

forstarchiv 87, 107-120
(2016)

DOI 10.4432/0300-
4112-87-107

© DLV GmbH

ISSN 0300-4112

Korrespondenzadresse:
Andreas.Weller@
nw-fva.de

Eingegangen:
02.11.2015

Angenommen:
06.05.2016

Vergleich von Buchen-Durchforstungskonzepten bezüglich des dimensions- und altersabhängigen Rotkernrisikos basierend auf simulierten Z-Baum-Durchmessern

Comparison of thinning regimes for common beech concerning to the dimension and age dependent risk of beech heart based on simulated future crop tree diameters

ANDREAS WELLER

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Grätzelstraße 2, 37079 Göttingen, Deutschland

Kurzfassung

Der Vergleich verschiedener Durchforstungskonzepte für Buche (*Fagus sylvatica* L.) fokussiert im Rahmen einer Kombination aus empirischen Versuchsflächendaten und darauf aufbauenden Modellrechnungen auf das Radial- und Durchmesserwachstum der Z-Bäume. Folgende Fragen stehen im Mittelpunkt: (1) Wie reagiert der Radialzuwachs im Rahmen der Jungdurchforstungen in einer Bestandesentwicklungsphase mit dem höchsten Zuwachsvermögen auf die standraumerweiternden Eingriffe? (2) Wie wirkt sich die modellhafte Abbildung der Behandlungsvarianten auf das Erreichen eines Zieldurchmessers von 60 cm und damit auf das Risiko bezüglich des fakultativen Buchenrotkerns aus? (3) Wie lassen sich potenzielle Durchmesserleistungen der Buche auf leistungsfähigen Standorten in Nordwestdeutschland abhängig von der Behandlung modellbasiert abschätzen?

Der Farbkern bei Buche ist durchmesser- bzw. altersabhängig und führt zu einer Wertminderung des Rohholzes. Ab einer Durchmesser-/Altersgrenze von etwa 60 cm bzw. 120 Jahren nimmt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten sortierrelevanter Kernmerkmale zu. Die Auswertung basiert auf 3 Buchen-Durchforstungsversuchen, die zwischen 2002 und 2005 auf leistungsfähigen Standorten in nordwestdeutschen Mittelgebirgen angelegt wurden. Die definierten Durchforstungen umfassen 2 Gruppen bezüglich der grundlegenden waldbaulichen Vorgehensweise: Die Lichtwuchsdurchforstung nach den Grundsätzen der Waldbaustrategie „Qualifizieren – Dimensionieren“ (QD-Strategie) und die Z-Baum-orientierte Ausleседurchforstung (ZB-Adf.) konzentrieren sich ausschließlich auf die Förderung und das Wachstum der Ausleseebäume, während die Hochdurchforstungen (E-Grade) auch die Zwischenfelder behandeln. Die QD-Strategie legt zudem eine sehr geringe Z-Baumzahl je Flächeneinheit zugrunde.

Der Einfluss der unterschiedlichen Behandlungen auf den Radialzuwachs der Ausleseebäume in Brusthöhe (1,3 m) wird anhand bisher vorliegender empirischer Zeitreihendaten beurteilt: Die Lichtwuchsdurchforstung führt nach 2 Durchforstungsdurchgängen zu einem überlegenen Radialzuwachs.

Die für höhere Alter projizierte Durchmesserentwicklung der Z-Bäume basiert auf der Bibliothek TreeGrOSS (Tree Growth Open Source Software; Nagel 2009). Die Simulationen umfassen Zeiträume bis zu 90 Jahren. Die Steigung der Durchmesserentwicklungslinien ($D_{1,3}$) nimmt auch bei der intensiven Lichtwuchsdurchforstung in höheren Baumaltern ab, daher führt nur ein früher Durchforstungsbeginn zu den gewünschten Zuwachssteigerungen. Nur auf sehr guten nordwestdeutschen Standorten (absolute Oberhöhenbonität im Alter 100 Jahre ≥ 39 m) erreichen nahezu alle Z-Bäume bis zu einem Alter von etwa 130 Jahren bei konsequenter Lichtwuchsdurchforstung den Zieldurchmesser von 60 cm, mit einem entsprechend geringen dimensionsabhängigen Rotkern-Entwertungsrisiko. Durch das QD-Konzept unterstellte Durchmesserleistungen ($D_{1,3}$) der Buche von 80 cm und mehr in Zeiträumen von 110 bis 120 Jahren werden durch das Wachstumsmodell selbst auf sehr guten nordwestdeutschen Standorten nicht projiziert.

Schlüsselwörter: *Fagus sylvatica*, Durchforstungsversuche, Durchforstungsstrategie, Wachstumsmodell, Zieldimension, Buchenrotkern

Abstract

The comparison of various thinning regimes for beech (*Fagus sylvatica* L.) is focused on empirical as well as simulated radial and diameter increment of selected trees. The following questions are dealt with: (1) What effects do several stand tending measures have on radial increment within the framework of young stand thinning during a stand development phase with the highest increment capacity? (2) What is the effect of a modelled image of thinning variants on the attainment of a target diameter of 60 cm or rather on the age related risk of beech heart? (3) In how far is it possible to make model-based predictions of beech trunk increment on highly productive sites in northwestern Germany as a result of the applied thinning regimes?

The possibility of duramenisation of beech is dependent on trunk diameter and age respectively and leads to a decline in timber value. From a diameter of 60 cm upwards, respectively beyond an age limit of 120 years, there is an increased probability of a negative effect on timber grading. The present assessment is based on 3 thinning experiments carried out between 2002 and 2005 on good to very good sites in low mountain ranges of northwestern Germany. The defined thinning experiments encompass 2 groups regarding basic forest management procedure. Accretion thinning according to the principles of the forest management strategy 'Qualify – Dimension' (abbr. QD-strategy) and future crop tree oriented selective thinning concentrate exclusively on the growth and furtherance of selected trees (z-stems), while crown thinning with designated future

crop trees also entails treatment of the intermediate spaces. The QD-strategy moreover is based on a limited amount of future crop trees per unit area. The influence of the various regimes on radial increment of the selected trees at breast height (1.3 m) is assessed using empirical time series data: accretion thinning leads to higher radial increment after two applications. The simulation of the diameter development of the individual trees based upon the TreeGrOSS-library (Tree Growth Open Source Software; Nagel 2009). The simulations comprise periods up to 90 years. The slope of diameter development lines (DBH) becomes shallower with increasing tree age, even with intensive accretion thinning. Thus, asked increment will only occur, if thinning measure is carried out from an early stage. Only on capable sites in northwestern Germany (absolute stand top height site class at the age of 100 years ≥ 39 m) will nearly all future crop trees up to an age of approximately 130 years attain the target diameter of 60 cm, with an accordingly lower size-related beech heart devaluation risk. The DBH-achievements of beech suggested by the QD-concept of 80 cm-plus for periods ranging from 110 to 120 years are not projected by the growth model, even on highly productive sites in northwestern Germany.

Key words: *Fagus sylvatica*, thinning experiments, thinning regime, growth model, exploitable size, beech heart

Einleitung

Die Buche hat ihren Verbreitungsschwerpunkt in Mitteleuropa. In Deutschland nimmt sie mit ca. 1,7 Mio. Hektar Bestandesfläche 15,4 % der Waldfläche ein (BMEL 2014) und ist damit auch vom Einschlagsvolumen her die wichtigste Laubbaumart (DFWR 2006, Statistisches Bundesamt 2015). Vor dem Hintergrund des Klimawandels wird der Buche aufgrund ihrer weiten ökologischen Amplitude eine zunehmende Bedeutung beigemessen (Felbermeier 1993, Kölling et al. 2005, Suttmöller et al. 2008).

Die Durchforstungsphase ist in Buchenbeständen von entscheidender Bedeutung in Bezug auf die potenzielle Wertleistung, Betriebssicherheit und den Erhalt von Mischbaumarten. Waldbauliches Ziel der Buchenbewirtschaftung ist eine Produktion wertvollen Holzes durch eine entsprechende Bestandesbehandlung (z. B. Niedersächsische Landesforsten 1997, Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt 2004, Hessen-Forst 2008, Landesbetrieb SaarForst 2008, Landesforsten Rheinland-Pfalz 2010). Wertvolles Buchenholz zeichnet sich neben ausreichender Dimension und Astreinheit durch einen weißkernigen Holzkörper aus. Physiologische Prozesse im Holz der Buche führen ab Stammdurchmessern zwischen 35 und 40 cm zu einer Verthyllung der Parenchymzellen und damit zur Voraussetzung der fakultativen Verkernung (Zycha 1948). Die Disposition zur Kernbildung hängt somit von der Stammdimension ab, das Risiko, dass es tatsächlich zu einem Farbkern kommt, nimmt mit der Länge des Zeitraumes zu, in dem Luftsauerstoff durch bereits vorhandene (z. B. Zwiesel) oder sich neu öffnende Eintrittspforten (z. B. stärkere absterbende Äste) ins Holz eindringen und zu einer Oxidation von Zellinhaltsstoffen und damit zu einer Farbveränderung der parenchymatischen Holzteile führen kann (sogenannter Buchenrotkern) (Johann 1996). Ab einem Altersgrenzwert von ca. 120 Jahren steigt die Wahrscheinlichkeit sortierrelevanter Kernmerkmale stark an (Freist 1962, Walter und Kučera 1991, Johann 1996, Hupfeld et al. 1997, Knoke und Schulz-Wenderoth 2001, Schmidt et al. 2011, Kohnle et al. 2014). Das Rotkernrisiko ist darüber hinaus standortabhängig und auf Kalk- und Basaltstandorten erhöht (Schmidt et al. 2011). Rotkerniges, ansonsten aber hochwertiges Buchenstammholz wird mit deutlichen Preisabschlägen bewertet (BML 1969, Seeling 1991, Hapla und Steinfatt 2001, Schmidt et al. 2011, DFWR und DHWR 2015). Noch negativer wirkt sich der Spritzkern auf das Sortierverhalten bei Buchenstammholz aus (Sachse 1991), da bei diesem Kerntyp eine besonders ausgeprägte Thyllenbildung und eine bereits beginnende Holzersetzung auftritt (Nečesný 1958a, 1958b). Die waldbaulichen Leitbilder vieler Landesforsten berücksichtigen diesen Sachverhalt und gehen von technischen Erntedurchmessern ($D_{1,3}$) von 60 cm aus (z. B. Niedersächsische Landesforsten 1997, Thüringer Ministerium

für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt 2004, Landesbetrieb SaarForst 2008, Landesforsten Rheinland-Pfalz 2010), da unterhalb einer Durchmesser-/Altersgrenze von etwa 60 cm und 120 Jahren eine Entwertung durch Rotkern kaum zu befürchten ist (Klädtko 2002).

Seit dem Jahr 1999 wird die waldbauliche Behandlung der Buche intensiv diskutiert (u. a. Freise und Spieker 1999, Utschig 2000, Guericke 2002, Klädtko 2002, Nagel und Spellmann 2008). Anlass dazu gab die Waldbaustrategie „Qualifizieren – Dimensionieren“ (Letter 1999, Wilhelm et al. 1999a, 1999b, 1999c, 1999d), in deren Mittelpunkt die ausschließliche Förderung vergleichsweise weniger Z-Bäume steht (maximal 40 Ausleseebäume ha^{-1} auf einem Hochleistungsstandort; Landesforsten Rheinland-Pfalz 2009). Die QD-Strategie unterstellt weiterhin Durchmesserleistungen von 80 cm und mehr in Produktionszeiträumen von 110 bis 120 Jahren (Wilhelm et al. 1999a, 1999d, 2001).

Zwischen 2002 und 2005 wurden vor dem Hintergrund dieser Diskussion 3 durch die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) koordinierte Buchen-Durchforstungsversuche in den Ländern Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen angelegt, die erstmals auch die QD-Strategie umfassen und welche die Diskussion auf eine quantifizierbare Grundlage stellen.

Material und Methoden

Drei Durchforstungsversuche, angelegt in Buchenbeständen mit geringen Anteilen von Gemeiner Esche (*Fraxinus excelsior* L.), Stieleiche (*Quercus robur* L.) und Traubeneiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) in einzelbaumweiser Mischung mit Grundflächenanteilen bis zu 4 %, bilden die Grundlage für eine langfristige Simulation der Baumdurchmesser.

Lage, Standort und Klima der Versuchsorte

Die Buche bevorzugt physiologisch tiefgründige, nährstoffreichere, schwach saure bis gut basenversorgte (kalkreiche), mäßig podsolierte Sand- bis Lehmböden. Sie ist an temperate Klimate mit Jahresniederschlägen über 500 mm (Felbermeier 1993) und Jahresdurchschnittstemperaturen zwischen 4,0 °C und 9,5 °C gebunden (Englisch 2006, Rudow 2014). Das Klima der dieser Auswertung zugrunde liegenden Versuchsorte ist aufgrund der langfristigen Kennwerte schwach subatlantisch getönt. Tabelle 1 vermittelt einen Überblick über die klimatischen Verhältnisse der Versuchsorte.

Tab. 1. Klimatische Basisdaten der zugrunde liegenden Durchforstungsversuche.
Basic site-relevant climatic data of the underlying thinning experiments.

Kennwerte	Bleicherode-Südharz 701a	Lahnstein 9a	Saarforst 1668a
Anzahl Parzellen (insgesamt/in die Auswertung einbezogen)	6/5	7/6	6/5
Lage (Koordinaten)	51.5752 N/10.8524 E	50.3772 N/7.9413 E	49.3358 N/7.0222 E
Wuchsgebiet ¹	Harz (36)	Westerwald (47)	Saar-Hügel- und -Bergland (70)
mittl. Niederschlag (Jahr) ²	774 mm	850 mm	973 mm
mittl. Niederschlag (VZ) ^{2,3}	381 mm	360 mm	380 mm
mittl. Temperatur (Jahr) ²	7,3 °C	8,0 °C	8,8 °C
mittl. Temperatur (VZ) ^{2,3}	14,1 °C	15,4 °C	15,4 °C

¹ Quelle: Gauer und Kroiher (2012)

² Quelle: NW-FVA (2016)

³ VZ = Vegetationszeit (Mai–September)

Der Versuch Bleicherode-Südharz 701a liegt in Thüringen im Wuchsbezirk 36.07 (Mittleres Unterharzplateau) (Gauer und Kroiher 2012) in schwach bis stark geneigter Südwest-Exposition in einer Höhenlage von 420 m ü. NN. Ausgangsmaterial der Bodenbildung ist die devonische Südharz-Grauwacke-Formation, aus der sich eine Braunerde mit mäßig frischem Bodenwasserhaushalt und mittlerer Trophie entwickelt hat. Im Unterboden sind verdichtete Bereiche vorhanden.

Der Versuchsort Lahnstein 9a befindet sich in der kollinen Höhenstufe im Wuchsbezirk 47.01 (Niederwesterwald) (Gauer und Kroiher 2012). Geologisches Ausgangsmaterial ist lößüberlagerter Grauwackensandstein des unteren Devons, aus dem sich bodentypologisch eine Lockerbraunerde entwickelt hat. Der Boden wird als mitteltiefgründig, frisch und mesotroph (mit einer Tendenz zu guter Basenversorgung) beschrieben.

Der Versuch Saarforst 1668a liegt im Wuchsbezirk 70.03 (Saarkohlenwald) in mäßig geneigter Südost-Exposition in einer Höhenlage von 370 m ü. NN (Gauer und Kroiher 2012). Ausgangsmaterial der Bodenbildung sind die Saarbrücker Schichten (Westfal) des oberen Karbons. Die Bodengeneese führte zu einer Braunerde mittlerer Nährstoffversorgung. Der Wasserhaushalt des tiefgründigen, wasserzügigen Bodens wurde als frisch bis betont frisch eingestuft.

Definition der Behandlungskonzepte

1. Waldbaustrategie „Qualifizieren – Dimensionieren“ (QD-Strategie)

Nach Erreichen astfreier Schaftlängen von ca. 25 % der standörtlich möglichen Baumhöhe, werden die Kronen der Ausleseebäume stark freigestellt. Einerseits soll der Zuwachs eines Auslesebaumes durch eine möglichst große Krone maximiert werden, andererseits sollen keine Eintrittspforten für Luftsauerstoff ins Holz durch das Absterben von stärkeren Ästen an der Kronenbasis entstehen, der durch Oxidation mit Inhaltsstoffen der Parenchymzellen zum Buchenrotkern und damit zur Wertminderung des Stammholzes führt (Wilhelm et al. 1999b, 1999c; siehe auch Michaelis 1935 und Bryndum 1987). Dazu werden alle Nachbarn mit Kronenkontakt ohne Rücksicht auf die soziale Stellung durchforstet. Die Zwischenfelder bleiben unbehandelt. Die Reifephase beginnt, sobald die Ausleseebäume 80 % ihrer standörtlich möglichen Endhöhe erreicht haben (Wilhelm et al. 1999d, Landesforsten Rheinland-Pfalz 2009).

Als Z-Bäume wurden supervitale, vorherrschende Stämme ausgewählt. Dabei war die Z-Baumzahl im saarländischen Versuch mit 47 Stämmen ha⁻¹ am geringsten, während in Bleicherode-Südharz 701a und in Lahnstein 9a jeweils 55 Z-Bäume ha⁻¹ ausgewählt wurden.

2. Z-Baum-orientierte Auslesedurchforstung (ZB-Adf.)

Je Hektar sollten 80 Z-Bäume nach den Kriterien Vitalität und Qualität sowie nachrangig nach der räumlichen Verteilung ausgewählt werden, tatsächlich wurden zwischen 71 und 82 Z-Bäume ha⁻¹ festgelegt. Die Z-Bäume sind durch die Entnahme von im Mittel 2 Bedrängern je Eingriff im Sinne einer Positivauslese (Wiedemann 1935, Abetz 1974) zu fördern. Mögliche Bedränger gehören dabei der Baumklasse 1 bis 3 (Kraft 1884) an. Die Zwischenfelder bleiben unbehandelt. Die Durchforstungen werden unabhängig von Stammzahl- oder Grundflächenhaltung des verbleibenden Bestandes geführt.

Um eine stärkere Förderung der Z-Bäume, als im Versuchskonzept festgelegt, auszuschließen oder zu verifizieren, wurde die Intensität der ZB-Adf. geprüft: Der maximale Kronenradius definiert den Übergang von der Licht- zur Schattenkrone (Burger 1939). Aus der Gesamtzahl der Durchforstungsbäume wurden diejenigen als bedeutsam identifiziert, deren Höhe mindestens der Ansatzhöhe der maximalen Kronenbreite am Stamm entspricht und die damit in den fotosynthetisch bedeutendsten Bereich der Krone der Ausleseebäume ragen. Bei der Buche geht man von der größten Kronenbreite in rd. 40 % der Kronenlänge von der Baumspitze aus (Pretzsch 1992). Anschließend wurde die Anzahl relevanter Durchforstungsstämme durch die Anzahl der Ausleseebäume dividiert. Auf den betreffenden Versuchsfeldern wurde in der Vergangenheit zur Förderung der Ausleseebäume nicht versuchskonzeptkonform stärker in die herrschende Bestandesschicht eingegriffen. Bei der Erstdurchforstung wurden im Mittel jeweils 4,5 Bedränger je Z-Baum entnommen, bei der zweiten Durchforstung waren es 3 bzw. 3,5 Bedränger je Auslesebaum. Bei der dritten Durchforstung, die sich erst im laufenden Zuwachszeitraum auswirken wird, wurden im rheinland-pfälzischen Versuch im Mittel 5 Bedränger je Z-Baum ausgezeichnet (siehe Tabelle 2).

Tab. 2. Tatsächliche Durchforstungsstärke in den Versuchsfeldern mit Z-Baum-orientierter Auslesedurchforstung (ZB-Adf.).
Actual thinning intensity in the trial plots with future crop tree oriented selective thinning.

Versuchsort	Aufn.-Nr.	Funktion (polynom.) zur Schätzung der Baumhöhe (h)	Mittlere Ansatzhöhe der max. Kronenbreite, h (maxKB) = $h \times 0,6$ [m]	Anzahl Z-Bäume* [Stck. ha ⁻¹]	Anzahl relev. Df.-Stämme [Stck. ha ⁻¹]	Bedränger je Z-Baum [Stck.]
Bleicherode-Südharz 701a	1	$h(m) = 0,0259x^2 - 0,6428x + 21,988$	11,5	71	320	4,5
	2	$h(m) = 0,0075x^2 - 0,0603x + 18,330$	12,6	71	248	3,5
	3	$h(m) = 0,0228x^2 - 0,9248x + 30,796$	15,3	71	114	1,5
Lahnstein 9a	1	$h(m) = -0,0605x^2 + 1,9334x - 0,0302$	7,8	82	361	4,5
	2	$h(m) = -0,0999x^2 + 3,9454x - 20,644$	10,4	82	246	3
	3	$h(m) = 0,0144x^2 - 0,2958x + 19,138$	11,8	82	410	5

* Rechnerisch ergeben sich in den unterschiedlich großen Messparzellen auf der Grundlage der Z-Baumauswahl bei Versuchsbeginn für Bleicherode-Südharz 701a 71 Z-Bäume ha⁻¹ und für Lahnstein 9a 82 Z-Bäume ha⁻¹.

3. Quantifizierte Hochdurchforstungen (Hdf.)

Die Durchforstungsstärke der als Hochdurchforstungen (E-Grad; Wimmenauer 1902) zu definierenden Eingriffe mit 120 Z-Bäumen ha⁻¹ wird über eine standortgleiche undurchforstete Parzelle (Nullfläche) gesteuert, deren Oberstandsgrundfläche mit einem natürlichen Bestockungsgrad (nB°) von 1,0 die Referenz für die Staffelung der Eingriffsstärken bildet (siehe Tabelle 3). Diese Vorgehensweise berücksichtigt das Ertragsniveau der Untersuchungsbestände, und sie gewährleistet relativ gleiche Eingriffsintensitäten an unterschiedlichen Versuchsstandorten. Maßgeblich für die Zuordnung eines Baumes zum Oberstand sind die Baumklassen des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten von 1902 (Kramer und Akça 1995). Neben Bäumen der Baumklasse 1 und 2 zählen per Definition auch Bäume der Baumklasse 3 zum Oberstand, um über die Zeit Fluktuationen in den Stammzahlfrequenzen des Ober- und Unterstandes weitgehend zu vermeiden.

Für die quantifizierten Durchforstungen ist eine unterschiedliche Pflegeintensität der Z-Bäume vorgegeben: Bei schwacher Hdf. Entnahme von einem Bedränger, bei mäßiger Hdf. Entnahme von 2 Bedrängern und bei starker Hdf. Entnahme von 2–3 Bedrängern je Z-Baum und Eingriff.

Lineare Regression zur bedingten Schätzung der Z-Baum-Durchmesser

Abweichend vom vorgesehenen 5-jährigen Aufnahmeturnus, umfasste der Zeitraum zwischen erster und zweiter Aufnahme in der thüringischen Versuchsfläche 6 Jahre. Die dritte Aufnahme fand dann nach weiteren 4 Jahren statt. Um den Zuwachs auch hier auf 5-jährige Zeiträume beziehen zu können, wurden die Durchmesser für den Zeitpunkt der zweiten Inventur aus einer Zuwachsgeraden geschätzt, die an jeden Datensatz angepasst wurde. Auf der Grundlage dieser mithilfe linearer Regression berechneten Durchmesserwerte wurde der Radialzuwachs der Z-Bäume sowohl der ersten als auch der zweiten Zuwachsperiode ermittelt.

Statistische Datenanalyse

Die statistisch signifikante Unterschiedlichkeit der intervallskalierten Z-Baum-Durchmesser ($D_{ZB\ 1,3}$; cm) wurde in den zugrunde liegenden Messreihen mithilfe eines gemischten Modells (Bortz 1988) varianzanalytisch anhand des F-Wertes zum Niveau $\alpha = 5\%$ geprüft, wobei Faktor A die Versuchsstandorte repräsentiert und Faktor B den Einfluss der Behandlung auf die Ausprägung der abhängigen Variablen ($D_{ZB\ 1,3}$; cm) berücksichtigt. Unter Faktor A sind auch die unterschiedlichen Alter der Untersuchungsbestände subsumiert. Vorausgehend wurde das Vorliegen der in ihrer Gesamtheit als „Normalität“ bezeichneten Voraussetzungen für die Anwendung dieses parametrischen Verfahrens mittels Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest bzw.

Tab. 3. Übersicht der Behandlungsvarianten und Z-Baumzahlen je Variante.
Scheme of the various thinning regimes and number of z-stems depending on variant type.

Variante	Natürlicher Bestockungsgrad (nB°)	Z-Bäume (Min.–Max./Mittelwert) [Stck. ha ⁻¹]	Versuchssteuerung
QD-Strategie	ohne Vorgabe der Sollgrundfläche	47–55/52	Freie Lichtwuchsdurchforstung
Auslesedurchforstung	ohne Vorgabe der Sollgrundfläche	71–82/77	Freie Auslesedurchforstung
Nullfläche	1,0 (maximale Dichte)	120	ohne Durchforstung
Schwache Durchforstung (E-Grad)	0,80	120	Grundflächengesteuerte Durchforstung
Mäßige Durchforstung (E-Grad)	0,65	120	Grundflächengesteuerte Durchforstung
Starke Durchforstung (E-Grad)	0,50	120	Grundflächengesteuerte Durchforstung

Tab. 4. Ergebnisse der Signifikanzprüfung mithilfe der Varianzanalyse anhand des F-Wertes. Der Einfluss der Faktoren A (Versuchsstandort) und B (Behandlungsvariante) auf die abhängige Variable „Z-Baum-Durchmesser“ ($D_{28,1,3}$) [cm] ist statistisch bedeutsam für $p \leq 0,05$ (n = Umfang der Stichprobengruppen).

Results of the significance check aided by analysis of variance of the F-test value. The influence of the factors A (trial site) and B (trial variant) on the dependent variable DBH of z-stems [cm] is of statistical value for $p \leq 0.05$ (n = volume of total random samples).

Faktor	Aufnahme 1 (n = 322)		Aufnahme 2 (n = 315)		Aufnahme 3 (n = 312)	
	F	p	F	p	F	P
Konstante	9852,081	0,0000 ***	10962,19	0,0000 ***	12092,13	0,0000 ***
A	82,755	0,0000 ***	37,68	0,0000 ***	15,68	0,0000 ***
B	3,562	0,0038 **	3,32	0,0062 **	9,70	0,0000 ***

mithilfe des Levene's Test überprüft. Die Prozeduren wurden mit dem Modul „Haupteffekte ANOVA“ des Programmpaketes „STATISTICA“ (Statsoft 1995) gerechnet.

Verwendetes Wachstumsmodell und Simulationseinstellungen

Die Untersuchungsfragestellungen lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt auf empirischer Grundlage nur teilweise beantworten, da die Zieldimensionen noch nicht erreicht sind. Stattdessen erfolgte eine Simulation der behandlungs- und altersabhängigen Entwicklung der Durchmesser, basierend auf der Bibliothek TreeGrOSS (Tree Growth Open Source Software; Nagel 2009), welche die Wachstumsroutinen des baumabstandsabhängigen Modells BWINPro für nordwestdeutsche Buchenbestände enthält (Nagel et al. 2015). Die Durchforstungsroutinen gehen auf die Ansätze von Duda (2006) zurück, mit Ausnahme der regelbasierten Abbildung der QD-Strategie, die durch Nagel et al. (2015) programmiert und in das Wachstumsmodell implementiert wurde. Die Simulationsläufe wurden in 5-Jahresschritten durchgeführt. Die Modellbestände wurden auf der Basis der Daten der dritten Aufnahme der zugrunde liegenden Durchforstungsversuche aufgebaut. Für die Bäume des Derbholzbestandes (Derbholzgrenze ($D_{1,3}$) = 7,0 cm) sind deren Standpunktkoordinaten bekannt.

Die Bestandesbehandlung im Sinne der QD-Strategie wurde in der Modellroutine wie folgt programmiert: allseitige Freistellung der Ausleseebäume bis zum Erreichen von 80 % ihrer standörtlich möglichen Endhöhe. Die Kronen bleiben bis zum nächsten Eingriff konkurrenzfrei. Danach geht die Lichtung im Sinne einer Reifephase zu einer schwachen Kronenpflege über.

Bei der ZB-Adf. und bei den Hochdurchforstungen im Sinne eines E-Grades erfolgt der Übergang zur Reifephase und damit ein

Übergang zu schwacher Eingriffsstärke bei einer Bestandesoberhöhe (hdom; Assmann 1961) von 28 m (Spellmann 1999, Nagel und Spellmann 2008, Landesforsten Rheinland-Pfalz 2010).

Das Wachstumsmodell BWINPro nutzt die Bestandesgrundfläche als Steuerungsgröße für die Durchforstungsintensität: Die Grundflächenhaltung während der oberhöhenabhängigen Bestandesentwicklungsphasen bis Simulationsende wird aus dem theoretischen Wert einer maximalen Grundfläche, der aus einer baumartenspezifischen maximalen Dichtefunktion (Wördehoff et al. 2014) bestimmt wird, und dem angestrebten natürlichen Bestockungsgrad hergeleitet (Hansen und Nagel 2014). Eine detaillierte Übersicht über die Einstellungen zum Durchforstungsverfahren enthält Tabelle 5.

Ergebnisse

Ertragskundliche Kennwerte als Ergebnis bisheriger Feldaufnahmen

Die Datenzeitreihe der zugrunde liegenden Durchforstungsversuche umfasst 3 Eingriffsinventuren. Aus den Primärdaten wurden ertragskundliche Zustands- und Zuwachsgrößen berechnet, deren Wertebereiche getrennt nach Behandlungsvarianten und Aufnahmezeitpunkten in Tabelle 6 angegeben sind und die einen Überblick über den Einfluss der Varianten auf die Bestandeswerte erlauben.

Das QD-Versuchsfeld in Lahnstein 9a wurde abweichend vom vorgegebenen 5-jährigen Aufnahmeturnus bereits 3 Jahre nach der ersten Maßnahme wieder durchforstet. Der ausscheidende Bestand wurde in einer Nebenaufnahme erfasst (Aufnahme-Nr. 1a; Tabelle 6).

Tab. 5. Einstellungen im Wachstumsmodell BWINPro zum Durchforstungsverfahren. Model-settings in the forest simulator BWINPro for the thinning measures.

Variante	Angestrebter natürlicher Bestockungsgrad	'Thinning Factor'
QD-Strategie	keine Vorgabe	14.0;0.55;hdom 100×0.8;hdom 100×0.8;0.80;50.0
Auslesedurchforstung	keine Vorgabe	14.0;0.65;28.0;28.0;0.70;32.0;32.0;0.80;50.0
Schwache Durchforstung (E-Grad)	0,80	14.0;0.80;28.0;28.0;0.80;32.0;32.0;0.80;50.0
Mäßige Durchforstung (E-Grad)	0,65	14.0;0.65;28.0;28.0;0.70;32.0;32.0;0.80;50.0
Starke Durchforstung (E-Grad)	0,50	14.0;0.50;28.0;28.0;0.65;32.0;32.0;0.80;50.0

hdom = Grundflächenmittelhöhe der 100 durchmesserstärksten Bäume je Hektar.

'Thinning Factor': Über die Festlegung des natürlichen Bestockungsgrades (nB^*) (beispielhaft kursiv hervorgehoben) wird dem Wachstumsmodell die Durchforstungsintensität in den durch die Bestandesoberhöhe (hdom) definierten Bestandesentwicklungsphasen (beispielhaft fett hervorgehoben) vorgegeben (Hansen und Nagel 2014, Nagel et al. 2015).

Maximale Dichte der Grundfläche [$m^2 ha^{-1}$]: $G_{max} = 55,342 - 127,01 \times \exp(-\exp(-2,314) \times hdom^{1,025})$ (Buche, Nordwestdeutschland; Wördehoff et al. 2014).

Tab. 6. Bestandeswerte (Minimum – Maximum) der zugrunde liegenden Versuchsfelder, angegeben sind Hektarwerte (Derbholzbestand; erste bis dritte Aufnahme). Yield values (minimum – maximum) per hectare of the underlying trial plots (stand of compact wood; first to third yield survey).

Behandlung	Aufn.-Nr.	Alter [Jahre]	Verbleibend						Ausscheidend			Laufender Zuwachs IV (Min.-Max.) [m ³ Jahr ⁻¹]
			hdom (Min.-Max.) [m]	dodom (Min.-Max.) [cm]	hg (Min.-Max.) [m]	dg (Min.-Max.) [cm]	G (Min.-Max.) [m ²]	V (Min.-Max.) [m ³]	dg (Min.-Max.) [cm]	G (Min.-Max.) [m ²]	V (Min.-Max.) [m ³]	
QD-Strategie	1	31-40	14,7-18,5	14,4-21,8	12,8-16,1	10,0-13,1	17,1-28,2	87-209	10,1-14,4	2,4-6,7	12-52	14,1-15,3
	1a	35	-	-	-	0	0	10,8	4,8	24		
Auslesedurchforstung	2	36-46	17,9-20,2	18,3-25,0	15,6-17,4	11,8-14,1	19,2-25,9	131-209	10,3-16,5	0,6-9,7	4-49	11,6-12,8
	3	41-50	19,1-21,4	22,7-27,8	16,2-18,0	13,2-14,9	17,4-24,7	131-222	13,1-16,8	2,8-7,9	23-58	
	1	32-40	15,9-21,2	15,6-24,5	13,6-18,0	10,4-14,9	18,3-24,7	102-213	11,6-17,5	3,8-8,2	24-76	
Nullfläche	2	37-46	18,3-22,6	19,0-28,0	15,6-18,9	11,8-16,2	20,3-24,4	140-227	12,5-18,8	5,7-6,9	41-67	13,4-15,4
	3	42-50	20,3-23,7	23,0-29,7	17,2-19,7	13,2-16,9	20,1-24,2	160-237	13,0-20,4	4,1-6,3	43-49	
	1	31-40	15,6-19,7	17,9-24,9	13,2-17,1	11,0-14,9	23,6-33,9	134-277	-	0	0	
Hochdurchforstung (hb° = 0,8)	2	36-46	19,5-21,8	18,9-27,6	16,3-18,7	12,6-16,4	30,6-39,1	225-354	7,9-8,8	0,2-0,5	2	13,2-18,6
	3	41-50	21,8-23,8	24,8-29,3	18,8-20,7	14,3-17,2	35,0-42,0	308-423	8,1-9,4	0,3-1,4	1-7	
	1	31-40	17,7-21,2	19,8-24,4	15,5-18,7	11,5-14,8	19,8-26,3	132-255	14,9-17,2	3,5-6,8	28-64	
Hochdurchforstung (hb° = 0,65)	2	36-46	19,7-22,5	22,9-26,9	17,4-19,2	13,7-16,2	24,6-31,3	205-293	10,1-22,7	1,5-6,8	16-64	13,0-19,7
	3	41-50	21,2-23,8	26,2-28,9	18,1-20,9	15,2-17,1	25,8-34,4	253-349	11,9-16,3	0,7-4,7	7-38	
	1	31-40	14,8-18,8	15,6-22,2	12,7-15,9	10,0-13,7	15,3-23,0	78-173	12,3-15,6	4,8-9,9	30-79	
Hochdurchforstung (hb° = 0,5)	2	36-46	17,8-20,1	19,7-25,7	15,1-16,8	11,7-15,3	19,4-26,9	130-219	13,0-16,2	2,5-5,6	21-47	11,2-16,3
	3	41-50	20,0-21,4	23,4-27,6	16,4-18,5	13,1-16,2	22,9-29,1	176-258	14,1-19,2	1,4-4,6	14-40	
	1	31-32	16,9-17,5	16,9-18,8	14,4-15,4	11,0-11,8	12,2-17,4	75-118	13,0-13,9	7,9-7,2	55-56	
Versuchsauswertung nach DESER-Norm (Johann 1993): D1.1, D2.1, H1.1, H2.1, H3.2, K1.2, K2.1, K2.2, DHA2.	2	36-37	18,7-20,1	21,9-22,4	15,9-17,5	13,0-13,6	15,6-17,2	127-129	12,5-13,4	4,5-6,7	34-51	12,3-17,3
	3	41-42	20,1-22,7	25,8-27,0	17,0-19,8	14,4-16,5	16,5-18,6	155-160	13,6-15,2	4,2-4,9	37-41	
	1	31-32	16,9-17,5	16,9-18,8	14,4-15,4	11,0-11,8	12,2-17,4	75-118	13,0-13,9	7,9-7,2	55-56	

Versuchsauswertung nach DESER-Norm (Johann 1993): D1.1, D2.1, H1.1, H2.1, H3.2, K1.2, K2.1, K2.2, DHA2.
 nb° = natürlicher Bestockungsgrad, bezogen auf die Grundfläche einer undurchforsteten Nullfläche auf vergleichbarem Standort, hdom = Grundflächennittelhöhe der 100 durchmesserstärksten Bäume je Hektar, ddom = Grundflächennittelstamm, dg = Durchmesser des Grundflächennittelstammes, G = Bestandesgrundfläche, V = Bestandsvorrat.
 Ausgleich der Durchmesser-Höhen-Beziehung über die Korff-Funktion (überarbeitet von Lappi 1991, 1997): $\ln(h) = a - b \times (d + \lambda)^{-c} + e$ mit $\lambda = 7$ und $c = 1,225$.
 Volumeberechnung in Vorratstestreinem Derbholz mit Rinde: Für Buche und Fichte nach Bergel (1973): $V_d = 0,4309 + 0,0017335 \times h + 1,237/h - 118,188(d \times dx + dx^2) \times (dx^2)$, für Eiche nach Bergel (1974): $V_d = 0,4786 - (1,011176/d) + 2,10428/h - (203,1997/d \times h \times h)$. Derbholzgrenze ($D_{j,3}$) = 7,0 cm.

Charakterisierung der Standortleistungsfähigkeit der Versuchsorte und -felder

Die Standortleistung wird über die Alters-Oberhöhen-Beziehung sowie über einen Vergleich mit den Oberhöhenbonitäten der Ertragsstafel für Buche (Schober 1967: mäßige Durchforstung) beurteilt (siehe Abbildung 1). Verwendet wird die Oberhöhe (hdom) in der Definition von Assmann (1961), die allgemein als Maßstab der Standortleistungsfähigkeit gilt (z. B. Assmann 1959, Kramer 1959, Hägglund 1981, Neumann 1999, Zingg 1999). Der Bonitätsfächer der Schober'schen Ertragsstafel wurde aufgrund der hohen Standortpotenziale mithilfe der Regressionsfunktion von Döbbeler et al. (2003) um eine -I. und um eine 0. Ertragsklasse erweitert.

Der Oberhöhenwachstumsgang der Versuchsfelder verdeutlicht die Leistungsfähigkeit der Versuchsstandorte: Die Höhenverläufe im Altersrahmen zwischen 31 und 50 Jahren liegen deutlich über der I. Bonität der Buchen-Ertragsstafel (Schober 1967: mäß. Df.). Die Lage der Oberhöhenentwicklungslinien zueinander deutet im rheinland-pfälzischen und im thüringischen Versuch auf kleinstandörtliche Unterschiede bezüglich des Bodenwasserhaushalts und/oder der Trophie hin. Nach ihrer Oberhöhenentwicklung zu urteilen, ist Saarforst 1668a die standörtlich homogenste Fläche und stellt sich als leistungsfähigster Standort heraus (absolute Oberhöhenbonität im Alter 100 Jahre (hdom 100) von 39 m, während Lahnstein 9a (hdom 100 = 38 m) und Bleicherode-Südharz 701a (hdom 100 = 36 m) auf einem etwas geringeren Niveau liegen. Insgesamt geht aus Abbildung 1 hervor, dass sich die Buche an den vorliegenden Versuchsorten im Bereich ihres Maximums befindet.

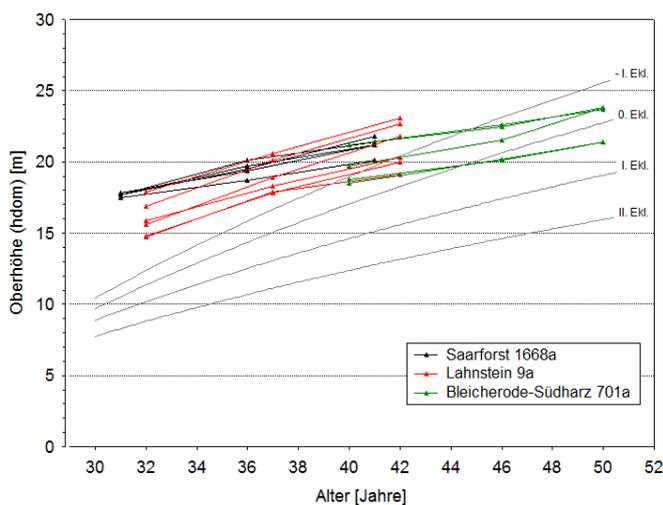


Abb. 1. Oberhöhe (hdom) [m] über dem Alter [Jahre] in den Versuchsfeldern der zugrunde liegenden Durchforstungsversuche. Referenz: Entwicklung der Oberhöhe I. und II. Ertragsklasse (Schober 1967: mäßige Durchforstung) sowie -I. und 0. Ertragsklasse (extrapoliert nach Döbbeler et al. 2003).

Stand top height (H100) [m] over age [years] in the trial plots of the underlying thinning experiments. Reference: stand top height development of site class I and II (Schober 1967: moderate thinning) and site class -I and 0 (extrapolated from Döbbeler et al. 2003).

Einfluss der Jungdurchforstungen auf den Radialzuwachs der Z-Bäume

Nach Abschluss der Qualifizierungsphase ist eine inhomogene Varianz der Z-Baum-Durchmesser zu beobachten. Zu den unterschiedlichen Mittelwerten der Messreihen trägt auch der Altersunterschied der Untersuchungsbestände bei. Die Streuung der Durchmesser hängt vom konkurrenzbedingtem Grad der Differenzierung ab und wird in Abbildung 2 visualisiert. Die Darstellung beinhaltet die Durchmesser Mittelwerte der Z-Bäume zum Zeitpunkt der ersten Aufnahme getrennt nach Versuchsorten, deren Wertebereiche und die 95 %-Vertrauensbereiche der Mittelwerte.

Der differenzierende Effekt des Standorts bzw. des Alters auf die Z-Baum-Durchmesser ist zu allen Aufnahmezeitpunkten hochsignifikant und bei der ersten und zweiten Aufnahme stärker als der Einfluss der Behandlungen. Der Effekt der Behandlungsvarianten ist zum Niveau $\alpha = 5\%$ zweifach- bzw. dreifach signifikant (siehe Tabelle 4). In Bleicherode-Südharz 701a kommt der 8- bzw. 9-jährige Altersvorsprung gegenüber Lahnstein 9a bzw. Saarforst 1668a in einem höheren Mittelwert der Z-Bäume von 19,3 cm zum Tragen. Die Varianz ist mit Ausnahme der Parzelle, die nach QD-Grundsätzen durchforstet wird, höher als in den Parallelversuchen. Die Spannweite der Werte beträgt im Minimum 5,5 cm in der Parzelle, die nach QD-Kriterien behandelt wird, und maximal 13,7 cm in der mäß. Hdf. ($nB^{\circ} = 0,65$). Zur Charakterisierung der Gesamtstreuung wurden die Variationskoeffizienten (V) berechnet, mit:

$$V = \frac{s}{\bar{x}}$$

wobei: s = Standardabweichung der Messreihe, \bar{x} = Mittelwert der Messreihe.

Der Variationskoeffizient beträgt in Bleicherode-Südharz 701a $V = 0,1590$. Im rheinland-pfälzischen Versuch, der zu Beginn der Beobachtung inhomogensten Fläche, beträgt der mittlere Durchmesser 14,6 cm, mit der geringsten Spannweite der Werte von 4,2 cm in dem Versuchsfeld, das nach QD-Regeln durchforstet wird, und mit maximal 10,0 cm in der schw. Hdf. ($nB^{\circ} = 0,8$). Die Gesamtstreuung in Lahnstein 9a zum Zeitpunkt der ersten Aufnahme wird

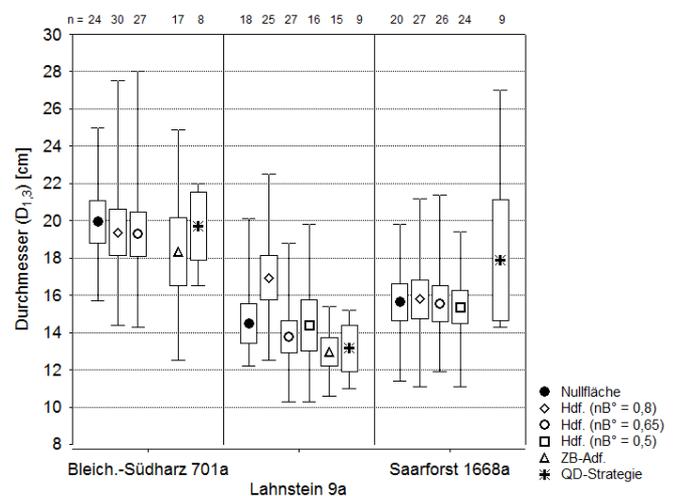


Abb. 2. Mittelwerte der Z-Baum-Durchmesser ($D_{1,3}$) [cm], 95 %-Konfidenzintervalle der Mittelwerte und Wertebereiche (Minimum – Maximum) der Messreihen als Ergebnis der ersten ertragskundlichen Aufnahme, getrennt nach Versuchsorten und -varianten (n = Umfang der Stichprobengruppen).

Mean values of future crop tree diameters (DBH) [cm], 95% confidence intervals of the mean values and value facets (minimum – maximum) of the test series as a result of the first yield survey, separated according to trial areas and thinning methods (n = size of random sample batches).

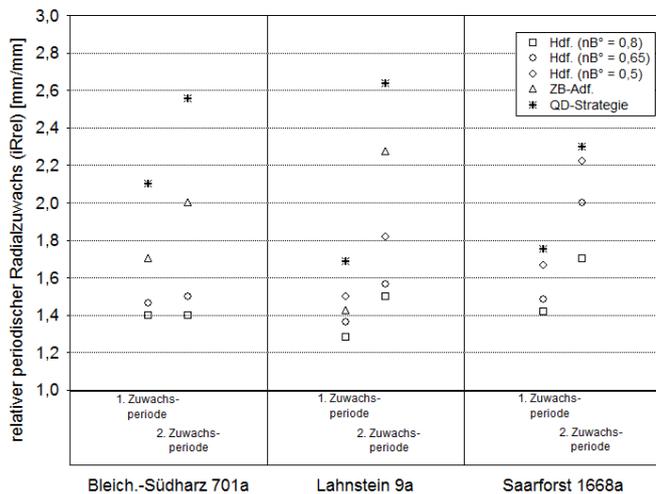


Abb. 3. Relativer Radialzuwachs (iRel) [mm/mm] der Z-Bäume in der ersten und zweiten Zuwachsperiode, getrennt nach Versuchsorten und Behandlungsvarianten. Relativised radial increment (iRel) [mm/mm] of future crop trees during the first and second increment period, separated according to trial areas and thinning methods.

durch einen Variationskoeffizienten $V = 0,1814$ charakterisiert. Im saarländischen Versuch beträgt der mittlere Z-Baum-Durchmesser zu Versuchsbeginn 15,8 cm. Mit Ausnahme der Parzelle, die nach QD-Prinzipien behandelt wird, befinden sich die arithmetischen Durchmesserwerte in Saarforst 1668a auf einem vergleichbaren Niveau: Die Durchmesser tendieren um 15,5 cm; der zugehörige Variationskoeffizient V beträgt 0,1634.

In Abbildung 3 ist der arithmetisch mittlere Radialzuwachs der Z-Bäume auf der Basis empirischer Daten über zwei jeweils 5-jährige Zuwachsperioden dargestellt. Wegen der unterschiedlichen Mittelwerte und aufgrund der unterschiedlichen Streuung der Messreihen wurde der Zuwachs der Durchforstungsvarianten in Relation zum Zuwachs der Nullflächen gesetzt, um den Einfluss der Jungdurchforstungen auf das sekundäre Dickenwachstum der Auslesebäume vergleichen zu können. In den Nullflächen liegen die absoluten periodischen Radialzuwächse der Z-Bäume nur zwischen 9 und 11 mm. Der relative Radialzuwachs hat in den undurchforsteten Referenzflächen den Wert 1, während die durch die Standraumerweiterung im Zuge der unterschiedlichen Behandlungen beeinflussten Zuwachswerte über der 1,0-Linie liegen.

Abbildung 3 legt eine deutliche behandlungsbedingte Staffelung der Radialzuwächse offen. Die deutlichste Zuwachssteigerung wird an allen Versuchsorten durch die Lichtwuchsdurchforstung im Sinne der QD-Strategie erreicht: Bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes ist der Radialzuwachs der Z-Bäume um den Faktor 2,3–2,6 höher als in den Nullflächen. Dem stehen als absolute Größen periodische Radialzuwächse zwischen 23 und 29 mm gegenüber. Die ZB-Adf. führte zu einem 2,0–2,3-fach höheren Radialzuwachs. Die st. Hdf. ($nB^\circ = 0,5$) steigerte den Radialzuwachs der Auslesebäume um den Faktor 1,8–2,2. Relativ gering ist der Effekt der schwachen Durchforstung auf das Zuwachsverhalten der Z-Bäume: Mit dem hochdurchforstungsartigen Eingriff geht ein 1,4–1,7-fach erhöhter Radialzuwachs einher. Die relativen Bestockungsgrade liegen in diesen Flächen noch zwischen 1,2 und 1,4 (Schober 1967: maß. Df.) und verdeutlichen damit die angespannte Konkurrenzsituation auch nach Durchforstung. Mit Ausnahme der thüringischen Versuchsfäche wirken sich aber auch die schwachen Durchforstungen in der zweiten Zuwachsperiode zuwachssteigernd aus. Auch bei maß. Hdf.,

die auf einen natürlichen Bestockungsgrad von 0,65 abzielt, ist das Dickenwachstum der Auslesebäume im Vergleich zur QD-Strategie und zur ZB-Adf. unterdrückt; der relative Zuwachs ist gegenüber den Nullflächen um den Faktor 1,5–2,0 höher.

Die ZB-Adf. führte im Vergleich der untersuchten Behandlungskonzepte zu einer überproportional starken Zunahme des Radialzuwachses (siehe Abbildung 3). Allerdings wurden die Z-Bäume teils stärker gefördert, als dies das Versuchskonzept vorsah, wie anhand eines einfachen Verfahrens festgestellt werden konnte.

Simulierte Durchmesserentwicklung

Der Einfluss der Behandlungskonzepte auf das Erreichen der Z-Baum-Zieldimension von 60 cm und somit auf die Länge des Dispositionszeitraumes in Bezug auf die fakultative Verkernung wird auf der Basis simulativer Werte vor dem Hintergrund definierter Wachstumsbedingungen bezüglich der Standortleistung, der konzeptspezifischen Z-Baumhaltungen und der unterschiedlichen Durchforstungsintensitäten beurteilt. Die Simulationsläufe umfassen Zeiträume bis zu 90 Jahren. Für das Wachstumsmodell BWINPro werden maximale Simulationszeiträume bis zu 40 Jahren empfohlen (Nagel und Sprauer 2009, Hansen und Nagel 2014). Simulationen über längere Zeiträume führen aber auch dann zu biologisch plausiblen Ergebnissen und leisten einen wichtigen Beitrag zur Entscheidungsfindung, wenn die Testbestände bezüglich ihres Alters und ihrer Grundflächenhaltung im Parametrisierungsbereich des Modells gehalten werden.

Bei der ZB-Adf. und bei den Hochdurchforstungen im Sinne eines E-Grades werden Z-Baumgruppen bei direkter dichtebedingter Konkurrenz modellimmanent aufgelöst (Hansen und Nagel 2014). Der Algorithmus der QD-Variante wurde so programmiert, dass die ohnehin sehr geringe Anzahl der Z-Bäume selbst bei einer möglichen Kronenüberlappung über den Simulationszeitraum gleich bleibt (Nagel et al. 2015).

Die Simulationsergebnisse berücksichtigen die Standortleistungsfähigkeit in Form eines Standortindex, der absoluten Oberhöhenbonität im Alter 100 Jahre ($h_{dom} 100$). Simulierte Durchmesserwerte außerhalb der 95 %-Vertrauensbereiche der Mittelwerte ($\bar{x} \pm 95\% \text{ CI}$) wurden zur stochastischen Absicherung der Ergebnisse von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Die Z-Baumauswahl im Rahmen aller Simulationen wurde auf der Grundlage der in den Versuchsfeldern zu Durchforstungsbeginn tatsächlich festgelegten Auslesebäume vorgenommen (vgl. Tabelle 3). Abbildung 4 stellt die durch das Wachstumsmodell auf der Grundlage von Standort-, Baumabstands- und Bestandesdichte-Informationen projizierte Entwicklung der Z-Baum-Durchmesser in den Versuchsfeldern dar, die nach QD-Grundsätzen behandelt werden. Über den gesamten Simulationszeitraum nimmt die Durchmesserstreuung zu. Dies führt zu einer gestreckten Nutzungsdauer der Z-Bäume selbst bei kronenspannungsarmem Wachstum nach konsequenter Lichtwuchsdurchforstung. Im bonitätsmäßig an der Spitze stehenden Versuch Saarforst 1668a erreichen die ersten Z-Bäume schon mit 87 Jahren die unterstellte Zieldimension. Am Ende des Simulationszeitraumes mit 131 Jahren haben nahezu alle Auslesebäume auf der Parzelle die Zielstärke von 60 cm erreicht (Abbildung 4C). In Bleicherode-Südharz 701a und in Lahnstein 9a führt die Lichtwuchsdurchforstung nach QD-Kriterien dazu, dass erste Zielstärken in einem Altersrahmen von 96 bis 102 Jahren vorhanden sind, wobei Lage und Steigung der projizierten Durchmesserentwicklungslinien in beiden Versuchsfeldern weitgehend synchron verlaufen (Abbildung 4A, Abbildung 4B). Selbst bei konsequenter Dimensionierung ergibt die Simulation, dass auf den beiden durch eine Oberhöhenbonität ($h_{dom} 100$) von 35 m gekennzeichneten Standorten bis zum Ende des Simulationszeitraumes erst 50 % der Z-Bäume in zielstarke

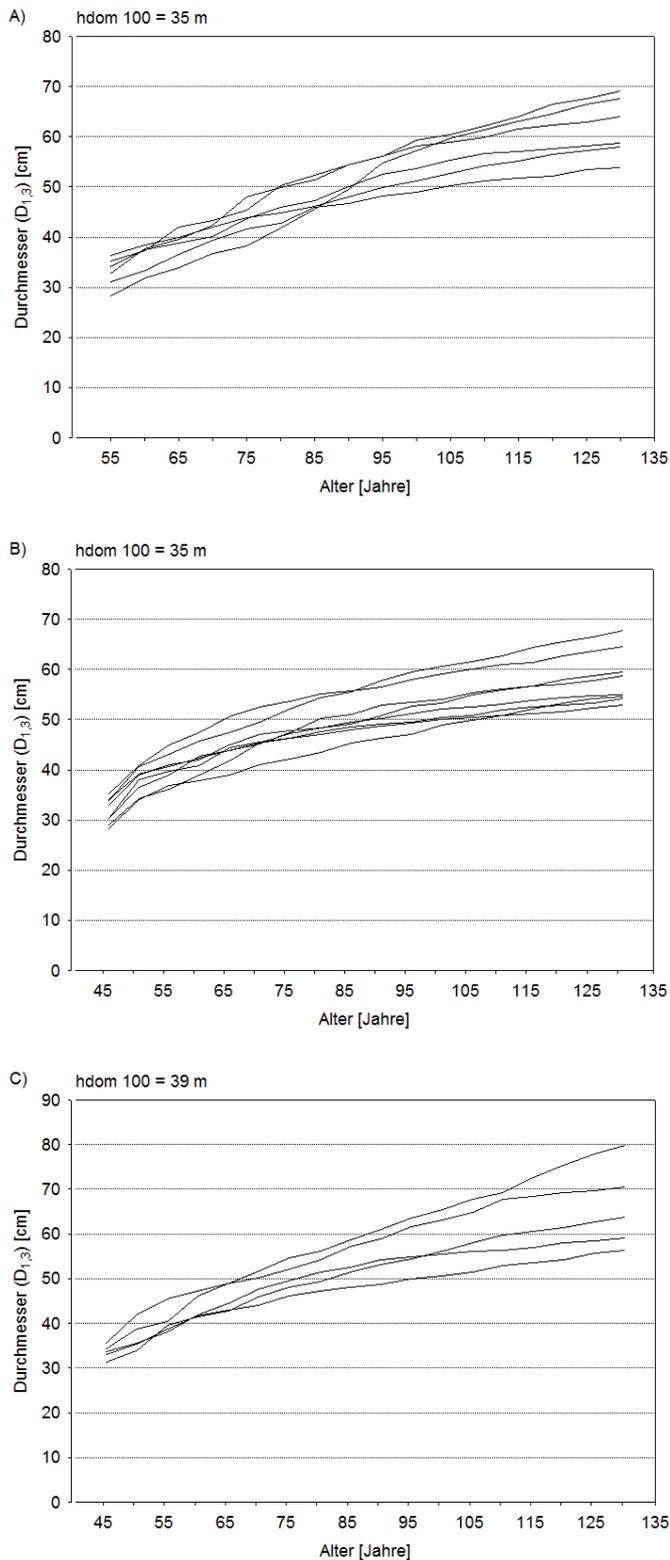


Abb. 4. Simulative Durchmesserentwicklung ($D_{1,3}$) [cm] der Z-Bäume über dem Alter [Jahre] in den Parzellen mit Lichtwuchsdurchforstung nach QD-Grundsätzen, getrennt nach Versuchsorten: (A) Bleicherode-Südharz 701a, (B) Lahnstein 9a und (C) Saarforst 1668a. Die Angabe der absoluten Oberhöhenbonität im Alter 100 Jahre (hdom 100) dient der Beurteilung der Standortleistungsfähigkeit.

Simulated future crop tree diameter increment (DBH) [cm] over age [years] in the plots, in which accretion thinning was carried out, according to QD-principles. The individual trial areas are: (A) Bleicherode-Südharz 701a, (B) Lahnstein 9a and (C) Saarforst 1668a. The indication of absolute stand top height site class at the age of 100 years serves to assess site productivity.

Dimensionen einwachsen und damit der verkernungsrelevante Altersgrenzwert von 120 Jahren von einem beträchtlichen Teilkollektiv überschritten wird. Mit zunehmendem Baumalter nimmt die Steigung der simulierten Durchmesserentwicklungslinien in der modellhaften Abbildung der QD-Variante ab. Nur ein früher Durchforstungsbeginn bei Bestandesoberhöhen (hdom) zwischen 14 und 16 m kann daher zu den gewünschten Zuwachssteigerungen führen (siehe auch Klädtke 2002).

Die Standortleistungsfähigkeit der Parzellen mit ZB-Adf. ist sowohl in der rheinland-pfälzischen als auch in der thüringischen Versuchsfläche durch eine Oberhöhenbonität (hdom 100) von 37 m gekennzeichnet und liegt damit um 5/10 einer extrapolierten Ertragsklasse über den dortigen QD-Versuchsfeldern auf dem Niveau einer 0. Bonität (Döbbeler et al. 2003). Lage und Steigung der durch das Wachstumsmodell projizierten Durchmesserentwicklungslinien verlaufen ab Alter 80 Jahre synchron (Abbildung 5). Eine behand-

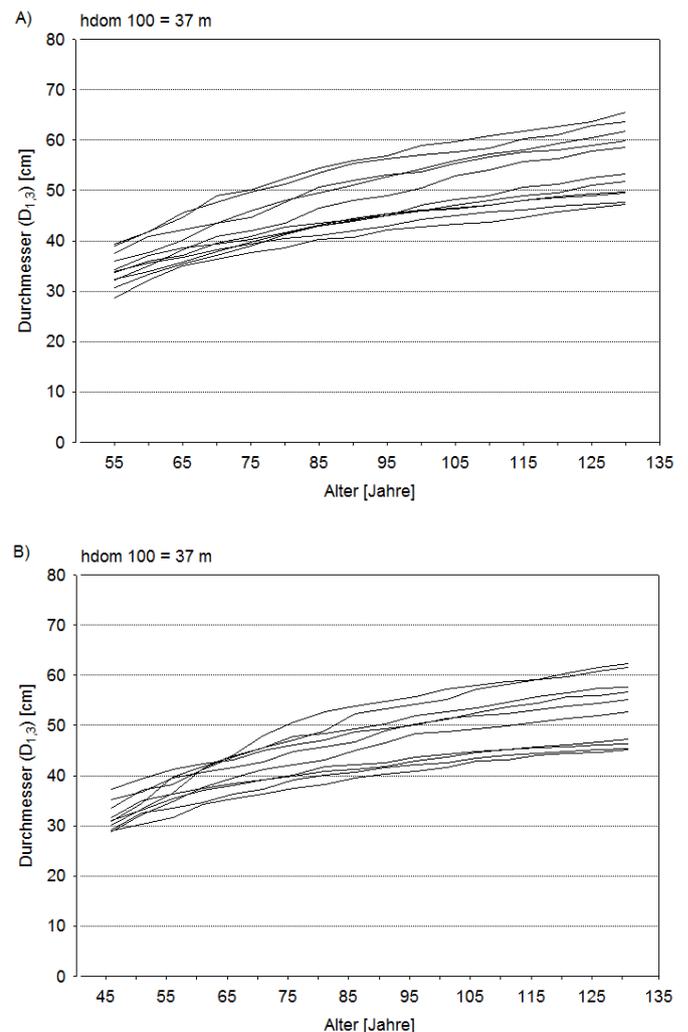


Abb. 5. Simulative Durchmesserentwicklung ($D_{1,3}$) [cm] der Z-Bäume über dem Alter [Jahre] in den Parzellen mit Z-Baum-orientierter Auslesedurchforstung, getrennt nach Versuchsorten: (A) Bleicherode-Südharz 701a und (B) Lahnstein 9a. Die Angabe der absoluten Oberhöhenbonität im Alter 100 Jahre (hdom 100) dient der Beurteilung der Standortleistungsfähigkeit.

Simulated future crop tree diameter increment (DBH) [cm] over age [years] in plots with future crop tree oriented selective thinning. The individual trial areas are: (A) Bleicherode-Südharz 701a and (B) Lahnstein 9a. The indication of absolute stand top height site class at the age of 100 years serves to assess site productivity.

lungsbedingte Homogenisierung der Durchmesservarianz ist auch hier nicht zu beobachten. Trotz höherer Z-Baumzahl (im Mittel 77 Stück ha⁻¹, Min.–Max.: 71–82 Stück ha⁻¹) gegenüber den QD-Parzellen und trotz moderaterer Förderung im Rahmen der modellhaften Abbildung der Behandlung ist die Streuung der Durchmesser um den Mittelwert am Ende des Simulationszeitraumes den Z-Baumkollektiven der QD-Felder vergleichbar. Mittelwert und Durchmesservarianz sind bei Simulationsbeginn in Lahnstein 9a geringer als in Bleicherode-Südharz 701a, entsprechend stärker nimmt die Streuung über den Zeitraum in der rheinland-pfälzischen Versuchsfläche zu. Abhängig von der Struktur der Modellbestände bei Simulationsbeginn und basierend auf dem Standortindex projiziert das Wachstumsmodell erste Zieldimensionen in einem Altersrahmen zwischen 106 und 118 Jahren, d. h. in der thüringischen Versuchsfläche nur geringfügig, in Lahnstein 9a jedoch deutlich später als im jeweiligen QD-Versuchsfeld. Als Ergebnis der Modellschätzung wachsen in Bleicherode-Südharz 701a bis zu dem verkernungsrelevanten Grenzwert von 120 Jahren immerhin 40 % der Z-Bäume in die Zielstärke ein, während der erntedurchmesserabhängige Nutzungsgang der Ausleseebäume sich in Lahnstein 9a deutlich über den verkernungsbedeutsamen Altersgrenzwert hinaus in höhere Baumalter verschiebt (Abbildung 5).

Bei der modellhaften Abbildung der Hochdurchforstungen (E-Grad; Wimmenauer 1902) werden auch die Zwischenfelder behandelt. Die Durchmesserentwicklung der Z-Bäume im Rahmen der schw. Hdf. bleibt im Vergleich sowohl zu den Behandlungskonzepten, die nur auf die Entwicklung der Ausleseebäume abzielen, als auch im Vergleich zu den intensiveren Hochdurchforstungen deutlich zurück (Abbildung 6: Spalten 1–3, Zeile 1). Als Ergebnis der Modellschätzung wird die Zieldimension auf diesen Parzellen bis zum verkernungsrelevanten Altersgrenzwert nicht erreicht, einhergehend mit einem hohen Rotkern-Entwertungsrisiko der Ausleseebäume. Dabei wirkt sich die Variabilität des Standorts in der Modellprojektion angesichts der hohen Bestandesdichten nicht signifikant auf das Durchmesserzuwachsverhalten aus, obwohl zwischen leistungsfähigstem (hdom 100 = 40 m) und vergleichsweise schwächstem Standort (hdom 100 = 37 m) ein Gefälle von einer extrapolierten Ertragsklasse (Döbbeler et al. 2003) besteht.

Bei mäß. Hdf. bildet das Wachstumsmodell die Durchmesserentwicklung standortsensitiv ab (Abbildung 6: Spalten 1–3, Zeile 2). Im standörtlich sehr leistungsfähigen saarländischen Versuchsfeld projiziert das Modell erste Zielstärken in einem Alter von 108 Jahren und 50 % des betrachteten Baumkollektivs wachsen bis zum Altersgrenzwert von 120 Jahren in zielstarke Dimensionen ein. In Bleicherode-Südharz 701a und in Lahnstein 9a wird die Zieldimension von 60 cm jedoch bis zum Ende des Simulationszeitraumes im Alter von 130 bzw. 132 Jahren auch bei mäß. Hdf. nicht erreicht. Die thüringische Parzelle besitzt dabei mit einer Oberhöhenbonität (hdom 100) von 34 m in der vorliegenden Serie das vergleichsweise geringste Standortpotenzial.

In den Modellbeständen mit st. Hdf. wird während der Durchforstungsphase (bis zu einer Bestandesoberhöhe (hdom) von 28 m) ein natürlicher Bestockungsgrad von 0,5 angestrebt. Rheinland-pfälzischer und saarländischer Anbauort befinden sich bezüglich der Standortleistung auf einem vergleichbar hohen Niveau. Abhängig von der Struktur dieser Bestände bei Simulationsbeginn projiziert das Wachstumsmodell erste Zielstärken in einem Altersrahmen zwischen 100 und 107 Jahren. 30–70 % der Baumkollektive erreichen bis zum Altersgrenzwert von 120 Jahren den Erntedurchmesser von 60 cm (Abbildung 6: Spalten 2 und 3, Zeile 3). Unter Berücksichtigung der innerhalb der zugrunde liegenden Versuche diagnostizierten Standortunterschiede ist die ZB-Adf. (mit 71–82 Z-Bäumen ha⁻¹) der st. Hdf. bezüglich der simulierten Z-Baum-Durchmesserentwicklung und somit auch in Bezug auf eine Verringerung des Verkernungsrisikos unterlegen. Bei st. Hdf. und bei Lichtwuchsdurchfors-

tung nach QD-Grundsätzen schätzt das Modell die Effekte auf den Zeitpunkt des Erreichens des vorgegebenen Erntedurchmessers unter Berücksichtigung der standörtlichen Unterschiede dagegen ähnlich ein. Die modellhafte Entwicklung der Bestände mit mäß. Hdf. führt nur auf den leistungsfähigsten Standorten (hdom 100 = 39 m) dazu, dass nennenswerte Anteile der Z-Bäume vor dem verkernungsrelevanten Altersgrenzwert die unterstellte Zielstärke erreichen. Bei einer Grundflächenhaltung von 80 % bezogen auf den theoretischen Wert einer maximal bestockten Fläche gleichen Alters und gleicher Bonität (Wördehoff et al. 2014) ist das Durchmesserwachstum der Ausleseebäume nochmals stärker unterdrückt: Das Modell projiziert Durchmesser von 60 cm selbst auf sehr wuchskräftigen Standorten erst jenseits eines Alters von 125 Jahren.

Modellbasierte Evaluierung der Durchmesserleistung der Buche

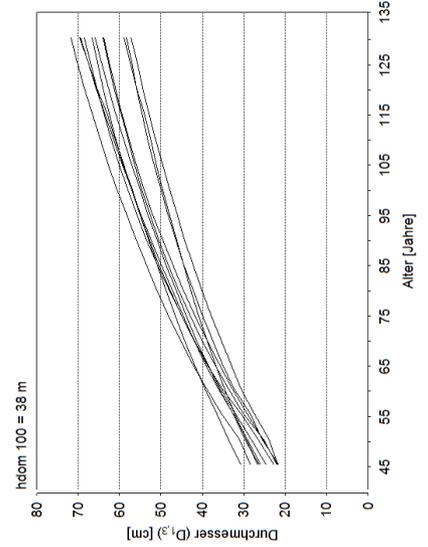
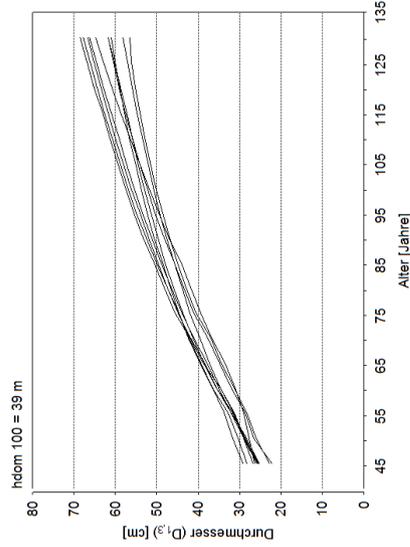
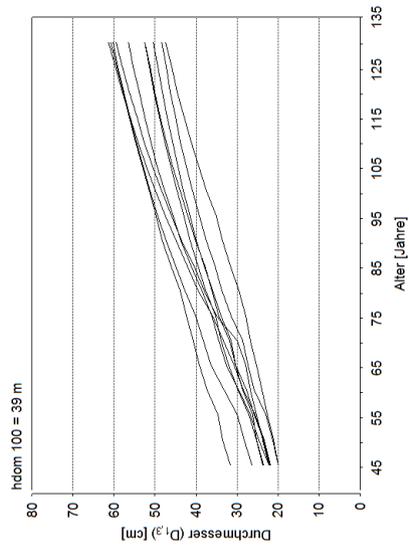
Wilhelm et al. (1999a, 1999d) unterstellen in ihrem Konzept zur Erzeugung stark dimensionierter Buchen Wuchsleistungen, die zu Durchmessern ($D_{1,3}$) von 80 cm und mehr in Produktionszeiträumen von 110 bis 120 Jahren führen sollen (siehe auch Klädtke 2002 sowie Nagel und Spellmann 2008). Die hier gewählten Simulationszeiträume erstrecken sich geringfügig über diese Baumalter hinaus bis zu einem Alter von 132 Jahren. Die den Simulationsvarianten zugrunde liegenden Durchforstungsversuche repräsentieren leistungsfähige Standorte. Die optimistischste Modellschätzung geht für das QD-Versuchsfeld in Saarforst 1668a davon aus, dass die ersten Ausleseebäume in einem Alter von ca. 130 Jahren einen Durchmesser von 80 cm erreichen. Für eine Oberhöhenbonität (hdom 100) von 35 m, wie in den QD-Feldern der rheinland-pfälzischen und der thüringischen Versuchsfläche, projiziert das Modell selbst bei konsequenter Lichtwuchsdurchforstung bis zum Ende des Simulationszeitraumes im Alter 130 bzw. 132 Jahre maximale Durchmesser von „nur“ ca. 70 cm (siehe Abbildung 4). Ähnliche Durchmesser der Z-Bäume schätzt das Wachstumsmodell nach 90-jähriger Simulationsdauer auf vergleichbar wuchskräftigen Standorten bei st. Hdf. (siehe Abbildung 6: Spalten 2 und 3, Zeile 3). Das Modell projiziert für die stark hochdurchforsteten rheinland-pfälzischen und saarländischen Versuchsfelder (hdom 100 \geq 38 m) maximale Durchmesser im Alter 132 bzw. 131 Jahre von 70 bzw. 72 cm. Bei der moderateren ZB-Adf. mit 71–82 Z-Bäumen ha⁻¹ sind die Erwartungen bezüglich der Durchmesserleistung nochmals weiter zurückzunehmen: Trotz des hohen Standortpotenzials der Parzellen mit ZB-Adf. (hdom 100 = 37 m) erreichen die Ausleseebäume bei Simulationsende Durchmesser von maximal 65 cm (siehe Abbildung 5).

Diskussion und waldbauliche Schlussfolgerungen

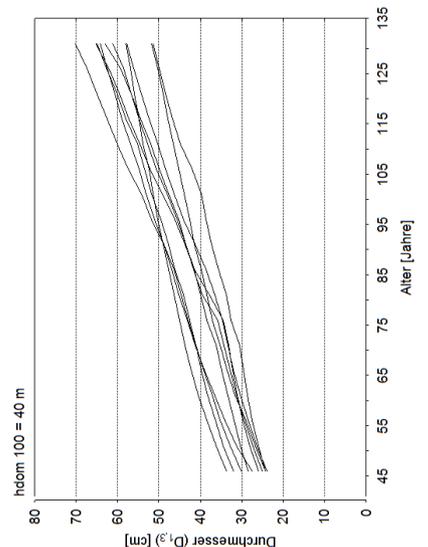
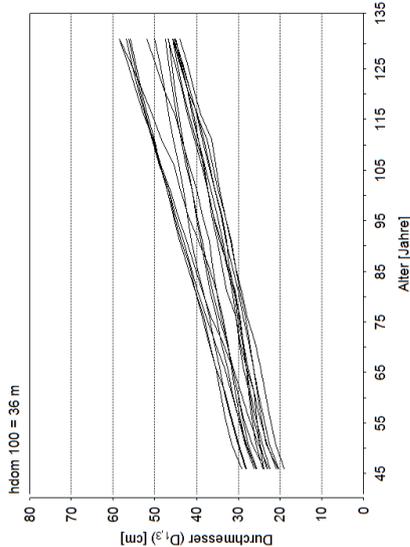
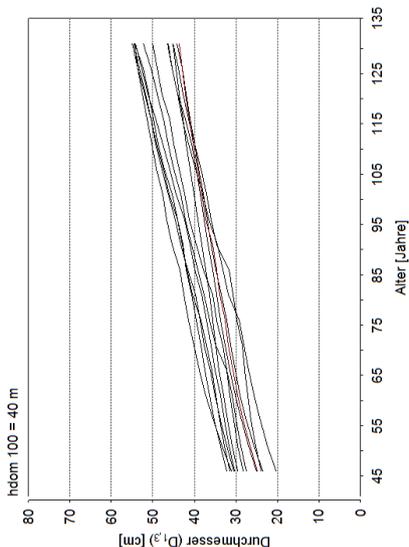
Der Lichtwuchsdurchforstung entsprechend, befinden sich die periodischen Radialzuwächse der Z-Bäume in einer Bestandesentwicklungsphase mit dem höchsten Zuwachsvermögen in den QD-Feldern nach 2 Jungdurchforstungen auf einem höheren Niveau als die der Vergleichskollektive. Dieses aus den empirischen Daten abgeleitete Ergebnis korrespondiert mit den Beobachtungen von Klädtke (1997) in baden-württembergischen Lichtwuchsversuchen.

Eine hohe Durchforstungsintensität zur Steigerung des Wertetrages der Buche wurde bereits von Schwappach (1911) erkannt, und Assmann (1965, 1976) sowie Schober (1972) demonstrierten auf der Grundlage langfristig beobachteter bayerischer und ehemals preußischer Buchen-Durchforstungsreihen die überlegene Wertleistung stark im Herrschenden durchforsteter Buchenbestände. Bei den vor-

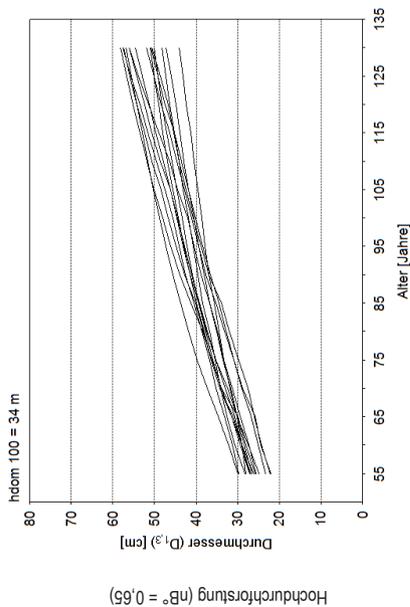
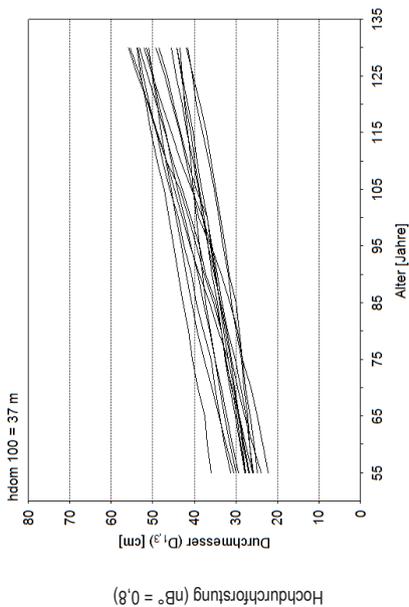
Saarforst 1668a



Lahnstein 9a



Bleicherode-Südharz 701a



Hochdurchforstung ($nB^* = 0.8$)

Hochdurchforstung ($nB^* = 0.65$)

Hochdurchforstung ($nB^* = 0.5$)

Abb. 6. Simulative Durchmesserentwicklung ($D_{1.3}$) [cm] der Z-Bäume über dem Alter [Jahre] in den Parzellen mit Hochdurchforstung (E-Grad; Wimmerauer 1902). Spalte 1–3: Versuchsorforstung (von links nach rechts), Zeile 1–3: Varianten bezüglich der Eingriffsstärke (von oben nach unten). Die Angabe der absoluten Oberhöhenbonität im Alter 100 Jahre (hdom 100) dient der Beurteilung der Standortleistungsfähigkeit. Simulated future crop tree diameter increment (DBH) [cm] over age [years] in plots that underwent crown thinning (E-grade; Wimmerauer 1902). Column 1 to 3: trial plots, line 1 to 3: variants, regarding intensity of thinning. The indication of absolute stand top height site class at the age of 100 years serves to assess site productivity.

liegenden Behandlungskonzepten sind 2 grundsätzliche waldbauliche Vorgehensweisen zu unterscheiden: QD-Strategie und ZB-Adf. zielen ausschließlich auf eine Förderung der Bestandeswertträger ab, während die Hochdurchforstungen auch die Zwischenfelder behandeln. Die QD-Strategie geht darüber hinaus von einer sehr geringen Anzahl Ausleseebäume aus (im Versuchsmittel 52 Z-Bäume ha^{-1} , gegenüber 71–120 Z-Bäumen je Flächeneinheit bei der ZB-Adf. und den Hochdurchforstungen), die während der Durchforstungsphase auch in der modellhaften Abbildung der Behandlung allseits und dauerhaft freigestellt werden. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist eine starke Förderung des Durchmesserwachstums und der Kronenentwicklung der wenigen Z-Bäume sowie die Minimierung des Verkernungsrisikos. Ein weiterer Effekt ist eine hohe Einzelbaumstabilität gegenüber Windbruch und -wurf durch geringe Schlankheitsgrade ($h/D_{1,3}$ -Werte) und durch eine niedrige Schwerpunktage der Baumkrone (Wilhelm et al. 1999a, 1999c, 2001, Landesforsten Rheinland-Pfalz 2009, Wilhelm und Rieger 2013). Durchmesserleistungen von mindestens 80 cm in Produktionszeiträumen von 110 bis 120 Jahren sollen so möglich sein. Kritisch angemerkt wird, dass die Waldbaustrategie „Qualifizieren – Dimensionieren“ die Flächenproduktivität, die ökonomische Bedeutung der Vorerträge angesichts des steigenden und sich bezüglich der Anteile energetischer Nutzung verändernden Rohholzbedarfs sowie die Produktionsrisiken vor dem Hintergrund der projizierten Klimaänderungen nicht ausreichend berücksichtigt (Dieter et al. 2001, Nabuurs et al. 2002, Brèda et al. 2006, Mantau et al. 2007, Manthey et al. 2007, Spekat et al. 2007, Spellmann et al. 2007, Gerstengarbe 2008, Nagel und Spellmann 2008, Spellmann et al. 2008, Suttmöller et al. 2008, Spellmann 2013).

Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluss verschiedener Buchen-Behandlungskonzepte auf das zeitliche Erreichen einer unterstellten Zieldimension der Z-Bäume von 60 cm BHD. Die Kombination von empirischen Versuchsflächendaten und Prognoseberechnungen mit einem Wachstumsmodell ist wissenschaftlich anerkannt und erprobt (z. B. Bücking et al. 2007, Nagel und Spellmann 2008, Nagel und Sprauer 2009). Auf der Grundlage 41- bis 50-jähriger Versuchsbestände wurde die Entwicklung der Z-Baum-Durchmesser über 90 Jahre simuliert, um die Behandlungsvarianten hinsichtlich ihrer Bedeutung für das durchmesser- und altersabhängige Verkernungsrisiko beurteilen zu können. Das Wachstumsmodell BWINPro liefert für nordwestdeutsche Standort- und Klimabedingungen biologisch plausible Ergebnisse auch für die QD-Strategie, da das Modell mit umfangreichen Rohdaten aus nordwestdeutschen Solitärversuchen, Einzelbaumexperimenten und Lichtungsversuchen parametrisiert wurde und laufend reparametrisiert wird. Auf einem sehr guten Standort ($h_{\text{dom}} 100 = 39 \text{ m}$) führt die QD-Strategie dazu, dass nahezu alle Ausleseebäume bis zur Mitte der VII. Altersklasse zielstarke Dimensionen erreichen und damit den verkernungsrelevanten Altersgrenzwert nur geringfügig überschreiten, aber bereits bei geringeren Bonitäten ($h_{\text{dom}} 100 = 35 \text{ m}$) wachsen bis zu diesem Grenzwert nur 50 % der Z-Bäume in die Zielstärke ein, mit einem erhöhten Risiko verkernungsbedingter Wertminderung für die Bäume geringeren Durchmessers (siehe auch Utschig und Küsters 2003). Für die ZB-Adf. projiziert das Modell auf wuchskräftigen Standorten ($h_{\text{dom}} 100 = 37 \text{ m}$) erste Zieldimensionen in einem Altersrahmen von 106 bis 118 Jahren; der Anteil zielstarker Bäume bis zum Grenzwert von 120 Jahren beträgt 40 %.

Die durch Wilhelm et al. (1999a, 1999d, 2001) unterstellten Durchmesserleistungen in Zeiträumen von 110 bis 120 Jahren mögen für Buchensolitäre zutreffen (siehe Hasenauer et al. 1994), werden aber durch das Wachstumsmodell für die Testbestände selbst auf sehr guten Standorten nicht projiziert. Dieses Simulationsergebnis korrespondiert mit dem Resultat einer dendrometrischen Untersuchung vorherrschender Buchen mit großen, gleichmäßigen sowie völlig intakten Kronen aus Südwestdeutschland und dem angrenzenden

den Lothringen, die sich nach dem Erreichen einer astfreien Schaftlänge von 25 % der Endhöhe weitgehend konkurrenzfrei entwickeln konnten. Demnach benötigten die untersuchten Bäume für einen Durchmesser von 80 cm etwa 130 Jahre (Klädtko 2002).

Altherr (1971) entwickelte ein Konzept zur Steigerung der Wertleistung der Buchenwirtschaft mit 100–120 Z-Bäumen ha^{-1} , das bei einer Oberhöhe (h_{dom}) von 18 m einsetzende und über 20 Jahre andauernde Grundflächenabsenkungen auf $20 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ vorsieht, danach nimmt die Durchforstungsintensität ab, und Bestandesgrundfläche und -vorrat wachsen wieder an. Diese Behandlungsweise zielt durch die konsequente Förderung der Ausleseebäume darauf ab, dass diese in Produktionszeiträumen von bis zu 120 Jahren mindestens Stammholzstärkeklasse L6 (Mittendurchmesser des ausgehaltenen Stammes mindestens 60 cm) erreichen, mit einem geringen Rotkern-Entwertungsrisiko. Klädtko (1997) und Hein et al. (2007) wiesen nach 25- bzw. 35-jähriger Beobachtung der Altherr'schen Versuchsreihen anhand aussagekräftiger Zustands- und Zuwachsgrößen nach, dass dieses Ziel unter den gesetzten Vorgaben erreichbar ist. Die Hochdurchforstung mit starker Grundflächenabsenkung ($nB^\circ = 0,5$) während der Durchforstungsphase und nachfolgenden schwächeren Eingriffen, beschreitet bezüglich der Z-Baumzahlen und der Durchforstungsstärke einen vergleichbaren Weg, die Durchforstung setzt aber früher ein, d. h. bei einer Bestandesoberhöhe (h_{dom}) von 14 bis 16 m (je nach Bonität zwischen 40 und 60 Jahre) (Nagel und Spellmann 2008). Die st. Hdf. ist der ZB-Adf. bezüglich der simulierten Z-Baum-Durchmesser überlegen. In Bezug auf st. Hdf. und QD-Strategie schätzt das Modell die Effekte auf den Zeitpunkt des Erreichens erster Zielstärken unter Berücksichtigung der standörtlichen Unterschiede ähnlich ein, aber die Festlegung auf sehr wenige Ausleseebäume im Rahmen der QD-Strategie ist mit Risiken verbunden und berücksichtigt im Gegensatz zum E-Grad mit 120 Z-Bäumen ha^{-1} die potenzielle flächenbezogene Wertleistung der Buchenbestände nicht ausreichend, was Nagel und Spellmann (2008) auf einem Modellansatz basierend nachwies (siehe auch Utschig 2000, Klädtko 2001, Guericke 2002, Spellmann 2006). Bei nur 50 Z-Bäumen ha^{-1} müssten diese Bäume einen Erntedurchmesser von mindestens 80 cm erreichen, wenn die Flächenproduktivität ausgeschöpft werden soll (Klädtko 2002), und befinden sich dann durchmesser-, aber auch altersmäßig in einem Bereich mit höherem Rotkernrisiko, denn Seeling und Becker (2002) fanden auch bei kronenspannungsarm gewachsenen, großkronigen Buchen eine deutliche Zunahme der Rotkernhäufigkeit ab einem Alter von ca. 120 Jahren.

Die Simulationsläufe belegen, dass auch eine starke Durchforstung der Buche im Sinne eines E-Grades mit 120 Z-Bäumen ha^{-1} mit Blick auf die eingangs formulierte Untersuchungsfragestellung bei frühem Durchforstungsbeginn und guten Bonitäten ($\geq \text{II}$. Ertragsklasse; Schober 1967: maß. Df.) in Produktionszeiträumen zu Z-Baumdimensionen führen kann, mit denen nur ein geringes Rotkernrisiko einhergeht. Ein zusätzlicher positiver Effekt dieser auch die Zwischenfelder behandelnden Behandlungsweise ist eine Verbesserung der Qualitätsstruktur des Bestandes insgesamt, da aufgrund der ökologischen Besonderheit der Buche räumlich konzentriert oft qualitativ gute und schlechte Individuen vorkommen, wie die Untersuchungen von Kató (1973) sowie Kató und Mülder (1979) belegen.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. Jürgen Nagel, Leiter des Sachgebietes Wachstumsmodellierung/Informatik an der NW-FVA, und Herrn Dr. Jan Hansen, wissenschaftlicher Mitarbeiter im vorgenannten Sachgebiet, danke ich für Rat und Tat beim Einstieg in die Bibliothek TreeGrOSS. Weiterhin gilt mein Dank dem Forstlichen Forschungs- und Kompetenzzentrum von ThüringenForst in Gotha für die freundliche Überlassung des Datenmaterials aus der Versuchsfläche Bleicherode-Südharz 701a.

Literatur

- Abetz P. 1974. Zur Standraumregulierung in Mischbeständen und Auswahl von Zukunftsbäumen. Allg. Forstz. 29, 871–873
- Altherr E. 1971. Wege zur Buchenstarkholzproduktion. Festschrift zur 15. Hauptversammlung des baden-württembergischen Forstvereins, 123–127
- Assmann E. 1959. Höhenbonität und wirkliche Ertragsleistung. Forstw. Cbl. 78, 1–20
- Assmann E. 1961. Waldertragskunde. BLV, München
- Assmann E. 1965. Buchenlichtwuchsbetrieb. Forstw. Cbl. 84, 329–346
- Assmann E. 1976. Behandlung und Produktionsmöglichkeiten der Rotbuche nach dem jetzigen ertragskundlichen Wissensstand. Forstw. Cbl. 95, 245–251
- Bergel D. 1973. Formzahluntersuchungen an Buche, Fichte, europäischer Lärche und japanischer Lärche zur Aufstellung neuer Massentafeln. Allg. Forst- u. Jagd-Ztg. 144, 117–124
- Bergel D. 1974. Massentafeln II – Eiche, Roteiche, Kiefer. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) 2014. Bundeswaldinventur 3. Bonn
- BML (Bundesministerium für Landwirtschaft) 1969. Verordnung über gesetzliche Handelsklassen für Rohholz (Forst-HKLV) vom 31. Juli 1969. BGBl. I, S. 1075 ff.
- Bortz J. 1988. Statistik für Sozialwissenschaftler. 3. Aufl., Springer, Berlin
- Brèda N., Huc R., Granier A., Dreyer E. 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. Ann. For. Sci. 63, 625–644
- Bryndum H. 1987. Buchendurchforstungsversuche in Dänemark. Allg. Forst- u. Jagd-Ztg. 158, 115–121
- Bücking M., Moshammer R., Roeder A. 2007. Wertholzproduktion bei der Fichte mittels kronenspannungsarm gewachsener Z-Bäume – Ökonomische Prognose unter Berücksichtigung waldwachstumskundlicher und holzqualitativer Eigenschaften. Mitteilung FAWF, Trippstadt, Nr. 62/07
- Burger H. 1939. Kronenaufbau gleichaltriger Nadelholzbestände. Mitteilung der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen 21, 5–58
- DFWR (Deutscher Forstwirtschaftsrat) 2006. Zahlen und Fakten zur Buchenwaldbewirtschaftung in Deutschland. http://www.dfwr.de/presse/pressemitteilungen/PM_Buchen_ZahlenFakten.pdf (abgerufen am 6.5.2015)
- DFWR (Deutscher Forstwirtschaftsrat), DHWR (Deutscher Holzwirtschaftsrat) 2015. Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR) (privatrechtliche Vereinbarung – in Kraft getreten am 1. Januar 2015). <http://www.rvr-deutschland.de> (abgerufen am 6.5.2015)
- Dieter M., Englert H., Klein M. 2001. Abschätzung des Rohholzpotentials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Institut für Ökonomie der BFH, Hamburg, Arbeitsbericht 2001/11
- Döbbeler H., Albert M., Schmidt M., Nagel J. 2003. BWINPro. Programm zur Bestandesanalyse und Prognose. Handbuch zur Version 6.2. Göttingen
- Duda H. 2006. Vergleich forstlicher Managementstrategien. Dissertation Fakultät Forstwissenschaften und Waldökologie Universität Göttingen. <http://www.webdoc.sub.gwdg.de/diss/2006/duda/> (abgerufen am 8.5.2015)
- Englisch M. 2006. Die Rotbuche – ein Baumartenportrait. BFW-Praxisinformation 12, 3–4. http://www.waldwissen.net/wald/bacume_waldpflanzen/laub/bfw_buche/index_DE (abgerufen am 10.6.2015)
- Felbermeier B. 1993. Der Einfluss von Klimaänderungen auf die Areale der Baumarten: Methodenstudie und regionale Abschätzung für die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in Bayern. Forstliche Forschungsberichte München 134
- Freise C., Spieker H. 1999. Konkurrenzfreies Wachstum der Buche – Wie weit lässt sich das Dickenwachstum durch Kronenexpansion steigern? AFZ/Der Wald 54, 1346–1349
- Freist H. 1962. Untersuchungen über den Lichtungszuwachs der Rotbuche und seine Ausnutzung im Forstbetrieb. Forstwissenschaftliche Forschungen. Paul Parey, Hamburg und Berlin
- Gauer J., Kroiher F. (Hrsg.) 2012. Waldökologische Naturräume Deutschlands – Forstliche Wachstumsgebiete und Wachstumsbezirke. Bundesforschungsinstitut für ländliche Räume, Wald und Fischerei (vTI), Sonderheft 359
- Gerstengarbe F.-W. 2008. Der Klimawandel – Ursache und Veränderungen. Gartower Gespräche, Eigenverlag, 12–22
- Guericke M. 2002. Untersuchungen zur Wuchsdynamik der Buche. Forst und Holz 57, 331–337
- Hägglund B. 1981. Evaluation of forest site productivity. C.A.B. For. Abstr. 42, 515–527
- Hansen J., Nagel J. 2014. Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS – Anwendung und theoretische Grundlagen. Universitätsverlag Göttingen
- Hapla F., Steinfart H.-C. 2001. Kritische Analyse der EN 1316-1 bei Sortierung von Buchen-Starkholz im Vergleich zur HKS. Allg. Forst- u. Jagd-Ztg. 173, 86–94
- Hasenauer H., Stampfer E., Rohrmoser C., Sterba H. 1994. Solitärdimensionen der wichtigsten Baumarten Österreichs. Österreichische Forstzeitung 105, 28–29
- Hein S., Lenk E., Klädtke J., Kohnle U. 2007. Z-Baumorientierte Auslese-durchforstung in Buche (*Fagus sylvatica* L.): Auswirkungen auf Qualität, Sortenstruktur und Wertleistung. Allg. Forst- u. Jagd-Ztg. 178, 8–20
- Hessen-Forst (Hrsg.) 2008. Hessische Waldbaufibel. Grundsätze und Leitlinien zur naturnahen Wirtschaftsweise im hessischen Staatswald. Kassel
- Hupfeld M., Berendes G., Lehnhardt F. 1997. Buchenrotkern und Zielstärkennutzung. Untersucht im hessischen Forstamt Hatzfeld. AFZ/Der Wald 52, 1024–1027
- Johann K. 1993. DESER-Norm 1993. Normen der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten zur Aufbereitung von waldwachstumskundlichen Dauerversuchen. Tagung DVFFA – Sektion Ertragskunde – in Unterreichenbach-Kapfenhardt. Tagungsbericht, 96–104
- Johann K. 1996. Zieldurchmesser und Rotkernigkeit bei Buche. Holzkurier 51/52, 24–26
- Kató F. 1973. Begründung der qualitativen Gruppendurchforstung. Habilitationsschrift Forstliche Fakultät Universität Göttingen
- Kató F., Mülder D. 1979. Qualitative Gruppendurchforstung der Buche – Wertentwicklung nach 15 Jahren. Allg. Forst- u. Jagd-Ztg. 150, 105–111
- Klädtke J. 1997. Seit 25 Jahren nach Altherr: Buchen-Lichtwuchsdurchforstung. AFZ/Der Wald 52, 1019–1023
- Klädtke J. 2001. Zu: Konzepte zur Buchen-Lichtwuchsdurchforstung. AFZ/Der Wald 56, 1339
- Klädtke J. 2002. Wachstum großkroniger Buchen und waldbauliche Konsequenzen. FVA-Einblick 5, 2–3
- Knoke T., Schulz-Wenderoth S. 2001. Ein Ansatz zur Beschreibung von Wahrscheinlichkeit und Ausmaß der Farbkernbildung bei Buche (*Fagus sylvatica* L.). Forstw. Cbl. 120, 154–172
- Kohnle U., Klädtke J., Michiels H.-G. 2014. Waldentwicklungstypen – standorts- und waldwachstumskundliche Aspekte. AFZ/Der Wald 69, 9–11
- Kölling C., Walentowski H., Borchert H. 2005. Die Buche in Mitteleuropa. AFZ/Der Wald 60, 696–699
- Kraft G. 1884. Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Klindworth's Verlag, Hannover
- Kramer H. 1959. Die Oberhöhe als Bestandesmerkmal. Allg. Forst- u. Jagd-Ztg. 130, 241–255
- Kramer H., Akça A. 1995. Leitfaden zur Waldmesslehre. J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. M.
- Landesbetrieb SaarForst 2008. Richtlinie für die Bewirtschaftung des Staatswaldes im Saarland (WBRL). Saarbrücken. [http://www.saarforst-saarland.de/images/stories/Microsoft Word-WBRL Nov. 2008-aktuell.doc.pdf](http://www.saarforst-saarland.de/images/stories/Microsoft%20Word-WBRL%20Nov.2008-aktuell.doc.pdf) (abgerufen am 15.7.2015)
- Landesforsten Rheinland-Pfalz 2009. Qualifizieren – Dimensionieren. Waldbaustrategie. 2. Aufl., Zentralstelle der Forstverwaltung Rheinland-Pfalz, Neustadt/Weinstraße
- Landesforsten Rheinland-Pfalz 2010. Richtlinie zur waldbaulichen Behandlung der Wälder in der Reifephase und im Generationenwechsel. Mainz. <http://www.wald-rlp.de/index.php?id=3188&type=98> (abgerufen am 15.7.2015)
- Lappi J. 1991. Calibration of height and volume equations with random parameters. For. Sci. 37, 781–801
- Lappi J. 1997. A longitudinal analysis of height/diameter-curves. For. Sci. 43, 555–570
- Letter H.-A. 1999. Wert – nicht Masse ist das Ziel. Manuskript eines ANW-Vortrages (unveröff.)
- Mantau U., Sögel C., Wimar H. 2007. Holzrohstoffbilanz Deutschland – Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung bis 2010. Hamburg

- Manthey M., Leuschner C., Hårdt W. 2007. Buchenwälder und Klimawandel. *Natur und Landschaft* 82, 441–445
- Michaelis K.-A. 1935. Wie bringt Durchforsten die größere Stärke- und Wertzunahme des Holzes? 6. Aufl., Neumann, Neudamm
- Nabuurs G.J., De Goede D.M., Michie B., Schelhaas M.J., Wesseling J.G. 2002. Long-term international impacts of nature-oriented forest management on European forests – An assessment with the EFISCEN model. *Journal World For. Res. Manage.*, Vol. 9, 101–129
- Nagel J. 2009. Waldwachstumssimulation mit dem Softwarepaket Tree-GrOSS – Neuerungen, Erweiterungsmöglichkeiten und Qualitätsmanagement. Tagung DVFFA – Sektion Forstliche Biometrie und Informatik – in Freiburg. *Die grüne Reihe*, 174–178
- Nagel J., Sprauer S. 2009. Langfristige Simulation der Zielstärkennutzung in Buchenbeständen. Tagung DVFFA – Sektion Ertragskunde – in Ascona, Schweiz. Tagungsbericht, 159–164. http://www.nw-fva.de/~nagel/SektionErtragskunde/band2009/Tag2009_17.pdf (abgerufen am 10.6.2015)
- Nagel J., Duda H., Hansen J. 2015. Forest Simulator BWINPro Version 7.8.01. Frei verfügbar unter <http://www.nw-fva.de/Software/> (abgerufen am 6.7.2015)
- Nagel R.-V., Spellmann H. 2008. Wachstum, Behandlung und Ertrag von Reinbeständen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in Nordwestdeutschland. Beiträge aus der NW-FVA 3, Göttingen
- Nečesany V. 1958a. The change of parenchymatic cells vitality and the physiological base for the information of beech heart. *Drev. výsk.* 3, 131–149
- Nečesany V. 1958b. Der Buchenkern. Struktur, Entstehung und Entwicklung. *Slovenská Akadémia Vied, Bratislava*, 206–222
- Neumann M. 1999. Die Bedeutung der Baumhöhe im Wandel der Waldwachstumsforschung. *Cbl. ges. Forstw.* 116, 3–16
- Niedersächsische Landesforsten 1997. Entscheidungshilfen zur Behandlung und Entwicklung von Buchenbeständen. Merkblatt 33
- NW-FVA (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt) 2016. Regionalisierte Klimawerte auf der Grundlage von Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), 1 km-Raster, Mittelwerte für die Klimanormalperiode 1961–1990. Göttingen (unveröff.)
- Pretzsch H. 1992. Zur Analyse der räumlichen Bestandesstruktur und der Wuchskonstellation von Einzelbäumen. *Forst und Holz* 47, 408–418
- Rudow A. 2014. Zur Ökologie und Entwicklungsgeschichte der Buche (*Fagus sylvatica* L.). *Zürcher Wald* 46, 4–8. http://www.zueriwald.ch/files/5614/0447/4101/ZW3_14kl.pdf (abgerufen am 22.6.2015)
- Sachse H. 1991. Kerntypen der Rotbuche. *Forstarchiv* 62, 238–242
- Schmidt M., Nowack S., Riebeling R. 2011. Methodische Ansätze und Ergebnisse zur Quantifizierung des Buchen-Rotkerns in Hessen. *Allg. Forst- u. Jagd-Ztg.* 182, 146–159
- Schober R. 1967. Ertragstafeln für Rotbuche. In: Schober R. 1987. Ertragstafeln wichtiger Baumarten. 3. Aufl., J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. M.
- Schober R. 1972. Die Rotbuche. Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und Mitteilungen der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt 43/44
- Schwappach A. 1911. Die Rotbuche. Neumann, Neudamm
- Seeling U. 1991. Abnorme Kernbildung bei Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) und ihr Einfluß auf holzbiologische und holztechnologische Kenngrößen. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme Universität Göttingen A 77
- Seeling U., Becker G. 2002. Der „Rotkern“ bei großkronigen Buchen. *FVA-Einblick* 5, 4–5
- Spekar A., Enke W., Kreienkamp F. 2007. Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM 5/MPI – OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES – Szenarien B1, A1B und A2. Umweltbundesamt, Publikationen UBA, Dessau
- Spellmann H. 1999. Überführung als betriebliche Aufgabe. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 8, 194–217
- Spellmann H. 2006. Bestandespflege – Mittel zum Zweck. Entscheidungshilfen auf der Grundlage waldwachstumskundlicher Forschungsergebnisse. Tagung Deutscher Forstverein in Weimar/Thüringen. Tagungsbericht, 126–136
- Spellmann H. 2013. Masse statt Klasse? Waldbauliche Konsequenzen aus einer veränderten Rohholznachfrage. *AFZ/Der Wald* 67 (9), 10–15
- Spellmann H., Suttmöller J., Meesenburg H. 2007. Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. *AFZ/Der Wald* 62, 1246–1249
- Spellmann H., Mantau U., Polley H. 2008. Nachhaltige Rohholzversorgung aus deutschen Wäldern – Positionspapier der Plattform Forst u. Holz von DFWR und DHWR. www.dfwr.de/download (abgerufen am 27.6.2013)
- Statistisches Bundesamt 2015. Wald und Holz. Holzeinschlag nach Holzartengruppen. <http://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/WaldundHolz/Tabellen/GesamteinschlagHolzartengruppen.html> (abgerufen am 6.5.2015)
- Statsoft 1995. STATISTICA for Windows (Vol. 1). General conventions and statistics I. 2. Aufl. Tulsa/Oklahoma
- Suttmöller J., Spellmann H., Fiebiger C., Albert M. 2008. Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Buchenwälder in Deutschland. Beiträge aus der NW-FVA 3, Göttingen
- Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt 2004. Waldbaugrundsätze für den Staatswald Thüringens einschließlich der Behandlungsrichtlinien der Hauptbaumarten. Erfurt
- Utschig H. 2000. Wachstum vorherrschender Buchen in Abhängigkeit von Standort und Behandlung. *Forst und Holz* 55, 44–50
- Utschig H., Küsters E. 2003. Wachstumsreaktionen der Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf Durchforstungen – 130-jährige Beobachtung des Durchforstungsversuches Elmstein 20. *Forstw. Cbl.* 122, 389–409
- Walter M., Kučera L.J. 1991. Vorkommen und Bedeutung verschiedener Kernformen bei der Buche. *Schweiz. Z. Forstw.* 142, 391–406
- Wiedemann E. 1935. Zur Klärung der Durchforstungsbegriffe. *Zeitschr. Forst- u. Jagdw.* 67, 56–64
- Wilhelm G.J., Rieger H. 2013. Naturnahe Waldwirtschaft mit der QD-Strategie. Ulmer, Stuttgart
- Wilhelm G.J., Letter H.-A., Eder W. 1999a. Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz: Zielsetzungen und waldbauliche Prinzipien. *AFZ/Der Wald* 54, 232–233
- Wilhelm G.J., Letter H.-A., Eder W. 1999b. Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz: Die Phase der Qualifizierung. *AFZ/Der Wald* 54, 234–236
- Wilhelm G.J., Letter H.-A., Eder W. 1999c. Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz: Die Phase der Dimensionierung. *AFZ/Der Wald* 54, 236–238
- Wilhelm G.J., Letter H.-A., Eder W. 1999d. Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz: Die Phase der Reife. *AFZ/Der Wald* 54, 239–240
- Wilhelm G.J., Letter H.-A., Eder W. 2001. Zu: Konzepte zur Buchen-Lichtwuchsdurchforstung. *AFZ/Der Wald* 56, 1226–1227
- Wimmenauer K. 1902. Die diesjährige Versammlung des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten. Beilage: Anleitung zur Ausführung von Durchforstungs- und Lichtungsversuchen. *Allg. Forst- u. Jagd-Ztg.* 78, 422–425
- Wördehoff R., Schmidt M., Nagel R.-V., Spellmann H. 2014. Prognose der maximalen Bestandesgrundfläche mit Hilfe von Quantilsregressionen und Entwicklung eines grundflächengesteuerten Nutzungskonzeptes für die Baumarten Buche und Fichte in Nordwestdeutschland. Tagung DVFFA – Sektion Ertragskunde – in Lenzen/Elbe. Tagungsbericht, 88–92
- Zingg A. 1999. Genauigkeit und Interpretierbarkeit von Oberhöhen. *Cbl. ges. Forstw.* 116, 25–34
- Zycha H. 1948. Über Kernbildung und verwandte Vorgänge im Holz der Rotbuche. *Forstw. Cbl.* 67, 80–109