

forstarchiv 88, 79-90
(2017)

DOI 10.4432/0300-
4112-88-79

© DLV GmbH

ISSN 0300-4112

Korrespondenzadresse:
axel.albrecht@forst.
bwl.de

Eingegangen:
16.12.2016

Angenommen:
04.03.2017

Effekte von Jungbestandspflege in baumzahlreichen Fichtenverjüngungen

Effects of pre-commercial thinning in high-density Norway spruce regeneration

AXEL ALBRECHT¹, ELKE LENK¹, BERND ROSE² und ULRICH KOHNLE¹

¹ Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA), Wonnhaldestraße 4, 79100 Freiburg, Deutschland

² Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft (FAWF), Hauptstraße 16, 67705 Trippstadt, Deutschland

Kurzfassung

Ausgewertet wurden die Daten von acht Fichten-Versuchsanlagen (*Picea abies* (L.) H. Karst.) in stammzahlreichen Jungbeständen (Bürstenwüchse aus Naturverjüngung) auf Freiflächen in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, auf denen jeweils unterschiedlich intensive Behandlungen zur Stammzahlreduktion durchgeführt worden waren. Die Versuchsflächen wurden in Sturmfolgebänden in Rheinland-Pfalz nach Vivien/Wiebke (1990) und in Baden-Württemberg nach Lothar (1999) angelegt. Zwischen der unbehandelten Variante und schematischen Stammzahlreduktionen (< 3.000 verbleibende Fichten pro ha) als Extremvarianten wurden noch die Auskesselung (Freistellung von 250 Fichten im Radius von 2,5 m) und die Köpfung (Köpfen der Bedränger von 250 Fichten im Radius von 2 m) als intermediäre Varianten getestet. Einige Jahre nach den Eingriffen wurden erneut Stammzahl, Durchmesser und Höhen erhoben, um die eingriffsbedingten Effekte auf Durchmesserentwicklung, Bestandesstabilität und Strukturdiversität zu beschreiben.

Die aktuellsten Aufnahmen zeigen, dass Auskesselung und schematische Stammzahlreduktion im Jugendstadium (ca. 4 m Oberhöhe) bei der weiteren Bestandesentwicklung bis zur Bestandesoberhöhe von ca. 13 m zu durchschnittlich 3 cm größeren Mitteldurchmessern im Vergleich zur unbehandelten Variante führen. Bezogen auf das Teilkollektiv der baden-württembergischen Versuchsflächen wurde dieser Durchmesseroversprung nur durch die schematische Reduktion erzielt.

Bezogen auf das Kollektiv der 200 stärksten Fichten je Hektar bewirkte die schematische Stammzahlreduktion einen Durchmesseroversprung von 5 cm, die Auskesselung von 3 cm bei der Oberhöhe von 13 m gegenüber der unbehandelten Variante. Dabei waren in der Auskesselungsvariante die Kesselzentralbäume nur zu etwa 50 % Profiteure der Freistellung; auch andere Bestandesindividuen profitierten von der Freistellung.

Die bestandesweisen H/D-Werte reagierten rasch auf die Eingriffe: Insbesondere die schematische Stammzahlreduktion verringerte die H/D-Werte spürbar, jedoch ebnete dieser Effekt mehrere Jahre nach dem Eingriff wieder ab, und die Werte näherten sich denen der Auskesselung. Beide Eingriffsvarianten senkten die H/D-Werte gegenüber der unbehandelten Variante erheblich.

In der Konsequenz für den praktischen Waldbau bedeutet das Unterlassen von Jungbestandspflege eine Erhöhung der Endhöhe von Fichtenbeständen um schätzungsweise 5 m, sofern die Zieldurchmesser unverändert erreicht werden sollen. Dies bringt eine erhebliche Erhöhung der Sturmschadenswahrscheinlichkeit mit sich. Wird alternativ nach unterlassener Bestandspflege die Endhöhe oder Produktionszeit unverändert als Zielkriterium der Fichtenproduktion beibehalten, ist im Bestandeskollektiv der 200 stärksten Fichten mit um etwa 5 cm reduzierten Durchmessern zu rechnen.

Jungbestandspflege erscheint als Stabilisierungsmaßnahme zur Vermeidung von Schaftbruch unverzichtbar. Fichtenbetriebe, die das Jugendrisiko Schneebruch und das Altersrisiko Windbruch berücksichtigen, sollten in dichten Fichtennaturverjüngungen Jungbestandspflege durchführen. Innerhalb der verschiedenen Pflegevarianten kann dann zwischen höchstem Eingriffseffekt bei der schematischen Reduktion, gefolgt von mittlerem Effekt bei der Auskesselung und einem geringen Effekt bei der Köpfung gewählt werden. Ermutigend ist auch das Ergebnis der Analysen der Durchmesserdiversität: Zum gegenwärtigen Zeitpunkt lassen sich bei keiner der untersuchten Pflegevarianten negative Auswirkungen hinsichtlich einer unerwünschten Homogenisierung durch Jungbestandspflege erkennen.

Schlüsselwörter: Auskesselung, schematische Stammzahlreduktion, Durchmesserentwicklung, Strukturdiversität, Durchmesserdiversität, Naturverjüngung, Differenzierung, Bestandesdurchmesser, Gemeine Fichte, *Picea abies*

Abstract

Data from eight experimental sites of young and high-density Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) natural regeneration stands in Southwest Germany were analyzed. The treatments (pre-commercial thinnings) ranged from systematic reduction (< 3,000 remaining stems per ha) to a no-treatment control, complemented by an intermediate selective thinning (2.5 m radial clearing around 250 target stems per ha). The measured stands originated from natural regeneration after windthrow in 1990 and 1999 and were treated once at a dominant stand height of around 3 to 4 m. Several years after treatment, the stands were measured again for stem number, diameter and height to quantify the effects of pre-commercial thinning on diameter development, stand stability and structural diversity.

The most recent surveys at a dominant stand height of 13 m show that mean stand diameters of treated stands are about 3 cm larger compared to untreated stands. In a subsample of the plots, this difference was only observed for the most intense systematic reduction of stem numbers, not for the selective intervention. For the diameter of dominant trees (diameter of the 200 thickest spruces/ha) this advance was even more pronounced, amounting to +5 cm for the systematic and to +3 cm for the selective treatment, respectively. An interesting result was that in the selective treatment only 50% of the released target trees developed to be among the 200 thickest trees per hectare, indicating that also other individuals of those stands benefit from the release.

Pre-commercial thinning quickly impacted on slenderness: especially the systematic treatment improved this stability indicator significantly, whilst the effect seems to be limited in duration. Despite initial differences, slenderness of systematic and selective treatments became very similar several years after the intervention. However, both treatments improved the slenderness ratio significantly compared to the control.

As a consequence for forestry, skipping pre-commercial thinning in high-density spruce regenerations is likely to increase final stand height by about 5 m, if fixed target diameters of trees are the objective of spruce management. This will result in a significantly increased probability of storm damage. Otherwise, if the management objective under omitted pre-commercial thinning remains a fixed rotation age, mean diameters of target trees are expected to be 5 cm smaller than in treated stands. Pre-commercial thinning additionally appears essential to stabilize stands against stem breakage. Consequently, silvicultural regimes aiming at reducing snow and wind breakage should employ pre-commercial thinning. Undesired, negative side-effects of precommercial thinning, such as homogenizing structural diversity, were not found based on measures of diameter diversity.

Key words: treatment variants, reduction of stem numbers, selective clearing, selective release, stand diameter development, natural regeneration, natural differentiation, structural diversity, diameter diversity, Norway spruce, *Picea abies*

Einleitung

Die Frage nach der Notwendigkeit von Pflegeeingriffen in Verjüngungen von Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) ist alles andere als neu. Früher standen dabei zunächst vor allem Aspekte im Zusammenhang mit Kulturen im Vordergrund: insbesondere Pflanzenzahlen, -sortimente oder -verbände sowie die Notwendigkeit standraumerweiternder Pflegemaßnahmen in übermäßig dichten Pflanzungen (z. B. FVA-BW 1968, Klein 1978). Seit einiger Zeit kommen dazu vermehrt auch Fragen, wie am besten mit baumzahlreichen, wenig differenzierten Naturverjüngungen („Bürstenwüchse“) umzugehen sein dürfte, wenn diese abrupt den Altholzschirm verlieren und im Freistand erwachsen (Cameron 2002, Kohnle und v. Teuffel 2005).

Solche Fichten-Bürstenwüchse finden sich nicht selten auf Sturm-schadflächen, wie sie beispielsweise in großem Umfang nach den Stürmen Vivian/Wiebecke 1990 (Kenk 1991), Lothar 1999 (Jacob 2004, Kronauer 2000, Kohnle et al. 2005) oder Kyrill 2007 (Kronauer 2007) entstanden sind. Entsprechende Verjüngungssituationen können allerdings auch planmäßig entstehen beispielsweise im Zuge von Saumschlägen. Gemeinsam ist den Bürstenwüchsen, dass die nach Höhe und/oder Alter nur wenig variierenden Pflanzen teilweise extrem dicht beieinander stehen. Dadurch entsteht enormer Konkurrenzdruck, der die Entwicklungsdynamik prägt. Dies wirkt sich maßgeblich auf verschiedene Aspekte des Differenzierungsprozesses aus wie beispielsweise Mortalität, Entwicklung von Bestandesdichte, Mischbaumarten, Qualität, Durchmesser und Stabilität der Bäume.

Auf der einen Seite wird Nichteingreifen heute gerne mit positiv belegten Begriffen wie Natürlichkeit, Selbstdifferenzierung, natürliche Astreinigung oder biologische Automation verknüpft. Auf der anderen Seite verursachen Pflegeeingriffe zwar Aufwendungen, können aber zweifelsohne auch positive Wirkungen zeitigen: sie können beispielsweise den Erhalt wuchsunterlegener Mischbaumarten fördern oder die technische Durchführbarkeit später folgender Durchforstungen erleichtern. Außerdem fördern Pflegeeingriffe die Durchmesserentwicklung der Fichten (Kenk und Weise 1998, Kohnle und v. Teuffel 2005) und damit auch deren Stabilität beispielsweise gegen Schneebruch (Kramer und Bjerg 1978, Merkel 1975, Brüchert et al. 2000, Jalkanen und Mattila 2000). Eine weitere Konsequenz der Förderung des Durchmesserwachstums ist es, dass dadurch ein angestrebter Zieldurchmesser bereits bei geringerer Baumhöhe, bei kürzerem Produktionszeitraum und damit bei geringerer Gefährdung durch Sturmschäden erreicht werden kann (Schmidt et al. 2010, Albrecht et al. 2012).

Auswirkungen von Pflegeeingriffen auf die Entwicklung der Bewurzelung sind zwar ebenfalls denkbar. Da Wurzeluntersuchungen jedoch außerordentlich aufwendig sind, liegen zu diesem Aspekt

bisher nur wenige Untersuchungen vor. Aus einigen Wurzeluntersuchungen in Kulturen mit Fichte oder Naturverjüngungen mit Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) liegen jedoch orientierende Hinweise darauf vor, dass sich stärkere Konkurrenz tatsächlich ungünstig auf die Entwicklung stabilitätsgebender Grob- und Strukturwurzeln auswirkt (McMinn 1963, Nielsen 1990, Shainsky et al. 1992, Bolkenius 2001, Kneeshaw et al. 2002, Hermann 2005, Nicoll et al. 2006, Martens 2010, Briggs et al. 2012, Kuehne et al. 2015).

Insgesamt gilt es daher, die Vor- und Nachteile von Pflegeeingriffen in baumzahlreichen Fichten-Naturverjüngungen forstbetrieblich sorgfältig abzuwägen. Eine wichtige Grundlage dafür sind verlässliche Abschätzungen der unbeeinflussten selbstdifferenzierenden Entwicklung baumzahlreicher, unüberschirmt aufwachsender Fichtenbestände im Vergleich zur Entwicklung nach Pflegeeingriffen. Nach Orkan Lothar wurden dazu von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) Aufnahmen bereits vorhandener Praxisflächen als „Soforthilfe“ für Entscheidungen zur Bewältigung der Sturmschadensfolgen ausgewertet (Kohnle und v. Teuffel 2005). Parallel dazu wurde in Baden-Württemberg seinerzeit eine Serie längerfristiger Versuche eingerichtet, mit dem Ziel, die Wirkung von Maßnahmen der Jungbestandspflege in abgedeckten Fichten-Bürstenwüchsen systematisch zu beobachten. Nachdem die Versuche nun seit über zehn Jahren laufen und in der Zwischenzeit mindestens zweimal aufgenommen wurden, besteht die Möglichkeit einer Zwischenbilanz, die Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist. Von der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF) werden ähnliche Versuchsanlagen zur Jungbestandspflege in baumzahlreichen Fichten-Verjüngungen betreut. Es erschien daher zweckmäßig, sie in diese Auswertung mit einzubeziehen.

Ziel der Untersuchung ist die Darstellung der eigendynamischen Entwicklung unbehandelter Jungwüchse im Vergleich zu Jungwüchsen, in denen gezielte Maßnahmen zur Jungbestandspflege erfolgt waren. Insbesondere ging es um die Auswirkungen auf die Entwicklung von Durchmesser, Stabilität und Struktur der Bestände.

Material und Methode

Versuchsanlagen

Versuche wurden an insgesamt acht Waldorten (sechs in Baden-Württemberg und zwei in Rheinland-Pfalz; Abbildung 1) in fichten-dominierten baumzahlreichen Naturverjüngungen ohne überschirmenden Altbestand durchgeführt. Auf den Feldern am jeweiligen

Versuchsort wurden unterschiedliche Varianten der Jungbestandspflege durchgeführt. Die Pflegeeingriffe erfolgten dabei einmalig zu Versuchsbeginn. Die weitere Entwicklung der Bestände ist seither ohne weitere aktive Eingriffe verlaufen.

Insgesamt wurden folgende vier grundsätzlich unterschiedliche Pflegevarianten in den Versuchen realisiert:

- Unbehandelte Kontrolle: Auf diesen Feldern erfolgten keinerlei Pflegeeingriffe, um den ungestörten Verlauf eigendynamischer Differenzierungsprozesse beobachten zu können.
- Köpfung: Auswahl von rd. 200–250 herrschenden Bäumen je Hektar in \pm gleichmäßiger Verteilung und Begünstigung durch Köpfung benachbarter Bedränger in einem Radius von rd. 1,5–2,5 m.
- Auskesselung: Auswahl von rd. 200–250 herrschenden Bäumen je Hektar in \pm gleichmäßiger Verteilung und Entfernung sämtlicher Nachbarbäume in einem Radius von rd. 1,0–2,5 m.
- Schematische Reduktion: Freistellung von rd. 1.000–3.000 herrschenden Bäumen je Hektar in \pm gleichmäßiger Verteilung durch systematische Entfernung aller anderen Bäume auf der Fläche.

Allerdings wurden nicht an allen Versuchsorten alle Varianten umgesetzt. Zwar beinhalten alle Versuche die Varianten „unbehandelte Kontrolle“ und „Auskesselung“. In Baden-Württemberg fehlt jedoch die Variante „Köpfung“ und in Rheinland-Pfalz die Variante „schematische Reduktion“. Außerdem wurden die Pflegevarianten durch Modifikationen des Grundprinzips teilweise weiter differenziert. Details dazu sind im Folgenden näher ausgeführt und in der Tabelle 1 dargestellt.

Versuche in Baden-Württemberg

Die baden-württembergischen Versuche (Fi465–Fi477, Abbildung 1) wurden zwischen 2003 bis 2009 an sechs verschiedenen Waldorten in baumzahlreichen Naturverjüngungen angelegt, die zum Zeitpunkt der Versuchsanlage etwa zwischen 2–4 m hoch (Alter: 14–21 Jahre) waren und zum weitaus überwiegenden Teil aus Fichten bestanden. Bei der letzten Aufnahme lagen die Fichtenanteile an den sechs Versuchsorten im Mittel bei 85–100 %.

Die Versuchsserie war konzeptionell so angelegt worden, dass sie die in der seinerzeit gültigen Richtlinie zur Jungbestandspflege der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg (Ministerium für Ländlichen Raum Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg 1988) ausgeführten Pflegevarianten widerspiegelte. Neben Feldern mit der schematischen Reduktion war daher die Auskesselungs-Variante prominent vertreten.

Die Auskesselung wurde in Baden-Württemberg einheitlich mit einem Radius von rd. 2,5 m ausgeführt. Neben Fichten wurden einzelfallweise gelegentlich auch beigemischte Baumarten (*Weißtanne* *Abies alba* MILL., Laubbäume) als Kesselzentralbäume freigestellt.

Bei den schematischen Reduktionen wurde in zwei Untergruppen differenziert: eine baumzahlärmere Variante, bei der auf maximal 1.500 Bäume ha^{-1} (1.000–1.500) reduziert wurde, und eine baumzahlreichere bei der mindestens 2.200 Bäume ha^{-1} (2.200–3.000) belassen wurden. Bei der schematischen Reduktion wurden beigemischte Laubbäume grundsätzlich nicht entfernt, sondern auf den Flächen belassen.

Eine Besonderheit bildet der Versuch Fi465. Im Gegensatz zu den anderen Versuchen in Baden-Württemberg waren hier die Entnahmen bei schematischer Reduktion und Auskesselung auf „Bedränger“ beschränkt, wenn deren Höhe 60 % der Höhe des jeweils freizustellenden Baumes überschritt. Außerdem musste die Beobachtung dieser Fläche aufgrund nicht programmgemäßer Behandlung durch den Forstbetrieb bereits zu einem frühen Zeitpunkt (2006)

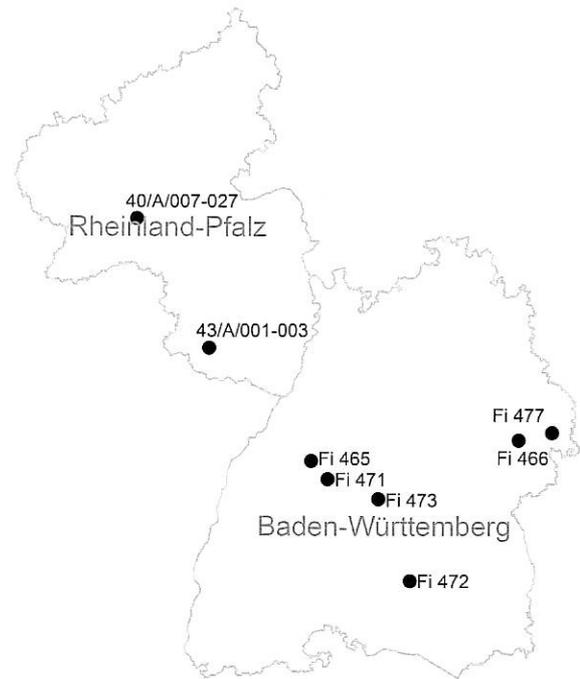


Abb. 1. Lage der Versuchsfelder in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Location of the experimental sites in Baden-Wuerttemberg and Rhineland-Palatinate.

abgebrochen werden. Der Bestand hatte zu diesem Zeitpunkt mit rd. 8 m eine so große Oberhöhe (H_{200} ; Höhe des Mittelstammes der 200 stärksten Bäume je Hektar) erreicht, dass eine Einbeziehung der Messwerte in die vorliegenden Auswertungen noch sinnvoll möglich erschien.

Versuche in Rheinland-Pfalz

Auch die beiden rheinland-pfälzischen Versuche (40/A/007-027, 43/A/001-003, Abbildung 1) wurden in baumzahlreichen, durch Sturm abgedeckten Naturverjüngungen eingerichtet. Im Vergleich zu Baden-Württemberg wurden die Flächen zum einen bereits zu einem früheren Entwicklungszeitpunkt eingerichtet (Alter bei Anlage und Behandlung: 10–13 Jahre). Zum anderen sind die Beobachtungszeiträume aufgrund der früheren Anlage (1991 bzw. 1994) deutlich länger. Außerdem waren die Anteile von Beimischungsbaumarten tendenziell höher. Die Fichtenanteile lagen zum Zeitpunkt der letzten Aufnahme an den beiden Versuchsorten im Mittel bei 86 % bzw. 77 % (Anteil an der Grundfläche der gemessenen Bäume). Die wichtigste Beimischungsbaumart war Kiefer (*Pinus sylvestris* L.).

Im Gegensatz zu den Versuchen in Baden-Württemberg waren in Rheinland-Pfalz keine schematischen Reduktionen durchgeführt worden. Dagegen wurde bei den Auskesselungen etwas feiner differenziert nach Freistellungsbeginn und Freistellungsradius in folgenden Varianten:

- Radius 1,0 m bei Baumhöhe 2 m,
- Radius 1,5 m bei Baumhöhe 2 m,
- Radius 1,5 m bei Baumhöhe 3 m.

Tab. 1. Übersicht über die Versuche. Summary of the experimental sites.

Bezeichnung	Versuch		Erste Aufnahme		Letzte Aufnahme		Anzahl Felder im Versuch			Mittlere Aufnahme- fläche je Feld [ha]	Aufnahmedesign bei letzter Aufnahme (lebende Bäume)
	Jahr ¹ der Anlage (Alter in Jahren)	Jahr ¹	Dichte ² [N ha ⁻¹]	Jahr ¹ (Anteil Fichte in % ³)	Oberhöhe ⁴ (Bonität ⁵) [m]	Köpfung	Auskesselung	Schematische Reduktion			
F1465 (Erzkösterle)	2002 (21)	2002	n. e.*	2006 (100)	8,0 (31,8)	1 -	18	1	1	0,20	temporäre Probekreise (r=4m; Aufnahme der 5 höchsten Bäume je Kreis)
F1466 (Heidenheim)	2005 (20)	2005	> 77.000	2011 (100)	7,4 (29,7)	1 -	18	1	1	0,04	permanente Probekreise (r = 3 m, Bäume > 130 cm Höhe, r = 1,5 m Bäume < 130 cm Höhe)
F1471 (Altensteig)	2007 (20)	2007	> 69.000	2013 (95)	8,0 (31,3)	1 -	18	1	1	0,03	permanente Probekreise (r = 3 m, Bäume > 130 cm Höhe, r = 1,5 m Bäume < 130 cm Höhe)
F1472 (Sigmaringen)	2002 (14)	2002	> 130.000	2012 (96)	11,9 (37,2)	1 -	18	2	1	0,04	Vollaufnahme (bei schemat. Reduktion: Aufnahme aller Bäume höher 130 cm; sonst: Aufnahme ab BHD 3 cm)
F1473 (Rotenburg)	2002 (18)	2007	> 35.000	2012 (85)	11,3 (33,6)	1 -	18	2	1	0,04	Vollaufnahme (bei schemat. Reduktion: Aufnahme aller Bäume höher 130 cm; sonst: Aufnahme ab BHD 3 cm)
F1477 (Ebnat)	2008 (18)	2008	> 215.000	2013 (91)	8,4 (33,4)	1 -	18	1	1	0,05	Vollaufnahme aller Bäume ab BHD 3 cm; Bäume mit BHD < 3 cm auf einem zentralen Probekreis (r = 3 m)
40/A007-027 (Traben-Trarbach)	1991 (13)	1997	> 10.000	2014 (86)	14,4 (32,7)	3 6	3 3	9 3	3 3	0,04	Vollaufnahme der Kessel-Zentralbäume und temporärer Probekreise (r = 3 m; Aufnahme aller Bäume ab BHD 3 cm)
43/A001-003 (Westrich)	1994 (10)	2014 ⁶	(2014: > 3.000)	2014 (77)	18,8 (40,4)	1 1	1 1	2 2	-	0,02	Vollaufnahme aller Bäume
Summe bzw. Mittelwert (Ingesamt: 42 Felder)											
						10 7	17	8		0,05	

¹ Angegeben ist das zugeordnete Vegetationsjahr, in dem das Wachstum abgeschlossen worden war.
² Angegeben ist die Anzahl der auf den unbehandelten Kontrollfeldern gemessenen lebenden Bäume (gerundete orientierende Angabe; ermittelt mit teilweise unterschiedlichen Aufnahmeschwellen).
³ Anteil Fichte an der Grundfläche aller gemessenen Bäume (Mittelwert der Felder).
⁴ Angegeben als mittlere H₁₀₀ (Höhe des Grundflächennittelstamms der 200 dicksten Bäume je ha) aller Felder des Versuchs.
⁵ Oberhöhenbonität Fichte; angegeben als Oberhöhe im Alter 100 Jahre (Mittelwert der Felder; nach Assmann u. Franz).
⁶ Keine frühere Aufnahme (erste Aufnahme = letzte Aufnahme).
⁷ Erst bei der Aufnahme 2014 ermittelt.
⁸ Einheitslicher Freistellungsradius r = 2,5 m bei Versuchsanlage (Oberhöhe rd. 2-4 m).
 * n. e. = nicht ermittelt.

Während auch Auskesselungen grundsätzlich nur einmalig bei Versuchsanlage erfolgten, bildete die kleinere der beiden rheinland-pfälzischen Versuchsflächen (43/A/001-003) eine gewisse Ausnahme. Hier wurden nämlich die 1994 erstmalig ausgekesselten Fichten durch zusätzliche Entnahme von Bedrängern in den Jahren 2003 und 2010 weiter etwas gefördert.

Eine Besonderheit bildete in Rheinland-Pfalz die Variante mit Köpfung, die in Baden-Württemberg nicht angelegt worden war. Die Köpfungen erfolgten im Anhalt an das Vorgehen bei Auskesselung, allerdings mit der Maßgabe, dass die sich im Freistellungsradius befindlichen Bäume nicht an der Basis weggeschnitten wurden, sondern etwa in Hüfthöhe (ca. 1,30 m) geköpft wurden, sodass Teile der Grünkrone verblieben. Diese Varianten wurden aus rein ergonomischen Gründen in die Versuchsserien aufgenommen, um zu überprüfen, ob es ausreicht, wenn zur ergonomisch günstigen Arbeitsführung die Fichten nur in Hüfthöhe geköpft werden. Differenziert wurde bei den Köpfungen in:

- Radius 1,5 m bei Baumhöhe 2 m,
- Radius 1,5 m bei Baumhöhe 3 m.

Messung der Versuche

Letzte Aufnahme

Für die gemeinsame Auswertung der Versuche wurde das Design für die letzte Aufnahme der Versuche (2011–2015) in beiden Bundesländern aufeinander abgestimmt (vgl. Tabelle 1).

In Abhängigkeit der teilweise zum Zeitpunkt der letzten Aufnahme immer noch extrem hohen Anzahl von stehenden Bäumen (lebend und tot) beschränkten sich die Aufnahmen bei einem Teil der Felder auf stichprobenartig aufgenommene Teilflächen. Die an den Stichprobenpunkten erfassten Messwerte wurden für die Berechnungen feldweise zusammengefasst und berechnet. Die in Tabelle 1 angegebenen Flächen bilden damit nur denjenigen Flächenanteil eines Feldes ab, auf dem Messungen durchgeführt wurden. Die tatsächlich behandelten Flächen waren in der Regel deutlich größer.

Aufgrund teilweise unterschiedlicher messtechnischer Behandlung kleiner Bäume mit Durchmesser in Brusthöhe < 3 cm (BHD; gemessen mit Rinde in rd. 130 cm Höhe) beziehungsweise von Bäumen < 130 cm Höhe sind die für dieses Kollektiv ermittelten Werte nicht voll vergleichbar (Tabelle 1). Auswertungen zum Zeitpunkt der letzten Auswertung beschränkten sich daher auf das Kollektiv der (lebenden) Bäume mit BHD \geq 3 cm um konsistente Werte für Vergleiche von Bestandesdichte, Baumartenanteil, Höhen- oder Durchmesser-Entwicklung zu erhalten.

Zusätzlich zu Kennwerten für den Gesamtbestand wurden standardmäßig für die Kollektive der jeweils 100 und 200 dicksten Fichten je ha die Durchmesser-Kennwerte (BHD: D_{100} , D_{200}) sowie die Höhen-Kennwerte (H_{100} , H_{200}) berechnet und bereitgestellt.

Frühere Aufnahmen

Für die meisten Versuche standen zusätzlich zur letzten Aufnahme auch Messwerte von früheren Aufnahmezeitpunkten zur Verfügung. Bei diesen früheren Aufnahmen war allerdings nur in den seltensten Fällen der Versuch unternommen worden, möglichst alle (lebenden) Bäume zu erfassen. Vielmehr beschränkten sich die Messungen in aller Regel auf die systematische Erfassung herrschender Bäume; dabei wurden in Abhängigkeit der Entwicklung der Bestände bei frühen Aufnahmen durchaus auch Bäume mit BHD < 3 cm aufgenommen. Damit waren Berechnungen von Charakteristika für unterschiedliche Kollektive herrschender Bäume durchgängig möglich (Mittelwerte der 100, 200 stärksten Bäume je ha). Die Berechnung von Charakteristika für den Gesamtbestand unterliegt jedoch leichten Ungenauigkeiten.

Auswertung

Aufgrund der Anlage der Versuche an verschiedenen Orten war von Unterschieden in der Wuchskraft (Bonität) auszugehen, die sich auf die Wachstumsgeschwindigkeit auswirken dürften. Um möglichen Unterschieden in der standortbedingten Wachstumsgeschwindigkeit Rechnung zu tragen, wurde anstelle des Alters beziehungsweise der Zeit die Höhenentwicklung der Bestände als Indikator für ihre physiologische Entwicklung gewählt. Die Entwicklung der Bestandesdichte und der Durchmesserwerte wurde infolgedessen über der Oberhöhe (H_{200}) abgebildet.

Die Auswertungen wurden in vielen Fällen auf die Kennwerte des Kollektivs der 200 stärksten Fichten je ha (D_{200} , H_{200}) bezogen: Grund hierfür ist, dass dieses Kollektiv in etwa mit der Anzahl an Z-Bäumen korrespondiert, die entsprechend gängiger waldbaulicher Richtlinien für Fichte in Baden-Württemberg mit Beginn der Durchforstung ausgewählt werden sollen (ForstBW 2014). Zur Charakterisierung des Gesamtbestands wurden ergänzend auch der Mitteldurchmesser und die Stammzahlen dargestellt.

Unterschiede zwischen Behandlungsvarianten und/oder den beiden Bundesländern wurden auf der Basis der Messergebnisse zum Zeitpunkt der letzten Aufnahme auf statistische Signifikanz geprüft. Verwendet wurden zum einen verteilungsfreie nicht-parametrische Testverfahren. Bei mehr als zwei Gruppen im Vergleich erfolgte zunächst eine Prüfung auf Basis des Kruskal-Wallis- H -Tests, der im Prinzip eine nicht-parametrische Varianzanalyse darstellt; für Vergleiche zwischen zwei Gruppen wurde der Mann-Whitney- U -Tests (zweiseitig) herangezogen. Zum anderen wurden auch parametrische Verfahren wie der Tukey-Test angewendet.

Die Verjüngungen waren in den verschiedenen Versuchen bei der letzten Aufnahme unterschiedlich hoch, was überwiegend aufgrund unterschiedlicher Entstehungszeitpunkte zu erklären ist (Rheinland-Pfalz: Vivian-/Wiebke-Sturmfolgeflecken nach 1990, Baden-Württemberg: Lothar-Sturmfolgebestände 1999). Um diesem unterschiedlichen Entwicklungszustand Rechnung zu tragen, wurden ergänzend Kovarianzanalysen mit einbezogen, bei denen die Höhe des jeweiligen Bestandes als stetige Kovariable verwendet wurde, mit angeschlossenen Duncan-Tests für paarweise Vergleiche.

Nach der statistischen Analyse der jeweils letzten Aufnahme folgte die grafische Darstellung aller Aufnahmen über der Oberhöhe (H_{200}). Hier wurden die Stammzahl, der Mitteldurchmesser (D_g) und der Durchmesser herrschender Fichten (D_{200}) abgebildet.

Zur Analyse der strukturellen Diversität wurden zunächst verteilungsbasierte Maße für die Baumdurchmesser berechnet. Hier wurden als absolutes Streumaß die Standardabweichung und als relatives Maß der Variationskoeffizient (Mittelwert/Standardabweichung) berechnet. Anschließend wurden für die Baumdurchmesser noch die zwei Diversitätsmaße Shannon-Index (H_d , Magurran 2004, berechnet nach (1)) und Shannon-Evenness (E_d , 2) berechnet:

$$H_d = - \sum_{j=1}^{Nd} p_j \times \ln(p_j) \quad (1)$$

Nd : Anzahl an Durchmesserklassen (hier: 1 cm-Klassen)
 p_j : grundflächenbasierter Anteil von Durchmesserklasse j

$$E_d = H_d / \ln(Nd) \quad (2)$$

Bei ausschließlicher Betrachtung des Shannon-Index (H_d) besteht die Gefahr, dass Diversitätsunterschiede erheblich durch das Vorkommen unterschiedlicher Anzahlen absoluter Durchmesserklassen bestimmt werden. Deshalb wurde die Shannon-Evenness (E_d) ergänzend zum Shannon-Index berechnet, da sie die Diversität von Beständen mit sehr unterschiedlichen Anzahlen von Durchmesserklassen durch Standardisierung vergleichbar und leicht interpretierbar macht (Pretzsch und Schütze 2009).

Die statistischen Analysen wurden mit den Programmpaketen Statistica und R (R Core Team 2016) durchgeführt, grafische Darstellungen erfolgten in R mit package ggplot2 (Wickham 2009).

Ergebnisse

Zustand bei der letzten Aufnahme

Differenzierung nach Untergruppen: Köpfung, Auskesselung, Reduktion
Für die Versuchsanlagen, in denen die Köpfungen und Auskesselungen (Rheinland-Pfalz) bzw. die schematischen Reduktionen (Baden-Württemberg) in Untergruppen differenziert worden waren, wurde zunächst geprüft, inwieweit die Unterschiede zwischen den teilweise recht feinen Untergruppen statistisch signifikant waren. Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede für die Variablen H_{200} und D_{200} gefunden (Tabelle 2). Dies galt auch für die Baumzahlen (BHD ≥ 3 cm) bei Köpfung und schematischer Reduktion. Die einzige Ausnahme trat demgegenüber bei den Untergruppen der Auskesselung auf. Zwar ergab auch hier die nicht-parametrische Varianzanalyse keinen Hinweis auf statistisch signifikante Unterschiede. Bei der Kovarianzanalyse mit der Bestandeshöhe als stetiger Kovariable trat zwischen zwei der drei Untergruppen ein auf dem 5 %-Niveau signifikanter Unterschied auf. Aufgrund der im Regelfall fehlenden signifikanten Unterschiede zwischen den Untergruppen wurde im Folgenden nicht mehr nach diesen Untergruppen differenziert.

Unterschiede zwischen den Varianten

Bezüglich der Oberhöhe (H_{200}) traten weder in den baden-württembergischen noch in den rheinland-pfälzischen Versuchen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Mittelwerten der Varianten auf (Tabelle 3).

Bei der Analyse der Durchmesser herrschender Fichten (D_{200}) ergaben sich bei den nicht-parametrischen Tests noch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten. In der Kovarianz-

analyse unterschieden sich jedoch in beiden Bundesländern alle drei Varianten signifikant.

Bei der Bestandesdichte unterschied sich die schematische Reduktion in den Versuchen in Baden-Württemberg signifikant von der unbehandelten Kontrolle und der Auskesselung (Tabelle 3). Die Unterschiede zwischen allen anderen Behandlungsvarianten waren dagegen weder in den baden-württembergischen noch in den rheinland-pfälzischen Versuchen signifikant.

Zustand aller Aufnahmen

Die Auswertungen der Bestandesdichte zeigten, dass die Stammzahlen mit zunehmender Höhenentwicklung zurückgehen. Besonders deutlich und sehr ähnlich war dieser Effekt für die Varianten Auskesselung, Köpfung und die unbehandelte Variante (Abbildung 2). Dagegen zeigte sich bei der schematischen Reduktion ein solcher Zusammenhang nicht so stark ausgeprägt, und es waren deutlich die geringeren absoluten Stammzahlen erkennbar.

Die in Abbildung 2 festgestellte abnehmende Stammzahl mit zunehmender Oberhöhe korrespondierte mit zunehmenden mittleren Durchmessern (D_g , Abbildung 3). Die Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten waren hier weniger klar ersichtlich, und lediglich die Flächen ohne Behandlung lagen in der Durchmesserentwicklung deutlich unter den behandelten Varianten.

Aufgrund der extrem hohen Streuung der D_g -Werte für Auskesselung und Köpfung auf den rheinland-pfälzischen Versuchsfeldern (Abbildung 3) wurde die gleiche Abbildung auf die baden-württembergischen Versuchsfelder beschränkt: In diesem Unterkollektiv der Daten lag die mittlere Durchmesserentwicklung der Auskesselung sehr nah bei der unbehandelten Variante (Abbildung 4), also deutlich niedriger als bei der Betrachtung der Daten beider Bundesländer. Als Resultat der Auskesselung übersteigt die Durchmesserkurve der Auskesselung die der unbehandelten Variante bei einer Oberhöhe von ca. 7 m. Die schematische Reduktion führte zu erheblich größeren Durchmessern.

Tab. 2. Unterschiede zwischen den bei Köpfung (Rheinland-Pfalz), Auskesselung (Rheinland-Pfalz) und schematischer Reduktion (Baden-Württemberg) angelegten Untervarianten zum Zeitpunkt der letzten Aufnahme. Dargestellt sind die Anzahl einbezogener Felder (n) sowie Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) von Oberhöhe (H_{200}), Durchmesser herrschender Bäume (D_{200}) und Anzahl lebender Bäume je ha (BHD ≥ 3 cm).

Differences between the topped (Rhineland-Palatinate), selectively cleared (Rhineland-Palatinate) and systematically thinned (Baden-Wuerttemberg) sub-treatments at the time of the most recent survey. n : number of plots, Mittelwert: mean value, SD: standard deviation, H_{200} : stand dominant height (mean height of the 200 thickest spruces ha⁻¹), D_{200} : mean diameter of the 200 thickest spruces ha⁻¹. Bäume: number of trees ha⁻¹.

Variante	n	H_{200} [Mittelwert \pm SD]	D_{200} [Mittelwert \pm SD]	Bäume pro ha [Mittelwert \pm SD]
Köpfung				
Radius 1,5 m bei Höhe 2 m	3	14,5 m \pm 1,00 ^N	16,2 cm \pm 1,53 ^{Nn}	8.467 \pm 2057 ^{Nn}
Radius 1,5 m bei Höhe 3 m	4	15,0 m \pm 3,36 ^N	15,8 cm \pm 3,46 ^{Nn}	8.061 \pm 4328 ^{Nn}
Auskesselung				
Radius 1,0 m bei Höhe 2 m	3	15,2 m \pm 1,75 ^N	18,0 cm \pm 1,76 ^{Nn}	8.617 \pm 2045 ^{Na}
Radius 1,5 m bei Höhe 2 m	3	15,7 m \pm 1,19 ^N	18,7 cm \pm 0,31 ^{Nn}	7.625 \pm 675 ^{Na,b}
Radius 1,5 m bei Höhe 3 m	5	16,3 m \pm 3,19 ^N	19,6 cm \pm 4,15 ^{Nn}	6.276 \pm 3671 ^{Nb}
Schematische Reduktion				
auf 1.000-1.500 je ha	4	9,7 m \pm 2,20 ^N	14,1 cm \pm 2,90 ^{Nn}	2.598 \pm 1782 ^{Nn}
auf 2.200-3.000 je ha	3	9,9 m \pm 2,26 ^N	13,4 cm \pm 1,72 ^{Nn}	3.630 \pm 611 ^{Nn}

^N Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der jeweiligen Untergruppen sind nicht signifikant (Kruskal-Wallis-H-Test und Mann-Whitney-U-Test, $p < 0,05$).

^a Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der jeweiligen Untergruppen sind nicht signifikant (Kovarianzanalyse, stetige Kovariable: H_{200} , $p < 0,05$).

^{a,b} Die Unterschiede zwischen Mittelwerten von Untergruppen gefolgt von unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant (Kovarianzanalyse, stetige Kovariable: H_{200} , $p < 0,05$).

Tab. 3. Unterschiede zwischen verschiedenen Varianten der Jungbestandspflege bei Fichte zum Zeitpunkt der letzten Aufnahme. Dargestellt sind die Anzahl der in die Berechnung einbezogenen Werte (Anzahl), Mittelwert und Standardabweichung (SD) verschiedener Kennwerte zum Zeitpunkt der letzten Aufnahme. Differences between the different variants of precommercial thinning in spruce at the time of the most recent survey. Anzahl: number of plots, Mittelwert: mean value, SD: standard deviation, H_{200} : stand dominant height (mean height of the 200 thickest spruces ha^{-1} , D_{200} : mean diameter of the 200 thickest spruces ha^{-1} , Bestandesdichte: number of trees ha^{-1} .

	Baden-Württemberg		Rheinland-Pfalz	
	Anzahl	Mittelwert \pm SD	Anzahl	Mittelwert \pm SD
Oberhöhe Fichte (H_{200}) [m]				
Unbehandelte Kontrolle	6	9,2 \pm 1,63 ^N	4	14,2 \pm 1,82 ^N
Köpfung			7	14,8 \pm 2,46 ^N
Auskesselung	6	9,3 \pm 2,40 ^N	11	15,9 \pm 2,28 ^N
Schematische Reduktion	8	9,5 \pm 2,03 ^N		
Durchmesser herrschende Fichte (D_{200}) [cm]				
Unbehandelte Kontrolle	6	10,8 \pm 1,37 ^{N a}	4	13,9 \pm 1,67 ^{N d}
Köpfung			7	16,0 \pm 2,61 ^{N e}
Auskesselung	6	12,0 \pm 2,64 ^{N b}	11	18,9 \pm 2,83 ^{N f}
Schematische Reduktion	8	13,5 \pm 2,33 ^{N c}		
Bestandesdichte [Bäume ha^{-1} mit BHD \geq 3 cm]				
Unbehandelte Kontrolle	5	12.379 \pm 1.328 ^{A a}	4	8.472 \pm 3.942 ^{N n}
Köpfung			7	8.235 \pm 3.290 ^{N n}
Auskesselung	5	11.562 \pm 1.174 ^{A a}	11	7.282 \pm 2.719 ^{N n}
Schematische Reduktion	7	3.279 \pm 1.329 ^{B b}		

^{A, B, N} Mittelwerte in Spalten gefolgt von unterschiedlichen Großbuchstaben unterscheiden sich signifikant (nicht-parametrischer Kruskal-Wallis-H-Test gefolgt von Mann-Whitney-U-Tests, $p < 0,05$).

^{a-c, n} Mittelwerte in Spalten gefolgt von unterschiedlichen Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant (Kovarianzanalyse mit H_{200} als stetigem Prädiktor gefolgt von Duncan-Tests, $p < 0,05$).

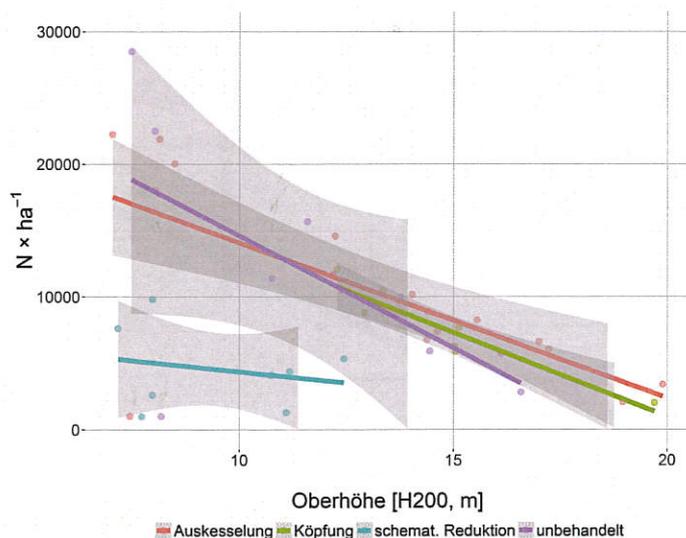


Abb. 2. Bestandesstammzahldichte über der Oberhöhe (H_{200}) nach Behandlungsvariante. Die Beobachtungspunkte wurden mit einer linearen Regression ausgeglichen, deren Vertrauensbereich grau schattiert ist. Stem density ha^{-1} ($N ha^{-1}$) as a function of dominant stand height (H_{200}) by treatment. The observed data points were smoothed with a linear regression and the corresponding grey confidence band.

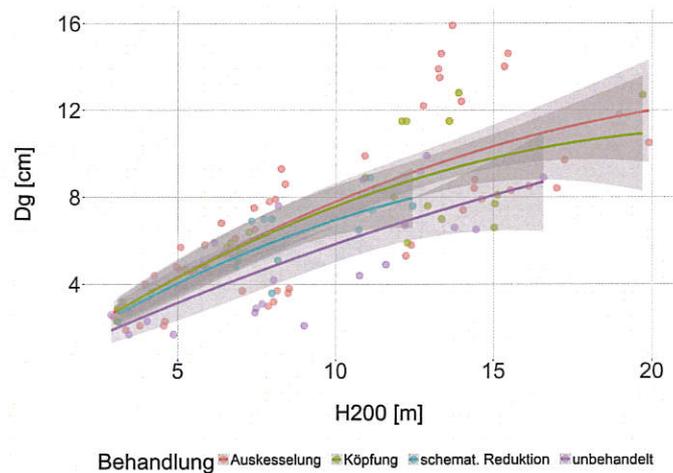


Abb. 3. Entwicklung des mittleren Durchmessers (D_g) über der Oberhöhe (H_{200}) nach Behandlungsvarianten. Die Beobachtungspunkte wurden mithilfe eines Polynoms 2. Ordnung durch den Achsenursprung ausgeglichen. Der Vertrauensbereich der Ausgleichskurven ist grau schattiert. Mean diameter as a function of dominant stand height (H_{200}) by treatment. The observed data points were smoothed with a 2nd order polynomial through the axes' origin [0;0]. The grey areas cover the respective confidence bands.

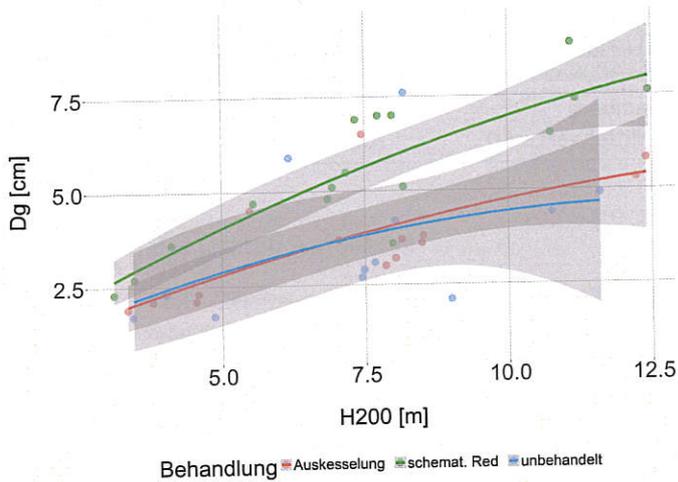


Abb. 4. Entwicklung des mittleren Durchmessers (D_g) über der Oberhöhe (H_{200}) nach Behandlungsvarianten, hier nur für die baden-württembergischen Versuchsflächen. Die Beobachtungspunkte wurden mithilfe eines Polynoms 2. Ordnung durch den Achsenursprung ausgeglichen. Der Vertrauensbereich der Ausgleichskurven ist grau schattiert.

Mean diameter as a function of dominant stand height (H_{200}) by treatment, here the Baden-Württemberg sites only. The observed data points were smoothed with a 2nd order polynomial through the axes' origin [0;0]. The grey areas cover the respective confidence bands.

In Abbildung 5 ist die Durchmesserzunahme der herrschenden Fichten (D_{200}) im Laufe der Höhenentwicklung der Bestände dargestellt. Die geringste Zunahme dieses Durchmessers ist bei den unbehandelten Feldern zu beobachten, die stärkste bei den schematisch reduzierten Feldern. Die Felder mit Auskesselung liegen unterhalb der systematischen Reduktion, und die mit Köpfung liegen noch näher an der unbehandelten Kontrolle, wobei die Durchmesser der unbehandelten Kontrolle erst bei Oberhöhen größer als 10 m die niedrigsten Werte aufwiesen. Die engen Streubänder lassen auf eine gute Differenzierung zwischen den Behandlungsvarianten ab einer Oberhöhe von ca. 10 m schließen. Ebenso ist die bisher erst geringe Oberhöhe der baden-württembergischen Felder mit schematischer Reduktion zu sehen (ca. 12 m).

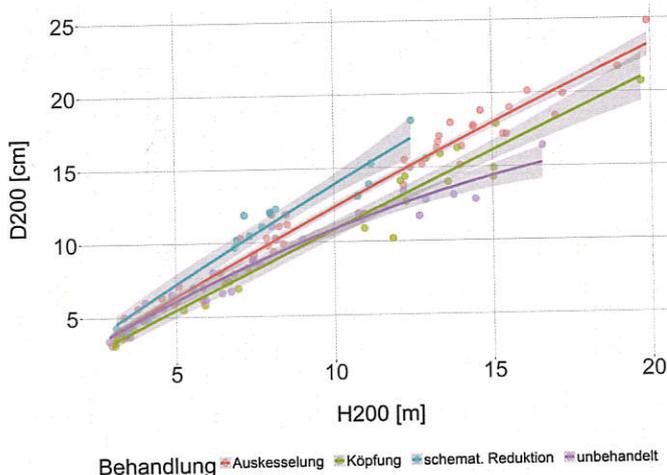


Abb. 5. Durchmesserentwicklung vorherrschender Fichten (D_{200}) über der Oberhöhe (H_{200}) nach Behandlungsvarianten. Die Beobachtungspunkte wurden mithilfe eines Polynoms 2. Ordnung durch den Achsenursprung ausgeglichen. Der Vertrauensbereich der Ausgleichskurven ist grau schattiert.

Diameter of the 200 thickest spruces ha^{-1} (D_{200}) as a function of dominant stand height (H_{200}) by treatment. The observed data points were smoothed with a 2nd order polynomial through the axes' origin [0;0]. The grey areas cover the respective confidence bands.

Speziell für alle Bestände mit Auskesselung wurde der mittlere Durchmesser der Kesselzentralbäume ($200-250 ha^{-1}$) verglichen mit dem Durchmesser aller herrschender Fichten (D_{200}). In Abbildung 6 wird deutlich, dass die freigestellten Zentralbäume nicht systematisch am stärksten von der Freistellung profitieren: Dem Kollektiv der (herrschenden) 200 stärksten Fichten je ha gehörte neben Kesselzentralbäumen offensichtlich auch eine nennenswerte Anzahl von Fichten an.

Als Weiser für die Schaftstabilität wurde der H/D-Wert aufgetragen (Abbildung 7). In den meisten Fällen war ein Anstieg der H/D-Werte mit zunehmender Bestandeshöhe erkennbar. Lediglich schematische Reduktionen zu Beginn der Versuche senkten die Werte systematisch ab. Dies traf sowohl für die Gesamtheit aller Fichten (H_g/D_g, rechts: ‚HDG‘) als auch für das Teilkollektiv der herrschenden Fichten (H₂₀₀/D₂₀₀, links: ‚HD200‘) zu. Bei Bestandeshöhen über 15 m lieferten die unbehandelten Bestände grundsätzlich die höchsten – und damit instabilsten – H/D-Werte. Beim HDG-Wert unterschieden sich Köpfung und Auskesselung kaum voneinander, wohingegen beim HD₂₀₀ die Auskesselung zu deutlich niedrigeren Werten führte als die Köpfung. Die Variante Köpfung führte erst bei Oberhöhen größer als 11 m zu niedrigeren HD₂₀₀-Werten als die unbehandelte Variante.

Strukturelle Diversität

Sowohl die absoluten als auch die relativen Streumaße der Einzelbaum-Durchmesserverteilungen ließen kaum Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten erkennen (Tabelle 4). Lediglich die absolute Streuung lag in Baden-Württemberg bei der schematischen Reduktion signifikant über der der anderen Varianten.

Beim Shannon-Index wies die schematische Reduktion den niedrigsten Wert auf, gefolgt von der unbehandelten Variante (Abbildung 8). Köpfung und Auskesselung unterschieden sich nicht signifikant voneinander und wiesen die höchste Shannon-Durchmesserdiversität auf. Bei der Shannon-Evenness zeigte sich lediglich die unbehandelte Variante signifikant von allen anderen Behandlungsvarianten verschieden und wies höhere Diversität auf. Bei der Shannon-Evenness fielen für alle Varianten die vergleichsweise niedrigen absoluten Werte für die Diversität auf.

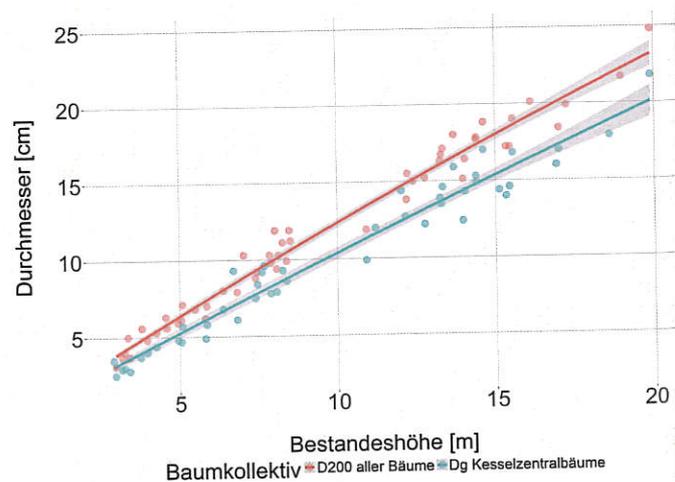


Abb. 6. Durchmesserentwicklung nur in den Auskesselungsbeständen: mittlerer Durchmesser (D_g) der Kesselzentralbäume verglichen mit dem Durchmesser herrschender Fichten (D_{200}).

Diameter development as a function of stand height for the selectively cleared treatment, only: mean diameter of the released target spruces (D_g) compared to the mean diameter of the 200 thickest spruces ha^{-1} .

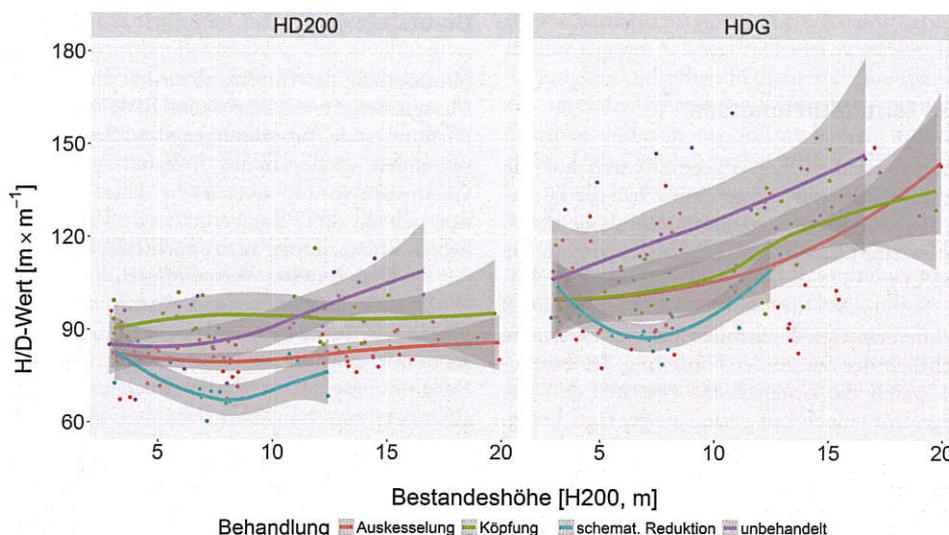


Abb. 7. H/D-Werte verschiedener Baumkollektive für die Behandlungsvarianten. Links (HD₂₀₀) der Wert nur für das Kollektiv herrschender Fichten: H₂₀₀ [m]/D₂₀₀ [m], rechts (HDG) der mittlere Bestandeswert (Hg[m]/Dg[m]).

H/D ratios for different tree groups by treatment: left (HD₂₀₀) the H/D ratio for dominant spruces: H₂₀₀ [m]/D₂₀₀ [m], on the right (HDG) the mean stand value (Hg[m]/Dg[m]), Hg: height of the mean basal area tree, Dg: diameter of the mean basal area tree.

Tab. 4. Absolute und relative Maße der Streuung der Baumdurchmesser als Indikator für die Strukturvielfalt. Signifikante Gruppenunterschiede sind fettgedruckt. Absolute and relative measures of variation in tree diameters as indicator for structural diversity. Significant group differences are printed in bold.

	Rheinland-Pfalz			Baden-Württemberg		
	Unbehandelt	Köpfung	Auskesselung	Unbehandelt	Auskesselung	Schematische Reduktion
Absolute Streuung	3,6	3,3	3,7	2,1	2,2	3,5
Standardabweichung [cm]	± 0,83	± 0,84	± 0,78	± 0,70	± 0,63	± 1,18
Relative Streuung	0,48	0,43	0,45	0,44	0,46	0,44
Standardabweichung [cm]	± 0,088	± 0,07	± 0,05	± 0,09	± 0,08	± 0,011

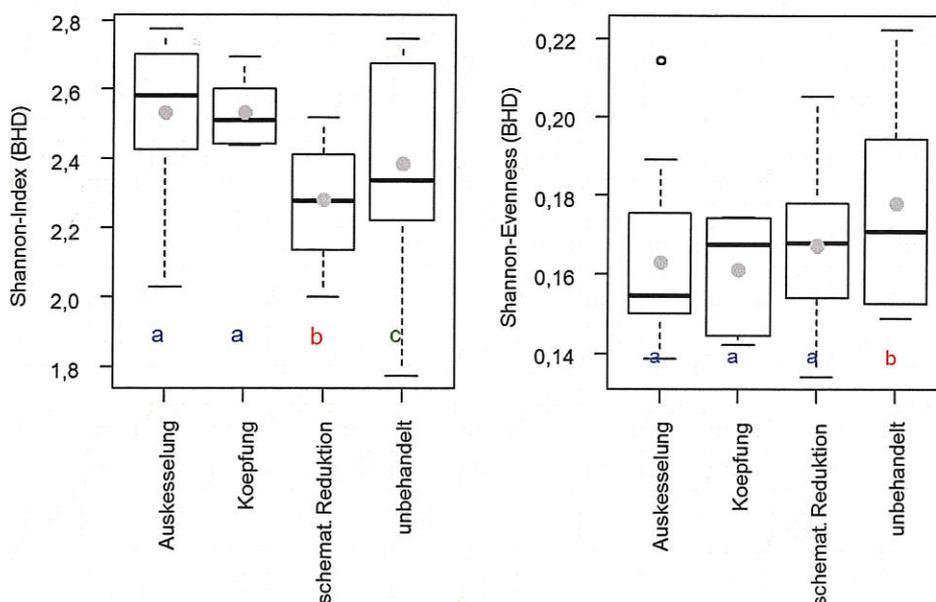


Abb. 8. Diversitätsindizes für die Baumdurchmesserverteilungen in 1-cm-Stufen nach Behandlungsvariante. Signifikant verschiedene Behandlungen sind durch verschiedene Buchstaben unterhalb der jeweiligen Boxplots dargestellt (Varianzanalyse).

Diversity indices for the tree diameter distributions in 1 cm classes by treatment. Significantly different treatments are identified by different letters underneath the respective boxplot (analysis of variance).

Diskussion

Bestandesdichte und Mitteldurchmesser

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Pflegevarianten auf die Durchmesserwerte sind klar und belegen zunächst die Förderung der Entwicklung der mittleren Bestandesdurchmesser durch jede Art der standraumerweiternden Pflege: generell bewirkten die Pflegemaßnahmen (Köpfung, Auskesselung, schematische Reduktion) eine Förderung des Bestandes-Mitteldurchmessers um ca. 2 bis 3 cm gegenüber selbstdifferenzierten Kontrollen bis zur Oberhöhe von etwa 13 m. Hinsichtlich der Stärke der Förderung des Bestandes-Mitteldurchmessers waren die Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten insgesamt jedoch nur gering ausgeprägt. Lediglich bei Betrachtung nur der baden-württembergischen Versuche ließ sich für die schematische Reduktion eine signifikant stärker fördernde Wirkung auf die Entwicklung des Bestandes-Mitteldurchmessers erkennen als bei Auskesselung (Abbildung 4).

Der mittlere Bestandesdurchmesser hat auch Bedeutung für den Arbeitsaufwand: Sind die Mitteldurchmesser bei der Jungbestandspflege niedrig und damit die Stammzahlen hoch, steigen Zeitbedarf und Kosten der Pflegemaßnahmen erheblich an (Rieger 1982). Dies ist insbesondere dann relevant, wenn Maßnahmen wiederholt werden müssen. Zusätzlich ist der Mitteldurchmesser informativ, da sich der ausscheidende Bestand bei der Erstdurchforstung vornehmlich aus dem mittleren Bestandeskollektiv und stückzahlmäßig weniger aus dem Kollektiv der vorherrschenden Bäume (D_{200}) zusammensetzt. Durch ausbleibende Jungbestandspflege bedingte geringere Mitteldurchmesser erhöhen damit auch bei der Erstdurchforstung den Aufwand und verringern den Sortenerlös des ausscheidenden Bestands.

Auch in anderen Ländern werden die Einflüsse der Jungbestandspflege untersucht. Bei der Arbeit von Zhang et al. (2006) zu *Pinus banksiana* Lamb. war keine Auskesselungsvariante enthalten. Analysiert wurde jedoch eine wenig intensive schematische Stammzahlreduktion auf ca. 6.700 Bäume je ha (nach Eingriff). Die Autoren kamen dabei zur Erkenntnis, dass dieser wenig intensive Pflegeeingriff einen so geringen Einfluss auf den Zuwachs hatte, dass er nicht zu empfehlen sei.

Prinzipiell förderliche Wirkung stammzahlreduzierender Eingriffe in Kiefernbeständen auf den mittleren Durchmesser sowie das bei Erstdurchforstungen in der Folge anfallende Erntevolumen belegen Eisenhauer und Zimmermann (2003) sowie Huuskonen und Hynnen (2006). Dabei bewirkte eine Reduktion der Stammzahlen von 3.000 auf 2.000 je ha bei Oberhöhe 3 m einen um 14 % erhöhten Mitteldurchmesser bei Erreichen einer Oberhöhe von 14 m.

Aufgrund fehlender systematischer Untersuchungen muss derzeit bei Auskesselung oder unbehandelter selbstdifferenzierter Entwicklung zwar noch offen bleiben, in welchem Ausmaß die bei Erreichen der Erstdurchforstungshöhe nach wie vor enorm hohen Bestandesdichten aus lebenden und abgestorbenen Bäumen die Erstdurchforstung erschweren und zu erhöhtem Aufwand führen. Sowohl der optische Eindruck solcher Bestände als auch vereinzelt Praxisberichte legen jedoch die Vermutung nahe, dass die in solch dichten Beständen durch die nichtbehandelten selbstdifferenzierten Bestandteile vorliegenden „grünen Wände“ für Harvesterköpfe oder motormanuelle Einsatztrupps nur ausgesprochen schwer durchdringbar sein dürften und bei richtlinienkonformer Erstdurchforstung nennenswerte Aufwandserhöhungen nach sich ziehen.

Diversität

Hinsichtlich der Strukturdiversität lieferten die unterschiedlichen Messgrößen ein uneinheitliches Bild: Während einige Indizes diversitätsmindernde Auswirkungen von Pflegemaßnahmen indizieren, weisen andere wiederum auf diversitätssteigernde Wirkung hin. In der Gesamtbeurteilung werten wir daher diese Befunde dahingehend, dass sich alle drei Pflegevarianten im Vergleich zur eigendynamischen Selbstdifferenzierung nicht nachteilig auf die Entwicklung der Vielfalt der Durchmesser-Verteilungsstrukturen auswirken.

Aspekte der Baumartendiversität wurden in diesem Versuch explizit nicht betrachtet, sollen aber kurz diskutiert werden. Die Versuchsanlage wurde bewusst einfaktoriell gehalten, um neben dem Behandlungsgradienten nicht noch zusätzlich einen Gradienten der Baumartenmischung einzuführen. Diese Erweiterung hätte einen erheblichen Anstieg des Aufwands und eine erhebliche Ausdehnung der erforderlichen Flächengrößen bedeutet, was nicht darstellbar war. Deshalb lassen sich keine quantitativen Befunde auf systematischer Datengrundlage ableiten. Es bleibt daher lediglich die Überlegung, dass die Selbstdifferenzierung in den unbehandelten Jungbeständen prinzipiell zugunsten konkurrenzstarker Mischbaumarten mit vergleichsweise raschem Jugendwachstum wie der Fichte, der Vogelbeere (*Sorbus aucuparia* L.) und der Sandbirke (*Betula pendula* ROTH) verlaufen dürfte. Da in selbstdifferenzierenden Jungwüchsen Eingriffe zugunsten wuchsunterlegener Mischbaumarten unterbleiben, ist davon auszugehen, dass diese tendenziell der Konkurrenz verstärkt zum Opfer fallen. Auskesselung und schematische Reduktion erlauben dagegen auch die Förderung wuchsunterlegener Mischbaumarten. Dadurch sollten hier im Gegensatz zu selbstdifferenzierenden Jungwüchsen prinzipiell bessere Gestaltungsmöglichkeiten zur Förderung von Mischbeständen mit Klimax-Baumarten bestehen. Insbesondere im Hinblick auf die unter Klimawandel als besonders vulnerabel eingestufte Baumart Fichte kommt dem Aspekt der Mischbestandsförderung tatsächlich besonders großes Gewicht zu (Kölling et al. 2009, Kohnle 2015).

Durchmesserentwicklung herrschender Bäume und Risikoaspekte

Hinsichtlich der Durchmesserentwicklung der 200 stärksten Fichten je Hektar zeigt sich eine Reihung der Effizienz: Die größte Förderungswirkung erzielt die schematische Reduktion, gefolgt von einer etwa halb so starken Förderung durch die Auskesselung. Die Förderungswirkung der Köpfungsvariante gegenüber der unbehandelten Variante fiel dagegen bei den herrschenden Bäumen sehr gering aus. Projiziert man den bisherigen Wachstumsvorsprung der schematischen Reduktion auf den Zeitpunkt einer Erstdurchforstung bei ca. 15 m Oberhöhe, so lässt sich ableiten, dass dann die herrschenden Fichten (D_{200} -Kollektiv) einen Vorsprung von etwa 5 cm gegenüber selbstdifferenzierten unbehandelten Jungbeständen aufweisen dürften. Den Befund der Effizienzreihung verschiedener Pflegevarianten im Hinblick auf die Durchmesserentwicklung herrschender Jungfichten in Naturverjüngungen stellten auch Rumpf und Ditges (2008) fest, wenngleich die untersuchten Jungbestände in deren Arbeit von Altbeständen variierender Dichte überschirmt waren.

Bezüglich der Auskesselung war ein weiterer interessanter Befund, dass zu den im Durchmesserwachstum geförderten Bäumen auch ein Großteil von nicht explizit als Kesselzentralbäume freigestellten Bäumen gehört. Durch die Einlegung der Kessel wurden neben den Kesselzentralbäumen also offenkundig auch Bäume am Kesselrand oder im Bereich der nichtbehandelten Zwischenfelder mit gefördert.

Beurteilt man die Stabilität junger Fichtenbestände anhand von H/D-Werten, so führt die schematische Reduktion zu den stabilsten

Beständen. Da der H/D-Wert einen guten Näherungswert für die Schaftstabilität darstellt, fördert diese Behandlung also die Stabilität gegenüber Schneebruch und Windbruch. Die Vermeidbarkeit solcher Bruchschäden wurde in zahlreichen Arbeiten in engem Zusammenhang mit dem H/D-Wert bestätigt (Merkel 1975, Klein 1978, Kramer und Bjerg 1978, Petty und Worrel 1981, Petty und Swain 1985, Rottmann 1985, Marsch 1989, Valinger und Lundqvist 1992, Slodický 1995, Nykänen et al. 1997, Peltola et al. 1997, Peltola et al. 1999, Brüchert und Becker 2000, Brüchert et al. 2000, Jalkanen und Mattila 2000, Päätao 2000, Müller 2002, Zubizarreta-Gerendiain et al. 2012, Kohnle et al. 2014). Allerdings gab es auch Ergebnisse, die niedrige H/D-Werte nicht als Weiser für Stabilität gegenüber Bruch bestätigen konnten (Richter 1998). Interessant war des Weiteren, dass sich die H/D-Werte zwischen Auskesselung und schematischer Reduktion nur geringfügig unterschieden. Trotz der sehr klaren initialen H/D-Wert-bezogenen Stabilisierungsreaktion der Bestände auf die Jungbestandspflege bleibt jedoch zu befürchten, dass ohne weitere Eingriffe diese Stabilität wieder verloren gehen kann, was anhand der Wendepunkte der H/D-Kurven (Abbildung 7) ersichtlich wurde.

Eine häufig diskutierte Frage im Hinblick auf herrschende Fichten betrifft die Fähigkeit zur natürlichen Selbstdifferenzierung ohne Eingriffe (z. B. Kenk und Weise 1998, Pampe et al. 2003). Untersuchungen aus dicht gepflanzten Fichtenbeständen (4.444 N ha⁻¹) zeigen eindrücklich, dass herrschende Fichten prinzipiell auch ohne Durchforstungseingriffe stabile H/D-Werte erreichen können (Schübeler 1993, Leder 1998). Charakteristisch für Bestände ohne Eingriffe sind allerdings hohe Anteile schneebruchbedingter Ausfälle im Jugendstadium und ein Erreichen dieser stabilen H/D-Werte zu einem späten Zeitpunkt im Vergleich mit behandelten Beständen, und damit bei höherer Bestandeshöhe und höherem Sturmrisiko. Darüber hinaus sind direkte Vergleiche zwischen unbehandelten und behandelten Beständen in diesen Arbeiten nicht durchgeführt worden, sodass die waldbaulichen Schlussfolgerungen auf die Selbstdifferenzierung ohne Eingriffe begrenzt bleiben müssen.

Zusätzlich zum Schneebruchrisiko haben die Ergebnisse auch Relevanz für das Sturmrisiko. Derzeit muss davon ausgegangen werden, dass das Unterlassen der Jungbestandspflege in stammzahlreichen Naturverjüngungen das Erreichen von gängigen Zieldurchmessern (45–60 cm) um mindestens 5 m in der Höhenentwicklung der Bestände verzögert. Bezieht man diese Verzögerung auf 30 m hohe Fichtenbestände, entspricht das unter Zuhilfenahme gängiger Sturmrisikokurven einer Erhöhung des Sturmrisikos und damit der anzunehmenden Schadmengen um das ca. 1,3- bis 1,5-Fache (z. B. Schmidt et al. 2010, Valinger und Fridman 2011).

Schlussfolgerungen und betriebliche Konsequenzen

Die selbstdifferenzierte Entwicklung stammzahlreicher Fichten-naturverjüngungen ohne Pflegeeingriffe spart zwar zunächst Kosten im Vergleich zu den Eingriffsvarianten. Mittel- und langfristig führt dies jedoch zu einer ganzen Reihe unbefriedigender Ergebnisse, wie z. B. reduzierte Durchmesserentwicklung, erhöhter Schneebruchgefahr, ungünstiges Verhältnis von Aufwand und Ertrag bei der Erstdurchforstung und erhöhtes Sturmrisiko. Außerdem konnten wir keine erhöhte Strukturdiversität der Durchmesser-Verteilungen in selbstdifferenzierten unbehandelten Beständen konstatieren.

Hinsichtlich des in der Jugendphase der Bestände gegebenen Schneebruchrisikos wirken sich standraumerweiternde Pflegemaßnahmen deutlich risikomindernd aus. Diese Schlussfolgerung fußt auf den Auswertungen der H/D-Werte und dem Befund, dass sowohl Auskesselung als auch schematische Reduktion den H/D-Wert in ähnlicher Größenordnung absenken. Im Hinblick auf die Minimierung von Schneebruchschäden sollte somit in erster Linie darauf geachtet werden, dass generell ein energischer Eingriff erfolgt. Die Art und Weise, wie dieser Eingriff vorgenommen wird (Auskesselung

oder schematische Reduktion), scheint dagegen in Bezug zur Stabilisierung gegen Schneebruch erst in zweiter Linie von Bedeutung.

Jungbestandspflege in dichten Fichtennaturverjüngungen ist auch ein zentrales Element zur Vorsorge gegen Schäden aufgrund von Stürmen und sich aus Sturmschäden entwickelnden Borkenkäfer-siken. Dabei wies die schematische Reduktion die höchste Effizienz bezüglich der Förderung des Durchmesserwachstums der 200 stärksten Fichten auf und kann deshalb besonders empfohlen werden. Die schematische Reduktion ermöglicht es, angestrebte Zieldurchmesser früher, damit bei geringeren Baumhöhen und damit wiederum verbunden bei geringerem Sturmrisiko zu erreichen. Analog zu ihrer etwas reduzierten Eingriffsintensität führt jedoch auch die Auskesselung zu einer Förderung bzw. Stabilisierung der 200 stärksten Fichten, wenn auch in abgeschwächter Form.

Danksagung

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der FVA und der FAWF, die bei den Datenerhebungen im Gelände seit vielen Jahren beteiligt sind, gilt unser besonderer Dank. Ebenso bedanken wir uns für die Unterstützung durch die jeweiligen Revier- und Betriebsleitungen, die durch Rücksichtnahme bei der Bewirtschaftung die Versuchsanlagen erst ermöglichen. Bei zwei anonymen begutachtenden Personen möchten wir uns für die konstruktiv-kritischen Anmerkungen bedanken, die zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen haben.

Literatur

- Albrecht A., Hanewinkel M., Bauhus J., Kohnle U. 2012. How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. *European Journal of Forest Research* 131, 229–247
- Bolkenius D. 2001. Zur Wurzelbildung von Fichte (*Picea abies* L. [Karst]) und Weißtanne (*Abies alba* Mill.) in gleich- und ungleichaltrigen Beständen. *Freiburger Forstliche Forschung* 35
- Briggs N.A., Kuehne C., Kohnle U., Bauhus J. 2012. Root system response of naturally regenerated Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) after complete overstory removal. *Canadian Journal of Forest Research* 42, 1858–1864
- Brüchert F., Becker G. 2000. Biegemechanische Eigenschaften von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) bei unterschiedlichen Wuchsbedingungen - Grundlagen zur Abschätzung der Stabilität von Bäumen gegenüber mechanischen Belastungen durch Sturm und Schnee. *Forstarchiv* 71, 102–111
- Brüchert F., Becker G., Speck T. 2000. The mechanics of Norway Spruce [*Picea abies* (L.) Karst]: mechanical properties of standing trees from different thinning regimes. *Forest Ecology and Management* 135, 45–62
- Cameron A.D. 2002. Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. *Forestry* 75, 25–35
- Eisenhauer D.-R., Zimmermann R. 2003. Durchforstung von jungen Kiefernbeständen - Auswirkungen auf Durchmesserzuwachs, Flächenleistung, Einzelbaumstabilität und Bestandesstruktur. In: Deutscher Verband forstlicher Forschungsanstalten (Hrsg.) Jahrestagung Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband forstlicher Forschungsanstalten, 215–232
- ForstBW 2014. Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen (Baden-Württemberg). Ministerium Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, Stuttgart
- FVA-BW (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg) 1968. Stammzahlreduzierungen in reinen Fichtenbeständen. Merkblatt 8
- Hermann R.K. 2005. Wurzelstudien an Douglasie - ein Literaturüberblick. In: Dong, P. H. (Hrsg.) Zum Anbau und Wachstum der Douglasie. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz 55/05, 135–164
- Huuskonen S., Hynynen J. 2006. Timing and intensity of precommercial thinning and their effects on the first commercial thinning in Scots pine stands. *Silva Fennica* 40, 645–662
- Jacob A. 2004. Zwischenbilanz nach „Lothar“. *Badische Bauern Zeitung* 57 (50), 22–24

- Jalkanen A., Mattila U. 2000. Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data. *Forest Ecology and Management* 135, 315–330
- Kenk G. 1991. Natürliche Wiederbewaldung von Sturmwurfflächen: Möglichkeiten zur waldbaulichen Rationalisierung und Wertsteigerung. *Wald-wirt* 18 (3), 38–42
- Kenk G., Weise U. 1998. Nichtstun – ein alternativer Weg zu erhöhter Stabilität und Wertleistung? Zu: Beobachtungen zur Bestandesstruktur und durchforsteter Fichtenbestände. *Allg. Forstz.* 53, 937–939
- Klein M. 1978. Der Einfluss verschiedener Behandlungen auf deren Massen- und Wertleistung sowie die Bestandessicherheit gegen Wind und Schnee, Dissertation Universität Göttingen (unveröff.)
- Kneeshaw D.D., Williams H., Nikinmaa E., Messier C. 2002. Patterns of above- and below-ground response of understory conifer release 6 years after partial cutting. *Canadian Journal of Forest Research* 32 (2), 255–265
- Kohnle U. 2015. Fichte im Klimawandel – was tun? *FVA-einblick* 3, 13–16
- Kohnle U., von Teuffel K. 2005. Jungbestandspflege in Fichten-Naturverjüngungen auf Sturmflächen? *AFZ-Der Wald* 60, 571–574
- Kohnle U., Dinkelacker F., von Gilsa H. 2005. Sicherung waldbaulicher Qualitätsstandards in Baden-Württemberg – Ergebnisse zum Stand der Wiederbewaldung 2003. *AFZ-Der Wald* 60, 561–565
- Kohnle U., Lenk E., Freyler K., Keller O. 2014. H/D-Wert und Schneeschäden auf Kiefern- und Birken-Versuchsflächen. *AFZ-Der Wald* 69 (4), 12–15
- Kölling C., Knoke T., Schall P., Ammer C. 2009. Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Forstarchiv* 80, 42–54
- Kramer H., Bjerg N. 1978. Biologische Aspekte zur Jungbestandspflege der Fichte – Diskussion des Olper Fichten-Durchforstungsversuches. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt* 55
- Kronauer H. 2000. Schwere Sturmschäden in Baden-Württemberg – Lothar stellt Wiebke in den Schatten. *AFZ-Der Wald* 55, 92–93
- Kronauer H. 2007. Ruhe nach dem Sturm? Schäden durch Orkan Kyrill. *AFZ-Der Wald* 62, 250–251
- Kuehne C., Weiskittel A.R., Fraver S., Puettmann K.J. 2015. Effects of thinning-induced changes in structural heterogeneity on growth, ingrowth, and mortality in secondary coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research* 45(11), 1448–1461
- Leder B. 1998. Beobachtungen zur Bestandesstruktur und durchforsteter Fichtenbestände. *Allg. Forstz.* 53, 793–796
- Magurran A.E. 2004. *Measuring biological diversity*. Blackwell Publishing, Malden
- Marsch M. 1989. Biomechanische Modelle zur Quantifizierung der Tragfähigkeit von Einzelbäumen und Beständen gegenüber Schnee- und Windbelastung sowie darauf aufbauende Bestandesbehandlungsmaßnahmen mit Hilfe eines Simulationsmodells, dargestellt am Beispiel der Baumart Fichte. Dissertation TU Dresden
- Martens S. 2010. Robust sieht anders aus – Ergebnisse der Wurzeluntersuchungen an Douglasie. *Forstjournal Staatsbetrieb Sachsenforst* 4, 3–6
- McMinn R.G. 1963. Characteristics of Douglas-fir root systems. *Canadian Journal of Botany* 41, 105–122
- Merkel O. 1975. Schnebruch im Fichtenbestand bei 40jähriger Auslese-durchforstung. *Allg. Forstz.* 30, 663–664
- Ministerium für Ländlichen Raum Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg (Hrsg.) 1988. *Jungbestandspflege in den wichtigsten Betriebszieltypen*. Stuttgart
- Müller F. 2002. Modellierung von Sturm-, Schnee- und Rotfäulerisiko in Fichtenbeständen auf Einzelbaubelebene. Dissertation TU München
- Nicoll B.C., Gardiner B.A., Rayner B., Peace A.J. 2006. Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. *Canadian Journal of Forest Research* 36, 1871–1883
- Nielsen C.C.N. 1990. Einflüsse von Pflanzabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie auf Biomassenverteilung im Hinblick auf die Sturmfestigkeit der Fichte. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt* 100
- Nykänen M.-L., Peltola H., Quine C., Kellomäki S., Broadgate M. 1997. Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions. *Silva Fennica* 31, 193–213
- Päätao M.-L. 2000. Risk of snow damage in unmanaged and managed stands of scots pine, Norway spruce and birch. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15, 530–541
- Pampe A., Spellmann H., Schmidtke H., Rieckmann P. 2003. Jugendwachstum und Differenzierung von Fichten-Naturverjüngungen – Konsequenzen für die waldbauliche Behandlung. *Forst u. Holz* 58, 390–394
- Peltola H., Nykänen M.-L., Kellomäki S. 1997. Model computations on the critical combination of snow loading and windspeed for snow damage of Scots pine, Norway spruce and birch sp at stand edge. *Forest Ecology and Management* 95, 229–241
- Peltola H., Kellomäki S., Väisänen H., Ikonen V.-P. 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway Spruce and birch. *Canadian Journal of Forest Research* 29, 647–661
- Petty J.A., Swain C. 1985. Factors influencing stem breakage of conifers in high winds. *Forestry* 58, 75–84
- Petty J.A., Worrel R. 1981. Stability of Coniferous Tree Stems in Relation to Damage by Snow. *Forestry* 54, 115–128
- Pretzsch H., Schütze G. 2009. Transgressive overyielding in mixed compared with pure stands of Norway spruce and European beech in Central Europe: evidence on stand level and explanation on individual tree level. *European Journal of Forest Research* 128, 183–204
- Richter J. 1998. *Überschätzer HD-Wert*. *Allg. Forstz.* 53, 791–792
- Rieger G. 1982. Technik und Zeitbedarf der Jungbestandspflege in den wichtigsten Betriebszieltypen. *Mitteilungen der forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg* 98
- Rottmann M. 1985. Schneebuchschäden in Nadelholzbeständen. *J. D. Sauerländer's, Frankfurt a. M.*
- Rumpf H., Dites J. 2008. Jugendwachstum von Fichtennaturverjüngung in Abhängigkeit von Überschildungsdichte und Pflegestrategie. *Forst u. Holz* 63, 20–25
- Schmidt M., Hanewinkel M., Kändler G., Kublin E., Kohnle U. 2010. An inventory-based approach for modeling single tree storm damage – experiences with the winter storm 1999 in southwestern Germany. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 1636–1652
- Schübeler D. 1993. Ertragskundliche und waldbauliche Untersuchungen in einem undurchforsteten Fichtenbestand. *Schriftenreihe Landesanstalt für Forstwirtschaft Nordrhein-Westfalen* 7, 17–37
- Shainsky L.J., Newton M., Radosevich S.R. 1992. Effects of intra- and inter-specific competition on root and shoot biomass of young Douglas-fir and red alder. *Canadian Journal of Forest Research* 22, 101–110
- Slodiacák M. 1995. Thinning regime in stands of norway spruce subjected to snow and wind damage. In: Couatts M.P., Grace J. (Hrsg.) *Wind and trees*. Cambridge University Press, Cambridge, 436–447
- Valinger E., Fridman J. 2011. Factors affecting the probability of windthrow at stand level as a result of Gudrun winter storm in southern Sweden. *Forest Ecology and Management* 262, 398–403
- Valinger E., Lundqvist L. 1992. The influence of thinning and nitrogen fertilisation on the frequency of snow and wind induced stand damage in forest. *Scottish Forestry* 46, 311–320
- Wickham H. 2009. *ggplot2: elegant graphics for data analysis*. Springer, New York
- Zhang S.Y., Chauret G., Swift D.E., Duchesne I. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 36, 945–952
- Zubizarreta-Gerendiain A., Pellikka P., Garcia-Gonzalo J., Ikonen V.-P., Peltola H. 2012. Factors affecting wind and snow damage of individual trees in a small management unit in Finland: assessment based on inventoried damage and mechanistic modelling. *Silva Fennica* 46, 181–196