

Konstruktionsprinzip für eine neue Generation von Ertragstafeln erläutert am Beispiel der Baumart Buche^{*)}

Aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Göttingen

(Mit 7 Abbildungen und 5 Tabellen)

M. ALBERT[✉], J. NAGEL, M. SCHMIDT, R.-V. NAGEL und H. SPELLMANN

(Angenommen September 2022)

DOI-Nummer: 10.23765/afjz0002084

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Ertragstafeln; aktuelles Zuwachsniveau; gestaffelte Hochdurchforstung; Waldwachstum; Forsteinrichtung.

Yield tables; current increment level; graduated thinning from above; forest growth; forest management.

1. EINLEITUNG

Laut den Ergebnissen der dritten Bundeswaldinventur stocken derzeit noch auf 24% der Waldfläche in Deutschland Reinbestände (BMEL, 2016). Ferner werden 32% der Wälder als einschichtig klassifiziert. Diese Statistik und der Sachverhalt, dass die Baumarten in Mischbeständen häufig horstweise oder kleinflächig gemischt sind, untermauert die bestehende Relevanz von klassischen Reinbestands-Ertragstafeln für die Forstwirtschaft. Sie dienen weiterhin als Orientierung und Referenz bei der Planung, Bewirtschaftung und Bewertung von Wäldern, obwohl die aktuellen Waldbauprogramme Mischwaldmehrung und Strukturaneicherung als mittel- bis langfristige Waldentwicklungsziele angeben (vgl. z. B. Nds. Min. f. Ernährung, Landwirtschaft u. Verbraucherschutz, 2019).

Die ersten Ertragstafeln wurden vor über 200 Jahren aufgestellt (PAULSEN, 1795) und ihre Weiterentwicklungen reichen bis in die Gegenwart (z. B. BÖCKMANN, 1990; LOCKOW, 2003; ECKMÜLLNER und VOSPERNIK, 2005; ECKMÜLLNER, 2009; RÖHE et al., 2019; LOCKOW und NOACK, 2021). In ihrem Aufbau sind sie über die Jahrhunderte mehr oder weniger gleich geblieben. Dies kann als ein Zeichen für ihre Akzeptanz und Nützlichkeit gewertet werden.

Die erste Ertragstafelgeneration, beginnend mit der örtlichen Erfahrungstabelle von PAULSEN (1795), zeichnete sich durch eine sehr geringe Datengrundlage, begrenzte regionale Gültigkeit und geringe Vergleichbarkeit der verschiedenen Tafeln aus. So verwendete beispielsweise COTTA (1821) den Bestandesvorrat als Bonitätsmaßstab, während BAUR (1877) bereits die

Bestandesmittelhöhe in gegebenem Alter als Produktivitätsweiser nutzte. Auf dem Treffen des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten 1874 in Wien wurde durch die Vertreter der forstlichen Versuchsanstalten angeregt, die Datengrundlagen und Konstruktionsmethoden der Ertragstafelaufstellung zu vereinheitlichen (zitiert nach WENK et al., 1990, S. 259) und das Vorhaben im Arbeitsplan für die Aufstellung von Holzertragstafeln niederzuschreiben (GANGHOFER, 1877). Dies führte zur zweiten Generation von Ertragstafeln, zu deren wichtigen Neuerungen auch die Bindung der Tafeln an „normale“ Bestände, also an im Bestandaufbau homogene, ungestörte und nach einer definierten Durchforstungsart behandelte Bestände, zählte. Bekannte Beispiele der zweiten Ertragstafel-Generation sind die Großgebietsertragstafeln von SCHWAPPACH (1912) mit einheitlicher Grundkonzeption und basierend auf den Versuchsflächendaten der Preußischen Forstlichen Versuchsanstalt sowie deren Weiterentwicklungen durch WIEDEMANN (1949) und SCHOBER (1975). Die Verwendung von biometrisch-statistischen Funktionen zur Herleitung der Altersverläufe ertragskundlicher Kenngrößen führte zur dritten Ertragstafelgeneration. Erstmals von GEHRHARDT (1923) angewendet, setzte sich diese Vorgehensweise mit den vorläufigen Fichten-Ertragstafeln von ASSMANN und FRANZ (1963) durch, die auch zur Oberhöhenbonitierung übergingen und Ertragsniveaustufen auswiesen. Ein weiteres Beispiel der dritten Generation ist die DDR-Fichtenertragstafel von WENK et al. (1984), deren Besonderheit die Verwendung von unterschiedlichen Höhenwachstumstypen ist, wodurch die Einordnungsbeziehung Bestandeshöhe in Abhängigkeit vom Alter um ein Wuchssystem erweitert wird.

Allen bisherigen Ertragstafelentwicklungen ist gemein, dass sie direkt auf Beobachtungsdaten von Versuchsflächen und Stammanalysen basieren. Solange man für einen Produktionszeitraum und entsprechend für die Beobachtungsdauer von Versuchsflächen annähernd Standortskonstanz unterstellen konnte, führte die Herleitung der Ertragstafelgrößen aus einem großen Fundus von Versuchsflächenbeobachtungen und ggf. von Stammanalysen zu keinen größeren Verzerrungen, auch wenn diese zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst worden waren. Da sich jedoch die Wachstumsbedingungen durch die Einträge aus der Luft und steigende Kohlendioxidkonzentrationen spätestens seit den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts deutlich ver-

^{*)} Ein umfangreicher Appendix mit detaillierten Modellbeschreibungen der verwendeten biometrisch-statistischen Funktionsgleichungen kann beim Erstautor angefordert werden.

[✉] Korrespondierender Autor: PD Dr. MATTHIAS ALBERT. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abt. Waldwachstum, Grätzelstraße 2, D-37079 Göttingen, Germany.
E-Mail: matthias.albert@nw-fva.de

ändert haben (SPIECKER et al., 1996; BOISVENUE und RUNNING, 2006; PRETZSCH et al., 2014a; SMITH et al., 2015), können insbesondere weit zurückliegende Aufnahmen auf langfristig beobachteten Versuchsflächen heute nur noch eingeschränkt für eine Ertragstafel-erstellung genutzt werden.

Eine Überarbeitung vieler etablierter Ertragstafeln, wie z.B. die in der Sammlung von SCHÖBER (1995), ist daher aufgrund des deutlich gestiegenen Zuwachsniveaus durch veränderte Standortbedingungen und der gewandelten waldbaulichen Begründungs- und Behandlungspraktiken erforderlich. Diese ist jedoch mit dem herkömmlichen Konstruktionsprinzip aufgrund der nur begrenzt nutzbaren Versuchsflächenbeobachtungen, die diese veränderten Bedingungen widerspiegeln, kaum zu realisieren. Das im Folgenden vorgestellte Prinzip zur Erstellung einer neuen, vierten Generation von Ertragstafeln für gleichaltrige, vollbestockte Reinbestände verknüpft deshalb ausgewählte empirische Erhebungen auf Versuchsflächen mit Waldwachstumssimulationen und gewährleistet damit eine Datengrundlage, die das aktuelle Zuwachsniveau widerspiegelt und mit einer gestaffelten Hochdurchforstung ein modernes Bewirtschaftungskonzept abbildet.

Ziel dieser Abhandlung ist es, am Beispiel der Baumart Buche (*Fagus sylvatica*, L.) das Konstruktionsprinzip der vierten Ertragstafelgeneration, die dabei getroffenen Annahmen und Festlegungen, die Anwendungsbereiche und ihre Limitationen vorzustellen. Die neue Buchen-Ertragstafel sowie die auf dem gleichen Konstruktionsprinzip beruhenden Tafeln für die Baumarten Eiche (*Quercus patraea* [Mattuschka] Liebl. resp. *Quercus robur* L.), Fichte (*Picea abies*, [L.] Karst), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*, [Mirb.] Franco) und Kiefer (*Pinus silvestris*, L.) stehen auf der Internetseite der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) zum Herunterladen zur Verfügung (ALBERT et al., 2021).¹⁾ Des Weiteren steht das R Paket „et.nwfv“ mit

den neuen Ertragstafeln zur automatisierten Bonitierung sowie zur Inter- und Extrapolation zur Verfügung (NUSKE et al., 2022).

2. MATERIAL UND METHODEN

Zur Erstellung der vierten Generation von Ertragstafeln werden empirische Messwerte auf langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen dreifach genutzt. Als erstes werden basierend auf Versuchsflächendaten Modellbestände unterschiedlichen Alters erstellt. Diese Modellbestände werden mit Hilfe des einzelbaumbasierenden Waldwachstumssimulators TreeGrOSS (HANSEN und NAGEL, 2014) für 30-jährige Zeitscheiben fortgeschrieben. Dazu werden, zweitens, die Grundflächenzuwachs-funktionen in TreeGrOSS mit Versuchsflächendaten ab dem Aufnahmejahr 1970 parametrisiert, um das gegenwärtige Zuwachsniveau abzubilden (SPRAUER und NAGEL, 2018). Im Rahmen der Wachstumssimulationen wird zudem das Behandlungskonzept einer gestaffelten Hochdurchforstung mit fest definierten Grundflächenhaltungen abgebildet. Die dritte Verwendung empirischer Versuchsflächendaten dient der Ableitung der in bestimmten Entwicklungsphasen angestrebten Grundflächenhaltungen. Die Simulationsdaten werden anschließend mittels biometrisch-statistischer Funktionsgleichungen in stetige Altersverläufe der ertragskundlichen Kenngrößen der Ertragstafeln überführt.

2.1 Datengrundlage

Eine wesentliche Voraussetzung zur Ableitung von Ertragstafeln ist eine möglichst breite Abdeckung des Alters- und Bonitätsspektrums mit Daten der zu bearbeiteten Baumarten. Für die hier vorgestellte neue Buchen-Ertragstafel wurden daher aus den ertragskundlichen Versuchsflächen der NW-FVA die Versuchspartellen von Buchenreinbeständen allen Alters und aller Produktivität ausgewählt, die konsequent hochdurchforstet wurden und somit der abzubildenden waldbaulichen Norm einer gestaffelten Hochdurchforstung (vgl. Kap. 2.2) möglichst nahe kamen. Auf Grundlage dieser Versuchsflächendaten wurden die mit dem Ein-

¹⁾ <https://www.nw-fva.de/unterstuetzen/waldpflege-und-nutzung/neue-ertragstafeln>

Tab. 1

**Datengrundlage für die Erstellung der Buchen-Ertragstafel:
Anzahl der generierten Modellbestände
mit ihren Alters- und Oberhöhenbonitätskennwerten.**

Data base to derive the yield table for beech: number of generated model stands, stand age before simulation and site index.

Anzahl Modellbestände ¹⁾	Alter zu Beginn der Projektion [Jahre]			Oberhöhenbonität H ₁₀₀ [m]		
	Min.	Mittelwert	Max.	5%- Quantil	Mittelwert	95%- Quantil
241 (61)	25	63	110	26,7	33,1	40,4

¹⁾ Die Anzahl ergibt sich aus der in Klammern angegebenen Anzahl der Versuchspartellen multipliziert mit den verwendeten Aufnahmen abzüglich ausgesonderter Startkonstellationen.

The number results from the number of trial stands in parenthesis multiplied by the number of applied inventories minus excluded starting constellations.

zelbaum-Waldwachstumssimulator TreeGrOSS (HANSEN und NAGEL, 2014) fortzuschreibenden Buchen-Modellbestände erzeugt. Die entsprechenden Kennwerte der Modellbestände sind in *Tab. 1* aufgelistet.

Die zur Generierung der Modellbestände empirischen Durchmesserverteilungen wurden auf ihre Eignung, eine gestaffelte Hochdurchforstung widerzuspiegeln, geprüft (vgl. Kap. 2.2). Ungeeignete Parzellenaufnahmen wurden für die Erstellung von Modellbeständen nicht herangezogen. Insgesamt stehen 241 Modellbestände für die Ertragstafelerstellung zur Verfügung, welche auf 61 Versuchspartzellen mit jeweils mehreren Aufnahmen basieren (*Tab. 1*).

Der nach der 30-jährigen Fortschreibung aufgespannte Altersbereich von 25 bis 140 Jahren deckt den Gültigkeitsbereich der erstellten Ertragstafel vom Beginn der Durchforstungseingriffe bis zur einsetzenden End-/Zielstärkennutzung gut ab. Das Bonitätsspektrum der verwendeten Buchen-Versuchsflächen reicht von der -I. bis zur II.5 Ertragsklasse.

2.2 Erstellung der Modellbestände

Aus jeder empirischen Durchmesserverteilung des Oberstandes (Bäume der Kraft'schen Klassen 1 bis 3 laut Aufnahmeanweisung für Versuchsflächen der NW-FVA) der 241 zur Verfügung stehenden Versuchsflächenaufnahmen wurden zufällig Durchmesser gezogen, bis die Zielgrundfläche des unterstellten waldbaulichen Behandlungskonzeptes, definiert über die spezifizierte Grundflächenhaltung einer gestaffelten Hochdurchforstung als Funktion der Oberhöhe (vgl. Kap. 2.4), erreicht war. Da viele der Versuchsflächenparzellen zwar hochdurchforstet, aber in der Eingriffsstärke nicht gestaffelt behandelt worden waren, können mehr oder weniger starke Abweichungen der empirischen Durchmesserverteilungen von den bei durchgehender Anwendung dieses Behandlungskonzeptes zu erwartenden Durchmesserverteilungen auftreten. Um diese möglichen Abweichungen zu überprüfen und auszugleichen, wurden Schätzfunktionen für den Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (D_g) und den 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 behandelten Versuchsflächenparzellen hergeleitet. Sie sind wie folgt formuliert:

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

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

Entsprechend den Funktionen [1.1] und [1.2] wurden anschließend die beobachteten Werte der Versuchsflächenaufnahmen mit den Sollwerten abgeglichen. Traten Differenzen größer 10 cm auf, so wurden die Startkonstellationen als ungeeignet angesehen und aus dem Pool der Modellbestände entfernt. Bei geringeren Differenzen wurde eine Korrektur vorgenommen, indem zuerst die gesamte Durchmesserverteilung um die Differenz zwischen $D_{g_{soll}}$ und $D_{g_{ist}}$ verschoben wurde. In

einem zweiten Schritt wurde dann die Durchmesserverteilung um das Abstandsverhältnis $(D_{100_{soll}} - D_{g_{soll}}) / (D_{100_{ist}} - D_{g_{ist}})$ gestaucht bzw. gestreckt. Diese modifizierten Durchmesserverteilungen dienten anschließend als Grundlage für die oben angeführten Zufallsziehungen von Durchmessern unter Berücksichtigung der Grundflächenhaltungen einer gestaffelten Hochdurchforstung.

Entsprechend der erzeugten Durchmesserverteilungen für die Modellbestände wurden aus den Versuchsflächendaten die dazugehörigen Einzelbaumhöhen über generalisierte Bestandeshöhenkurven ergänzt und weitere für die Wachstumssimulation benötigte Einzelbaumparameter, wie Kronenansatzhöhe und Kronenbreite, über in der Waldwachstumsbibliothek TreeGrOSS (HANSEN und NAGEL, 2014) verfügbare Funktionen geschätzt.

2.3 Zeitscheibensimulation

Als Resultat standen 241 Modellbestände auf Einzelbaumbasis mit einer Bestandesgröße von jeweils 0,2 ha für die Wachstumssimulationen zur Verfügung. Diese Modellbestände wurden entsprechend ihres jeweiligen Bestandesalters t und ihrer generierten Bestandesoberhöhen vor Beginn der Simulation bonitiert (vgl. Kap. 2.5). Ferner wurden regelbasiert Z-Bäume ausgewählt und für die jeweils 30-jährigen Zeitscheiben die Bestandesentwicklung in sechs 5-Jahres-Simulationsschritten mit dem Waldwachstumssimulator TreeGrOSS fortgeschrieben. Die Verwendung der aktuellen Bestandesgrößen und der Bonität zum Startpunkt der Simulation spiegelt, mit Ausnahme der über die vorgegebene Grundfläche erzeugten Bestandesdichte, die Standortbedingungen während des bisherigen Bestandeslebens auf den jeweiligen Versuchsflächen wider. Die Zuwachsschätzungen erfolgten mit den neu parametrisierten Wachstumfunktionen aus TreeGrOSS, die auf Basis von Versuchsflächendaten ab dem Aufnahmejahr 1970 an das aktuelle Zuwachsniveau angepasst worden waren (SPRAUER und NAGEL, 2018). Die Simulationsdauer wurde auf 30 Jahre beschränkt, da sich das Zuwachsniveau aufgrund der sich weiter verändernden Standortbedingungen auch zukünftig dynamisch verschieben wird. Die Gültigkeit der abgebildeten Modellbestandsstrukturen und Zuwachsverhältnisse ist dadurch zeitlich begrenzt. Eine periodische, in Zeitintervallen von ca. 10 bis 20 Jahren durchzuführende Anpassung des Simulationsansatzes unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse und veränderter Verhältnisse soll diesem Umstand Rechnung tragen.

2.4 Waldbauliches Behandlungskonzept

Die NW-FVA empfiehlt in ihren Merkblättern zur baumartenspezifischen Behandlung und Entwicklung von Waldbeständen eine gestaffelte Hochdurchforstung, die 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 vor Einsetzen der End-/Ziel-

Tab. 2

**Eingriffsregeln zur Umsetzung des waldbaulichen Behandlungskonzeptes
einer gestaffelten Hochdurchforstung zur Erreichung definierter Grundflächenhaltungen
im Rahmen von Waldwachstumssimulationen mit TreeGrOSS.**

**Realisation of the silvicultural management concept graduated thinning from above with
regard to the predefined stand basal areas implemented in TreeGrOSS for growth simulations.**

Relative Bonität [Ekl] (Schober 1995)	Oberhöhenbonität im Alter 100 [m]	Zielstärke [cm]	Z-Bäume [N/ha]	1. Höhenbereich starke Hochdurchforstung		2. Höhenbereich Übergang von stark zu mäßig		3. Höhenbereich mäßige Hochdurchforstung	
				Oberhöhenbereich [m]	Z-Baum-bezogene Pflege	Oberhöhenbereich [m]	Z-Baum-bezogene Pflege	Oberhöhenbereich [m]	Z-Baum-bezogene Pflege
(-) I	40,5	70	80	11,5 - 26,0	2 Bedränger	26,1 - 40,5	1 Bedränger pro Z-Baum	>40,5	moderate Eingriffe in den Zwischen- feldern
0	36,5	65	90	11,5 - 24,0	pro Z- Baum je Eingriff, Kronen- über- lappung bis 30 cm	24,1 - 36,5	je Eingriff, Kronenüber- lappung ≤ 100 cm	>36,5	
I	32,5	60	100	11,5 - 22,0		22,1 - 32,5		>32,5	
II	28,5	60	110	11,5 - 20,0		20,1 - 28,5		>28,5	
III	24,5	55	120	11,5 - 18,0		18,1 - 24,5		>24,5	

stärkennutzung mit moderaten Eingriffen in den Zwischenfeldern ausläuft. Ziel dieses Behandlungskonzeptes ist es, 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 (NW-FVA, 2022; vgl. auch WIEDEMANN, 1937; BRYNDUM, 1987; SPELLMANN und NAGEL, 1996; NAGEL und SPELLMANN, 2008). Die in der Ertragstafel für Buche unterstellte waldbauliche Behandlung folgt diesem Konzept, indem für die Simulation der Modellbestände in TreeGrOSS Z-Baum-Zahlen und Zielstärken in Abhängigkeit von der Bonität und die Staffelung von Art und Stärke der Eingriffe innerhalb einer Bonität nach Oberhöhenbereichen festgelegt wurden (Tab. 2).

Die ersten Durchforstungseingriffe beginnen bonitätsunabhängig ab einer Oberhöhe von 11,5 m (Tab. 2). Bei Buche ist ein Eingriff bei einer Oberhöhe von 11,5 m der früheste Zeitpunkt und bedeutet eine astfreie Schaftlänge von ca. 6,5 m. Für längere astfreie Schaftlängen muss der erste Durchforstungseingriff entsprechend später stattfinden. Das Durchforstungsintervall beträgt entsprechend den Waldwachstumssimulationsschritten fünf Jahre. Das entscheidende Kriterium zur Festlegung der Durchforstungsstärke sind während des gesamten Behandlungszyklus die für bestimmte Alter bzw. bei bestimmten Oberhöhen festgelegten Grundflächenhaltungen im Oberstand (Abb. 1). Unter Einhaltung dieser Vorgabe wird im ersten Oberhöhenbereich, der star-

ken Hochdurchforstung, konsequent eine bestimmte Anzahl an Z-Bäumen durch die Entnahme von maximal zwei Bedrängern pro Eingriff bei einer zulässigen Kronenüberlappung von bis zu 30 cm begünstigt. Im zweiten Oberhöhenbereich, dem Übergang von starker zu mäßiger Durchforstung, wird noch maximal ein Bedränger je Z-Baum und Eingriff entnommen bei einer zulässigen Kronenüberlappung von bis zu einem Meter. Außerdem werden in den beiden ersten Höhenfenstern zur Erreichung der angestrebten Grundflächenhaltungen ggf. noch Bäume im Herrschenden zur Förderung temporärer Z-Bäume in den Zwischenfeldern entnommen. Der dritte Oberhöhenbereich ist durch eine mäßige Durchforstung gekennzeichnet, die sich auf moderate Eingriffe im Herrschenden in den Zwischenfeldern beschränkt.

Die Verläufe der Grundflächenhaltungen für die gestaffelte Durchforstung basieren auf gutachterlichen Festlegungen, die anhand von Auswertungen ertragskundlicher Versuchsflächen mit sehr unterschiedlichen Durchforstungsstärken, -arten und -intensitäten abgeleitet wurden. Die Verläufe orientieren sich in der Jugend an den quantitativ abgeleiteten Grundflächenhaltungen von stark hochdurchforsteten Versuchsflächen und nähern sich im Alter den Grundflächenhaltungen mäßig hochdurchforsteter Versuchsflächen an. Das Niveau der Grundflächenhaltung richtet sich dabei auch nach der Wachstumsdynamik der Buche in der entsprechenden Altersphase. Eine direkte Herleitung der Grundflächenhaltungen für eine gestaffelte Hochdurch-

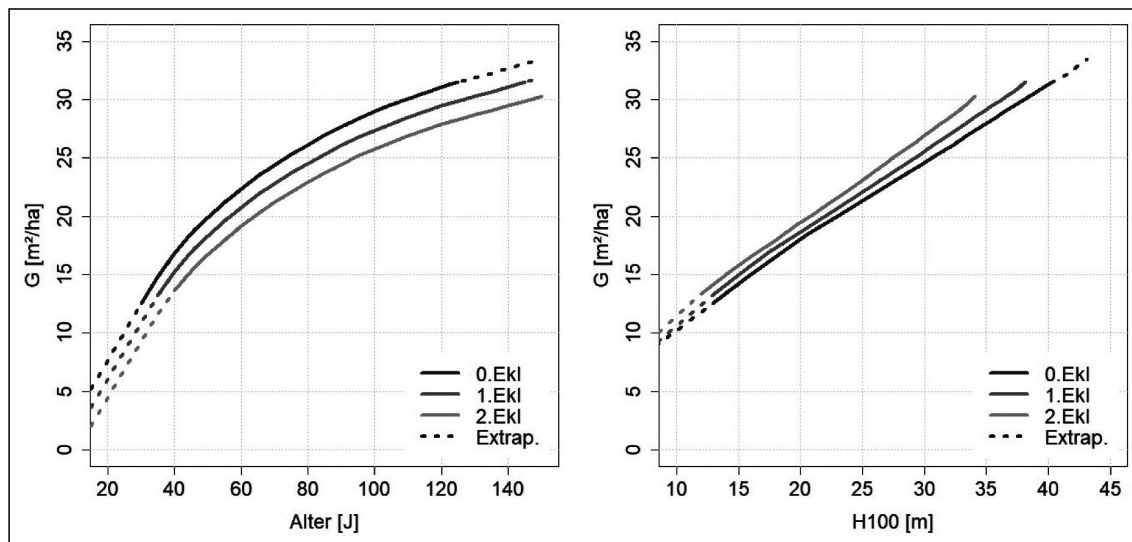


Abb. 1

Grundflächenverlauf gemäß der gestaffelten Hochdurchforstung für Buchenbestände über dem Alter (links) und über der Bestandesoberhöhe (rechts) für drei Bonitäten (der Extrapolationsbereich außerhalb des Buchen-Ertragstafelbereiches ist gestrichelt dargestellt).

Basal area according to graduated thinning concept for beech stands over age (left) and over stand top height (right) for three site indices (extrapolation range beyond the reported beech yield table in dashed lines).

forstung von der Erstdurchforstung bis zum Einsetzen der Zielstärkennutzung war aufgrund einer zu geringen Anzahl an entsprechend behandelten und nach Altern gestaffelten Versuchsflächen nicht möglich.

Der Unterstand, definiert im Anhalt an ASSMANN (1961, S. 91) als die Bäume, deren Höhe $\leq 50\%$ der Oberhöhe (H_{100}) des Bestandes in gegebenem Alter ist, wurde weder bei der Bemessung der Eingriffsstärken, noch in den Grundflächenangaben der Ertragstafeln für den verbleibenden und ausscheidenden Bestand berücksichtigt. Die vorgegebenen Grundflächenhaltungen des verbleibenden Bestandes definieren einen Bestockungsgrad B° von 1,0 für die neuen Ertragstafeln und sind die Zielgröße nach ertragstafelkonformer Durchforstung.

2.5 Bonitierung

Bei der Erstellung von Ertragstafeln und deren Anwendung ist es von zentraler Bedeutung, wie Bestände bonitiert werden und welchen Alters-Oberhöhenverläufen sie folgen. Für die neue Buchen-Ertragstafel wurden die Bestände in ihrer Wuchsleistung entsprechend der üblichen Einordnungsbeziehung über Alter und Oberhöhe (H_{100}) bonitiert (H_{100} wird in der Literatur auch als Spitzenhöhe bezeichnet (vgl. PRODAN, 1965, S. 184)). Die unterstellten Höhenwachstumsgänge folgen einem modifizierten, funktionalisierten Bonitätsfächer auf Basis der Alters-Oberhöhen-Beziehungen der Buchen-Ertragstafel von SCHOBBER (1967) (Abb. 2). Die Beobachtungsdaten der Versuchsflächen gaben keinen Anlass, von der Form der Alters-Höhen-Beziehung der Buchen-Ertragstafel von SCHOBBER (1967) grundsätzlich abzuweichen. Im Hinblick auf die Existenz zahlreicher

sehr leistungsfähiger Bestände wurde der Bonitätsfächer um eine 0. und -I. Ertragsklasse erweitert. Dieser bestehende Bonitätsfächer wurde mittels der Sloboda-Funktion in der algebraischen Differenzenform ausgedrückt (STAUPENDAHL, 2021a; SLOBODA 1971, S. 68):

$$H_{100} = 65^a * (si/65^a)^{\exp\left(\frac{b}{(c-1)*age^{(c-1)}} - \frac{b}{(c-1)*100^{(c-1)}}\right)} \quad [2]$$

mit

$$a = 0,97812 - 0,03621 * ekl$$

$$b = 0,64567 * \exp(-0,08788 * ekl)$$

$$c = 0,90530 * \exp(-0,05427 * ekl)$$

si = absolute Höhenbonität bzw. die Oberhöhe H_{100} im Bezugsalter 100

ekl = relative Bonität (Ertragsklasse nach SCHOBBER (1967)).

Die neu entwickelte Funktion bildet vor allem die Jugendentwicklung besser ab und ermöglicht sachlogisch plausiblere Extrapolationen über den Bonitätsrahmen der Buchen-Ertragstafel von SCHOBBER (1967) hinaus. Die in Abb. 2 zu beobachtenden Abweichungen des neuen Fächers (Linien) von den alten Tafelwerten (Punkte) sind außerdem dadurch zu erklären, dass die Oberhöhenbonitäten der neuen Ertragstafel äquidistant sind und dadurch nicht immer genau den Oberhöhen im Alter 100 der alten Ertragstafel entsprechen. Die Abweichungen sind damit Ausdruck einer verbesserten Konsistenz des Bonitätsfächers. Die Oberhöhen der 0. und -I. Ertragsklasse wurden durch lineare Extrapolation der alten Tafelwerte ermittelt und bei der Schätzung der Modellparameter einbezogen, um die Modellverläufe in diesem Bereich zu stabilisieren (STAUPENDAHL, 2021a).

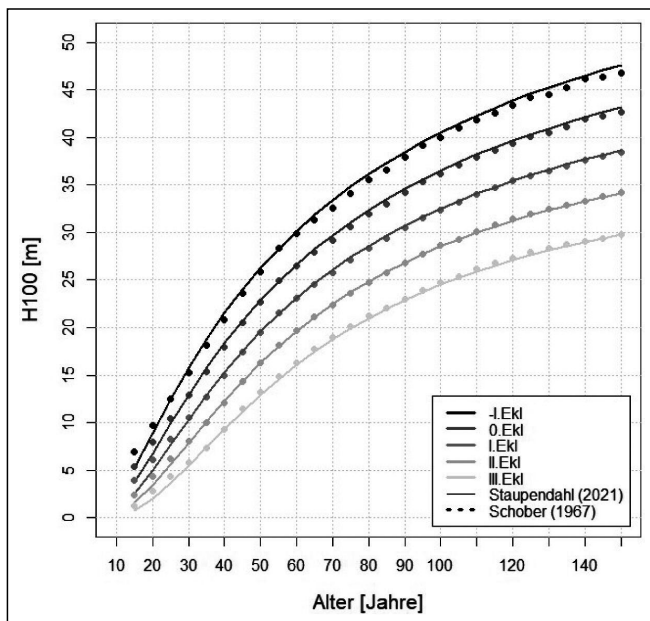


Abb. 2

Modifizierter, funktionalisierter Buchen-Bonitätsfächer (Linien) auf Basis der Alters-Oberhöhen-Beziehung der Buchen-Ertragstafel Schober (Punkte).

Modified functions of beech site index curves (lines) based on the age-top height relationship of Schober's yield table for beech (points).

2.6 System von biometrisch-statistischen Funktionsgleichungen

Die Ertragstafel wurde mit biometrisch-statistischen Modellen erstellt, die auf Basis der Daten der simulierten Waldentwicklung der Modellbestände parametrisiert wurden. Die Einzelbaumdaten der Simulationen wurden

nach jedem Zeitschritt aggregiert und die so abgeleiteten Bestandeswerte funktional ausgeglichen. Eine Modellierung der Simulationsdaten einerseits notwendig, um Brüche im mittleren Verlauf der Bestandeswerte zu vermeiden, da insbesondere in den Randbereichen der Zeitscheiben keine kontinuierlichen Übergänge garantiert sind. Andererseits ist eine Funktionalisierung auch deshalb unbedingt notwendig, um eine flexible digitale Anwendung, insbesondere für beliebige Interpolationen innerhalb des Alters- und Bonitätsrahmens, zu ermöglichen (vgl. NUSKE et al., 2022). Für die verschiedenen Zielgrößen wurden unterschiedliche Modelle verwendet, die kontinuierliche Werteverläufe der Ertragstafelgrößen gewährleisten (Tab. 3 sowie Appendix für detaillierte Modellspezifika).

Die neue Buchen-Ertragstafel ist nach den klassischen Vorbildern aufgebaut. Für verschiedene absolute Oberhöhenbonitäten sind die Entwicklungen der ertragskundlichen Bestandeskennwerte, getrennt nach verbleibendem und ausscheidendem Bestand, in Fünfjahresschritten dargestellt. Der Bonitätsrahmen reicht von der absoluten Oberhöhenbonität 40,5 m (entspricht einer -I. Ertragsklasse nach SCHOBER) bis zur absoluten Oberhöhenbonität 24,5 m (entspricht einer III. Ertragsklasse nach Schober). Der Altersrahmen beginnt mit der Fünfjahres-Altersperiode, in der eine Bestandesoberhöhe von 11,5 m erreicht oder überschritten wird, also mit Beginn der Hauptpflegephase, und endet in dem Altersbereich, in dem der Dg die angestrebte Zielstärke von 60 cm erreicht oder das maximale Simulationsalter von 150 Jahren erreicht wird.

Abb. 3 veranschaulicht die 16 Schritte der Berechnung der ertragskundlichen Bestandeskennwerte.

Nach dem Aufspannen des Altersrahmens für jede Ertragsklasse wurden schrittweise die ertragskund-

Tab. 3

Modelle zur Schätzung der Ertragstafelgrößen (iV: laufender Zuwachs; DOW: Durchmesser des Weise'schen Oberhöhenstammes; Dg: Durchmesser des Grundflächenmittelstammes; Hg: Höhe des Grundflächenmittelstammes; aus.Hg: Höhe des ausscheidenden Grundflächenmittelstammes; V: stehender Vorrat; G: Grundfläche; FH: Formhöhe; N: Stammzahl).

Models to estimate yield table parameters (iV: current increment; DOW: diameter of Weise's top height tree; Dg: diameter of mean basal area tree; Hg: height of mean basal area tree; aus.Hg: height of removed mean basal area tree; V: standing volume; G: basal area; FH: form height; N: number of stems).

Nr	Zielgröße	Modellform	Prädiktoren
1	iV	Differenzenform der Sloboda-Funktion *)	Alter, Bonität
2	DOW	Differenzenform der Chapman-Richards-Fkt. *)	Alter, Bonität
3	Dg	Differenzenform der Hossfeld-Fkt. *)	Alter, Bonität
4	Hg	Lineares Modell	H100, Bonität
5	aus. Hg	Lineares Modell	H100, Bonität
6	V	Differenzenform der Sloboda-Fkt. *)	Alter, Bonität
7	G	Generalisiertes additives Modell	Alter, Bonität
8	FH	Lineares Modell	Hg
9a	N	Generalisiertes additives Modell	H100, Bonität
9b	N	Überführung in rechnerische Werte aus Dg und G	Alter

*) STAUPENDAHL (2021b).

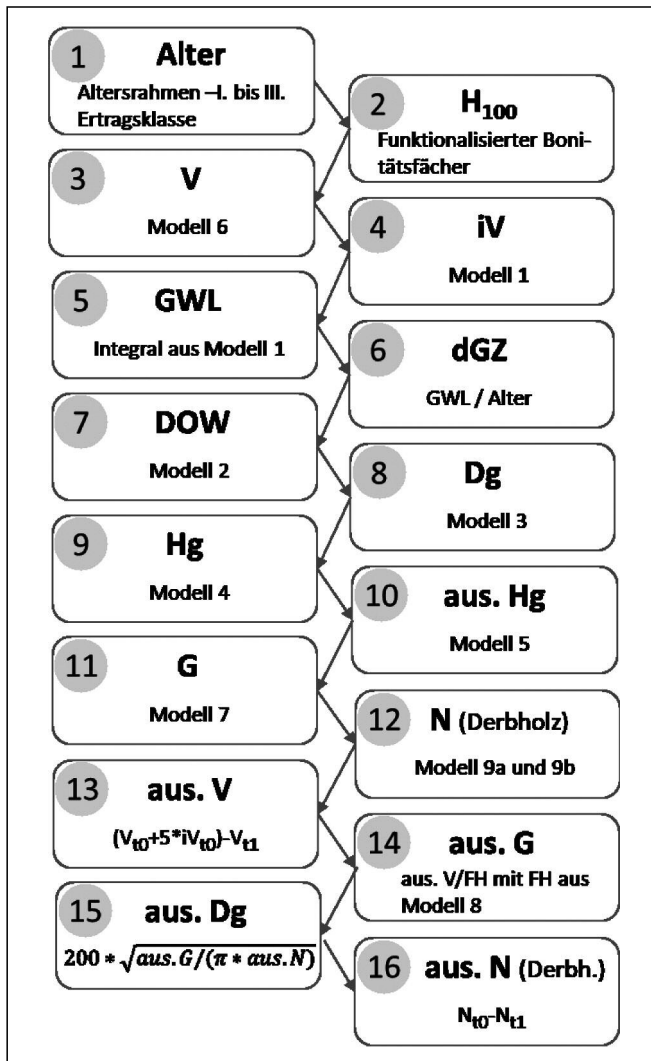


Abb. 3

Berechnung der ertragskundlichen Bestandeskennwerte für die Buchen-Ertragstafel in 16 Schritten (Zielgröße in fett; Modell aus Tab. 3 bzw. Rechenweg in klein; Abkürzungen siehe Tab. 3).

Estimation of stand parameters for the beech yield table in 16 steps (target parameter in bold; model from tab. 3 or calculation in small font; for abbreviations see tab. 3).

lichen Bestandeskennwerte mittels der in Tab. 3 spezifizierten Modelle bzw. über einfache Berechnungen ermittelt (Abb. 3). Die in Abb. 3 aufgeführten Modelle und Rechenwege gewährleisten plausible Werteverläufe und konsistente Innen- und Querbeziehungen der Ertragstafel.

Für die Verwendung der Ertragstafeln in der Forstpraxis sind darüber hinaus Zuwachsreduktionsfaktoren notwendig, um bei Differenzen der Ist-Grundfläche von der Soll-Grundfläche der neuen Ertragstafel für gestaffelte Hochdurchforstung (Bestockungsgrad B° größer oder kleiner 1,0) einen möglichen Mehr- bzw. Minderzuwachs zu berücksichtigen (vgl. KRAMER und AKÇA 1987, S. 202). Die Herleitung der Zuwachsreduktionsfaktoren erfolgte ebenfalls mit Hilfe von Simulationen, indem

Modellbestände in unterschiedlichen Dichten aufgebaut und projiziert wurden. Dazu wurde jeder Modellbestand mit Bestockungsgraden von 0,1 bis 1,3 in Bezug zur neuen Ertragstafel für die gestaffelte Hochdurchforstung aufgebaut. Es wurden dabei gleiche Durchmesserstrukturen unterstellt, wie sie bei den Modellbeständen der idealtypischen gestaffelten Hochdurchforstung Anwendung fanden, nur dass hier andere Bestandesdichten vorgegeben wurden. Die erzeugten Bestände wurden anschließend für die Dauer von 5 Jahren im Wachstum simuliert, wobei keine Eingriffe vorgenommen, kein Einwuchs projiziert und keine Mortalität angenommen wurde. Der Zuwachs ergibt sich somit aus der Differenz der Volumina zu Beginn und am Ende der Periode.

3. ERGEBNISSE

Die Anwendung der neuen Buchen-Ertragstafel ist an folgende Voraussetzungen gebunden: (1) die Tafel gilt für gleichaltrige, vollbestockte Reinbestände, (2) bei Abweichungen vom unterstellten Bestockungsgrad $B^\circ = 1,0$ laut Grundflächenhaltung der hier definierten gestaffelten Hochdurchforstung sind Zuwachskorrekturfaktoren anzuwenden, (3) die aufgeführten ertragskundlichen Kennwerte beziehen sich ausschließlich auf den Oberstand, definiert als Gesamtheit aller Bäume, deren Höhe größer 50% der Bestandesoberhöhe ist, (4) der räumliche Gültigkeitsbereich der Tafel umfasst Nordwestdeutschland mit einem einheitlichen mittleren Ertragsniveau, (5) zwischen den Oberhöhenbonitäten und den Altern kann linear interpoliert werden, während eine lineare Extrapolation außerhalb der in der Ertragstafel aufgespannten Bonitäts- und Altersrahmen problematisch ist und (6) die Ertragstafel sollte nur für Planungszeiträume bis 20 Jahre angewendet werden.

3.1 Ertragskundliche Bestandeskennwerte

Im Folgenden werden exemplarisch die ertragskundlichen Bestandeskennwerte der neuen Buchen-Ertragstafel vorgestellt. Tab. 4 zeigt den klassischen Aufbau der Ertragstafel für die Oberhöhenbonität 36,5 m.

Am Beispiel des Tabellenblattes der neuen Buchen-Ertragstafel in Tab. 4 ist zu erkennen, dass der Altersrahmen nach Überschreiten der Oberhöhe von 11,5 m, hier im Alter 30 mit $H_{100} = 12,9$ 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. Die Ertragstafel ist so konzipiert, dass sich die Angaben des laufenden Zuwachses jeweils auf die Zeile der vorangehenden Fünfjahresperiode beziehen. Dieses steht im Einklang mit der Fichten-Ertragstafel von WIEDEMANN (1936/42), während z.B. die Buchen-Ertragstafel von SCHOBER (1967) den laufenden Zuwachs auf die folgende Periode bezieht.

Die Abb. 4 und Abb. 5 illustrieren die Altersverläufe wichtiger ertragskundlicher Kenngrößen gemäß der neuen Buchen-Ertragstafel im Vergleich zu den entsprechenden Kenngrößen der Buchen-Ertragstafel von SCHOBER für mäßige Durchforstung (1967) für die 0., I.

Tab. 4

**Tabellenblatt der neuen Buchen-Ertragstafel, gestaffelte Durchforstung,
Oberhöhenbonität 36,5 m (0. Ertragsklasse).**

**Spreadsheet from the new beech yield table, graduated thinning,
site index 36.5 m (0. yield class).**

Buche: gestaffelte Durchforstung															
Oberhöhenbonität: 36.5 m im Alter 100															
verbleibender Bestand								ausscheidender Bestand							
Alter	Stammzahl	Mittelhöhe	Oberhöhe (H100)	Grundfläche	mittl. Durchmesser Dg	Durchmesser Weise	Vorrat	Stammzahl	Grundfläche	mittl. Durchmesser Dg	Vorrat	Laufender Volumenzuwachs	Gesamtwuchsleistung	durchschnittl. Gesamtwuchs	
Jahre	Stück/ha	m	m	m ² /ha	cm	cm	m ³ /ha	Stück/ha	m ² /ha	cm	m ³ /ha	m ³ /ha/J	m ³ /ha	m ³ /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	

und II. Ertragsklasse. Es ist ersichtlich, dass das Zuwachsniveau der neuen Buchen-Ertragstafel grundsätzlich höher ist und die Baumdimensionen (Durchmesser des Grundflächenmittelstammes und Durchmesser Weise) stärker sowie die Nutzungsmassen höher sind. Das höhere Zuwachsniveau findet in der deutlich höheren Gesamtwuchsleistung und entsprechend in den Verläufen des durchschnittlichen Gesamtwuchses sowie des laufenden Volumenzuwachses seinen Ausdruck. Der Kulminationspunkt des laufenden Zuwachses ist bei der neuen Tafel gegenüber der Schober'schen Tafel leicht in jüngere Alter verschoben. Im Vergleich der beiden Tafeln ist die Vorratsentwicklung bei der 0. Ertragsklasse sehr ähnlich, während sie bei der neuen Tafel mit abnehmender Bonität besonders in den mittleren Altern geringere Bestandesvolumina aufweist. Die Grundflächenhaltungen und die Stammzahlhaltungen der gestaffelten Hochdurchforstung sind über dem Alter durchweg niedriger als bei der mäßigen Durchforstung

nach SCHOBER (1967). Der höhere Zuwachs wird, bei gleichzeitig geringerer Grundflächenhaltung als bei Schober, durch deutlich höhere Vornutzungsmassen (aus. V) abgeschöpft. Die gesteigerte Dimensionsentwicklung bei gestaffelter Hochdurchforstung gegenüber der mäßigen Durchforstung wird im Altersverlauf des Dg deutlich. Die konsequente Umsetzung der Hochdurchforstung zeigt sich vor allem in den wesentlich stärkeren Dimensionen des ausscheidenden Bestandes. Der Verlauf des Durchmessers des Weise'schen Oberhöhenstammes gibt einen Hinweis auf das frühzeitige Erreichen der Zielstärken für das Kollektiv der Z-Bäume.

Die Zuwachsverläufe in *Abb. 4* beziehen sich auf ertragstafelkonform behandelte, vollbestockte Bestände. Wird jedoch die Grundfläche eines Bestandes stärker abgesenkt oder werden hohe Grundflächen eines bisher nicht ertragstafelkonform behandelten Bestandes mit einem Bestockungsgrad >1,0 schrittweise abgesenkt, so

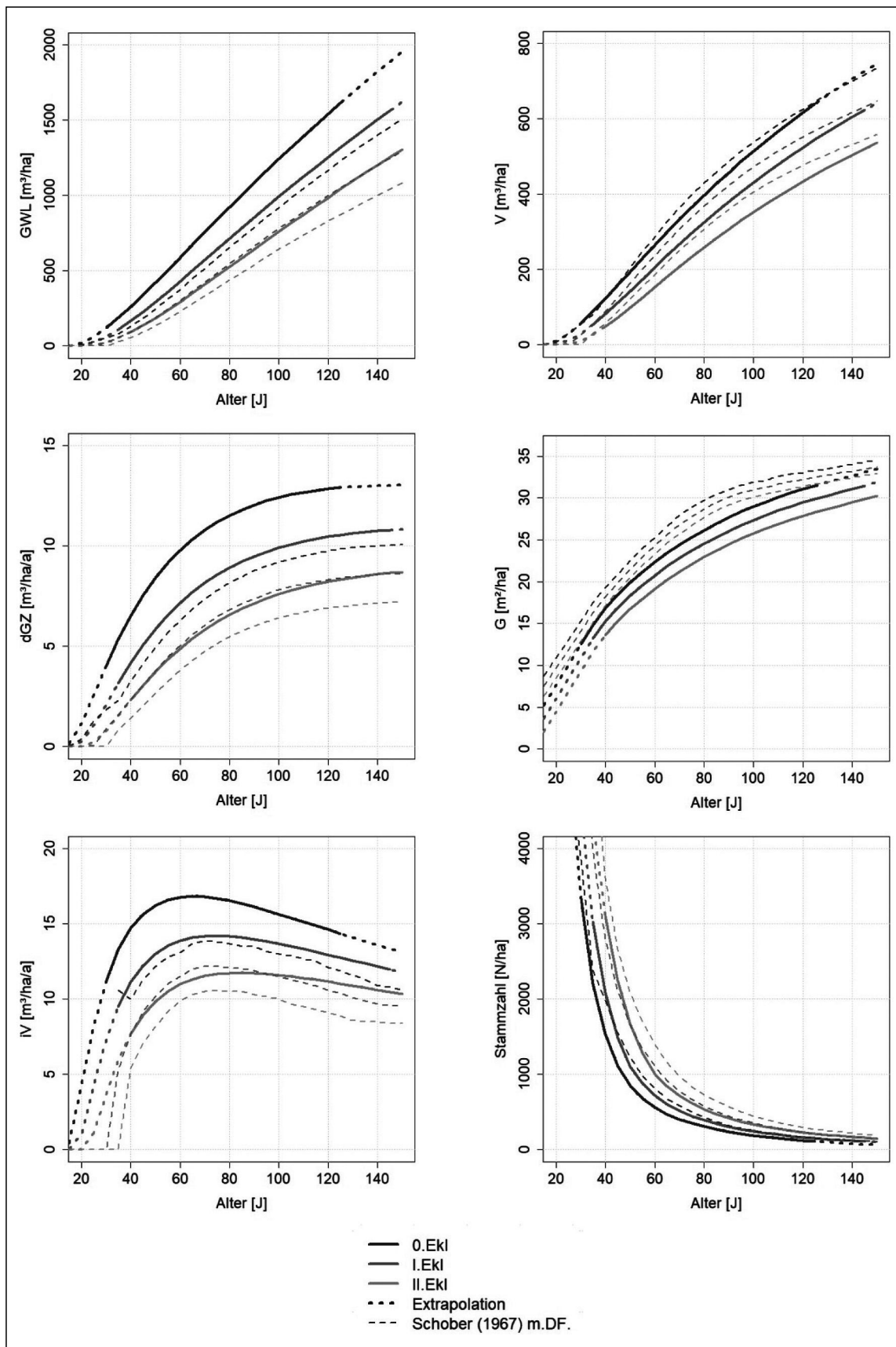


Abb. 4

Altersverläufe wichtiger ertragskundlicher Kenngrößen gemäß neuer Buchen-Ertragstafel und laut Buchen-Ertragstafel SCHOBER mäßige Durchforstung (1967) für die 0., I. und II. Ertragsklasse.
 Development of important growth and yield parameters over age according to the new beech yield table and the beech yield table by SCHOBER (1967) for yield classes 0., I., and II.

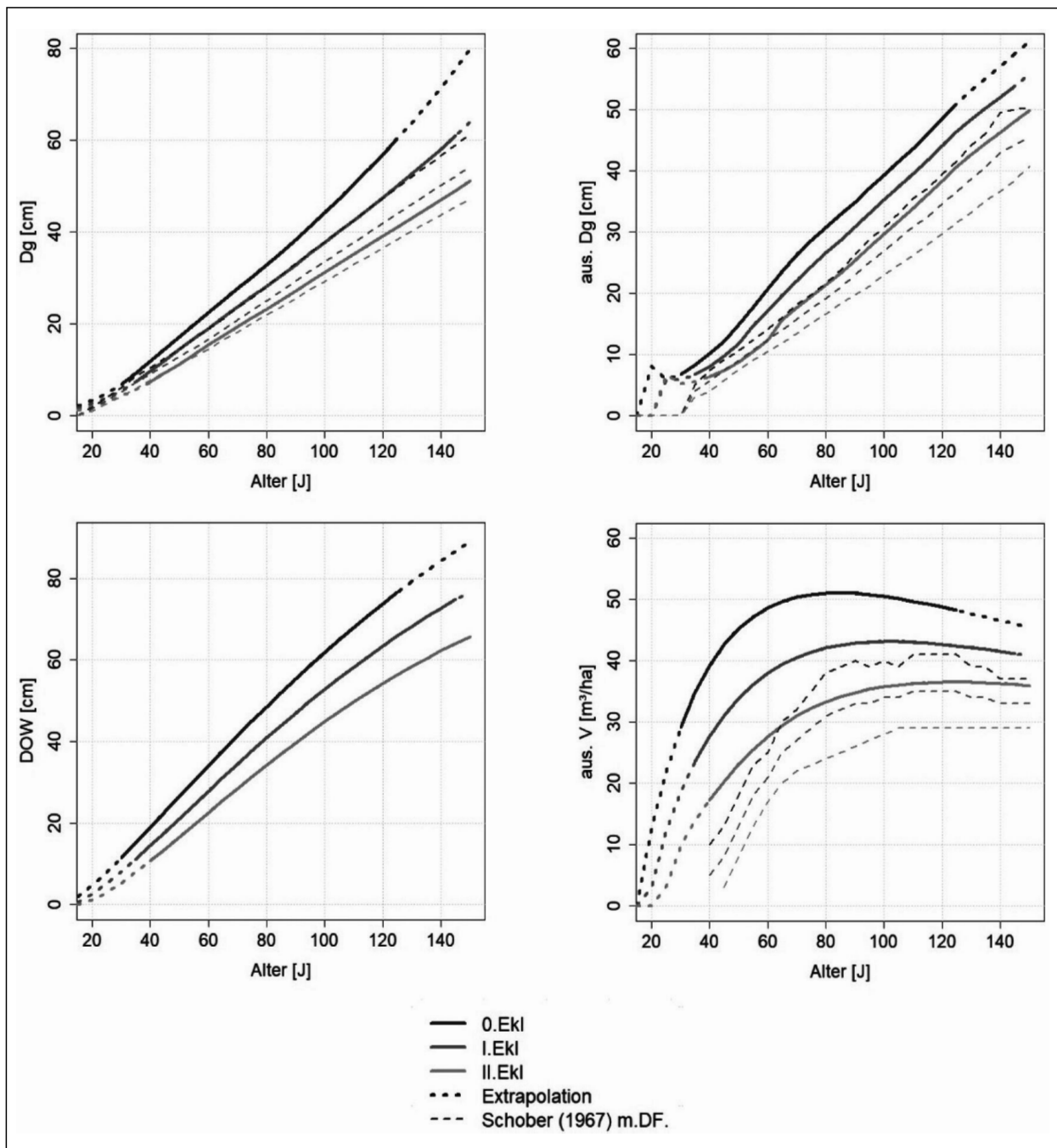


Abb. 5

Altersverläufe wichtiger ertragskundlicher Kenngrößen gemäß neuer Buchen-Ertragstafel und laut Buchen-Ertragstafel SCHOBER mäßige Durchforstung (1967) für die 0., I. und II. Ertragsklasse.
 Development of important growth and yield parameters over age according to the new beech yield table and the beech yield table by SCHOBER (1967) for yield classes 0., I., and II.

Tab. 5

Zuwachskorrekturfaktoren (Korr.) für die neue Buchen-Ertragstafel für unterschiedliche Bestockungsgrade (B°).

Factors to adjust increment values (Korr.) according to the new beech yield table for different stocking degrees (B°).

B°	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
Korr.	0,15	0,30	0,42	0,51	0,60	0,70	0,79	0,87	0,94	1,00	1,05	1,10	1,14

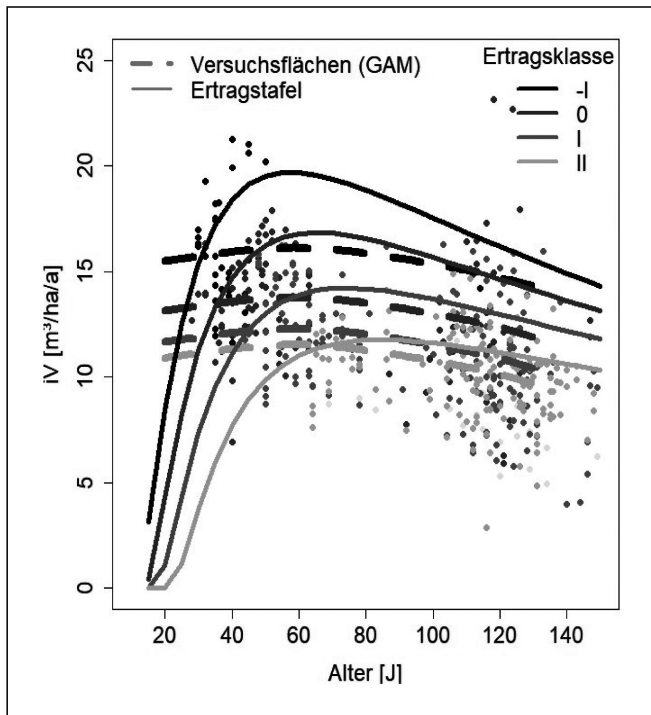


Abb. 6

Vergleich des laufenden Volumenzuwachses laut neuer Buchen-Ertragstafel mit Versuchsfelderbeobachtungen (Punkte) und deren Ausgleich mit einem generalisierten additiven Modell (GAM).

Comparison of current increment according to the new beech yield table with yield experiment data (points) which are smoothed applying a generalized additive model (GAM).

müssen die angegebenen Zuwächse der Tafel für die folgende 5-Jahres-Periode mit den Zuwachskorrekturfaktoren gemäß *Tab. 5* korrigiert werden.

Im Gegensatz zu den bisher gebräuchlichen Zuwachsreduktionstabellen (vgl. KRAMER und AKÇA, 1987, S. 202), bei denen ab einem Bestockungsgrad über 1,0 der Zuwachs nicht mehr korrigiert wird, steigt in der Simulation der modellierten Zuwachs mit steigendem Bestockungsgrad weiter, wenn auch degressiv, weshalb für diesen Bereich ebenfalls Zuwachskorrekturfaktoren nötig sind, was in *Tab. 5* berücksichtigt ist. Weitergehende Auswertungen der Simulationsergebnisse zeigen, dass sich die berechneten Zuwachskorrekturfaktoren in Übereinstimmung mit dem von PRETZSCH (2005) nachgewiesenen Dimensions- und Standorteffekt befinden. Eine hinsichtlich Bestandesalter und Bonität differenzierte Ableitung von Reduktionsfaktoren wurde jedoch zugunsten einer einfachen Handhabung der Ertragstafeln nicht vorgenommen. Vielmehr werden generalisierte Reduktionsfaktoren nur in Abhängigkeit vom Bestockungsgrad, wie in *Tab. 5* aufgeführt, angegeben.

3.2 Validierung der Ertragstafel

Insbesondere die in den Ertragstafeln abgebildeten Zuwächse, die Durchmesserentwicklungen und die entnommenen Nutzungsmassen wurden anhand von ausgewählten Versuchsfeldern validiert (*Abb. 6* und *Abb. 7*). Für die Validierung der laufenden Zuwächse wurden zusätzliche Versuchsfelderbeobachtungen herangezogen, die über das Material zur Ertragstafelerstellung hinausgehen und nach 1990 erhoben wurden, um das

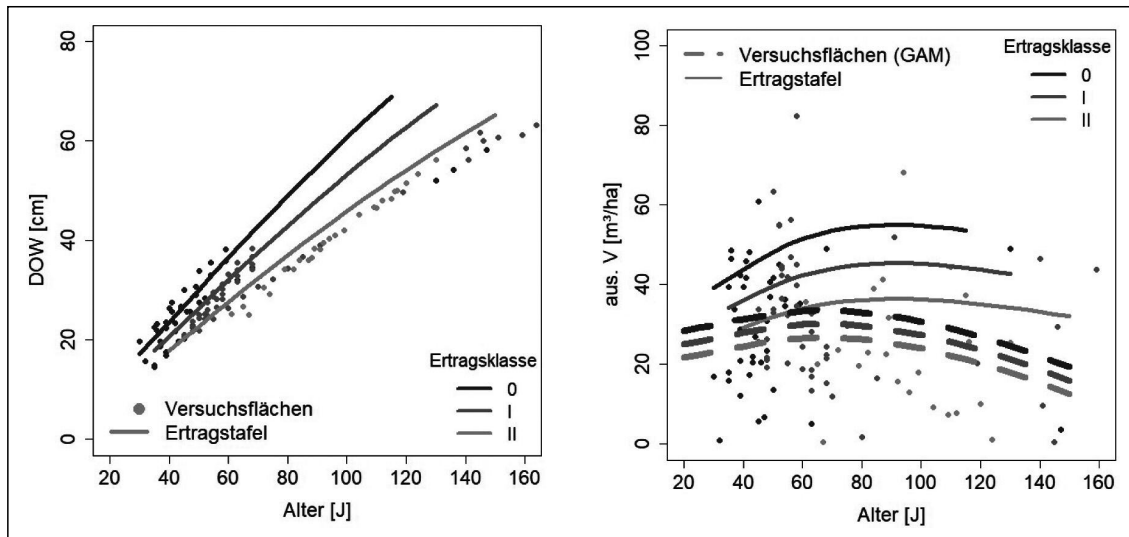


Abb. 7

Vergleich der Entwicklung des Durchmessers des Weise'schen Oberhöhenstammes (links) und des ausscheidenden Vorrates laut neuer Buchen-Ertragstafel mit entsprechenden Versuchsfelderbeobachtungen (Punkte). Für den ausscheidenden Vorrat (rechts) erfolgte für eine bessere Vergleichbarkeit jeweils ein Ausgleich mit einem generalisierten additiven Modell (GAM).

Comparison of top diameter (left) according to the new beech yield table using yield experiment data (points). In the case of thinned volume (right) a generalized additive model (GAM) was applied to better visualize trends in the experiment data.

derzeitige Zuwachsniveau konsistent zu den Ertragstafeln abzubilden. Es handelte sich hierbei ausschließlich um Versuchspartellen in Buchenreinbeständen (Mischungsanteil anderer Baumarten <10%) mit einer hochdurchforstungsartigen Behandlung (Abb. 6).

Die teilweise sehr unausgeglichene Verteilung der Bonitäten der Versuchsbestände über dem Alter sowie die große Streuung der Zuwachsbeobachtungen innerhalb der Bonitäten muss bei der Validierung beachtet werden. Während sehr gute Bonitäten fast ausschließlich in ganz jungen Altern vorkommen, sind Zuwachsbeobachtungen für schlechtere Bonitäten größtenteils in mittelalten und alten Versuchsbeständen zu finden. Die mit einem verallgemeinerten additiven Modell (erklärende Prädiktoren: B^0 , Bonität, Alter) stark vereinfacht geschätzten Zuwachsverläufe können somit nur als Anhalt dienen. Es wird jedoch deutlich, dass die Zuwachsverläufe laut neuer Buchen-Ertragstafel die in der Jugend beobachteten hohen Zuwachswerte adäquat berücksichtigen und sich im Alter den modellierten Verläufen der Versuchsflächen annähern. Der Sachverhalt der unausgegliehenen Bonitätsverteilungen bei den zur Verfügung stehenden Versuchsflächen unterstreicht zudem die Notwendigkeit, bei der Aufstellung der Buchen-Ertragstafel die Datenbasis der empirischen Beobachtungen um waldwachstumskundliche Simulationen für die Parametrisierung der biometrisch-statistischen Funktionen zu erweitern, um stabile Verläufe der ertragskundlichen Kenngrößen zu erzielen. Dabei konnte die unausgeglichene Datenbasis der Modellbestände allerdings nur in Richtung zunehmender Alter erweitert werden. Die zur Herleitung der Zuwachswerte verwendete algebraische Differenzenform der Sloboda-Funktion gewährleistet zusätzlich über bestimmte Annahmen, z. B. dass Zuwachswerte erst bei vorhandenem Derbholz geschätzt werden, biologisch plausible Verläufe und eine konsistente Staffelung nach Bonitäten (STAUPENDAHL, 2021b).

An die Versuchsflächendaten zur Validierung der Durchmesserentwicklungen und des ausscheidenden Volumens wurden hinsichtlich der waldbaulichen Behandlung ebenfalls sehr strenge Maßstäbe angelegt. Es wurden hierzu nur Versuchsflächen herangezogen, die stark hochdurchforstet waren (Abb. 7).

Der Durchmesser des Weise'schen Oberhöhenstammes repräsentiert in höheren Altern näherungsweise das Kollektiv der Z-Bäume und ist somit von besonderer forstwirtschaftlicher Relevanz. Die Validierung der Ertragstafelverläufe an ausgewählten Versuchsflächenbeobachtungen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (Abb. 7, links). Die Abweichungen in höheren Altern bei der II. Ertragsklasse erklären sich dadurch, dass die älteren Versuche überwiegend schon in älteren Beständen ohne eine hochdurchforstungsartige Vorbehandlung angelegt wurden und die Zuwachsniveaus bei gleicher Höhenbonität noch geringer waren.

Wie schon bei der Zuwachsvalidierung ergibt sich bei der Überprüfung des ertragstafelmäßigen Verlaufes des ausscheidenden Vorrates die Schwierigkeit einer sehr großen Streuung der auf Versuchsflächen beobachteten Entnahmemassen, wobei die Staffelung nach Bonitäten

noch schwächer ausgeprägt ist. Der mit einem verallgemeinerten additiven Modell (erklärende Prädiktoren: Bonität, Alter) verdeutlichte Trend wird stark durch einige sehr geringe Entnahmemengen gedrückt und kann somit nur als grober Anhalt dienen. Es ist aus Abb. 7 (rechts) aber dennoch ersichtlich, dass die Ertragstafelverläufe zwar im oberen Bereich, jedoch noch deutlich innerhalb der Bandbreite der Beobachtungen verlaufen.

4. DISKUSSION

4.1 Bedeutung und Einsatzmöglichkeiten der Ertragstafel

Waldwachstumssimulatoren, insbesondere die einzelbaumorientierten Ansätze wie z. B. TreeGrOSS (HANSEN und NAGEL, 2014), SILVA (KAHN und PRETZSCH, 1997; PRETZSCH et al., 2002) und PROGNAUS (STERBA und MONSERUD, 1997), aber auch Bestandesmodelle wie STAND (PUKKALA und MIINA, 2006), haben sich als zuverlässige Forstplanungsinstrumente erwiesen (BÖCKMANN, 2004; HASENAUER, 2006). Sie zeichnen sich durch einen sehr breiten Anwendungsbereich aus, da sie die Abbildung sehr unterschiedlicher Baumartenmischungen, Bestandstrukturen und Behandlungskonzepte erlauben. Standortssensitive Leistungsmodelle ermöglichen zudem Projektionen unter Berücksichtigung des Klimawandels (z. B. ALBERT und SCHMIDT, 2010; NOTHDURFT et al., 2012; SEYNAVE et al., 2005; SCHMIDT, 2020). Ertragstafeln besitzen diese Anwendungsmöglichkeiten nicht oder nur sehr eingeschränkt. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, warum es heute überhaupt noch sinnvoll ist, neue Ertragstafeln zu erarbeiten. Hierfür lassen sich folgende Gründe anführen: Ertragstafeln sind zum einen einfach in ihrer Anwendung, weil sie nur wenige und sehr schnell zu erhebende Eingangsdaten benötigen. Zum anderen bieten sie mit den unterstellten Behandlungskonzepten eine Orientierung für die Steuerung der Waldentwicklung, während die vielen möglichen Stellschrauben der Einzelbaumwachstumssimulatoren viele Forstpraktiker und Forsteinrichter überfordern. In der Forstpraxis gibt es zudem ein langes Erfahrungswissen zur Handhabung von Ertragstafeln. Des Weiteren sind klar definierte Behandlungskonzepte wichtig für die Ermittlung des steuerlichen Nutzungssatzes und die Waldbewertung. Diese Eigenschaften bieten Waldwachstumssimulatoren nicht oder nur eingeschränkt (vgl. LEMM, 2004; VON TEUFFEL et al., 2006), weshalb die klassischen Ertragstafeln auch heute noch nützliche Planungsinstrumente im breiten Portfolio der Waldwachstumsmodelle darstellen (PRETZSCH, 2016).

Das Hauptanwendungsgebiet der neuen Ertragstafeln wird weiterhin in den forstpraktischen Bereichen der klassischen Forsteinrichtung und Waldbewertung liegen. Mit ihrem Referenzcharakter bieten die Ertragstafeln aber auch bei wissenschaftlichen Fragestellungen die Möglichkeit, die Effekte alternativer waldbaulicher Behandlungen auf die verschiedenen Bestandeskennwerte zu quantifizieren (z. B. GADOW und PUUMALAINEN, 2002), einen Vergleichsmaßstab im Modellierungs- und Monitoringbereich zu haben (z. B. MELLERT et al., 2008; VOSPERNIK et al., 2015), prozessorientierte Wachstums-

modelle zu initialisieren (z. B. LASCH-BORN et al., 2015) oder auch als Kalkulationsgrundlage für Kohlenstoff- und Nährstoffbilanzen zu dienen (z. B. WARING und McDOWELL, 2002; WUTZLER und MUND, 2007; FLECK et al., 2017; SCHLUHE et al., 2018).

4.2 Konstruktionsprinzip und Datengrundlage

Die NW-FVA verfügt mit ihren derzeit ca. 900 in Beobachtung stehenden ertragskundlichen Versuchsflächen über eine breite Datenbasis zur Bearbeitung walddachstumskundlicher Fragestellungen. Diese Datengrundlage reduziert sich aber stark, wenn man die Versuche zur klassischen Herleitung von Ertragstafeln für Reinbestände einer Baumart mit bestimmter waldbaulicher Behandlung betrachtet. So standen für die Buche nur 61 Versuchspartellen mit hochdurchforstungsartig behandelten Reinbeständen zur Verfügung. Außerdem waren nicht alle Bonitäten über alle Alter abgedeckt. Aufgrund dieser Einschränkungen wäre eine allein auf Beobachtungsdaten beruhende Herleitung der Altersverläufe ertragskundlicher Kennwerte nur schwer möglich gewesen. Die Kombination aus empirischen Beobachtungen zur Erstellung von Modellbeständen, die die Entwicklungsgeschichte der Versuchsflächen enthalten, und Waldwachstumssimulationen eben dieser Modellbestände erweitert demgegenüber die Datenbasis erheblich. Im Fall der neuen Buchen-Ertragstafel konnten auf diese Weise 241 Modellbestände genutzt werden, die nach ihrer jeweils 30-jährigen Entwicklungsprojektion den Altersbereich von 25 bis 140 Jahren abdecken und die in einem Oberhöhenbonitätsbereich zwischen 26,5 und 40,5 m rangieren. Eine ausgewogene Verteilung der Bonitäten über den betrachteten Altersbereich war dennoch nur eingeschränkt möglich, da diese maßgeblich durch das Alter der Modellbestände zu Beginn der Simulation bestimmt wird. Weiterhin konnte mit Hilfe der Waldwachstumssimulationen eine gestaffelte Hochdurchforstung in den neuen Ertragstafeln abgebildet werden. Dies erlaubt die Feststellung, dass das vorgestellte Konstruktionsprinzip für die Aufstellung neuer Ertragstafeln geeignet ist, um mit den Waldwachstumssimulationen der Modellbestände die Effekte eines veränderten Zuwachsniveaus und einer empfohlenen waldbaulichen Behandlung auf den verbleibenden und ausscheidenden Bestand explizit zu berücksichtigen. Damit geht dieser Ansatz über vertretbare Anpassungen der etablierten Tafeln hinaus, die sich auf Korrekturen der Baumdimensionen beschränken (WOLLBORN und BÖCKMANN, 1998), eine Kalibrierung der Ertragstafelkennwerte an aktuellen Waldzuständen vornehmen, auch wenn diese in ihrer Behandlung nicht den empfohlenen waldbaulichen Maßnahmenfolgen entsprechen (STAUPENDAHL und SCHMIDT, 2016), oder die Zuwachsniveaus durch die Verwendung von Zuwachskorrekturfaktoren anpassen (PRETZSCH, 2016).

Die Waldwachstumssimulationen in 30-jährigen Zeitscheiben statt einer durchlaufenden Simulation über ein gesamtes Bestandesleben sind das zweite zentrale Konstruktionsmerkmal der neuen Ertragstafeln der vierten Generation. Dadurch kann für die jeweiligen Perioden annähernde Standortskonstanz unterstellt werden,

wodurch Zuwachsschätzungen auf aktuellem Niveau gewährleistet werden. Auch sehen die Empfehlungen für den Einsatz von Wachstumssimulatoren seit jeher eine Begrenzung der Projektionszeiträume vor, da mit fortschreitender Simulationsdauer die Effekte der Fehlerfortpflanzung zu immer größeren Unsicherheiten führen (GERTNER, 1987; VANCLAY und SKOVSGAARD, 1997).

Die Verknüpfung von Versuchsflächenbeobachtungen und Waldwachstumssimulationen zur Ertragstafelerstellung wirkt der Entkopplung von erwartetem und beobachtetem Wachstum entgegen (vgl. PRETZSCH, 1992). So lassen sich die fortlaufenden Aufnahmen von ertragskundlichen Versuchsflächen sowie die Daten aus Betriebs- und Bundeswaldinventuren schnell in Wert setzen, indem die Zuwachsfunktionen von Waldwachstumssimulatoren periodisch angepasst und neue Ertragstafeln nach dem oben beschriebenen Verfahren auf aktuellem Zuwachsniveau erzeugt werden. Dies entspricht auch der Empfehlung von LEMM (2004), Modelle, hier die Ertragstafeln, für bestimmte Anwendungen ohne allzu großen Aufwand durch die Verwendung von qualitativ hochwertigen Modellteilen, hier TreeGrOSS, im Sinne der Komponententechnologie zu erstellen.

4.3 Bonitätsfächer

Mit Hilfe der in Kap. 2.5 vorgestellten Methodik eines funktionalisierten Bonitätsfächers ist es möglich, auch im Extrapolationsbereich des ursprünglichen Bonitätsfächers der Buchen-Ertragstafel von SCHOBER (1967) plausible Oberhöhenwachstumsverläufe für eine 0. und -I. Ertragsklasse zu erzeugen (STAUPENDAHL, 2021a). Eine herkömmliche lineare Extrapolation gewährleistet demgegenüber nicht zwangsläufig plausible Verläufe, wie das Beispiel der Eichen-Ertragstafel von JÜTNER (1955) eindrucksvoll gezeigt hat (vgl. ALBERT et al., 2021). Eine Erweiterung des Bonitätsfächers der etablierten Tafeln war notwendig, weil sich mit der Verbesserung der Standortbedingungen in den letzten Jahrzehnten nicht nur Grundflächenzuwachssteigerungen bei gegebener Bonität, sondern auch Verschiebungen des Höhenwachstums hin zu besseren Bonitäten ergeben haben (PRETZSCH et al., 2014b).

Der neue Bonitätsfächer (vgl. Abb. 2) geht sowohl bei der Ertragstafelerstellung als auch bei seiner Anwendung von mittelfristig geltender Standortskonstanz aus. Diese Annahme gilt auch für die 30-jährigen Zeitscheibensimulationen und führt zu der Empfehlung, mit den Ertragstafeln nur maximal 20-jährige Planungsperioden zu betrachten. Bei längeren Zeiträumen sind hingegen gerichtete Produktivitätsveränderungen zu erwarten, die u. a. dazu führen, dass die Oberhöhenentwicklung eines Bestandes nicht dem Verlauf des in den Ertragstafeln abgebildeten Höhenwachstumsganges entspricht, sondern den Bonitätsfächer durchläuft (vgl. KINDERMANN, 2017).

4.4 Behandlungskonzept gestaffelte Hochdurchforstung

Die Ziele der Durchforstung haben sich in den letzten Jahrzehnten mehrfach geändert. Heute werden vorrangig die Zielelemente Wertleistung, Stabilität, Kosten-

senkung und Struktur verfolgt. Sie lassen sich nach Untersuchungen an der NW-FVA am besten mit einer gestaffelten Hochdurchforstung aufeinander abstimmen (vgl. u. a. NAGEL, 2007; NAGEL und SPELLMANN, 2008; SPELLMANN, 2001, 2002, 2004, 2008; SPELLMANN und NAGEL, 1996). Dementsprechend wurde diese Art der Durchforstung auch als Behandlungskonzept für die neuen Ertragstafeln gewählt. Sie strebt zwei- oder mehrschichtige Bestände an. Die Übergänge in der Durchforstungsstärke von stark zu mäßig folgen dem Wachstumsgang der Baumarten und damit dem Zuwachsreaktionsvermögen der jeweils verbleibenden Bäume eines Bestandes nach Eingriffen. Darüber hinaus werden durch die Konzentration der Eingriffe auf die herrschende Schicht sowie die positive Auslese und Förderung von Z-Bäumen die Baumkronen rechtzeitig gepflegt und ausgebaut, der Zuwachs auf die besten Bäume konzentriert, schlechte Bäume frühzeitig entnommen, die Stabilität erhöht, die Werbungskosten und das Schwachholzaufkommen gesenkt, der Unter- und Zwischenstand erhalten und gute Voraussetzungen für eine spätere Zielstärkennutzung und natürliche Verjüngung der Bestände geschaffen.

Die Anwendung der in der Ertragstafel vorgegebenen waldbaulichen Behandlung bedarf in bisher schlecht gepflegten bzw. nicht dem Konzept der gestaffelten Hochdurchforstung behandelten Beständen aufgrund der Geschichtlichkeit der Einzelbaum- und Bestandesentwicklung einer angemessenen Anpassung. So können u. a. die Grundflächenhaltungen, die mittleren Dimensionen und die Vorräte bei z. B. aufgestauten Pflegerückständen oder einer eher niederdurchforstungsartigen Behandlung von den Ertragstafelvorgaben erheblich abweichen. Gemäß den Empfehlungen in den Merkblättern zur baumartenspezifischen Behandlung und Entwicklung von Waldbeständen sollte in solchen Fällen entsprechend der jeweiligen Ausgangssituation in Richtung einer gestaffelten Hochdurchforstung gesteuert werden (vgl. NW-FVA, 2022).

4.5 Limitationen der neuen Buchen-Ertragstafel

Die neue Buchen-Ertragstafel ist für homogene, gleichaltrige und vollbestockte Reinbestände konzipiert. Folglich sind die Ertragstafelschätzungen umso ungenauer, je stärker die realen Bestände von dieser Annahme abweichen. Dies gilt zum einen für ältere Bestände mit dem Einsetzen einer gestreckten Zielstärkennutzung, in deren Zuge sie in strukturreiche und meist auch gemischte Bestände überführt werden sollen. Ihre Entwicklung kann in der Überführungsphase durch den in der neuen Buchen-Ertragstafel beschriebenen Wachstumsgang nicht mehr befriedigend beschrieben werden. Zum anderen kann es standorts- und strukturabhängig in Mischbeständen zu positiven und negativen Zuwachseffekten kommen (vgl. z. B. PRETZSCH et al., 2010; PRETZSCH et al., 2013; PRETZSCH et al., 2015; PRETZSCH und SCHÜTZE, 2015; SPRAUER und NAGEL, 2015; THURM und PRETZSCH, 2016; ZELLER und PRETZSCH, 2019). Je intensiver die jeweilige Mischungsform ist (Einzelmischung, truppweise bzw. gruppenweise Mischung), desto ungenauer sind die Ertragstafelschätzungen für

die jeweiligen ideellen Anteilflächen der Mischbaumarten. Übergangsweise kann man sich je nach Baumartenmischung mit den von PRETZSCH (2016) vorgeschlagenen Korrekturfaktoren in der Größenordnung zwischen 10 und 20 % zur Anpassung des Zuwachses der Reinbestandsertragstafeln behelfen.

Eine weitere Limitation ergibt sich aus der Tatsache, dass eine Ertragstafel nur mittlere Verläufe der ertragskundlichen Größen über dem Alter abbildet. Gerade beim Zuwachs bewirken aber Extremereignisse, wie zum Beispiel die in den letzten Jahren gehäuft aufgetretene Trockenheit, unmittelbare Verluste. Diese kurzfristigen Reaktionen des Baumwachstums können in den neuen Ertragstafeln nicht berücksichtigt werden.

Bei der praktischen Anwendung der neuen Buchen-Ertragstafel besteht zudem in Beständen, die in ihrer bisherigen Behandlung stark von einer gestaffelten Hochdurchforstung abweichen, die grundsätzliche Schwierigkeit, dass die reale Durchmesserentwicklung der Bäume nicht der in der Ertragstafel beschriebenen Entwicklung entspricht. Eine Anpassung der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes oder der Oberdurchmesser lässt sich mit Kalibrierungsmodellen, die den Bestockungsgrad als Prädiktor enthalten und somit den Durchmesser dichtesensitiv modellieren, vornehmen (STAUPENDAHL und SCHMIDT, 2016). Etwaige Differenzen im Vorrat lassen sich über eine Korrektur mit dem Bestockungsgrad und Unterschieden in den Zuwächsen über die Zuwachskorrekturfaktoren (vgl. Tab. 5) ausgleichen.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das vorgestellte Konstruktionsprinzip zur Erstellung einer vierten Generation von Ertragstafeln ist geeignet, plausible Altersverläufe ertragskundlicher Kennwerte herzuleiten und konsistente Innen- und Querbeziehungen zu gewährleisten. Am Beispiel der neuen Buchen-Ertragstafel wurde gezeigt, dass dieses bewährte Planungsinstrument mit der Abbildung des aktuellen Zuwachsniveaus und der Vorgabe einer gestaffelten Hochdurchforstung an die aktuellen Bedürfnisse der Forstpraxis angepasst wurde. Wie alle bisherigen Ertragstafeln stellen die neuen Tafeln einfache Wachstums- und Behandlungsmodelle dar, die der Forstplanung als Referenz dienen und den Forstbetrieben Orientierung geben. Aufgrund der sich fortwährend ändernden Standortbedingungen kann die neue Ertragstafelgeneration nur für Planungszeiträume bis zu 20 Jahren empfohlen werden. Eine periodische Überarbeitung der modellbasierten Ertragstafeln ist in Zeiträumen von 10 bis 20 Jahren vorgesehen, um durch eine Neuparametrisierung der Zuwachsfunktionen der klimabedingten Dynamik der Standorts-Leistungsbeziehungen und etwaiger waldbaulicher und methodischer Weiterentwicklungen Rechnung zu tragen. Eine entsprechendes Vorgehen wurde bereits von WENK et al. (1990, S. 256) gefordert.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Methodik zur Erstellung der vierten Generation von Ertragstafeln ermöglicht durch die Kombination von

empirischen Versuchsflächenbeobachtungen und Waldwachstumssimulationen die Ableitung von ertragskundlichen Kenngrößen, die dem aktuellen Zuwachsniveau entsprechen (Abb. 6) und die das von der NW-FVA empfohlene waldbauliche Behandlungskonzept einer gestaffelten Hochdurchforstung widerspiegeln (Tab. 2 und Abb. 1). Die mit einem auf empirischen Grundlagen basierenden Simulationsdatensatz parametrisierten biometrisch-statistischen Funktionen gewährleisten plausible Altersverläufe der Ertragstafelgrößen sowie konsistente Quer- und Innenbeziehungen (Tab. 3 und Abb. 3).

Für die Erstellung der neuen Buchen-Ertragstafel galten die Festlegungen, dass (a) ein mittleres Ertragsniveau für Nordwestdeutschland abgebildet wird, (b) die Tafelwerte sich nur auf den Oberstand, das ist die Gesamtheit aller Bäume, deren Höhe größer 50% der Bestandesoberhöhe H_{100} ist, beziehen, (c) der Bestockungsgrad von 1,0 über die vorgegebene Grundflächenhaltung der gestaffelten Hochdurchforstung definiert wird und (d) der Höhenwachstumsgang über einen modifizierten und funktionalisierten Bonitätsfächer auf Basis der Alters-Oberhöhenverläufe der Buchen-Ertragstafel von SCHÖBER (1967) abgebildet wird. Aufgrund der verwendeten Versuchsflächendaten aus dem gesamten Zuständigkeitsbereich der NW-FVA hat die Buchen-Ertragstafel einen räumlichen Gültigkeitsbereich für Nordwestdeutschland. Die Dynamik der Standortsveränderungen, hier durch eine Neuparametrisierung der Zuwachsfunktionen in TreeGrOSS berücksichtigt, lässt es ratsam erscheinen, die Ertragstafeln nur für Planungszeiträume von bis zu 20 Jahren anzuwenden.

Am Beispiel der neuen Buchen-Ertragstafel wird aufgezeigt, welche Veränderungen sich im Vergleich zur etablierten Buchen-Ertragstafel von SCHÖBER (1967) ergeben haben. Das wesentlich höhere aktuelle Zuwachsniveau führt bei einer ähnlichen Vorratshaltung zu deutlich höheren Vornutzungsmassen (Abb. 4 und Abb. 5). Die gestaffelte Hochdurchforstung mit einer konsequenten Förderung einer bemessenen Zahl an Z-Bäumen schlägt sich in stärkeren Dimensionen sowohl des verbleibenden als auch des ausscheidenden Bestandes nieder (Abb. 5).

Die Anwendung der Buchen-Ertragstafel ist streng genommen auf gleichaltrige Reinbestände beschränkt. Ihre Aussagekraft nimmt ab, je struktureicher und gemischerter ein Buchenbestand ist und je stärker sich die Standortbedingungen weiter verändern. Um diese Dynamik zu berücksichtigen und die Integration neuer Daten und Erkenntnisse zu gewährleisten, ist vorgesehen, in Zeitintervallen von 10 bis 20 Jahren Neuparametrisierungen der Zuwachsfunktionen durchzuführen und die Ertragstafelwerte zu überarbeiten.

7. SUMMARY

Title of the paper: *Methodological concept for a fourth generation of yield tables illustrated through the example of European beech.*

The methodological concept of the fourth yield table generation combines empirical data from long-term yield

trials and growth simulations based on a single-tree growth simulator. This approach allows to derive growth and yield parameters which are in line with the current increment level (fig. 6) and which represent the recommended silvicultural treatment of a graduated thinning from above (tab. 2 and fig. 1). A system of biometrical-statistical functions is parameterized with the growth simulation data which originated on the grounds of the empirical observations. This system of functions warrants biologically feasible age trends of the yield table parameters as well as consistent relationships between interdependent parameters (tab. 3 and fig. 3).

The following specifications were established for the derived new beech yield table: (a) we assume a mean yield level for northwestern Germany, (b) the yield table refers to the upper stand layer, i.e. all trees which are higher than 50% of the top stand height H_{100} , (c) the stocking degree of 1.0 is defined by the basal area of the underlying concept of a graduated thinning from above, and (d) the height-age-relationship is defined using modified site index functions based on the established beech yield table by SCHÖBER (1967). The spatial validity range covers northwestern Germany as the utilized long-term yield trials are located predominantly in the jurisdiction of the Northwest German Forest Research Institute. The rapidly changing site conditions were taken into account by parameterizing the growth functions of the single-tree growth simulator TreeGrOSS using experimental data from the observation period 1970 to today, thus representing the current increment level. However, we advise to apply the new yield tables only for planning periods of up to 20 years due to future dynamics in site conditions.

Comparing the new beech yield table to the well-established and still nowadays widely used beech yield table by SCHÖBER (1967) reveals the differences. Today's significantly higher increment level with a similar prescribed standing volume in both tables results in higher harvested volume in the new table (fig. 4 and fig. 5). The silvicultural concept of a graduated thinning from above supporting selected crop trees leads to significantly higher dimensions of standing as well as harvested stems (fig. 5).

Strictly speaking, the new beech yield table should only be applied to even-aged pure beech stands. Its validity decreases with increasing structural and tree species diversity as well as with accelerating site changes. A re-parameterization of the growth simulator's increment functions and a revision of the yield table is planned in 10 to 20 year time intervals. This procedure will account for site dynamics and aims to integrate new empirical data and new findings in the fields of forest growth and management.

8. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Principe de construction d'une nouvelle génération de tables de production expliqué avec l'exemple de l'espèce hêtre.*

La méthode d'élaboration de la quatrième génération de tables de production permet, grâce à la combinaison d'observations empiriques de placettes expérimentales et

de simulations de croissance forestière, de déduire des valeurs de production qui correspondent au niveau d'accroissement actuel (fig. 6) et reflètent le concept d'intervention sylvicole recommandé par la NW-FVA, à savoir une éclaircie par le haut et graduelle (tab. 2 et fig. 1). Un système de fonctions biométriques et statistiques est paramétré avec les données de simulation de croissance qui proviennent des observations empiriques. Ce système de fonctions permet de justifier les tendances d'âge biologiquement réalisables des paramètres de la table de production ainsi que les relations cohérentes entre les paramètres interdépendants (tab. 3 et fig. 3).

Pour l'élaboration de la nouvelle table de production du hêtre, il a été décidé que (a) un niveau de production moyen pour le nord-ouest de l'Allemagne serait représenté, (b) les valeurs de la table se réfèreraient uniquement à la strate dominante, c'est-à-dire à l'ensemble des arbres dont la hauteur est supérieure à 50% de la hauteur maximale du peuplement H_{100} , (c) le degré de recouvrement de 1,0 est défini par le concept de la surface terrière de l'éclaircie par le haut et graduelle et (d) la relation hauteur-âge est définie en utilisant des fonctions d'indice de fertilité modulées basées sur la table de production du hêtre établi par SCHOBER (1967). Le domaine de validité spatiale couvre le nord-ouest de l'Allemagne, car les essais de production à long terme utilisés sont situés principalement dans la circonscription de la Station de recherche forestière du nord-ouest de l'Allemagne. La dynamique des changements rapides de stations a été prise en compte en paramétrant les fonctions de croissance à l'aide du seul simulateur de croissance d'arbre TreeGROSS en utilisant des données expérimentales de la période d'observation 1970 à aujourd'hui, a permis ainsi de représenter le niveau d'accroissement actuel. Cependant, nous conseillons d'appliquer les nouvelles tables de production uniquement pour des périodes de planification allant jusqu'à 20 ans en raison de la dynamique future des conditions stationnelles.

L'exemple de la nouvelle table de production du hêtre montre les changements intervenus par rapport à la table de production du hêtre établie par SCHOBER (1967). Le niveau actuel d'accroissement nettement plus élevé, pour un volume sur pied décrit comme identique dans les deux tableaux, se traduit par un volume récolté plus élevé dans la nouvelle table (fig. 4 et fig. 5). Le concept sylvicole d'une éclaircie par le haut et graduelle en aidant des arbres d'avenir sélectionnés conduit à des dimensions nettement plus élevées des tiges sur pied et des tiges récoltées (fig. 5).

L'utilisation de la table de production du hêtre est strictement limitée à des peuplements monospécifiques équiennes. Sa pertinence diminue à mesure qu'un peuplement de hêtres est plus structuré et plus mélangé et que les conditions stationnelles continuent de se modifier. Afin de tenir compte de cette dynamique et de garantir l'intégration de nouvelles données et connaissances, il est prévu d'effectuer de nouveaux paramétrages des fonctions d'accroissement à des intervalles de 10 à 20 ans et de réviser les valeurs de la table de production.

9. DANKSAGUNG

Den beiden anonymen Gutachtern danken wir für die hilfreichen Kommentare.

Das diesem Artikel zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (Förderkennzeichen 22027816) von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

10. LITERATUR

- ALBERT, M. und M. SCHMIDT (2010): Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). Forest Ecology and Management, **259(4)**, S. 739–749. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.04.039>
- ALBERT, M., J. NAGEL, M. SCHMIDT, R.-V. NAGEL und H. SPELLMANN (2021): Eine neue Generation von Ertragstabellen für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer [Datensatz]. Version 1.1. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6827728>
- ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde. BLV Verlagsgesellschaft München. 490 S.
- ASSMANN, E. und F. FRANZ (1963): Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. Institut für Ertragskunde der Forstlichen Forschungsanstalt. München.
- BAUR, F. v. (1877): Die Fichte in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form. Springer-Verlag, Berlin. 58 S.
- BÖCKMANN, TH. (1990): Wachstum und Ertrag der Winterlinde (*Tilia cordata* Mill.) in Niedersachsen und Nordhessen. Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität Göttingen. 143 S.
- BÖCKMANN, T. (2004): Möglichkeiten und Grenzen von Waldwachstumssimulatoren aus Sicht der forstlichen Praxis. In: M. HANEWINKEL und K. VON TEUFFEL (Eds.), Waldwachstumsmodelle für Prognosen in der Forsteinrichtung (S. 95–102). Freiburger Forstliche Forschung, Band 50.
- BOISVENUE, C. und S. W. RUNNING (2006): Impacts of climate change on natural forest productivity – Evidence since the middle of the 20th century. Global Change Biology, **12(5)**, S. 862–882. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x>
- BRYNDUM, H. (1987): Buchendurchforstungsversuche in Dänemark. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, **158(7/8)**, S. 115–121.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (Hsg.) (2016): Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2012. 280 S.
- COTTA, H. (1821): Hülftabellen für Forstwirthe und Forsttaxatoren. Dresden.
- ECKMÜLLNER, O. (2009): Eichen-ertragstafel für Ostösterreich – für Hochwald und Mittelwald. Landwirtschaftskammer Niederösterreich, Umweltdaten, 28
- ECKMÜLLNER, O. und S. VOSPERNIK (2005): Neue Fichten-ertragstabellen für Nord- und Osttirol. Austrian Journal of Forest Science, **122, 3**, S. 136–162
- FLECK, S., B. AHREND, J. SUTMÖLLER, M. ALBERT, J. EVERS und H. MEESENBURG (2017): Is Biomass Accumulation in Forests an Option to Prevent Climate Change Induced Increases in Nitrate Concentrations in the North German Lowland? Forests, **8(219)**. <https://doi.org/10.3390/f8060219>

- GADOW, K. VON und J. PUUMALAINEN (2002): Scenario planning for sustainable forest management. In: K. VON GADOW, T. PUKKALA und M. TOMÉ (Eds.), Sustainable Forest Management (S. 319–356). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- GANGHOFER, A. (1877): Das forstliche Versuchswesen. Band 1. Augsburg. Selbstverlag
- GEHRHARDT, E. (1923): Ertragstabellen für Eiche, Buche, Tanne, Fichte und Kiefer. Berlin: Springer.
- GERTNER, G. (1987): Approximating Precision in Simulation Projections: An Efficient Alternative to Monte Carlo Methods. *Forest Science*, **33**(1), S. 230–239.
- HANSEN, J., und J. NAGEL (2014): Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS – Anwendung und theoretische Grundlagen. H. SPELLMANN, (Ed.): Beiträge aus der Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Band 11. Universitätsdrucke Göttingen. 224 S.
- HASENAUER, H. (2006): Sustainable Forest Management. Growth Models for Europe. (H. HASENAUER, Ed.). Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 398 S.
- JÜTTNER, O. (1955): Ertragstafel für Eiche (mäßige und starke Durchforstung). SCHÖBER, R. (Hsg.): Ertragstabellen wichtiger Baumarten. 4. Aufl., Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's Verlag, 1995.
- KAHN, M. und H. PRETZSCH (1997): Das Wachstumsmodell SILVA-Parametrisierung der Version 2.1 für Rein- und Mischbestände aus Fichte und Buche. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, **168**(6/7), S. 115–123.
- KINDERMANN, G. (2017): Erstellung von Oberhöhenfächern bei variablen Standortverhältnissen. In: KOHNLE, U. und KLÄDTKE, J. (Hsg.) DVFFA Tagungsband Ertragskunde: S. 95–109.
- KRAMER, H. und A. AKÇA (1987): Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur. 2. Auflage. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main: 287 S.
- LASCH-BORN, P., F. SUCKOW, M. GUTSCH, C. REYER, Y. HAUF und T. PILZ (2015): Forests under climate change: potential risks and opportunities. *Meteorologische Zeitschrift*, **24**(2), S. 157–172. <https://doi.org/10.1127/metz/2014/0526>
- LEMM, R. (2004): Ein Modell für alle Fälle – einfache, alternative Simulationsmodelle. In: M. HANEWINKEL und K. VON TEUFFEL (Eds.), Waldwachstumsmodelle für Prognosen in der Forsteinrichtung (S. 32–48). Freiburger Forstliche Forschung, Band 50.
- LOCKOW, K.-W. (2003): Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.) im norddeutschen Tiefland. Ertragstafel. Landesforstanstalt Eberswalde.
- LOCKOW, K.-W. und M. NOACK (2021): Ertragstafel für Douglasie. Verlag Kessel. 49 S.
- MELLERT, K. H., J. PRIETZEL, R. STRAUSSBERGER, K. E. REHFUESS, H.-P. KAHLE, P. PEREZ und H. SPIECKER (2008): Relationships between long-term trends of air temperature, precipitation, nitrogen nutrition and growth of coniferous stands in Central Europe and Finland. *European Journal of Forest Research*, **127**(6), S. 507–524. <https://doi.org/10.1007/s10342-008-0233-7>
- NAGEL, R.-V. (2007): Bestandesentwicklung, Einzelbaumwachstum und Qualitätsentwicklung von Stiel- und Traubeneichenbeständen in Nordwestdeutschland unter dem Einfluss unterschiedlicher Durchforstungsstärken. In: NAGEL, J. (Hrsg.), DVFFA Tagungsband Ertragskunde: S. 114–132.
- NAGEL, R.-V. und H. SPELLMANN (2008): Wachstum, Behandlung und Ertrag von Reinbeständen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in Nordwestdeutschland. In Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Ed.), Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Band 3. Universitätsdrucke Göttingen. S. 221–266.
- NDS. MIN. F. ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT U. VERBRAUCHERSCHUTZ (2019): Programm LÖWE+, Niedersächsisches Programm zur langfristigen ökologischen Waldentwicklung in den Landesforsten, Eigenverlag: 35 S.
- NOTHDURFT, A., T. WOLF, A. RINGELER, J. BÖHNER und J. SABOROWSKI (2012): Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. *Forest Ecology and Management*, **279**, S. 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.018>
- NUSKE, R., K. Staupendahl und M. Albert (2022): et.nwfv: Forest Yield Tables for Northwest Germany and their Application (0.1.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7207597>
- NW-FVA (2022): Merkblätter, Entscheidungshilfen und Leitfäden. Zugriff am 23.03.2022 auf <https://www.nw-fva.de/veroeffentlichen/merkblaetter>
- PAULSEN, J. CH. (1795): Praktische Anweisung zum Forstwesen. Detmold.
- PRETZSCH, H. (1992): Zunehmende Unstimmigkeit zwischen erwartetem und wirklichem Wachstum unserer Waldbestände. *Forstw. Cbl.* **111**: S. 366–382.
- PRETZSCH, H. (2005): Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence from long-term experimental plots. *European Journal of Forest Research*, **124**: S. 193–205. <https://doi.org/10.1007/s10342-005-0068-4>
- PRETZSCH, H. (2016): Ertragstafel-Korrekturfaktoren für Umwelt- und Mischungseffekte. *AFZ-Der Wald*, **14**: S. 47–50.
- PRETZSCH, H., P. BIBER und J. DURSÝ (2002): The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*, **162**: S. 3–21.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, G. SCHÜTZE, E. UHL und T. RÖTZER (2014a): Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications*, **5**, 4967. <https://doi.org/10.1038/ncomms5967>
- PRETZSCH, H., P. BIBER, G. SCHÜTZE und K. BIELAK (2014b): Changes of forest stand dynamics in Europe. Facts from long-term observational plots and their relevance for forest ecology and management. *Forest Ecology and Management*, **316**: S. 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.050>
- PRETZSCH, H., K. BIELAK, J. BLOCK, A. BRUCHWALD, J. DIELER, H. P. EHRHART, U. KOHNLE, J. NAGEL, H. SPELLMANN, M. Zasada und A. Zingg (2013): 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. *European Journal of Forest Research*, **132**(2), S. 263–280. <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0673-y>
- PRETZSCH, H., J. BLOCK, J. DIELER, P. H. DONG, U. KOHNLE, J. NAGEL, H. SPELLMANN und A. ZINGG (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., M. DEL RÍO, C. AMMER, A. AVDAGIC, O. BARBEITO, K. BIELAK, G. BRAZAITIS, L. COLL, G. DIRNBERGER,

- L. DRÖSSLER, M. FABRIKA, D. I. FORRESTER, K. GODVOD, M. HEYM, V. HURT, V. KURYLYAK, M. LÖF, F. LOMBARDI, B. MATOVIĆ, F. MOHREN, R. MOTTA, J. DEN OUDEN, M. PACH, Q. PONETTE, G. SCHÜTZE, J. SCHWEIG, J. SKRZYSZEWSKI, V. SRAMEK, H. STERBA, D. STOJANOVIĆ, M. SVOBODA, M. VANHELLEMONT, K. VERHEYEN, K. WELLHAUSEN, T. ZLATANOV und A. BRAVO-OVIEDO (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. *European Journal of Forest Research*, **134**(5), S. 927–947. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0900-4>
- PRETZSCH, H. und G. SCHÜTZE (2015): Effect of tree species mixing on the size structure, density, and yield of forest stands. *European Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0913-z>
- PRODAN, M. (1965): Holzmesslehre. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main. 644 S.
- PUKKALA, T. und J. MIINA (2006): STAND: A Decision Support System for the Management of Even-Aged Stands in Finland. In: H. HASENAUER (Ed.), *Sustainable Forest Management. Growth Models for Europe*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. S. 85–92
- RÖHE, P., K.-W. LOCKOW und M. NOACK (2019): Ertragstafel für die Stieleiche (*Quercus robur* L.). Landesforst Mecklenburg-Vorpommern (Hg.). cw Nordwest Media Verlagsgesellschaft.
- SCHLUHE, M., H. ENGLERT, R. WÖRDEHOFF, M. SCHULZ, M. DIETER und B. MÖHRING (2018): Klimarechner zur Quantifizierung der Klimaschutzleistung von Forstbetrieben auf Grundlage von Forsteinrichtungsdaten. *Landbau-forschung, Appl Agric Forestry Res.* 1–20.
- SCHMIDT, M. (2020): Standortsensitive und kalibrierbare Bonitätsfächer?: Wachstumspotenziale wichtiger Baumarten unter Klimawandel. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, **190**(5/6), S. 136–160.
- SCHOBBER, R. (1967): Ertragstafel für die Baumart Buche (mäßige und starke Durchforstung). SCHOBBER, R. (Hg.): *Ertragstafeln wichtiger Baumarten*. 4. Aufl., Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's Verlag, 1995.
- SCHOBBER, R. (1975): *Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung*. Neubearb. Frankfurt a. M., J.D. Sauerländer's Verlag.
- SCHOBBER, R. (1995): *Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung*. 4. Aufl. Frankfurt am Main., J.D. Sauerländer's Verlag.
- SCHWAPPACH, A. (1912): *Ertragstafeln der wichtigsten Holzarten: in tabellarischer und graphischer Form*. Neudamm: Neumann.
- SEYNAVE, I., J.-C. GÉGOUT, J.-C. HERVÉ, J. DRAPIER, E. BRUNO und G. DUMÉ (2005): *Picea abies* site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases. *Canadian Journal of Forest Research*, **35**, S. 1669–1678. <https://doi.org/10.1139/X05-088>
- SMITH, S. J., J. EDMONDS, C. A. HARTIN, A. MUNDRA und K. CALVIN (2015): Near-term acceleration in the rate of temperature change. *Nature Climate Change*, **5**: S. 333–336. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2552>
- SLOBODA, B. (1971): Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung. Mitteilungen der Baden-Württembergischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt, Heft 32. 108 S.
- SPELLMANN, H. und J. NAGEL (1996): Zur Durchforstung von Fichte und Buche. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, **167**. Jg., S. 6–15
- SPELLMANN, H. (2001): Bewirtschaftung der Eiche auf der Grundlage waldwachstumskundlicher Untersuchungen in Nordwestdeutschland. *Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie*, Bd. **35**, S. 145–152
- SPELLMANN, H. (2002): Waldbauliche Perspektiven für die niedersächsische Kiefernwirtschaft. *Forst u. Holz*, **57**. Jg., Heft 3, S. 71–76.
- SPELLMANN, H. (2004): Ursachen-Wirkungs-Beziehungen am Beispiel der Douglasie, waldwachstumskundliche Entscheidungshilfen für Waldbewirtschaftung und Forstplanung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, **175**. Jg., S. 142–150.
- SPELLMANN, H. (2008): Die Kiefer – ein Auslaufmodell? – Beiträge für eine zielgerichtete Entwicklung. In: Nordwestdt. Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.): *Die Waldkiefer – Fachtagung zum Baum des Jahres 2007*. Beiträge aus der Nordwestdt. Forstl. Versuchsanstalt, Band 2. Universitätsdrucke Göttingen: S. 63–78.
- SPIECKER, H., K. MIELIKÄINEN, M. KÖHL und J. P. SKOVSGAARD (1996): *Growth Trends in European Forests*. European Forest Institute Research Report No. 5, Springer: 372 S.
- SPRAUER, S. und J. NAGEL (2015): Aboveground productivity of pure and mixed Norway spruce and European beech stands. *Eur. J. For. Res.* **134**, S. 781–792.
- SPRAUER, S. und J. NAGEL (2018): Neuparametrisierung des Grundflächenzuwachsmodells in TreeGrOSS mit Versuchsflächendaten ab 1970. NW-FVA unveröffentlicht.
- STAUPENDAHL, K. (2021a): Mit der Hossfeld-, Sloboda- und Chapman-Richards-Funktion geschätzte Bonitätsfächer auf Basis der Daten der Ertragstafelsammlung Schober. R package, unveröffentlicht.
- STAUPENDAHL, K. (2021b): Mit der Hossfeld-, Sloboda- und Chapman-Richards-Funktion geschätzte stehende Vorräte, Durchmesser des Grundflächenmittelstammes und Durchmesser des Weise'schen Oberhöhenstammes auf Basis der Simulationsdaten für die Ertragstafelerstellung. R Funktionen, unveröffentlicht.
- STAUPENDAHL, K. und M. SCHMIDT (2016): Kalibrierung der Ertragstafeln für die Hauptbaumarten in Hessen mithilfe der Daten der Bundeswaldinventur. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, **187**(9/10), S. 197–216.
- STERBA, H. und R. A. MONSERUD (1997): Applicability of the forest stand growth simulator PROGNAUS for the Austrian part of the Bohemian Massif. *Ecological Modelling*, **98**: S. 23–34.
- THURM, E. A. und H. PRETZSCH (2016): Improved productivity and modified tree morphology of mixed versus pure stands of European beech (*Fagus sylvatica*) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) with increasing precipitation and age. *Annals of Forest Science*. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0588-8>
- VANCLAY, J. K. und J. P. SKOVSGAARD (1997): Evaluating Forest Growth Models. *Ecological Modelling*, **98**, S. 1–12.
- VON TEUFFEL, K., S. HEIN, M. KOTAR, E. PINTO Preuhsler, J. PUUMALAINEN und P. WEINFURTER (2006): End User Needs and Requirements. In: H. HASENAUER (Ed.), *Sustainable Forest Management. Growth Models for Europe*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: S. 19–38.

- VOSPERNIK, S., R. A. MONSERUD und H. STERBA (2015): Comparing individual-tree growth models using principles of stand growth for Norway spruce, Scots pine, and European beech. *Canadian Journal of Forest Research*, **45**: S. 1006–1018. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0394>
- WARING, R. H. und N. MCDOWELL (2002): Use of a physiological process model with forestry yield tables to set limits on annual carbon balances. *Tree Physiology*, **22**(2–3): S. 179–188. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.2-3.179>
- WENK, G., K. RÖMISCH und D. GEROLD (1984): DDR-Fichtenenertragstafel. Dresden, Agrarwiss. Ges. d. DDR.
- WENK, G., V. ANTANAITIS und Š. ŠMELKO (1990): Wald-ertragslehre. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin. 448 S.
- WIEDEMANN, E. (1936/42): Ertragstafel für die Baumart Fichte (mäßige, starke und gestaffelte Durchforstung). In: SCHOBER, R. (Hg.): Ertragstabellen wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 4. Aufl., Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's Verlag, 1995.
- WIEDEMANN, E. (1937). Die Fichte 1936. Teil 2: Die Durchforstung und Lichtung, die neuen Ertragstabellen für verschiedene Durchforstung, die ständörtlichen Untersuchungen, Zusammenfassung. *Mitt. Forstw. Forstwiss.*, **8**: S. 103–336.
- WIEDEMANN, E. (1949): Ertragstabellen der wichtigen Holzarten bei verschiedener Durchforstung. Hannover: Verlag M & H Schaper.
- WOLLBORN, P. und T. BÖCKMANN (1998): Ein praktikables Modell zur Strukturierung des Vorrates aus Ertragstafelschätzungen. *Forst und Holz*, **53**(18), S. 547–550.
- WUTZLER, T. und M. MUND (2007): Modelling mean above and below ground litter production based on yield tables. *Silva Fennica*, **41**(3), S. 559–574. <https://doi.org/10.14214/sf.289>
- ZELLER, L. und H. PRETZSCH (2019): Effect of forest structure on stand productivity in Central European forests depends on developmental stage and tree species diversity. *Forest Ecology and Management*, **434**: S. 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.024>