

# Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

**Verbundvorhaben: Neue Generation dynamischer Ertragstafeln**  
**Teilvorhaben 1: Dynamische Ertragstafeln**  
**Teilvorhaben 2: Ökonomische Bewertung**

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 1: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt,  
Abteilung Waldwachstum**  
**Teilvorhaben 2: Georg-August-Universität Göttingen, Abt.  
Forstökonomie und Forsteinrichtung**

Förderkennzeichen:

**22027816, 22027916**

Laufzeit:

**01.09.2017 – 30.06.2021**

Datum der Veröffentlichung:

**06.04.2022**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

# Schlussbericht

## I. Ziele

Ertragstafeln sind auch heutzutage für viele Forstbetriebe das Fundament für eine nachhaltige Nutzungsplanung, sie stellen eine objektive und nachvollziehbare Besteuerungsgrundlage dar und dienen der Waldbewertung als Referenz. Viele heute gebräuchliche Ertragstafeln sind aufgrund veränderter Wachstumsbedingungen und neuer waldbaulicher Bewirtschaftungskonzepte jedoch veraltet. Übergeordnetes Ziel dieses Verbundvorhabens ist es daher, für die fünf Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie neue Ertragstafeln zu erstellen, die das aktuelle Zuwachsniveau widerspiegeln und das von der Nordwestdeutschen Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) empfohlene waldbauliche Behandlungskonzept einer gestaffelten Hochdurchforstung umsetzen (AP 1).

Die neuen Ertragstafeln werden mit Hilfe des einzelbaumbasierten Waldwachstumssimulators der NW-FVA erstellt. Ein weiteres Ziel des Verbundvorhabens ist daher eine Verbesserung der Schätzgenauigkeit des Simulators in Bezug auf das Reaktionsvermögen von Einzelbäume auf Veränderungen ihrer inter- bzw. intraspezifischer Konkurrenz in Abhängigkeit von ihrer sozialen Stellung (AP 2). Ein weiteres Ziel ist die Weiterentwicklung der Mischbestandsfähigkeit des Waldwachstumssimulators und schließlich die Herleitung von Mischbestandskorrekturfaktoren für die neuen Ertragstafeln (AP 3).

Ein weiteres wichtiges Instrument für die Forstplanung und Waldbewertung sind Bestandessortentafeln. Die Erstellung neuer Bestandessortentafeln auf Grundlage der Modellierung sortierungsrelevanter Qualitätsmerkmale im Einklang mit den in der neuen Ertragstafeln abgebildeten Wachstumsgängen und unterstellter Bestandesbehandlung stellt daher ein weiteres Ziel des Verbundvorhabens dar (AP 4).

Die Ziele im Teilvorhaben 2 (AP 5) umfassen eine ökonomische Bewertung der in AP 1 entstandenen, auf den Ertragstafeln basierenden Produktionsmodelle sowie eine Analyse der betrieblichen Implikationen anhand eines nachvollziehbaren und auf realistischen Eingangsdaten basierenden Bewertungsmodells.

## 1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung für AP 1 umfasst die Schaffung einer Datengrundlage sowie die Entwicklung der Methodik für die Herleitung der Ertragstafelgrößen. Die Anforderungen an die neuen Ertragstafeln, das aktuelle Zuwachsniveau abzubilden und die gestaffelte Durchforstung als waldbauliche Behandlungsnorm zu unterstellen, bedingen eine kombinierte Nutzung von Beobachtungen aus Versuchsflächen und Fortschreibung der Waldentwicklung mit einem Waldwachstumssimulator. Die Herleitung der Methodik zum Aufbau der Datengrundlage, das ist die Verwendung von Versuchsflächendaten als Startkonstellation für die 30-jährige Zeitscheibensimulation mit dem Waldwachstumssimulator, ist somit das erste Ergebnis des AP 1. Dazu wurde eine eigene Softwarelösung entwickelt, die automatisiert auf Grundlage ausgewählter Versuchsflächendaten Bestände erzeugt und diese mit den TreeGrOSS-Wachstumsroutinen für 30 Jahre fortschreibt. Die Formulierung und technische Umsetzung des empfohlenen waldbaulichen Behandlungskonzeptes einer gestaffelten Hochdurchforstung ist ein weiteres Ergebnis in AP 1. Während der Projektlaufzeit wurden auch die Waldbaukonzepte mäßige und starke Hochdurchforstung getestet, diese allerdings zugunsten der empfohlenen Variante nicht in das Ertragstafelwerk aufgenommen. Aufbauend auf den Simulationsergebnissen wurde eine Funktionssammlung statistischer Gleichungen zur Schätzung der Ertragstafelgrößen entwickelt. In einem iterativen Prozess aus Auswertung und Validierung der neuen Ertragstafeln wurden je nach Baumart bis zu 10 Versionen gerechnet. Dieser Umstand verdeutlicht die Komplexität der Ertragstafelherleitung. Unter anderem wurden neue Bonitätsfächer und Zuwachsfunktionen entwickelt sowie eine Vielzahl an statistischen Funktionen zur Schätzung der Ertragstafelgrößen angepasst. Insbesondere die Plausibilität der Innenbeziehungen, d.h. die Überführung einzelner Ertragstafelgrößen ineinander (z. B. Stammzahl, Grundfläche und Durchmesser des Grundflächenmittelstammes) stellte dabei eine große Herausforderung dar.

Die Aufgabenstellung für AP 2 zielt auf eine Verbesserung der Grundflächenzuwachsfunktion für Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie im TreeGrOSS-Paket hinsichtlich baumindividueller Wachstumseffekte, die in Abhängigkeit der inter- und intraspezifischen Konkurrenz in Abhängigkeit

ihrer sozialen Stellung zu Umsetzprozessen führen. Dazu wird die nicht erklärte Reststreuung des ursprünglich in TreeGrOSS implementierten Grundflächenzuwachsmodells modelliert. In einem ersten Schritt wird dieser Zufallsfehler mit einem generalisierten linearen gemischten Modell mit einem bestandes- sowie baumspezifischen Interzept, wie auch einem bestandes- sowie baumspezifischen Steigungsparameter, geschätzt. In einem weiteren Ansatz wird der lineare Effekt der Zeit auf den Grundflächenzuwachs durch eine smooth-function der Zeit ersetzt. Die erstellten Modelle für die Baumarten Fichte, Buche und Kiefer sind die wissenschaftlichen Ergebnisse des AP 2. Die Bewertung der Ergebnisse zeigt nur einen geringen Einfluss dieser Modellverbesserung auf die geschätzte absolute Dimensionsentwicklung von Baumdurchmessern. Insofern wurde bisher auf eine Implementation der neuen Grundflächenzuwachsmodellen in TreeGrOSS verzichtet.

Die Kernaufgabe von AP 3 besteht in der Herleitung von Korrekturfaktoren, die den Mehr- bzw. Minderzuwachs in Mischbeständen quantifizieren und somit die neuen Ertragstafeln für Mischbestände nutzbar machen. Zu Beginn musste die Grundflächenzuwachsmodellen mit Versuchsflächendaten ab 1970 zwecks Abbildung des gegenwärtigen Zuwachsniveaus neu parametrisiert werden. Darauf aufbauend wurde im Zuge der Überprüfung der Mischbestandsfähigkeit des Waldwachstumssimulators ein Ansatz entwickelt, der den ursprünglichen Konkurrenzparameter in der Grundflächenzuwachsmodellen durch die jeweils artspezifischen Anteile an der Gesamtkonkurrenz ersetzt. Mit Hilfe des so angepassten Waldwachstumssimulators werden die Mehr- bzw. Minderzuwächse für die Baumartenmischung Fichte-Buche untersucht. Die abgeleiteten Korrekturfaktoren entsprechen in ihrer Größenordnung den von Pretzsch (2016) publizierten Ergebnissen. Andere relevante Baumartenmischungen konnten aus Zeitgründen nicht analysiert werden.

Die Erstellung neuer Bestandessortentafeln im Einklang mit den neuen Ertragstafeln ist die Aufgabe von AP 4. Neben der Stärkeklassensortierung spielt die Baum- bzw. Bestandesqualität eine wesentliche Rolle für Bestandessortentafeln. Als erstes Ergebnis wurden daher Bewertungsschemata für die Güteklassenvergabe entwickelt und als Ergänzung zu Daten der Qualitätsansprache auf Versuchsflächen neue Astigkeitsdaten an Eiche und Buche erhoben. Für die Nadelbaumarten Fichte, Kiefer und Douglasie wurden die bestehenden Astigkeitsmodelle von Schmidt (2001) technisch aktualisiert und in ein R-Package überführt. Mit dem Ziel, eine plausible Stärkeklassenverteilung über dem Alter zu gewährleisten, wurden die Durchmessermodellen der für die neuen Ertragstafeln generierten Zeitscheibensimulationen mittels eines verallgemeinerten additiven Modells mit Weibullverteilter Response-Variablen (BHD) in Abhängigkeit von Alter und Bonität geschätzt. Als Endergebnis stehen in AP 4 die Bestandessortentafeln für die fünf Hauptbaumarten, die analog zu den Ertragstafeln nach Bonitäten getrennt die Stärkeklassenverteilung über dem Alter wiedergeben.

AP 5 lieferte mit den Ergebnissen der Praxisbefragung zur gegenwärtigen und zukünftigen Nutzung von Ertragstafeln in der Forstpraxis die Rechtfertigung für eine Überarbeitung der derzeit in Gebrauch befindlichen Ertragstafeln. Mit dem entwickelten baumarten-, qualitäts- und verfahrensspezifischen Modell zur automatisierten ökonomischen Bewertung der naturalen Ertragstafeldaten konnten die betrieblichen Implikationen aus der Anwendung der neuen Ertragstafeln analysiert werden. Zum Zeitpunkt der Analyse konnten die Auswirkungen der mäßigen und starken Hochdurchforstung miteinander und im Vergleich zu den Ertragstafeln der Sammlung Schober (1985) dargestellt werden. Die schließlich gewählte waldbauliche Behandlungsvariante der gestaffelten Durchforstung stand zum dem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung.

Die fünf Teilprojekte dieses Verbundvorhabens arbeiteten parallel an ihren jeweiligen Aufgabenstellungen. Diese Gleichzeitigkeit stellte sich als größeres Hindernis und Ursache für zeitliche Verzögerungen dar. Die angedachten Verbesserungen des Wachstumsmodells erwiesen sich als komplexer als erwartet und konnten teilweise erst zum Projektende realisiert werden. Dadurch mussten insbesondere die Arbeitspakete 3, 4 und 5 auf unvollständigen bzw. vorläufigen Daten aufbauen.

## 2. Stand der Technik

Im Rahmen dieses Verbundprojektes wurden zahlreiche Methoden und Modelle entwickelt und verwendet, so dass der Stand der Technik als Aufzählung präsentiert wird:

Einzelbaumorientierte Waldwachstumssimulatoren: die Entwicklung von statistischen Modellen zur Schätzung des Einzelbaumzuwachses und Anwendung als Waldwachstumssimulator in Forschung und

Forstpraxis reicht auch in Europa inzwischen 30 Jahre zurück (PRETZSCH 1992, PRETZSCH u. KAHN 1996, ECKMÜLLNER 1990, HASENAUER 1994, HASENAUER et al. 1995, Nagel 1996, STERBA et al. 1995). Der in AP 1 eingesetzte Waldwachstumssimulator beruht auf den TreeGrOSS-Wachstumsroutinen (Hansen and Nagel 2014). Ein großer Vorteil des Einzelbaumansatzes betrifft die realitätsnähere Schätzung der Waldentwicklung in Mischbeständen. TreeGrOSS wurde bereits erfolgreich auf seine Mischbestandsfähigkeit überprüft (Sprauer and Nagel 2015), dennoch besteht hier Verbesserungspotenzial.

Waldbaukonzepte: Mit dem Wandel der waldbaulichen Ziele in den letzten drei Jahrzehnten, die sich mit den Schlagworten Ungleichaltrigkeit, Mischbestände, Hochdurchforstung, Zielstärkennutzung, Voranbau, kleinflächige Naturverjüngung, biologische Rationalisierung, Intensitätsstufen umschreiben lassen (vgl. z. B. Niedersächsische Landesforsten 2021), müssen auch die Instrumente für die Forstplanung wie die Ertragstafeln und Bestandessortentafeln ebenfalls überarbeitet werden. Die NW-FVA empfiehlt als waldbauliches Behandlungskonzept die gestaffelte Hochdurchforstung mit Auswahl von Zukunftsbäumen (vgl. z. B. Niedersächsische Landesforsten 2021). Auch die Umsetzung dieser Behandlungsvorgaben ist durch den Einzelbaumbezug von TreeGrOSS problemlos möglich.

Ertragstafeln: Als Produkt diverser waldwachstums- bzw. ertragskundlicher Untersuchungen entstand im deutschsprachigen Raum seit Ende des 18. Jahrhunderts eine Vielzahl forstlicher Ertragstafeln. Sie bilden den Ausgangspunkt einer ganzen Reihe von waldwachstumskundlichen Modellen unterschiedlicher Datengrundlagen, Erstellungsmethoden und Anwendungsgebieten (Pretzsch 2009, S. 423 ff.). Während sich die Form der tabellarischen Darstellung einer Bestandesentwicklung anhand mittlerer und kumulierter Werte in über 200 Jahren kaum verändert hat, lassen sich die Ertragstafelwerke mit Blick auf die Datengrundlage und die Erstellungsmethodik im Wesentlichen drei entwicklungsgeschichtlichen Generationen zuordnen (Pretzsch 2009, S. 432). Die für den nordwestdeutschen Raum überaus bedeutende und noch heute im Gebrauch befindliche Ertragstafelsammlung von Schober (1975) bzw. Schober (1995) geht u. a. zurück auf eine von Schwappach (1912) veröffentlichte Ertragstafelsammlung, die wiederum von Wiedemann (1949) ergänzt und bearbeitet wurde. Die Überarbeitungen und Neuveröffentlichungen stützen sich dabei insbesondere auf teilweise identische, in der Zwischenzeit weitergeführte Versuchsflächen der ehemaligen Preußischen Forstlichen Versuchsanstalt (Schober 1995, S. 5). Die Ertragstafeln der Schoberschen Sammlung bilden aber nicht das aktuelle Zuwachsniveau ab und als Durchforstungskonzept wird in der Regel die mäßige bzw. starke Niederdurchforstung unterstellt.

Umsetzprozesse/Rangerhaltung: Eine Vielzahl von Untersuchungen zu verschiedenen Baumarten beschreibt an Einzelbäumen das Phänomen des „Umsetzens“ (Busse 1930, Erteld 1950, Magin 1952, Weck 1958, Hengst 1962, Seibt und Sloboda 1978, Spellmann und Diest 1990). Das „Umsetzen“ wird als eine Änderung der „Leistung“ eines Stammes im Verhältnis zur Leistung der übrigen Bestandsmitglieder bzw. als Änderung der „Geltung“ diesen gegenüber als erstes von Busse (1930) definiert. Die Betrachtungsgrundlage zur Identifikation von Umsetzprozessen ist jedoch weitgehend unvollständig. So untersucht Erteld (1950) beispielsweise die Bäume anhand ihrer Durchmesserklassen, ohne weitere wachstumsrelevante Merkmale gleichzeitig zu berücksichtigen. Auch andere Autoren folgen diesem Beispiel und nutzen den BHD als quantitativen Gegenstand zur Messung von Umsetzprozessen (Hengst 1962, Seibt und Sloboda 1978, Merkel 1978, Holten und Diest 1996). Die Zuordnung der Individuen in eine spezifische Klasse nur auf Basis des BHD stellt eine stark vereinfachte Grundlage zur Vergleichbarkeit der Einzelbäume miteinander dar, die bei der Berücksichtigung weiterer Kennwerte, wie dem Alter, der Baumhöhe oder der Kronengröße möglicherweise nicht mehr gegeben wäre. Wächst ein Baum im Verhältnis zu den übrigen Bäumen seiner Klasse positiv oder negativ aus dieser heraus, können die Gründe dafür all jene sein, die bei einer Klassifikation der Bäume nicht berücksichtigt wurden. In AP 2 soll daher das Grundflächenzuwachsmmodell, welches zahlreiche erklärende Variablen wie Kronenmantelfläche, Alter, Konkurrenz und Freistellungseffekt enthält, in der Form modifiziert werden, dass ein Teil des zufällige Fehlerterm des Modells über bestandes- und baumspezifische Zufallseffekte erklärt wird.

Fehlerterm in Regressionsmodellen: Das in TreeGrOSS implementierte Grundflächenzuwachsmmodell von Nagel (1999) schätzt den Erwartungswert anhand eines generalisierten linearen Regressionsmodells (GLM). Der residuale Fehler wird im Modell als  $\epsilon \sim N(0, \sigma)$  angenommen. Dieser Modellansatz berücksichtigt jedoch nicht, dass die Beobachtungen nicht unabhängig voneinander,

sondern Wiederholungsmessungen eines Baumes innerhalb eines jeweiligen Bestandes darstellen. Die einzelnen Beobachtungen sind somit stochastisch nicht voneinander unabhängig und weisen keine unabhängigen Residuen auf (Schilzeth und Nakagawa 2013). Eine mangelnde Berücksichtigung der strukturellen Gruppierungseinheiten des Bestandes und der Einzelbäume führt zu einer Unterschätzung der Standardfehler der Regressionskoeffizienten sowie zu einer Überschätzung der statistischen Signifikanz (Fahrmeir et al., 2013). Daher wird zur Identifikation individueller Wachstumseffekte ein generalisiertes lineares gemischtes Modell (GLMM) mit einem bestandes- sowie baumspezifischen Interzept, wie auch einem bestandes- sowie baumspezifischen Steigungsparameter verwendet, welches die hierarchische Struktur der Parametrisierungsdaten berücksichtigt.

Mischungseffekte: Die Produktivität von Mischbeständen kann von der Produktivität der jeweiligen Reinbestände deutlich abweichen, wobei es zu Mehrzuwachs im Sinne von *overyielding*, das ist eine höhere Produktivität im Mischbestand als das gewichtete Mittel der Produktivität der Reinbestände ist, oder *transgressive overyielding*, das ist eine höhere Produktivität im Mischbestand als im Reinbestand der produktivsten Baumart der Mischung, kommen kann (Pretzsch et al., 2017). Ein Mehrzuwachs ergibt sich aus einer höheren Bestandesdichte und/oder einer höheren relativen Wachstumsrate. Beeinflusst wird der wachstumkundliche Mischungseffekt neben den beteiligten Baumarten und dem Standort durch die Mischungsform und die Bestandesdichte. Pretzsch (2016) hat für gängige Baumartenmischungen Korrekturfaktoren für den Bestandeszuwachs abgeleitet, die eine Verwendung von Reinbestandesertragstafeln in Mischbeständen verbessert. Derartige Korrekturfaktoren sollen auch in AP 3 aus Simulationen mit TreeGrOSS abgeleitet werden.

Mischbestandsfähigkeit von TreeGrOSS: Ein wesentlicher Vorteil von Einzelbaumwachstums-simulatoren ist ihre Fähigkeit, in Mischbeständen über geeignete Konkurrenzmaße den Mischungseffekt zu berücksichtigen. Sprauer und Nagel (2015) konnten dies für TreeGrOSS nachweisen. Dabei bildet der Konkurrenzindex C66 die Konkurrenz im Kronenraum ab und die artspezifischen Unterschiede resultieren aus den unterschiedlichen Kronengrößen von Baumarten bei gegebenem BHD. Ein Nachteil ergibt sich aus der biologisch unplausiblen Tatsache, dass bei gleicher Kronengröße Bäume unterschiedliche Baumarten die gleiche Konkurrenzwirkung haben. Eine Erhöhung der Mischbestandsfähigkeit von TreeGrOSS ist somit Aufgabe von AP 3.

Bestandessortentafeln: Der ökonomische Wert eines Bestandes oder des im Rahmen einer Nutzungsmaßnahme anfallenden Rohholzes ist von den Einzelbaumdimensionen und Holzqualitäten abhängig. Forstbetriebe sind darauf angewiesen, vor Nutzungsmaßnahmen Kenntnisse über die zu erwartenden Sortimentsverteilungen zu haben, und im Rahmen der Waldwertschätzung ist die kalkulatorische Wertermittlung auf Schätzungen von Sortimentsverteilungen angewiesen. Bestandessortentafeln sind Werkzeuge, mit denen man anhand von wenigen im Bestand zu erhebenden Eingangsgrößen Aussagen über die Sortimentsverteilung machen kann. Der mittlere Brusthöhendurchmesser der betrachteten Bäume ist hierbei seit Pressler (1882) primäre Eingangsgröße. Die BHD-abhängige Zuordnung von Sortimentsverteilungen ist das bis heute etablierte Standardverfahren (vgl. z.B. Sterba et al. 1986; Schöpfer u. Dauber 1989; Offer und Staupendahl 2009; Matthews et al. 2016). Zentral für die Erstellung von Bestandessortentafeln ist eine realitätsnahe Schätzung der tatsächlichen Stärke- und Güteklassen. Die Möglichkeit der Simulation eines realitätsnahen Einzelbaumwachstums unter Berücksichtigung aktueller Wuchsbedingungen und Bestandeskonstellationen in Kombination mit flexiblen Schaftformfunktionen sowie Kronenansatzfunktionen (Schmidt 2001) besteht bereits für die wichtigsten Baumarten im Softwarepaket TreeGrOSS. Das ermöglicht, jeden Einzelbaum bei Einstellung entsprechender Sortimentsvorgaben entsprechend seines Brusthöhendurchmessers und seiner Höhe zutreffend zu sortieren und zu bewerten sowie die Summe aller Sortierungen der Einzelbäume eines Bestandes auf Bestandesebene zu aggregieren (Hansen u. Nagel 2014). Mit dieser Methodik ist es möglich, aktuelle Bestandessortentafeln unter Berücksichtigung veränderter Zuwachsbedingungen und dem unterstellten empfohlenen Waldbaukonzept im Einklang mit den neu zu erarbeitenden Ertragstafeln im Rahmen dieses Projektes von AP 4 zu erstellen.

Qualitätsmodellierung: Da Bestandessortentafeln Informationen über die Stärkeklassen- und Güteklassenverteilung enthalten, spielt die Qualitätsmodellierung bei der Erstellung neuer Tafelwerke eine zentrale Rolle. Die zu berücksichtigenden obligaten und fakultativen Qualitätsmerkmale

orientieren sich an der Rahmenvereinbarung für den Rundholzhandel (RVR 2021). Auf behandlungssensitiven Modellen zur äußeren Astigkeit wichtiger Laub- und Nadelbaumarten (SCHMIDT 2001) und zum Buchen-Rotkern in Abhängigkeit von Alter, Dimension und geologischem Ausgangssubstrat (SCHMIDT et al. 2008) soll aufgebaut werden. Weitere sortierrelevante Gütemerkmale, wie z. B. Stammform bzw. Krümmungen und Drehwuchs sollen im AP 4 modelliert werden. Durch eine Implementierung dieser Modelle zur Schätzung der sortierrelevanten Holzqualitäten in TreeGrOSS wird eine realitätsnahe Simulation der Qualitätsentwicklung der Bäume möglich.

### Literatur

- Busse, J. (1930) Vom "Umsetzen" unserer Waldbäume, Mitteilungen des sächs. Forstl. Versuchsanstalt zu Tharandt, S.118
- DFWR (Deutscher Forstwirtschaftsrat) u. DHWR (Deutscher Holzwirtschaftsrat) (Hrsg.) (2015): Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR). Berlin. 2. Auflage. 56 S.
- Eckmüllner, O. (1990): WASIM - Wachstumssimulation. *Holzwirtschaft, Wald und Holz Rundschau*. 46 (1):24-27
- Erteld, W. (1950): Der Verlauf des Umsetzens bei der Fichte. *Forstwirtschaft, Holzwirtschaft*, Heft 19/20, 301-309
- Fahrmeir, L., Kneib, T., Lang, S., Marx, B., 2013. *Regression*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34333-9>
- Hansen, Jan, and Jürgen Nagel. 2014. *Waldwachstumskundliche Softwaresysteme Auf Basis von TreeGrOSS - Anwendung Und Theoretische Grundlagen*. Beiträge a. ed. Hermann Spellmann. Göttingen: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
- Hasenauer, H. (1994): Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. *Forstliche Schriftenreihe Universität für Bodenkultur, Wien*, Band 8., 152 S.
- Hasenauer, H.; Moser, M. und Eckmüllner, O. (1995): Ein Programm zur Modellierung von Wachstumsreaktionen. *AFZ, H. 4*, 216-218
- Hengst, E. (1962): Das Umsetzen von Einzelbäumen im gleichaltrigen Buchenreinbestand. *Wissenschaftl. Zeitschrift der TU Dresden*, 11. Jg., 4, 791-798
- Holten, N. E. u. Diest, W. v. (1996): Über das Umsetzen in dänischen Eichenbeständen. Eine Untersuchung über Zuwachs und finanziellen Ertrag von Einzelbäumen. *Forstarchiv*, 67. Jg., 160-174.
- Magin, R. (1952): Zuwachsleistungen der soziologischen Baumklassen in langfristig beobachteten Versuchsflächen. *Forstwiss. Centralblatt*, 71. Jg., 225-243
- Matthews, R.; Jenkins, T. A. R.; Mackie, E. D.; Dick, E. C. (2016): *Forest yield. A handbook on forest growth and yield tables for British forestry*. Forestry Commission, Edinburgh.
- Merkel, O. (1978): Zur Frage des Umsetzens früh ausgewählter Z-Bäume in Buchenbeständen – dargestellt an Ergebnissen der Vfln. Nr. Bu 237 (Fbz. Kaltenbronn), Bu 238 (Fbz. Oberkirch), Bu 239 (Fbz. Stockach)-Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde, Bericht der Jahrestagung vom 16.-20.5.1978 in Konstanz, 107-135
- Nagel, J. (1996): Anwendungsprogramm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung. *Forst u. Holz*, 51. Jg., 3, 76-78
- Nagel, Jürgen. 1999. *Konzeptionelle Überlegungen Zum Schrittweisen Aufbau eines Waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland*. Schriften. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag.
- Niedersächsische Landesforsten 2021: *Entscheidungshilfen zur Behandlung und Entwicklung von Buchenbeständen*. [https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/common/veroeffentlichen/merkblaetter/NI\\_Entscheidungshilfen\\_Buchenbestaende.pdf](https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/common/veroeffentlichen/merkblaetter/NI_Entscheidungshilfen_Buchenbestaende.pdf) (Zugriff am 27.09.2021)
- Offer, A.; Staupendahl, K. (2009): Neue Bestandessortentafeln für die Waldbewertung und ihr Einsatz in der Bewertungspraxis. *Forst und Holz* 64 (5), S. 16 - 25.
- Pressler, M. (1882): *Holzwirtschaftliche Tafeln*. 2. Band. 3. Aufl. 2 Bände. Tharandt und Leipzig: Verlag der Pressler'schen Werke.
- Pretzsch, H. (1992): *Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände*. Forstliche Forschungsberichte München, Band 115
- Pretzsch, H. (2016): Ertragstafel-Korrekturfaktoren für Umwelt- und Mischungseffekte. *AFZ-Der Wald*, 187. Jg., 14: 47-50
- Pretzsch, H. und Kahn, M. (1996): Wuchsmodelle für die Unterstützung der Wirtschaftsplanung im Forstbetrieb. *AFZ/DerWald*, 25, 1414-1419
- Pretzsch, H. (2009): *Forest dynamics, growth and yield. From Measurement to Model*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH.
- Pretzsch, H., Forrester, D. I., & Bausch, J. (2017). *Mixed-Species Forests*. (H. Pretzsch, D. I. Forrester, & J. Bausch, Eds.) (1.). Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9>

- Schielzeth, H., Nakagawa, S., 2013. Nested by design: model fitting and interpretation in a mixed model era. *Methods in Ecology and Evolution* 4, 14–24. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00251.x>
- Schmidt, M. (2001): Prognosemodelle für ausgewählte Holzqualitätsmerkmale wichtiger Baumarten. Dissertation an der Universität Göttingen. 302 S.
- Schmidt, M.; Nowack, S. und Riebeling, R. (2008): Methodische Ansätze und Ergebnisse zur Quantifizierung des Buchen-Rotkerns in Hessen. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der NW-FVA. Universitätsverlag. Göttingen, 268-290
- Schober, R. (1995): Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 4. Aufl., J. D. Sauerländers Verlag, Frankfurt a. M., 166 S.
- Schöpfer, W. und Dauber, E. (1985) Bestandessortentafeln 1982/85. In: Forst-, Holz- und Jagd-Taschenbuch 1986, M. u. H. Schaper, Hannover.
- Schwappach, Adam (1912): Ertragstafeln der wichtigsten Holzarten : in tabellarischer und graphischer Form. Neudamm: Neumann.
- Seibt, G. und Sloboda, B. (1978): Zur Quantifizierung von Umsetzungsprozessen in gleichaltrigen Fichtenbeständen. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde, Bericht der Jahrestagung vom 16.-20.5.1978 in Konstanz, 92-106
- Spellmann, H. und Diest, W. v. (1990): Entwicklung von Z-Baum-Kollektiven in langfristig beobachteten Eichen-Versuchsflächen der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt. *Forst und Holz*, 45. Jg., 573-580
- Sprauer, S. und Nagel, J. (2015): Aboveground productivity of pure and mixed Norway spruce and European beech stands. *Eur. J. Forest Res.*, 134 Jg., 5, 781-792 (doi 10.1007/s10342-015-0889-8)
- Sterba, H.; Kleine, M.; Eckmüllner, O. (1986): Sortentafeln für Tanne, Lärche, Kiefer und Buche. Wien: Österreichischer Agrarverlag.
- Sterba, H.; Moser, M. und Hasenauer, H. (1995): PROGNAUS - ein abstandsunabhängiger Wachstumssimulator für ungleichaltrige Mischbestände. Tagungsband der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 29.-31. Mai 1995 in Joachimsthal, 173-183
- Weck, J. (1958): Vom Umsetzen unserer Waldbäume. *AFZ*, 13. Jg., 717-720
- Wiedemann, Eilhard (1949): Ertragstafeln der wichtigen Holzarten bei verschiedener Durchforstung. Hannover: Verlag M & H Schaper.

### 3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Als beratendes Gremium wurde eine projektbegleitende Arbeitsgruppe eingerichtet. Als Mitglieder konnten gewonnen werden:

- Frau Dr. Annett Degenhardt, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde
- Herr Andreas Brokate, Landesamt für Steuern Niedersachsen
- Herr Prof. Dr. Hans Pretzsch, TUM München
- Herr Dr. Peter Biber, TUM München
- Herr Dr. Kai Staupendahl, ArgusForstplanung

Die projektbegleitende Arbeitsgruppe traf sich zu insgesamt vier Sitzungen, auf denen der Arbeitsstand vorgestellt, diskutiert und über das weitere Vorgehen beraten wurde.

## II. Ergebnisse

### 1. Erzielte Ergebnisse

## Arbeitspaket 1

### 1. Grundprinzip der Ertragstafelerstellung

Die Herleitung der neuen Generation dynamischer Ertragstafeln für die fünf Hauptbaumarten Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer geht über das auch bei neueren Ertragstafeln der dritten Generation verfolgte Prinzip eines biometrisch-statistischen Ausgleichs von empirischen Beobachtungen hinaus (vgl. z. B. Dietmar et al. 1983, Wenk et al. 1984, Lockow 2003, Röhe et al. 2019). Aufbauend auf realen Versuchsflächendaten wurden künstliche Bestände generiert und mit dem Einzelbaumwachstumssimulator TreeGrOSS der NW-FVA (Hansen und Nagel 2014) für 30-Jahre fortgeschrieben. Diese Simulationsdaten wurden anschließend mittels eines Systems von biometrisch-statistischen Funktionsgleichungen in Tafelwerke überführt. Dieses Vorgehen hat zwei entscheidende Vorteile. Zum einen wird das Wachstum mit den Zuwachsfunktionen von TreeGrOSS auf dem aktuell herrschenden Zuwachsniveau projiziert, was aufgrund der sich ändernden Standortverhältnisse bei langfristigen Versuchsflächen für weit zurückliegende Aufnahmen nicht gegeben wäre. Zweitens kann im Waldwachstumssimulator die von der NW-FVA empfohlene waldbauliche Behandlung einer gestaffelten Hochdurchforstung abgebildet werden, während die empirische Datenbasis mit diesem waldbaulichen Vorgehen für eine Ertragstafelerstellung zu gering ist.

### 2. Datengrundlage und Gültigkeitsbereich

Aus der ertragskundlichen Versuchsflächendatenbank der NW-FVA wurden zunächst diejenigen Versuchspartellen herausgefiltert, die der abzubildenden waldbaulichen Norm einer gestaffelten Hochdurchforstung nahe kommen. Ziel war es dabei, ein möglichst breites Alters- und Bonitätsspektrum abzubilden. Anhand dieser Versuchsflächendaten wurden die mit dem Einzelbaumwachstumssimulator fortzuschreibenden Startbestände generiert. Die entsprechenden Kennwerte der Startbestände für die fünf Hauptbaumarten sind in Tab. 1 aufgelistet.

*Tab. 1: Datengrundlage für die Ertragstafelerstellung für die fünf Hauptbaumarten: Anzahl der generierten Startbestände (<sup>1</sup>die Anzahl ergibt sich aus der in Klammern angegebenen Anzahl von Versuchspartellen multipliziert mit den verwendeten Aufnahmen abzüglich ausgesonderter Startkonstellationen), Alters- und Oberhöhenbonitätskennwerte (Minimum Min, erstes Quantil 1.Qu., Mittelwert, drittes Quantil 3.Qu., Maximum Max).*

	Anzahl Startbestände <sup>1</sup>	Alter zu Beginn der Projektion [Jahre]					Oberhöhenbonität $h_{100}$ [m]		
		Min.	1.Qu.	Mittelw.	3.Qu.	Max.	1.Qu.	Mittelw.	3.Qu.
Buche	241 (61)	25	40	63	83	110	29,5	33,1	36,1
Eiche	463 (101)	17	42	74	107	170	25,0	27,3	29,6
Fichte	278 (61)	19	28	42	45	99	36,7	37,9	40,3
Douglasie	478 (290)	15	32	40	48	77	39,1	41,7	44,5
Kiefer	142 (32)	16	29	43	56	96	28,9	30,6	32,5

Die Anzahl der je Baumart zur Verfügung stehenden Startbestände lag zwischen minimal 142 für die Kiefer und maximal 478 für die Douglasie. Zur Generierung der Startbestände wurden die unterschiedlichen Aufnahmen einer Versuchspartelle als unabhängige Datenquelle angesehen, d.h. aus den z. B. 61 Buchenpartellen wurden anhand der verschiedenen Aufnahmezeitpunkte des ertragskundlichen Versuches 241 Startkonstellationen erzeugt (vgl. Tab. 1). Jede Startkonstellation wurde anhand verschiedener Kriterien auf Plausibilität geprüft und ggf. aus dem Pool der Startbestände wieder entfernt (vgl. auch Abschnitt 3.3 *Generierung von Startbeständen* unten). Der Altersbereich der schlussendlich zur Verfügung stehenden Startbestände deckt, insbesondere nach einer 30-jährigen Fortschreibung, gut den Gültigkeitsbereich der zu erstellenden Ertragstafeln ab, nämlich von Beginn der Durchforstungseingriffe bis zur Zielstärkennutzung. Das Bonitätsspektrum reicht bei Eiche und Buche von der 0. bis zur II. Ertragsklasse, bei Fichte und Kiefer von der 0. bis zur I. Ertragsklasse und bei der Douglasie von der I. bis II. Ertragsklasse, so dass die Extrapolation

bei den dann erstellenden Ertragstafeln i. d. R. maximal eine Ertragsklasse beträgt (Ausnahmen: Fichte und Kiefer Extrapolation um zwei Ertragsklassen nach unten).

Die herangezogenen Versuchsflächen stammen weit überwiegend aus dem heutigen Zuständigkeitsbereich der NW-FVA in den Bundesländern Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein sowie aus den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und dem Saarland, in denen die Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt (NFV) früher zuständig war und die noch in Beobachtung der NW-FVA stehen. Die neuen Ertragstafeln haben somit einen räumlichen Gültigkeitsbereich für Nordwestdeutschland.

### 3. Methodik

#### 3.1 Festlegungen

Es wurden für die Erstellung der Ertragstafeln zwei Festlegungen vorgenommen: (1) es wird ein mittleres Ertragsniveau abgebildet und (2) wird ein in der Jugend modifizierter, funktionalisierter Bonitätsfächer auf Basis der baumartenspezifischen Daten der Ertragstafelsammlung von Schober (1995) angewendet.

#### 3.2 *Waldbauliches Behandlungskonzept*

Das in den Ertragstafeln abgebildete Behandlungskonzept zielt darauf ab, stabile, vertikal und horizontal strukturierte Bestände guter Qualität zu erziehen, die eine möglichst risikoarme Entwicklung der Volumen- und Werterzeugung gewährleisten und Handlungsspielräume für die Verjüngungsphase schaffen. Dazu wird das von der NW-FVA empfohlene Konzept einer gestaffelten Hochdurchforstung umgesetzt, welches bei den ersten Eingriffen starke Durchforstungen im Herrschenden zur konsequenten Förderung einer baumartenspezifisch bemessenen Anzahl von Z-Bäumen, danach einen Übergang zu mäßigen, die Z-Bäume pflegenden und den Bestandesschluss erhaltenden Eingriffen vorsieht und schließlich mit Einsetzen der Zielstärkennutzung ausläuft (vgl. z. B. Niedersächsische Landesforsten 2021). Für eine Implementierung des waldbaulichen Behandlungskonzeptes in den Waldwachstumssimulator wurden Regeln definiert, die u. a. die Anzahl an Z-Bäumen, angestrebten Zielstärken und die Anzahl der pro Z-Baum zu entnehmenden Bedränger spezifizieren (siehe Anhang 1).

Maßgebliches Kriterium für die Durchforstungsstärke ist die in bestimmten Altern bzw. bei bestimmten Oberhöhen anzustrebende Grundflächenhaltung im Oberstand, beispielhaft für die Baumart Buche in Abb. 1 dargestellt (alle Baumarten in Anhang 2). Der Unterstand, definiert im Anhalt an Assmann (1961) als die Bäume, deren Höhe  $\leq 50\%$  der Oberhöhe ( $h_{100}$ ) des Bestandes in gegebenem Alter ist, wird nicht bei der Bemessung der Eingriffsstärken und auch nicht in den Grundflächenangaben der Ertragstafeln für den verbleibenden und ausscheidenden Bestand berücksichtigt.

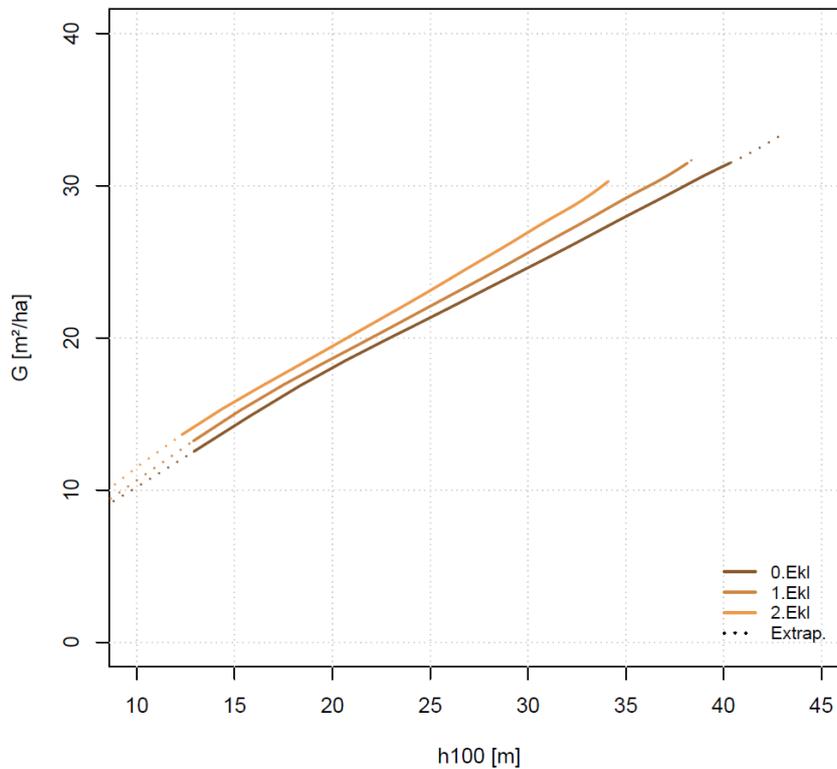


Abb. 1: Grundflächenhaltung dargestellt über der Bestandesoberhöhe für die Baumart Buche unter dem waldbaulichen Behandlungskonzept einer gestaffelten Durchforstung (gepunktet: Extrapolationsbereich der erstellten Ertragstafel).

Da sich die Durchforstungsstärke der gestaffelten Durchforstung an der über die Bestandesoberhöhe definierte Pflegephase orientiert, ist in Abb. 1 die Grundflächenhaltung entsprechend über dem Oberhöhenverlauf beispielhaft für die Baumart Buche dargestellt.

### 3.3 Generierung von Startbeständen

Aus jeder empirischen Durchmesserverteilung der zur Verfügung stehenden Versuchsflächenaufnahmen wurden zufällig Durchmesser gezogen, bis die Zielgrundfläche des unterstellten waldbaulichen Behandlungskonzeptes, definiert über die oben spezifizierte Grundflächenhaltung, erreicht war. Da die Durchmesserentwicklung nicht jeder Versuchsflächenparzelle der unter dem zu simulierenden Behandlungskonzept einer gestaffelten Hochdurchforstung zu erwartenden Entwicklung entsprach, konnte es zu Diskrepanzen zwischen der beobachteten und der erwarteten Durchmesserverteilung kommen. Um diese mögliche Verzerrung zu überprüfen und auszugleichen, wurden Schätzfunktionen für den Durchmesser des Grundflächenmittelstammes ( $D_g$ ) und dem Durchmesser der 100 stärksten Bäume pro ha ( $D_{100}$ ) in Abhängigkeit vom Bestandesalter und der absoluten Oberhöhenbonität ( $H_{100}$ ) mit Hilfe von Daten aus idealtypisch stark hochdurchforstungsartig behandelten Versuchsflächenparzellen, hier am Beispiel der Baumart Buche, wie folgt formuliert (Funktionen aller Baumarten in Anhang 3):

$$\text{starke HDF} \quad D_{g_{soll}} = 0,441 * \text{Alter} - 0,330 * H_{100} \quad R^2_{adj} = 0,98 \quad [1.1]$$

$$D_{100_{soll}} = 0,230 * \text{Alter} + 0,663 * H_{100} \quad R^2_{adj} = 0,99 \quad [1.2]$$

Bei der Modifikation der Durchmesserverteilungen wurde die gestaffelte Durchforstung wie die starke Hochdurchforstung behandelt. Entsprechend der Funktionen [1.1] und [1.2] wurden die beobachteten Werte der Versuchsflächenaufnahmen mit den Sollwerten abgeglichen. Bei Differenzen, die größer als 10 cm waren, wurde die Startkonstellation als ungeeignet angesehen und aus dem Pool der Startbestände entfernt. Bei geringeren Differenzen wurde eine Korrektur vorgenommen, indem zuerst die gesamte Durchmesserverteilung um die Differenz  $D_{g_{soll}} - D_{g_{ist}}$  verschoben wurde. In einem zweiten Schritt wurde die

Durchmesserverteilung um das Streckenverhältnis  $(D100_{\text{soll}} - Dg_{\text{soll}}) / (D100_{\text{ist}} - Dg_{\text{ist}})$  gestaucht bzw. gestreckt. Diese modifizierten Durchmesserverteilungen dienten nunmehr als Grundlagen für die oben angeführte Zufallsziehung von Durchmessern.

Entsprechend der erzeugten Durchmesserverteilungen für die Startbestände wurden aus den Versuchsflächendaten die dazugehörigen Einzelbaumhöhen ergänzt und weitere benötigte Einzelbaumparameter, wie Kronenansatzhöhe und Kronenbreite, über in TreeGrOSS verfügbare Funktionen geschätzt. Als Resultat standen dann auf Einzelbaumbasis die Startbestände mit einer Bestandesgröße von jeweils 0,2 ha für die Wachstumssimulation zur Verfügung. Diese Startbestände erhielten die Bonität entsprechend des Bestandesalters  $t$  und der generierten Bestandesoberhöhe vor Beginn der Simulation (vgl. auch Abschnitt 3.4 *Zeitscheibensimulation* unten). Ferner wurden Z-Bäume ausgewählt und die Bestandesentwicklung wurde in sechs 5-Jahres-Simulationsschritten für entsprechend 30 Jahre ( $t+30$ ) fortgeschrieben.

### 3.4 *Zeitscheibensimulation*

Für eine praxistaugliche Anwendbarkeit der neuen Ertragstafeln mussten die Wachstumsgänge aus Versuchsflächen allen Alters unter den gegenwärtigen Wachstumsbedingungen fortgeschrieben werden. Dabei war die bisherige Geschichte der Bestände zu berücksichtigen, d.h. die bisherige Entwicklung der Bestandesgrößen im Laufe des konkreten Bestandeslebens. Diese Anforderungen wurden durch eine Zeitscheibensimulation realisiert, d.h. aus einer Vielzahl von Versuchsflächenaufnahmen unterschiedlichen Alters  $t$  wurden für die Waldwachstumsbibliothek TreeGrOSS (Hansen und Nagel 2014) Startkonstellationen generiert und diese dann für 30 Jahre ( $t+30$ ) fortgeschrieben. Durch dieses Vorgehen spiegeln die aktuellen Kennwerte und die Bonität des zu simulierenden Bestandes die Standortbedingungen des bisherigen Bestandeslebens wider. Die Zuwachsschätzung erfolgte mit den Wachstumfunktionen aus TreeGrOSS, die durch Neuparametrisierung des Grundflächenzuwachsmodells auf Basis von Versuchsflächendaten ab dem Aufnahmejahr 1970 an das gegenwärtige Zuwachsniveau angepasst wurden (NW-FVA 2018). Die zum Beginn der Simulation zugewiesene Bonität wurde für die 30-jährige Simulation konstant gehalten.

An die Oberhöhenverläufe der Ertragstafeln für Buche (Schober 1967), Fichte (Wiedemann 1936/42), Kiefer (Wiedemann 1943) und Douglasie (Bergel 1985) wurde die Hossfeld-Funktion und für Eiche (Jüttner 1955) die Sloboda-Funktion (Eiche) angepasst und durch den Nullpunkt gezogen (Staupendahl 2021; siehe Anhang 5). Diese neu funktionalisierten Bonitätsfächer wurden für die Bonitierung der Startbestände und die Oberhöhenentwicklung der neuen Ertragstafeln verwendet.

### 3.5 *Modellbaukasten*

Die Ertragstafeln wurden mit biometrisch-statistischen Modellen erstellt, die auf Basis von Daten der mit TreeGrOSS simulierten Waldentwicklung der Startbestände parametrisiert wurden. Eine Modellierung der Simulationsdaten war notwendig, da insbesondere in den Randbereichen der Zeitscheiben keine kontinuierlichen Übergänge garantiert waren, es also zu Brüchen im mittleren Verlauf kommen konnte. Für die verschiedenen Zielgrößen wurden unterschiedliche Modelle verwendet. Tab. 2 beschreibt den sogenannten Modellbaukasten mit den verwendeten Modellformen und Modellparametern (siehe Anhang 6 für detaillierte Modellspezifika). Die in Tab. 2 aufgeführten Modelle gewährleisteten kontinuierliche Werteverläufe der Ertragstafelgrößen.

Tab. 2: Modellbaukasten zur Schätzung von Ertragstafelgrößen (iV: laufender Zuwachs; DOW: Durchmesser des Weise'schen Oberhöhenstammes; Dg: Durchmesser des Grundflächenmittelstammes; aus.: jeweilige Kenngröße des ausscheidenden Bestandes; Hg: Höhe des Grundflächenmittelstammes; V: stehender Vorrat; G: Grundfläche; FH: Formhöhe; N: Stammzahl; s(x): Spline des Prädiktors x; <sup>1</sup>Bonität nur bei Buche und Eiche als Prädiktor).

Nr	Zielgröße	Modellform	Modellparameter
1a	iV	Differenzenform der Sloboda-Funktion mit Nullstellen	Alter, Bonität
1b	iV	Diff.form der Chapman-Richards-Fkt mit Nullstellen	Alter, Bonität
2a	DOW	Differenzenform der Hossfeld-Fkt. mit Nullstellen	Alter, Bonität
2b	DOW	Diff.form der Chapman-Richards-Fkt mit Nullstellen	Alter, Bonität
2c	DOW	Differenzenform der Sloboda-Fkt mit Nullstellen	Alter, Bonität
3a	Dg	Differenzenform der Hossfeld-Fkt. mit Nullstellen	Alter, Bonität
3b	Dg	Diff.form der Chapman-Richards-Fkt mit Nullstellen	Alter, Bonität
4	Hg	Lineares Modell	H100, Bonität <sup>1</sup>
5	aus. Hg	Lineares Modell	H100, Bonität <sup>1</sup>
6a	V	Differenzenform der Hossfeld-Fkt. mit Nullstellen	Alter, Bonität
6b	V	Differenzenform der Sloboda-Fkt mit Nullstellen	Alter, Bonität
6c	V	Diff.form der Chapman-Richards-Fkt mit Nullstellen	Alter, Bonität
7a	G	Generalisiertes additives Modell	s(Alter), Bonität
7b	G	Lineares Modell	Alter, Bonität
8a	FH	Lineares Modell	Hg
8b	FH	Generalisiertes additives Modell	s(Hg)
9a	N	Generalisiertes additives Modell	s(H100), Bonität
9b	N	Überführung in rechnerische Werte aus dg und G	Korrektur über Alter

### 3.6 Ertragstafelbaukasten

Die Ertragstafeln wurden für einen definierten Altersrahmen und bestimmte Oberhöhenbonitäten erstellt. Der Altersrahmen beginnt bei Erreichen einer Bestandesoberhöhe von 11 m, also mit Beginn der Hauptpflegephase, und endet in dem Altersbereich, in dem der Dg die jeweils angestrebte Zielstärke erreicht (Dg = Zielstärke von 60 cm bei Buche, 70 cm bei Eiche, 45 cm bei Fichte und Kiefer und 70 cm bei Douglasie) bzw. mit dem maximalen Simulationsalter (150 Jahre bei Buche, 180 Jahre bei Eiche, 120 Jahre bei Fichte, Kiefer und Douglasie). Tab. 3 listet im sogenannten Ertragstafelbaukasten für die fünf Baumarten die Rechenwege bzw. genutzten Modelle zur Herleitung der Ertragstafelparameter auf.

Tab. 3: Ertragstafelbaukasten zur Berechnung der Ertragstafelparameter (Abkürzung der Zielgrößen siehe Tab. 2; \*) bei der Eiche wurde nur der erste Simulationsschritt verwendet).

Schritt	Zielgröße	Baumart	Berechnung
1	Alter	Bu, Ei, Fi, Ki Dgl	Altersrahmen für -I bis III. Ertragsklasse Altersrahmen für 0. bis III. Ertragsklasse
2	H100	alle	Neu funktionalisierter Bonitätsfächer
3	V	Ei, Fi Bu, Dgl Ki	Modell Nr. 6a Modell 6b Modell 6c
4	iV	Bu,Ei,Fi,Dgl Ki	Modell Nr. 1a Modell Nr. 1b
5	GWL	Bu, Ei, Fi, Dgl Ki	Integral aus Modell Nr. 1 $V_{t0} + \text{Summe (iV)}$
6	dGZ	alle	GWL/Alter
7	DOW	Fi, Ki Bu, Ei Dgl	Modell Nr. 2a Modell Nr. 2b Modell Nr. 2c
8	Dg	Bu, Fi, Dgl, Ki Ei Bu, Fi, Ki, Dgl	Modell Nr. 3a Modell Nr. 3b $200 * \sqrt{G/(\pi * N)}$
9	Hg	alle	Modell Nr. 4
10	aus. Hg	alle	Modell Nr. 5
11	G	Bu, Ei, Fi, Dgl Ki	Modell Nr. 7a Modell Nr. 7b
12	N (nur Derbholz)	Bu, Fi, Ki, Dgl Ki	Modell Nr. 9a und 9b $40000 * G/(\pi * Dg^2)$
13	aus. V	alle	$(V_{t0+5*iV_{t0}}) - V_{t1}$
14	aus. G	Bu,Ei,Ki,Dgl Fi	aus.V/FH mit FH aus Modell Nr. 8a aus.V/FH mit FH aus Modell Nr. 8b
15	aus. Dg	alle	$200 * \sqrt{\text{aus. } G/(\pi * \text{aus. } N)}$
16	aus. N (nur Derbholz)	alle	$N_t - N_{t+1}$

Die in Tab.3 aufgeführten Modelle und Rechenwege gewährleisten plausible Werteverläufe und konsistente Innenbeziehungen der Tafeln.

#### 4. Ergebnisse

Das Tabellenwerk der Ertragstafeln ist nach dem Vorbild der Ertragstafelsammlung von Schober (1995) aufgebaut, d.h. die Werte werden über dem Alter in 5-Jahresschritten für das waldbauliche Behandlungskonzept gestaffelte Durchforstung bezogen auf die oben definierten Grundflächenhaltungen tabellarisch aufgeführt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse für die Baumart Buche vorgestellt (die Tabellenwerke und dazugehörige Grafiken aller fünf Baumarten sind in Anhang 7 enthalten).

**Buche: gestaffelte Durchforstung**  
Oberhöhenbonität: **36.5 m** im Alter 100

Alter	verbleibender Bestand							ausscheidender Bestand				Gesamtwuchs			
	Stammzahl	Mittelhöhe	Oberhöhe (H100)	Grundfläche	mittl. Durchmesser	Durchmesser Weise	Vorrat	Stammzahl	Grundfläche	mittl. Durchmesser	Vorrat	Laufender Volumenzuwachs	Gesamtwuchsleistung	durchschnittl. Gesamtwuchs	
Jahre	Stück/ha	m	m	m <sup>2</sup> /ha	cm	cm	m <sup>3</sup> /ha	Stück/ha	m <sup>2</sup> /ha	cm	m <sup>3</sup> /ha	m <sup>3</sup> /ha/J	m <sup>3</sup> /ha	m <sup>3</sup> /ha/J	
30	3333	9.3	12.9	12.5	6.9	11.5	57	1961	7.2	6.8	29	11.2	121	4.0	
35	2200	12.4	15.7	14.8	9.3	15.2	88	1134	6.1	8.3	35	13.3	188	5.4	
40	1535	15.1	18.3	16.8	11.8	18.9	123	665	5.4	10.2	39	14.7	261	6.5	
45	1111	17.7	20.7	18.5	14.6	22.7	158	424	4.9	12.2	43	15.6	339	7.5	
50	850	20.0	22.8	19.9	17.3	26.5	194	261	4.6	15.0	45	16.2	421	8.4	
55	679	22.1	24.8	21.2	19.9	30.3	230	171	4.3	17.9	47	16.6	504	9.2	
60	560	24.0	26.6	22.3	22.5	34.0	265	119	4.0	20.7	49	16.8	587	9.8	
65	472	25.7	28.2	23.4	25.1	37.7	300	87	3.8	23.6	50	16.8	672	10.3	
70	405	27.3	29.7	24.4	27.7	41.4	333	67	3.6	26.2	50	16.8	756	10.8	
75	352	28.8	31.1	25.3	30.3	45.0	366	54	3.5	28.7	51	16.7	839	11.2	
80	307	30.1	32.3	26.1	32.9	48.5	398	44	3.3	30.9	51	16.5	922	11.5	
85	270	31.4	33.5	26.9	35.6	52.0	428	37	3.2	32.9	51	16.4	1004	11.8	
90	239	32.6	34.6	27.7	38.4	55.3	458	32	3.0	35.0	51	16.1	1084	12.0	
95	212	33.6	35.6	28.3	41.3	58.6	487	27	2.9	37.1	51	15.9	1164	12.3	
100	188	34.6	36.5	29.0	44.3	61.8	515	23	2.8	39.3	51	15.7	1242	12.4	
105	168	35.6	37.4	29.5	47.3	64.9	541	20	2.7	41.5	50	15.4	1319	12.6	
110	151	36.4	38.2	30.1	50.4	67.9	567	18	2.6	43.7	50	15.1	1395	12.7	
115	135	37.2	38.9	30.6	53.7	70.9	593	15	2.6	46.0	49	14.9	1469	12.8	
120	122	38.0	39.6	31.1	57.0	73.7	617	13	2.5	48.5	49	14.6	1542	12.9	
125	110	38.7	40.3	31.5	60.3	76.5	640	12	2.4	50.9	48	14.4	1614	12.9	

*Abb. 2: Tabellenblatt der neuen Ertragstafel Buche, gestaffelte Durchforstung, Oberhöhenbonität 36,5 m (0. Ertragsklasse).*

Am Beispiel des in Abb. 2 gezeigten Ausschnittes aus der neuen Buchen-Ertragstafel gestaffelte Durchforstung, Oberhöhenbonität 36,5 im Alter 100, ist zu erkennen, dass der Altersrahmen nach Überschreiten der Oberhöhe von 11 m, hier Alter 30 mit H100 = 12,9 m, beginnt. Im Alter 30 fallen die ersten Durchforstungsmassen an. Der Altersrahmen für die hier angegebene 0. Ertragsklasse endet im Alter 125, da hier der Dg 60,3 cm beträgt und somit die vorgegebene Zielstärke für Buche selbst für den Grundflächenmittelstamm erreicht ist (vgl. DOW Alter 100). Die folgenden Grafiken illustrieren für wichtige Parameter die Verläufe laut 0., I. und II. Ertragsklasse.

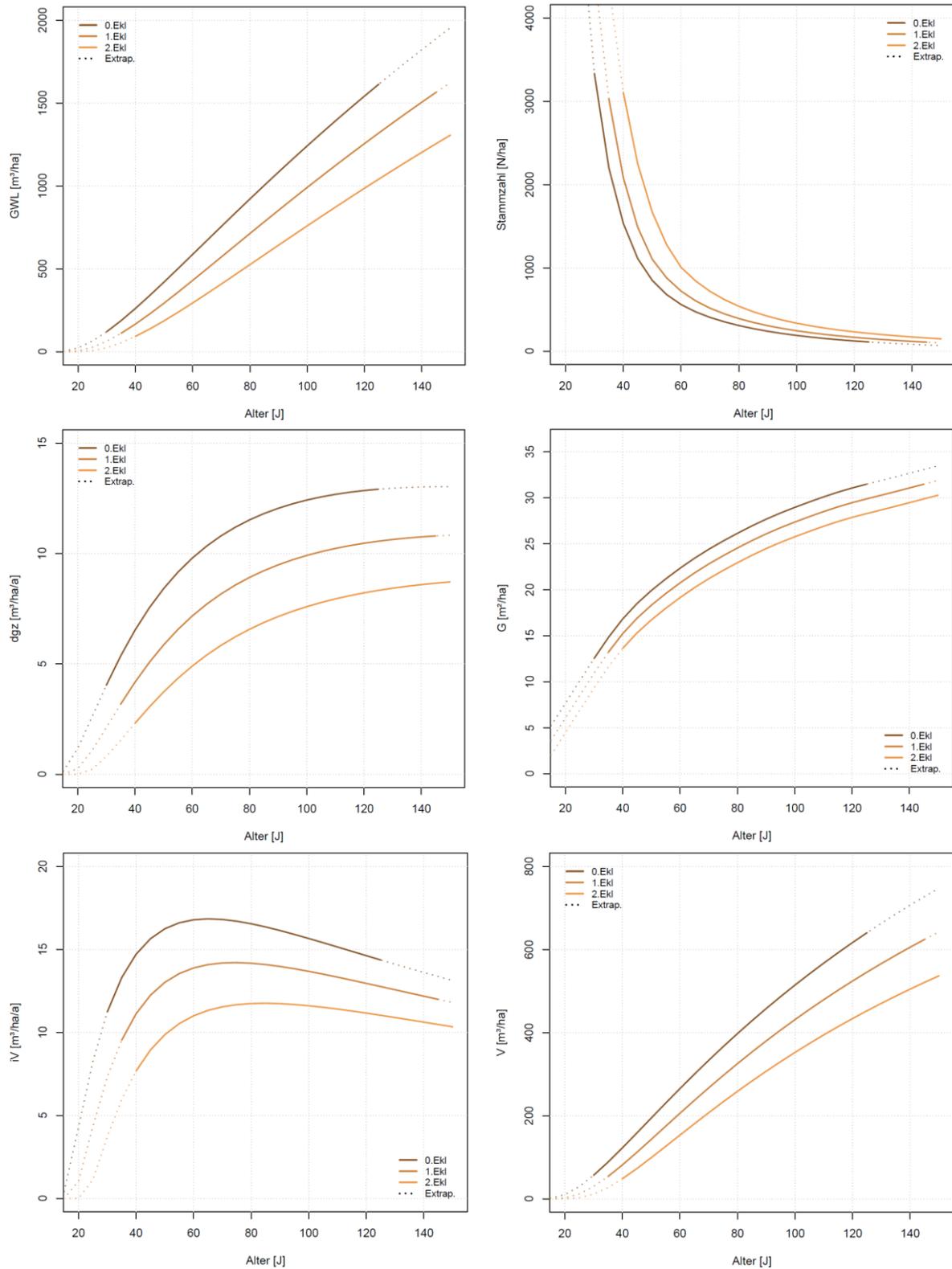


Abb. 3: Verläufe ausgewählter Parameter der neuen Buchenertragstafel (linke Spalte: Gesamtwuchsleistung, durchschnittlicher Gesamtzuwachs, laufender Volumenzuwachs; rechte Spalte: Stammzahl pro ha, Grundfläche pro ha, Vorrat pro ha).

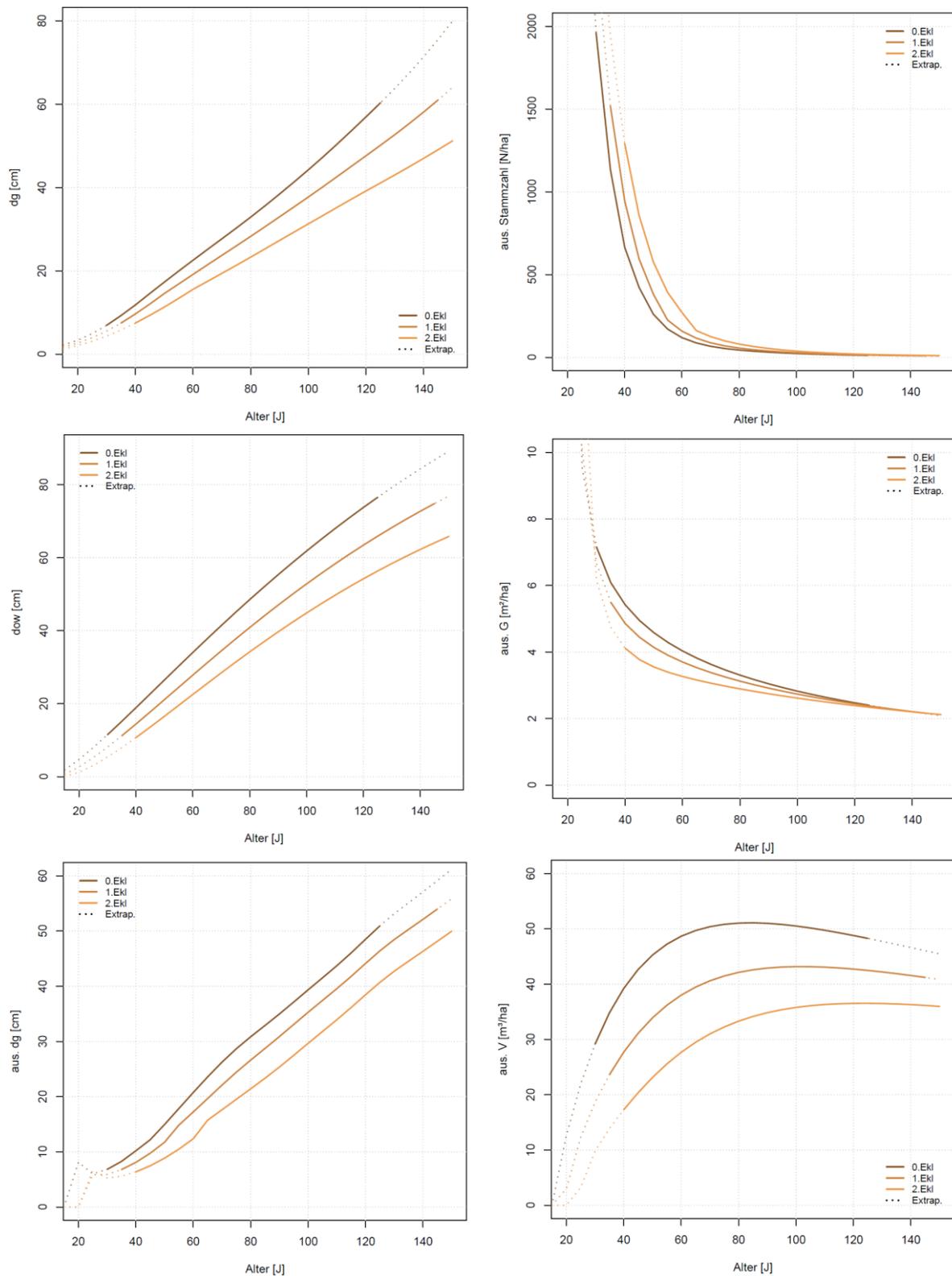


Abb. 4: Verläufe ausgewählter Parameter der neuen Buchenertragstafel (linke Spalte: Durchmesser des Grundflächenmittelstammes, Durchmesser des Weise'schen Oberhöhenstammes, ausscheidender Dg; rechte Spalte: ausscheidende Stammzahl pro ha, ausscheidende Grundfläche pro ha, ausscheidender Vorrat pro ha).

Für eine praxistaugliche Verwendung der Ertragstafeln sind Zuwachsreduktionsfaktoren notwendig. Die Herleitung der Zuwachsreduktionsfaktoren erfolgte ebenfalls simulativ, indem die Startbestände in unterschiedlichen Dichten aufgebaut und projiziert wurden. Dazu wurde jeder Startbestand wie für die Ertragstafelsimulation mit einer Korrektur der Durchmesserverteilung über Dg und D100 in Dichten von 0,1 bis 1,6 Bestockungsgraden zu der Bezugs-ertragstafel (gestaffelte Hochdurchforstung) aufgebaut. Der erzeugte Bestand wurde für die Dauer von 5 Jahren im Wachstum simuliert, wobei keine Eingriffe vorgenommen

wurden, kein Einwuchs projiziert sowie die Mortalitätsroutine vor dem Wachstum ausgeführt wurde. Der Zuwachs ergibt sich aus der Differenz der Volumina. Tab. 4 listet die Zuwachsreduktionsfaktoren für die fünf Baumarten über dem Bestockungsgrad, bezogen auf die Grundflächenhaltung der gestaffelten Durchforstung, auf.

Tab. 4: Zuwachsreduktionsfaktoren für die fünf Hauptbaumarten.

B°	Buche	Eiche	Fichte	Kiefer	Douglasie
0,1	0,15	-	0,13	0,12	0,14
0,2	0,30	0,37	0,26	0,23	0,27
0,3	0,42	0,37	0,38	0,37	0,39
0,4	0,51	0,49	0,50	0,51	0,50
0,5	0,60	0,60	0,61	0,61	0,60
0,6	0,70	0,69	0,70	0,70	0,69
0,7	0,79	0,78	0,79	0,79	0,77
0,8	0,87	0,86	0,87	0,87	0,85
0,9	0,94	0,94	0,95	0,94	0,93
<b>1,0</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
1,1	1,05	1,06	1,07	1,05	1,06
1,2	1,10	1,12	1,12	1,08	1,12
1,3	1,14	1,16	1,16	-	-

Die Zuwachsreduktionsfaktoren in Tab. 4 sind für den Fall gedacht, dass ein Bestand plötzlich in seiner Grundfläche abgesenkt wird oder dass die hohe Grundfläche eines bisher nicht ertragstafelkonform behandelten Bestandes, Bestockungsgrad > 1,0, schrittweise abgesenkt werden soll.

## 5. Validierung der Ertragstafeln

Anhand von ausgewählten Versuchsflächen wurden insbesondere die in den Ertragstafeln abgebildeten Zuwächse, die Gesamtwuchsleistung, die Durchmesserentwicklung und die entnommenen Nutzungsmassen validiert (Abb. 5; Liste der Versuchsfläche vgl. Anhang 4).

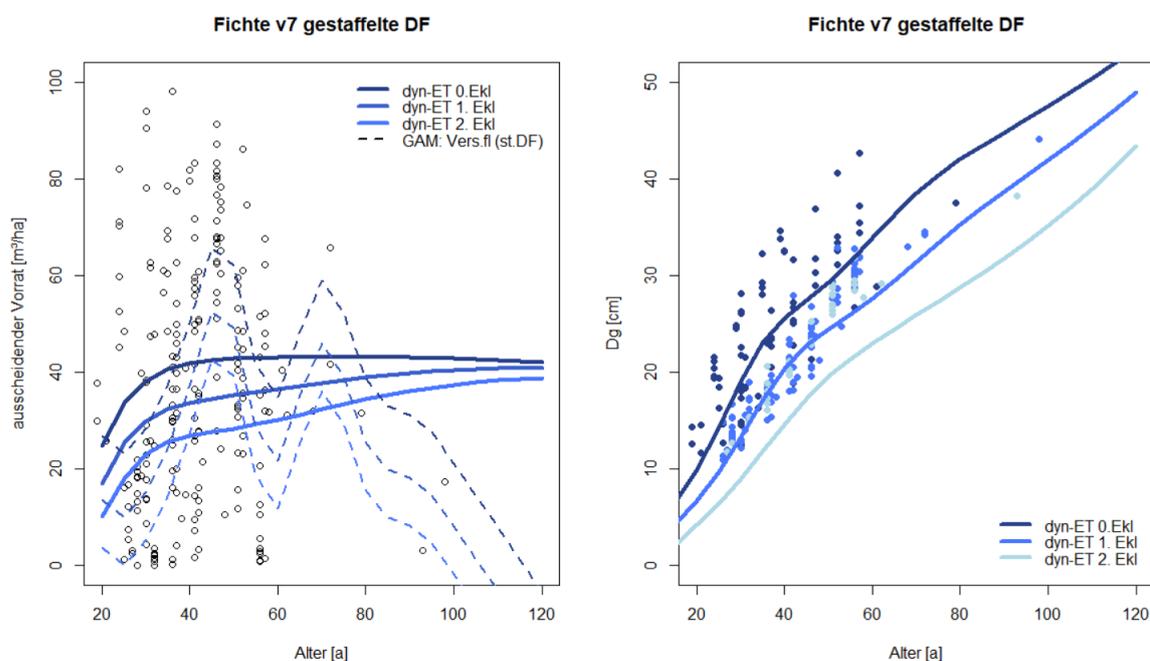


Abb. 5: Beispiel einer grafischen Validierung des ausscheidenden Vorrates (links) und des Dg (rechts) der neuen Fichten-Ertragstafel an Daten von ertragskundlichen Versuchsflächen für die 0., I. und II. Ertragsklasse (dargestellt als Punkte).

Bei der grafischen Validierung der Parameterverläufe der neuen Ertragstafeln mit Versuchsflächenbeobachtungen, wie in Abb. 5 beispielhaft dargestellt, muss die zum Teil recht unausgeglichene Belegung der Beobachtungen für die verschiedenen Bonitäten über dem Alter beachtet werden. Zudem sind die ausgewählten Versuchsflächen alle hochdurchforstungsartig, jedoch nur zu einem geringen Teil entsprechend dem Konzept einer gestaffelten Durchforstung behandelt worden. Dennoch war es dieser Art einer qualitativen Validierung möglich, unplausible Parameterwerte der Ertragstafeln zu identifizieren. So wurden beispielsweise in einem früheren Simulationslauf deutlich zu hohe Entnahmeholumina bei der Douglasie vorhergesagt, welche dann auf Grundlage der grafischen Validierung durch Simulationsanpassungen auf ein Niveau der Versuchsflächenbeobachtungen abgesenkt werden konnten.

Einen Überblick zum Zuwachsniveau der fünf Hauptbaumarten nach den neuen Ertragstafeln im Vergleich zu den Zuwächsen aus einem großen Datensatz von ertragskundlichen Versuchsflächen gibt Abb. 6.

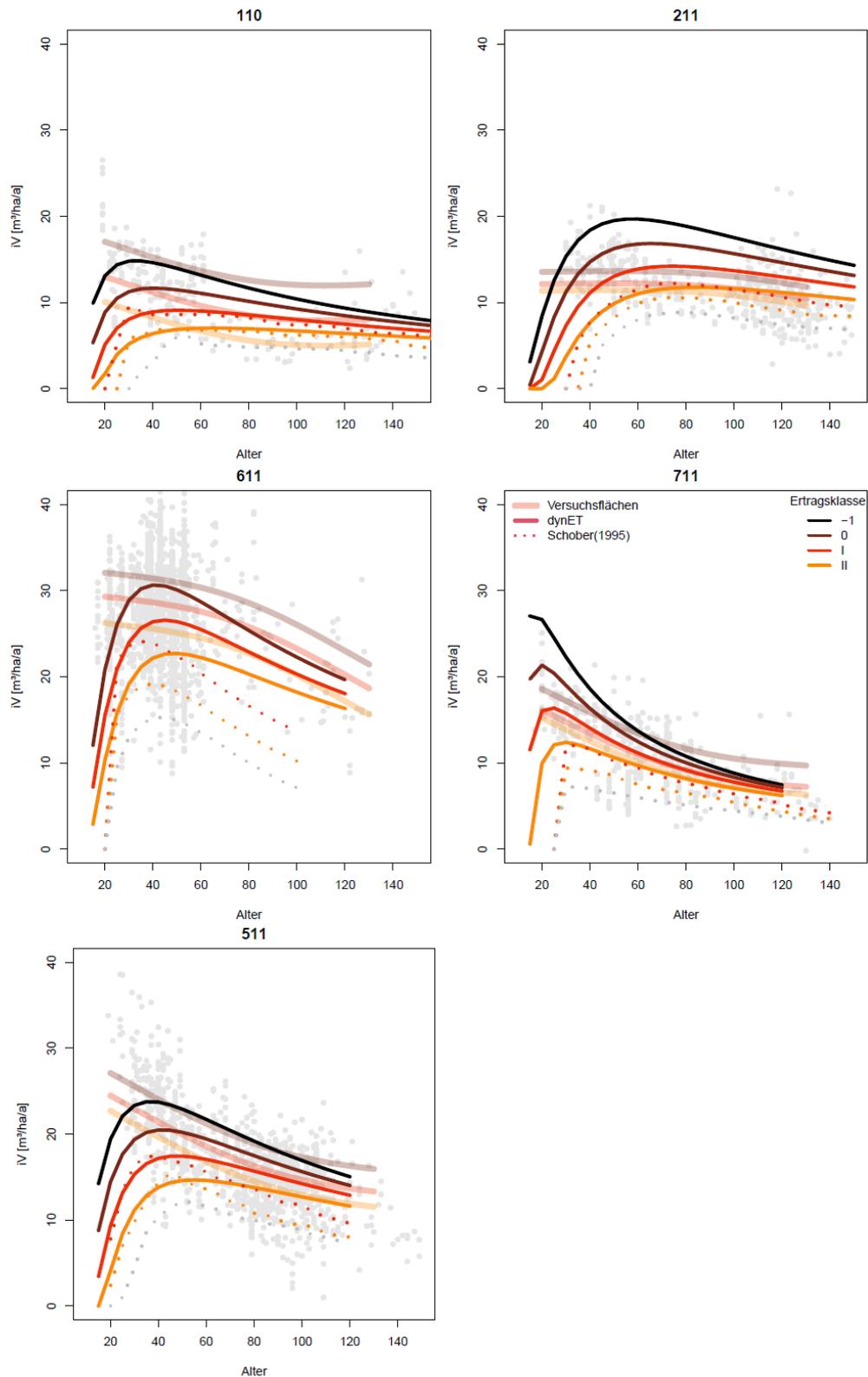


Abb. 6: Validierung des laufenden Zuwachses der neuen Ertragstafeln für Eiche (110), Buche (211), Douglasie (611), Kiefer (711) und Fichte (511) an Daten von ertragskundlichen Versuchsflächen sowie als Referenz die Zuwachsverläufe der Tafeln aus der Ertragstafelsammlung von Schober (1995).

Die beobachteten Zuwächse (graue Punkte) stammen aus ertragskundlichen Versuchen, die nach 1990 aufgenommen wurden, vollbestockte Reinbestände sind und keine extremen Bestandesbehandlungen einschließen (Abb. 6). Die Beobachtungen wurden mittels eines generalisierten additiven Modells (GAM) ausgeglichen. Die sich daraus ergebenden Verläufe sind nur als Anhalt zu verstehen, da die Verteilung der Bonitäten über dem Alter bei den Baumarten zum Teil sehr unausgeglichen ist. Insbesondere im jungen Alter zeigen die modellierten Versuchsflächenzuwächse deutlich höhere Zuwachswerte als die als weitere Referenz ebenfalls dargestellten Zuwachsverläufe der entsprechenden Ertragstafeln aus der Sammlung von

Schober (1995). Die dargestellten Zuwächse der neuen Ertragstafeln, der Versuchsflächen und der Schoberschen Referenz beziehen sich immer auf vollbestockte Bestände, jedoch ist bei ihrem Vergleich zu beachten, dass die Referenzgrundflächen zur Ermittlung der Bestockungsgrade unterschiedlich sind. Insgesamt decken die Zuwachsverläufe im dargestellten Bonitätsspektrum der neuen Ertragstafeln die Versuchsflächenbeobachtungen gut ab und liegen erwartungsgemäß zum Teil deutlich über den Verläufen der Schoberschen Referenz.

## 6. Fazit und Ausblick

Die Verläufe der Bestandesparameter in den neuen Ertragstafeln über dem Alter sind für alle fünf Hauptbaumarten biologisch plausibel. Sie sind in sich konsistent und entsprechen den Erwartungen bezüglich des gegenüber den Werten der Ertragstafeln in der Ertragstafelsammlung von Schober (1995) deutlich höheren Zuwachsniveaus. Außerdem spiegeln sie zudem das waldbauliche Behandlungskonzept einer gestaffelten Hochdurchforstung wider und konnten anhand von Versuchsflächendaten validiert werden.

Dennoch ließen sich bei der Aufstellung der Ertragstafeln nicht alle auftretenden Probleme gänzlich lösen. Dies betrifft zum einen das methodische Problem der Biaskorrektur bei den Zuwachsschätzungen, welches im Zusammenhang mit den bei den fünf Hauptbaumarten unterschiedlich ausbalancierten Versuchsflächendaten zu sehen ist. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Zuwachsschätzung auf Basis der Waldwachstumssimulation mit TreeGrOSS. Im Rahmen der Ertragstafelerstellung wurde das Biasproblem beim Zuwachs durch Anwendung von Korrekturfunktionen zunächst vorläufig gelöst (vgl. Zwischenbericht 2020). Zum anderen wurden die Bonitätsfächer der Ertragstafelsammlung Schober (1995) neu ausgeglichen, da die ursprünglich in TreeGrOSS genutzten Funktionen insbesondere im Extrapolationsbereich keine gute Anpassung aufwiesen. Hierzu wurden für Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer die Oberhöhenwerte mit einer Hossfeld-, und für Eiche mit einer Sloboda-Funktion an die Oberhöhenwerte der Ertragstafeln aus der Sammlung von Schober (1995) angepasst (Staupendahl 2021, siehe Anhang 5). Diese Funktionen zeigen eine hohe Flexibilität und verlaufen durch den Ursprung, was biologisch plausibel ist. Eine grundsätzlich wünschenswerte Neuparametrisierung der Wachstumsmodelle in TreeGrOSS unter Verwendung der Funktionen von Staupendahl (2021) war wegen des Arbeitsumfanges im Rahmen der Projektlaufzeit nicht mehr realisierbar. Dies ist jedoch vertretbar, weil die jeweiligen Simulationszyklen im Rahmen der Ertragstafelerstellung nur 30 Jahre betragen, so dass die Abweichungen zwischen dem neuen Oberhöhenverlauf und den als Prädiktor im Wuchsmodell verwendeten Oberhöhenwerten akzeptabel sind. Allein bei der Baumart Eiche kam es zu größeren Abweichungen, so dass für die Parametrisierung der Zuwachsfunktion im Modellbaukasten (vgl. Anhang 6) nur der erste 5-jährige Simulationsschritt genutzt wurde.

Insgesamt besteht somit in Teilen weiterer Forschungsbedarf. Die Grundidee der neuen Generation dynamischer Ertragstafeln, nämlich eine periodische Überarbeitung des Tafelwerkes in regelmäßigen Zeitintervallen von 10 bis 20 Jahren vorzunehmen, um methodische Fortschritte zu nutzen und die sich fortlaufend verändernden Umweltbedingungen mit ihre Auswirkungen auf die Standort-Leistungs-Beziehungen zu berücksichtigen, trägt diesen Umständen Rechnung.

## Literatur

- Assmann, E. (1961): Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien. 490 S.
- Bergel, 1985: Ertragstafel für Douglasie. In: Schober, R. 1987: Ertragstafeln wichtiger Baumarten. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.
- Dittmar, O.; Knapp, E. und Lembcke, G. 1986: DDR-Buchenertragstafel 1983. IFE-Berichte aus Forsch. u. Entwicklung 4
- Hansen, Jan, and Jürgen Nagel. 2014. *Waldwachstumskundliche Softwaresysteme Auf Basis von TreeGrOSS - Anwendung Und Theoretische Grundlagen*. Beiträge a. ed. Hermann Spellmann. Göttingen: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
- Jüttner, 1955: Ertragstafel für Eiche. In: Schober, R. 1987: Ertragstafeln wichtiger Baumarten. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.
- Lockow, K.-W. 2003: Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.) im norddeutschen Tiefland. Ertragstafel. Landesforstanstalt Eberswalde.
- Nagel, Jürgen. 1999. *Konzeptionelle Überlegungen Zum Schrittweisen Aufbau eines Waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland*. Schriften. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag.
- Niedersächsische Landesforsten 2021: Entscheidungshilfen zur Behandlung und Entwicklung von Buchenbeständen. [https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/common/veroeffentlichen/merkblaetter/NI\\_Entscheidungshilfen\\_Buchenbestaende.pdf](https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/common/veroeffentlichen/merkblaetter/NI_Entscheidungshilfen_Buchenbestaende.pdf) (Zugriff am 27.09.2021)
- NW-FVA 2018: Neuparametrisierung des Grundflächenzuwachsmo­dells in TreeGrOSS. Unveröffentlicht.
- Röhe, Peter, Karl-Willi Lockow, and Matthias Noack. 2019. *Ertragstafel Für Die Stieleiche (Quercus Robur L.)*. ed. Landesforst Mecklenburg-Vorpommern. cw Nordwest Media Verlagsgesellschaft.
- Schober, Reinhard. 1995. *Ertragstafeln Wichtiger Baumarten Bei Verschiedener Durchforstung*. 4th ed. Frankfurt am Main: J. D. Sauerländers Verlag.
- Schober, R. 1967: Ertragstafel für Buche. In: Schober, R. 1987: Ertragstafeln wichtiger Baumarten. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.
- Staupendahl, K. 2021: Mit der Hossfeld- und Sloboda-Funktion geschätzte Bonitätsfächer auf Basis der Daten der Ertragstafelsammlung Schober. Unveröffentlicht.
- Wenk, Günter; Römisch, Klaus; Gerold, Dorothea (1984): DDR-Fichtenertragstafel.
- Wiedemann, E. 1936/1942: Ertragstafel für Fichte. In: Schober, R. 1987: Ertragstafeln wichtiger Baumarten. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.
- Wiedemann, E. 1943: Ertragstafel für Kiefer. In: Schober, R. 1987: Ertragstafeln wichtiger Baumarten. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.

## Arbeitspaket 2

### 1. Motivation zur Untersuchung von Umsetzprozessen

Gängige, in der forstlichen Praxis eingesetzte Waldwachstumsmodelle wie MOSES (Hasenauer 1994), PROGNAUS (Sterba et al. 1995), SILVA (Kahn u. Pretzsch 1997, Pretzsch et al. 2006) und BWINPro bzw. TreeGrOSS (Nagel 1999, Hansen u. Nagel 2014) unterstellen, dass Einzelbäume gleicher sozialer Stellung auf gleich starke Veränderungen ihrer inter- bzw. intraspezifischen Konkurrenzsituation gleich stark reagieren. Die Veränderungen werden durch die jeweils verwendeten Konkurrenzindizes beschrieben. Die tatsächlichen individuellen Unterschiede, die genetisch oder kleinstandörtlich determiniert sein können, werden von den Modellen vereinfachend dadurch berücksichtigt, dass die Reststreuung zufällig auf den Durchmesser- und Höhenzuwachs der Einzelbäume verteilt wird. Dies impliziert jedoch, dass nur im Mittel aller Bäume die Streuung der Zuwächse richtig geschätzt wird, die Reststreuung jedoch prinzipbedingt baumindividuell nicht erklärend zugewiesen werden kann. Erschwerend kommt hinzu, dass im Simulator für jeden Projektionsschritt zufällig aus der um Null zentrierten Verteilung der Reststreuung gezogen wird und so der geschätzte Zuwachs eines Baumes mal um positive und mal um negative Reststreuungsbeiträge ergänzt wird. Eine längerfristig gerichtete Zuwachsänderung aus der unerklärten Komponente ist mit diesem Vorgehen nicht möglich, was jedoch für die Abbildung von Umsetzungsprozessen notwendig wäre.

Eine zweite Vereinfachung in den Modellansätzen besteht darin, dass bei Bäumen unterschiedlicher sozialer Stellung absolut gleiche Veränderungen der Konkurrenzindizes zu gleichen relativen Wachstumsreaktionen führen, wodurch das Reaktionsvermögen der vorherrschenden und beherrschten Bäume eher überschätzt wird (vgl. LOCKOW 1998, GUERICKE et al. 2006, NAGEL 2007). Eine ähnliche Problematik ergibt sich auch bei der unterschiedlich starken und schnellen Freistellung von Einzelbäumen in der Endnutzungsphase, in der die Bäume der herrschenden Schicht zwar vergleichbare Höhen haben, aber sehr unterschiedliche Kronengrößen und Kronenausformungen, von denen ihre Fähigkeit zur Umstellung nach Freistellung abhängt. Noch größer sind die Reaktionsunterschiede in der Endnutzungsphase zwischen den Bäumen der herrschenden und der beherrschten Bestandesschicht (vgl. BÖCKMANN 2016). Beide Phänomene werden bisher von den Wachstumssimulatoren gar nicht bzw. nur unbefriedigend nachgebildet.

Im Rahmen der Erstellung neuer Ertragstafeln mit Hilfe von Waldwachstumssimulationen durch TreeGrOSS war es ein Ziel dieses Arbeitspaketes, realitätsnähere Durchmessererschätzungen durch Einbeziehung von Umsetzungsprozessen zu gewährleisten.

#### *1.1 Definition von Umsetzprozessen*

Wie bereits in einer Vielzahl von Untersuchungen zu verschiedenen Baumarten beschrieben, kann an Einzelbäumen das Phänomen des „Umsetzens“ festgestellt werden (Busse 1930, Erteld 1950, Magin 1952, Weck 1958, Hengst 1962, Seibt und Sloboda 1978, Spellmann und Diest 1990). Das „Umsetzen“ wird als eine Änderung der „Leistung“ eines Stammes im Verhältnis zur Leistung der übrigen Bestandsmitglieder bzw. als Änderung der „Geltung“ diesen gegenüber als erstes von Busse (1930) definiert. Darunter verstanden wurden in erster Linie soziologische Veränderungen, die Busse an der (Kronenschicht-)Klasse festmachte. Dieser Definition schlossen sich sowohl Weck (1958) als auch Hengst (1962) in ihren Untersuchungen an. Schober (1988) erweiterte diese Definition um die Betrachtung von qualitativen Veränderungen anhand der Vitalität, der Schaftgüte und des Gesundheitszustandes eines Baumes. Somit lässt sich festhalten, dass das „Umsetzen“ als Veränderung des Einzelbaumes im Verhältnis zu einer Klasse bzw. einem Kollektiv innerhalb des Bestandes oder zum gesamten Bestand verstanden werden kann.

Weiterhin widmeten sich Autoren vor allem den Ursachen des „Umsetzens“, die zum einen durch endogene genetische Individualeigenschaften bedingt und zum anderen durch äußere Umwelteinflüsse, wie Wind-, Dürre-, Windwurf-, Schneebruch-, Immissions-, Pilz oder Insektenschäden (Schober 1988), der Begründung des Bestandes, standörtlichen Gegebenheiten sowie inter- und intraspezifischen Konkurrenz in ihrer Intensität und ihrem Ausmaß gesteuert werden (Magin 1952, Weck 1958, Hengst 1962, Holten und Diest

1996). Zudem ändern sich Intensität und Ausmaß des „Umsetzens“ über dem Alter, sodass in der Jugend- und Dickungsphase sowie in mittelalten Beständen Umsetzprozesse am stärksten sind (Busse 1930, Erteld 1950, Hengst 1964, Schröck 1957, Weck 1958, Seibt und Sloboda 1978) und ältere Bestände ausgeglichenerer Zuwachsverläufe zeigen (Busse 1930, Erteld 1950, Weck 1958). Laut Abetz (1989) kann das Phänomen des Umsetzens weder erklärt, noch beeinflusst werden.

Neben der Definition und den Ursachen für Umsetzprozesse wurde in der Literatur ebenso untersucht, welche Individuen in ihrem Rang im Bestand unter welchen Umständen auf- oder absteigen. So beobachtet Magin (1952) in bayrischen Fichtenversuchsflächen mit zunehmendem Durchforstungsgrad einen größeren Anteil positiv aufsteigender Individuen, während der Anteil negativ umsetzender Individuen abnimmt. Weck (1958) fasste die Untersuchungen Busses (1930) rechnerisch zusammen und kam zu der Erkenntnis, dass 20-67 % der anfangs 100 stärksten Bäume im Laufe der Zeit negativ abgestiegen sind.

Diese Quellen lassen erkennen, dass das „Umsetzen“ der Einzelbäume in der älteren forstlichen Literatur bereits Beachtung gefunden hat, jedoch bisher eine unvollständige Betrachtungsgrundlage zur Identifikation von Umsetzprozessen genutzt wurde. So untersucht Erteld (1950) beispielsweise die Bäume anhand ihrer Durchmesserklassen, ohne weitere wachstumsrelevante Merkmale gleichzeitig zu berücksichtigen. Auch andere Autoren folgen diesem Beispiel und nutzen den BHD als quantitatives Merkmal zur Messung von Umsetzprozessen (Hengst 1962, Seibt und Sloboda 1978, Merkel 1978, Holten und Diest 1996). Die Zuordnung der Individuen in eine spezifische Klasse nur auf Basis des BHD stellt eine stark vereinfachte Grundlage zur Vergleichbarkeit der Einzelbäume dar, die bei der Berücksichtigung weiterer Kennwerte, wie dem Alter, der Baumhöhe oder der Kronengröße möglicherweise nicht mehr gegeben wäre. Wächst ein Baum im Verhältnis zu den übrigen Bäumen seiner Klasse positiv oder negativ aus dieser heraus, können die Gründe dafür all jene sein, die bei einer Klassifikation der Bäume nicht berücksichtigt wurden. In der Waldwachstumsbibliothek TreeGrOSS (Hansen u. Nagel 2014) wird der Grundflächenzuwachs als Funktion von Kronendimensionen, Baumhöhe, Alter und Konkurrenzsituation geschätzt. Folglich können bislang unerklärte, gerichtete, baumindividuelle Wachstumsprozesse, die zum Umsetzen bzw. der Rangerhaltung führen, nur über die zufällige Reststreuung modelliert werden.

Im Rahmen dieses Projektes sollten Umsetzprozesse im Waldwachstumssimulator besser abgebildet werden. Insofern musste das Umsetzen über Wachstumsprozesse beschrieben werden. Daher wurde Umsetzen als eine **relevante, langfristige Veränderung des Einzelbaumzuwachses im Vergleich zum mittleren Zuwachs des Bestandeskollektivs** definiert.

### *1.2 Ziele des Teilvorhabens*

Das erste Ziel war ein Nachweis von Umsetzprozessen entsprechend der obigen Definition. Dazu wurde ein deskriptiver Ansatz basierend auf Daten von undurchforsteten Versuchsflächen gewählt, um Umsetzen ohne anthropogene Einflüsse durch waldbauliche Eingriffe zu identifizieren. Das zweite Ziel war die Erstellung einer generellen Methode zur Berücksichtigung von Umsetzprozessen im Waldwachstumssimulator. Dazu wurde sich in einem inferenzstatistischen Ansatz auf jene Umsetzursachen beschränkt, welche nicht über fixe Parameter wie beispielsweise das Alter, die Baumhöhe, die Kronengröße oder die Konkurrenz erklärt werden können. D.h., es wurde in der zufälligen Reststreuung des ursprünglichen Grundflächenzuwachsmo­dells in TreeGrOSS (Hansen und Nagel 2014) nach gerichteten baumindividuellen Wachstumseffekten gesucht. Um diesen Unterschied deutlich zu machen und eine klare Trennung vom ursprünglichen Terminus des „Umsetzens“ zu gewährleisten, wurden diese Ergebnisse der nicht direkt messbaren Umsetzeffekte als „**individuelle Wachstumseffekte**“ bezeichnet.

## 2. Nachweis des „Umsetzens“ ohne anthropogene Einflüsse

Um einen Nachweis über die Existenz des „Umsetzens“ zu erbringen, wurden aus dem Versuchsflächennetz der NW-FVA Fichten- sowie Buchenbestände ausgewählt, die über einen langen Zeitraum von mindestens 25

Jahren aufgenommen wurden. Zusätzlich richtete sich die Auswahl der Flächen danach, ob die Grundfläche der jeweiligen Bestände im jeweiligen Bestandesalter über dem 80 %-Quantil der maximalen Grundflächenhaltung nach Wördehoff (2016) lag. Dieses Kriterium wurde gewählt um zu gewährleisten, dass nur Parzellen selektiert wurden, die keine oder nur sehr geringe anthropogene Einflüsse (forstliche Eingriffe) und größere Störungen durch natürliche Ausfälle erfahren haben. Die dem Untersuchungsdatensatz zu Grunde liegenden Bestände waren somit entweder Nullflächen oder Parzellen, welche schwach niederdurchforstet wurden. Damit sollte sichergestellt werden, dass das „Umsetzen“ isoliert und ohne die Auswirkungen von Durchforstungseffekten betrachtet werden kann.

Diese Parzellen wurden anhand des beobachteten Durchmesserzuwachses einer in der Regel fünfjährige Wachstumsperiode analysiert. Hierfür wurden zunächst die Werte in Jahreszuwächse umgerechnet und ein einfacher gleitender Mittelwert aus zwei Jahreszuwächsen gebildet, um den potentiellen Auswirkungen von Messfehlern entgegen zu wirken und ausschließlich langfristige Veränderungen zu betrachten. Um das „Umsetzen“ gemäß der Definition von Busse (1930) im Verhältnis zum Bestandeskollektiv zu identifizieren, wurden die Durchmesserzuwächse des Weiteren durch eine Normierung in die Durchmesserstruktur des Bestandeskollektivs eingegliedert. Als Ergebnis konnte die Entwicklung der Zuwächse des Einzelbaumes im Verhältnis zum Bestandesmedian des Durchmesserzuwachses betrachtet werden. Zuletzt wurde ein Grenzwert (+/- 0,5) gewählt, der eine Einteilung von Bäumen in positiv oder negativ umsetzende bzw. indifferent wachsende Individuen ermöglichte (vgl. Kistemaker et al. 2018).

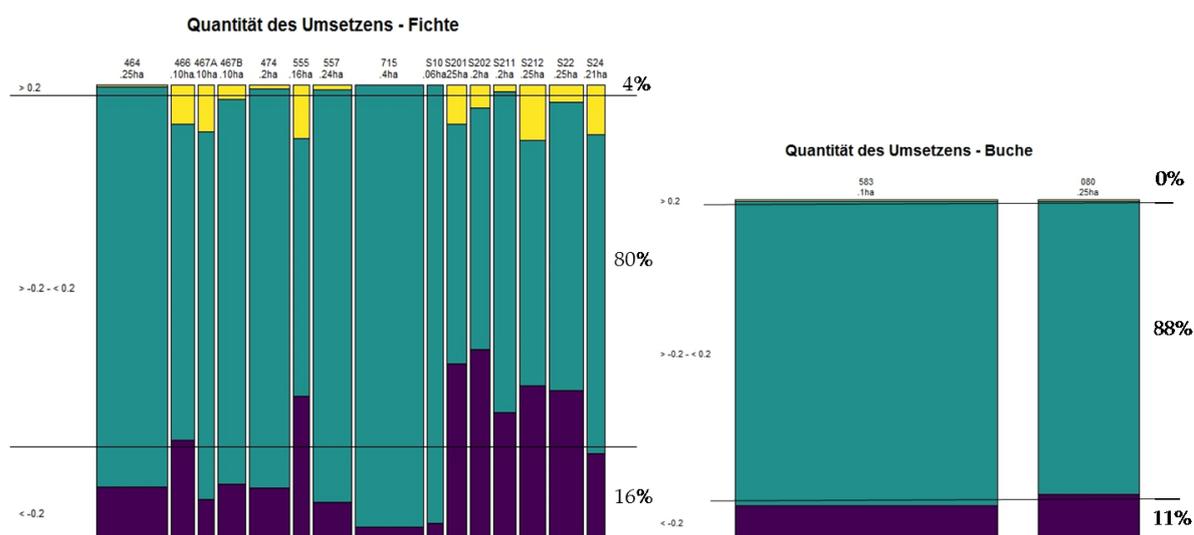


Abb. 7: Quantität des Umsetzens für die ausgewählten 15 Fichtenparzellen (links) und 2 Buchenparzellen (rechts). gelb = positiv umsetzend, violett = negativ umsetzend, türkis = indifferent.

Mit Hilfe der beschriebenen Methodik konnten für die untersuchten Fichtenparzellen (n=15) für 4 % der Bäume positive sowie für 16 % negative Umsetzungsprozesse ermittelt werden (Abb. 7). In den Buchenparzellen (n=2) wurden 11 % negative Umsetzer bei 89 % indifferent wachsenden Bäumen identifiziert. Anhand dieser Ergebnisse wurde somit die Existenz des Umsetzens ohne anthropogene Einflüsse für die Baumarten Fichte und Rotbuche belegt (Kistemaker et. al. 2018).

### 3. Modellierung baumindividueller Wachstumseffekte

Die Modellierung baumindividueller Wachstumseffekte erforderte eine umfangreiche Datenbasis langer Zeitreihen. Die Methodik der Modellierung wurde an Daten der Baumart Fichte entwickelt.

### 3.1 Material

Die Auswahl von Parzellen aus dem Versuchsflächennetz der NW-FVA orientierte sich ausschließlich an der Selektion von Flächen, deren Bäume lange Beobachtungsreihen von mindestens 40 Jahren aufweisen. Da nach einer Quantifikation der „individuellen Wachstumseffekte“ diese in der Grundflächenzuwachsfunction der TreeGrOSS-Bibliothek implementiert werden sollten, wurde der empirische Grundflächenzuwachs der Einzelbäume als Zielgröße bei der Modellierung verwendet. Anhand einer Quantilselektion wurde innerhalb der Bestände im jeweiligen Alter die größten und kleinsten 0,01 % der Grundflächenzuwächse als Ausreißer von der Analyse ausgeschlossen (vgl. Rohner et. al. 2017). Die Untersuchungen konnten somit auf der Grundlage eines Datensatzes von insgesamt 31 Fichtenbeständen mit 3376 Bäumen und einer Gesamtzahl von 33.227 beobachteten Zuwächsen gestützt werden. In Tab. 5 wird der Datensatz anhand einiger Merkmale dargestellt.

Tab. 5: Bestandescharakteristika der verwendeten langfristigen Fichten-Versuchsflächen.

Nr.	Anzahl der Aufnahmen	Erste/letzte Aufnahme	Altersspanne	Bestandestyp	Schichten	Durchforstungsart nach DVFFA (1902)
1	8-14	1934-2007	73	misch	2	E
2	8-15	1934-2007	73	misch	2	E
3	8-9	1931-2010	79	rein	1	Schn. Mäiß.
4	8-9	1931-2010	82	rein	2	A
5	8-11	1928-2005	77	rein	1	Schn.
6	8	1928-1990	62	rein	1	A
7	8-13	1928-2000	72	rein	2	D
8	8-13	1928-2000	72	rein	2	A
9	8-14	1928-2005	77	rein	2	C
10	8-9	1961-2008	47	rein	1	B
11	8-9	1961-2008	47	rein	1	B
12	8-14	1929-1997	68	misch	2	D
13	8-14	1929-1997	68	misch	1	B
14	8-9	1929-1990	61	rein	1	C
15	8-9	1929-1990	61	rein	1	A
16	8-9	1929-1990	61	rein	2	D
17	8-9	1948-2005	57	misch	2	A
18	8-13	1929-2000	71	misch	1	E
19	8-13	1929-2000	71	rein	1	B
20	8	1953-2010	57	rein	1	B
21	8	1953-2010	57	rein	1	B
22	9-11	1951-2007	56	rein	1	A
23	8-9	1951-2010	59	misch	2	Gest. Df.
24	8	1964-2009	45	misch	1	C
25	8	1973-2010	37	rein	1	A
26	8	1926-2007	81	rein	1	Schn.
27	8	1926-2007	81	rein	1	A
28	8	1973-2008	35	rein	1	C
29	8-9	1968-2008	40	rein	1	B
30	8-9	1968-2008	40	rein	1	B
31	8-9	1968-2008	40	rein	1	A

## 3.2 Methoden

### 3.2.1 Grundflächenzuwachsfunction als Basismodell

Als methodischer Ausgangspunkt diente das in TreeGroSS (Hansen und Nagel 2014) implementierte Modell zur Schätzung des Grundflächenzuwachses. In Anlehnung an das Modell Prognosis (Wykoff et al. 1982) wurden die Koeffizienten über eine multiple lineare Regression geschätzt und mit der folgenden Gleichung der fünfjährige Grundflächenzuwachs  $\mu^a$  des jeweiligen Einzelbaumes  $i$  zum Zeitpunkt  $j$  bestimmt (Münder 2006):

$$\mu_{ij}^a = \exp(\beta_0 + \beta_1 \log(x_{1,i,j}) + \beta_2 \log(x_{2,i,j}) + \beta_3 x_{3,i,j} + \beta_4 x_{4,i,j}) \quad [1]$$

Es wurden normalverteilte Grundflächenzuwächse angenommen, bezeichnet als  $y_{i,j} \sim N(\mu_{i,j}^a, \sigma_{i,j}^a)$ . Es gilt:  $y_{i,j} = \mu_{i,j}^a + \epsilon_{i,j}^a$  mit  $\epsilon_{i,j}^a \sim N(0, \sigma_{i,j}^a)$ . Hierbei beschreibt  $x_1$  den quadratischen Paraboloid der Kronenmantelfläche [m<sup>2</sup>],  $x_2$  das Baumalter [in Jahre],  $x_3$  den positionsunabhängigen Konkurrenz-Index C66 (Wensel u. Koehler 1987) und  $x_4$  den positionsunabhängigen C66 nach der Durchforstung (Freistellungseffekt) (vgl. Nagel 1999). Der Koeffizient der Kronenmantelfläche ergibt sich seinerseits aus einer Funktion der Kronenbreite und dem Kronenansatz. Die Kronenbreite wird als eine Funktion des BHD bestimmt und der Kronenansatz als eine Funktion der Baumhöhe, des BHD sowie der Bonität. Über die Kronenansatzhöhe wird somit ein Bezug zum Höhenmodell und damit der Einfluss des Standortes bei der Bestimmung des Grundflächenzuwachses gewährleistet.

### 3.2.2 Neuparametrisiertes Grundflächenzuwachsmoell – ICG (individual constant growth)

Der Datensatz zur Parametrisierung des Grundflächenzuwachsmoells von  $\mu_{ij}^a$  unterscheidet sich von dem in dieser Untersuchung herangezogenen Daten (Tab. 5) insofern, als dass für das in Funktion [1] beschriebene Basismodell lediglich Messungen ab dem Jahr 1970 verwendet wurden, um das aktuelle Zuwachsniveau bei der Schätzung des Grundflächenzuwachses zu berücksichtigen (Pretzsch et al., 2014; Spiecker et al., 1996). Aus diesem Grund wurde das Basismodell unter Berücksichtigung eines globalen Interzept mit Hilfe des neuen Datensatzes (Tab. 5) unter sonst gleichen Annahmen wie in Gl. 1 für jeden einzelnen Bestand ( $n = 31$ ) neu parametrisiert, um diesen Niveauunterschied auszugleichen.

$$\mu_{ij}^b = \exp(\beta_0^b + \log(\mu_{ij}^a)) \quad [2]$$

Im weiteren Verlauf wird das in Gl. 2 aufgeführte Modell als „ICG“ (individual constant growth model) bezeichnet. Mit den geschätzten Grundflächenzuwächsen sowie Residuen dieses Modells wurden die im Rahmen dieser Untersuchung konzipierten Modellerweiterungen verglichen.

Dieser ICG-Modellansatz berücksichtigt jedoch nicht, dass der Datensatz einer hierarchisch verschachtelten Struktur unterliegt (Pedersen et al. 2019). Die gemessenen Grundflächenzuwächse liegen als sich wiederholende Messungen eines Baumes innerhalb eines jeweiligen Bestandes vor. Aufgrund dieser Datenstruktur ist davon auszugehen, dass die einzelnen Messungen innerhalb von Beständen und für einzelne Bäume korreliert und die resultierenden Residuen des Basismodells nicht unabhängig voneinander sind (Schilzeth and Nakagawa 2013). Eine mangelnde Berücksichtigung der strukturellen Gruppierungseinheiten aus Beständen und Einzelbäumen führt zu einer Unterschätzung der Standardfehler der Regressionskoeffizienten und damit zu einer Überschätzung der statistischen Signifikanz (Fahrmeir et al., 2013).

### 3.2.3 Modell mit baumindividueller linearer Wachstumskonstante - ILG (individual linear growth)

Die Formulierung der Grundflächenzuwachsfunction als generalisiertes lineares gemischtes Modell (GLMM) mit einem bestandes- sowie baumspezifischen Interzept, wie auch einem bestandes- sowie baumspezifischen Steigungsparameter, ist eine Möglichkeit die hierarchisch verschachtelte Struktur des Datensatzes zu berücksichtigen. Eine Erweiterung des Basismodells (Gl. 2) ergibt sich somit wie folgt:

$$\mu_{i,j}^c = \exp\left(\beta_0^c + \log(\mu_{ij}^a) + \sum_{l=1}^{standID} \left(I_{\{n_{standID}=k\}} \cdot (\gamma_{0,k}^{stand} + \gamma_{1,k}^{stand} \cdot x_{5,i,j})\right) + \sum_{l=1}^{treeID} \left(I_{\{n_{treeID}=i\}} \cdot (\gamma_{0,i}^{tree} + \gamma_{1,i}^{tree} \cdot x_{5,i,j})\right)\right) \quad [3]$$

Der Erwartungswert der Grundflächenzuwachs  $\mu^c$  von Baum i zum Zeitpunkt j wird nunmehr unter Verwendung eines globalen Interzept  $\beta_0^c$ , dem Erwartungswert  $\mu_{ij}^a$ , sowie bestandesspezifischen Zufallseffekten für den Einzelbestand k mit  $\gamma_0^{stand}; \gamma_1^{stand}$  und zuletzt baumspezifische Zufallseffekten für den Einzelbaum i mit  $\gamma_0^{tree}; \gamma_1^{tree}$  geschätzt. Die Zufallseffekte werden jeweils durch eine Indikatorfunktion bedingt, welche l=1 ist, wenn die Bedingung im Index erfüllt wird. Die bestandes- und baumspezifischen Koeffizienten  $\gamma_1^{stand}$  und  $\gamma_1^{tree}$  werden als Funktion des um den Mittelwert des Gesamtdatensatzes zentrierten Baumalters  $x_5$  (vgl. Bell et al. 2017) von Baum i zum Zeitpunkt j geschätzt. Für die Zufallseffekte gilt die Annahme, dass  $\gamma_{0,k}^{stand} \sim N(0, \sigma_{\gamma_0^{stand}})$ ;  $\gamma_{1,k}^{stand} \sim N(0, \sigma_{\gamma_1^{stand}})$  und  $\gamma_{0,i}^{tree} \sim N(0, \sigma_{\gamma_0^{tree}})$ ;  $\gamma_{1,i}^{tree} \sim N(0, \sigma_{\gamma_1^{tree}})$ . Die Annahmen bezüglich der Verteilung der Grundflächenzuwächse sowie der Residuen aus dem Basismodell werden für das GLMM übernommen.

Diese Erweiterung des Basismodells ermöglicht jedem Bestand und jedem Baum ein individuelles Grundflächenzuwachs-niveau ( $\gamma_0^{stand}; \gamma_0^{tree}$ ) sowie eine spezifische Wachstumsrate ( $\gamma_1^{stand}; \gamma_1^{tree}$ ), welche als mit dem Alter monoton sinkend oder steigend angenommen wird. Unter gleichzeitiger Formulierung von  $\mu_{ij}^b$  als Modellkonstante wird über die bestandes- sowie baumspezifischen Parameter  $\gamma_0$  und  $\gamma_1$  die systematische Messabweichung zum beobachteten Grundflächenzuwachs  $y_{i,j}$  geschätzt. Dieser Ansatz wird als ILG-Modell (individual linear growth model) bezeichnet.

### 3.2.4 Modell mit baumindividuellem nicht-linearen Wachstumsverlauf - ISG (individual smooth growth)

Eine weitere Möglichkeit der Modellerweiterung erfolgt unter der Annahme, dass die bestandes- sowie baumspezifischen Erwartungswerte der Grundflächenzuwächse einen komplexeren Verlauf als Funktion der Zeit darstellen. In diesem Fall wird der lineare Effekt der Zeit auf den Grundflächenzuwachs durch eine Glättungsfunktion der Zeit ersetzt.

$$\mu_{i,j}^d = \exp\left(\beta_0^d + \log(\mu_{ij}^a) + \sum_{l=1}^{standID} \left(I_{\{n_{standID}=k\}} \cdot (f_{ij}^{stand}(x_{5,i,j}))\right) + \sum_{l=1}^{treeID} \left(I_{\{n_{treeID}=i\}} \cdot (f_{ij}^{tree}(x_{5,i,j}))\right)\right) \quad [4]$$

In diesem Fall errechnet sich für jeden Bestand k sowie Baum i nicht nur ein einzelner Koeffizient  $\gamma_0$  und  $\gamma_1$  für das Grundflächenzuwachs-niveau sowie die Wachstumsrate, sondern für jeden Bestand k sowie Baum i eine eigene Glättungsfunktion  $f(x_5)$  in Abhängigkeit vom Alter [in Jahren] zum Zeitpunkt j. Dieser Ansatz eines verallgemeinerten additiven gemischten Modells (GAMM) wird im weiteren Text als ISG-Modell (individual smooth growth model) bezeichnet.

Jede Glättungsfunktion setzt sich wiederum zusammen aus einer Anzahl m an Basisfunktionen b, von denen jede einen Koeffizienten  $\beta_m$  besitzt (Simpson 2018):

$$f(x_5) = \sum_{m=1}^{stand;tree} b_m(x_5) \beta_m \quad [5]$$

Gegenüber dem ILG-Ansatz können unter Verwendung des ISG-Ansatzes neben langfristigen individuellen Wachstumseffekten auch kurzzeitige Wachstumsunterschiede quantifiziert werden.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die baumspezifischen Grundflächenzuwächse für jeden einzelnen Bestand (n=31) getrennt berechnet. Somit gilt für die bestandsspezifische Indikatorfunktion  $I=0$ , sodass lediglich die baumspezifischen Zufallseffekte  $\gamma_0^{tree}; \gamma_1^{tree}$  beziehungsweise  $f_{i,j}^{tree}(x_{5,i,j})$  berücksichtigt werden.

Alle Modelle wurde mit Hilfe der statistischen Programmiersprache und Entwicklungsumgebung von R (R Core Team, 2020) unter der Verwendung der mgcv-Bibliothek (Wood, 2017) parametrisiert.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Reduktion des Modellfehlers

Für den Vergleich des ILG- und ISG-Ansatzes untereinander sowie mit dem ICG-Ansatz wurde die mittlere quadratische Abweichung (MSE) für jedes Bestandesmodell (n = 31) bestimmt und jeweils durch die MSE des ICG-Modells geteilt. Somit wurde eine „relative Modellverbesserung“ errechnet.

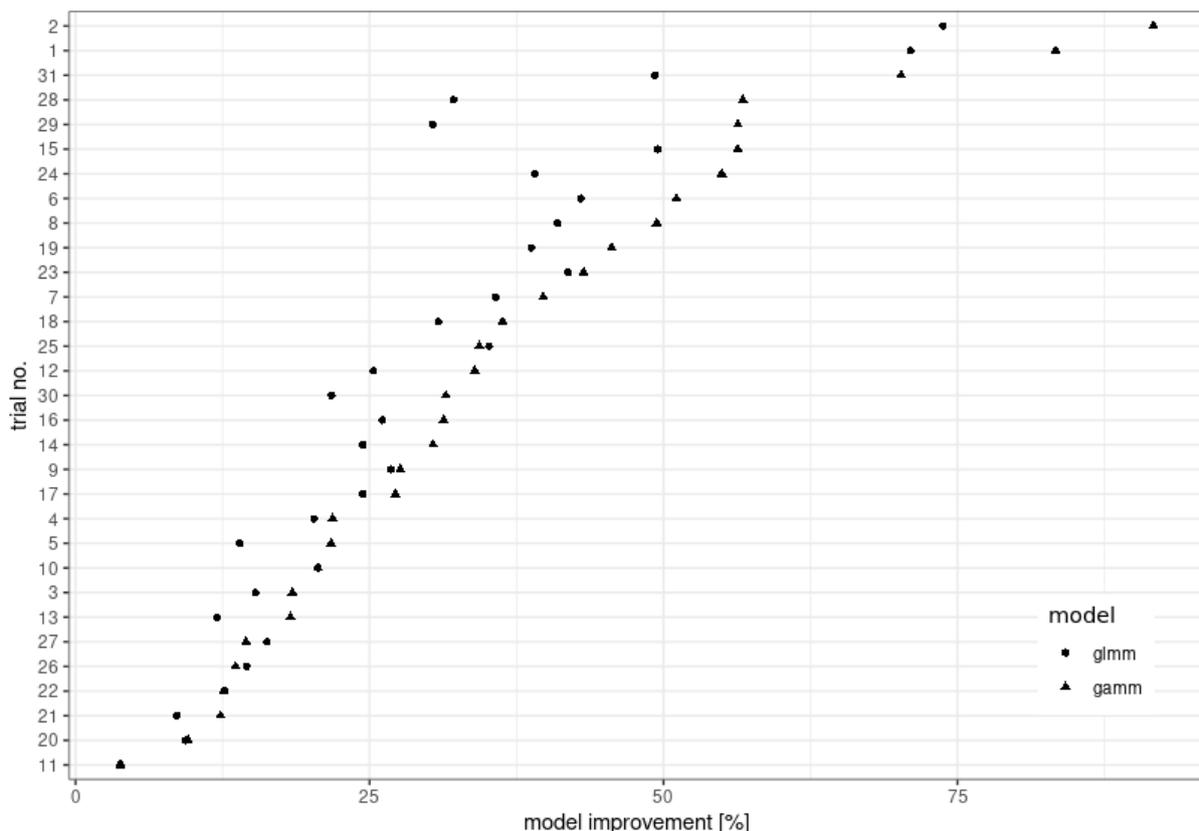


Abb. 8: Modellverbesserung gegenüber dem Basismodell ICG (glmm ist das ILG-Modell, gamm ist das ISG-Modell).

Abb. 8 zeigt, dass der ISG-Ansatz in fast allen Beständen (trial no.) eine im Vergleich zum ILG-Ansatz größere Reduktion der Fehlerterms und somit Verbesserung der Modellschätzung (model improvement) bewirkt. Besonders groß fällt die Verbesserung in den Beständen 1 und 2 aus. In den Beständen 10, 11, 20, 21, 26 und 27 kann keine größere Modellverbesserung durch den komplexeren ISG-Ansatz erzielt werden. Weiterhin

lässt sich mit Blick auf Tab. 5 erkennen, dass die relative Modellverbesserung der Einzelbestandesmodelle mit abnehmender Intensität forstlicher Eingriffe zunimmt. So weisen beispielsweise Bestände mit einem C-Grad (5, 3) tendenziell geringere Modellverbesserungen auf als A-Grade (31, 29, 15).

Um dieses Ergebnis zu prüfen, wurden aus dem Gesamtdatensatz die einschichtigen Reinbestände selektiert, deren Grundflächenzuwächse als ILG oder ISG-Ansatz parametrisiert werden konnten. Ausgeschlossen wurden die Bestände 20 und 21 (Düngungsversuche). Für die ausgewählten Bestände ( $n = 13$ ) wurde die relative Modellverbesserung der Einzelbestandesmodelle zum Zeitpunkt der Aufnahme  $t$  bestimmt. In Abb. 9 werden die Werte der relativen Modellverbesserung über den jeweiligen Bestockungsgraden zum Zeitpunkt  $t$  abgetragen.

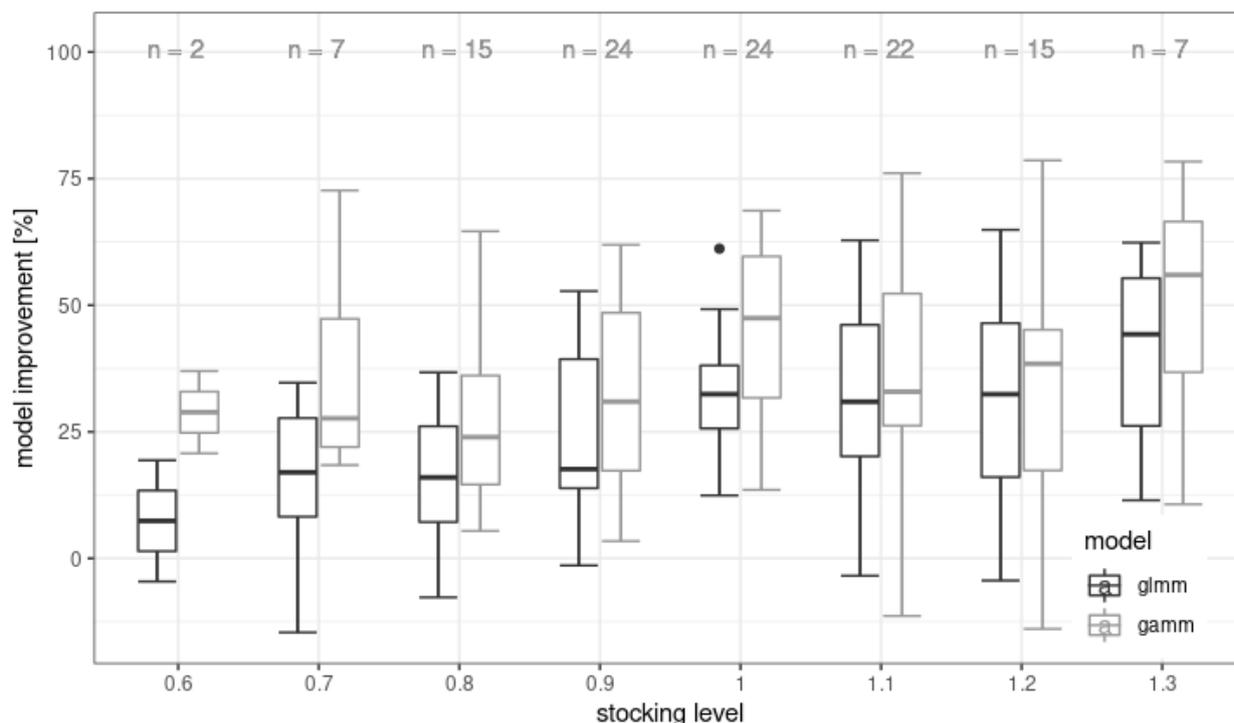


Abb. 9: Modellverbesserung bei unterschiedlichen Bestockungsgraden (glmm ist das ILG-Modell, gamm ist das ISG-Modell).

Beide Modellansätze zeigen mit zunehmendem Bestockungsgrad eine wachsende Modellverbesserung, wobei dieser Zusammenhang ab einem Wert von 1.0 inkonsistenter wird und die Varianz der Modellverbesserung zunimmt (Abb. 9). Vor allem im Vergleich der Whisker weist dabei das ISG-Modell im Vergleich zum ILG-Modell eine größere Variabilität der Werte auf. Die Interpretation der Varianzen im Vergleich der unterschiedlichen Bestockungsgrade innerhalb eines Modells kann auf Grund schwankender Stichprobengrößen  $n$  nicht vorgenommen werden.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Modellverbesserung bei einer zunehmenden Bestandesdichte mit zunehmendem Wert des einzelbaumbezogenen C66-Koeffizienten steigt. Um diese Hypothese zu stärken, wurde für jeden Baum des Gesamtdatensatzes ( $n = 3376$ ) eine relative Modellverbesserung auf Basis des MSE sowie ein mittlerer C66-Koeffizient errechnet, deren Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) für das ILG bei  $r = 0.39$  ( $p < 0.001$ ) und für das ISG bei  $r = 0.42$  ( $p < 0.001$ ) liegen.

#### 4.2 Verbesserung der Schätzgenauigkeit

Wie aus den vorhergehenden Abb. 8 und 9 ersichtlich ist, zeigen die beiden Modellansätze besonderes in dichten Versuchsflächen eine verstärkte Reduktion vom Modellfehler des Grundflächenzuwachsmodells. Um die Wachstumsverläufe der Bäume in stärker durchforsteten Parzellen zu untersuchen, wurden für die Bestände 2 und 3 die empirischen periodisch jährlichen Grundflächenzuwächse (pbai) für jeweils zehn Bäume über dem jeweiligen Aufnahmejahr aufgetragen. Bestand 2 (Abb. 10) weist hierbei unter dem als E-Grad

durchforsteten Eichenschirm eine hohe Bestandesdichte auf, während Bestand 3 (Abb. 11) als einschichtiger Fichtenreinbestand bei einem E-Grad ein lockereres Kronendach besitzt.

Die geschätzten Grundflächenzuwächse des ICG, ILG sowie ISG wurden neben dem empirischen periodisch jährlichen Grundflächenzuwachs abgebildet. Die rotgepunktete vertikale Linie markiert exemplarisch einen Durchforstungseingriff. Die Ordinaten beider Abb. 10 und 11 wurden im Bereich der größten Werte gestaucht, um die Darstellbarkeit der kleineren Grundflächenzuwachswerte zu verbessern.

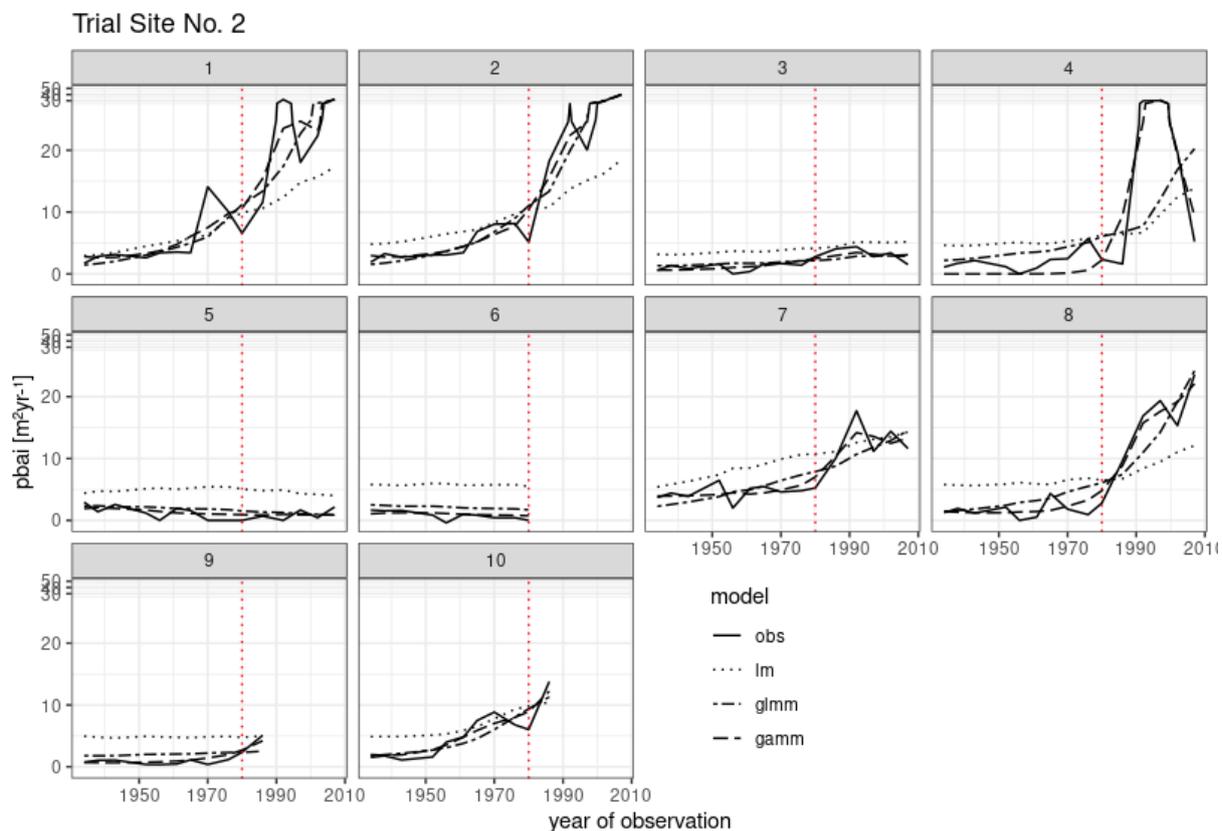


Abb. 10: Entwicklung des periodischen jährlichen Grundflächenzuwachses über der Zeit im Bestand 2 (obs sind die Beobachtungen, lm ist das ICG-Modell, gimm ist das ILG-Modell, gamm ist das ISG-Modell).

Der periodisch jährliche Grundflächenzuwachs der Bäume im Bestand 2 liegt im Mittel bei  $5.77 \text{ [m}^2\text{yr}^{-1}] \pm 7.95$  (Abb. 10). Für die meisten der dargestellten Bäume zeigt sich deutlich, dass das ICG-Modell den empirischen Grundflächenzuwachs der unter dem Eichenschirm „hockenden“ Fichten überschätzt. Dieser generelle Niveauunterschied wird durch das ILG- sowie das ISG-Modell ausgeglichen. Die Reaktionen auf den im Jahr 1980 durchgeführten forstlichen Eingriff werden des Weiteren durch den ISG-Ansatz am besten aufgefangen, während das ILG-Modell die Wachstumsreaktionen unterschätzt (z. B. Baumnummern 1, 2, 4, 8). Diese Reaktionsfähigkeit des ISG-Modells auf die in der herrschenden Bestandesschicht durchgeführten Durchforstungseingriffe führen zu einer großen relativen Modellverbesserung (vgl. Abb. 10).

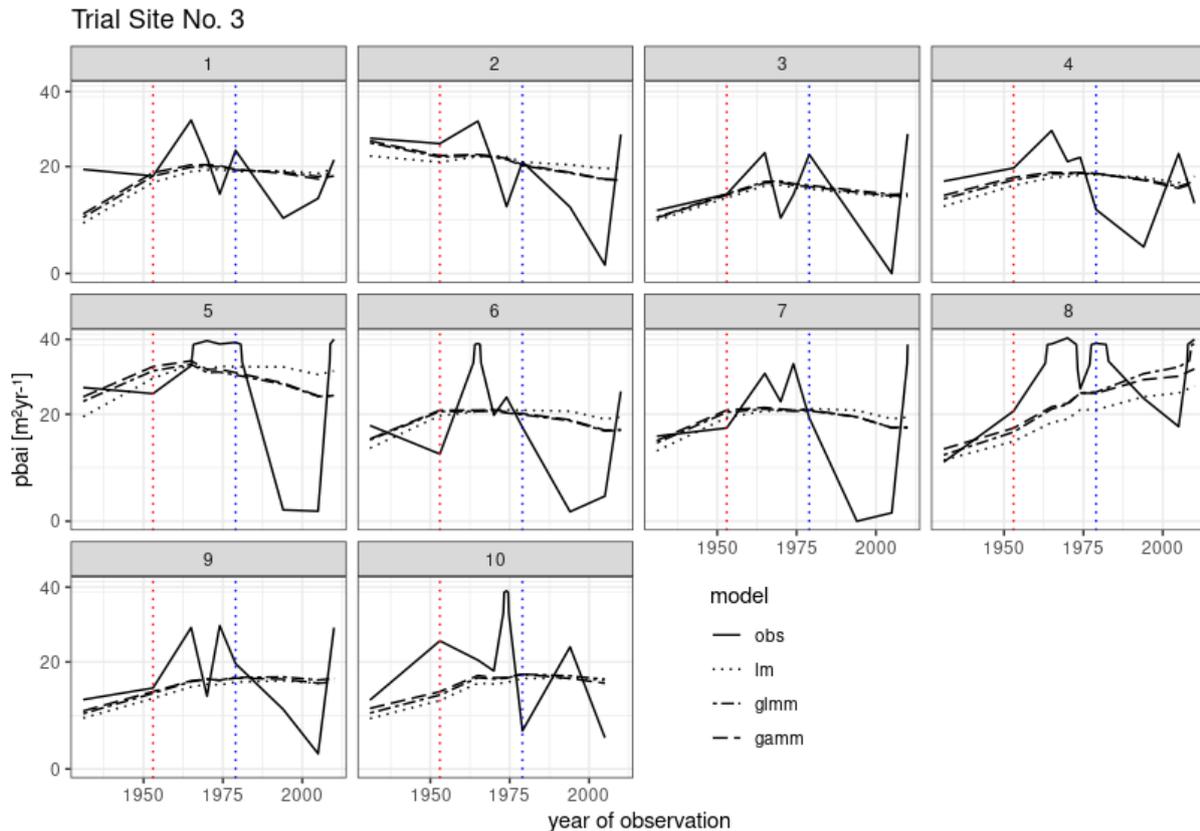


Abb. 11: Entwicklung des periodischen jährlichen Grundflächenzuwachses über der Zeit im Bestand 3 (obs sind die Beobachtungen, lm ist das ICG-Modell, glmm ist das ILG-Modell, gamm ist das ISG-Modell).

Der periodisch jährliche Grundflächenzuwachs der Bäume im Bestand 3 liegt im Mittel bei  $19.42 \text{ [m}^2\text{yr}^{-1}] \pm 9.61$  (Abb. 11). Der empirische Grundflächenzuwachs weist große Schwankungen auf, welche weder durch das ICG-Modell noch durch die ILG- sowie ISG-Modell beschrieben werden können. Die Schwankungen der empirischen Grundflächenzuwächse erscheinen im Vergleich der dargestellten Bäume Ähnlichkeiten zu besitzen. So weisen beispielsweise alle Bäume mit Ausnahme von Baum Nr. 10 im Verlauf des Grundflächenzuwachses nach der markierten Durchforstung im Jahr 1953 eine eindeutig positive Wachstumsreaktion auf. Ebenso markiert die blau gepunktete Linie ein Ereignis im Jahr 1979, welches bei allen Bäumen wieder mit Ausnahme von Baum Nr. 10 zu einer negativen Wachstumsreaktion geführt hat. Beide Ereignisse werden durch die geschätzten Grundflächenzuwächse nicht abgebildet. Im Vergleich der geschätzten Grundflächenzuwächse der Bestände 2 und 3 lässt sich somit feststellen, dass die relative Modellverbesserung und erhöhte Schätzgenauigkeit der ILG und ISG-Modelle tendenziell mit geringen Grundflächenzuwächsen (geringen Wachstumsreaktionen) einhergeht. Ergänzend konnte anhand der Berechnungen aus Abb. 8 festgestellt werden, dass der MSE des ICG-Modells mit den Modellverbesserungen des ISG-Ansatzes negativ korreliert ist ( $r = -0.28$ ;  $p < 0.001$ ). Für das ILG-Modell konnte diese signifikante Korrelation nicht bestätigt werden ( $r = -0.11$ ;  $p = 0.06$ ). Somit zeigt sich, dass die relative Modellverbesserung mit zunehmendem Modellfehler des ICG-Modells sinkt.

Abschließend wurde anhand der Einzelbaumresiduen aller Bestände die AR (1) - Korrelation bestimmt, welche für das ICG-Modell bei  $r = 0.20$  ( $p < 0.001$ ), für das ILG bei  $r = -0.06$  ( $p < 0.001$ ) und für das ISG bei  $r = -0.09$  ( $p < 0.001$ ) liegt. Die autoregressive Modellstruktur konnte folglich durch den ILG- sowie ISG-Ansatz besser berücksichtigt werden.

#### 4.3 Modellerstellung für Buche und Kiefer

Für die Baumarten Buche und Kiefer konnten bisher nur ILG-Modellansätze parametrisiert werden. Die Modellerstellung für Buche basierte auf 105 Beständen mit 3.828 Bäumen und insgesamt 38.601 Einzelbaumzuwachsbeobachtungen. Für die Kiefer stammten die Daten aus 28 Beständen mit 1.542 Bäumen und insgesamt 12.514 Beobachtungen. Diese ILG-Modelle für Buche und Kiefer sind jedoch bisher vorläufige Ergebnisse, da beispielsweise der Alterstrend noch nicht berücksichtigt wurde.

## 5. Fazit und Ausblick

Im Rahmen des Arbeitspaketes sollten die Rangerhaltung bzw. Umsetzungsprozesse und das Reaktionsvermögen von Bäumen unterschiedlicher sozialer Stellung in der Durchforstungs- und Endnutzungsphase untersucht und die aufgedeckten Zusammenhänge in die Wachstumsfunktionen des TreeGrOSS-Programmpakets integriert werden. Für die Baumarten Fichte und Buche konnten Umsetzungsprozesse ohne anthropogene Einflüsse in undurchforsteten Beständen nachgewiesen werden. Die Abbildung dieser als relevante, langfristige Veränderung des Einzelbaumzuwachses im Vergleich zum mittleren Zuwachs des Bestandeskollektivs definierten Umsetzprozesse im Grundflächenzuwachsmmodell von TreeGrOSS ging davon aus, dass die Modellvariablen den Einfluss von Baumdimension, Alter und Konkurrenzsituation auf den Zuwachs abbilden und bisher unerklärte, gerichtete Wachstumsprozesse in der zufälligen Reststreuung des Modells das Umsetzen bewirken. Die für die Baumart Fichte erstellten Modelle mit baumindividueller linearer Wachstumskonstante (ILG) und mit baumindividuellem nicht-linearem Wachstumsverlauf (ISG) reduzieren aufgrund ihrer Modellstruktur die Reststreuung und zeigen gegenüber dem TreeGrOSS-Grundmodell deutliche relative Verbesserungen der Schätzgenauigkeit. Diese Verbesserungen scheinen umso größer zu sein, je dichter ein Bestand ist bzw. je höher der Konkurrenzdruck auf einen Einzelbaum ist. Des Weiteren nimmt die relative Verbesserung zumindest für das ISG-Modell umso stärker ab, je besser bereits die Schätzgenauigkeit des ICG-Modells ist.

Diese sehr aufwendige statistische Modellierung des einzelbaumbezogenen Grundflächenzuwachses erbrachte für die Baumart Fichte eine deutliche relative Verbesserung der Schätzgenauigkeit, in absoluten Werten zeigten sich jedoch auch nach 30-jähriger Waldwachstumssimulation nur geringfügige Unterschiede in den resultierenden Durchmessern zwischen den drei Modellvarianten. Insofern sind die Ansätze der ILG- und ISG-Modelle als methodisch akkurat zu bewerten, in der praktischen Relevanz der Waldwachstumsmodellierung aufgrund des –zumindest derzeit- geringen Effektes bei der Baumart Fichte aber eher als nachrangig zu beurteilen. Insbesondere eine signifikante Verbesserung der neuen Ertragstafeln ist durch die Anwendung des ILG- oder ISG-Modells bei der Grundflächenzuwachsschätzung im Rahmen der Simulation der Ertragstafel-Startbestände nicht zu erwarten.

Ein Vergleich der Modelle für Fichte und Buche soll weitere Erkenntnisse erbringen, z. B. ob Umsetzprozesse im Sinne der hier verwendeten Definition je nach Baumart unterschiedlich deutlich ausgeprägt sind.

## Literatur

- Abetz, P. 1989: Zu den Ursachen des „Umsetzens“ von (Z-) Bäumen, Jahrestagung vom 8. bis 10. Mai 1989, Deutscher Verband forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde
- Bell, A., Jones, K., Fairbrother, M., 2017. Understanding and misunderstanding group mean centering: a commentary on Kelley et al.'s dangerous practice. *Qual. Quant.* 52, 2031–2036. <https://doi.org/10.1007/s11135-017-0593-5>
- Böckmann, T. (2016): Warum sind Betriebsinventuren für die forstliche Praxis wichtig? *Forstarchiv*, 87, 31-37
- Busse, J. (1930) Vom “Umsetzen“ unserer Waldbäume, *Mitteilungen des sächs. Forstl. Versuchsanstalt zu Tharandt*, S.118
- Erteld, W. (1950): Der Verlauf des Umsetzens bei der Fichte. *Forstwirtschaft, Holzwirtschaft*, Heft 19/20, 301-309
- Fahrmeir, L., Kneib, T., Lang, S., Marx, B., 2013. *Regression*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34333-9>
- Guericke, M., Nagel, R. und Müller, D. (2006): Erste waldwachstumskundliche Ergebnisse aus einem Einzelbaumexperiment mit der Baumart Douglasie. *Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 29.-31.05.2006 in Staufen*, 122-133
- Hansen, J., und Nagel, J. (2014). *Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGroSS - Anwendung und theoretische Grundlagen*. (H. Spellmann, Ed.) (Beiträge a). Göttingen: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
- Hasenauer, H., 1994: Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-, Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. *Forstl. Schriftenreihe Univ. für Bodenkultur, Wien*. Bd.8: 152 S.
- Hengst, E. (1962): Das Umsetzen von Einzelbäumen im gleichaltrigen Buchenreinbestand. *Wissenschaftl. Zeitschrift der TU Dresden*, 11. Jg., 4, 791-798
- Holten, N. E. u. Diest, W. v. (1996): Über das Umsetzen in dänischen Eichenbeständen. Eine Untersuchung über Zuwachs und finanziellen Ertrag von Einzelbäumen. *Forstarchiv*, 67. Jg., 160-174.
- Kahn, M. und Pretzsch, H., 1997: Das Wachstumsmodell SILVA - Parametrisierung der Version 2.1 für Rein- und Mischbestände aus Fichte und Buche. *AFJZ*, 168.Jg.: S. 115 - 123.
- Kistemaker, A., Sennhenn-Reulen, H., Albert, M., Nagel, J., 2018. Zum Phänomen des Umsetzens – ein altes Thema neu aufgegriffen. *Tagungsband DVFFA, Sektion Ertragskunde*.
- Lockow, K.-W. (1998): Langfristige Versuchsflächen Eberswalde - Der Kiefern-Lichtungsversuch mit Rotbuchenunterbau Schönholz 16. *Beitr. Forstwirtsch. U. Landschaftsökologie*, 32, 4, 145-154
- Nagel, J. (1999). *Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland*. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag.
- Nagel, R.-V. (2007): Bestandesentwicklung, Einzelbaumwachstum und Qualitätsentwicklung von Stiel- und Traubeneichenbeständen in Nordwestdeutschland unter dem Einfluss unterschiedlicher Durchforstungsstärken. *Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 21.-23.05.2007 in Alsfeld-Eudorf*, 114-132
- Magin, R. (1952): Zuwachsleistungen der soziologischen Baumklassen in langfristig beobachteten Versuchsflächen. *Forstwiss. Centralblatt*, 71. Jg., 225-243
- Merkel, O. (1978): Zur Frage des Umsetzens früh ausgewählter Z-Bäume in Buchenbeständen – dargestellt an Ergebnissen der Vfln. Nr. Bu 237 (Fbz. Kaltenbronn), Bu 238 (Fbz. Oberkirch), Bu 239 (Fbz. Stockach)-Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde, *Bericht der Jahrestagung vom 16.-20.5.1978 in Konstanz*, 107-135
- Münder, K., 2006. *Konkurrenzuntersuchungen und Wachstumsmodellierung in Waldumbaubeständen des Mittleren Erzgebirges*. Technische Universität Dresden, Dresden.
- Pedersen, E.J., Miller, D.L., Simpson, G.L., Ross, N., 2019. Hierarchical generalized additive models in ecology: an introduction with mgcv. *PeerJ* 7, e6876. <https://doi.org/10.7717/peerj.6876>
- Pretzsch, H., Biber, P., Dursky, J., and Sadtke, R., 2006: The Individual-Tree-Based Stand Simulator SILVA. In: Hasenauer, H. (Hsg.), 2006: *Sustainable Forest Management. Growth Models for Europe*. Springer-Verlag: pp. 78-84.
- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E., Rötzer, T., 2014. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications* 5. <https://doi.org/10.1038/ncomms5967>
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- Rohner, B., Waldner, P., Lischke, H., Ferretti, M. & Thürig, E. Predicting individual-tree growth of central European tree species as a function of site, stand, management, nutrient, and climate effects. *Eur. J. For. Res.* (2017). doi:10.1007/s10342-017-1087-7
- Schielzeth, H., Nakagawa, S., 2013. Nested by design: model fitting and interpretation in a mixed model era. *Methods in Ecology and Evolution* 4, 14–24. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00251.x>
- Schober, R. (1988): Von Zukunfts- und Elitebäumen. *AFJZ*, 159. Jg., 11/12, 239-24
- Schröck, O. 1957: Vergleichende Untersuchungen des Wachstumsganges an Einzelbäumen aus verschiedenen alten Kiefernbeständen. *Archiv f. Forstwesen*

- Seibt, G. und Sloboda, B. (1978): Zur Quantifizierung von Umsetzungsprozessen in gleichaltrigen Fichtenbeständen. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde, Bericht der Jahrestagung vom 16.-20.5.1978 in Konstanz, 92-106
- Simpson, G.L., 2018. Modelling Palaeoecological Time Series Using Generalised Additive Models. *Front. Ecol. Evol.* 6. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00149>
- Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M., 1996. Growth Trends in European Forests Studies from 12 Countries. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Spellmann, H. und Diest, W. v. (1990): Entwicklung von Z-Baum-Kollektiven in langfristig beobachteten Eichen-Versuchsflächen der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt. *Forst und Holz*, 45. Jg., 573-580
- Sterba, H., Moser, M., & Monserud, R. A. (1995). Prognaus - Ein Waldwachstumssimulator für Rein- und Mischbestände. *Österreichische Forstzeitung*, (5), 19–20.
- Weck, J. (1958): Vom Umsetzen unserer Waldbäume. *AFZ*, 13. Jg., 717-720
- Wensel, L. und Koehler, J., 1985: A Tree Growth Projection System for Northern California Coniferous Forests. Univ. California Berkeley, Research Note No. 12
- Wood, S.N., 2017. Generalized Additive Models : An Introduction with R, Second Edition. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>
- Wykoff, W.; Crookston, N.A. und Stage, A. (1982): User's Guide to the Stand Prognosis Model. USDA For. Ser. Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, General Technical Report INT-133

## Arbeitspaket 3

### 1. Hintergrund zur Mischbestandsfähigkeit von TreeGrOSS

Die Mischbestandsfähigkeit der Wachstumsroutinen im TreeGrOSS-Paket wird durch Verwendung des Konkurrenzindex C66, der über die Summe der Kronenschnittflächen aller Nachbarbäume in 66 % der Höhe des jeweiligen Bezugsbaumes wirkt, sichergestellt (Hansen u. Nagel 2014). Da die Kronenbreite artspezifisch ist, d. h. unterschiedliche Baumarten bei gleichem Stammdurchmesser unterschiedliche Kronenbreiten haben, hängt der modellierte Zuwachs des Bezugsbaumes von den benachbarten Baumarten ab (Nagel 1999). Allerdings konnte z. B. Biber (1996) zeigen, dass die Krone einer benachbarten Buche den Zuwachs von Fichten und Buchen stärker einschränkt als die gleichgroße Krone einer benachbarten Fichte. Dieser Effekt wird in TreeGrOSS nicht abgebildet. Daher war die Verbesserung der Mischbestandsfähigkeit des Waldwachstumssimulators Hauptziel dieses Arbeitspaketes. Eine Grundvoraussetzung zur Verbesserung der Mischbestandsfähigkeit des Waldwachstumssimulators ist eine Aktualisierung der herkömmlichen Grundflächenzuwachsfunction auf neuer Datengrundlage, um das aktuelle Zuwachsniveau widerzuspiegeln und eventuelle Verschiebungen in den Zuwachsrelationen zwischen den Baumarten berücksichtigen zu können.

Schlussendlich war es das Ziel, Zuwachskorrekturfaktoren zu erstellen, die den Mehr- bzw. Minderzuwachs in Baumartenmischungen quantifizieren, um die Anwendbarkeit der neu zu erstellenden Ertragstafeln in Mischbeständen zu verbessern.

### 2. Neuparametrisierung der Grundflächenzuwachsfunction

Eine Neuparametrisierung der Grundflächenzuwachsfunction mit Versuchsflächenaufnahmen ab 1970 spiegelt die veränderten Umweltbedingungen bzgl. des Zuwachses wider. Außerdem wurde die Datenbasis seit der ursprünglichen Parametrisierung (Nagel 1999) insbesondere um zahlreiche Mischbestandsflächen erweitert. Die Funktion wurde aus der Wachstumsbibliothek TreeGrOSS übernommen (Formel 6):

$$\log(ig) = \beta_0 + \beta_1 \log(km) + \beta_2 \log(alt) + \beta_3 c66 + \beta_4 c66c \quad [6]$$

mit

ig : Grundflächenzuwachs des Einzelbaumes

km: Kronenmantelfläche

alt: Alter

c66: Konkurrenzindex

c66c: Veränderung des Konkurrenzindex durch Freistellung

Für die Baumarten Eiche, Buche, Fichte, Kiefer und Douglasie wurden entsprechend neue Modellparameter geschätzt. Abb. 12 verdeutlicht die Verbesserung der Zuwachsschätzung auf der Bestandesebene durch die Neuparametrisierung am Beispiel der Baumart Fichte.

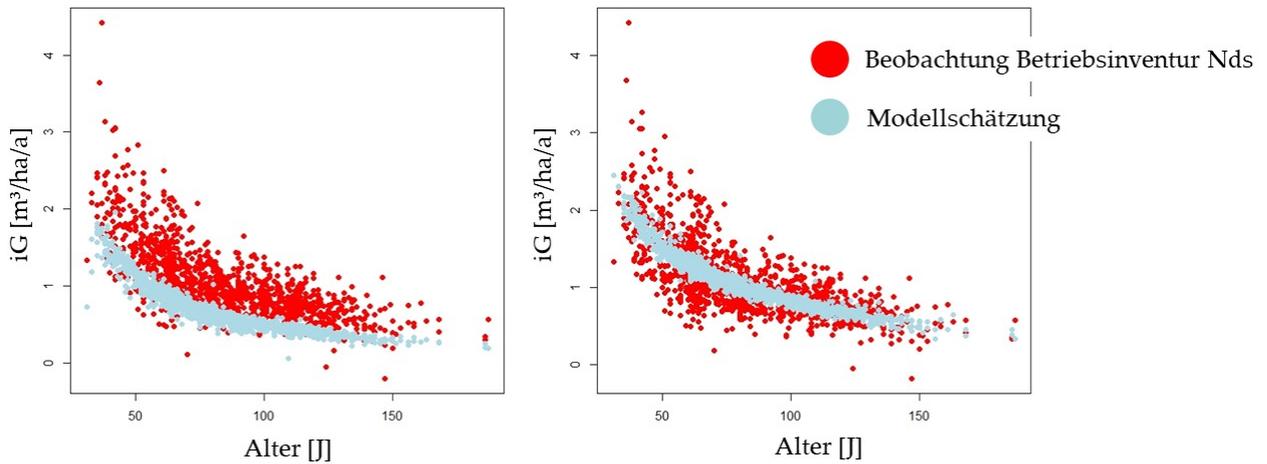
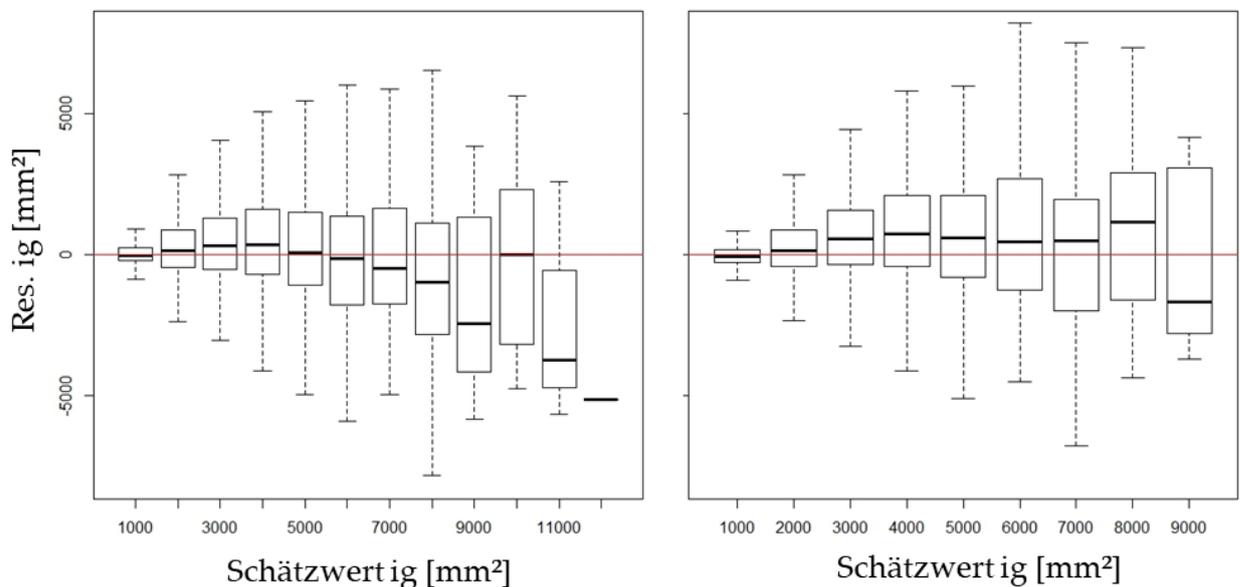


Abb. 12: Geschätzter Bestandesgrundflächenzuwachs  $iG$  (hellblau) im Vergleich zu den Beobachtungen der niedersächsischen Betriebsinventur (rot) für 1290 Fichtenreinbestände mit Bestockungsgrad zwischen 0,8 und 1,2 auf Grundlage der alten Modellparametrisierung (links) und mit dem neuparametrisierten Grundflächenzuwachsmmodell (rechts).

Deutlich zu erkennen ist die Unterschätzung der aktuellen Bestandesgrundflächenzuwächse zwischen der ersten und zweiten niedersächsischen Betriebsinventur (Zeitraum ca. 2000 bis 2017) mit dem Grundflächenzuwachsmmodell auf der alten Parametrisierungsgrundlage (Abb. 12, links). Nach Neuparametrisierung wird das Zuwachsniveau im Mittel deutlich besser getroffen (Abb. 12, rechts). Die Grafiken und weitere Analyseplots für alle fünf Baumarten sind in Anhang 8 enthalten.

Eine Validierung anhand der Daten der niedersächsischen Betriebsinventur erbrachte noch eine leichte Verzerrung der Schätzwerte, wie am Beispiel des Eichenmodells in Abb. 13 dargestellt.

Abb. 13: Residuen des Einzelbaumgrundflächenzuwachses  $Res.ig$  (Differenz aus Beobachtungswert aus der



Betriebsinventur und Schätzwert des Modells) über dem geschätzten Grundflächenzuwachswert für 19.594 Eichen (links auf Grundlage der alten Modellparametrisierung; rechts mit dem neuparametrisierten Grundflächenzuwachsmmodell).

Die Problematik eines Bias auf Bestandesebene wurde im Berichtsteil des Arbeitspaketes 1 thematisiert und im Zwischenbericht 2020 ausführlich behandelt.

### 3. Ein neuer Ansatz zur Konkurrenzschätzung in Mischbeständen

Bisher wurde die Mischbestandsfähigkeit des Waldwachstumssimulators durch Verwendung des Konkurrenzindex C66 gewährleistet. Im C66 werden Konkurrenzunterschiede zwischen den Baumarten über artspezifische Kronenbreiten quantifiziert. In einem neuen Ansatz sollte die unterschiedliche Konkurrenzwirkung der Baumarten auf den Zuwachs nunmehr direkt aus den Daten abgeleitet werden, indem statt eines Konkurrenzindex acht Indexwerte jeweils getrennt nach Artzugehörigkeit des Konkurrenten gebildet wurden und deren Einfluss auf den Zuwachs quantifiziert wurde. Folgende Funktion wurde dazu parametrisiert:

$$ig_{ij} = \hat{ig}_{ij} + a_{ei} * c66ei_{ij} + a_{bu} * c66bu_{ij} + a_{fi} * c66fi_{ij} + a_{dgl} * c66dgl_{ij} + a_{ki} * c66ki_{ij} + b_j \quad [7]$$

mit

i: Baum

j: Versuch

$\hat{ig}$  : Grundflächenzuwachs-Schätzung mit dem Basismodell, d.h. erwarteter Zuwachs unter

Berücksichtigung der Kronenmantelfläche, des Alters und der Freistellung des Baumes i in Versuch j

a: Koeffizienten zur Quantifizierung der artspez. Konkurrenzwirkung von Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer

b<sub>j</sub> : Zufallseffekt auf Ebene des Versuches j

Die Funktion 7 wurde einzeln für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie parametrisiert, d.h. es wird immer die artspezifische Konkurrenz auf eine Bezugsbaumart abgebildet. Im Folgenden wird diese Funktion als **Grundflächenzuwachsfunction mit artspezifischer Konkurrenz (Modell maK)** bezeichnet.

Der reduzierende Effekt der artspezifischen Konkurrenz auf den Grundflächenzuwachs der Bezugsbaumart Buche ist in Abb. 14 verdeutlicht.

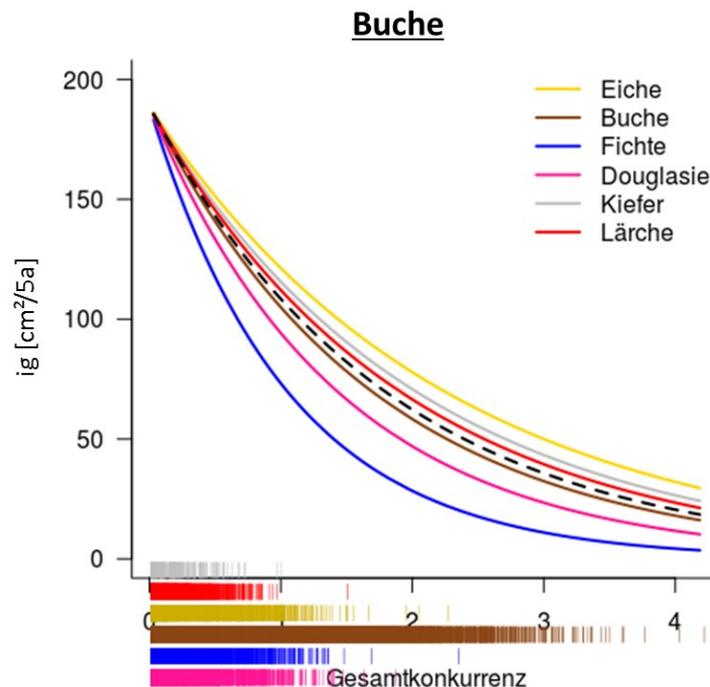


Abb. 14: Der reduzierende Effekt der artspezifischen Konkurrenz auf den Grundflächenzuwachs  $ig$  der Bezugsbaumart Buche (gestrichelte Linie: mittlere Zuwachsreduktion laut ursprünglichem Basismodell).

Mit zunehmender Gesamtkonkurrenz wird der Grundflächenzuwachs, in Abb. 14 beispielhaft dargestellt für eine Buche, reduziert. Wird die Buche nur von Eichen konkurrenziert (gelbe Linie in Abb. 14), ist der Effekt am geringsten. Die Fichte wiederum bewirkt den stärksten Konkurrenzdruck (blaue Line in Abb. 14). Die

gestrichelte Linie gibt den Effekt der Gesamtkonkurrenz auf den Zuwachs laut ursprünglichem Basismodell wider, d.h. die Abweichungen der artspezifischen Effekte zu diesem mittleren Effekt verdeutlicht die artspezifische Konkurrenzstärke.

#### 4. Simulation der Mischbestandseffekte

Der Herleitung von Zuwachskorrekturfaktoren für Mischbestandseffekte zur Verwendung mit den dynamischen Ertragstafeln sollte für die wichtigsten Baumartenmischungen erfolgen. Diese sind:

Fichte-Buche  
Fichte-Douglasie  
Buche-Douglasie  
Kiefer-Buche  
Kiefer-Eiche  
Buche-Eiche

Die Mischbestandseffekte wurden mit dem neu entwickelten Grundflächenzuwachsmo-  
dell mit artspezifischer Konkurrenz (Modell maK) durch Wachstumssimulation mit TreeGrOSS am Beispiel der Baumartenmischung Fichte-Buche hergeleitet. Die Methodik folgte dem Verfahren von Sprauer und Nagel (2015). Als Datenbasis standen die für die Ertragstafelsimulation verwendeten Startbestände zur Verfügung. Konkret wurden je Baumartenmischung ca. 100 Bestände nach Altersklassen und Bonitäten stratifiziert erzeugt und simuliert. Dabei wurden die Reinbestands-Startbestände so kombiniert, dass eine maximale Altersdifferenz der Baumarten von +/- 3 Jahren und eine Bonitätsdifferenz von +/- zwei Ertragsklassen auftritt. Der Mischungsanteil wurde dann von 5 bis 95 % variiert. Als Mischungsform wurden einzel-, trupp- und gruppenweise Mischungen analysiert. Eine horstweise Mischung würde aufgrund der nötigen großen Fläche eine zu zeitintensive Simulation bedeuten und wurde deshalb ausgeschlossen.

Die Wachstumssimulation umfasste eine 5-jährige Periode, ohne dass Durchforstungseingriffe durchgeführt wurden. Der Volumenzuwachs des Mischbestandes wurde dann mit dem Volumenzuwachs der jeweiligen Reinbestände verglichen. Beispielhaft sind die Resultate für die Mischung Fichte-Buche für unterschiedliche Bonitätskombinationen in Abb. 15 dargestellt.

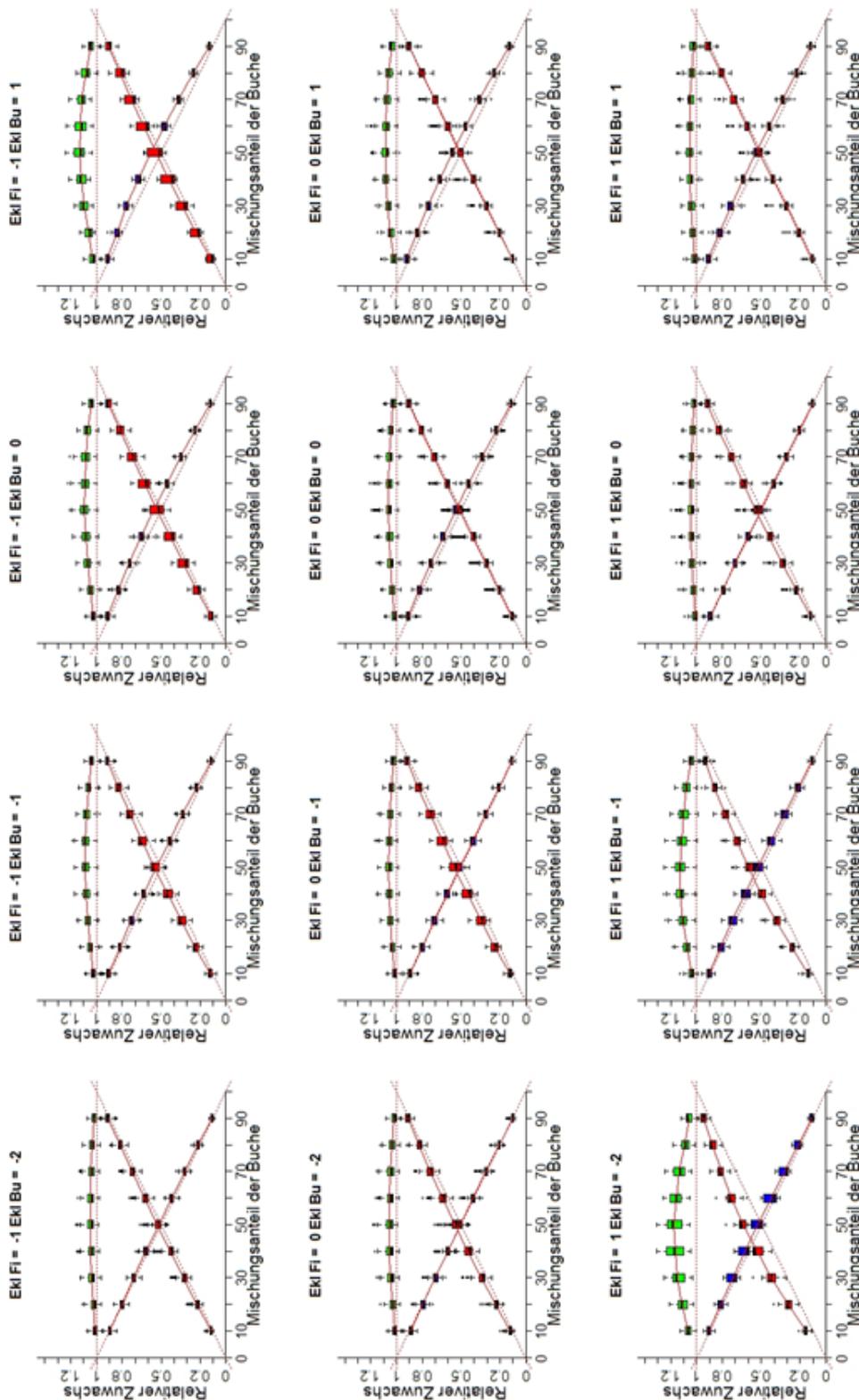


Abb. 15: Relative Produktivität von Fichten-Buchenbeständen verschiedener Ertragsklassen.

In den Beispielen in Abb. 15 sind in allen Kombinationen nur positive Mischbestandseffekte zu sehen. Diese Analyse weist somit auf einen Mehrzuwachs für Fichte-Buchen-Mischbestände hin. Der Mehrzuwachs der Mischbaumart mit besseren Bonitäten ist durchgehend (z.T. deutlich) höher. Je gegensätzlicher die Bonitäten in der Mischung (s. insbesondere Abb. 15, links unten und rechts oben), umso höher der gesamte Mehrzuwachs und zwar maßgeblich aufgrund der Baumart der besseren Bonität.

## 5. Analyse der Simulationsergebnisse – Identifikation von Einflussfaktoren

Die Simulationsergebnisse wurden zunächst deskriptiv untersucht und anschließend mit Hilfe von Regressionsmodellen vom Typ GAM (Generalised additive modell) und GAMLSS (Generalized additive model for location, scale and shape) analysiert, wofür eine Modellselektion mit den R-Paketen mgcv (Wood 2004) und gamlss (Rigby und Stasinopoulos 2005) durchgeführt wurde. Die Selektion erfolgte maßgeblich aufgrund der Betrachtung des BIC (Schwarz 1978). Dabei wurden zunächst ein die besten erklärenden Variablen unter mgcv ausgewählt und anhand von Tensor-Produkten auf Wechselwirkungen überprüft, um letztendlich unter Verwendung von gamlss ein monotonen Verhalten für einzelne Variablen zu erzwingen.

Im Folgenden wird die Selektion eines Regressionsmodells zur Erklärung der relativen Produktivität (Abkürzung: inc) von Fichten-Buchen-Mischbeständen gegenüber Reinbeständen beschrieben.

Die Regression konzentrierte sich auf die folgenden Variablen, die für besonders ausschlaggebend erachtet wurden:

1. gpro.fi = Der Grundflächenanteil der Fichte.
2. seg = Der Segregationsindex nach PIELOU (1977) für den Bestand.
3. h100.fi = Die mittlere Höhe der 100 höchsten Fichten.
4. hdiff\_rel = Die relative Höhendifferenz zwischen Fichte und Buche (Fichte – Buche).

Es wurde jeweils ein Modell unter Annahme einer Normalverteilung sowie eines unter Annahme einer Gammaverteilung berechnet (Tab. 6).

Tab. 6: Erklärung der relativen Produktivität im Mischbestand durch Regressionsmodelle mit einzelnen Variablen.

Modell	BIC Normalverteilung	BIC Gammaverteilung	Name
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(h100.fi)$	-144237.6	-145058	gam1a
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(seg)$	-145772.8	-146635.3	gam1b
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(gpro.fi)$	-155793.8	<b>-157106.1</b>	gam1c
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(hdiff_{rel})$	-146565.1	-147403.4	gam1d

Da jeweils die Gammaverteilung einen niedrigeren BIC erbrachte, wurden alle weiteren Modelle unter Annahme einer Gammaverteilung angepasst. Ausgehend von dem bis hier besten Modell (Gam1c, Gamma verteilt) wurde dem Modell jeweils eine Variable schrittweise hinzugefügt und der BIC betrachtet, um zu klären, welche Variablen gemeinsam die relative Produktivität am besten erklären (Tab. 7).

Tab. 7: Erklärung der relativen Produktivität im Mischbestand durch Regressionsmodelle mit mehreren Variablen.

Modell	BIC	Name
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(gpro.fi)$	-157106.1	gam1c
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(gpro.fi) + f_2(h100.fi)$	-160119.4	gam2
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(gpro.fi) + f_2(h100.fi) + f_3(* hdiff_{rel})$	-168262.4	gam3
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(gpro.fi) + f_2(h100.fi) + f_3(hdiff_{rel}\beta_4) + f_4(seg)$	<b>-170304.9</b>	gam4

An dem auf diese Weise ermittelten besten Modell (gam4) wurde getestet, ob die Segregation einer weiteren Unterteilung in drei Gruppen (1. Fichte ist führende Baumart, 2. beide Baumarten haben gleich Mischungsanteil und 3. Buche ist führende Baumart) bedarf. Dies erschien untersuchenswert, weil die Segregation von den Mischungsanteilen der Baumarten nicht unabhängig ist. Der BIC verbesserte sich hierdurch auf -171700.8. Allerdings verläuft die Wirkung der Segregation auf die relative Produktivität bei Unterteilung in drei Gruppen immer noch hinreichend gleichförmig (s. Abb. 16), sodass ein Unterlassen der Unterteilung der Segregation akzeptabel erscheint, um stattdessen weitere Effekte testen zu können.

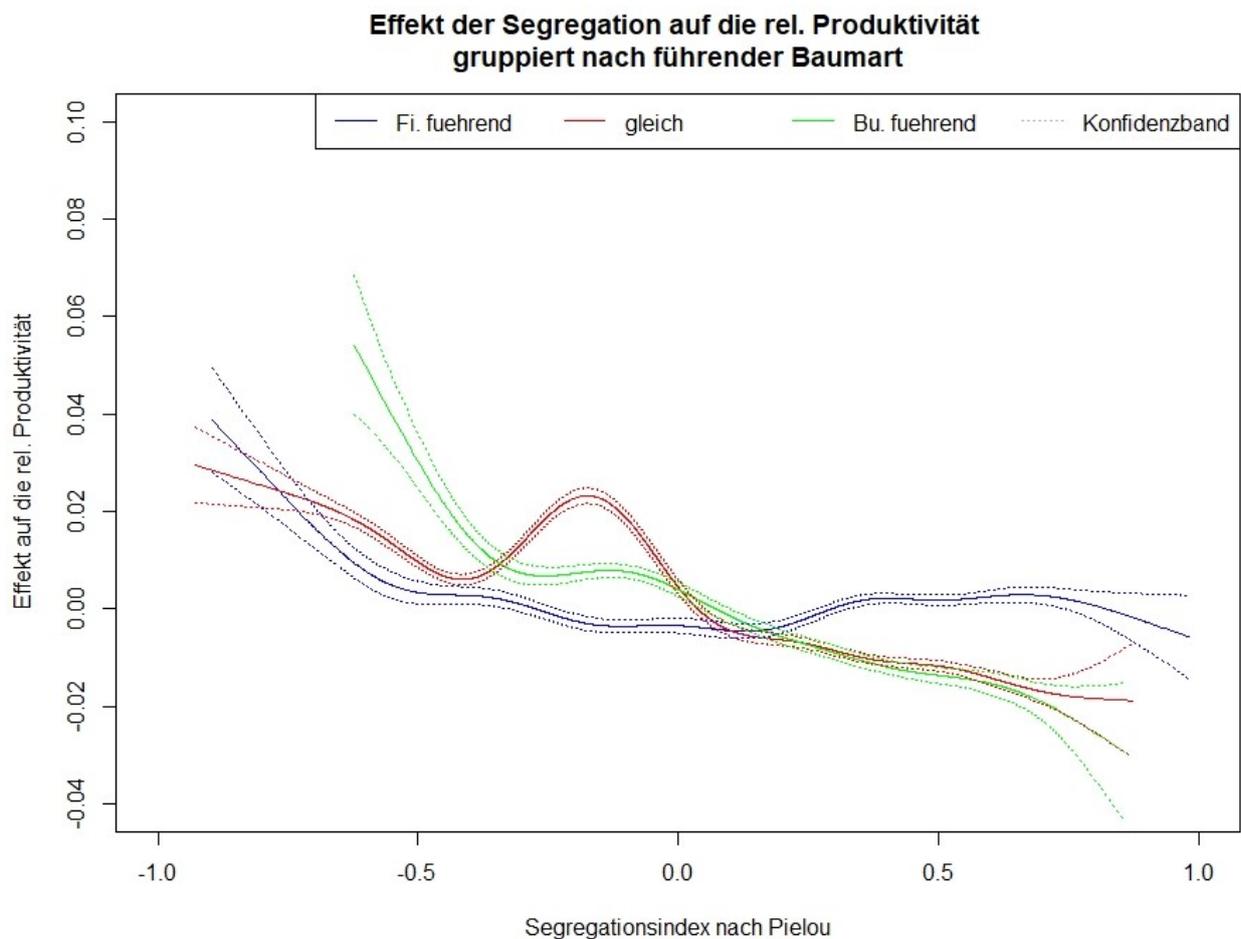


Abb. 16: Wirkung der Segregation auf die relative Produktivität, unterteilt in drei Gruppen nach führender Baumart.

Im nächsten Schritt wurde mit Hilfe des Tensorprodukts auf Wechselwirkungen zwischen den Variablen getestet (Tab. 8).

Tab. 8: Erklärung der relativen Produktivität im Mischbestand durch Regressionsmodelle mit mehreren Variablen, wobei einzelne Variablen als Tensorprodukt behandelt werden. Alle Modelle wurden unter der Annahme einer Gamma-Verteilung gefittet.

Modell	BIC	Name
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(h100.fi, seg) + f_2(gpro.fi) + f_2(hdiff\_rel)$	-172777.9	te.gam4
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(h100.fi, hdiff\_rel) + f_2(gpro.fi) + f_2(seg)$	-171170.1	te2
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(h100.fi, gpro.fi) + f_2(seg) + f_2(hdiff\_rel)$	-171524.2	te3
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(gpro.fi, seg.fi) + f_2(h100.fi) + f_2(hdiff\_rel)$	-171502.2	te4
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(gpro.fi, hdiff\_rel) + f_2(seg) + f_2(h100.fi)$	-172969.4	te5
$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + f_1(seg, hdiff\_rel) + f_2(gpro.fi) + f_2(h100.fi)$	<b>-173596.3</b>	te6

Das Modell, welches ein Tensorprodukt für die Variablen Segregation und Höhendifferenz zwischen den Baumarten (te6) beinhaltet, erreicht den niedrigsten BIC und ist somit als am besten zu bewerten. Eine Wechselwirkung zwischen Segregationsindex und der Höhendifferenz scheint wahrscheinlich. Abb. 17 veranschaulicht die Wirkung auf die relative Produktivität im Mischbestand.

## Wirkung des Tensor-Produktes auf den Zuwachs im Mischbestand

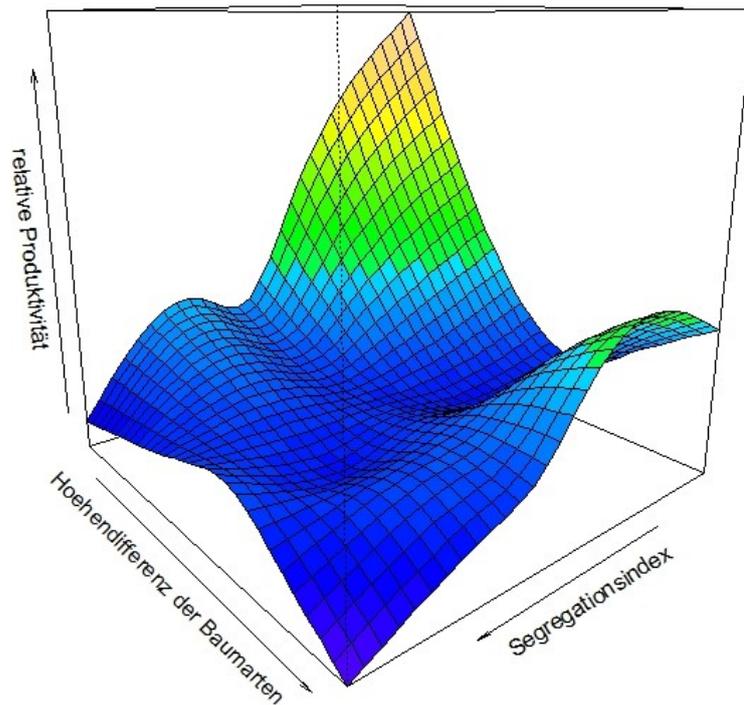


Abb. 17: Veranschaulichung der Wirkungen der im Tensorprodukt zusammengefassten Variablen Segregation und Höhendifferenz der beiden Baumarten auf die relative Produktivität in Mischbeständen.

Da für ein robustes Modell ein monotonen Verhalten der Variablen vorteilhaft ist, soll die weitere Untersuchung der Wechselwirkung zukünftiger Forschung zugeschrieben werden. Es wurde hier stattdessen ein gamlss-Modell angepasst. Auf diese Weise konnten die Variablen seg und h100.fi monotonisiert werden, sodass sich das finale Modell entsprechend der Formel ergibt.

$$\ln(E[inc]) = \alpha_0 + m_1(seg) + f_0(gpro.fi) + m_2(h100.fi) + f_1(hdiff_{rel}) \quad [8]$$

mit:

inc  $\sim$  Gamma( $\mu$ ,  $\nu$ ) verteilt mit  $\phi = \frac{1}{\nu} = \sigma^2$ ,

und Begrenzung der Freiheitsgrade von seg, h100.fi, sowie hdiff\_rel auf df=4

Der BIC des Modells liegt bei -170349.3. Die hohe Güte des Modells ist auch aus Abb. 18 ersichtlich.

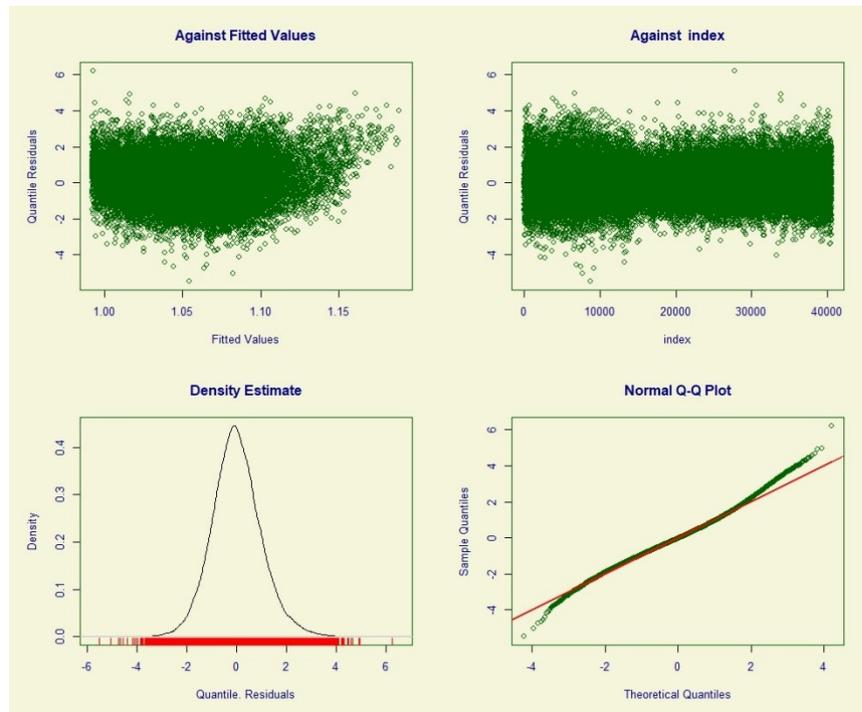


Abb. 18: Plots zur Güte des finalen Regressionsmodells.

In Abb. 19 ist die Wirkung der erklärenden Variablen auf die Produktivität zu erkennen. Die Abbildung der Mischungsanteile (gpro.fi) zeigt, dass bei einem Grundflächenverhältnis von 45 % Fichte zu 55 % Buche die größten Mehrzuwächse erwartet werden können. Eine niedrige Segregation führt zu gesteigerten Zuwachseffekten. Eine geringe h100 (d.h. auch ein jüngeres Bestandesalter) wirkt sich ebenfalls positiv auf den Zuwachs aus. Zu guter Letzt zeigt der Effekt der Höhendifferenz der Baumarten auf den Zuwachs, dass eine größere Höhendifferenz zu positiven Effekten auf den Zuwachs führt.

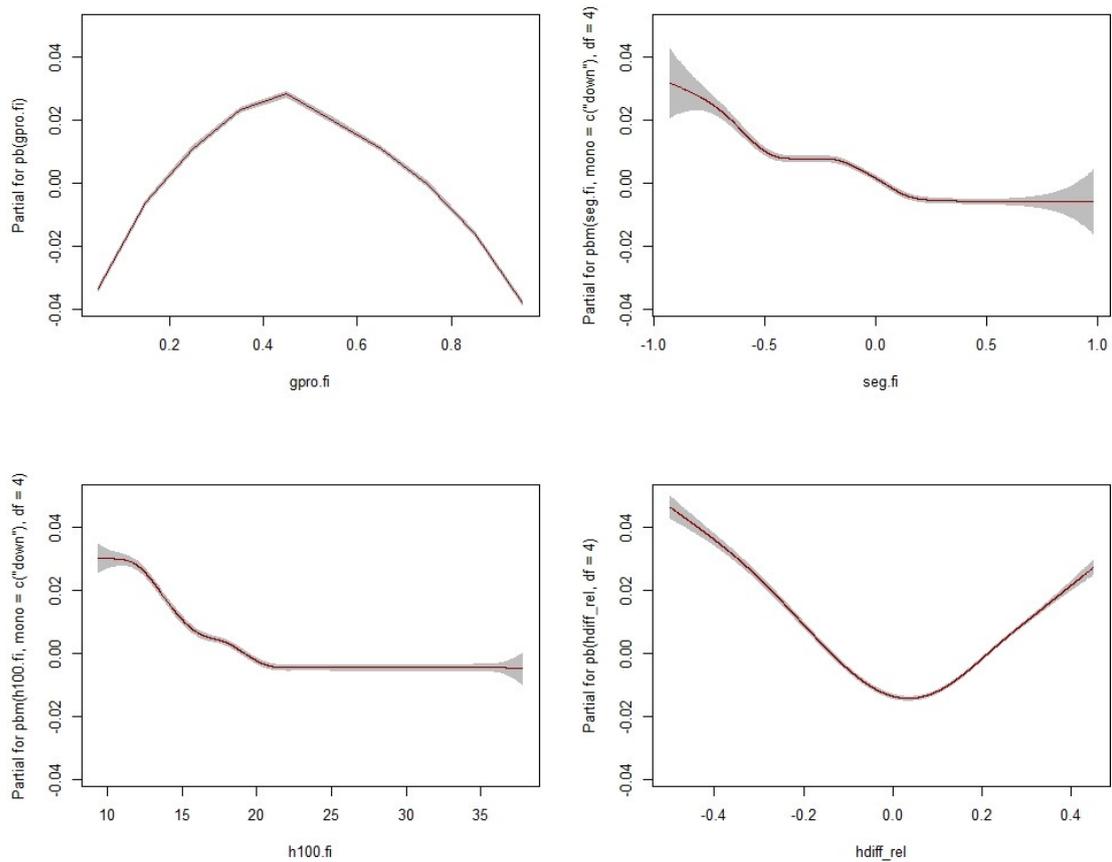


Abb. 19: Wirkung der Variablen auf die relative Produktivität im Mischbestand aus Fichte und Buche

Um zu sehen, welche der beiden Baumarten die Effekte jeweils maßgeblich herbeiführt, wurde die relative Produktivität getrennt für die beiden Baumarten untersucht. Hierfür wurde zunächst ein gam analog zu gam4 gerechnet und die Effekte der Variablen geplottet (s. Abb. 20 und 21). Aufgrund der grafischen Auswertung der Abbildungen 12 und 13 wird die Monotonisierung der Variablen gegenüber dem Modell aus Formel 8 folgendermaßen angepasst:

- Die Variable gpro.fi wird monotonisiert und zwar in gegenläufigen Richtungen für Buche und Fichte.
- Die Monotonie des Effekts der Segregation auf die relative Produktivität der Buche muss ansteigend sein.
- Die Monotonie des Effekts der h100 auf die relative Produktivität der Fichte wird aufgehoben.

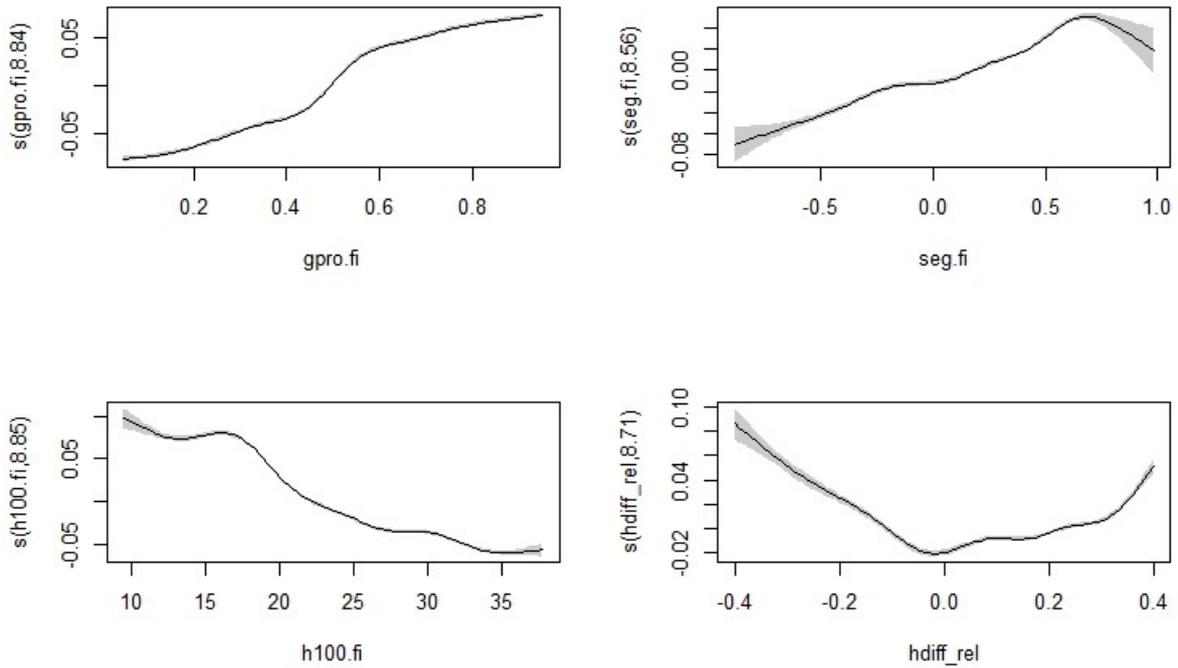


Abb. 20: Effekte der Variablen eines gam-Regressionsmodells auf die relative Produktivität der Buche.

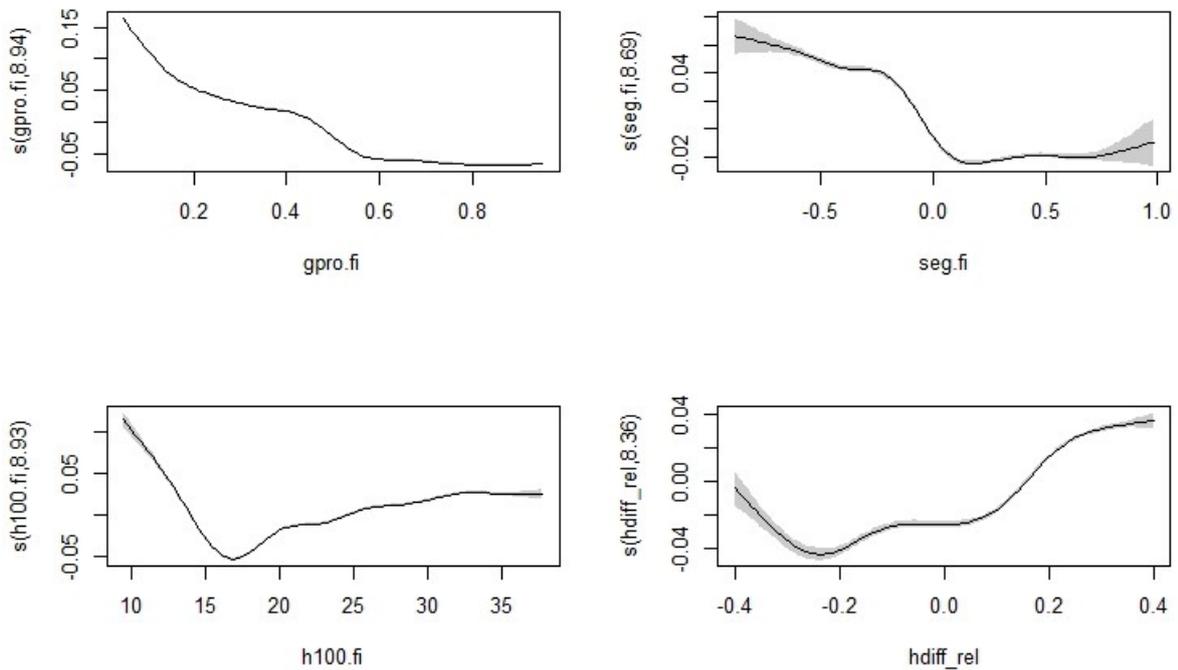


Abb. 21: Effekte der Variablen eines gam-Regressionsmodells auf die relative Produktivität der Fichte.

In Abb. 22 ist der Effekt der wie oben beschrieben entwickelten gamlss-Regressionsmodelle auf die relative Produktivität getrennt nach den beiden Baumarten zu erkennen. Im ersten Plot ist zu sehen, dass die Baumarten jeweils dort die höchste relative Produktivität haben, wo sie einen geringen Flächenanteil aufweisen. Des Weiteren ist für die Fichte eine intensive Durchmischung (niedriger Segregationsindex) von Vorteil, während die Buche vor allem bei räumlicher Trennung der Arten profitiert. Für beide Baumarten ist eine erhöhte relative Produktivität für niedrige h100-Werte der Fichte festzustellen, wobei die Fichte nach

einer schnell nachlassenden Produktivität ab 18 m wieder einen zunehmenden Effekt aufweist. Die Buche zeigt im Bereich, wo sie höher als die Fichte ist, eine erhöhte relative Produktivität, die zu einem Minimalwert bei Höhengleichheit absinkt und bei Höhenvorsprung der Fichte wieder leicht ansteigt. Die Fichte profitiert hingegen nur von einem Höhenvorsprung.

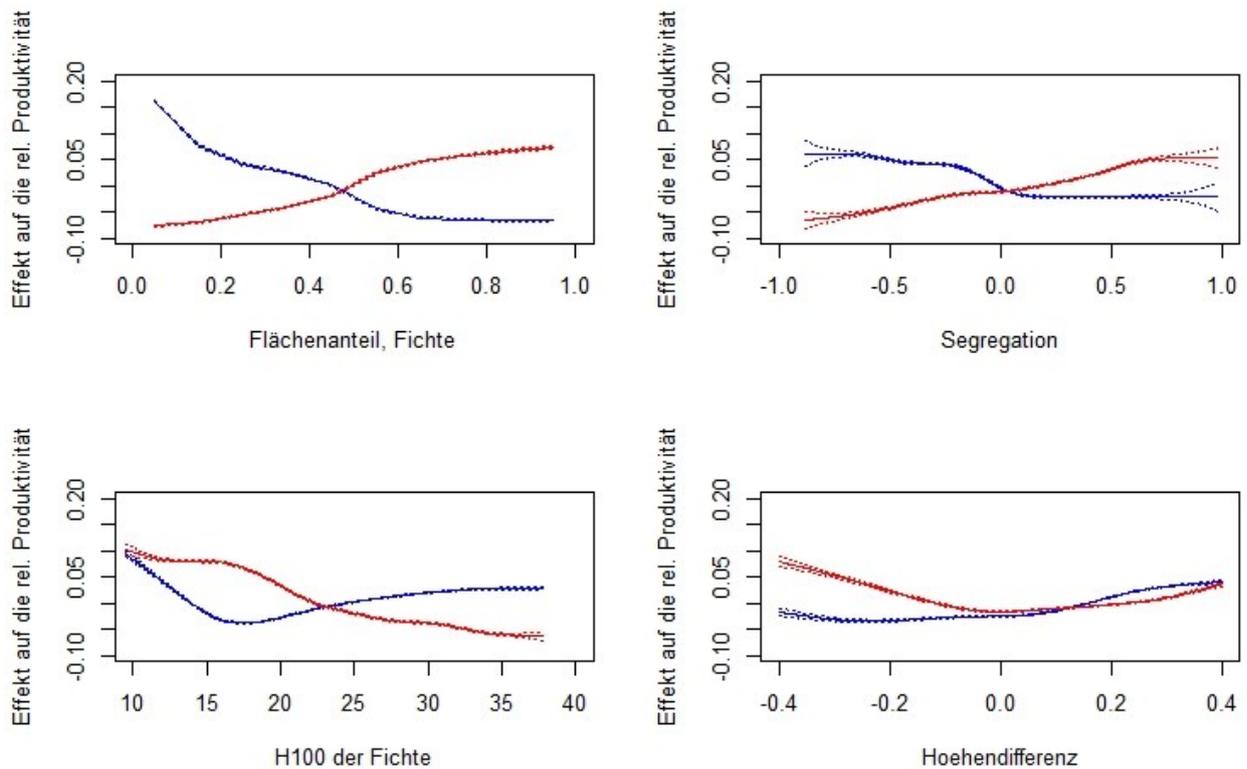


Abb. 22: Einfluss der Variablen des zur Schätzung der Korrekturtafeln verwendeten *gamlss*-Regressionsmodells auf die relative Produktivität, getrennt für Fichte (blau) und Buche (rot).

Mit Hilfe des Regressionsmodells konnten Korrekturtafeln für Fichten und Buchen im Mischbestand erstellt werden (Tab. 6 und 7). Vereinfachend wird die Variable Segregation auf drei Zustände fixiert, die den Mittelwerten der jeweiligen räumlichen Verteilung entsprechen:

- Einzelstammweise: -0.29
- Truppweise: 0.27
- Gruppenweise: 0.35

Die Tab. 9 und 10 weisen für unterschiedliche Oberhöhenkombinationen in Abhängigkeit vom Mischungsanteil die Zuwachskorrekturfaktoren für einzelstammweise eingemischte Buche (Tab. 9) bzw. Fichte (Tab. 10) aus.

*Tab. 9: Zuwachskorrekturfaktoren für die Buche bei einzelstammweise Mischung mit Fichte bei unterschiedlichen Oberhöhenkombinationen und Mischungsanteilen.*

<b>h100_fi</b>	<b>h100_bu</b>	<b>5%</b>	<b>15%</b>	<b>25%</b>	<b>35%</b>	<b>45%</b>	<b>55%</b>	<b>65%</b>	<b>75%</b>	<b>85%</b>	<b>95%</b>
10	6	1,31	1,31	1,29	1,28	1,25	1,20	1,17	1,16	1,14	1,13
10	8	1,26	1,26	1,24	1,23	1,20	1,15	1,13	1,11	1,09	1,09
10	10	1,25	1,24	1,23	1,21	1,19	1,14	1,11	1,10	1,08	1,07
10	12	1,30	1,29	1,28	1,26	1,23	1,18	1,16	1,14	1,12	1,12
15	9	1,29	1,28	1,27	1,26	1,23	1,18	1,15	1,14	1,12	1,11
15	12	1,24	1,23	1,22	1,21	1,18	1,13	1,11	1,09	1,08	1,07
15	15	1,22	1,22	1,21	1,19	1,17	1,12	1,09	1,08	1,06	1,06
15	18	1,27	1,27	1,25	1,24	1,21	1,16	1,14	1,12	1,10	1,10
20	12	1,23	1,22	1,21	1,20	1,17	1,12	1,10	1,08	1,07	1,06
20	16	1,18	1,18	1,17	1,15	1,13	1,08	1,06	1,04	1,03	1,02
20	20	1,17	1,16	1,15	1,14	1,11	1,06	1,04	1,03	1,01	1,01
20	24	1,21	1,21	1,20	1,18	1,16	1,11	1,08	1,07	1,05	1,05
25	15	1,17	1,16	1,15	1,14	1,11	1,07	1,04	1,03	1,01	1,01
25	20	1,12	1,12	1,11	1,09	1,07	1,02	1,00	0,99	0,97	0,97
25	25	1,11	1,10	1,09	1,08	1,06	1,01	0,99	0,97	0,96	0,95
25	30	1,15	1,15	1,14	1,12	1,10	1,05	1,03	1,01	1,00	0,99
30	18	1,15	1,14	1,13	1,12	1,09	1,05	1,02	1,01	0,99	0,99
30	24	1,10	1,10	1,09	1,07	1,05	1,01	0,98	0,97	0,96	0,95
30	30	1,09	1,08	1,07	1,06	1,04	0,99	0,97	0,96	0,94	0,94
30	36	1,13	1,13	1,11	1,10	1,08	1,03	1,01	1,00	0,98	0,97
35	21	1,12	1,12	1,11	1,09	1,07	1,02	1,00	0,99	0,97	0,97
35	28	1,08	1,07	1,06	1,05	1,03	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93
35	35	1,06	1,06	1,05	1,04	1,01	0,97	0,95	0,94	0,92	0,92
35	42	1,11	1,10	1,09	1,08	1,06	1,01	0,99	0,97	0,96	0,95
40	24	1,11	1,11	1,10	1,09	1,06	1,02	1,00	0,98	0,97	0,96
40	32	1,07	1,07	1,06	1,04	1,02	0,98	0,96	0,94	0,93	0,92
40	40	1,06	1,05	1,04	1,03	1,01	0,96	0,94	0,93	0,92	0,91
40	48	1,10	1,09	1,08	1,07	1,05	1,00	0,98	0,97	0,95	0,95

Tab. 10: Zuwachskorrekturfaktoren für die Fichte bei einzelstammweise Mischung mit Buche bei unterschiedlichen Oberhöhenkombinationen und Mischungsanteilen.

h100_fi	h100_bu	5%	15%	25%	35%	45%	55%	65%	75%	85%	95%
10	6	1,50	1,38	1,33	1,31	1,28	1,22	1,20	1,20	1,20	1,20
10	8	1,46	1,34	1,29	1,27	1,24	1,19	1,17	1,16	1,16	1,16
10	10	1,41	1,29	1,25	1,23	1,20	1,15	1,13	1,12	1,12	1,12
10	12	1,40	1,28	1,24	1,22	1,19	1,14	1,12	1,11	1,11	1,11
15	9	1,36	1,24	1,20	1,18	1,15	1,10	1,08	1,08	1,08	1,08
15	12	1,32	1,21	1,17	1,15	1,12	1,07	1,05	1,05	1,05	1,05
15	15	1,27	1,17	1,12	1,11	1,08	1,03	1,02	1,01	1,01	1,01
15	18	1,26	1,16	1,12	1,10	1,07	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00
20	12	1,34	1,23	1,19	1,17	1,14	1,09	1,07	1,07	1,07	1,07
20	16	1,31	1,20	1,16	1,14	1,11	1,06	1,04	1,04	1,04	1,04
20	20	1,26	1,16	1,12	1,10	1,07	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00
20	24	1,25	1,15	1,11	1,09	1,06	1,02	1,00	1,00	0,99	0,99
25	15	1,39	1,27	1,23	1,21	1,18	1,13	1,11	1,10	1,10	1,10
25	20	1,35	1,24	1,19	1,17	1,15	1,10	1,08	1,07	1,07	1,07
25	25	1,30	1,19	1,15	1,13	1,10	1,06	1,04	1,03	1,03	1,03
25	30	1,29	1,18	1,14	1,12	1,10	1,05	1,03	1,03	1,02	1,02
30	18	1,41	1,29	1,25	1,23	1,20	1,15	1,13	1,12	1,12	1,12
30	24	1,37	1,26	1,21	1,20	1,17	1,11	1,10	1,09	1,09	1,09
30	30	1,32	1,21	1,17	1,15	1,12	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05
30	36	1,31	1,20	1,16	1,14	1,11	1,07	1,05	1,04	1,04	1,04
35	21	1,42	1,30	1,26	1,24	1,21	1,16	1,14	1,13	1,13	1,13
35	28	1,38	1,27	1,22	1,20	1,18	1,12	1,10	1,10	1,10	1,10
35	35	1,33	1,22	1,18	1,16	1,13	1,08	1,06	1,06	1,06	1,06
35	42	1,32	1,21	1,17	1,15	1,12	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05
40	24	1,42	1,30	1,26	1,24	1,21	1,16	1,14	1,13	1,13	1,13
40	32	1,38	1,27	1,22	1,20	1,18	1,12	1,10	1,10	1,10	1,10
40	40	1,33	1,22	1,18	1,16	1,13	1,08	1,06	1,06	1,06	1,06
40	48	1,32	1,21	1,17	1,15	1,12	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05

Die Korrekturwerte für die Buche schwanken zwischen einem Minderzuwachs von 8 % bis zu einem Mehrzuwachs von 31 %. Für die Fichte werden ausschließlich Mehrzuwächse von bis zu 50 % ausgewiesen. Die Werte nehmen mit zunehmendem Fichtenanteil für beide Baumarten ab. Die Werte für die Buche sind bei Höhengleichheit der Baumarten am geringsten. Bei sonst gleichen Bedingungen sind die Werte für Fichte bei einer Fichten-Oberhöhe von 18 m am geringsten.

Insgesamt liegen diese Werte im Rahmen des von Pretzsch (2016) hergeleiteten mittleren Mischungseffektes von 21 % Mehrzuwachs und korrespondieren mit dem von ihm empfohlenen konservativ gewählten Zuwachskorrekturfaktor von 10 % zur Anpassung von Reinbestandsertragstafeln in Buchen-Fichten-Mischbeständen.

## 6. Fazit und Ausblick

Drei wesentliche Arbeitsschritte waren nötig, um für die neuen Ertragstafeln Mischungseffekte auf den Zuwachs herzuleiten: (1) die Neuparametrisierung des Grundflächenzuwachsmodells, (2) die Entwicklung eines Modells, welches die Sensitivität von TreeGrOSS auf Baumartenmischungen erhöht, und schließlich (3)

die simulative Herleitung und Modellierung von Zuwachskorrekturfaktoren für Mischbestände. Die Arbeitsschritte (1) und (2) benötigten unerwartet viel Aufwand, so dass der Arbeitsschritt (3) nur exemplarisch für die Mischung Buche-Fichte durchgeführt werden konnte. Allerdings bestehen auch weiterhin methodische Schwierigkeiten, die einen Einsatz der Korrekturfaktoren derzeit noch nicht empfehlen.

Die Mischbestandseffekte in den Simulationsergebnissen beruhen allein auf einer veränderten relativen Wachstumsrate, während eine veränderte Allometrie oder Stammzahlhaltefähigkeit durch TreeGrOSS im Mischbestand nicht abgebildet wird (vgl. Pretzsch et al. 2017, S. 204). Grundsätzlich zeigen die Simulationsergebnisse die Mischbestandseffekte des Waldwachstumssimulators, eine Überprüfung der Ergebnisse an Versuchsflächen ist dringend geboten.

Die modellierten Zuwachskorrekturfaktoren für Mischbestände aus Fichte und Buche zeigen nur indirekt über die Oberhöhenrelationen eine Standortssensitivität auf, die in anderen Untersuchungen jedoch als sehr relevant eingestuft wird (vgl. Pretzsch et al., 2010).

Das methodische Vorgehen und die hier präsentierten ersten Ergebnisse sind vielversprechend, bedürfen aber noch weiterer Analysen und Validierungen. Daher sollten die Ergebnisse derzeit noch nicht als Korrekturfaktoren für Mischbestände in Ertragstafeln verwendet werden, zumal auch noch keine Zuwachskorrekturfaktoren für die anderen relevanten Baumartenmischungen vorliegen.

## Literatur

- Biber, P., 1996: Konstruktion eines einzelbaumorientierten Wachstumssimulators für Fichten-Buchen-Mischbestände im Solling. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 142. 252 S.
- Hansen, J., und Nagel, J. (2014). Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS - Anwendung und theoretische Grundlagen. (H. Spellmann, Ed.) (Beiträge a). Göttingen: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
- Nagel, J. (1999). Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag.
- Pielou, E.C., 1977: Mathematical Ecology. John Wiley & Sons, New York: 384 S.
- Pretzsch, H. (2016). Ertragstafel-Korrekturfaktoren für Umwelt- und Mischungseffekte. AFZ-Der Wald, 14, 47–50.
- Pretzsch, H., Block, J., Dieler, J., Dong, P. H., Kohnle, U., Nagel, J., ... Zingg, A. (2010). Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. *Annals of Forest Science*, 67(712).
- Pretzsch, H., Forrester, D. I., & Bauhus, J. (2017). *Mixed-Species Forests*. (H. Pretzsch, D. I. Forrester, & J. Bauhus, Eds.) (1.). Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9>
- Rigby, R. A. and Stasinopoulos D. M. (2005): Generalized additive models for location, scale and shape, (with discussion), *Appl. Statist.*, 54, part 3, S. 507-554.
- Schwarz, G. (1978): Estimating the Dimension of a Model. *Annals of Statistics*. 2, Nr. 6, doi:10.1214/aos/1176344136, JSTOR 2958889, S. 461–464.
- Sprauer, S., und Nagel, J. (2015). Aboveground productivity of pure and mixed Norway spruce and European beech stands. *European Journal of Forest Research*, 134, 781–792. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0889-8>
- Wood, S.N. (2004): Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models. *J. Amer. Statist.*

## **Arbeitspaket 4**

### **1. Hintergrund zur Erstellung von Bestandessortentafeln**

Die Bewertung der Nutzfunktion von Waldbeständen orientiert sich nicht an der reinen Massenleistung ausgedrückt über Bestandesmittelwerte wie Vorrat und Holzzuwachs, sondern an der Häufigkeitsverteilung zu Marktpreisen bewerteter Sortimente (Schmidt 2001). Bestandessortentafeln dienen der Forsteinrichtung und Waldbewertung als Planungsgrundlage, indem sie eine Sortimentsverteilung in Abhängigkeit vom Durchmesser des Grundflächenmittelstammes angeben. Ein verändertes Zuwachsniveau und andere waldbauliche Behandlungskonzepte lassen, genau wie bei den Ertragstafeln, eine Überarbeitung der heute in der Praxis gängigen Bestandessortentafeln (z. B. Schöpfer und Dauber 1985, Offer und Staupendahl 2009) nötig erscheinen.

Das Hauptziel dieses Arbeitspaketes war die Erstellung neuer Bestandessortentafeln im Anhalt an die neuen Ertragstafeln. Daher spiegeln die neuen Bestandessortentafeln Stärkeklassenverteilungen wider, die dem empfohlenen waldbaulichen Behandlungskonzept der gestaffelten Durchforstung entsprechen und somit die Bestandesstruktur und Bestandesbehandlung berücksichtigen. Neben der Stärkeklassenverteilung wird die Sortenbildung jedoch auch durch andere obligate und fakultative Holzmerkmale entscheidend mitbestimmt, die baumartenspezifisch in die Güteklassenbildung eingehen (DFWR u. DHWR 2020). Deshalb war es ein weiteres wichtiges Ziel des Vorhabens, realitätsnahe Prognosemodelle für wichtige Gütemerkmale der Hauptbaumarten für die Erstellung der Bestandessortentafeln nutzbar zu machen bzw. neu zu entwickeln.

### **2. Entwicklung eines Bewertungsschemas für die Güteklassenvergabe**

Zu Beginn wurden die baumartenspezifischen Qualitätsmerkmale identifiziert, die laut Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel (RVR) sortierrelevant sind (DFWR u. DHWR 2020). Diese Qualitätsmerkmale wurden dann genutzt, um artspezifische Bewertungsschemata für die Güteklassenvergabe zu erstellen. Jedoch wurden einige Merkmale, für die weder Schätzmodelle noch Datenerhebungen aus Versuchsflächen zur Verfügung standen, wie z. B. Weißfäule bei der Buche, Ringschäle bei der Eiche oder Verfärbung bei Fichte und Kiefer, bei der Erstellung der Bewertungsschemata ausgeschlossen (vgl. auch Zwischenbericht 2017). Abb. 23 zeigt ein Bewertungsschema am Beispiel der Baumart Buche, das eine eigene Güteklassenzuordnung auf Einzelbaumebene ermöglicht.

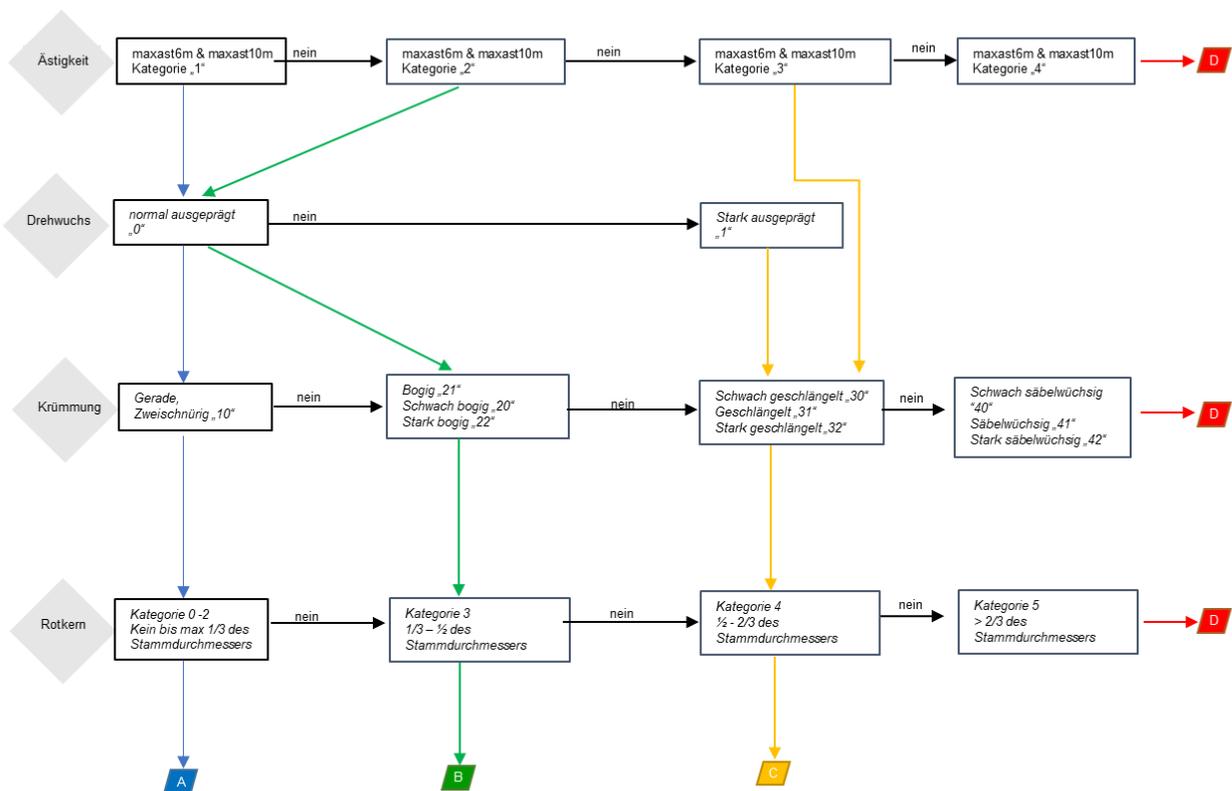


Abb. 23: Entwicklung eines Bewertungsschemas für die Güteklassenvergabe.

Ausgangspunkt der Bewertung ist das Qualitätsmerkmal Astigkeit. Weitere Merkmale sind Drehwuchs, Krümmung und Rotkern. Optional kann auch das qualitätsbestimmende Merkmal Rotkern noch differenzierter berücksichtigt werden (siehe Bewertungsschemata aller Baumarten in Anhang 9). Analog zu den Laubbaumarten wurde auch für das Nadelholz (Fichte, Douglasie und Kiefer) ein Bewertungsschema in Anhalt an die RVR entwickelt. Das Fichten-Bewertungsschema ist in Abb. 24 dargestellt. Hier werden die Qualitätsmerkmale Astigkeit, Abholzigkeit und Krümmung berücksichtigt. Laut RVR führen bei der Beurteilung der Astigkeit nicht verwachsene Äste an sich erstmal noch zu keiner Abwertung von der Güteklasse B nach C (Zusatz 7 der RVR), entscheidend sind eher die Fauläste. Eine Unterscheidung diesbezüglich, also ob ein Ast nicht verwachsen oder gar faul ist, liegt allerdings nicht vor, weshalb hier folgende Anpassung vorgenommen wurde: Totäste werden bis zu einer Stärke von 25 mm der Kategorie 2 (B) zugeordnet, danach bis 40 mm der Kategorie 3 (C).

Es ist schwierig vorherzusagen, aus wie viel Prozent Totäste letztendlich Fauläste werden oder wie lange deren Überwallung dauert. Dies hängt u.a. davon ab, ob der ganze Ast abgebrochen ist, oder wie lang der noch bestehende Aststummel ist, aber auch von Faktoren wie z.B. Luftfeuchtigkeit (beeinflusst Pilzbefall bzw. Fäulnis) oder der Grad der Freistellung (da hiervon das Dickenwachstum abhängt). Modelle hierfür gibt es derzeit noch nicht.

Im Bewertungsschema wird die Abholzigkeit nach der RVR in Kategorien eingeteilt, die abhängig vom Mittendurchmesser sind. Die Krümmung bzw. Schaftform wurde bei der weiteren Auswertung ignoriert, da diese bei der Fichte nur eine untergeordnete Rolle spielt. Fast ausschließlich kommt hier die Kategorie 1 vor, d.h. zweischnurig oder maximal schwach bogig.

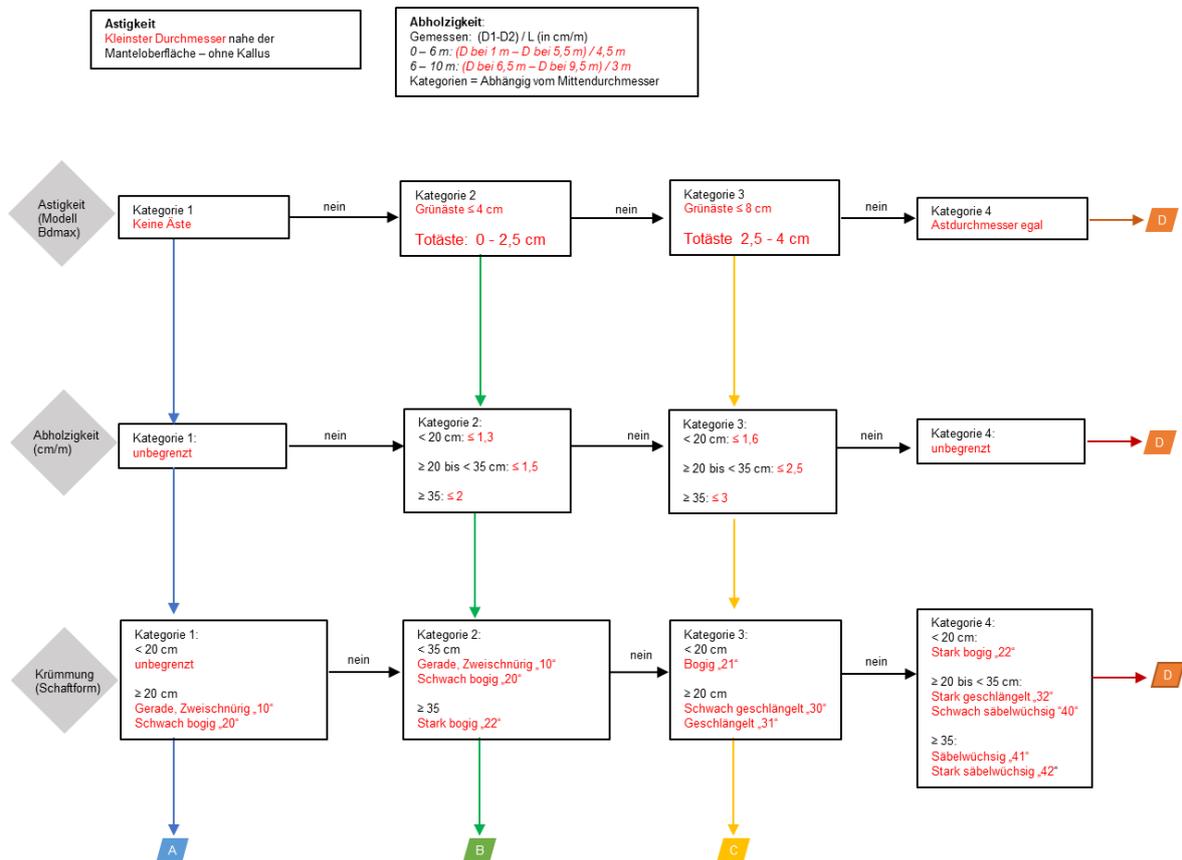


Abb. 24: Entwicklung eines Fichten-Bewertungsschemas für die Güteklassenvergabe.

### 3. Schätzung der Qualitätsparameter für die Erstellung der Bestandessortentafeln

Während sich die Stärkeklassenverteilung für die neuen Bestandessortentafeln direkt aus den einzelbaumweisen Simulationsdaten, die für die Herleitung der neuen Ertragstafeln genutzt wurden, durch Sortimentierung ergibt, fehlen Angaben zu Qualitätsparametern in der Ausgabedatei des Waldwachstumssimulators. Daher war es ein Ziel, die in den Bewertungsschemata zur Güteklassenvergabe aufgeführten Qualitätsmerkmale mit Modellen zu schätzen.

Das wichtigste und in den Bewertungsschemata erste Qualitätsmerkmal für alle Baumarten ist die Astigkeit. Für das Nadelholz stehen die Astigkeitsmodelle von Schmidt (2001) zur Verfügung. Für Buche und Eiche gibt es aktuell keine geeigneten Modelle, die mit verfügbaren Parametern Astanzahlen und Aststärken in verschiedenen Stammhöhen schätzen könnten. Auf ausgewählten Versuchsflächen der NW-FVA werden jedoch Qualitätsmerkmale am Einzelstamm erfasst (NFV 2005). In Abb. 25 ist exemplarisch für den Buchen-Durchforstungsversuch Münden 2027j die Qualitätsansprache grafisch ausgewertet.

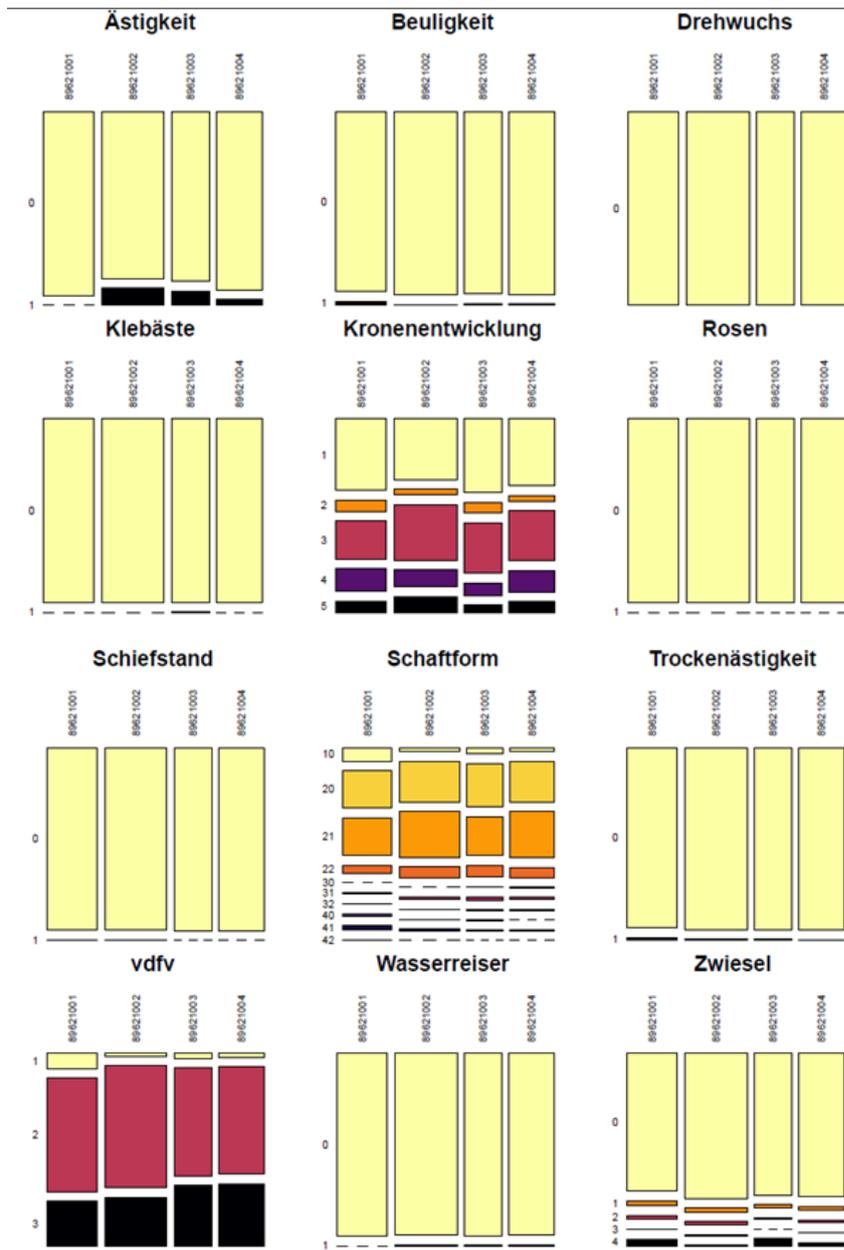


Abb. 25: Mosaikplot der absoluten Häufigkeiten von Qualitätsmerkmalen auf dem Buchen-Durchforstungsversuch Münden 2027j im Alter 71 Jahre (dargestellt sind die Verteilungen für vier Parzellen mit den Endnummern 01 (mäßige Hochdf.), 02 (Nullfläche), 03 (sehr starke Hochdf.) und 04 (starke Hochdf.)).

Aus Abb. 25 wird ersichtlich, dass die Qualitätsmerkmale auf den Versuchsflächen in Klassen angesprochen werden, häufig nur mit zwei Ausprägungen. So wird das Merkmal Astigkeit nur als normal- (0) bzw. starkastig (1) angesprochen. Im Ergebnis zeigt sich, dass Unterschiede in der Astigkeit zwischen den Parzellen bestehen, die Ausprägung normalastig jedoch weit überwiegt. Dieser Umstand führte auch dazu, dass eine Modellierung der Astigkeit in Abhängigkeit von der Bestandesbehandlung erfolglos verlief.

In einem nächsten Schritt wurden daher für Buche auf vier Versuchsflächen und Eiche auf zwei Versuchsflächen neue Astigkeitsdaten erhoben (vgl. Zwischenbericht 2018). Dabei wurde die ursprünglich dichotome Ansprache für Buche in vier Kategorien getrennt nach gesunden und toten Ästen aufgegliedert und zusätzlich wurde die Ansprache auf zwei Stammabschnitten durchgeführt (Tab. 11).

Tab. 11: Übertragung der Buchendatenaufnahme in Güteklassen in Anlehnung an die RVR.

	Gesunde Äste 0 - 6 m	Totäste 0 - 6 m	Gesunde Äste 6 - 10 m	Totäste 6 - 10 m	Überwallte Äste
	Anzahl:	Anzahl:	Anzahl:	Anzahl:	Rundnarbenhöhe zu -breite:
<b>Kategorie 1 (= A)</b>	0 Äste	0 Äste	0 Äste	0 Äste	≤ 1:4
<b>Kategorie 2 (= B)</b>	1 - 3 Äste	2 Äste	1 - 2 Äste	1 Ast	≤ 1:2 max 10 cm Rundnarbenhöhe
<b>Kategorie 3 (= C)</b>	4 - 6 Äste	3 Äste	3 - 4 Äste	2 Äste	≥ 1:2 <b>oder</b> Rundnarbenhöhe > 10 cm
<b>Kategorie 4 (= D)</b>	> 6 Äste	> 3 Äste	> 4 Äste	> 2 Äste	

Für die Baumart Eiche wurde die Aufnahmeanweisung um die Kategorien Rosen, Wasserreiser und Auswüchse erweitert (Tab. 12).

Tab. 12: Umsetzung der Eichendatenaufnahme in Güteklassen – in Anlehnung an die RVR.

	Gesunde Äste <small>Anzahl (Durchmesser beim Astansatz)</small> 0 - 6 m	Totäste 0 - 6 m	Gesunde Äste 6 - 10 m	Totäste 6 - 10 m	Überwallte Rosen <small>Astgehöhe = 1/2 des Durchmessers der Rose</small> 0 - 6 m      6 - 10 m		Wasserreiser <small>Anzahl einzelne</small> 0 - 6 m      6 - 10 m		Auswüchse <small>Anzahl Wasserreisertöpfe</small> 0 - 6 m      6 - 10 m	
	<b>Kategorie 1 (= A)</b>	0	0	0	0	0 - 6 Rosen ≤ 3 cm	0 - 4 Rosen ≤ 3 cm	≤ 3	≤ 2	0
<b>Kategorie 2 (= B)</b>	1 - 3 Äste ≤ 4 cm <b>oder</b> 1 Ast > 4 cm	1 - 2 Äste ≤ 4 cm	1 - 2 Äste ≤ 4 cm <b>oder</b> 1 Ast > 4 cm	1 Ast ≤ 4 cm	0 - 6 Rosen ≤ 4 cm	0 - 4 Rosen ≤ 4 cm	> 3	> 2	1 bis 3	1 bis 2
<b>Kategorie 3 (= C)</b>	> 3 Äste ≤ 4 cm <b>oder</b> > 1 Ast > 4 cm	> 2 Äste ≤ 4 cm <b>oder</b> 1 - 3 Äste > 4 cm	> 2 Äste ≤ 4 cm <b>oder</b> > 1 Ast > 4 cm	> 1 Ast ≤ 4 cm <b>oder</b> 2 Äste > 4 cm	> 6 Rosen <b>oder</b> > 4 cm	> 4 Rosen <b>oder</b> > 4 cm			> 3	> 2
<b>Kategorie 4 (= D)</b>		> 3 Äste > 4 cm		> 2 Äste > 4 cm						

Der Mehrwert dieser detaillierten Ansprache des Qualitätsmerkmals Astigkeit zeigt sich in Abb. 26. Hier wird wie in Abb. 25 die Häufigkeitsverteilung der Astigkeitsansprache auf dem Buchen-Durchforstungsversuch Münden 2027j dargestellt.

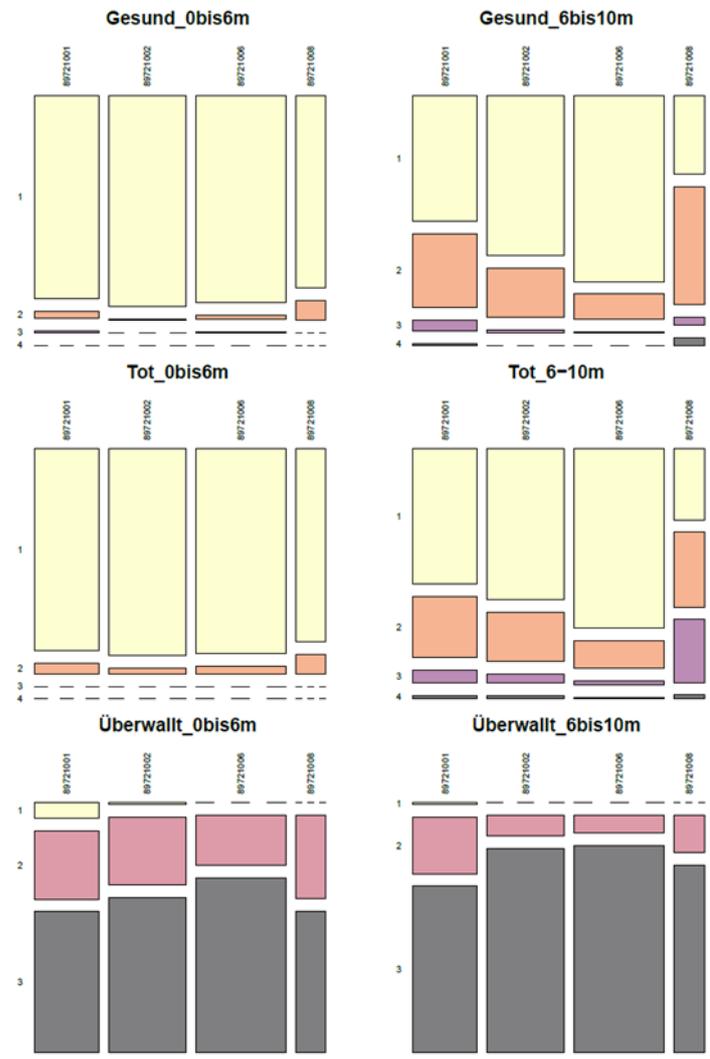


Abb. 26: Mosaikplot der absoluten Häufigkeiten von Qualitätsmerkmalen laut neuem Aufnahmeschema (vgl. Tab. 11) auf dem Buchen-Durchforstungsversuch Münden 2027j im Alter 71 Jahre (dargestellt sind die Verteilungen für vier Parzellen mit den Endnummern 01 (mäßige Hochdf.), 02 (Nullfläche), 03 (sehr starke Hochdf.) und 04 (starke Hochdf.)).

Insbesondere auf dem Stammabschnitt 6 bis 10 m zeigt sich ein deutlich differenziertes Bild bei der Ansprache der Astigkeit (Abb. 26). In den oben angeführten Bewertungsschemata für Buche (vgl. Abb. 23) und Eiche (vgl. Anhang 9) sind die detaillierten Astigkeitskriterien bereits integriert. Insgesamt waren die Ergebnisse auf den vier Buchen- und zwei Eichenflächen so überzeugend, dass zukünftig die Qualitätsansprache auf den Versuchsflächen der NW-FVA dieser neuen Aufnahmeanweisung folgen soll. Im Rahmen dieses Projektes reicht die aktuell zur Verfügung stehende Datenbasis für Modellierungszwecke jedoch nicht aus.

Insofern muss die Güteklasseneinteilung für die neuen Bestandessortentafeln auf anderem Wege erfolgen. Hier besteht Forschungsbedarf, der im Rahmen des Projektes nicht geleistet werden konnte. Zumindest für die Nadelbaumarten kann die Astigkeit mit Hilfe des neu programmierten Astigkeits-R-packages auf Basis der Modelle von Schmidt (2001) geschätzt und für eine Güteklasseneinteilung zukünftig genutzt werden.

#### 4. Erstellung eines Astigkeits-R-packages

In den Astigkeitsmodellen von Schmidt (2001) werden die Parameter Baumart, BHD, Baumhöhe, Kronenansatzhöhe genutzt. Mehrere Teilmodelle berechnen den untersten Tot- und Grünast, die Übergangsstreckenlänge, in der Grün- und Totäste gemeinsam auftreten können, sowie die Totaststreckenlänge (schematisch dargestellt in Abb. 27). Das Modell schätzt die äußeren Astdurchmesser für die stärksten Quirläste je Quirl sowie deren Höhe am Stamm (für Details siehe Anhang 10a und b).

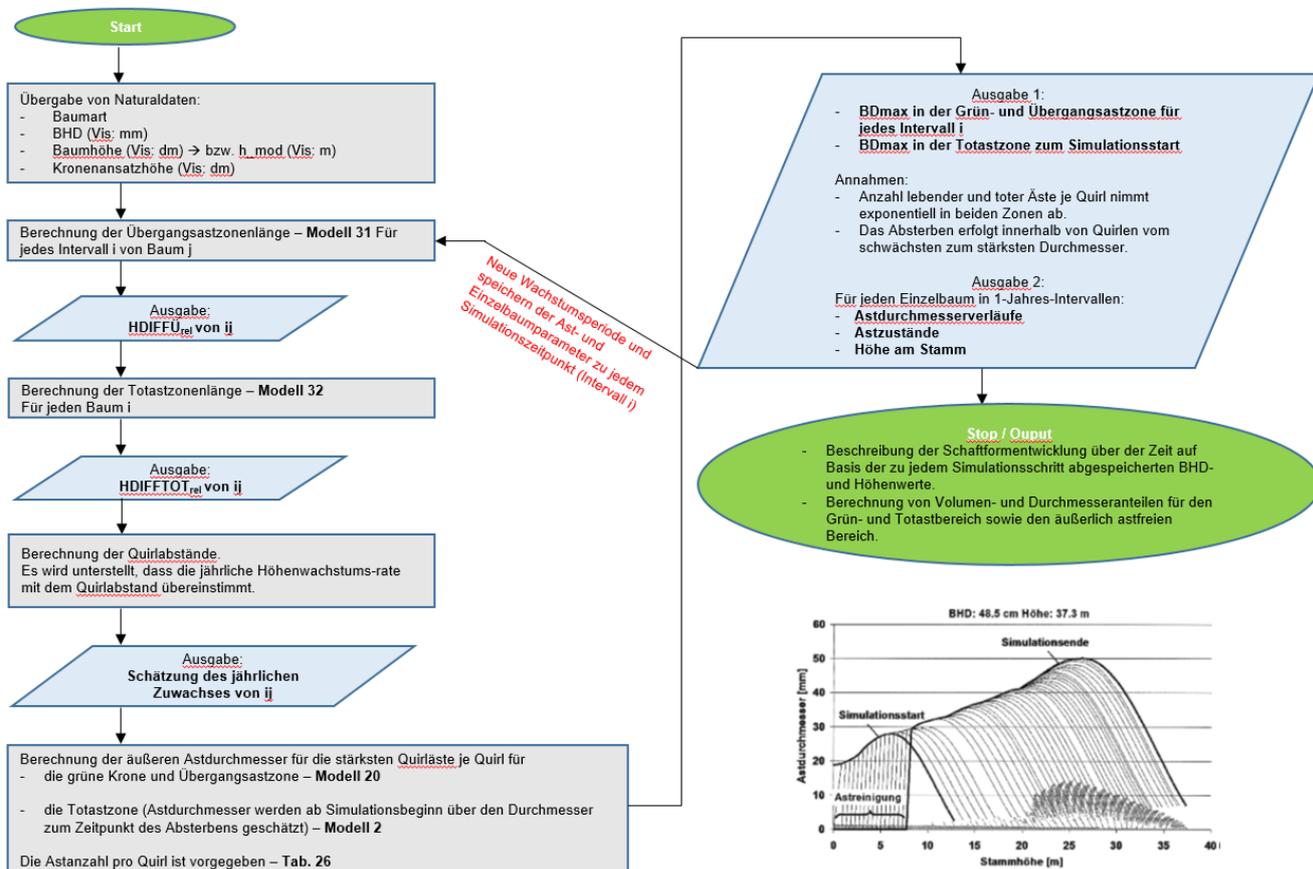


Abb. 27: Schematische Darstellung des Ablaufs der Astigkeitsmodelle.

Der Test der Astigkeitsmodelle erfolgte auf einer Fichtenfläche (edvid: 471511), welche 30 Jahre in die Zukunft simuliert wurde. Die Versuchsfläche ist 62 Jahre alt und umfasst vier Parzellen, das sind 47151101: Hochdurchforstung stark, 47151102: Lichtung mäßig, 47151103: Niederdurchforstung stark und 47151104: Niederdurchforstung mäßig (Abb. 28).

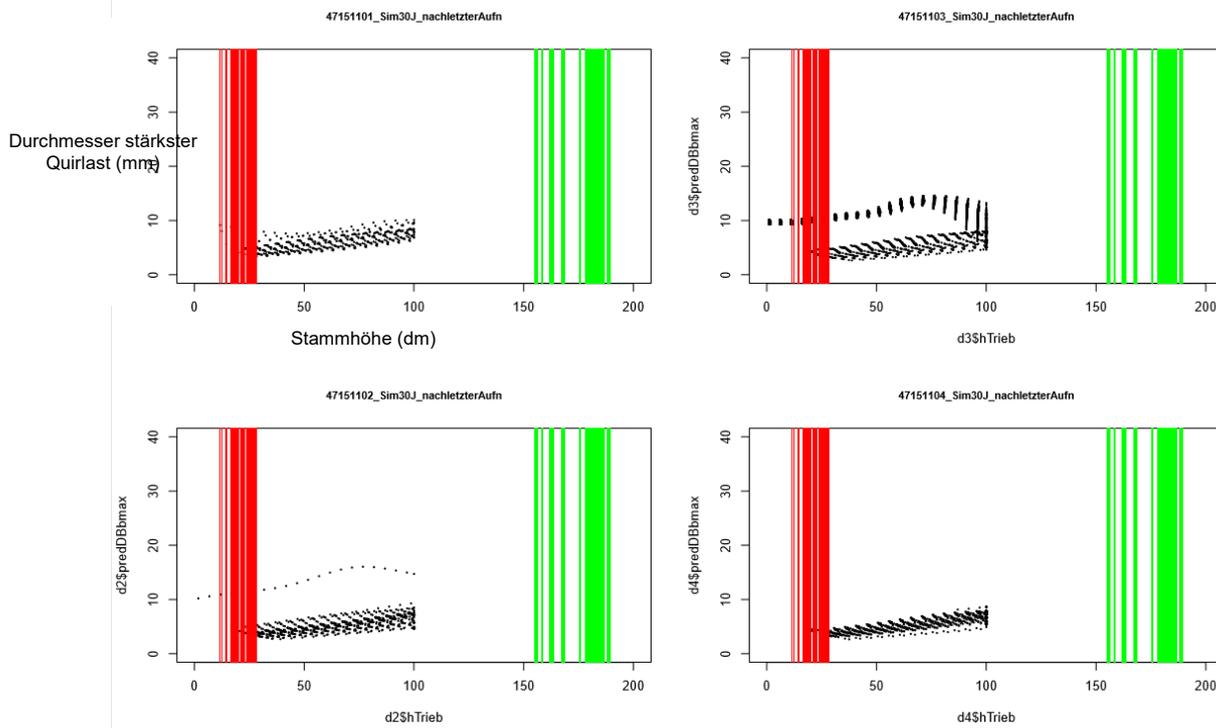


Abb. 28: Test des Astigkeitsmodells an einer Fichtenfläche (edvid: 471511), welche 30 Jahre in die Zukunft simuliert wurde. Gezeigt werden die stärksten Quirläste mit ihren Höhen am Stamm (in dm) und ihren Aststärken (in mm). Die roten Linien kennzeichnen die untersten Totäste, die grünen Linien die untersten Grünäste.

Der Test des Modells war positiv, eine Anwendung auf 14 weiteren Fichtenbeständen wurde durchgeführt. Mit den Informationen aus dem Modell, ob ein Ast tot oder lebend ist, wo er sitzt und welchen Durchmesser er hat, kann auf verschiedenen Abschnitten mit dem Bewertungsschema einzelbaumweise eine Güteklassenvergabe erfolgen. Anschließend wurden die Qualitätsverteilungen der Bestände bestimmt (Abb. 29).

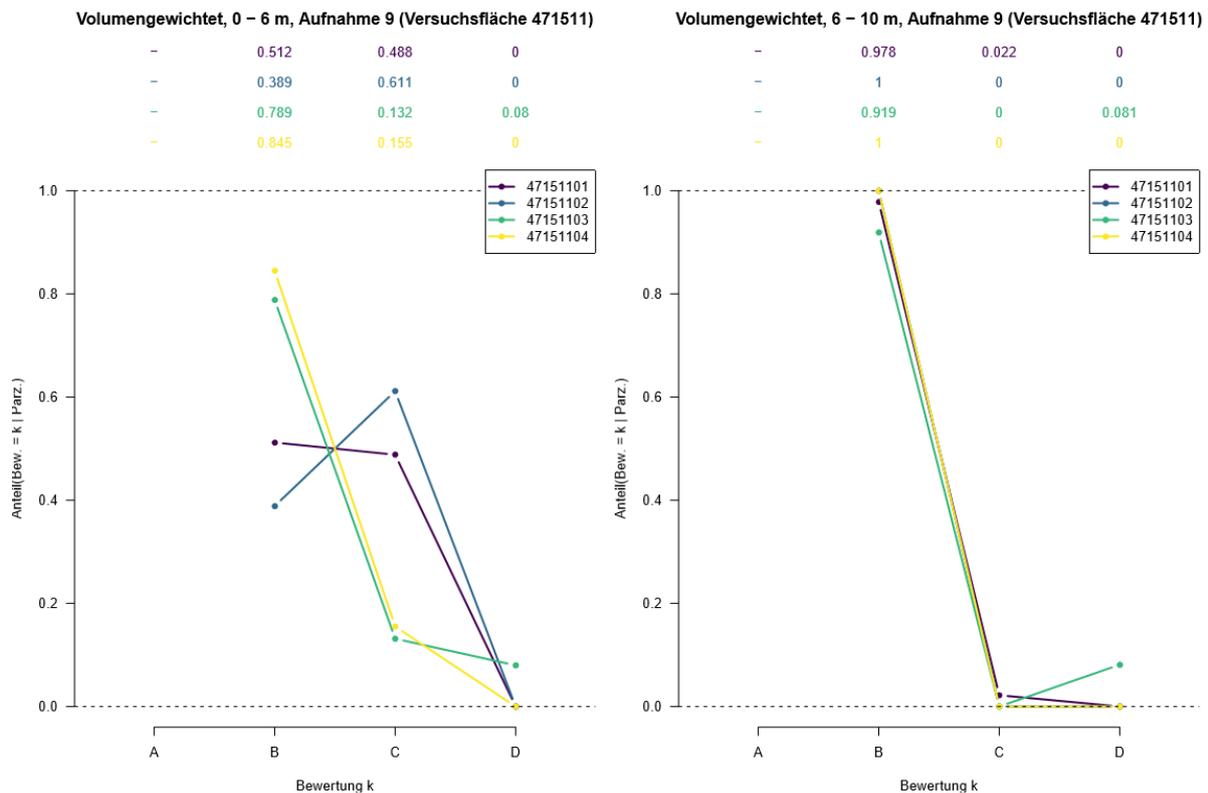


Abb. 29: Versuchsfläche 471511: Anteile der volumengewichteten Qualitäten.

Die Astigkeitsmodelle sind – mit eigenen Koeffizienten - auch für die Kiefer und Douglasie anwendbar. Es erfolgte hierzu eine Neuparametrisierung der Daten.

Um das Astigkeitsmodell großflächiger anwenden zu können, sprich für alle generieren Bestände sowie alle Daten, die aus einer Simulation gewonnen werden, wurde entschieden, ein R-Package für die drei Nadelbaumarten zu erstellen.

Für das Astigkeits-R-package wurden alle Teilmodelle neu gefittet und implementiert. Baumartenspezifischen Informationen, sprich Koeffizienten und Grenzen für Extrapolationen sind eingepflegt worden. Eine Koppelung des R-Packages mit TreeGrOSS böte den Vorteil, direkt nach jedem Simulationsschritt a) die Astigkeiten berechnen und b) daraus folgend eine Qualitätsvergabe vornehmen lassen zu können, die dann wiederum Einfluss hat auf die Sortierung der Sortimente. Diese technisch anspruchsvolle Kopplung konnte jedoch bisher nicht umgesetzt werden. Die Simulation des Nadelholzes und ihre Sortierung nach jedem Simulationsschritt kann daher nur ohne Berücksichtigung der Astigkeit/Qualität vorgenommen werden. Die Astigkeiten und damit die Qualitätsverteilungen der Bestände können erst hinterher bestimmt werden.

## 5. Modellierung der Durchmesserverteilung

Die Simulation zur Erstellung der neuen dynamischen Ertragstafeln beruhte auf Startbeständen unterschiedlichen Alters, die jeweils 30 Jahre fortgeschrieben wurden (Zeitscheibensimulation). Die korrespondierenden Durchmesserverteilungen sollten als Einzelbauminformationen für eine Sortimentierung dienen. Problematisch durch die Zeitscheibensimulation ist es, dass eine kontinuierliche Entwicklung der Durchmesserverteilung über dem Alter nicht gegeben ist, sondern Sprünge und Brüche nach den 30-jährigen Simulationsperioden entstehen. Ziel war es daher, diese Durchmesserverteilung so auszugleichen und zu modellieren, dass eine kontinuierliche Entwicklung über dem Alter und der absoluten

Höhenbonität (SI) dargestellt wird. Dieses Verfahren ist analog zum Vorgehen, die Simulationsdaten für die Ableitung der Ertragstafeln ebenfalls mit Modellen auszugleichen. Dabei wurde die Durchmesserverteilung des verbleibenden Bestandes und gesondert die Durchmesserverteilung des ausscheidenden Bestandes als nicht-lineare Funktionen des Alters und der Oberhöhenbonität als GAM-Regression mit Weibull-verteilter Response-Variablen (BHD) modelliert. Außerdem wurden Monotonie-Bedingungen für die Effekte von Alter und Oberhöhenbonität auf die Weibullparameter vorgegeben, um zu gewährleisten, dass die Entwicklung stetig verläuft.

Abb. 30 zeigt am Beispiel der Baumart Fichte, gestaffelte Durchforstung die kontinuierlichen modellierten Durchmesserverteilungen für die Bestandeskollektive verbleibender (hellblau) und ausscheidender (dunkelblau) Bestand sowie Z-Bäume (rot).

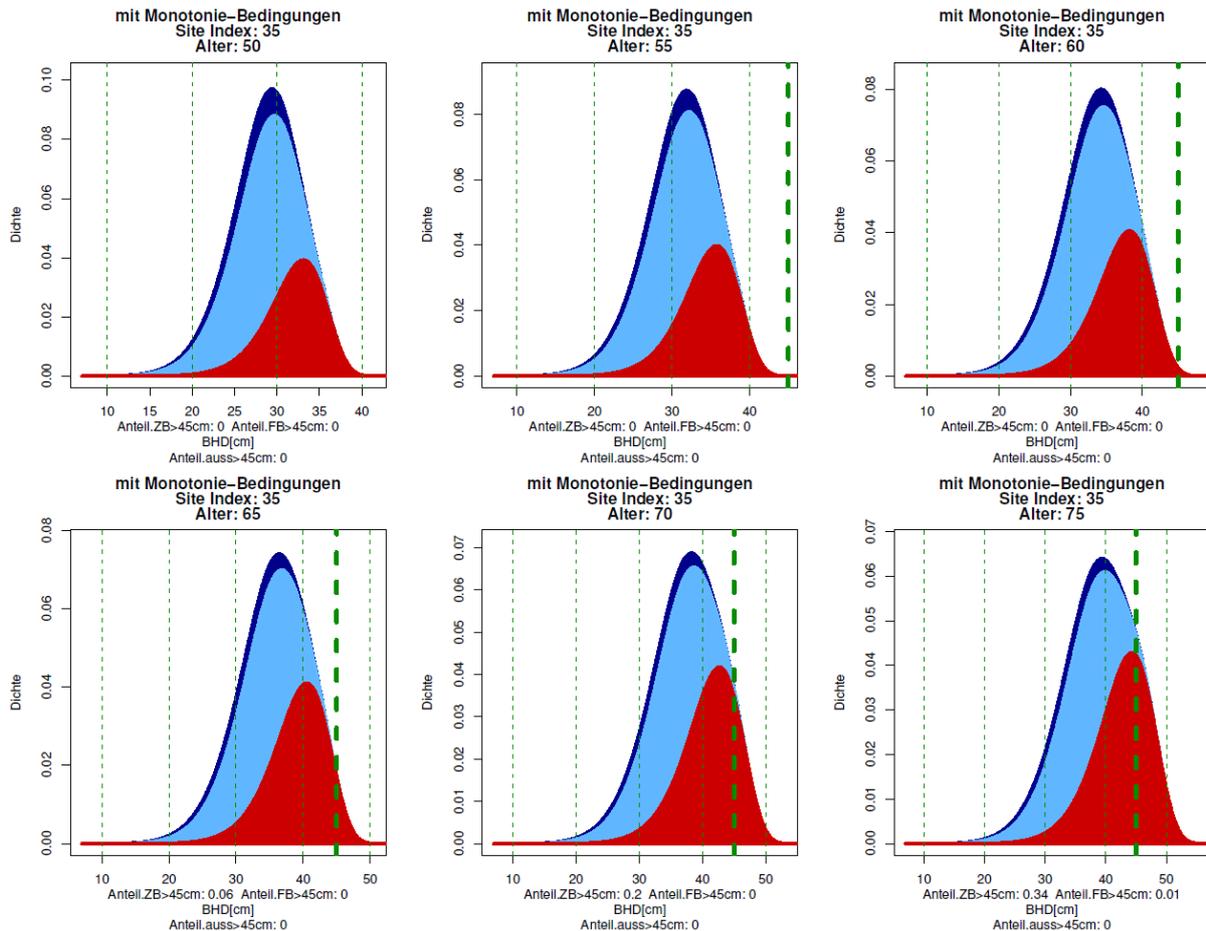


Abb. 30: Die kontinuierlichen modellierten Durchmesserverteilungen für die Bestandeskollektive verbleibender (hellblau) und ausscheidender (dunkelblau) Bestand sowie Z-Bäume (rot) der Baumart Fichte, gestaffelte Durchforstung, für den Altersbereich 50 bis 75 Jahre bei einer Oberhöhenbonität (SI) von 35 m. Die fette gestrichelte grüne Linie markiert eine mögliche Zielstärke.

Diese Durchmesserverteilungen waren - nachdem die Einzelbaumhöhen-Ergänzung erfolgte - die Eingangsdaten für die zu erstellenden Sortentafeln. Es können somit Sortentafeln für den verbleibenden und ausscheidenden Bestand erzeugt werden.

Da eine Publikation der neuen Bestandessortentafeln aufgrund von methodischem Forschungsbedarf zum jetzigen Zeitpunkt nicht wünschenswert ist, wurde die Modellierung der Durchmesserverteilungen unter gestaffelter Durchforstung nur für die Baumart Fichte durchgeführt. In früheren Simulationsläufe zur Ertragstafelerstellung unter mäßiger und starker Hochdurchforstung wurden zwar bis zur Erstellung von Bestandessortentafeln nach der geschilderten Methodik für alle Baumarten durchgeführt, aber aufgrund des Beschlusses, nur die gestaffelte Durchforstung bei der Ertragstafel zu berücksichtigen, verworfen.

## 6. Erstellung der Bestandessortentafeln

Für eine direkte Kompatibilität mit den neuen Ertragstabellen wurden die neuen Bestandessortentafeln für die Baumart Fichte für die entsprechenden Bonitäten und unterstellte waldbauliche Norm einer gestaffelten Durchforstung erstellt. Auf der oben geschilderten Datengrundlage wurde einzelbaumweise eine Sortimentierung für den verbleibenden und ausscheidenden Bestand vorgenommen und anschließend zu 20-jährigen Altersklassen zusammengefasst. Die Sortierregeln wurden in Anlehnung an die RVR erstellt (siehe Zwischenbericht 2019, Abb. 26).

Für die Baumart Fichte, gestaffelte Durchforstung geben die Abb. 31 und 32 eine Übersicht zu den geschätzten Sortimenten.

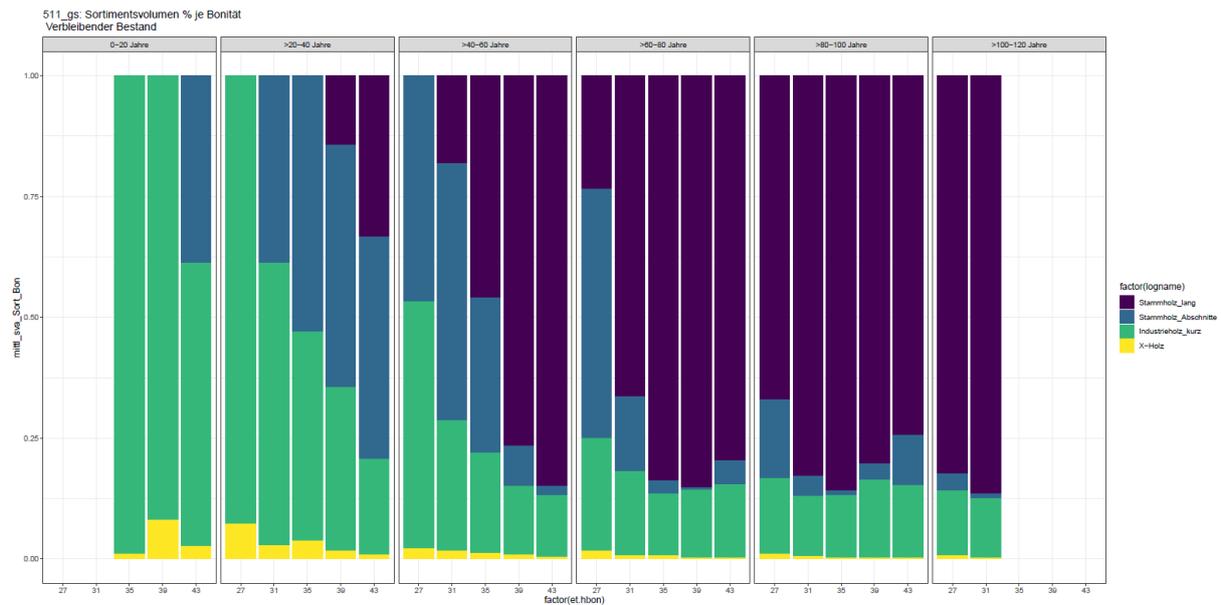


Abb. 31: Verteilung der Volumina des verbleibenden Bestandes für die verschiedenen Sortimente in 20-jährigen Altersklassen und verschiedenen absoluten Oberhöhenbonitäten für Fichte, gestaffelte Durchforstung.

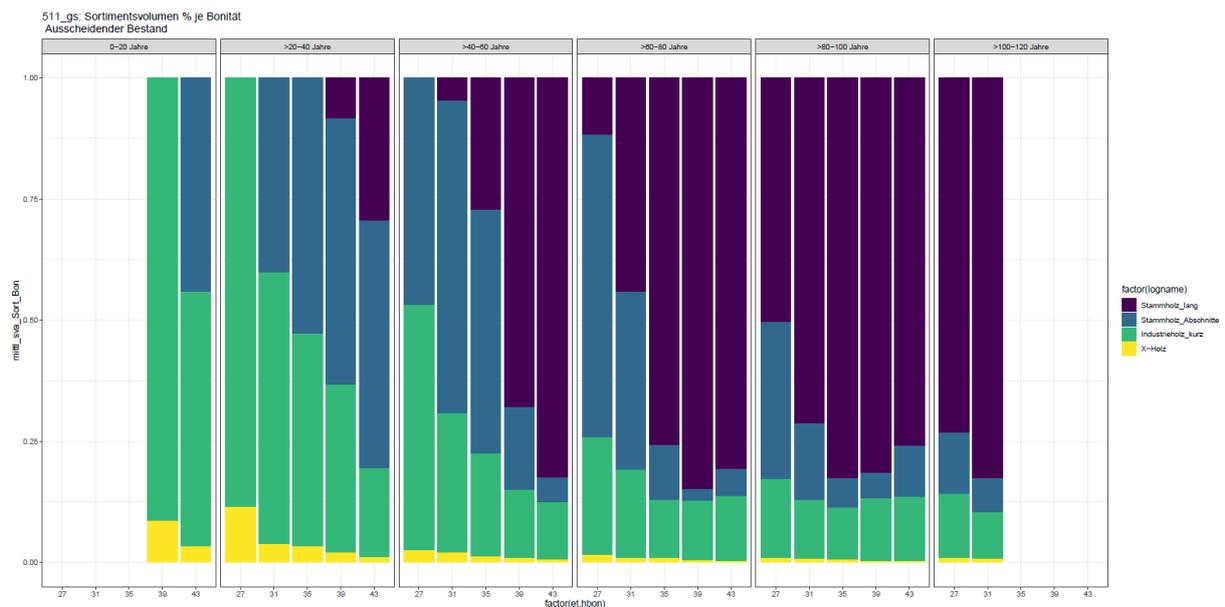


Abb. 32: Verteilung der Volumina des ausscheidenden Bestandes für die verschiedenen Sortimente in 20-jährigen Altersklassen und verschiedenen absoluten Oberhöhenbonitäten für Fichte, gestaffelte Durchforstung.

Die Datenstruktur, nämlich eine Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Sortimente in Abhängigkeit vom Alter und der Bonität, erlaubt gegenüber den herkömmlichen Bestandessortentafeln (vgl. z. B. Schöpfer und Dauber 1985, Offer und Staupendahl 2009), in denen die Sortimentsanteile allein über den Durchmesser des Grundflächenmittelstammes abgetragen sind, einen deutlich differenziertere Darstellung. Zusätzlich wird in den neuen Bestandessortentafeln dezidiert zwischen dem verbleibenden und ausscheidenden Bestand unterschieden. Die Unterschiede zwischen dem neuen und dem herkömmlichen Aufbau von Bestandessortentafeln analysiert Fibich (2021) eingehen (vgl. auch Abschnitt 7).

In der klassischen tabellarischen Form stellen sich die Ergebnisse der Sortimentierung aus den Abb. 31 und 32 wie folgt dar (Tab. 13 und 14):

Tab. 13: Neue Bestandessortentafel Fichte, gestaffelte Durchforstung, verbleibender Bestand.

511_gs: Verbleibender Bestand													
Altersklasse	e.thbon	logname	Anteil %	0	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4	5	
0-20 Jahre	35	Industrieholz_kurz	99.91	81.22	18.78								
		X-Holz	1.09	100									
	39	Industrieholz_kurz	91.94	51.47	48.41	0.12							
		X-Holz	8.06	100									
	>20-40 Jahre	43	Stammholz_Abschnitte	48.06		71.01	28.99						
			Industrieholz_kurz	72.74	42.62	57.38							
27		X-Holz	3.22	100									
		Industrieholz_kurz	92.79	2.74	85.09	12.18							
31		X-Holz	7.21	100									
		Stammholz_Abschnitte	54.76		8.08	80.71	11.22						
>40-60 Jahre	35	Industrieholz_kurz	82.36	16.03	75.12	8.85							
		X-Holz	3.94	100									
	39	Stammholz_lang	0.03				100						
		Stammholz_Abschnitte	61.12		10.91	65.16	22.7	1.24					
	>60-80 Jahre	31	Industrieholz_kurz	49.88	7.7	87.53	4.76	0.02					
			X-Holz	4.27	100								
43		Stammholz_lang	15.48				89.52	10.48					
		Stammholz_Abschnitte	53.90		8.3	47.16	36.41	8.13					
>80-100 Jahre		27	Industrieholz_kurz	36.52	8.9	59.61	31.48						
			X-Holz	1.83	100								
	31	Stammholz_lang	36.38				76.6	23.21	0.19				
		Stammholz_Abschnitte	50.23		6.05	45.03	38.78	10.14					
	>100-120 Jahre	39	Industrieholz_kurz	21.49	9.8	58.84	31.34	0.01					
			X-Holz	1.00	99.95	0.05							
43		Stammholz_Abschnitte	52.98		2	42.53	52.84	2.63					
		Industrieholz_kurz	57.80	6.11	52.58	41.24	0.07						
>120-140 Jahre		27	X-Holz	2.48	100								
			Stammholz_lang	19.90				77.2	22.8				
	31	Stammholz_Abschnitte	58.50		2.38	37.36	47.72	12.54					
		Industrieholz_kurz	29.64	5.88	57.66	35.93	0.54						
	>140-160 Jahre	35	X-Holz	1.91	100								
			Stammholz_lang	46.02				58.04	40.06	1.91			
39		Stammholz_Abschnitte	32.07		1.17	29.95	48.48	20.4					
		Industrieholz_kurz	20.71	5.51	34.92	58.96	0.61						
>160-180 Jahre		43	X-Holz	1.20	100								
			Stammholz_lang	76.68				26.11	53.27	19.67	0.95		
	31	Stammholz_Abschnitte	8.28		1.36	38.66	42.87	17.1					
		Industrieholz_kurz	14.24	2.74	31.64	57.75	7.85	0.02					
	>180-200 Jahre	43	X-Holz	0.80	94.44	5.56							
			Stammholz_lang	84.88				9.56	40.29	37.05	12.51	0.58	
27		Stammholz_Abschnitte	2.03		2.26	46.16	40.54	11.02					
		Industrieholz_kurz	12.70	2.66	25.76	45.32	23.31	2.94	0.01				
>200-220 Jahre		31	X-Holz	0.40	91.1	8.9							
			Stammholz_lang	23.50				81.38	18.61				
	43	Stammholz_Abschnitte	51.52		1.09	23.68	49.66	25.55	0.01				
		Industrieholz_kurz	23.34	4.36	47.13	48.01	0.49						
	>220-240 Jahre	39	X-Holz	1.64	99.86	0.14							
			Stammholz_lang	66.36				38.55	56.19	5.26			
27		Stammholz_Abschnitte	15.44		1.38	32.02	46.07	20.52					
		Industrieholz_kurz	17.42	5.22	32.99	60.39	1.4						
>240-260 Jahre		35	X-Holz	0.77	100								
			Stammholz_lang	83.78				11.2	46.6	37.89	4.29	0.01	
	43	Stammholz_Abschnitte	2.66		1.92	42.23	41.32	14.52					
		Industrieholz_kurz	12.79	1.4	25.72	53.44	19.32	0.13					
	>260-280 Jahre	31	X-Holz	0.77	87.65	12.35							
			Stammholz_lang	85.20				2.29	16.38	41.7	33.23	6.41	
27		Stammholz_Abschnitte	0.49		2.88	48	39.38	9.74					
		Industrieholz_kurz	14.04	1.04	17.14	28.92	38.49	13.97	0.44				
>280-300 Jahre		43	X-Holz	0.28	80.86	19.14							
			Stammholz_lang	79.67				0.51	4.22	18.18	38.28	38.55	0.26
	31	Stammholz_Abschnitte	4.85		1.1	25.54	24.56	22.54	4.86	0.04			
		Industrieholz_kurz	15.28	0.58	11.22	18.18	30.37	31.18	7.72	0.72	0.01		
	>300-320 Jahre	27	X-Holz	0.20	71.62	28.38							
			Stammholz_lang	66.98				42.68	55.35	1.97			
35		Stammholz_Abschnitte	16.28		1.44	35.47	43.97	19.12					
		Industrieholz_kurz	15.74	3.27	40.74	55.7	0.28						
>320-340 Jahre		39	X-Holz	1.00	98.68	1.32							
			Stammholz_lang	82.84				15.91	47.61	34.42	2.06		
	31	Stammholz_Abschnitte	4.22		2.15	43.46	41.5	12.89					
		Industrieholz_kurz	12.36	3.12	30.7	53.24	12.9	0.04					
	>340-360 Jahre	43	X-Holz	0.58	92.98	7.02							
			Stammholz_lang	85.80				4.36	24.28	45.68	25.28	0.4	
35		Stammholz_Abschnitte	1.02		2.9	47.87	39.96	9.28					
		Industrieholz_kurz	12.94	1.68	21.28	32.33	41.54	3.17					
>360-380 Jahre		39	X-Holz	0.24	87.32	12.68							
			Stammholz_lang	80.35				0.7	5.52	21.21	38.78	33.78	0.02
	27	Stammholz_Abschnitte	3.29		1.16	25.51	32.7	35.32	5.3				
		Industrieholz_kurz	16.18	0.82	9.73	18.08	32.66	20.52	18.04	0.16			
	>380-400 Jahre	43	X-Holz	0.18	90.22	9.78							
			Stammholz_lang	74.40				0.18	1.54	7.28	21.87	63	6.14
31		Stammholz_Abschnitte	10.30		0.04	0.76	3.96	17.2	37.86	34.5	5.68		
		Industrieholz_kurz	15.14	0.61	6.9	15.15	24.52	29.82	21.34	1.67			
>400-420 Jahre		27	X-Holz	0.16	84.1	15.9							
			Stammholz_lang	82.41				14.93	61.14	23.88	0.06		
	35	Stammholz_Abschnitte	3.48		1.38	39.02	42.86	16.74					
		Industrieholz_kurz	13.38	3.28	27.76	63.24	5.72						
	>420-440 Jahre	43	X-Holz	0.72	96.27	3.73							
			Stammholz_lang	86.52				4.26	22.66	48.04	24.81	0.25	
31		Stammholz_Abschnitte	0.98		3.02	49.47	37.71	9.81					
		Industrieholz_kurz	12.24	1.6	21.1	34.58	41.37	1.35					
27		X-Holz	0.27	90.42	9.58								

Tab. 14: Neue Bestandessortentafel Fichte, gestaffelte Durchforstung, ausscheidender Bestand.

511_gs: Ausscheidender Bestand												
Altersklasse	e.t.hbon	logname	Anteil %	0	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4	5
0-20 Jahre	39	Industrieholz_kurz	91.51	19.93	80.07							
		X-Holz	8.49	100								
		Stammholz_Abschnitte	44.14		85.58	14.42						
		Industrieholz_kurz	52.64	36.58	63.42							
		X-Holz	3.22	100								
20-40 Jahre	27	Industrieholz_kurz	88.66	1.14	83.64	15.22						
		X-Holz	11.34	100								
		Stammholz_Abschnitte	54.99		15.27	84.34	0.39					
		Industrieholz_kurz	76.53	9.4	86.99	3.61						
		X-Holz	5.14	100								
>20-40 Jahre	35	Stammholz_Abschnitte	60.78		23.33	66.21	10.41	0.06				
		Industrieholz_kurz	50.63	14.62	85.27	0.11						
		X-Holz	3.78	100								
		Stammholz_lang	8.94			97.2	2.8					
		Stammholz_Abschnitte	58.69		15.94	52.23	27.43	4.4				
>40-60 Jahre	39	Industrieholz_kurz	36.98	11.42	70.52	18.06						
		X-Holz	2.10	100								
		Stammholz_lang	34.50			87.96	12.04					
		Stammholz_Abschnitte	60.06		10.32	48.96	33.5	7.23				
		Industrieholz_kurz	21.42	13	71.48	15.51						
>60-80 Jahre	43	X-Holz	1.26	100								
		Stammholz_Abschnitte	53.23		3.31	52.46	43.03	1.2				
		Industrieholz_kurz	57.31	6.49	59.6	33.82	0.1					
		X-Holz	2.76	100								
		Stammholz_lang	4.83				70.34	29.66				
>80-100 Jahre	31	Stammholz_Abschnitte	66.17		4.95	49.86	39.12	6.06				
		Industrieholz_kurz	29.28	7.41	73.9	18.51	0.18					
		X-Holz	2.12	100								
		Stammholz_lang	27.30				83.63	16.18	0.19			
		Stammholz_Abschnitte	50.21		2.19	36.07	47.71	14.04				
>100-120 Jahre	35	Industrieholz_kurz	21.29	5.98	56.85	37.03	0.14					
		X-Holz	1.20	100								
		Stammholz_lang	67.93				44.67	48.78	6.4	0.16		
		Stammholz_Abschnitte	17.17		1.9	39.54	43.21	15.34				
		Industrieholz_kurz	14.06	3.22	49.25	46.28	1.25					
>120-140 Jahre	43	X-Holz	0.83	97.87	2.13							
		Stammholz_lang	82.48				19.26	50.94	26.22	3.4	0.18	
		Stammholz_Abschnitte	5.10		2.61	46.13	40.65	10.6				
		Industrieholz_kurz	11.90	3.38	37.17	46.32	12.66	0.46				
		X-Holz	0.50	95.73	4.27							
>140-160 Jahre	27	Stammholz_lang	11.75				90.37	9.63				
		Stammholz_Abschnitte	62.48		2.25	30.68	49.48	17.5	0.08			
		Industrieholz_kurz	24.28	5.95	57.5	36.34	0.21					
		X-Holz	1.49	100								
		Stammholz_lang	44.14				72.62	26.91	0.47			
>160-180 Jahre	31	Stammholz_Abschnitte	36.72		2.31	34.97	46.17	16.55				
		Industrieholz_kurz	18.31	6.26	55.65	38.09						
		X-Holz	0.82	100								
		Stammholz_lang	75.77				33.91	59.55	6.2	0.34		
		Stammholz_Abschnitte	11.31		2.66	42.61	41.66	13.07				
>180-200 Jahre	35	Industrieholz_kurz	12.08	2.77	54.97	41.57	0.7					
		X-Holz	0.84	96.76	3.24							
		Stammholz_lang	84.92				8.36	37.31	44.62	9.18	0.52	
		Stammholz_Abschnitte	2.36		3.47	47.55	40.2	8.78				
		Industrieholz_kurz	12.32	2.36	25.71	43.79	25.92	2.22				
>200-220 Jahre	39	X-Holz	0.40	85.88	14.12							
		Stammholz_lang	80.78				2.28	13.26	36.04	38.14	10.28	
		Stammholz_Abschnitte	5.54		0.97	29.14	33.4	26.72	9.58	0.2		
		Industrieholz_kurz	13.47	1.57	17.99	25.93	39.93	13.64	0.64	0.3		
		X-Holz	0.21	73.17	26.83							
>220-240 Jahre	43	Stammholz_lang	50.35				68.65	31.01	0.34			
		Stammholz_Abschnitte	32.56		2.04	36.9	44.32	16.73				
		Industrieholz_kurz	16.27	4.56	60.12	35.19	0.12					
		X-Holz	0.82	100								
		Stammholz_lang	71.38				45.9	51.47	2.63			
>240-260 Jahre	31	Stammholz_Abschnitte	15.82		2.94	43.86	41.77	11.44				
		Industrieholz_kurz	12.02	4.14	63.04	32.35	0.47					
		X-Holz	0.77	94.02	5.98							
		Stammholz_lang	82.64				19.31	57.8	22.27	0.61		
		Stammholz_Abschnitte	6.18		3.59	47.52	40.07	8.81				
>260-280 Jahre	35	Industrieholz_kurz	10.62	3.56	39.06	52.08	5.3					
		X-Holz	0.57	92.52	7.48							
		Stammholz_lang	81.51				3.4	19.76	45.1	29.32	2.41	
		Stammholz_Abschnitte	5.28		1.78	26.6	45.36	25.43	0.82			
		Industrieholz_kurz	12.96	2.56	18.43	38.83	32.06	6.97	1.16			
>280-300 Jahre	43	X-Holz	0.24	87.55	12.45							
		Stammholz_lang	76.04				0.9	6.31	21.54	40.44	30.11	0.7
		Stammholz_Abschnitte	10.51		0.14	3.94	14.2	38.05	37.84	5.48	0.34	
		Industrieholz_kurz	13.25	1.08	13.52	22.52	33.66	26.59	2.35	0.28		
		X-Holz	0.21	79.9	20.1							
>300-320 Jahre	27	Stammholz_lang	73.27				40.18	57.8	2.03			
		Stammholz_Abschnitte	12.59		1.86	39.68	43.26	15.2				
		Industrieholz_kurz	13.27	3.32	57.2	39.03	0.44					
		X-Holz	0.87	99.61	0.39							
		Stammholz_lang	82.66				23.12	60.34	16.07	0.48		
>320-340 Jahre	31	Stammholz_Abschnitte	7.06		3.78	48.69	38.62	8.9				
		Industrieholz_kurz	9.62	2.96	50.34	44.92	1.78					
		X-Holz	0.66	85.4	14.61							

## 7. Vergleich des neuen Bestandessortentafelansatzes mit dem Dg-abhängigen Verfahren

Für den Vergleich der neuen, alters-bonitätsgesteuerten Bestandessortentafeln für Fichte, gestaffelte Durchforstung, mit den herkömmlichen Dg-gesteuerten Tafeln überführte Fibich (2021) die Sortimentierungsprognosen der neuen Tafeln mit Hilfe aggregierter Mittelwertbildung in die Dg-abhängige Form. Fibich konnte auf diesem Wege feststellen, dass die größten Abweichungen zwischen den beiden Ansätzen bei geringen Dg-Werten auftreten, während ab einem Dg von 30 cm zwischen den Sortimentsgruppen kaum noch Unterschiede vorkommen.

Exemplarisch ist die Detailanalyse der Unterschiede zwischen den beiden Konstruktionsprinzipien in Abb. 33 dargestellt.

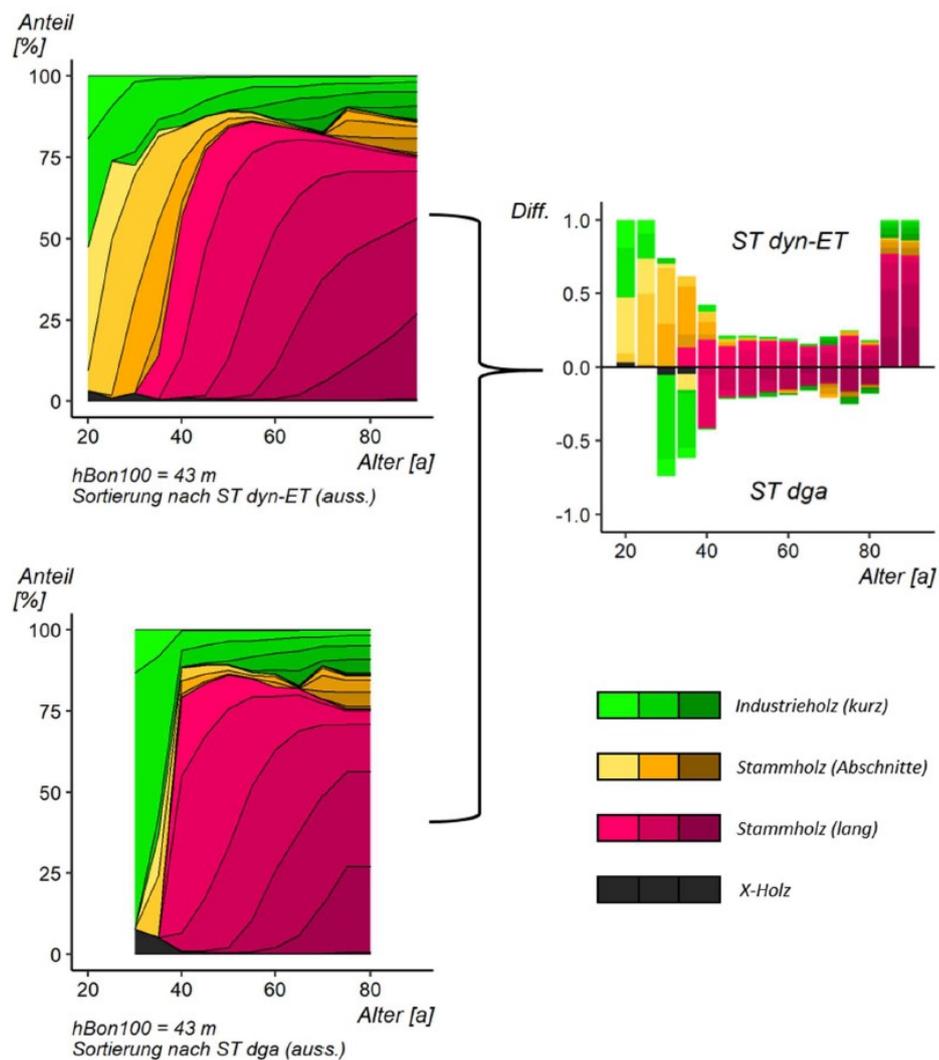


Abb 33: Prinzip zur Herleitung der gestapelten Differenzen für Fichte, gestaffelte Durchforstung, Oberhöhenbonität 43 m, ausscheidender Bestand (rechts oben): es werden Differenzen innerhalb von Altersklassen für jedes Sortiment zwischen der Häufigkeitsverteilung der Sortimentierprognose laut neuem Konstruktionsprinzip (ST dyn-ET, oben links) und der Häufigkeitsverteilung laut Dg-abhängigen Prinzip (ST, unten links) gebildet (Grafik aus Fibich 2021).

Anhand der gestapelten Differenzen für alle untersuchten Bonitäten und getrennt nach ausscheidendem und verbleibendem Bestand konnten die relativen Diskrepanzen (vgl. Staupendahl 1999), das sind die Anteile, die man austauschen muss um die eine Verteilung in die andere zu überführen, ermittelt werden (Abb. 34).

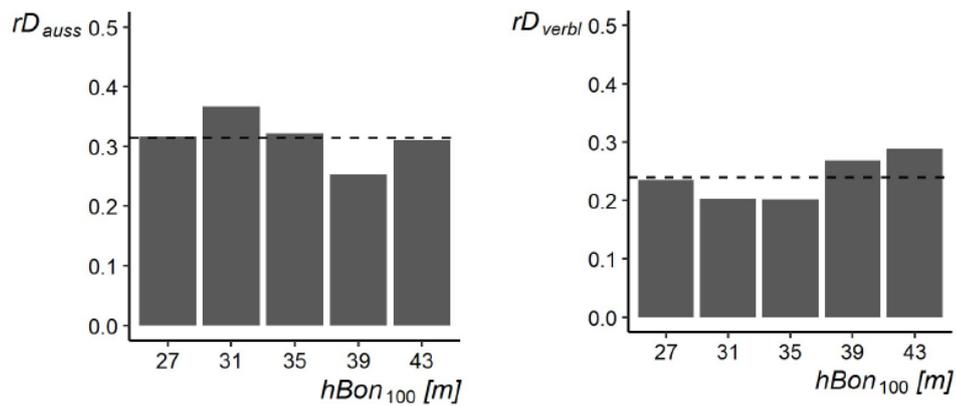


Abb. 34: Relative Diskrepanzen ( $rD$ ) zwischen dem neuen und dem  $Dg$ -abhängigen Konstruktionsprinzip für Bestandessortentafeln über Oberhöhenbonitäten für den ausscheidenden Bestand (links) und den verbleibenden Bestand (rechts) für Fichte, gestaffelte Durchforstung. Der Mittelwert über alle Bonitäten ist als gestrichelte Linie dargestellt (Grafik aus Fibich 2021).

Es wird deutlich, dass die unterschiedlichen Konstruktionsprinzipien zu erheblichen Unterschieden führen. Die Unterschiede sind beim ausscheidenden Bestand mit einer mittleren relativen Diskrepanz über alle Bonitäten von 0,31, also ca. 1/3 der Verteilungen muss ausgetauscht werden, höher ist als für den verbleibenden Bestand mit einem  $rD$ -Mittelwert von 0,24 (Abb. 34). Im Vergleich der Bonitäten zeigt sich kein klarer Trend.

Die ökonomische Analyse zeigte deutlich, dass die monetären Abweichungen je  $m^3$  Holz eng mit Verschiebungen in den Sortimentgruppen korreliert sind. Einen Überblick über die ökonomischen Implikationen der unterschiedlichen Konstruktionsansätze zur Erstellung von Bestandessortentafeln bietet Abb. 35.

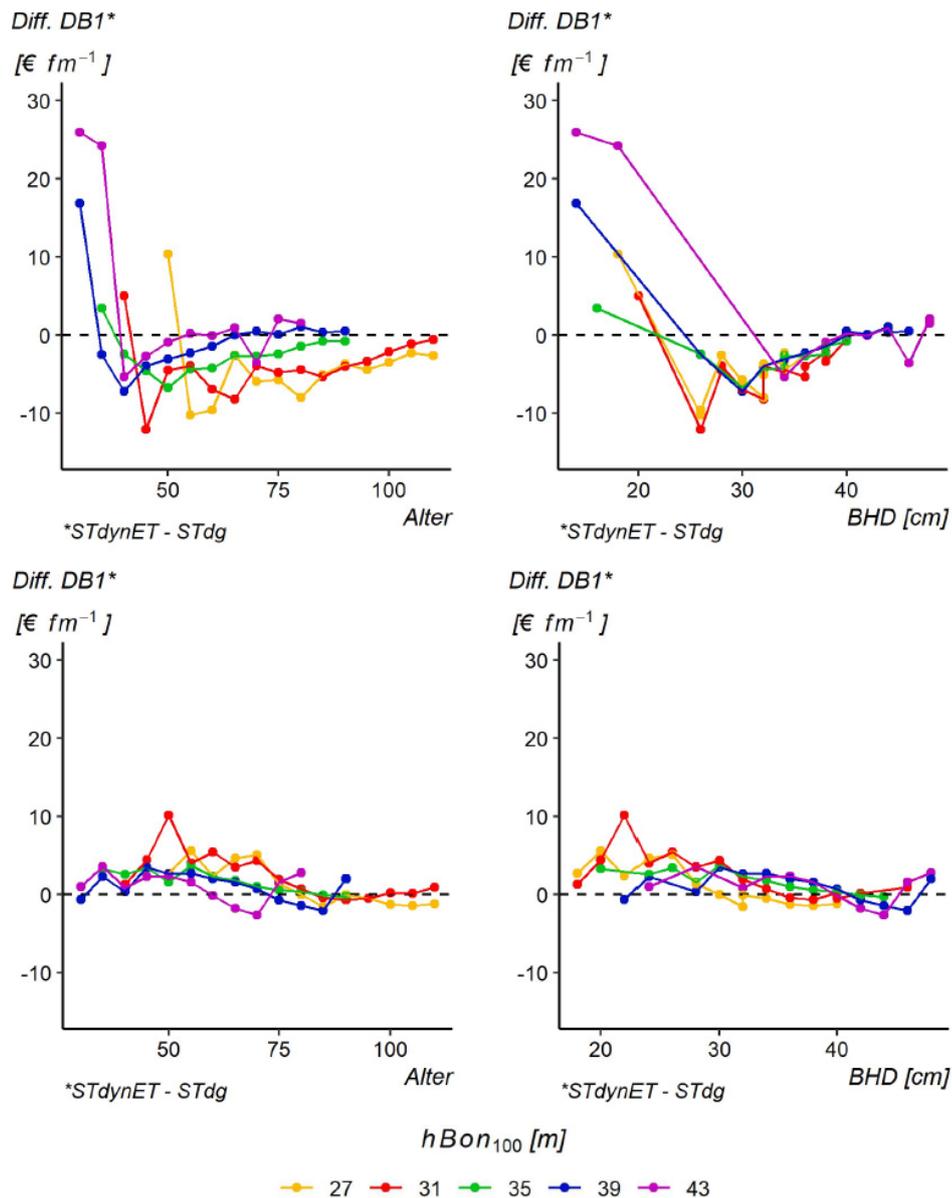


Abb. 35: Differenzen der mittleren erntekostenfreien Holzerlöse je  $\text{m}^3$  berechnet auf Grundlage des neuen und des Dg-abhängigen Konstruktionsprinzips für verschiedene Bonitäten für Fichte, gestaffelte Durchforstung in Abhängigkeit vom Alter (links) bzw. vom Durchmesser (rechts) und getrennt nach ausscheidendem (oben) und verbleibendem Bestand (unten) (Grafik aus Fibich 2021).

Die Erlöskalkulation für den ausscheidenden Bestand zeigt im jungen Alter bzw. bei geringen Durchmessern höhere Erträge unter Annahme des neuen Konstruktionsprinzips zur Sortimentierung als beim herkömmlichen Ansatz (Abb. 35, oben). Diese monetäre Vorteilhaftigkeit kehrt sich jedoch schnell ins Gegenteil, um erst im hohen Alter ähnliche Erlöse unter beiden Ansätzen zu erzielen. Für den verbleibenden Bestand scheint der alters-bonitätsgesteuerte neue Ansatz ökonomisch vorteilhafter (Abb. 35, unten).

Grundsätzlich erscheint das neue Konstruktionsprinzip durch die Mehrinformationen und größere Differenziertheit dem herkömmlichen Dg-abhängigen Verfahren überlegen. Jedoch müssten Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, wie genau die Eingangsparameter, also Alter und Bonität bzw. Dg, in der Praxis geschätzt werden können und wie hoch die Abweichungen in der Sortimentierung bei welchen Fehlern der Eingangsgrößen ausfallen.

## 8. Fazit und Ausblick

Die neuen Bestandessortentafeln korrespondieren mit den neuen Ertragstafeln, da sie auf den gleichen Simulationsdaten aufbauen. Die Bestandessortentafeln gelten somit für das Behandlungskonzept einer gestaffelten Hochdurchforstung und unterstellen das aktuelle Zuwachsniveau. Die genutzte Datenstruktur erlaubte eine differenzierte Darstellung der Stärkeklassenentwicklung. Statt der üblichen Klassenbildung über dem Dg konnten alters- und bonitätsabhängige Sortimentverteilungen für den verbleibenden und den ausscheidenden Bestand gebildet werden. Den Mehrwert dieser differenzierten Darstellung analysierte Fibich (2021).

Eine Veröffentlichung der neuen Bestandessortentafeln ist jedoch zum jetzigen Entwicklungsstand nicht wünschenswert. Es besteht hinsichtlich der Herleitung der Güteklassenverteilung noch erheblicher Forschungsbedarf, insbesondere für die Laubbaumarten Eiche und Buche. Und die Methodik zur Modellierung der Durchmesserverteilungen ist durch die Verwendung der Weibull-Funktion auf eingipfelige Strukturen beschränkt.

Des Weiteren sollten die Bestandessortentafeln an realen Waldbeständen oder auch Einschlagsdaten validiert werden.

## Literatur

- Deutscher Forstwirtschaftsrat e.V. und Deutscher Holzwirtschaftsrat e.V. (Hg.) 2020: Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR). <https://v2.verband-crm.de/dateien/9233-42/rahmenvereinbarung%20f%C3%BCr%20den%20rohholzhandel%20in%20deutschland>
- Fibich, J. 2021: Vergleich des neuartigen Prognoseansatzes der dyn-ET-Sortentafeln mit einem durchmesserabhängigen Verfahren. Masterarbeit an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Universität Göttingen. 48 S.
- Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt (NFV) 2005: Aufnahmeanweisung für ertragskundliche Versuchsflächen. Unveröffentlicht
- Offer, A.; Staupendahl, K. (2009): Neue Bestandessortentafeln für die Waldbewertung und ihr Einsatz in der Bewertungspraxis. Forst und Holz 64 (5), S. 16 - 25.
- Schmidt, M., 2001: Prognosemodelle für ausgewählte Holzqualitätsmerkmale wichtiger Baumarten. Diss. Universität Göttingen, Fakultät f. Forstwissenschaften u. Waldökologie. 296 S.
- Schöpfer, W. und Dauber, E. (1985) Bestandessortentafeln 1982/85. In: Forst-, Holz- und Jagd-Taschenbuch 1986, M. u. H. Schaper, Hannover.
- Staupendahl, K., 1999: Bestandesbezogene Modellierung von Durchforstungen in Buchenreinbeständen auf der Basis des Stammzahl-Grundflächen-Verhältnisses. Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des DVFFA, 17.-19.05.1999 in Volpriehausen. S.112-125.

## Arbeitspaket 5

### 1. Aufbau und Inhalt

Das Arbeitspaket 5, Teilvorhaben 2, endete planmäßig zum 31.10.2020. Das Arbeitspaket 1, Teilvorhaben 1 wurde kostenneutral bis zum 30.06.2021 verlängert. Da die Naturaldaten der Ertragstafeln, die der ökonomischen Analyse zu Grunde liegen, sogar erst im September 2021 in einer endgültigen Fassung vorlagen, sind sämtliche hier **aufgeführten Ergebnisse als vorläufig zu betrachten**. Insbesondere werden hier **Analysen für die waldbaulichen Behandlungen mäßige und starke Hochdurchforstung** gemacht, während die **finale Fassung** der neuen Ertragstafeln die von der NW-FVA empfohlene **gestaffelte Hochdurchforstung** enthält. Des Weiteren wurden in Arbeitspaket 1 noch **weitreichende Änderungen** bei der Zuwachsschätzung und dem funktionalen Ausgleich weiterer Ertragstafelgrößen gemacht, die hier ebenfalls **keine Berücksichtigung** finden konnten.

Abschnitt 2.1 skizziert zunächst die historische Entwicklung, diskutiert die ertragskundlichen Grundlagen und beschreibt Struktur sowie exemplarische Anwendungsgebiete forstlicher Ertragstafeln. Die Ergebnisse einer eigenständig durchgeführten Praxisbefragung zeigen in Abschnitt 2.2 die gegenwärtige Nutzung forstlicher Ertragstafeln und verdeutlichen die methodischen und inhaltlichen Ansprüche an zukünftige Ertragstafelwerke. Darauf erfolgt in Abschnitt 2.3.1 die ökonomische Bewertung der in Arbeitspaket 1 entstandenen Ertragstafelwerke anhand eines nachvollziehbaren und auf realistischen Eingangsdaten basierenden Bewertungsmodells. Es folgen auf ökonomisch bewerteter Ebene Vergleichsanalysen zu in der Forstpraxis etablierten Ertragstafelwerken sowie zwischen alternativen waldbaulichen Behandlungsalternativen.

Über die in diesem Bericht aufgezeigte ökonomische Bewertung hinaus besteht die Möglichkeit sich mit dem genutzten Modell Grafiken auf natürlicher Ebene generieren zu lassen und anhand dieser Grafiken weitere Vergleichsanalysen zu tätigen. Da jedoch in anderen Arbeitspaketen schon auf die natürlichen Kenngrößen eingegangen wird, wird an dieser Stelle auf eine weitere Darstellung verzichtet. Des Weiteren werden in diesem Bericht nur die ökonomischen Analysen zur Baumart Fichte aufgezeigt. Die Präsentation weiterer Baumarten gestaltet sich als zu umfangreich und ist somit in der externen Grafikanlage zu finden.

Im Zuge dieses Arbeitspaketes ist von Herrn Koster eine Dissertation entstanden (Koster 2020). Diese Dissertation ist sowohl vor Veröffentlichung der endgültigen Daten als auch vor Abschluss des Verbundprojektes entstanden und beruht somit auf vorläufigen Daten der Ertragstafelwerke. Sie beinhaltet weitere interessante Aspekte auf Basis der neuen Ertragstafelwerke. Hierzu gehören beispielsweise ein methodisches Konzept der Darstellung der Ertragstafeldaten als „stand density diagram“ (SDMD's – Bestandesbehandlungsdiagramme) (Koster 2020, S. 173 ff.) oder eine Sensitivitätsanalyse (Koster 2020, S. 219 ff.) bei der Wertrelationen waldbaulichen Behandlungsalternativen anhand der Veränderung relevanter Treiber sowie deren Wechselwirkungen analysiert werden und somit ein Brückenschlag zur forstlichen Praxis ermöglicht wird.

An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass in diesem Teilbericht der Fokus auf die Methodik und die beispielhafte Präsentation von Ergebnissen der Fichte gelegt wird. Abschließende Schlussfolgerungen und zentrale Erkenntnisse, sowie allgemeine Handlungsempfehlungen können Koster (2020) entnommen werden.

Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass auf wechselseitige Verweise zwischen Dissertation (Koster 2020) und diesem Bericht zu selbst verfassten Inhalten an den entsprechenden Stellen bewusst verzichtet wird.

### 2. Ertragstafeln – forstliche Wachstums- und Nutzungsmodelle

Bevor in Abschnitt 2.3 die ausführliche Analyse einer neuen Generation dynamischer Ertragstafeln erfolgt, geben die beiden vorhergehenden Abschnitte einen allgemeinen Überblick über die Geschichte und Anwendung forstlicher Ertragstafeln: Abschnitt 2.1 skizziert dafür einleitend die Entwicklungsgeschichte der Ertragstafeln im deutschsprachigen Raum in enger Anlehnung an Pretzsch (2009, S. 437 ff.) und erläutert klassische Anwendungsgebiete. Abschnitt 0 zeigt die Ergebnisse einer eigenständig durchgeführten Praxisbefragung zur gegenwärtigen und zukünftigen Verwendung forstlicher Ertragstafeln in der deutschen Forstwirtschaft.

Aufgrund des in Forschung und Praxis unterschiedlich und teils inkonsistent verwendeten Oberbegriffs der Ertragstafel erfolgen in Anlehnung an Fibich (2019, S. 3) für diesen Bericht folgende begriffliche Festlegungen:

- Als kleinste Einheit bilden *Ertragstafeltabellen* die standortabhängige Ertragsfähigkeit einer Baumart, getrennt nach absoluten oder relativen Bonitäten, innerhalb einer Ertragstafel ab.
- Die *Ertragstafel* bildet mit den verschiedenen Ertragstafeltabellen ein spezifisches Wachstums- und Nutzungsmodell, wobei unterschiedliche waldbauliche Behandlungsvarianten (vgl. z. B. Wiedemann 1936/42 und siehe dyn-ET in Abschnitt 0) und/oder unterschiedliche Ertragsniveaus (vgl. z. B. Assmann und Franz 1963 oder Bergel 1985) bzw. Bonitätssysteme (vgl. z. B. Wenk et al. 1984) ausgewiesen werden. Wird also allgemein von Ertragstafeln gesprochen, ist damit das konsistente Modell des Wachstums- und Nutzungsgangs einer Baumart bei festgelegter waldbaulicher Behandlung gemeint.
- Ein *Ertragstafelwerk* fasst die zusammenhängend veröffentlichten Ertragstafeln einer Baumart zusammen (z. B. Jüttner 1955 mit den Ertragstafeln der mäßigen und starken Durchforstung für die Baumart Eiche).
- Als *Ertragstafelsammlung* wird schließlich die Zusammenfassung verschiedener Ertragstafelwerke unterschiedlicher Baumarten und/oder Autoren verstanden (vgl. z. B. Schober 1995).

Beispiel: Man findet die Ertragstafeltabelle „I. Ertragsklasse“ der Ertragstafel „mäßige Durchforstung“ des Fichten-Ertragstafelwerks nach Wiedemann (1936/42) in der Ertragstafelsammlung von Schober (1995).

### 2.1 Historische Entwicklung und Anwendung

Als Produkt diverser waldwachstums- bzw. ertragskundlicher Untersuchungen entstanden im deutschsprachigen Raum seit Ende des 18. bzw. Anfang des 19. Jahrhunderts eine Vielzahl forstlicher Ertragstafeln. Sie bilden den Ausgangspunkt einer ganzen Reihe von waldwachstumskundlichen Modellen unterschiedlicher Datengrundlagen, Erstellungsmethoden und Anwendungsgebieten (Pretzsch 2009, S. 423 ff.). Während sich die Form der tabellarischen Darstellung einer Bestandesentwicklung anhand mittlerer und kumulierter Werte in über 200 Jahren kaum verändert hat, lassen sich die Ertragstafelwerke mit Blick auf die Datengrundlage und die Erstellungsmethodik im Wesentlichen drei entwicklungsgeschichtlichen Generationen zuordnen (Pretzsch 2009, S. 432).

Im 18. Jahrhunderts fand im deutschsprachigen Raum eine allmähliche Abkehr von der zuvor mehr oder weniger unregelmäßigen Waldnutzung bzw. -rodung zugunsten einer planmäßigen forstlichen Bewirtschaftung statt (Hasel und Schwartz 2006, S. 261 und 375 f.). Auslöser dieser Entwicklung war u. a. die Erkenntnis, dass eine langfristige Versorgung der großen Holzverbraucher, wie etwa des Bergbaus und der nachgelagerten Wirtschaftsbereiche, nur durch den Verzicht auf Raubbau zu gewährleisten war (Hasel und Schwartz 2006, S. 261 und 375 f.). Als Autor des ersten rein forstlichen Buchs stellte der sächsische Berghauptmann Carlowitz 1713 die Forderung, nur so viel Wald (bzw. Holz) zu schlagen, wie wieder nachwächst (Hasel und Schwartz 2006, S. 375). Damit gilt Carlowitz als Begründer der forstlichen Nachhaltigkeit und Grundsteinleger einer mehr als 300-jährigen Entwicklungsgeschichte des vielgestaltigen Begriffs der *Nachhaltigkeit* (vgl. Carlowitz 1713; 2009 und Sächsische Hans-Carl-von-Carlowitz-Gesellschaft e. V. 2013). Mit der Etablierung dieses Grundsatzes in der Waldbewirtschaftung entstand das Bedürfnis, die tatsächlichen Zuwächse von Waldbeständen (und damit ihr nachhaltiges Nutzungspotential) zuverlässig und einfach schätzen zu können. Dieses Bedürfnis bewog Paulsen (1795) dazu, eine Reihe von Tabellen zu veröffentlichen, in denen er für verschiedene Reinbestände jeweils Alter, Höhe, Stammzahl, Vorrat und Zuwachs gegenüberstellte. Diese Tabellen gelten heute als älteste deutschsprachige<sup>1</sup> Ertragstafeln und damit als Grundstein für die **erste Ertragstafelgeneration**, der Pretzsch (2009, S. 437) u.a. auch die Werke von Cotta (1821) und Hartig (1847) zuordnet.

Auffallend an den Ertragstafeln von Paulsen (1795) sowie nachfolgenden Werken der ersten Ertragstafelgeneration ist ihre äußerliche Ähnlichkeit zu moderneren Ertragstafelwerken. Das Festhalten an der tabellarischen Darstellung sieht Gadow (2005, S. 135) als Anzeichen dafür an, dass Ertragstafelwerke in dieser Form die an sie gestellten Anforderungen über einen langen Zeitraum erfüllen konnten. Abgesehen von diesen strukturellen Ähnlichkeiten bestehen aber kaum Ähnlichkeiten zu den späteren

---

<sup>1</sup> Pretzsch 2009, S. 437 ordnet die ersten Anweisungen zur Ertragstafelerstellung in Anlehnung an Schwappach 1903, S. 165 dem Werk von Réaumur („Réflexions sur l'état des forêts“; Anm. d. A.) aus dem Jahr 1721 zu .

Ertragstafelgenerationen. Pretzsch (2009, S. 437) verweist für die erste Ertragstafelgeneration, die er auch als „Erfahrungstafeln“ bezeichnet, auf die „unbefriedigende Datengrundlage, regionale Beschränkungen oder Einschränkungen ihrer Gültigkeit und die begrenzte Vergleichbarkeit der jeweils genutzten Erstellungsmethodik“.

Bemerkenswert sind die verschiedenen methodischen Ansätze der ersten Ertragstafelgeneration insbesondere mit Blick auf die Herausforderung der Bonitierung, d. h. der Produktivitätsquantifizierung des Standorts (vgl. Gadow 2003, S. 31 ff.). Paulsen (1795) und andere zogen für die Bestimmung der „Standortsgüteklasse“ bspw. „Standorts- und Bodenmerkmale“ heran (Kennel 1973, S. 226). Cotta (1821) nutzte hingegen mit dem Vorrat (verbleibendes Bestandesvolumen) im Alter 100 a ein Bestandesmerkmal (Pretzsch 2009, S. 438). Dadurch wurde zwar die Subjektivität der Standortansprache theoretisch umgangen, die Güte der Bonitierung aufgrund der Behandlungsabhängigkeit des Vorrats aber nicht zwangsläufig erhöht (Kennel 1973). Dies wurde insbesondere durch den Übergang zu intensiveren Durchforstungskonzepten und den damit verbundenen, höheren Vornutzungsanteilen an der Gesamtwuchsleistung ab dem 19. Jahrhundert immer bedeutsamer (Assmann 1961, S. 155, Pretzsch 2009, S. 433). Zudem ist bei der Standortklassifizierung über das Bestandesvolumen ein gewisser Zirkelschluss erkennbar, da die Quantifizierung des verbleibenden Bestandesvolumens ja gerade eine der Aufgaben forstlicher Ertragstafeln ist.

Baur (1876, 1881) erkannte die genannten Schwächen der vorangegangenen Bonitierungsansätze und etablierte eine neue Bonitierungsmethodik auf Basis der im jeweiligen Alter erreichten Bestandesmittelhöhe (Kennel 1973). Diese methodische Veränderung fiel zusammen mit dem Bemühen der Deutschen Forstlichen Versuchsanstalten die Ertragstafelerstellung durch eine Richtlinie über deren zukünftige Konstruktion zu vereinheitlichen (Pretzsch 2009, S. 440 nach Ganghofer 1881; siehe auch Pretzsch 2009, S. 101 ff.), was schließlich die **zweite Ertragstafelgeneration** einleitete. Auf Konferenzen einigte man sich in den 1870er und 1880er Jahren auf Eckpunkte, die das Erscheinungsbild und die dahinterstehende Datengewinnung sowie Konstruktionsmethodik forstlicher Ertragstafeln teilweise bis heute prägen und die Vergleichbarkeit unter den Ertragstafelwerken deutlich erhöhte (vgl. Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten 1873, 1902). In Verbindung mit einer immer weiter gewachsenen (überregionalen) Datengrundlage führten die vereinheitlichten Ansätze zur Veröffentlichung einer ganzen Reihe von wegweisenden Ertragstafeln, deren Entwicklung laut Pretzsch (2009, S. 440) im Wesentlichen Weise (1880) zu verdanken ist.

Nach Pretzsch (2009, S. 440) heben sich die Ertragstafeln von Schwappach (1902), Wiedemann (1932, 1936/42, 1949) und Schober (1975) aufgrund der (auch bei späteren Aktualisierungen beibehaltenen) einheitlichen konzeptionellen Grundlage von anderen Ertragstafelwerken bzw. Ertragstafelsammlungen der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts (u. a. Guttenberg 1915; Gehrhardt 1909, 1923) ab. Die für den nordwestdeutschen Raum überaus bedeutende und noch heute im Gebrauch befindliche (siehe Abschnitt 0) Ertragstafelsammlung von Schober (1975) bzw. Schober (1995) geht dabei u. a. zurück auf eine von Schwappach (1912) veröffentlichte Ertragstafelsammlung, die wiederum von Wiedemann (1949) ergänzt und bearbeitet wurde. Die Überarbeitungen und Neuveröffentlichungen stützen sich dabei insbesondere auf teilweise identische, in der Zwischenzeit weitergeführte, Versuchsflächen der ehemaligen Preußischen Forstlichen Versuchsanstalt (Schober 1995, S. 5).

Gehrhardt (1923) veröffentlichte eine weitere bedeutende Ertragstafelsammlung. Seine für die Hauptbaumarten Eiche, Buche, Tanne, Fichte und Kiefer aufgestellten Ertragstafeln beruhen auf der Zusammenführung bereits existierender Ertragstafeldaten über mathematische Modelle (Pretzsch 2009, S. 442 nach Gehrhardt 1930). Damit handelt es sich bei den Ertragstafeln Gehrhardts um die ersten, die den rein empirischen Ansatz vorangegangener Ertragstafeln um biometrisch-statistische Methoden ergänzten, was als Ausgangspunkt für die folgende, **dritte Ertragstafelgeneration** gesehen werden kann (Pretzsch 2009, S. 440 ff.).

Die Ertragstafelentwicklung der dritten Generation war in den 1950er und 1960er Jahren gekennzeichnet durch eine zunehmende Bedeutung der EDV-gestützten Auswertung von ertragskundlichen Ausgangsdaten (Pretzsch 2009, S. 442; vgl. u. a. Assmann 1961; Bradley et al. 1966). Basierend auf mathematisch formalisierten Einzelbaum- und Bestandeswachstumsbeziehungen ermöglichten die biometrisch-statistischen Modelle eine Ableitung der Bestandesentwicklung in Abhängigkeit von der Standortsgüte, der

Bestandesbehandlung und dem Ertragsniveau (Pretzsch 2009, S. 442). Das Ertragstafelwerk von Assmann und Franz (1963) gilt zum einen aufgrund der zahlreichen methodisch darin enthaltenden, waldwachstumskundlichen Grundbeziehungen als wichtige Grundlage zahlreicher Ertragstafelwerke im letzten Drittel des 20. Jahrhunderts (Pretzsch 2009, S. 444; vgl. u. a. Lembcke et al. 1975, Wenk et al. 1984 und Bergel 1985). Zum anderen trug die erstmalige Ausweisung unterschiedlicher Ertragsniveaus sowie die Bonitierung über die Bestandesoberhöhe (vgl. Pretzsch 2009, S. 433) zu der Bedeutsamkeit des Ertragstafelwerks von Assmann und Franz (1963) bei.

Neben den bereits genannten etablierten Standardwerken der wirtschaftlich bedeutenden Hauptbaumarten mit meist relativ großem räumlichem Gültigkeitsanspruch, sei an dieser Stelle auch auf die Erstellung zahlreicher Spezial-Ertragstafeln hingewiesen, auf die in dieser Arbeit aber nicht weiter eingegangen wird. Beispielhaft seien etwa die Kiefern-ertragstafel für wirtschaftlich wichtige Standorteinheiten der Oberpfalz (Schmidt 1971), die Kiefern-ertragstafel für Kippenstandorte des Lausitzer Braunkohlenreviers (Ertle et al. 2012) oder die Robinien-ertragstafel von Erteld (1951) genannt.

Parallel zur Entwicklung weiterer Ertragstafeln erfuhren waldwachstumskundlichen Simulationsmodelle ab den 1960er Jahren immer größer werdende Beachtung. Angestoßen durch Arbeiten von u. a. Franz (1968), Hoyer (1975), Hradetzky (1972), Bruce et al. (1977), Curtis et al. (1981) und Curtis (1982) wurden zahlreiche Bestandeswachstumssimulatoren entwickelt, welche die mittlere Bestandesentwicklung auf der Grundlage von Funktionssystemen und Algorithmen sowie in Abhängigkeit von einer Vielzahl an alternativen Bestandesbehandlungen abbilden (Pretzsch 2009, S. 444). Die rasante Entwicklung im Bereich der Waldwachstumssimulation führte bspw. dazu, dass die vorläufige Fichtenertragstafel von Assmann und Franz (1963) stets vorläufig blieb – Assmann sah die zukünftige Bedeutung von Ertragstafeln durch die Simulationsmodelle zumindest teilweise in Frage gestellt (Franz und Utschig 1990, S. 10).

Die fortlaufende Kapazitätssteigerung im Bereich der elektronischen Datenverarbeitung ermöglichte ab den 1980er Jahren die zunehmende Abkehr von Modellen auf der Basis von Bestandesmittelwerten. Einzelbaumbasierte Wachstumssimulatoren in vielfältiger Ausführung (vgl. Pretzsch 2009, S. 445 ff.) hielten Einzug in die forstwissenschaftliche Forschung, das forstliche Versuchswesen und auch die forstliche Praxis (Pretzsch 2009, S. 444).

Der heutige Stand in Bezug auf der Anwendung von und Forschung zu forstlichen Ertragstafeln ist divers zu sehen. Im Einklang mit Prodan (1965, S. 605), der bereits vor fast 60 Jahren eine abnehmende Bedeutung forstlicher Ertragstafeln prognostizierte, hielten einzelbaumbasierte Waldwachstumssimulatoren auch im deutschsprachigen Raum (z. B. *BWINPro*, Nagel und Schmidt 2006 oder *SILVA*, Kahn und Pretzsch 1997) Einzug in Wissenschaft, Versuchswesen und zumindest Teile der großen, öffentlichen Forstbetriebe. Zudem ist die Bedeutung von Betriebsinventuren zur Zustandserfassung im Rahmen der Forstbetriebsplanung (insb. in großen Forstbetrieben) stetig gestiegen (vgl. u. a. Fuchs und Kennel 1994; Nothdurft et al. 2008; Böckmann 2016). Weiterhin existieren in der forstlichen Praxis aber auch zahlreiche Anwendungsgebiete, in denen forstliche Ertragstafeln regelmäßig zum Einsatz kommen bzw. kommen können (vgl. Gerold und Gerold 2013; siehe auch Abschnitt 0). Mit der Forsteinrichtung und der Waldbewertung werden im Folgenden zwei bedeutende Anwendungsgebiete exemplarisch und mit besonderem Fokus auf den Einsatz forstlicher Ertragstafeln skizziert.

Nach Bachmann (1990, S. 421) ist die **Forsteinrichtung** „die mittel- und langfristige forstliche Planung auf betrieblicher und überbetrieblicher Ebene, welche unter Berücksichtigung ökologischer, wirtschaftlicher, betrieblicher und gesellschaftlicher Aspekte die Interessen am Wald sicherstellt“. Kurth et al. (1994, S. 24) definieren sie knapp und dennoch umfassend als „nachhaltige Regelung des Waldes“. Im Rahmen der Forsteinrichtung kommen forstliche Ertragstafeln einerseits bei der Zustandserfassung und andererseits bei der mittel- und langfristigen Planung zum Einsatz. Die Zustandserfassung beinhaltet dabei, neben einer Reihe anderer Faktoren, die Erhebung der vorliegenden Bestockungsverhältnisse in den einzelnen Waldbeständen eines Forstbetriebes. Dabei werden forstliche Ertragstafeln bzw. auf Ertragstafel-daten basierende Hilfstafeln und Planungssoftware eingesetzt, um u. a. die Bonitäten, Bestockungsgrade, Vorräte und laufenden Volumenzuwächse zu bestimmen. Die Bonität ergibt sich aus der Einordnungsbeziehung der verwendeten Ertragstafel und gibt die zum Bestand passende Ertragstafeltabelle vor. Aus dem Verhältnis von Ist-Grundfläche (z. B. über Winkelzählproben nach Bitterlich (1949) ermittelt) zur altersspezifischen Ertragstafelgrundfläche (Soll- oder Referenzgrundfläche) resultiert der *Bestockungsgrad* (vgl. Speidel 1972,

S. 237), über den der Vorrat des Bestandes linear aus dem Ertragstafelvorrat abgeleitet wird. Da abweichend davon keine proportionale Abhängigkeit des Volumenzuwachses von der Bestandesdichte besteht (vgl. z. B. Gadow 2005, S. 149 ff.; Pretzsch 2005), kommen zur Anpassung der Ertragstafelvolumenzuwächse an die tatsächlichen Bestandesverhältnisse teilweise<sup>2</sup> dichteabhängige Volumenzuwachskorrekturfaktoren (bzw. *Zuwachsreduktionsfaktoren*) zum Einsatz, welche in Abhängigkeit vom Bestockungsgrad bspw. in länderspezifischen Hilfstabellen für die Forsteinrichtung zu finden sind (Kramer und Akça 2008, S. 150). Als nachteilig anzusehen sind bei den aktuell verfügbaren dichteabhängigen Volumenzuwachskorrekturfaktoren die Vernachlässigung der Altersabhängigkeit (vgl. z. B. Pretzsch 2005) sowie (teilweise) das Fehlen von Werten für überbestockte Bestände. Das laufende dyn-ET-Projekt strebt die Ausweisung von Volumenzuwachskorrekturfaktoren an (Spellmann et al. unveröff.). Sollen die beschriebenen Bestandesdaten für einen Mischbestand geschätzt werden, wird dieser rechnerisch in mehrere Bestandesflächen zerlegt (Speidel 1972, S. 83). Für jede dieser rechnerischen Bestandesflächen erfolgt die Schätzung wie für den Reinbestand beschrieben – lediglich zur Ermittlung der Volumenzuwachskorrekturfaktoren wird nicht der Bestockungsgrad der einzelnen rechnerischen Bestandesflächen, sondern des Gesamtbestandes herangezogen. Durch die Baumartenmischung bedingte Abweichungen vom Volumenzuwachs ggü. dem Wachstum im Reinbestand (vgl. u. a. Pretzsch et al. 2010; Pretzsch et al. 2013a; Pretzsch et al. 2013b; Pretzsch et al. 2015), sogenannte Mischungseffekte, können<sup>3</sup> in Abhängigkeit von Mischungsform und -anteilen über Mischbestandsertragstabellen (vgl. nach Gadow 2003, S. 160, Fußnote 3 z. B. Bonnemann 1939; 1956; Wiedemann 1942; 1949) oder Korrekturfaktoren (vgl. z. B. Pretzsch 2016) in die Ertragstafelschätzungen einbezogen werden, weshalb diese bspw. auch im laufenden dyn-ET-Projekt für ausgewählte Mischungsvarianten ausgewiesen werden sollen (Spellmann et al. unveröff.). Liegen mehrere Bestandesschichten vor, werden deren Volumenzuwächse ebenfalls separat geschätzt (vgl. z. B. HMULF 2002). Weiteres Einsatzgebiet forstlicher Ertragstabellen im Rahmen der Forsteinrichtung ist die Ermittlung der mittelfristigen Vor- und Endnutzungsvolumina bei der bestandesweisen Nutzungsplanung (vgl. Speidel 1972, S. 128 ff.). So kann bspw. das Vornutzungsvolumen eines Bestandes ausgehend vom aktuellen Vorrat (gemäß Zustandserfassung; siehe oben) mit Hilfe des geschätzten Volumenzuwachses der Planungsperiode (unter Berücksichtigung von Volumenzuwachskorrekturfaktoren; siehe oben) und des angestrebten Vorrats am Ende der Planungsperiode (in Abhängigkeit vom Ziel-Bestockungsgrad) bestimmt werden. Ergebnis dieser Einzelplanung ist dann u. a. der sogenannte *waldbauliche Hiebsatz* als Summe der einzelbestandesweisen Nutzungsansätze (Speidel 1972, S. 162). Die betriebliche Gesamtplanung überträgt die bestandesweise Einzelplanung unter Berücksichtigung der betrieblichen Ziele und sonstigen Rahmenbedingungen auf den Gesamtbetrieb – die „induktive Einzelplanung“ wird „durch eine deduktive Gesamtplanung ergänzt“ (Speidel 1972, S. 162 nach Schober 1952). Aufgabe sind die Sachziel-, Nachhaltigkeits- und Wirtschaftlichkeitsprüfung (Speidel 1972, S. 162), wobei forstlichen Ertragstabellen insbesondere im Zuge der Berechnung sogenannter *Nachhaltswaiser* eine wichtige Bedeutung zukommt (Speidel 1972, S. 163 ff.). So dienen Ertragstabellen bspw. im Zuge der Herleitung von Vorrats- und Zuwachsweisern der Berechnung des Normalvorrats. Formelweiser, wie bspw. die *Gehrhardt'sche Formel*, greifen zudem auf Ertragstafeldaten, wie den Soll-Zuwachs (durchschnittlicher Gesamtvolumenzuwachs bis zur geplanten Umtriebszeit) zurück. Wichtige Bedeutung kommt der Forsteinrichtung als anerkanntes Betriebswerk und damit indirekt auch forstlichen Ertragstabellen zudem im Zuge der Ausweisung eines steuerrechtlichen *Nutzungssatzes* zu. Dieser stellt im Sinne des § 34b Abs. 3 Nr. 2 EStG in Verbindung mit § 68 EStDV eine Bemessungsgrundlage für außerordentliche Holznutzungen dar und muss nach Einkommenssteuer-Richtlinie R 34b. 4 „den Nutzungen entsprechen, die unter Berücksichtigung der vollen jährlichen Ertragsfähigkeit des Waldes in Kubikmetern (Festmetern) objektiv nachhaltig im Betrieb erzielbar sind. Maßgebend für die Bemessung des Nutzungssatzes sind nicht die Nutzungen, die nach dem Willen des Betriebsinhabers in einem Zeitraum von zehn Jahren erzielt werden sollen (subjektiver Hiebsatz), sondern

---

<sup>2</sup> Im Rahmen der durchgeführten Praxisbefragung wurde deutlich, dass die momentan verfügbaren Volumenzuwachskorrekturfaktoren in der forstlichen Praxis häufig keine Anwendung finden und zur Vereinfachung von einer linearen Abhängigkeit zwischen Bestockungsgrad und Volumenzuwachs ausgegangen wird. Kommt Forsteinrichtungssoftware zum Einsatz, sind die Volumenzuwachskorrekturfaktoren darin allerdings häufig berücksichtigt und müssen von der anwendenden Person nicht weiter beachtet werden.

<sup>3</sup> Keine der im Rahmen der Praxisbefragung interviewten Personen gab die Nutzung von mischungsabhängigen Volumenzuwachskorrekturfaktoren an.

die Nutzungen, die unter Berücksichtigung der vollen Ertragsfähigkeit nachhaltig erzielt werden können (objektive Nutzungsmöglichkeit)“. In §68 EStDV Abs. 2 wird dabei die Bedeutung der Objektivierung des naturalen Wachstums- und Nutzungsmodells (z. B. Ertragstafel) ersichtlich: „Der Festsetzung des Nutzungssatzes ist ein amtlich anerkanntes Betriebsgutachten oder ein Betriebswerk zugrunde zu legen, das auf den Anfang des Wirtschaftsjahres aufzustellen ist, von dem an die Periode von zehn Jahren beginnt. [...]“. Berücksichtigung findet der Nutzungssatz weitergehend bspw. auch bei der Bemessung von Beiträgen zur gesetzlichen Unfallversicherung für Forstbetriebe über 100 ha (vgl. Gutachterlicher Stellungnahme zur Aktualisierung des Beitragsmaßstabs für die Unfallversicherung in der Landwirtschaft, im Forst sowie im Gartenbau; SVLFG 2018).

Nach Mantel (1982, S. 11) befasst sich die **Waldbewertung** „mit der Ermittlung von Waldwerten verschiedenster Art, die sich aus der wald- und forstwirtschaftlichen Benützung des Grund und Bodens ergeben“. Eine solche Waldwertermittlung kann u. a. notwendig werden bei einem Eigentumswechsel, im Zuge von Nutzungsbeschränkungen und in Schadensfällen (Mantel 1982, S. 11). Im Rahmen der verwendeten Waldbewertungsmethoden kommen forstliche Ertragstafeln an verschiedenen Stellen zum Einsatz. Beispielhaft sei hier das *Alterswertfaktorverfahren* zur Ermittlung des sogenannten Bestandeswerts nach *Blume* (vgl. NMELV 2020) skizziert. Die Wertermittlung geschieht in diesem deterministischen<sup>4</sup> Verfahren mit Hilfe von Alterswertfaktoren, die den Wert eines Bestandes zu einem bestimmten Zeitpunkt im Verhältnis zu seinem Abtriebswert zum Endnutzungszeitpunkt abbilden und in die *Blume-Formel* (Blume 1949) eingesetzt werden. Die seit 2019 bundeseinheitlich verfügbaren, aktualisierten Alterswertfaktoren für die Baumartengruppen Eiche, Buche, Fichte und Kiefer (NLF 2014, Tabelle 1.14) basieren dabei auf etablierten Ertragstafeln (Jüttner 1955, mäßige Durchforstung; Wiedemann 1931, mäßige Durchforstung bzw. alternativ Schober 1967; Wiedemann 1936/42, mäßige Durchforstung; Wiedemann 1943, mäßige Durchforstung). Neben der Datengrundlage für die Ermittlung von Alterswertfaktoren dienen forstliche Ertragstafelwerke bzw. darauf basierende Hilfstafeln außerdem der Ermittlung des erntekostenfreien Abtriebswertes des Bestandes. Bonitätsabhängig werden Vorrat und mittlerer Brusthöhendurchmesser (BHD) des zu bewertenden Bestandes im Alter der planmäßigen Umtriebszeit bestimmt. In der Kombination mit Bestandessortentafeln, Holzerlösen sowie Holzerntekosten lässt sich schließlich der erntekostenfreie Abtriebswert zum Endnutzungszeitpunkt bestimmen (siehe auch Abschnitt 0), mit dem unter Einbeziehung der Bestandesbegründungskosten und des Alterswertfaktors der Bestandeswert im Bewertungsalter über die *Blume-Formel* ermittelt wird. Das Verfahren lässt aufgrund der zahlreichen notwendigen Annahmen erkennen, dass es im Rahmen der Waldbewertung weniger um einen im spezifischen Fall subjektiv korrekten, als um einen standardisierten, transparent hergeleiteten und objektivierten Wert geht, der von beiden am Bewertungsfall beteiligten Seiten akzeptiert wird. Ertragstafeln bilden dabei als nachvollziehbare und konsistente Wachstums- und Nutzungsmodelle eine vergleichbare und standardisierte naturale Basis. Bei zusätzlich einheitlichen ökonomischen Kenngrößen erfüllt das Ergebnis der Wertermittlung die Bedürfnisse der Objektivierung. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund möglicher Alternativen: Die Schätzung auf Basis einer Waldwachstumssimulation wäre zwar im Einzelfall i. d. R. exakter, jedoch für Außenstehende nicht nachvollziehbar und zudem meist nicht reproduzierbar (vgl. Gerold und Gerold 2013).

---

<sup>4</sup> Koster 2017 zeigte einen methodischen Weg zur Integration von Überlebensrisiken in das Alterswertfaktorenverfahren.

## *2.2 Praxisbefragung zur gegenwärtigen und zukünftigen Verwendung*

Zur Erfassung der gegenwärtigen und zukünftigen Verwendung forstlicher Ertragstafeln in der betrieblichen Praxis wurde eine Praxisbefragung durchgeführt – Auszüge der Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

### *2.2.1 Methodik und Charakterisierung der Befragten*

Per Mail (s. Abb. 12 im Anhang 11) wurden 163 Personen aus öffentlichen Behörden, öffentlichen und privaten Forstbetrieben sowie privaten Dienstleistungsunternehmen kontaktiert, bei denen aufgrund ihres Aufgabenschwerpunkts (z. B. Forsteinrichtung oder Waldbewertung) von einer mehr oder weniger intensiven Nutzung forstlicher Ertragstafeln im beruflichen Alltag auszugehen war. Die Auswahl erfolgte dabei über online-verfügbare Organigramme und per Telefon erfragten Informationen zur innerorganisatorischen Zuständigkeit. Zudem wurden (mit Erlaubnis der verantwortlichen Personen) Mailverteiler der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung sowie der Abteilung Forstökonomie der Georg-August-Universität Göttingen genutzt. Wie in der Mail zum Erstkontakt ausdrücklich gewünscht, wurde diese darüber hinaus von Adressaten an entsprechend in Frage kommende Personen weitergeleitet.

31 Personen (19 %) meldeten sich zurück und standen für ein leitfragengestütztes Telefoninterview bereit. Bis auf das Saarland, Hamburg und Bremen konnten Interviews mit Personen aus allen Bundesländern durchgeführt werden, wobei der Tätigkeitsschwerpunkt der befragten Personen in den Ländern Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Hessen lag (Tabelle 15). Zudem wurde eine Person der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (Bundesforst) mit bundesweiter Zuständigkeit befragt.

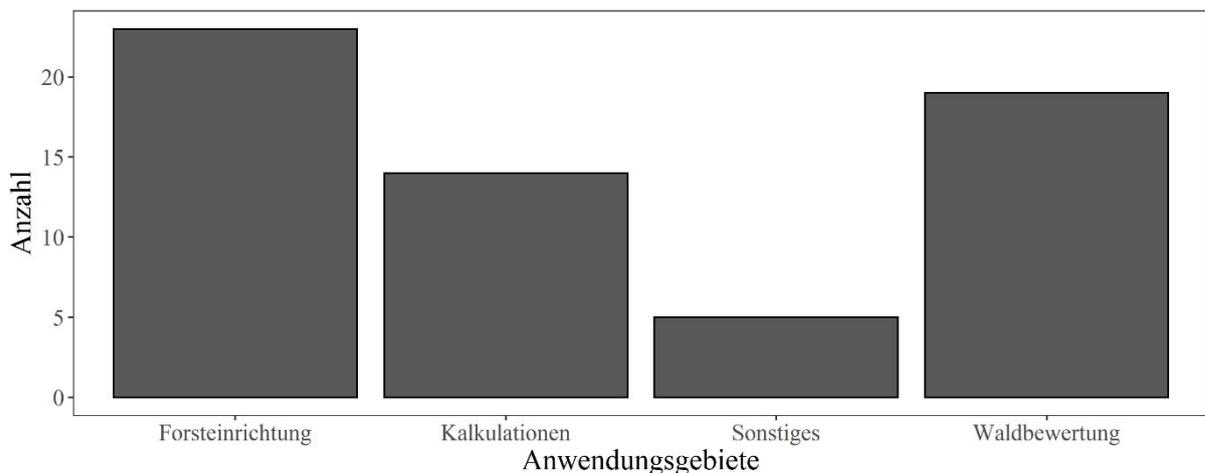
Ein Großteil der befragten Personen (16) ordnete sich auf Nachfrage einer Tätigkeit in öffentlichen Forstbetrieben zu, wobei hier der Schwerpunkt auf Niedersachsen lag (Tabelle 15). 10 Personen gaben an, für ein privates, forstliches Dienstleistungsunternehmen zu arbeiten oder mit einem solchen selbstständig zu sein; hier lag ein räumlicher Schwerpunkt auf Nordrhein-Westfalen. 3 befragte Personen arbeiten für öffentliche Behörden, 2 Personen in privaten Forstbetrieben.

*Tabelle 15: Institutionelle und räumliche Tätigkeitszuordnung der 31 per leitfragengestütztem Telefoninterview befragten Anwenderinnen und Anwender forstlicher Ertragstafeln (die Zuordnung erfolgte durch die befragten Personen; bei Mehrfachzuordnung wurden die befragten Personen um eine Schwerpunktsetzung gebeten).*

	öffentlicher Forstbetrieb	private Dienstleister	öffentliche Behörde	privater Forstbetrieb
Baden-Württemberg	-	1	-	1
Bayern	1	1	-	-
Berlin	1	-	-	-
Brandenburg	1	-	-	-
Hessen	3	1	-	-
Mecklenburg-Vorp.	1	-	-	-
Niedersachsen	4	-	1	1
Nordrhein-Westfalen	-	4	1	-
Rheinland-Pfalz	2	1	1	-
Saarland	-	-	-	-
Sachsen	-	1	-	-
Sachsen-Anhalt	-	1	-	-
Schleswig-Holstein	1	-	-	-
Thüringen	1	-	-	-
Bund	1	-	-	-
Summe	16	10	3	2

### 2.2.2 Anwendungsgebiete forstlicher Ertragstafeln

Auf die Frage nach den konkreten Anwendungsgebieten forstlicher Ertragstafeln (Mehrfachnennung waren möglich), gab der überwiegende Teil der Befragten (wie u. a. aufgrund der Auswahl an angeschriebenen Personen zu erwarten) eine Anwendung im Rahmen der Forsteinrichtung und/oder der Waldbewertung an (Abbildung 36).



*Abbildung 36: Anwendungsgebiete forstlicher Ertragstafeln (Mehrfachnennung möglich) gemäß der 31 per leitfragengestütztem Telefoninterview befragten Anwenderinnen und Anwender.*

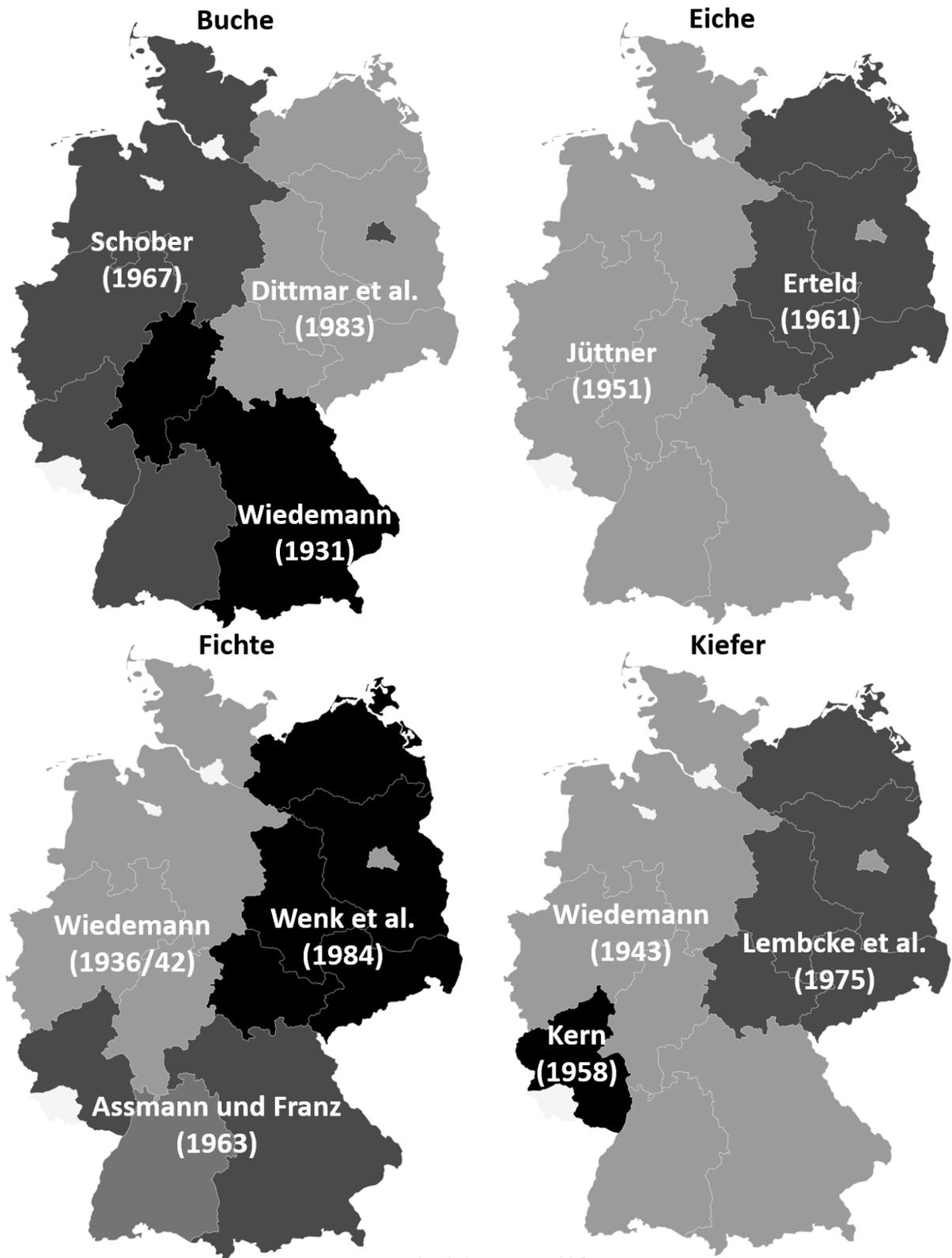
Weitere genannte Anwendungsgebiete waren betriebliche Kalkulationen<sup>5</sup>, wie z. B. Deckungsbeitragskalkulationen im Rahmen von Holzerntemaßnahmen, und Sonstiges, wie bspw. Wildschadensgutachten.

### *2.2.3 Räumliche Einsatzschwerpunkte etablierter Ertragstafelwerke*

Unter Berücksichtigung der teils sehr kleinen Stichproben (vgl. Tabelle 15), wird Anhand von *Abbildung*(Abbildung 37) deutlich, dass in der deutschen Forstpraxis gegenwärtig nur wenige etablierte Ertragstafelwerke mit klarem räumlichen Schwerpunkt zum Einsatz kommen. Während die Anwenderinnen und Anwender aus nordwestdeutschen Bundesländern baumartenübergreifend primär auf die Werke der Ertragstafelsammlung von Schober (1995) zurückgreifen, werden in den ostdeutschen Bundesländern (ohne Berlin) ausschließlich Ertragstafelwerke aus deutlich jüngerer Vergangenheit angewendet, die in der Zeit der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik (DDR) erstellt wurden. In Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz kommt für die Baumart Fichte (teilweise) das Ertragstafelwerk von Assmann und Franz (1963) zum Einsatz und für die Baumart Kiefer wurde in Rheinland-Pfalz die Ertragstafel für Buntsandsteingebiete des Pfälzer Waldes von Kern (1958) genannt. In Bayern und Hessen wird die Buche von den befragten Anwenderinnen und Anwendern durch das Ertragstafelwerk von Wiedemann (1931) abgebildet. Inwiefern die räumlichen Einsatzschwerpunkte fachlich begründet sind (z. B. mit den regionalen Spezifika standörtlicher Gegebenheiten) oder auf tradiertes Verhalten zurückgeführt werden kann, wurde im Rahmen der Praxisbefragung nicht untersucht.

---

<sup>5</sup> Unter betrieblichen Kalkulationen werden hier sämtliche ökonomische Analysen auf operativer Ebene eines Forstbetriebs verstanden.



created with datamaps.world ©

Abbildung 37: Räumliche Zuordnung forstlicher Ertragstafelwerke der Baumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer gemäß der 31 per leitfragengestütztem Telefoninterview befragten Anwenderinnen und Anwender (in Baden-Württemberg wurden für die Baumart Fichte jeweils einmal die Ertragstafelwerke von Assmann und Franz (1963) und von Wiedemann (1936/42) genannt).

#### 2.2.4 Stärken und Schwächen etablierter Ertragstafelwerke

Auf die bewusst offen gestellte Frage nach Stärken und Schwächen gegenwärtig angewendeter Ertragstafelwerke zeigte sich ein klares Meinungsbild – die Aussagen der befragten Personen (Mehrfachnennungen möglich) konnten zweifelsfrei in vier (Abbildung 8) bzw. fünf (Abbildung 39) im Nachhinein gebildeten Kategorien zusammengefasst werden.

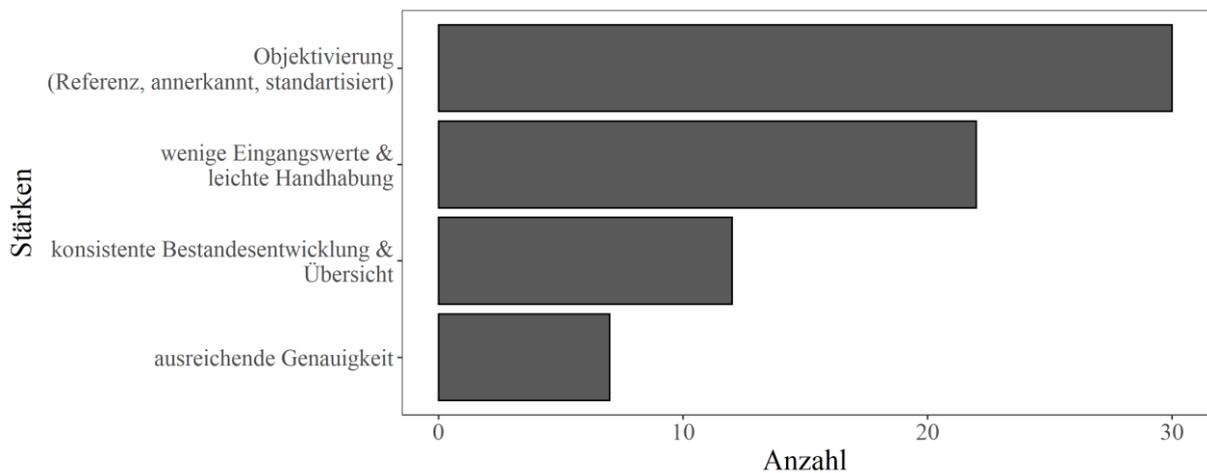


Abbildung 18: Stärken gegenwärtig verwendeter forstlicher Ertragstafelwerke gemäß der 31 per leitfragengestütztem Telefoninterview befragten Anwenderinnen und Anwender (Mehrfachnennungen möglich; zusammengefasst in im Nachhinein gebildeten Kategorien).

30 befragte Personen gaben als Stärke die Objektivierungswirkung von forstlichen Ertragstafeln an – durch die Standardisierung von Wachstums- und Nutzungsmodellen bilden sie eine anerkannte Referenz. Den Befragten geht es vielfach nicht darum, ob ein tatsächlicher Bestand durch die Ertragstafeldata exakt widerspiegelt wird, sondern vielmehr um ein hinreichend genaues Abbild, auf welches bspw. in Bewertungsverfahren oder bei juristischen Streitfällen zurückgegriffen werden kann. 22 Mal wurden die wenigen benötigten Eingangswerte und die damit verbundene leichte Handhabung als Stärke forstlicher Ertragstafeln genannt. Für eine zügige Vorratsbestimmung oder die grobe Abschätzung von möglichen Hiebsmengen des kommenden Jahrzehnts benötigt der Anwender einer forstlichen Ertragstafel lediglich Alter, Oberhöhe, Grundfläche (und ggf. Volumenzuwachskorrekturfaktoren) eines Bestandes. Selbst für mehrschichtige oder gemischte Bestände genügen mit entsprechenden Verfahren wenige Eckdaten, um eine für die Praxis meist ausreichende Genauigkeit zu erzielen. Diese für viele Anwendungsfälle ausreichende Genauigkeit und damit der bewusste Verzicht auf möglicherweise genauere, aber meist aufwendigere Verfahren (z. B. Stichprobeninventur, Waldwachstumssimulationen) wurde von 7 Anwenderinnen und Anwendern als Vorteil benannt. Schließlich nannten 12 befragte Personen das übersichtliche und konsistente Abbild einer gesamten Bestandesentwicklung<sup>6</sup> von der Begründung bis zur Endnutzung als klare Stärke forstlicher Ertragstafeln, welches Waldwachstumssimulationen in der Regel nicht liefern können. Die etablierten Ertragstafeln sind daher nicht ohne Grund, trotz ihres teils immensen Alters und der bekannten Schwächen, noch immer Grundlage zahlreicher forstpraktischer Anwendungen (siehe Abschnitt 0) und forstökonomischer Produktionsmodelle (vgl. z. B. Möhring 2010).

<sup>6</sup> Einschränkung sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Ertragstafeltabellen i. d. R. konstante Bonitäten unterstellen. Im engeren Sinne ist eine konsistente Beschreibung der gesamten Bestandesentwicklung somit angesichts von sich im Verlauf des Bestandeslebens verändernden Standortbedingungen niemals gegeben.

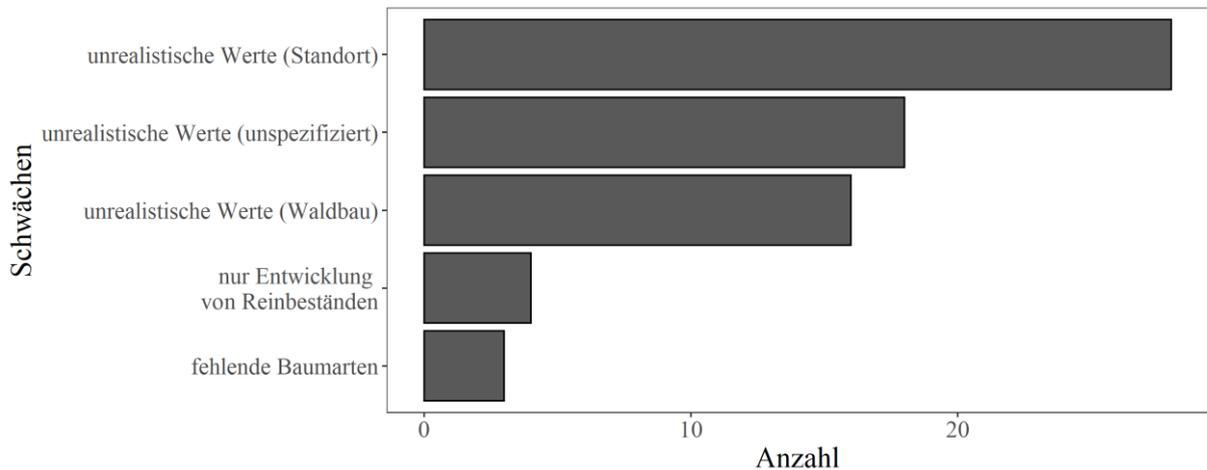


Abbildung 39: Schwächen gegenwärtig verwendeter forstlicher Ertragstafelwerke gemäß der 31 per leitfragengestützten Telefoninterview befragten Anwenderinnen und Anwender (Mehrfachnennung möglich; zusammengefasst in im Nachhinein gebildeten Kategorien).

Die Schwächen forstlicher Ertragstafeln wurden von den 31 befragten Personen ebenfalls sehr eindeutig wiedergegeben. Fast 90 % (62) der geäußerten Schwächen bezogen sich auf die Tatsache, dass die etablierten Ertragstafeln nicht (mehr) das heutige Niveau der forstlichen Produktion abbilden. Während in 18 Fällen keine Spezifizierung des vermuteten Grundes vorgenommen wurde, führten 28 Personen die Veränderung der Standortverhältnisse und 16 Personen veränderte waldbauliche Behandlungskonzepte an. Nur wenige Personen nannten die ausschließliche Abbildung von Reinbeständen (4) und das Fehlen bestimmter (Neben-) Baumarten als Schwäche (3).

#### 2.2.5 Einschätzungen zur zukünftigen Verwendung forstlicher Ertragstafeln

Den Abschluss der Praxisbefragung bildete eine offen gestellte Frage zur zukünftigen Verwendung und voraussichtlichen Rolle forstlicher Ertragstafeln – auch hier erfolgte eine Zuordnung zu im Nachhinein gebildeten Kategorien. 16 Antworten wurden der Kategorie „spielen mittelfristig eine wichtige Rolle“ und 6 Antworten der Kategorie „spielen langfristig eine wichtige Rolle“ zugeordnet. 9 befragte Personen sahen das generelle Konzept forstlicher Ertragstafeln gar als alternativlos an. Häufig wurde dabei allerdings die zukünftige Rolle forstlicher Ertragstafeln an deren (zeitnahe) Aktualisierung geknüpft. Zudem maßen 10 befragte Personen der Ergänzung forstlicher Ertragstafeln durch Inventur- oder Fernerkundungsdaten in der betrieblichen Praxis eine wichtige Rolle zu. Vier Personen sahen in den etablierten Ertragstafeln ein veraltetes Konzept und verwiesen beispielweise vollständig auf Waldwachstumssimulationen oder Betriebsinventuren. Über diese vier Personen hinaus maßen weitere 2 Personen den Waldwachstumssimulationen eine wichtige Bedeutung bei, sehen aber die dringende Notwendigkeit zur Vereinfachung.

Einige ausgewählte Zitate aus den leitfragengestützten Telefoninterviews dienen im Folgenden der ungefilterten Ergänzung des Meinungsbildes:

- „[Ertragstafeln sind] unabdingbar als Modell bei der jetzigen Konvention zur Berechnung von Waldwerten.“
- „Ertragstafeln bilden das Fundament der Forstwirtschaft.“
- „Wenn die Ertragstafeln sauber weiterentwickelt werden, sind diese auch in Zukunft wichtig.“
- „Wenn die Ertragstafeln nicht zeitnah aktualisiert werden, werden diese in der Versenkung verschwinden.“
- „Ertragstafeln, auf die man sich auf breiter Basis stützen kann, sind sehr wichtig.“
- „Wenn nichts gemacht wird, werden Ertragstafeln als Kuriosum auslaufen.“
- „Es ist verwunderlich, dass erst jetzt wieder an diesem Thema gearbeitet wird.“
- „Die Zukunft von überarbeiteten Ertragstafeln liegt in Betrieben mit mehr als 500 ha m. E. nur in Kombination mit einer Betriebsinventur um die Daten statistisch abzusichern.“
- „Insbesondere für Arbeiten im Bestand sind Ertragstafeln in Form von direkt verfügbaren Daten auch in der Zukunft wichtig.“

- „Die Bedeutung von Ertragstafeln wird in der Zukunft abnehmen.“
- „Ertragstafeln haben einen hohen betrieblichen Nutzen bei bekannten Schwächen und gutem Preis-Leistungsverhältnis.“

Insgesamt war bei allen befragten Personen ein großes Interesse am Verbundforschungsprojekt „Neue Generation dynamischer Ertragstafeln“ erkennbar. Es herrschte Einigkeit über den Forschungsbedarf, wobei die Dringlichkeit aktualisierter Ertragstafelwerke für die betriebliche Praxis in den westdeutschen deutlich höher als in den ostdeutschen Bundesländern eingeschätzt wurde.

### *2.3 Neue Generation dynamischer Ertragstafeln (dyn-ET)*

Grundlage der in Abschnitt 0 erstellen ökonomischen Bewertung sind die in Arbeitspaket 1 erarbeiteten neuen Ertragstafeln. Im folgenden Abschnitt erfolgt eine ökonomische Bewertung<sup>7</sup> dieser Ertragstafeldaten nach dyn-ET (unveröff.) mittels modular aufgebautem, automatisiertem R-Modell (R Core Team 2019). Über die ökonomische Bewertung hinaus besteht die Möglichkeit mit diesem Modell verschiedene naturale Kenngrößen grafisch darzustellen. Hierzu gehört einerseits eine Visualisierung der in den Ertragstafeln vorhandenen Kenngrößen, wie der laufende Bestandeszuwachs oder die Gesamtwuchsleistung, aber auch die Darstellung von Kenngrößen, die auf Basis der gegebenen naturalen Größen berechnet werden - wie die Volumenzuwachsraten oder die Stückvolumenrelationen<sup>8</sup>. Auf eine Präsentation dieser naturalen Ebene wird im Folgenden jedoch verzichtet, da in vorhergegangenen Arbeitspaketen diese naturalen Kenngrößen umfangreich diskutiert werden.

---

<sup>7</sup> Die ökonomische Bewertung findet ausschließlich in Bezug auf die forstwirtschaftliche Nutzung des Holzvolumens statt – weitere Waldfunktionen oder Wechselwirkungen, die durch diese entstehen, bleiben unberücksichtigt.

<sup>8</sup> Über die klassisch Methoden der Darstellung der verschiedenen naturalen Kenngröße über beispielweise dem Alter findet sich in Koster (2020, S. 173 ff.) ein weiteres methodisches Konzept der Darstellung der Ertragstafeldaten als Bestandesbehandlungsdiagramm (SDMD – stand density management diagram).

### 2.3.1 Ökonomische Bewertung

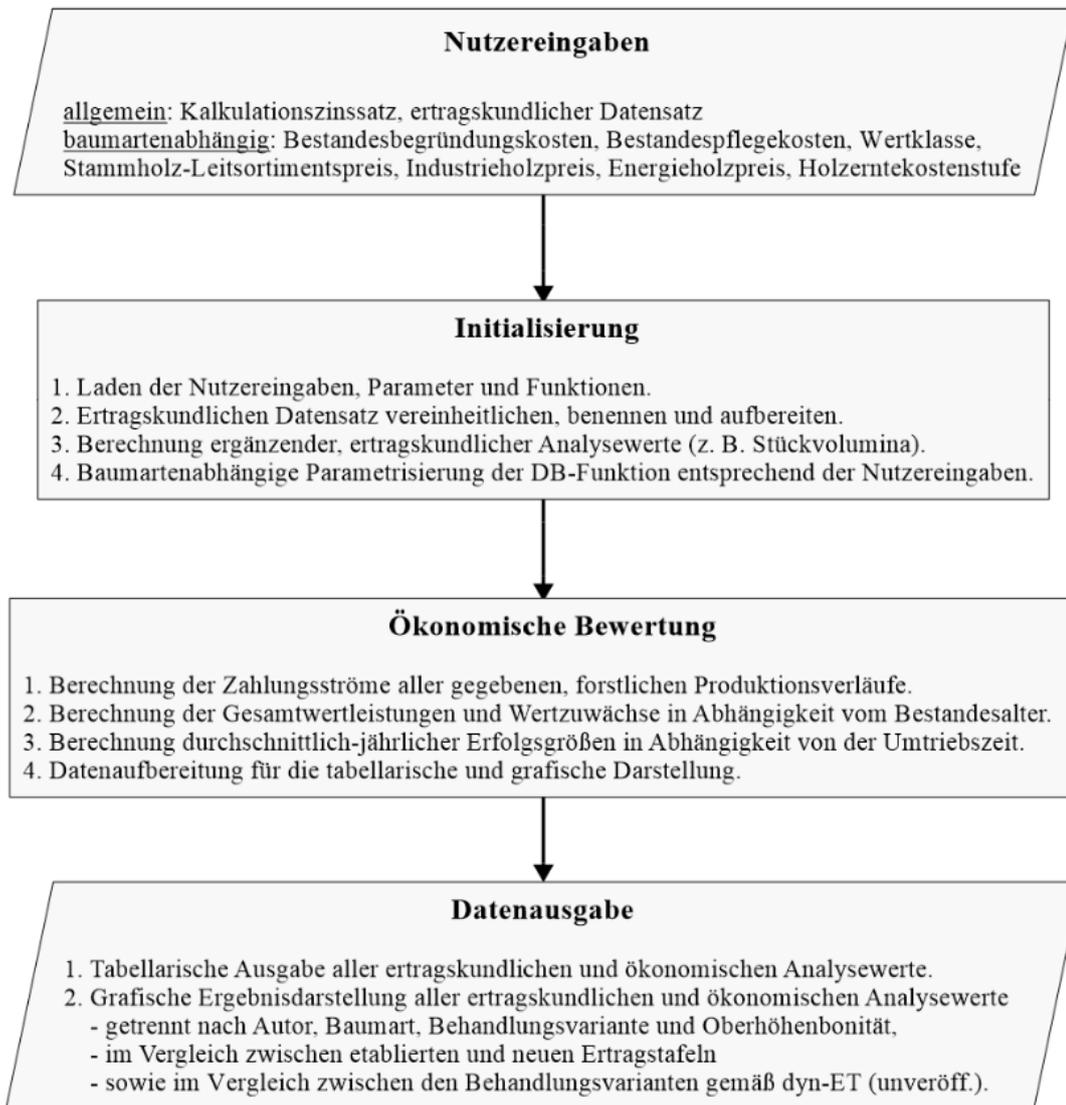


Abbildung 40: Ablaufdiagramm der ökonomischen Bewertung mittels automatisiertem R-Modell in Anlehnung an Groß (2019, S. 28). Parallelogramm: Nutzereingabe und Datenausgabe; Rechteck: Modellschritte.

Das R-Modell greift auf die Ertragstafeldaten zu, bereitet diese für die weiterführende Anwendung vor und führt schließlich in Verbindung mit allgemeinen und baumartenspezifischen Nutzereingaben die ökonomische Bewertung inkl. Vergleichsanalysen durch (Abbildung).

Die Einbindung der dyn-ET-Daten in das R-Modell erfolgt mittels SQLite-Bibliothek. Die Daten der etablierten Ertragstafelwerke für die Baumarten Buche und Fichte aus Schober (1995) wurden von Groß (2019) digitalisiert und werden im CSV-Dateiformat in das R-Modell eingebunden. Es erfolgt für die weitere Verarbeitung eine Vereinheitlichung von Struktur und Benennung der Daten aus dyn-ET (unveröff.) und Schober (1995).

Die allgemeinen und baumartenspezifischen Nutzereingaben können im R-Modell (innerhalb modellbedingter Grenzen) frei gewählt werden und sind in dieser Arbeit so gesetzt, dass eine realistische Bewertung stattfindet, die das ökonomische Potential der Baumarten im langjährigen Mittel<sup>9</sup> widerspiegelt.

<sup>9</sup> Die stark kalamitätsbeeinflussten Daten der forstwirtschaftlichen Extremjahre 2018 und 2019 werden bewusst nicht berücksichtigt, um bspw. bei der Sensitivitätsanalyse in in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** in Koster (2020) keine Doppelberücksichtigung von kalamitätsbedingten Nachteilen vorzunehmen.

Es kommt dabei für die folgenden Analysen weniger auf die absolute Höhe als vielmehr auf die Wertrelationen an.

Es werden Kosten für eine künstliche Bestandesbegründung (Kulturkosten) angenommen, welche sich in Anlehnung an Bodelschwingh (2018, S. 72) baumartenabhängig an der Kulturkostenstufe 5 („Pflanzung mit mittlerem Aufwand“) nach NLF (2014, Tabelle 1.13) orientieren (Tabelle 16). Ebenfalls in Anlehnung an Bodelschwingh (2018, S. 73) werden Bestandespflegekosten im Alter von 10 bzw. 20 Jahren angenommen (Tabelle 16).

Tabelle 16: Baumartenabhängige Bestandesbegründungs- und Bestandespflegekosten in Anlehnung an Bodelschwingh (2018, S. 72 f.).

Baumart	Bestandesbegründungskosten [€ ha <sup>-1</sup> ]	Pflegekosten (Alter: 10 Jahre) [€ ha <sup>-1</sup> ]	Pflegekosten (Alter: 20 Jahre) [€ ha <sup>-1</sup> ]
Fichte	3.400	500	-
Buche	8.800	700	500
Eiche	10.800	700	500
Kiefer	4.400	500	-
Douglasie	3.800	500	-

Die Bewertung geernteter Vor- und Endnutzungsvolumina erfolgt über eine Deckungsbeitragsfunktion, welche den Ausnutzungsgrad sowie die Holzerlöse und Holzerntekosten dimensionsabhängig berücksichtigt. Es wird für den dimensionsabhängigen Deckungsbeitrag  $P(D_g)$  im Sinne eines holzerntekostenfreien Holzerlöses frei Waldstraße (Deckungsbeitrag) folgende Chapman-Richards-Funktion

$$P(D_g) = \delta_1 \cdot (1 - e^{(-\delta_2 \cdot D_g)})^{\delta_3} + \delta_4, \quad [1]$$

mit dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes  $D_g$  in cm sowie den baumartenspezifisch hergeleiteten Funktionsparametern  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  und  $\delta_4$  genutzt. Ziel ist eine Deckungsbeitragsfunktion, die einerseits direkt auf die Volumeneinheit der Ertragstafeln, den Vorratsfestmeter, angewendet werden kann und andererseits durch die freie Eingabe von Leitsortiments-, Industrie- und Energieholzpreisen zukünftig an aktuelle Entwicklungen des Holzmarktes angepasst werden kann. Grundlage der Parametrisierung von Funktion 1 mittels nlxb-Funktion aus dem R-Paket nlmrt (Nash 2016) bilden in dieser Arbeit Sortentafeln nach Offer und Staupendahl (2018), Holzpreismatrizen nach Bodelschwingh (2018, Anhang 3), mittlere Leitsortiment- und Industrieholzpreise nach Schade (2019, S. 118) sowie Holzerntekosten nach Bodelschwingh (2018, S. 64 ff.).

Aus den Sortentafeln nach Offer und Staupendahl (2018) werden baumarten- und dimensionsabhängig in 2 cm-Schritten der Ausnutzungsgrad<sup>10</sup> sowie die Volumenanteile der Stammholzsortimente (Kombination aus Güte- und Stärkeklasse), des Industrie- und Energieholzes sowie des nicht verwerteten Derbholzes entnommen. Dabei wird als Referenz die Wertklasse 2 (durchschnittliche Qualitätsverhältnisse<sup>11</sup>) ohne

<sup>10</sup> Der Ausnutzungsgrad berücksichtigt den Rindenabzug sowie Ernteverluste durch z. B. den Wurzelanlauf, Trennschnitte, Zugaben und das forstliche Abrunden (Englert et al. 2018; Möhring et al. 2018, Abschnitt 5–9). Damit werden die in den Ertragstafeldaten angegebenen stehenden Vorratsfestmeter mit Rinde (Derbholz) auf verwertbares und nicht verwertbares Derbholzvolumen in Erntefestmeter ohne Rinde reduziert.

<sup>11</sup> Die drei von Offer und Staupendahl 2018 angegebenen Wertklassen repräsentieren nach Offer und Staupendahl 2009, S. 18 „überdurchschnittliche“ (Wertklasse 1), „durchschnittliche“ (Wertklasse 2) und „unterdurchschnittliche“ (Wertklasse 3) Bestandesqualitäten.

vorkommende Schäle genutzt und es wird baumartenübergreifend davon ausgegangen, dass die Aufarbeitung bis zu einem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes von  $D_g = 40$  cm hochmechanisiert, darüber hinaus motormanuell erfolgt (vgl. Groß 2019, S. 16).

Für das von Offer und Staupendahl (2018) angegebene nicht verwertete Derbholzvolumen (vgl. Englert et al. 2018) werden in Anlehnung an Bodelschwingh (2018, S. 60) weder Holzerlöse noch Holzerntekosten angesetzt – eine energetische Nutzung der nicht verwerteten Derbholzvolumina wird somit bspw. nicht angenommen. Für separat ausgewiesenes Energieholz wird im Sinne der Brennholzelbstwerbung ein einheitlicher Brennholzpreis unterstellt – Holzerntekosten fallen nicht an. Die angesetzten Brennholzpreise wurden in Anlehnung an Bodelschwingh (2018, ergänzende Auskunft des Autors) hergeleitet und können Tabelle 17 entnommen werden. Bei dem von Offer und Staupendahl (2018) ausgewiesenen Industrieholz wird in Anlehnung an Bodelschwingh (2018, S. 60) auf eine Trennung zwischen den Sorten Industrieholz-lang (IL) und Industrieholz-kurz/ Industrieschichtholz (IS) sowie eine preisliche Differenzierung zwischen Güteklassen verzichtet. Die Industrieholzpreise (Tabelle 17) entsprechen den mittleren Industrieholzpreisen (IL und IS bei Nadelhölzern; gerundet) aus Daten des Hessischen Staatswaldes der Jahre 2013 – 2017 nach Schade (2019, S. 124 bzw. 124).

*Tabelle 17: Preise für das jeweils in Klammern angegebene Stammholzleitsortiment als mittlerer Wert (gerundet) aus Daten des Hessischen Staatswaldes der Jahre 2013 – 2017 nach Schade (2019, S. 118); Industrieholzpreise als mittlerer Wert (IS und IL bei Nadelhölzern; gerundet) aus Daten des Hessischen Staatswaldes der Jahre 2013 – 2017 nach Schade (2019, S. 124); Brennholz- bzw. Energieholzpreise (gerundet) in Anlehnung an Bodelschwingh (2018).*

Baumart	Leitsortimentspreis [€ Efm <sup>-1</sup> ]	Industrieholzpreis [€ Efm <sup>-1</sup> ]	Brennholzpreis [€ Efm <sup>-1</sup> ]
Fichte	94 (B2b)	38	22
Buche	90 (B4)	48	34
Eiche	277 (B4)	42	28
Kiefer	74 (B2b)	36	22
Douglasie	95 (B2b)	38	22

Die preisliche Differenzierung zwischen den Stärke- und Güteklassen des Stammholzvolumens erfolgt über mittlere Leitsortimentspreise (Tabelle 17) im Hessischen Staatswald der Jahre 2013 – 2017 (gerundet) nach Schade (2019, S. 118) sowie Wertmatrizen nach Bodelschwingh (2018, Anhang 3 i. V. m. S. 63), welche die Stammholzsortimentspreise in Relation zum baumartenabhängigen Leitsortimentspreis angeben. Es ergeben sich somit Preismatrizen für die Stammholzsortimente.

Im Summenprodukt mit den Stammholzsortimentsanteilen nach Offer und Staupendahl (2018) ergibt sich der durchschnittliche Stammholzerlös je 2 cm-Schritt des Durchmessers des Grundflächenmittelstammes. Für den Verkaufserlös frei Waldstraße wird der Industrieholzerlös als Produkt aus Industrieholzpreis (Tabelle 17) und Industrieholzanteil nach Offer und Staupendahl (2018) addiert. Für dieses frei Waldstraße verkaufte Holzvolumen fallen Holzerntekosten an, die nach dem Kostenmodell von Bodelschwingh (2018, S. 65 ff.) hergeleitet werden. Hierbei wird die Kostenstufe 1, d. h. eine „normale Holzernte im befahrbaren Gelände“ mit einer Kombination von motormanuellen und maschinellen Verfahren, angenommen (Bodelschwingh 2018, S. 66).

Die Brennholzerlöse aus Selbstwerbung werden hinzuaddiert und es ergibt sich unter Berücksichtigung der Ausnutzungsgrade und des nicht verwerteten Derbholzes nach Offer und Staupendahl (2018) eine Datenreihe durchschnittlicher erntekostenfreien Holzerlöse in 2 cm-Schritten des Durchmessers des Grundflächenmittelstammes zwischen 10 cm und 70 cm (Fichte) bzw. 80 cm (Buche). Die aus der Funktionsparametrisierung mittels nlxb-Funktion aus dem R-Paket nlmrt (Nash 2016) resultierenden

Koeffizienten der Ausgleichsfunktion 1 können Tabelle 18 entnommen werden und Abbildung zeigt die entsprechenden Funktionsverläufe über den Datenpunkten<sup>12</sup>.

*Tabelle 18: Koeffizienten der Chapman-Richards-Deckungsbeitragsfunktion [1], hergeleitet über Sortentafeln nach Offer und Staupendahl (2018), Holzpreismatrizen nach Bodelschwingh (2018, Anhang 3), mittlere Leitsortiment- und Industrieholzpreise nach Schade (2019, S. 118 bzw. 124), Brennholz- bzw. Energieholzpreise (gerundet) in Anlehnung an Bodelschwingh (2018) sowie Holzerntekosten nach Bodelschwingh (2018, S. 64 ff.).*

Baumart	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
Fichte	160,784217	0,088489	0,960817	-106,027291
Buche	943,088665	0,018691	0,036049	-887,609469
Eiche	123,123188	0,039722	4,457516	0,628945
Kiefer	2023,516284	0,043034	0,028762	-106,027291
Douglasie	2679,386356	0,054861	0,026442	-2627,339993

Durch Multiplikation der entsprechenden Deckungsbeiträge mit den Volumina des ausscheidenden Bestandes (Vornutzungswerte) sowie dem verbleibenden Bestandesvolumen (Abtriebswerte) im Alter der Endnutzung entstehen je Ertragstafeltabelle und für alle möglichen Endnutzungszeitpunkte spezifische Zahlungsreihen. Die kumulierte Summe einer Zahlungsreihe ergibt die Gesamtwertleistung und aus dem periodischen Differenzenquotient resultiert der laufende Bestandeswertzuwachs zwischen zwei Zeitpunkten (rückblickend). In Relation zum Abtriebswert des verbleibenden Bestandes zu Beginn der jeweiligen Periode ergeben sich Wertzuwachsrate. Als jährliche Erfolgsgröße unter der Berücksichtigung von Kapitalknappheit wird die Brutto-Bodenrente genutzt – sie stellt unter der Prämisse des vollkommenen Kapitalmarkts den durchschnittlichen Überschuss der forstlichen Produktion als leicht zu interpretierende ökonomische Entscheidungsgröße dar (vgl. Möhring et al. 2006). Als konstanter Kalkulationszinssatz wird in Anlehnung an Möhring (2001)  $r = 1,5 \%$  gewählt, wobei dieser nicht zwangsläufig als externer Zinssatz zu verstehen ist, sondern im Sinne eines internen Grenzzinssatzes auch entscheidungsorientiert als Rendite einer innerbetriebliche Investitionsalternative angesehen werden kann (vgl. u. a. Möhring 1994, S. 44 ff.; Möhring und Rüping 2006, S. 6; Möhring 2014; Gerst 2015, S. 46 ff.).

<sup>12</sup> Sinkende Deckungsbeiträge bei hohen Einzelbaumdimensionen, bspw. durch Rotkernbildung bei der Buche (vgl. z. B. Bodelschwingh 2018, S. 97) oder reduzierten Absatzmöglichkeiten bei der Fichte (vgl. z. B. Kohnle und Teuffel 2020), werden nicht berücksichtigt.

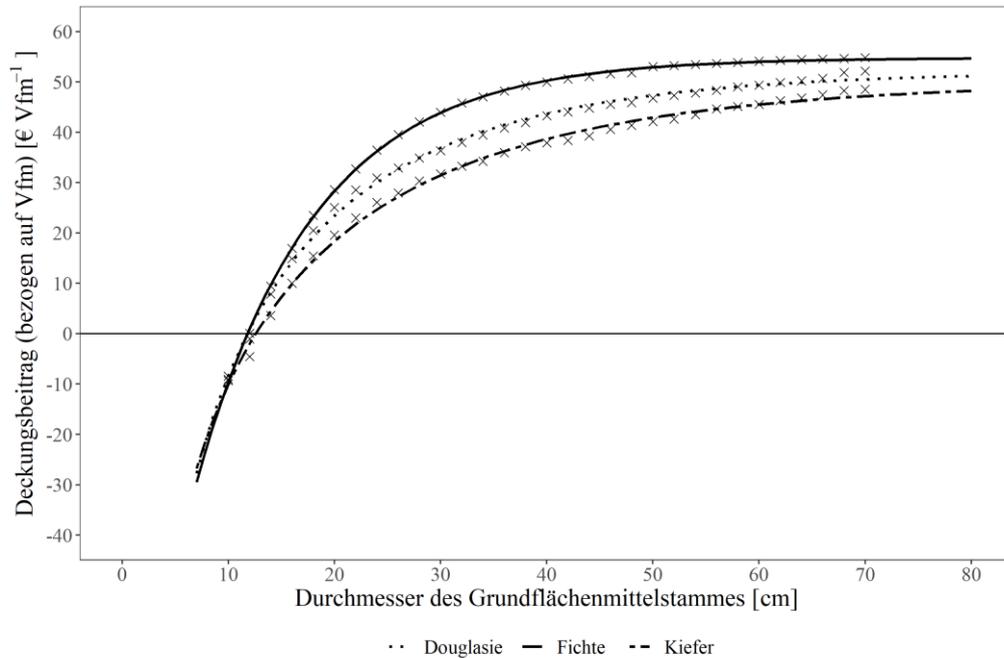


Abbildung 41: Baumartenspezifische, dimensionsabhängige Deckungsbeiträge (erntekostenfreie Holzerlöse) [ $\text{€ Vfm}^{-1}$ ] der Nadelhölzer; Datenpunkte in 2 cm-Schritten hergeleitet über Sortentafeln nach Offer und Staupendahl (2018), Holzpreismatrizen nach Bodelschwingh (2018, Anhang 3), mittlere Leitsortiment- und Industrieholzpreise nach Schade (2019, S. 118 bzw. 124), Brennholz- bzw. Energieholzpreise (gerundet) in Anlehnung an Bodelschwingh (2018) sowie Holzerntekosten nach Bodelschwingh (2018, S. 64 ff.); Ausgleichsfunktionen gemäß [1] mit Koeffizienten entsprechend Tabelle 18. Ausgleichsfunktionen der Buche und Eiche sind dem Anhang 11 zu entnehmen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Analog zur Analyse der vorläufigen Ertragstafeldaten werden die ökonomischen Bewertungsergebnisse im Folgenden nur für die Baumart Fichte aufgezeigt (Alle weiteren Baumarten und Behandlungsvarianten befinden sich im Anhang 12– das Modell ist zu finden unter: [https://gitlab.gwdg.de/forest\\_economics\\_goettingen/dyn-et.git](https://gitlab.gwdg.de/forest_economics_goettingen/dyn-et.git)):

- Das ökonomische Leistungsspektrum der mäßigen Hochdurchforstung als Basis-Behandlungsvariante wird anhand der Gesamtwertleistungen und laufenden Wertzuwächse aller Oberhöhenbonitäten abgebildet. Ergänzend werden die entsprechenden Abbildungen für die starke Hochdurchforstung im separaten Anhang 12 gezeigt. Für eine tabellarische Gegenüberstellung ausgewählter ökonomischer Bewertungsergebnisse wird analog zur Analyse der vorläufigen Ertragstafeldaten neben dem Kulminationszeitpunkt des laufenden Bestandeswertzuwachses das Alter bzw. Umtriebszeit 60 a (Fichte) gewählt, da für dieses Alter jeweils Ertragstafeldaten aller Oberhöhenbonitäten zur Verfügung stehen.
- Ein Vergleich zu etablierten Ertragstafelwerken (Fichte: Wiedemann 1936/42, mäßige Durchforstung) wird in Anlehnung an die Analyse der vorläufigen Ertragstafeldaten bei vergleichbaren Oberhöhenbonitäten anhand der Gesamtwertleistungen, der laufenden Bestandeswertzuwächse und Abtriebswerte sowie den daraus resultierenden Wertzuwachsrate, zwei Kennziffern einer nachhaltigen Betriebsklasse (durchschnittliche waldbauliche Überschüsse und durchschnittliche Abtriebswerte) sowie den Brutto-Bodenrenten gezogen. Die entsprechenden Abbildungen des Vergleichs der starken Durchforstungen werden im Anhang 12 gezeigt. Für eine tabellarische Gegenüberstellung ausgewählter Bewertungsergebnisse werden analog zur Analyse der vorläufigen Ertragstafeldaten neben den Kulminationszeitpunkten der laufenden

Bestandeswertzuwächse Alter bzw. Umtriebszeiten in Anlehnung an etablierte Umtriebszeiten (vgl. z. B. NLF 2014, Tabelle 1.1) gewählt<sup>13</sup> – 80 a (Fichte).

- Die ökonomischen Auswirkungen der unterschiedlichen waldbaulichen Behandlungsvarianten gemäß dyn-ET (unveröff.) werden schließlich auf Basis der minimalen, mittleren und maximalen Oberhöhenbonitäten anhand der Gesamtwertleistungen, der laufenden Bestandeswertzuwächse und Wertzuwachsrate sowie des durchschnittlichen waldbaulichen Überschusses und der Brutto-Bodenrente analysiert. Auch hier wird für die tabellarische Gegenüberstellung ausgewählter Bewertungsergebnisse das Alter 80 a für die Baumart Fichte bzw. die Kulminationszeitpunkte der laufenden Bestandeswertzuwächse gewählt.

Das ökonomische Leistungsspektrum der Baumart **Fichte** (mäßige Hochdurchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.) wird anhand des Gesamtwertleistungsfächers über dem Alter ersichtlich (Abbildung). Die bis zu einem Alter von 60 Jahren erbrachte Wertleistung deckt einen Rahmen zwischen 11443 und 48012 € ha<sup>-1</sup> ab (Tabelle 19).

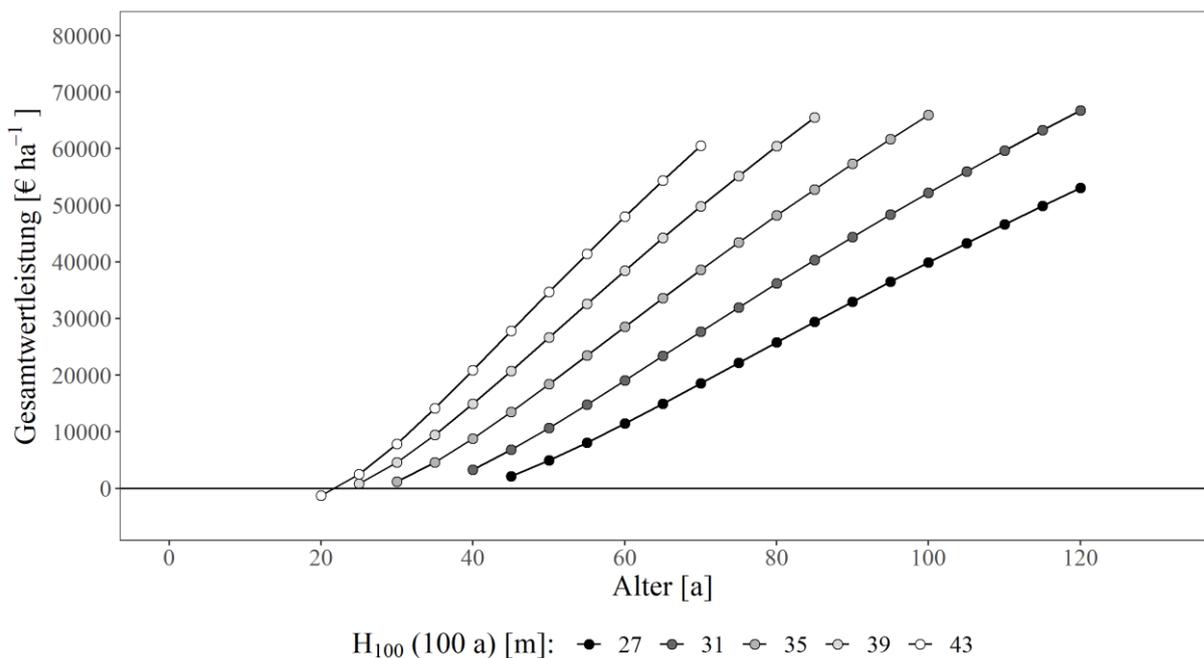


Abbildung 42: Gesamtwertleistung über dem Alter; alle Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte (mäßige Hochdurchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.).

Die laufenden Bestandeswertzuwächse der Baumart Fichte (mäßige Hochdurchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.) kulminieren umso früher, je höher die Oberhöhenbonität ist (Abbildung). Während bei einer Oberhöhenbonität von 27 m im Alter 75 a ein maximaler laufender Bestandeswertzuwachs von 726 € ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> erzielt wird, wächst der Bestandeswert bei einer Oberhöhenbonität von 43 m im Alter 45 a um 1.381 € ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> zu. Gleichzeitig nimmt die Veränderung der laufenden Wertzuwächse über dem Alter mit steigender Oberhöhenbonität deutlich zu.

<sup>13</sup> Es wird sich im Rahmen des Vergleichs ökonomischer Bewertungsergebnisse aus zwei Gründen bewusst für die Verwendung baumartenspezifisch konstanter Umtriebszeiten und somit gegen die jeweilig optimalen Umtriebszeiten (vgl. z. B. Bodelschwingh 2018, S. 121 ff.) entschieden: Erstens, steigen sowohl die durchschnittlichen waldbaulichen Überschüsse als auch die Brutto-Bodenrenten mit den gewählten Eingangsdaten und Modellprämissen nahezu ausnahmslos bis zum höchsten Alter der verfügbaren Ertragstafeldaten an. Es würden also keine optimalen, sondern lediglich modell-maximale Umtriebszeiten verglichen, welche nur über die zur Verfügung stehenden vorläufigen Ertragstafeldaten determiniert und nicht ökonomisch begründet wären. Zweitens, geht es bei den hier getätigten Analysen um den Vergleich gegebener waldbaulicher Behandlungsalternativen. Die Verwendung unterschiedlicher, jeweils optimaler, Umtriebszeiten würde den Erkenntnisgewinn nur steigern, sofern sich diese innerhalb der Modellgrenzen aus ökonomischen Gründen maßgeblich unterscheiden würden.

Tabelle 19: Vergleich ausgewählter ökonomischer Bewertungsergebnisse der Baumart Fichte (mäßige Hochdurchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.); alle Oberhöhenbonitäten; in Klammern ist jeweils die relative Differenz zur Oberhöhenbonität  $H_{100}(100 \text{ a}) = 35 \text{ m}$  angegeben; **GWertL(60 a)**: Gesamtwertleistung bis zum Alter 60 a, **max w<sub>B</sub>**: lfd. Bestandeswertzuwachs zum Zeitpunkt der Kulmination [...], **W<sub>B</sub>(60 a)**: Abtriebswert (verbl. Bestand) im Alter 60 a,  $\sum_0^{60 \text{ a}} \lambda \cdot P(D_g)$ : kumulierte Vornutzungswerte bis zum Alter 60 a, **a<sub>η</sub>(60 a)**: durchschn. waldbaulicher Überschuss einer nachhaltigen Betriebsklasse bei einer Umtriebszeit von 60 a, **a(60 a)**: Brutto-Bodenrente bei einer Umtriebszeit von 60 a.

Bestandesbehandlung	mäßige Hochdurchforstung					
	$H_{100}(100 \text{ a})$ [m]	27	31	35	39	43
<b>GWertL(60 a)</b> [€ ha <sup>-1</sup> ]		11.443 (- 60,0 %)	19.090 (- 32,2 %)	28.570	38.495 (+ 34,7 %)	48.013 (+ 68,1 %)
<b>max w<sub>B</sub></b> [€ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]		726 [75 a] (- 28,6 %)	862 [65 a] (- 15,2 %)	1.017 [60 a]	1.188 [50 a] (+ 16,8 %)	1.381 [45 a] (+ 35,8 %)
<b>W<sub>B</sub>(60 a)</b> [€ ha <sup>-1</sup> ]		9.311 (- 54,8 %)	14.822 (- 28,1 %)	20.605	26.298 (+ 27,6 %)	31.665 (+ 53,7 %)
$\sum_0^{60 \text{ a}} \lambda \cdot P(D_g)$ [€ ha <sup>-1</sup> ]		2.132 (- 73,2 %)	4.269 (- 46,4 %)	7.965	12.197 (+ 53,1 %)	16.348 (+ 105,2 %)
<b>a<sub>η</sub>(60 a)</b> [€ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]		126 (- 69,3 %)	253 (- 38,4 %)	411	577 (+ 40,4 %)	735 (+ 78,8 %)
<b>a(60 a)</b> [€ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]		22 (- 89,5 %)	104 (- 50,5 %)	210	322 (+ 53,3 %)	425 (+ 102,4 %)

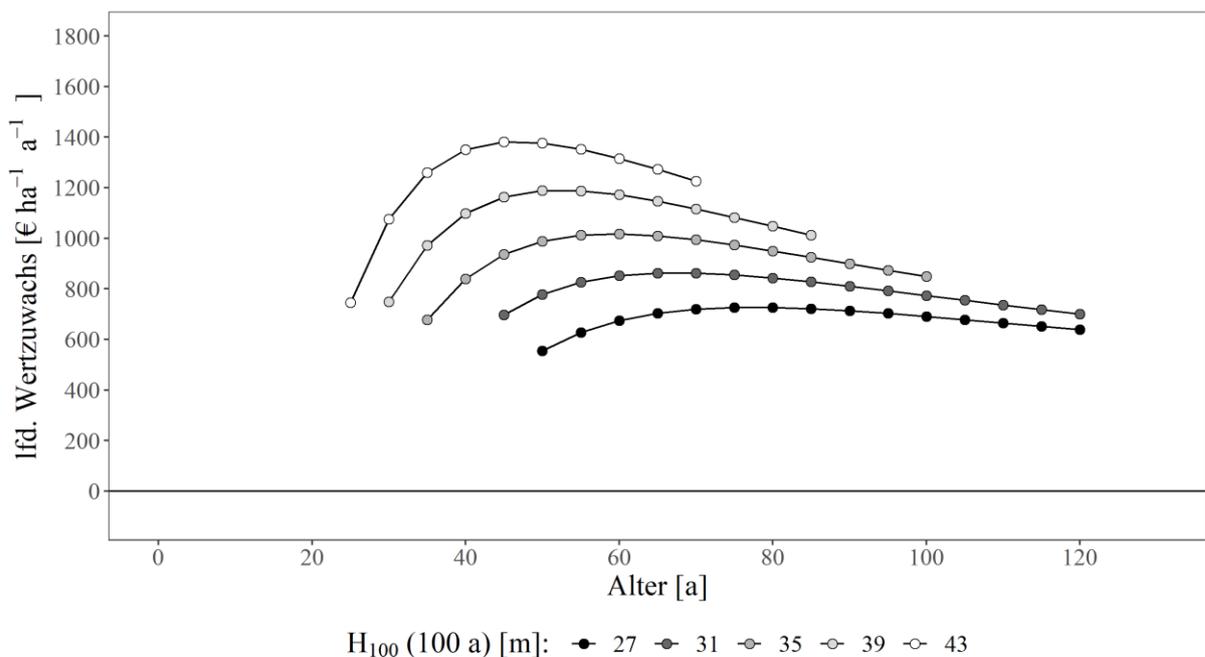


Abbildung 43: Laufender Bestandeswertzuwachs über dem Alter; alle Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte (mäßige Hochdurchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.).

Die Veränderungen ggü. dem etablierten Ertragstafelwerk von Wiedemann (1936/42) führen bei der Fichte zu erheblich veränderten ökonomischen Bewertungsergebnissen. Für die mäßige Durchforstung führt das erhöhte Ertragsniveau in Verbindung mit den stark gestiegenen mittleren Einzelbaumdurchmessern im verbleibenden und ausscheidenden Bestand zu einer deutlichen Steigerung der Gesamtwertleistung– sie beträgt im Alter 80 a bei annähernd gleicher Oberhöhenentwicklung ausgewählter Oberhöhenbonitäten zwischen 40 % und 103 % (Tabelle 20 und Abbildung ). Die relative Zunahme der Gesamtwertleistungen ggü. Wiedemann (1936/42, mäßige Durchforstung) steigt mit sinkender Oberhöhenbonität.

Entsprechend der Gesamtwertleistungen steigen auch die laufenden Bestandeswertzuwächse gemäß dyn-ET (unveröff., mäßige Hochdurchforstung) deutlich an (Abbildung 4545). Sie kulminieren ggü. Wiedemann (1936/42, mäßige Durchforstung) früher auf einem um 27 % und 47 % höheren Niveau (Tabelle 20).

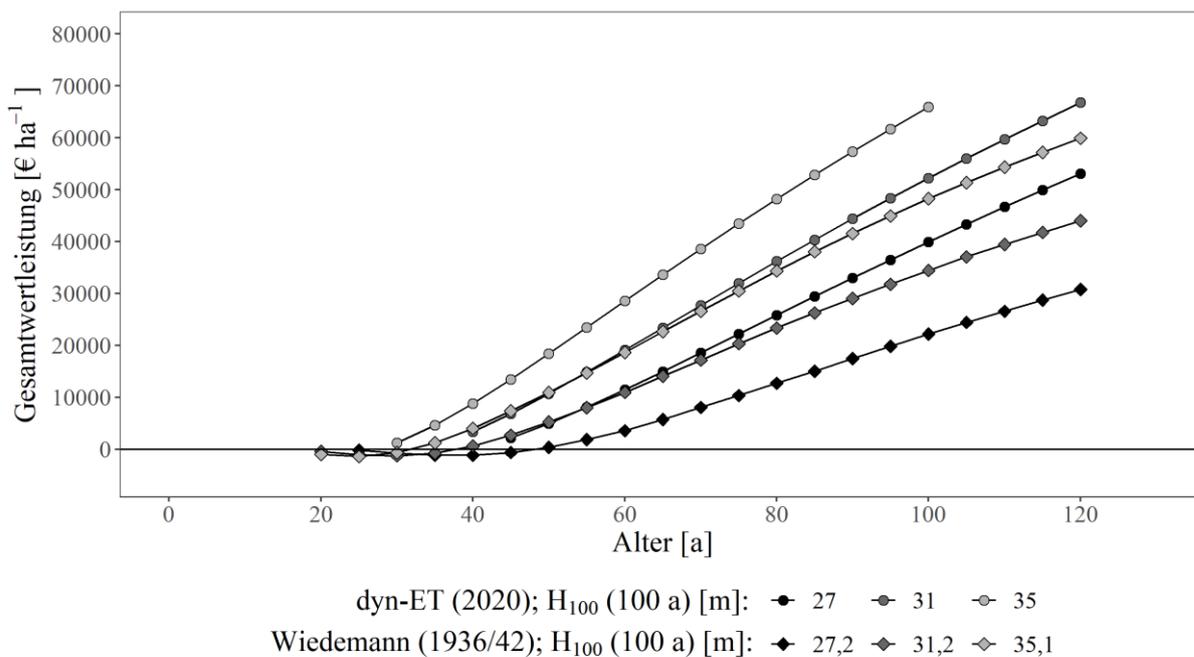


Abbildung 44: Gesamtwertleistung über dem Alter; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte (mäßige Durchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.) und Wiedemann (1936/42).

Aus den ggü. Wiedemann (1936/42, mäßige Durchforstung) annähernd unveränderten (niedrige Oberhöhenbonität) bzw. leicht gesunkenen (hohe Oberhöhenbonitäten) Vorräten resultieren in Verbindung mit den (bei niedrigen Oberhöhenbonitäten deutlich) gestiegenen mittleren Einzelbaumdurchmessern des verbleibenden Bestandes insb. bei niedrigen Oberhöhenbonitäten gesteigerte Abtriebswerte (Abbildung 4646). Im Alter 80 a beträgt die Steigerung bis zu 43 % (Tabelle 20). Bei den gleichzeitig deutlich höheren laufenden Bestandeswertzuwächsen (Abbildung 45) folgen gestiegene Wertzuwachsrate insbesondere bei mittlerer und hoher Oberhöhenbonität (Abbildung 47).

Tabelle 20: Vergleich ausgewählter ökonomischer Bewertungsergebnisse (mäßige Durchforstung); ausgewählte Oberhöhenbonitäten gemäß dyn-ET (unveröff.) und Wiedemann (1936/42) in Klammern ist jeweils die relative Differenz zur vergleichbaren Oberhöhenbonität nach Wiedemann (1936/42) angegeben;  $GWertL(80 a)$ : Gesamtwertleistung bis zum Alter 80 a,  $max w_B$ : lfd. Bestandeswertzuwachs zum Zeitpunkt der Kulmination [...],  $W_B(80 a)$ : Abtriebswert (verbl. Bestand) im Alter 80 a,  $\sum_0^{80 a} \lambda \cdot P(D_g)$ : kumulierte Vornutzungswerte bis zum Alter 80 a,  $a_\eta(80 a)$ : durchschn. waldbaulicher Überschuss einer nachhaltigen Betriebsklasse bei einer Umtriebszeit von 80 a,  $a(80 a)$ : Brutto-Bodenrente bei einer Umtriebszeit von 80 a.

Ertragstafel	Wiedemann (1936/42), mäßige Df.			dyn-ET (unveröff.), mäßige Df.		
	27,2	31,2	35,1	27	31	35
$H_{100}(100 a)$ [m]						
$GWertL(80 a)$ [€ ha <sup>-1</sup> ]	12.713	23.336	34.359	25.809 (+ 103,0 %)	36.198 (+ 55,1 %)	48.205 (+ 40,3 %)
$max w_B$ [€ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	494 [90 a]	629 [75 a]	799 [65 a]	726 [75 a] (+ 47,0 %)	862 [65 a] (+ 37,0 %)	1.017 [60 a] (+ 27,3 %)
$W_B(80 a)$ [€ ha <sup>-1</sup> ]	12.513	21.493	30.327	17.873 (+ 42,8 %)	24.083 (+ 12,0 %)	30.078 (- 0,01 %)
$\sum_0^{80 a} \lambda \cdot P(D_g)$ [€ ha <sup>-1</sup> ]	200	1.843	4.032	7.936 (+ 3.868 %)	12.115 (+ 557,3 %)	18.127 (+ 349,6 %)
$a_\eta(80 a)$ [€ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	110	243	381	274 (+ 148,6 %)	404 (+ 66,2 %)	554 (+ 45,5 %)
$a(80 a)$ [€ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	- 2	68	143	96 (+ 155,1 %)	173 (+ 86,7 %)	268

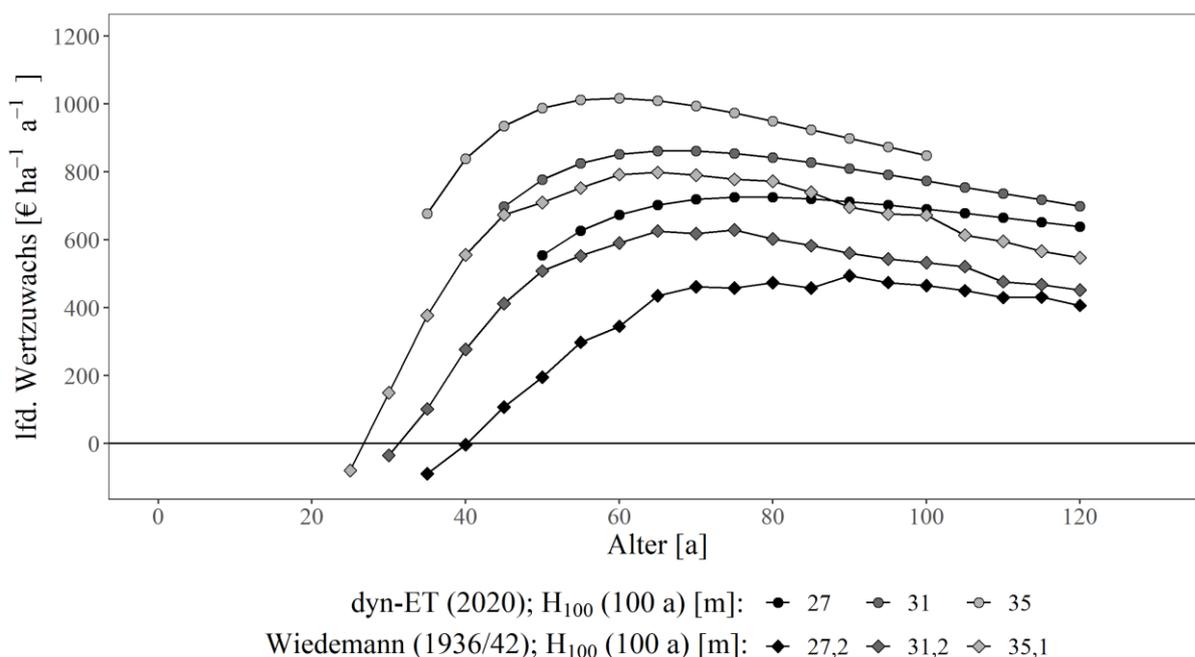


Abbildung 45: Laufender Bestandeswertzuwachs über dem Alter; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte (mäßige Durchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.) und Wiedemann (1936/42).

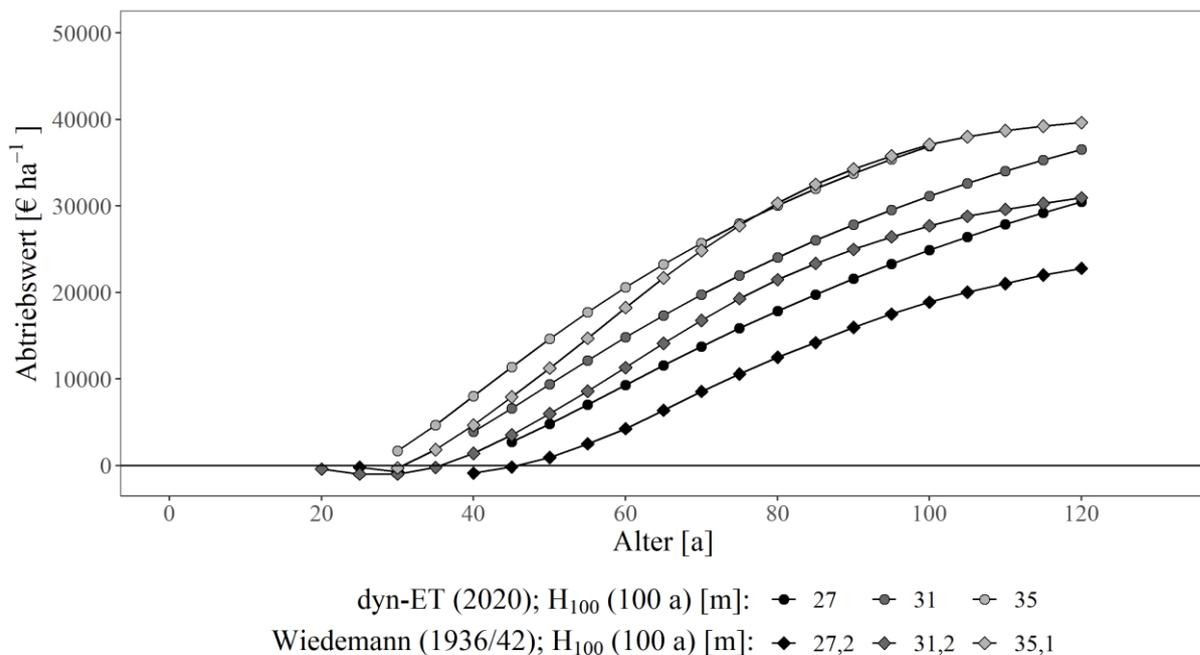


Abbildung 46: Abtriebswert über dem Alter; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte (mäßige Durchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.) und Wiedemann (1936/42).

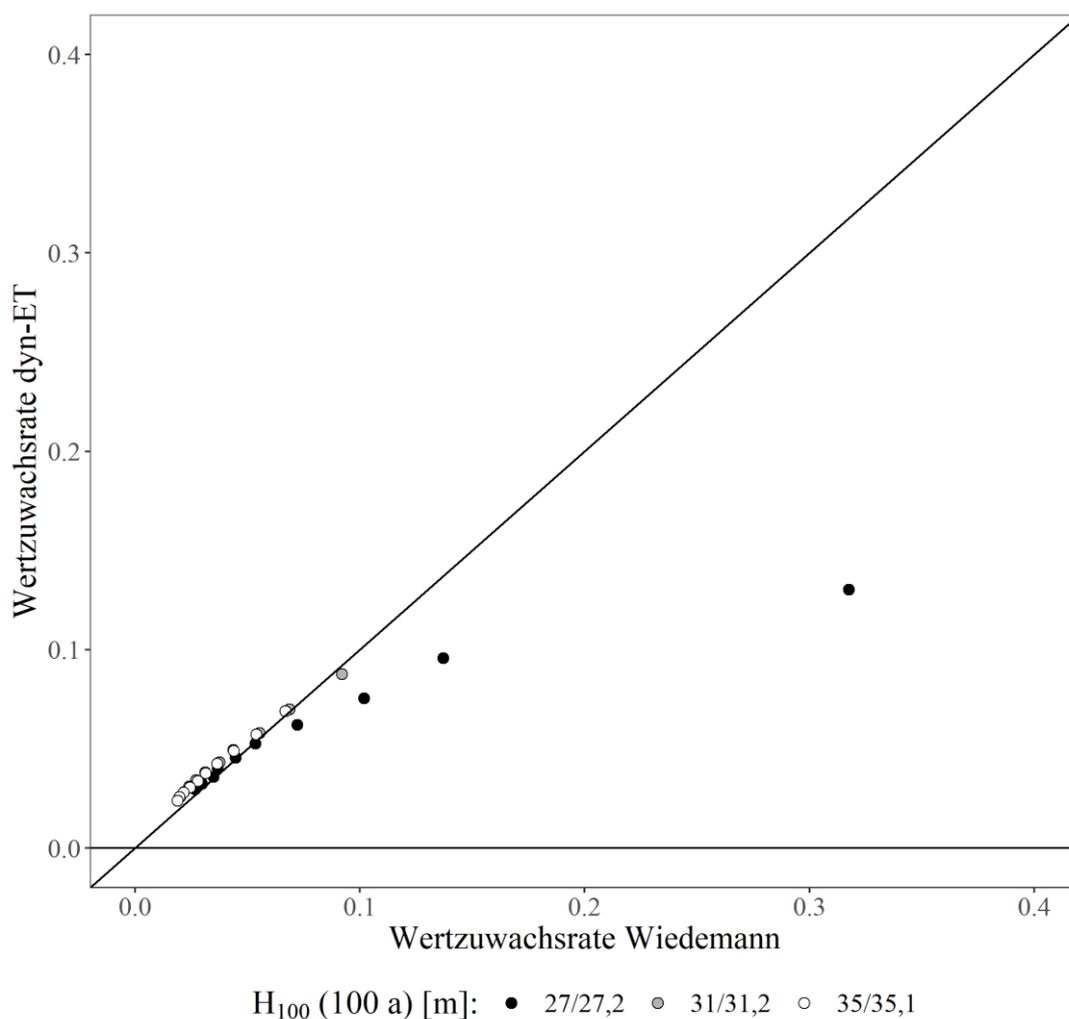


Abbildung 47: Wertzuwachsrate der Baumart Fichte (mäßige Durchforstung, ausgewählte Oberhöhenbonitäten) gemäß dyn-ET (unveröff.) und Wiedemann (1936/42); es werden nur

Vergleichspaare aus Altern dargestellt, in denen für alle Oberhöhenbonitäten Datenpunkte vorliegen; die Winkelhalbierende kennzeichnet gleiche Wertzuwachsrate im gleichen Alter.

Bei einer Umtriebszeit von 80 a liegen die durchschnittlichen waldbaulichen Überschüsse gemäß dyn-ET (unveröff., mäßige Hochdurchforstung) um 45 % (hohe Oberhöhenbonität) bis 148 % (niedrige Oberhöhenbonität) höher als gemäß Wiedemann (1936/42, mäßige Durchforstung) (Tabelle 20 und Abbildung).

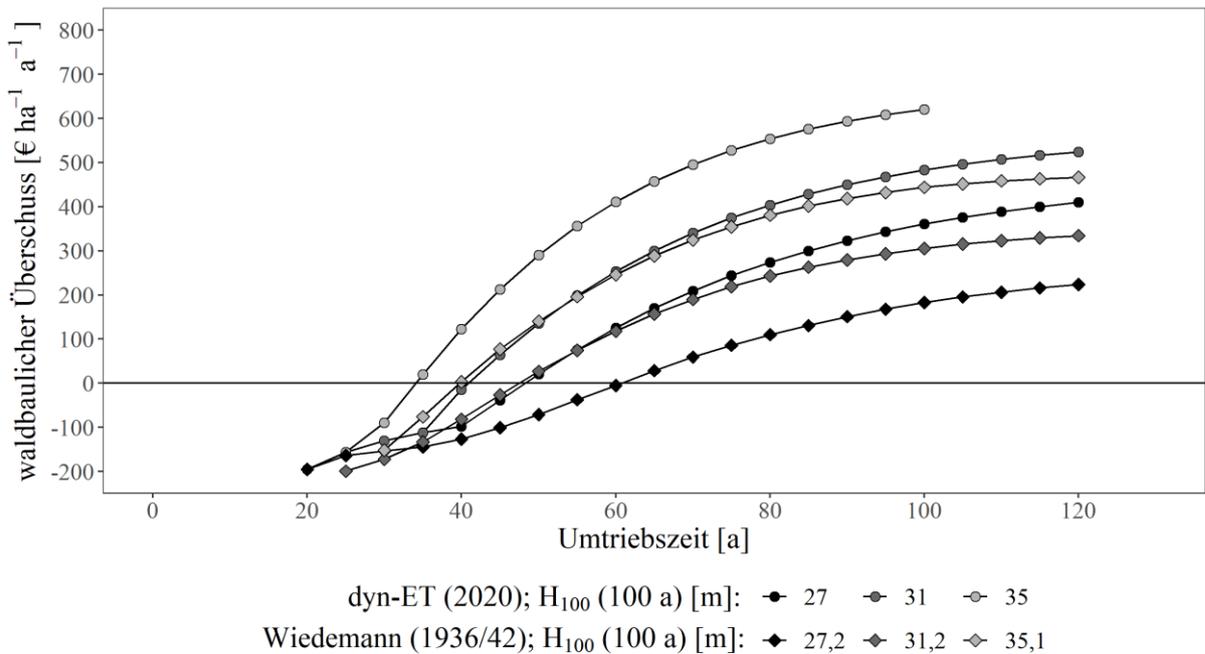


Abbildung 48: Durchschnittlicher waldbaulicher Überschuss der forstlichen Produktion über der Umtriebszeit; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte (mäßige Durchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.) und Wiedemann (1936/42).

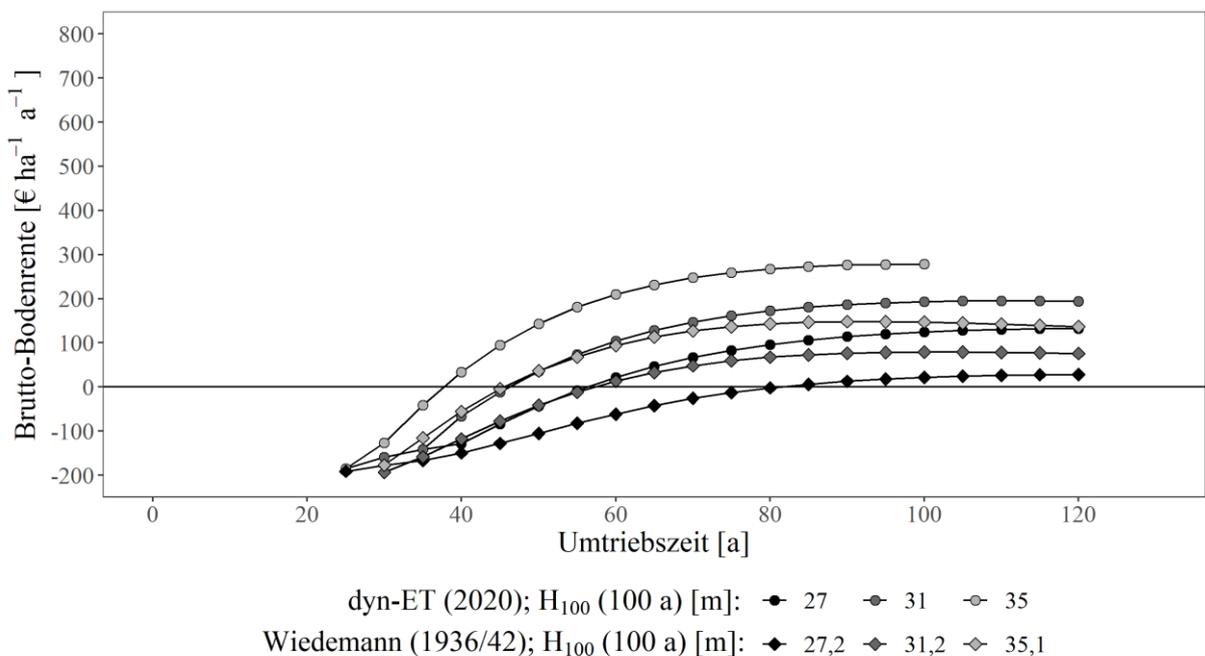


Abbildung 49: Brutto-Bodenrente ( $r = 1,5\%$ ) über der Umtriebszeit; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte (mäßige Durchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.) und Wiedemann (1936/42).

Gegenüber Wiedemann (1936/42, mäßige Durchforstung) steigen die mit einem Kalkulationszinssatz von  $r = 1,5\%$  berechneten Brutto-Bodenrenten bei einer Umtriebszeit von 80 a deutlich an (Tabelle 20 – bei Umtriebszeiten über 50 Jahren sind sie selbst bei der niedrigsten Oberhöhenbonität positiv (Abbildung49).

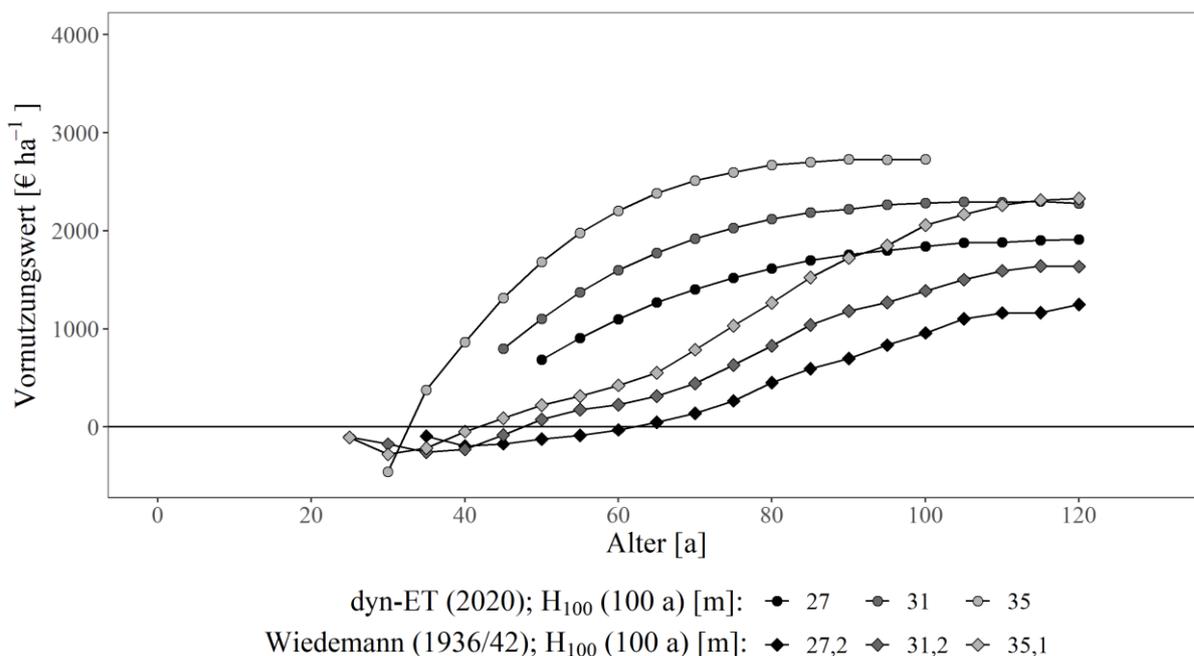


Abbildung 50: Vornutzungswerte über dem Alter; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte (mäßige Durchforstung) gemäß dyn-ET (unveröff.) und Wiedemann (1936/42).

Die unter Kapitalknappheit nochmal deutlich höhere Differenz (Tabelle 20) zwischen dyn-ET (unveröff., mäßige Hochdurchforstung) und Wiedemann (1936/42, mäßige Durchforstung) lässt sich u. a. anhand der deutlich höheren Vornutzungswerte in niedrigen Bestandesaltern erklären (Abbildung0). Werte gleichen Niveaus werden nach dyn-ET (unveröff., mäßige Hochdurchforstung) um bis zu 60 Jahre früher realisiert, was unter dem Zinseffekt erhebliche Auswirkungen auf die jährliche Erfolgsgröße hat.

Im ökonomischen Vergleich der waldbaulichen Behandlungsvarianten gemäß dyn-ET (unveröff.) zeigt sich bei der Baumart Fichte der Einfluss der Dimensionssteigerung durch die starke Hochdurchforstung. Während die Gesamtwuchsleistung bei starker Hochdurchforstung bei mittlerer und hoher Bonität deutlich niedriger als bei mäßiger Hochdurchforstung ist, zeigt sich für die Gesamtwertsleistung bei niedrigen Bonitäten ein sehr ähnlicher Verlauf (Abbildung 52) bzw. eine ökonomische Vorteilhaftigkeit der starken Hochdurchforstung zu Beginn der forstlichen Produktion die sich dann in eine Vorteilhaftigkeit der mäßigen Hochdurchforstung mit steigendem Alter wandelt.

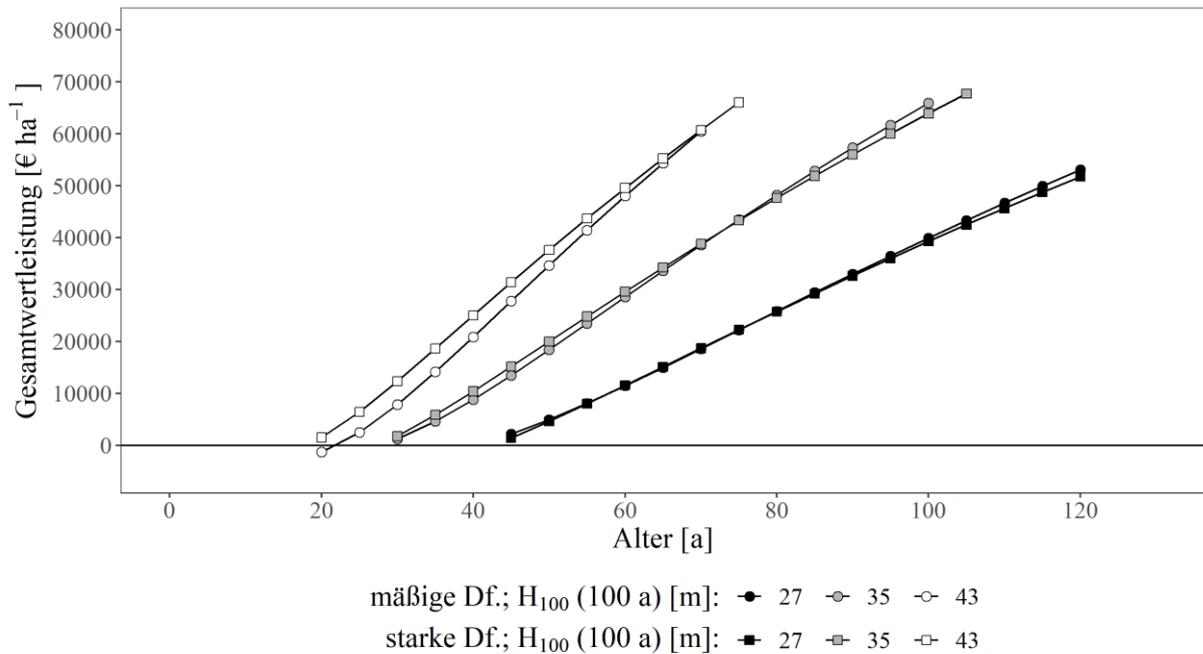


Abbildung 52: Gesamtwertleistung über dem Alter; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte getrennt nach Behandlungsvarianten gemäß dyn-ET (unveröff.).

Durch die Bewertung der ausscheidenden Bestandesvolumina mit der dimensionsabhängigen Deckungsbeitragsfunktion führen die (insb. bei hohen Oberhöhenbonitäten) deutlich höheren mittleren Einzelbaumdurchmesser bei starker Hochdurchforstung zu einer Kompensation der im Vergleich zur mäßigen Hochdurchforstung reduzierten Volumenleistung (Tabelle 21; siehe dazu auch die tiefergehenden Sensitivitätsanalysen in Koster (2020, S. 219 ff.)).

Tabelle 21: Vergleich ausgewählter ökonomischer Bewertungsergebnisse der Baumart Fichte (Oberhöhenbonität  $H_{100}(100\text{ a}) = 35\text{ m}$ ) gemäß dyn-ET (unveröff.); unterschiedliche Behandlungsvarianten; in Klammern ist jeweils die relative Differenz zur mäßigen Hochdurchforstung angegeben;  $G\text{Wert}L(80\text{ a})$ : Gesamtwertleistung bis zum Alter 80 a,  $\max w_B$ : lfd. Bestandeswertzuwachs zum Zeitpunkt der Kulmination [...],  $W_B(80\text{ a})$ : Abtriebswert (verbl. Bestand) im Alter 80 a,  $\sum_0^{80\text{ a}} \lambda \cdot P(D_g)$ : kumulierte Vornutzungswerte bis zum Alter 80 a,  $a_\eta(80\text{ a})$ : durchschn. waldbaulicher Überschuss einer nachhaltigen Betriebsklasse bei einer Umtriebszeit von 80 a,  $a(80\text{ a})$ : Brutto-Bodenrente bei einer Umtriebszeit von 80 a.

Bestandesbehandlung	mäßige Hochdurchforstung	starke Hochdurchforstung
$H_{100}(100\text{ a})$ [m]	35	35
$G\text{Wert}L(80\text{ a})$ [€ ha <sup>-1</sup> ]	48.205	47.632 (- 1,2 %)
$\max w_B$ [€ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	1.017 [60 a]	966 [50 a] (- 5,0 %)
$W_B(80\text{ a})$ [€ ha <sup>-1</sup> ]	30.078	25.539 (- 15,1 %)
$\sum_0^{80\text{ a}} \lambda \cdot P(D_g)$ [€ ha <sup>-1</sup> ]	18.127	22.092 (+ 21,9 %)
$a_\eta(80\text{ a})$ [€ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	554	547 (- 1,3 %)
$a(80\text{ a})$ [€ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	268	279 (+ 4 %)

Zum Zeitpunkt der jeweiligen Wertzuwachskulmination liegen die laufenden Bestandeswertzuwächse bei starker aber stets unterhalb der laufenden Bestandeswertzuwächse bei mäßiger Hochdurchforstung – bspw. bei der mittleren Oberhöhenbonität 35 m mit 966 € ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> um 5 % (Tabelle 21).

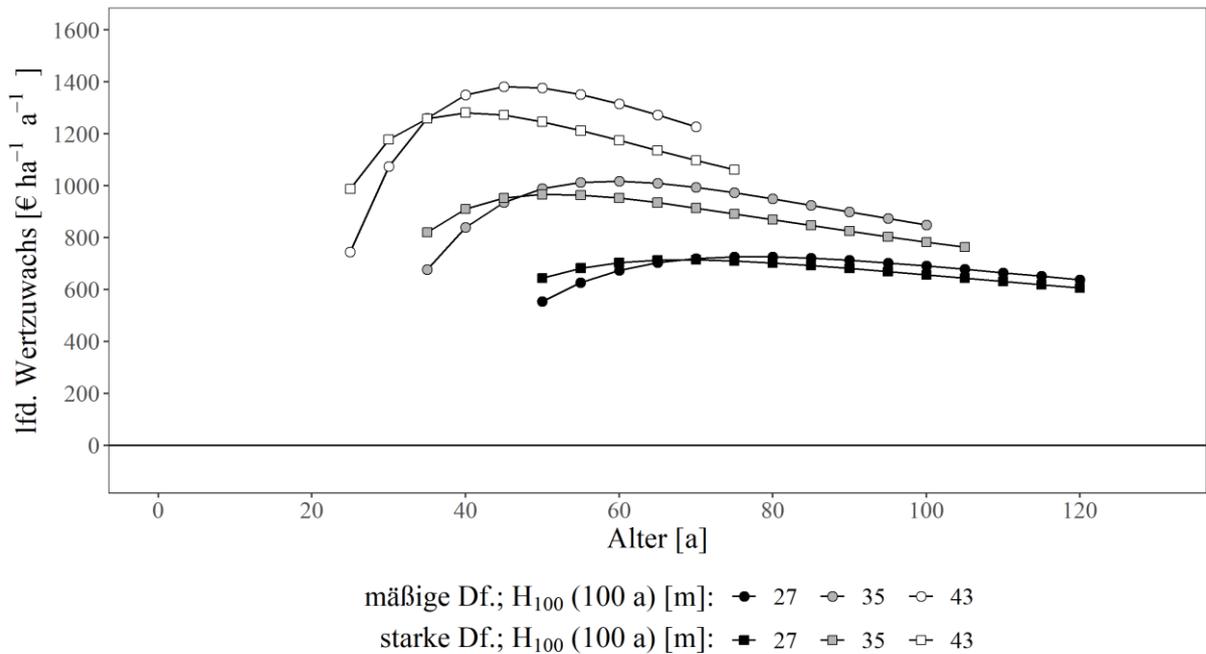


Abbildung 52: Laufender Bestandeswertzuwachs über dem Alter; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte getrennt nach Behandlungsvarianten gemäß dyn-ET (unveröff.).

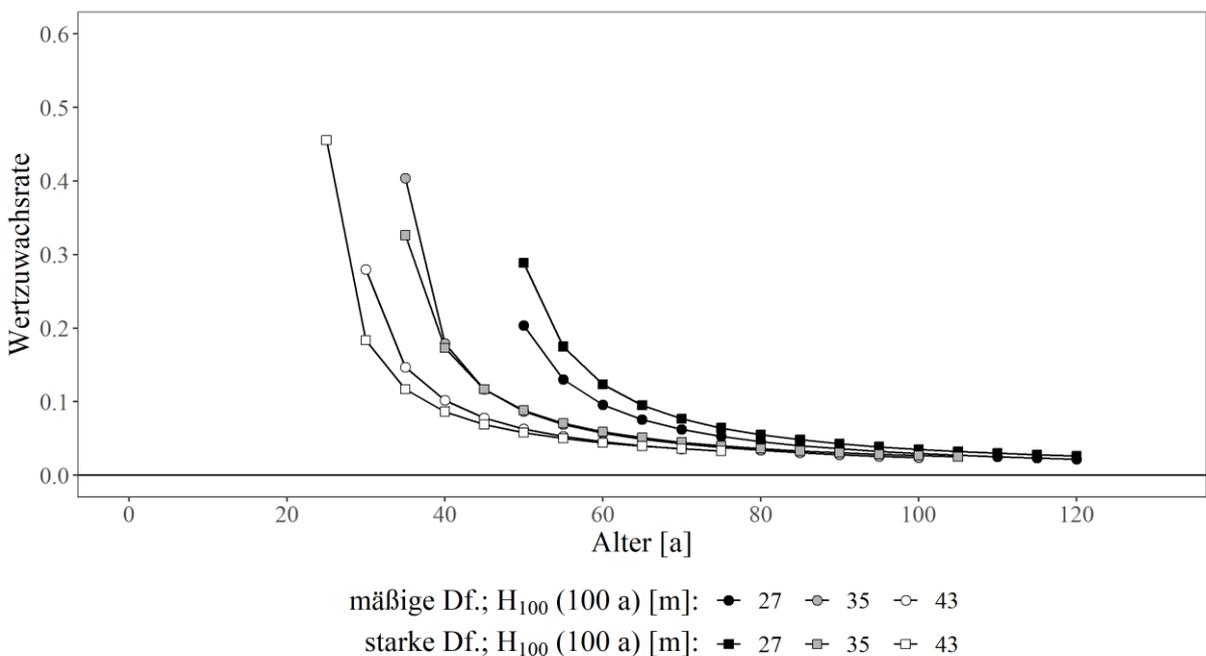


Abbildung 53: Wertzuwachsrate über dem Alter; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte getrennt nach Behandlungsvarianten gemäß dyn-ET (unveröff.).

Bei der Analyse der Wertzuwachsrate kehren sich die Verhältnisse zwischen den Behandlungsvarianten im Vergleich zu den Volumenzuwachsraten teilweise um. Während die Bestandesvolumenzuwächse bei starker Hochdurchforstung in Relation zum Vorrat stets höher als bei mäßiger Hochdurchforstung sind, liegen die Wertzuwachsrate bei mittlerer und hoher Oberhöhenbonität nun unterhalb der mäßigen Hochdurchforstung (Abbildung 53) – im gleichen Alter liegen die Abtriebswerte der mäßigen Hochdurchforstung dort also in Relation zu den Bestandeswertzuwächsen niedriger als bei starker Hochdurchforstung.

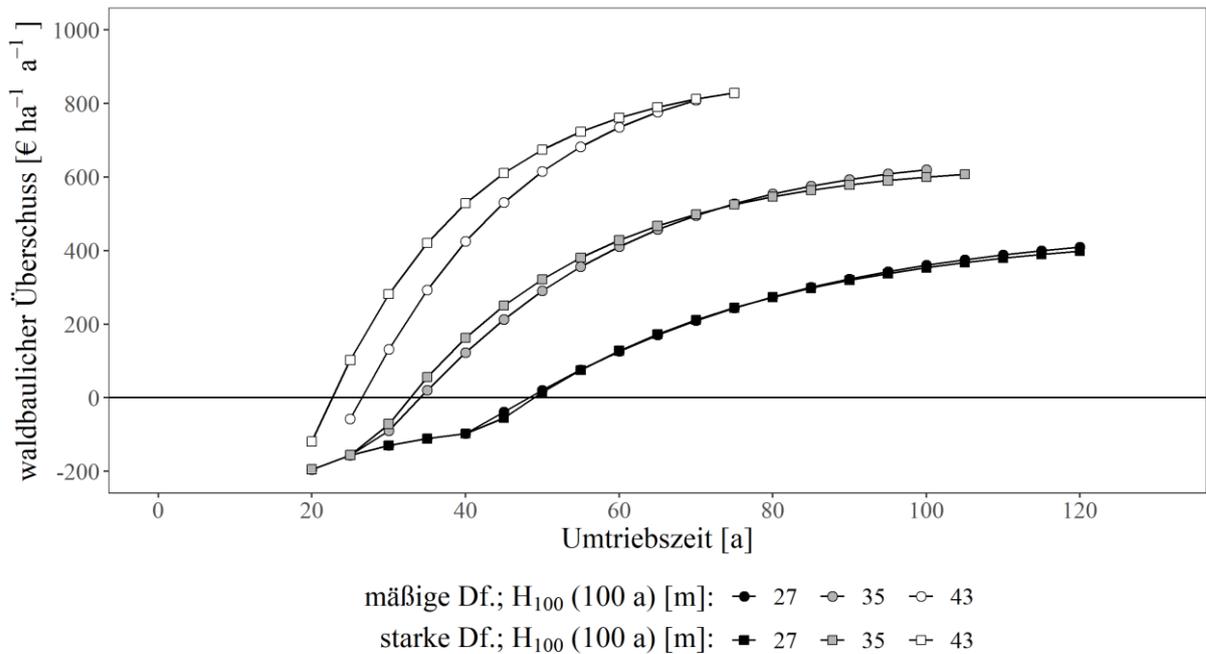


Abbildung 54: Durchschnittlicher waldbaulicher Überschuss der forstlichen Produktion über der Umtriebszeit; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte getrennt nach Behandlungsvarianten gemäß dyn-ET (unveröff.).

Der durchschnittliche waldbauliche Überschuss der forstlichen Produktion unterstreicht das bereits im Gesamterleistungs- und Wertzuwachsvergleich erkannte Muster (Abbildung). Deutlich vorteilhaft ist die starke Hochdurchforstung allerdings nur bei der höchsten Oberhöhenbonität. Bei der Brutto-Bodenrente profitiert die starke Hochdurchforstung aufgrund der höheren Vornutzungswerte in niedrigen Bestandesaltern nochmal mehr vom Zinseffekt – die Brutto-Bodenrente liegt bei starker Hochdurchforstung und einer Umtriebszeit von 80 a um 4 % höher als bei mäßiger Hochdurchforstung (Tabelle 21 und Abbildung 55).

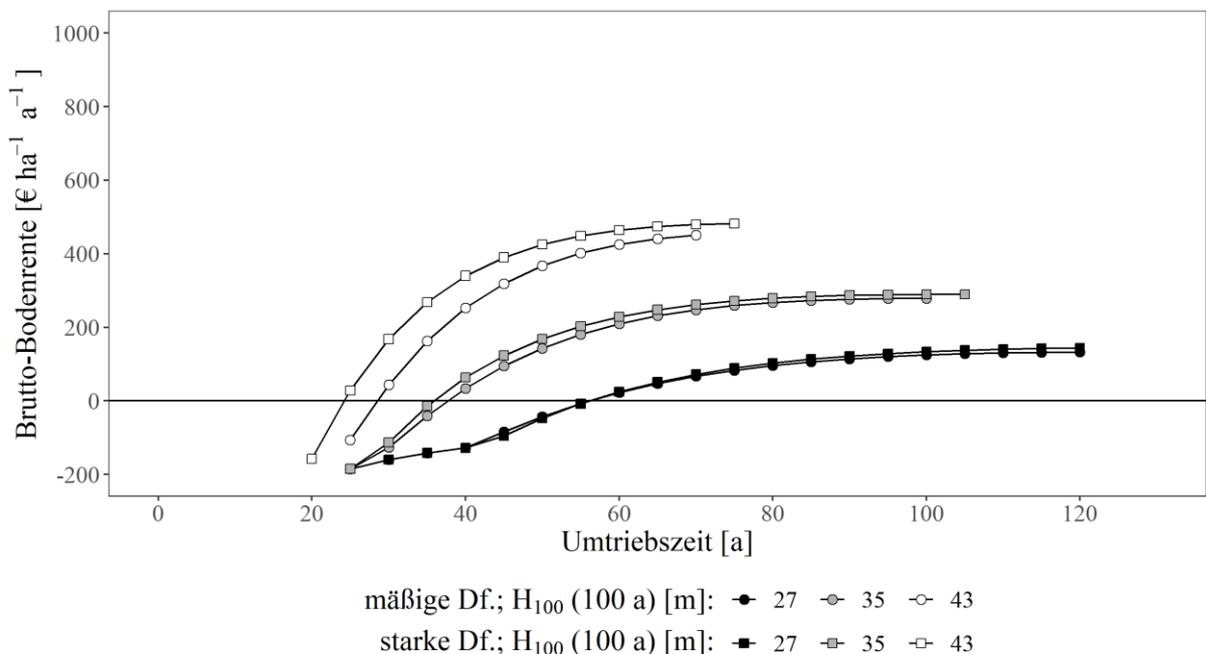


Abbildung 55: Brutto-Bodenrente ( $r=1,5$  %) über der Umtriebszeit; ausgewählte Oberhöhenbonitäten der Baumart Fichte getrennt nach Behandlungsvarianten gemäß dyn-ET (unveröff.).

### 2.3.2 Kritische Methoden- und Modellwürdigung

Die Analysen beziehen lediglich eine Auswahl der innerhalb des dyn-ET-Projekts zur Verfügung stehenden ertragskundlichen Daten mit ein. Die Auswahl erfolgte dabei mit starkem Fokus auf die ökonomischen Unterschiede zu etablierten Ertragstafelwerken sowie den ökonomisch relevanten Unterschieden der waldbaulichen Behandlungsvarianten.

Die getätigten Analysen in Abschnitt 0 beziehen sich ausschließlich auf die gewinnorientierte Rohholzerzeugung und vernachlässigen somit sämtliche anderen Funktionen und Leistungen des Ökosystems Wald (vgl. z. B. Samuelson 1976 und MEA 2005, S. 26 ff.). Die Auswirkungen der waldbaulichen Behandlungsvarianten auf andere Leistungen abseits des Holzertrags (z. B. Biodiversität, Emissionsschutz oder Trinkwasserbereitstellung) werden nicht berücksichtigt.

Die verwendeten Eingangsdaten für die ökonomische Bewertung spiegeln mit mittleren, überwiegend am hessischen Staatswald orientierten, Werten der Jahre 2013 bis 2017 realitätsnahe, baumartenspezifische Verhältnisse wider. Auch dabei geht es weniger um die absolute Höhe der Bewertungsergebnisse, als um die Wertrelationen zwischen den waldbaulichen Behandlungsvarianten. Die zur Funktionalisierung verwendete Chapman-Richards-Funktion ist geeignet, die nichtlinearen, dimensionsabhängigen Wertentwicklungen der Baumarten Buche und Fichte auf Basis der gewählten Eingangsdaten abzubilden. Bei veränderten Eingangsdaten und für jede andere Baumart muss die Eignung der Funktion sowie die Güte der Funktionalisierung, trotz der automatisierten Parametrisierung im Bewertungsmodell, stets aufs Neue überprüft werden – eine grafische Analyse, wie in Abbildung , wird dazu in der Regel ausreichen. Die aus den verwendeten Eingangsdaten in Verbindung mit den Ertragstafeldaten resultierenden immer weiter steigenden, jährlichen Erfolgsgrößen stehen teilweise im Widerspruch zu Analysen von z. B. Bodelschwingh (2018, S. 122) oder Möhring (2010). Tests mit im hohen Alter deutlich absinkenden DB-Funktionen ergaben innerhalb der Modellgrenzen dennoch keine Kulminationspunkte der jährlichen Erfolgsgrößen, weshalb auf die Integration von wertmindernden Effekten (z. B. Rotkernbildung bei der Buche) verzichtet wurde.

Mit der Verwendung eines einheitlichen Kalkulationszinssatzes ( $r = 1,5\%$ ) wird ein vollkommener Kapitalmarkt und damit u. a. die unbegrenzte Möglichkeit zur Kapitalaufnahme und -anlage zu einem einheitlichen Zinssatz sowie rationales Entscheiden auf Grundlage vollständiger Informationen unterstellt (vgl. Samuelson 1976; Johansson und Löfgren 1985, S. 74; Wippermann 2005, S. 28 f.; Hering 2017, S. 33 ff.).

### Literaturverzeichnis

- Assmann, Ernst (1961): Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. München: BLV Verlagsgesellschaft.
- Assmann, Ernst; Franz, Friedrich (1963): Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. Autoren-Referat: Institut für Ertragskunde der Forstlichen Versuchsanstalt München.
- Bachmann, Peter (1990): Forsteinrichtung als Mittel der Betriebsführung. In: *Schweiz. Z. Forstwes.* 141 (6), S. 415–430.
- Baur, Franz von (1876): Die Fichte in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form. Berlin.
- Baur, Franz von (1881): Die Rotbuche in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form. Berlin.
- Bergel, Dieter (1985): Douglasien-Ertragstafel für Nordwestdeutschland. Göttingen: Nieders. Forstl. Versuchsanst., Abt. Waldwachstum.
- Bitterlich, Walter (1949): Die Winkelzählprobe. Dissertation, Wien.
- Blume (1949): Taschenhandbuch der Forstwirtschaft. Hannover.
- Böckmann, Thomas (2016): Warum sind Betriebsinventuren für die forstliche Praxis wichtig? In: *Forstarchiv* 87, S. 31–37.
- Bodelschwingh, Hilmar von (2018): Ökonomische Potentiale von Waldbeständen. Konzeption und Abschätzung im Rahmen einer Fallstudie in hessischen Staatswaldflächen. Bad Orb: J.D. Sauerländer's Verlag (Schriften zur Forst- und Umweltökonomie, 47).
- Bonnemann, Alfred (1939): Der gleichaltrige Mischbestand von Kiefer und Buche. In: *Mitteilungen aus der Forstwirtschaft und Forstwissenschaft* (5), S. 439–483.

- Bonnemann, Alfred (1956): Eichen-Buchen-Mischbestände. In: *Allg. Forst- u. J.-Ztg. (Allgemeine Forst- und Jagdzeitung)* 127, S. 118–126.
- Bradley, R. T.; Christie, J. M.; Johnston, D. R. (1966): Forest management tabels. London (Forestry Commission booklet/Großbritannien /Forestry Commission).
- Bruce, David; DeMars, Donald J.; Reukema, Donald L. (1977): Douglas-fir Managed Yield Simulator: DFIT User's Guide. USDA Forest and Range Exp Station. Portland (General Technical Report PNW-57).
- Carlowitz, Hanns Carl von (1713; 2009): *Sylvicultura Oeconomica* oder haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. Reprint der zweiten Auflage 1732. Leipzig: Verlag Kessel.
- Cotta, Heinrich (1821): *Hülftafeln für Forstwirthe und Forsttaxatoren*. Dresden.
- Curtis, R. O.; Clendenen, G. W.; Demars, D. J. (1981): A new stand simulator for coast Douglas-fir: DFSIM user's guide. USDA Forest and Range Exp Station. Portland (General Technical Report PNW-128).
- Curtis, Robert O. (1982): A Simple Index of Stand Density for Douglas-fir. In: *for sci* 28 (1), S. 92–94. DOI: 10.1093/forestscience/28.1.92.
- dyn-ET (unveröff.): Neue Generation dynamischer Ertragstafeln: Vorläufige Projektdaten der Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) für die Baumarten Buche und Fichte. Göttingen.
- Englert, Hermann; Rosenkranz, Lydia; Seintsch, Björn (2018): Abschätzung des nicht verwerteten Derbholzes. In: *AFZ-DerWald* (23), S. 14–16.
- Erteld, Werner (1951): *Die Robinie und ihr Holz*. Berlin: Deutscher Bauernverlag.
- Ertle, Christoph; Knoche, Dirk; Wenk, Günter (2012): *Ertragstafel der Gemeinen Kiefer (Pinus sylvestris L.) für Kippenstandorte des Lausitzer Braunkohlenreviers*. 1. Aufl. Finsterwalde: Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften (Schriftenreihe des Forschungsinstituts für Bergbaufolgelandschaften).
- Fibich, Jonathan (2019): *Vergleich verschiedener Fichtenertragstafeln anhand ertragskundlicher und ökonomischer Kenngrößen*. Bachelorarbeit. Georg-August-Universität, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Abteilung Forstökonomie, Göttingen.
- Franz, Friedrich (1968): *Das EDV-Programm STAOET - zur Herleitung mehrgliedriger Standort-Leistungstafeln*. Unveröffentlichtes Manuskript. München.
- Franz, Friedrich; Utschig, Heinz (Hg.) (1990): *Ernst Assmanns Wirken in München. Ein Rückblick zu seinem zehnten Todestag. Gedenksymposium anlässlich des zehnten Todestages von Professor Ernst Assmann*. München. Lehrstuhl für Wachstumskunde der Technischen Universität München.
- Fuchs, Alfred; Kennel, Eckhard (1994): Erste Wiederholungsaufnahme einer permanenten Betriebsinventur im bayerischen Staatswald. In: *Forstw. Cbl.* 113, S. 224–235.
- Gadow, Klaus von (2003): *Waldstruktur und Waldwachstum*. Beilage zur Vorlesung im Wintersemester 2003/2004. Universität Göttingen, zuletzt geprüft am 18.10.2018.
- Gadow, Klaus von (2005): *Forsteinrichtung. Analyse und Entwurf der Waldentwicklung*. Göttingen: Universitätsdrucke Göttingen, zuletzt geprüft am 22.05.2018.
- Ganghofer, August von (Hg.) (1881): *Das Forstliche Versuchswesen*. Augsburg: Schmid'sche Buchhandlung.
- Gehrhardt, Ernst (1909): *Ueber Bestandes-Wachstumsgesetze und ihre Anwendung zur Aufstellung von Ertragstafeln*. In: *Allg. Forst- u. J.-Ztg. (Allgemeine Forst- und Jagdzeitung)* (85), S. 117–128.
- Gehrhardt, Ernst (1923): *Ertragstafeln für Eiche, Buche, Tanne, Fichte und Kiefer*. Berlin: Springer.
- Gehrhardt, Ernst (1930): *Ertragstafeln für reine und gleichartige Hochwaldbestände von Eiche, Buche, Tanne, Fichte, Kiefer, grüner Douglasie und Lärche*. Berlin: Springer-Verlag GmbH.
- Gerold, Denie; Gerold, Dorothea (2013): *Ertragstafeln und/oder Wachstumsmodelle. Chancen und Risiken für den Forstsachverständigen*. In: *Wertermittlungsforum* (3), 90-101.
- Gerst, Johannes (2015): *Der Grenzzins als Entscheidungskriterium in der Forstwirtschaft. Methodisches Konzept und empirische Evidenz*. Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2015. Bad Orb: J.D. Sauerländer's Verlag (Schriften zur Forst- und Umweltökonomie, 41).

- Groß, Volker von (2019): Auswirkungen der Anwendung einer neuen Generation forstlicher Ertragstafeln auf betriebliche Planungs- und Entscheidungsgrößen. Masterarbeit. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen. Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie.
- Guttenberg, Adolf Ritter von (1915): Wachstum und Ertrag der Fichte im Hochgebirge. Wien, Leipzig: Deuticke.
- Hartig, Theodor (1847): Vergleichende Untersuchungen über den Ertrag der Rotbuche im Hoch- und Pflanz-Walde, im Mittel- und Niederwald-Betriebe. nebst Anleit. z. vergleichenden Ertragsforschungen. Berlin: Verlag von Albert Förstner.
- Hasel, Karl; Schwartz, Ekkehard (2006): Forstgeschichte. Ein Grundriß für Studium und Praxis. 3., erw. und verb. Aufl. Remagen: Kessel.
- Hering, Thomas (2017): Investitionstheorie. 5., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter (Lehr- und Handbücher der Wirtschaftswissenschaft).
- HMULF (2002): Hessische Anweisung für Forsteinrichtungsarbeiten, HAFEA, vom 21.08.2002. In: Staatsanzeiger für das Land Hessen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten).
- Hoyer, Gerald E. (1975): Measuring and interpreting Douglas-fir management practices. State of Washington, Dept. of Natural Resources. Olympia.
- Hradetzky, Joachim (1972): Modell eines integrierten Ertragstafel-Systems in modularer Form. Doktorarbeit. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.
- Johansson, Per-Olov; Löfgren, Karl-Gustaf (1985): The Economics of Forestry and Natural Resources. Oxford: Basil Blackwell.
- Jüttner, Otto (1955): Ertragstafel für die Baumart Eiche (mäßige und starke Durchforstung). In: Schober, R. (Hg.): Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 4. Aufl. Frankfurt am Main: Sauerländer 1995.
- Kahn, Markus; Pretzsch, Hans (1997): Das Wachstumsmodell SILVA - Parametrisierung der Version 2.1 für Rein- und Mischbestände aus Fichte und Buche. In: *Allg. Forst- u. J.-Ztg. (Allgemeine Forst- und Jagdzeitung)* 168 (6-7), S. 115–123, zuletzt geprüft am 08.01.2019.
- Kennel, R. (1973): Die Bestimmung des Ertragsniveaus bei der Buche. In: *Forstwiss. Centralbl.* 92 (1), S. 226–234. DOI: 10.1007/BF02736053.
- Kern, Karl Guenter (1958): Untersuchungen über den Wachstumsgang der Kiefer im Buntsandsteingebiet des Pfälzer Waldes: Ein Vergleich mit d. Wiedemann'schen Ertragstafel 1948 - Mäßige Durchforstung (Schriftenreihe der Bad.-Württ. Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt, Abt. Ertragskunde / Baden-Württembergische Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt).
- Kohnle, Ulrich; Teuffel, Konstantin von (2020): Probleme mit zu viel Geld, zu wertvollen Beständen? In: *AFZ-DerWald* (3), S. 28–34.
- Koster, Roman (2017): Implementierung von Überlebensrisiken in die Bestandesbewertung und Berechnung von Alterswertfaktoren. Masterarbeit. Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Göttingen.
- Koster, Roman (2020): Ökonomische Analyse forstlicher Bestandesbehandlung. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, unveröffentlicht. Abteilung Forstökonomie.
- Kramer, Horst; Akça, Alparslan (2008): Leitfaden zur Waldmesslehre. 5., überarb. Aufl. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag.
- Kurth, Horst; Gerold, Denie; Ulbricht, Rolf (1994): Forsteinrichtung. Nachhaltige Regelung des Waldes. Berlin: Dt. Landwirtschaftsverl.
- Lembcke, Gunter; Knapp, Eugen; Dittmar, Otto (1975): Die neue DDR-Kiefern-ertragstafel. In: *Beiträge für die Forstwirtschaft* 15 (2), S. 55–64.
- Mantel, Wilhelm (1982): Waldbewertung. Einführung und Anleitung. 6., neubearb. u. erw. Aufl. München: BLV Verlagsgesellschaft.
- MEA (2005): Ecosystems and Human Well-being. Volume 1: Current State & Trends. Hg. v. Millennium Ecosystem Assessment. Washington (Global Assessment Reports). Online verfügbar unter <https://www.millenniumassessment.org/en/Global.html>, zuletzt geprüft am 25.03.2020.

- Möhring, Bernhard (1994): Über ökonomische Kalküle für forstliche Nutzungsentscheidungen. Ein Beitrag zur Förderung des entscheidungsorientierten Ansatzes der forstlichen Betriebswirtschaftslehre. Frankfurt a. M.: J.D. Sauerländer's Verlag (Schriften zur Forstökonomie, 7).
- Möhring, Bernhard (2001): Nachhaltige Forstwirtschaft und Rentabilitätsrechnung – ein Widerspruch? In: *Allg. Forst- u. J.-Ztg. (Allgemeine Forst- und Jagdzeitung)* 172 (04), S. 61–66.
- Möhring, Bernhard (2010): Optimierung forstlicher Produktion unter Beachtung von finanziellen Restriktionen. In: *Schweiz. Z. Forstwes.* 161 (9), S. 346–354. DOI: 10.3188/szf.2010.0346.
- Möhring, Bernhard (2014): Gibt es einen 'richtigen' Zinssatz bei der forstlichen Wertermittlung? In: *Wertermittlungsforum* (32), S. 72–78.
- Möhring, Bernhard; Paul, Carola; Bodelschwingh, Hilmar von; Dög, Markus; Gerst, Johannes; Kleinschmit, Chrisitan et al. (2018): Arbeitsmaterialien zur Betriebswirtschaftlichen Kalkulation. Hg. v. Abteilung für Forstökonomie und Forsteinrichtung des Burckhardt-Instituts. Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen.
- Möhring, Bernhard; Rüping, Ursula (2006): Bewertungskonzept für forstliche Nutzungsbeschränkungen. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag (Schriften zur Forstökonomie, 32).
- Möhring, Bernhard; Rüping, Ursula; Leefken, Georg; Ziegeler, M. (2006): Die Annuität - ein 'missing link' der Forstökonomie? In: *Allg. Forst- u. J.-Ztg. (Allgemeine Forst- und Jagdzeitung)* 177 (2), S. 21–29.
- Nagel, Jürgen; Schmidt, Matthias (2006): The silvicultural decision support system BWINPro. In: *Sustainable Forest Management: Springer-Verlag GmbH*, S. 59–63.
- Nash, John C. (2016): Functions for Nonlinear Least Squares Solutions [R package nlrm]. Version 2016.3.2: R Foundation for Statistical Computing.
- NLF (2014): Tabellen, Vordrucke und Hinweise zu den Niedersächsischen Waldbewertungsrichtlinien (WBR 2014). Niedersächsische Landesforsten. Online verfügbar unter [www.landesforsten.de](http://www.landesforsten.de), zuletzt geprüft am 12.04.2020.
- NMELV (2020): Waldbewertungsrichtlinien (WBR 2020). Anlage zum Runderlass des ML vom 4.12.2019 – Nds. MBl. Nr. 48/2019, S. 1774.
- Nothdurft, Arne; Borchers, Jens; Niggemeyer, Peter; Saborowski, Joachim; Kändler, Gerald (2008): Erste Folgeaufnahme einer Betriebsinventur als zweiphasige Stichprobe zur Stratifizierung. In: *Allg. Forst- u. J.-Ztg. (Allgemeine Forst- und Jagdzeitung)* 180 (7/8), S. 133–140.
- Offer, Armin; Staupendahl, Kai (2009): Neue Bestandessortentafeln für die Waldbewertung und ihr Einsatz in der Bewertungspraxis. In: *Forst und Holz* 64 (5), S. 16–25.
- Offer, Armin; Staupendahl, Kai (2018): Holzwerbungskosten- und Bestandessortentafeln. Kassel: HessenForst (Hrsg.).
- Paulsen, Johann Christian (1795): Praktische Anweisung zum Forstwesen. Detmold.
- Pretzsch, Hans (2005): Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence from long-term experimental plots. In: *Eur. J. For. Res.* 124 (3), S. 193–205. DOI: 10.1007/s10342-005-0068-4.
- Pretzsch, Hans (2009): Forest dynamics, growth and yield. From Measurement to Model. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH.
- Pretzsch, Hans (2016): Korrekturfaktoren für Umwelt- und Mischungseffekte bei der Anwendung von Ertragstabellen auf gleichaltrige Rein- und Mischbestände. In: *AFZ-DerWald* 71 (14), S. 47–50.
- Pretzsch, Hans; Bielak, Kamil; Block, Joachim; Bruchwald, Arkadiusz; Dieler, Jochen; Ehrhart, Hans-Peter et al. (2013a): Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. In: *European Journal of Forest Research* 132 (2), S. 263–280. DOI: 10.1007/s10342-012-0673-y.
- Pretzsch, Hans; Bielak, Kamil; Bruchwald, Arkadiusz; Dieler, Jochen; Dudzińska, M.; Ehrhart, Hans-Peter et al. (2013b): Mischung und Produktivität von Waldbeständen. Ergebnisse langfristiger ertragskundlicher Versuche. (Species mixing and productivity of forests. Results from long-term experiment). In: *Allg. Forst- u. J.-Ztg. (Allgemeine Forst- und Jagdzeitung)* 184 (7-8), S. 177–195.

- Pretzsch, Hans; Block, Joachim; Dieler, Jochen; Dong, P. H.; Kohnle, Ulrich; Nagel, Jürgen et al. (2010): Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. In: *Ann. For. Sci.* 67 (7), S. 712. DOI: 10.1051/forest/2010037.
- Pretzsch, Hans; del Río, M.; Ammer, Christian; Avdagic, A.; Barbeito, Ignacio; Bielak, Kamil et al. (2015): Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe. In: *European Journal of Forest Research* 134 (5), S. 927–947. DOI: 10.1007/s10342-015-0900-4.
- Prodan, Michail (1965): Holzmeßlehre. Frankfurt am Main: Sauerländer's Verlag.
- Sächsische Hans-Carl-von-Carlowitz-Gesellschaft e. V. (Hg.) (2013): Die Erfindung der Nachhaltigkeit. Leben, Werk und Wirkung des Hans Carl von Carlowitz. München: oekom-Verl.
- Samuelson, Paul A. (1976): Economics of Forestry in an Evolving Society. In: *Economic Inquiry* 14 (4), S. 466–492. DOI: 10.1111/j.1465-7295.1976.tb00437.x.
- Schade, V. (2019): HMI - Marktbilanz Forst und Holz 2019 Deutschland. Hg. v. HMI-Holzmarktinfor. Bonn.
- Schmidt, Anton (1971): Wachstum und Ertrag der Kiefer auf wirtschaftlich wichtigen Standorteinheiten der Oberpfalz: mit Leistungstafel. München: Forstl. Forschungsanst. (Forschungsberichte / Forstliche Forschungsanstalt).
- Schober, Reinhard (1952): Einzelplanung und Gesamtplanung der Forsteinrichtung und Betriebsvollzug - Einheit oder Gegensatz, Theorie und Wirklichkeit. In: Vorträge der Hochschulwoche Hann. Münden 1951. Bd. 2 Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen, Hg. R. Schober. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag, S. 51-54.
- Schober, Reinhard (1967): Ertragstafel für die Baumart Buche (mäßige und starke Durchforstung). In: Schober, R. (Hg.): Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 4. Aufl., Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's Verlag, 1995.
- Schober, Reinhard (1975): Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. Neubearb. Frankfurt a. M.: J.D. Sauerländer's Verlag.
- Schober, Reinhard (1995): Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 4. Aufl. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag.
- Schwappach, Adam (1902): Wachstum und Ertrag normaler Fichtenbestände in Preussen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses verschiedener wirtschaftlicher Behandlungsweisen. In: *Mitt. Forstl. Versuchswesens Preussens*, S. 44–119.
- Schwappach, Adam (1903): Leitfaden der Holzmeßkunde. 2. Aufl.: Verlag Julius Springer.
- Schwappach, Adam (1912): Ertragstafeln der wichtigsten Holzarten : in tabellarischer und graphischer Form. Neudamm: Neumann.
- Speidel, Gerhard (1972): Planung im Forstbetrieb: Paul Parey Zeitschriftenverlag GmbH.
- Spellmann, Hermann; Möhring, Bernhard; Nagel, Jürgen; Nagel, Ralf-Volker; Albert, Matthias (unveröff.): Projektantrag: Neue Generation dynamischer Ertragstafeln. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA); Abteilung für Forstökonomie der Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen, zuletzt geprüft am 09.12.2019.
- SVLFG (2018): Aktualisierung des Beitragsmaßstabs für die Unfallversicherung in der Landwirtschaft, im Forst sowie im Gartenbau. - Gutachterliche Stellungnahme -. Unter Mitarbeit von E. Prof.Dr. Bahrs. Hg. v. Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (SVLFG). Online verfügbar unter [http://www.svlfg.de/50-vmb/vmb02\\_neu/index.html](http://www.svlfg.de/50-vmb/vmb02_neu/index.html), zuletzt geprüft am 15.03.2019.
- Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten (1873): Anleitung für Durchforstungsversuche. In: Ganghofer, August von (1881) *Das Forstliche Versuchswesen*. Augsburg: Schmid'sche Buchhandlung, S. 247–253.
- Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten (1902): Beratungen der vom Vereine Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten eingesetzten Kommission zur Feststellung des neuen Arbeitsplanes für Durchforstungs- und Lichtungsversuche. In: *Allg. Forst- u. J.-Ztg. (Allgemeine Forst- und Jagdzeitung)* 78, S. 180–184, zuletzt geprüft am 11.07.2018.
- Weise, Wilhelm (1880): Ertragstafeln für die Kiefer in Deutschland. Berlin: Springer-Verlag GmbH.
- Wenk, Günter; Römisch, Klaus; Gerold, Dorothea (1984): DDR-Fichtenertragstafel.
- Wiedemann, Eilhard (1931): Ertragstafel für die Baumart Buche. In: Wiedemann (Hg.): Ertragstafeln für Buche 1931, Fichte (1936), Douglasie (1937). Preußische Versuchsanstalt für Waldwirtschaft, Hannover: Schaper 1938.

Wiedemann, Eilhard (1932): Die Rotbuche 1931. In: *Mitteilungen aus der Forstwirtschaft und Forstwissenschaft* 3 (1), S. 189.

Wiedemann, Eilhard (1936/42): Ertragstafel für die Baumart Fichte (mäßige, starke und gestaffelte Durchforstung). In: Schober, R. (Hg.): Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 4. Aufl., Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's Verlag, 1995.

Wiedemann, Eilhard (1942): Der gleichaltrige Buchen-Fichten-Mischbestand. In: *Mitteilungen aus der Forstwirtschaft und Forstwissenschaft* 13, S. 1–88.

Wiedemann, Eilhard (1943): Ertragstafel für die Baumart Kiefer (mäßige, starke und gestaffelte Durchforstung). In: Schober, R. (Hg.): Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 4. Aufl. Frankfurt am Main: Sauerländer 1995.

Wiedemann, Eilhard (1949): Ertragstafeln der wichtigen Holzarten bei verschiedener Durchforstung. Hannover: Verlag M & H Schaper.

Wippermann, C. (2005): Ökonomische Optimierung von Durchforstungen und Umtriebszeit. Eine modellgestützte Analyse am Beispiel der Kiefer. Zugl.:Göttingen, Univ., Diss., 2005. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag (Schriften zur Forstökonomie, 30).

## 2. Verwertung

Die neuen Ertragstafeln bieten der forstlichen Praxis ein gegenüber den aktuell genutzten Ertragstafeln deutlich verbessertes Planungsinstrument für die Produktions- und Ertragsregelung, die Waldbewertung und die Ermittlung steuerlicher Nutzungssätze. Die neuen Ertragstafeln bilden das aktuelle Zuwachsniveau ab und ermöglichen somit realistische Einschätzungen der Waldentwicklung für die nächsten 10 bis 20 Jahre. Ebenso bieten die neuen Ertragstafeln eine orientierende Norm für die Waldbewirtschaftung, weil sie das von der NW-FVA empfohlene Behandlungskonzept einer gestaffelten Durchforstung abbilden.

Die Veröffentlichung der neuen Ertragstafeln in Buchform, digital sowie als App ermöglicht einen einfachen und kostenlosen Zugang für alle interessierten Nutzer.

Die neuen Bestandessortentafeln sollen nach weiterer Entwicklung ebenfalls zur Verfügung gestellt werden. Auch sie bieten gegenüber den herkömmlichen Tafeln Informationsvorteile.

## 3. Erkenntnisse von Dritten

Die Stieleichen-Ertragstafel von Röhe et al. (2019) unterstellt ebenfalls eine waldbauliche Idealvorstellung. Hergeleitet wurde sie anhand von Daten aus Eichen-Versuchsflächen. Sie folgt also dem klassischen Konzept der dritten Generation von Ertragstafeln, indem Beobachtungen mittels biometrisch-statistischer Methoden in Ertragstafelverläufe überführt werden. Der in diesem Projekt gewählte Ansatz erweitert die Beobachtungsbasis, indem sie als Ausgangsdaten für Simulationen mit TreeGrOSS verwendet werden. Somit können idealtypische Behandlungen abgebildet werden und die Grundlage für die Ausgleichsfunktionen ist deutlich aufgeweitet.

## 4. Veröffentlichungen

### Erfolgte Veröffentlichungen:

Albert, M., Nagel, J., Nagel, R.-V. und Spellmann, H. 2019: Eine neue Generation dynamischer Ertragstafeln – erste Ergebnisse für die Baumart Buche. Tagungsband DVFFA, Sektion Ertragskunde.

Fibich, J. 2021: Vergleich des neuartigen Prognoseansatzes der dyn-ET-Sortentafeln mit einem durchmesserabhängigen Verfahren. Masterarbeit an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Universität Göttingen. 48 S.

Kistemaker, A., Sennhenn-Reulen, H., Albert, M., Nagel, J., 2018. Zum Phänomen des Umsetzens – ein altes Thema neu aufgegriffen. Tagungsband DVFFA, Sektion Ertragskunde.

Koster, R. 2020: Ökonomische Analyse forstlicher Bestandesbehandlung. Dissertation. Georg-August Universität Göttingen, Göttingen. Abteilung Forstökonomie

### geplante Veröffentlichungen:

Albert et al.: Eine neue Generation dynamischer Ertragstafeln. AFZ-Der Wald

Albert et al.: Konstruktionsprinzip für eine vierte Generation von Ertragstafeln. AFJZ

NW-FVA: Neue Ertragstafeln für fünf Hauptbaumarten (Tafelsammlung). Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt.

Koster et al.: Stand density management diagrams.

Stockmann et al.: Specification of individual growth effects in Norway spruce. Forests.

Stockmann et al.: Individual growth effects of Norway spruce and European beech – consequences for growth modelling.