1 normalisiert. Mit 1 bewertete Ergebnisse repräsentieren das beste Szenario im Vergleich zu den anderen Szenarien. Mit 0 bewertete Kategorien zeigen das schlechteste Verfahren.

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der multikriteriellen Analyse im Hinblick auf die einzelnen Behandlungskonzepte dargestellt. Die Nullvariante zeigt in der Kategorie Biodiversität das beste Ergebnis während dasselbe Behandlungskonzept in den übrigen Kategorien von allen anderen am schlechtesten abschneidet. Die Verfahren Schlitz mit Naturverjüngung, Schlitz Pflanzung und Lochhieb zeigen in allen Kategorien ebene Ergebnisse. Die Ergebnisse der Behandlungskonzepte Schirm mit Naturverjüngung, Schirm Pflanzung und Streifenkahh zeigen hingegen divergierende Ergebnisse zwischen den Kategorien. Zur Darstellung der Divergenz aller Kriterien innerhalb eines Behandlungskonzepts, wurde die Standardabweichung jedes Szenarios zwischen den Kategorien berechnet. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse. Die Analyse ermöglicht den direkten Vergleich der einzelnen Behandlungskonzepte anhand der Gesamtpunktzahl. So können solche Szenarien wie die Schlitzverfahren mit einer hohen Gesamtpunktzahl und einer geringen Standardabweichungen zwischen den Punktzahlen als stabil bezeichnet werden. Die Schirm-Verfahren zeigen eine relativ hohe Gesamtpunktzahl, allerdings zulasten einer höheren Standardabweichung.

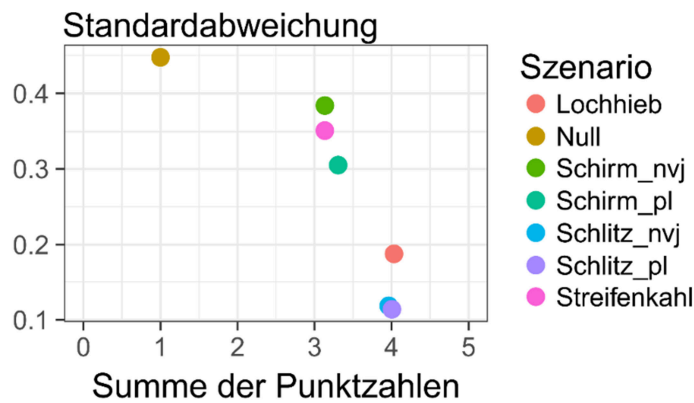


Abbildung 8: Standardabweichung der Punktezahlen aus den fünf Kategorien (Ökonomie, Ökologie, Kohlenstoffspeicher, Stabilität und Waldwachstum) über der Summe der Punktzahlen.

## 4 Diskussion

### 4.1 Waldumbau

Der Waldumbau kann, bis auf die Null- und Streifenkahlschlagvariante, mit fünf der sieben Szenarien verwirklicht werden (Abbildung 4). Auf Grund von künstlichen Störungen wie Schirm-, Schlitz oder Lochhieb können die neu eingebrachten Arten (Buche, Tanne) durch Pflanzung oder Naturverjüngung etabliert werden. Im Streifenkahlschlagverfahren folgt der Entnahme aller Bäume des Streifens zwar immer wieder natürliche Verjüngung von Buche und Tanne (Abbildung 4), doch ist die Störfläche zu groß als das sich die neuen Arten etablieren könnten. Bei diesem Verfahren müssten früh nach aufkommen der Verjüngung Eingriffe in der Verjüngung stattfinden um die Etablierung von Buche und der Tanne sicher zu stellen. Diese Eingriffe können jedoch nicht mit SILVA abgebildet werden. Im Nullverfahren bleibt der Bestand bis zum Ende der Simulation dicht und es kommt keine Naturverjüngung auf. Jedoch sind in Bergwaldlagen größere natürliche Störereignisse zu erwarten und das partielle Auflaufen von Naturverjüngung anderer Arten realistisch. Auch solche natürlichen Störereignisse können in SILVA nicht abgebildet werden. Diese natürlichen Störereignisse beeinflussen auch den laufenden Zuwachs sowie den Vorrat der Bestände. Die Evaluierung der Simulationsergebnisse mit langfristigen Versuchsflächen des Lehrstuhl für Waldwachstumskunde (TUM, Abbildung 6) zeigt, dass der Zuwachs realer Versuchsflächendaten aus Fichte, Tanne und Buche bei gleichem Vorrat geringer ausfällt als der laufende Zuwachs der Simulationsergebnisse. Das ist allerdings dahingehend zu relativieren als das der Fichtenanteil der Simulationsflächen höher ist und Störereignisse wie Wind und Borkenkäferbefall für Bergwaldlagen nur unzureichend durch SILVA dargestellt werden können. Letzterer ist vermutlich auch der Grund dafür, dass die Vorräte in der Nullvariante Werte von knapp 2000 Vfm/ha (Abbildung 5) erreichen. Vergleichende Ergebnisse von unbehandelten Versuchsflächen des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde aus reiner Fichte zeigen maximale Vorräte von ca. 1600 Vfm/ha. Zwar sind auch die Ergebnisse der anderen Simulationsszenarien mit dieser Verzerrung behaftet, doch sind die Ergebnisse untereinander vergleichbar, da die Verzerrung systematisch auftritt.

### 4.2 Langfristige Sicherung des Waldumbau

Die Schlitz- und Schirmhiebverfahren erreichen relativ schnell einen Zustand der Dauerleistung (steady state, Abbildung 5) und erhalten diesen bis zum Ende der Simulationen. Diese Verfahren sind demnach in Bezug auf Artenzusammensetzung und Waldwachstum relativ stabil. Auch langfristig betrachtet werden die Baumartenzusammensetzungen infolge der Schlitz- und Schirmhiebverfahren stabil bleiben und den angestrebten Waldumbau langfristig sicherstellen. Auch das Lochhiebverfahren lässt eine langfris-

tige Sicherung des waldumbau vermuten. Zwar ist dieses Verfahren in Bezug auf Zuwachs und Vorrats weniger stabil über den gesamten simulationszeitraum, dennoch wird durch dieses Verfahren eine ausgewogene Baumartenmischung und Altersstruktur erreicht.

### 4.3 Multikriterielle Analyse

Die Ergebnisse der multikriteriellen Analyse (Abbildung 7, Abbildung 8) lassen die Trennung der sieben Szenarien in drei Gruppen zu. Die Nullvariante erreicht lediglich in der Kategorie Biodiversität die höchste Punktzahl. Die Schirmhieb- und das Streifenkahlschlagverfahren zeigen stark divergierende Punktzahlen während die Schlitz- und Lochhiebverfahren in allen Kategorien hohe Punktzahlen erreichten. Anhand der vorliegenden Ergebnisse können die determinierenden Auswirkungen der unterschiedlichen Waldbaukonzepte sichtbar gemacht werden. Auch solcher, denen aufgrund der Konzeptneuheiten noch keine empirischen Studien oder praktische Erfahrungen zugrunde gelegt werden konnten. Zwar ist die hier präsentierte multikriterielle Analyse wegweisend für eine ganzheitliche Betrachtung waldbaulicher Konzepte, doch sollte der Gesamtkomplex Wald nicht auf die hier beschriebenen Kriterien reduziert werden. Je mehr Kriterien bei der multikriteriellen Analyse berücksichtigt werden, desto differenzierter können die Ergebnisse evaluiert werden.

## 5 Schlussfolgerung

Neue Richtlinien zur Bewirtschaftung von Bergmischwäldern können nicht allein von Simulationen eines Wachstumsmodells abgeleitet werden. Simulationen sind stets eine vereinfachte Darstellung der Wirklichkeit. So berücksichtigen die vorliegenden Simulationsergebnisse bspw. keine Schadereignisse wie Wind, Käfer oder Schnee. Auch Holzqualitäten, wie Stammformen oder Schäden an Einzelstämmen können mit dem Wuchsmodell SILVA nicht simuliert werden. Die Ergebnisse aus den Simulationsläufen mit dem Wuchsmodell sind daher immer als Trendaussagen und Entwicklungstendenzen zu verstehen. Sie dürfen nicht als wertmäßig absolute Vorhersage der zukünftigen Wirklichkeit interpretiert werden. Und dennoch sind die Prognoserechnungen mit dem Wuchsmodell in vielerlei Hinsicht ein wichtiges Hilfsmittel, gerade bei der Entwicklung neuer Behandlungskonzepte oder Richtlinien, da es sich bei diesen ebenfalls nicht um die exakte Abstimmung auf eine „Wirklichkeit“ handelt, sondern allgemein gültige Regeln aufgestellt werden müssen. Mit Hilfe der simulationsgestützten Analysen können Makrostrukturen (z.B. Seiltrassen, Femelhiebe, Löcher) räumlich explizit abgebildet und deren Effekte sichtbar gemacht werden. So demonstrieren die vorliegenden Ergebnisse, räumlich explizit aufgelöst, welche Entwicklung die waldbaulichen Pflegerichtlinien einleiten werden. Sowohl für die Wissenschaft als auch für die Forstpraxis sind diese Ergebnisse von Bedeutung. Sie bilden die Grundlage für die Umsetzung einer neuen Pflegerichtlinie auf rd. 100.000 ha Bergmischwald in Bayern. Sie können dem Waldbesitzer als Entscheidungshilfe dienen.

## 6 Danksagung

Unser Dank geht in erster Linie an die Bayerischen Staatsforsten AöR (BaySF). Ohne die Datenbereitstellung und Informationen über neue Behandlungskonzepte hätte der vorliegende Beitrag nicht entstehen können. Weiterhin danken wir der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft für die Bereitstellung der Holzpreise.

## 7 Literaturverzeichnis

- BAYERISCHE STAATSFORSTEN AÖR. (in Arbeit) Waldbauhandbuch Bayerische Staatsforsten. Richtlinie Für Die Waldbewirtschaftung Im Hochgebirge.
- BIBER, P. (2004) A Model for simulating Natural Regeneration in distance dependent Single Tree Simulators.
- BOSCOLO, M. & VINCENT, J.R. (2003) Nonconvexities in the production of timber, biodiversity, and carbon sequestration. *Journal of Environmental Economics and Management*, 46, 251–268.
- CAPARRÓS, A. & JACQUEMONT, F. (2003) Conflicts between biodiversity and carbon sequestration programs: economic and legal implications. *Ecological Economics*, 46, 143–157.
- EL KATEB, H., AMMER, C., SCHMERBECK, J. & MOSANDL, R. (2004) Management options in mixed mountain forests of the Bavarian Alps. *Regenerating Mountain Forests, An international Conference of the IUFRO units*, pp. 1–05.
- HANEWINKEL, M. (2001) Economic aspects of the transformation from even-aged pure stands of Norway spruce to uneven-aged mixed stands of Norway spruce and beech. *Forest Ecology and Management*, 151, 181–193.
- HILMERS, T., FRIESS, N., BÄSSLER, C., HEURICH, M., BRANDL, R., PRETZSCH, H., SEIDL, R. & MÜLLER, J. (in Arbeit) Transient changes of biodiversity across temperate forest development.
- HUSTON, M.A. & MARLAND, G. (2003) Carbon management and biodiversity. *Journal of Environmental Management*, 67, 77–86.
- KLEIN, D., HÖLLERL, S., BLASCHKE, M. & SCHULZ, C. (2013) The Contribution of Managed and Unmanaged Forests to Climate Change Mitigation—A Model Approach at Stand Level for the Main Tree Species in Bavaria. *Forests*, 4, 43–69.
- KLIMO, E., HAGER, H. & KULHAVÝ, J. (2000) Spruce Monocultures in Central Europe: Problems and Prospects. *European Forest Institute*.
- KNOKE, T., AMMER, C., STIMM, B. & MOSANDL, R. (2008) Admixing broadleaved to coniferous tree species: a review on yield, ecological stability and economics. *European Journal of Forest Research*, 127, 89–101.
- LEMM, R., HOLM, S. & THEES, O. (2013) Bessere Produktions- und Nutzungsentscheide mit dem Sortierungssimulator SorSim. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 164, 301–309.
- LEXER, M.J., HÖNNINGER, K., SCHEIFINGER, H., MATULLA, C., GROLL, N., KROMP-KOLB, H., SCHADAUER, K., STÄRLINGER, F. & ENGLISCH, M. (2002) The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 162, 53–72.
- MATTHEWS, S., O'CONNOR, R. & PLANTINGA, A.J. (2002) Quantifying the impacts on biodiversity of policies for carbon sequestration in forests. *Ecological Economics*, 40, 71–87.
- MATULLA, C., GROLL, N., KROMP-KOLB, H., SCHEIFINGER, H., LEXER, M.J. & WIDMANN, M. (2002) Climate change scenarios at Austrian National Forest Inventory sites. *Climate Research*, 22, 161–173.
- MONING, C. & MÜLLER, J. (2008) Environmental key factors and their thresholds for the avifauna of temperate montane forests. *Forest Ecology and Management*, 256, 1198–1208.
- MOSANDL, R. (1984) Löcherhiebe Im Bergmischwald: Ein Waldbauökologischer Beitrag Zur Femelschlagverjüngung in Den Chiemgauer Alpen. *Frank*.
- OFFENTHALER, I. & HOCHBICHLER, E. (2006) Estimation of root biomass of Austrian forest tree species. *Austrian Journal of Forest Science*, 1, 65–86.
- PRETZSCH, H. (1997) Analysis and modeling of spatial stand structures. Methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony. *Forest Ecology and Management*, 97, 237–253.
- PRETZSCH, H., BIBER, P. & ĎURSKÝ, J. (2002) The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*, 162, 3–21.

- PRETZSCH, H., BLOCK, J., DIELER, J., GAUER, J., GÖTTLEIN, A., MOSHAMMER, R., SCHUCK, J., WEIS, W. & WUNN, U. (2014) Nährstoffentzüge durch die Holz- und Biomassenutzung in Wäldern. Teil 1: Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente und ihre Anwendung in Szenariorechnungen. *Allg Forst u J-Ztg*, 185, 261–285.
- PRETZSCH, H., FORRESTER, D.I. & BAUHUS, J. (2017) *Mixed-Species Forests: Ecology and Management*. Springer.
- R CORE TEAM (2016) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- REININGER, H. (2000) *Plenterprinzip, Oder, Die Überführung Des Altersklassenwaldes*. Stocker.
- ROESSIGER, J., GRIESS, V.C., 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. *Ecological Modelling*, 255, 58–69.
- SEIDL, R., RAMMER, W., JÄGER, D., CURRIE, W.S. & LEXER, M.J. (2007) Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria. *Forest Ecology and Management*, 248, 64–79.
- SPIECKER, H., HANSEN, J., KLIMO, E., SKOVSGAARD, J.P., STERBA, H. & VON TEUFFEL, K. (2004) *Norway Spruce Conversion: Options and Consequences*. Brill Leiden.
- WEIBULL, W. (1951) A statistical distribution of wide applicability. *Journal of applied mechanics*, 103, 293–297.
- ZENNER, E.K., PECK, J.E., HOBI, M.L. & COMMARMOT, B. (2016) Validation of a classification protocol: meeting the prospect requirement and ensuring distinctiveness when assigning forest development phases. *Applied Vegetation Science*, 19, 541–552.