

Anhang

I. Material und Methode

1. Entwicklung der Versuchsflächen

Die vorliegende Arbeit basiert auf den von Albrecht et al. [3] detailliert beschriebenen, in Baden-Württemberg liegenden Versuchen zu unterschiedlich intensiver Jungbestandspflege in baumzahlreichen Fichten-Naturverjüngungen („Bürstenwüchsen“). Sie waren zwischen 2003 bis 2009 in Verjüngungen angelegt worden, die zum Zeitpunkt der Versuchsanlage etwa zwischen 2 – 4 m hoch bzw. 14 – 21 Jahre alt waren. Der Versuch Fi465 wurde allerdings so frühzeitig aufgegeben, dass er in die vorliegende Auswertung nicht sinnvoll einbezogen werden konnte. Auch der Versuch Fi466 musste zwischenzeitlich (vorzeitig) aufgegeben werden. Aufgrund der vorliegenden Aufnahmen konnte er jedoch im Wege einer simulativen Fortschreibung (s.u.) mit einbezogen werden. Die anderen vier Versuchsflächen (Fi466, Fi471, Fi472, Fi473, Fi477; [3]) sind immer noch Bestandteil des Versuchsflächennetzes der FVA und wurden seither weiter beobachtet; Messung und Berechnung der wachstumskundlichen Kennwerte entsprechen der Beschreibung in [3].

1.1 Varianten der Jungbestandspflege

1. *Unbehandelte Kontrolle*

hier erfolgten keinerlei Pflegeeingriffe in die jungwüchse, um den ungestörten Verlauf eigendynamischer Differenzierungsprozesse beobachten zu können;

2. *Auskesselung*

Auswahl von rd. 200-250 herrschenden Bäumen je Hektar in \pm gleichmäßiger Verteilung und Entfernung sämtlicher Nachbarbäume in einem Radius von rd. 2,5 m.

3. *Schematische Reduktion*

Freistellung einer definierten Anzahl herrschender Bäumen je Hektar in \pm gleichmäßiger Verteilung durch systematische Entfernung aller anderen Bäume auf der Fläche. Die schematischen Reduktionen erfolgten dabei in zwei Untervarianten:

- a) Reduktion auf eine Baumzahl von rd. 2.400 Bäumen / ha (2.200 – 3.000) bzw.
- b) Reduktion auf eine Baumzahl von rd. 1.200 Bäumen /ha (1.000 – 1.500).

Die beiden Varianten schematischer Reduktion waren allerdings nicht in allen fünf Versuchen gleichzeitig umgesetzt.

Ergänzend zu den auf den Versuchsflächen beobachteten Beständen wurde auch die Entwicklung eines aus Pflanzung von 1.500 Fichten /ha entstandenen Bestandes simuliert.

1.2 Entwicklungsstand der Bestände zum Auswertungszeitpunkt

Ziel der vorliegenden Arbeit war eine modellierte Abschätzung der Auswirkungen unterschiedlich intensiver Jungbestandspflege auf die weitere Entwicklung der Bestände nach Beginn der Durchforstung. Entsprechend den aktuellen waldbaulichen Richtlinien in Baden-Württemberg [16] wurde dazu für den Beginn der zu modellierenden Durchforstungen eine Oberhöhe von rd. 15m gewählt.

In Versuchen Fi472 und Fi473 hatten die Jungbestände diese Höhe bereits erreicht. Hier konnten die Durchforstungssimulationen direkt mit den Messdaten derjenigen Aufnahme gestartet werden konnten, die der dazu angestrebten Höhe von 15m am nächsten kamen.

In den anderen Versuchen waren die Bestände zum Zeitpunkt der letzten verfügbaren Aufnahmen dagegen noch deutlich unter 15m hoch (**Tabelle A-1**). Um sie trotzdem in die Untersuchung mit einbeziehen zu können, wurde die eigendynamische Entwicklung (ohne Eingriffe) dieser Bestände simulativ bis zur angestrebten Oberhöhe von rd. 15m fortgeschrieben.

Tabelle A-1. Übersicht über wachstumskundliche Kennwerte der Versuche zum Zeitpunkt der in die Untersuchung einbezogenen Aufnahme.

Versuchsfläche <i>(Ort, Aufnahmejahr)</i>	Variante der Jungbestandspflege	Alter <i>in Jahren</i>	N / ha <i>[davon Fi]</i>	N _{erb} / ha <i>[davon Fi]</i>	H ₂₀₀ Fichte	D ₂₀₀ Fichte	D _G Summe <i>[D_G Fichte]</i>	Vorrat <i>[davon Fi]</i>	i _{vol}	Verwendung bei Bildung der Df- Szenarien	
			<i>[davon Fi]</i>	<i>[davon Fi]</i>	<i>in m</i>	<i>in cm</i>	<i>in cm</i>	<i>in VfmD / ha</i>	<i>in VfmD / ha / l</i>		
Fi 466 <i>(Heidenheim; 2011)</i>	1: unbehandelt	27	22.482 [100%]	2.340 [100%]	8,0	11,1	4,2 [8,2]	29 [100%]	4,8	Fortschreibung mit W+ bis Höhe rd. 15m zur Initialisierung der Durchforstungs-Szenarien	
	2: ausgekesselt		22.220 [100%]	1.532 [100%]	7,1	10,4	3,7 [7,9]	15 [100%]	2,4		
	3a: red. 2.500/ha		7.603 [100%]	2.417 [100%]	7,2	12,0	5,5 [8,8]	36 [100%]	5,9		
Fi 471 <i>(Altenteig; 2018)</i>	1: unbehandelt	31	20.808 [95%]	2.375 [87%]	9,6	11,3	4,2 [8,0]	33 [81%]	5,3		
	2: ausgekesselt		13.362 [97%]	2.589 [93%]	11,7	15,5	5,4 [9,8]	79 [95%]	11,3		
	3b: red. 1.250/ha		11.962 [97%]	1.382 [93%]	10,9	16,0	4,6 [11,9]	68 [99%]	9,0		
Fi 477 <i>(Ebnat; 2018)</i>	1: unbehandelt	29	25.651 [97%]	2.465 [88%]	11,7	13,8	4,1 [8,8]	61 [77%]	8,9		
	2: ausgekesselt		11.934 [98%]	3.407 [97%]	11,6	14,7	6,2 [9,6]	100 [97%]	15,1		
	3b: red. 1.250/ha		4.004 [93%]	1.446 [89%]	11,7	16,8	8,2 [13,3]	106 [89%]	14,1		
Fi 473 <i>(Rottenburg; 2017)</i>	1: unbehandelt	34	6.345 [47%]	3.000 [56%]	13,8	13,5	8,5 [9,0]	159 [31%]	15,2		Durchforstungs-Szenarien unmittelbar initialisiert mit Messdaten der Aufnahme
	2: ausgekesselt		6.688 [94%]	3.280 [95%]	15,4	18,2	8,3 [10,6]	172 [88%]	17,7		
	3a: red. 2.500/ha		4.420 [76%]	1.989 [97%]	13,8	16,4	7,7 [11,2]	103 [99%]	12,2		
	3b: red. 1.110/ha		1.735 [87%]	1.036 [95%]	14,1	18,9	10,5 [13,5]	85 [97%]	11,0		
Fi 472 <i>(Sigmaringen; 2017)</i>	1: unbehandelt	30	7.369 [98%]	3.921 [97%]	14,8	16,2	8,0 [9,7]	159 [90%]	21,5		
	2: ausgekesselt		7.290 [99%]	3.496 [100%]	15,7	19,4	8,2 [10,6]	173 [100%]	20,5		
	3a: red. 2.200/ha		2.520 [85%]	1.897 [89%]	15,2	19,0	12,1 [13,8]	190 [89%]	20,3		
	3b: red. 1.250/ha		2.584 [88%]	1.318 [98%]	16,3	21,9	12,7 [17,5]	241 [99%]	23,4		

2. Simulation von Wachstum & Entwicklung

2.1 Simulierte Durchforstungsszenarien

Die Eingriffe beginnen bei den Durchforstungs-Szenarien einheitlich bei Oberhöhe 15m. Beim ersten Eingriff kamen dabei in Abhängigkeit der Bestandesdichte folgende beiden Varianten zur Anwendung:

- A: In den aus schematisch reduzierten Jungwüchsen hervorgegangen Beständen wurde beim ersten Eingriff mit der Anlage der Rückegassen im Abstand von 40m der Beginn der Z-Baum-Durchforstung auf der restlichen Fläche verbunden.
- B: Die aus unbehandelten bzw. ausgekesselten Jungwüchsen hervorgegangenen Bestände waren für einen sofortigen Beginn der Z-Baum-Durchforstung durch die extrem hohe Stammzahl (lebende und tote Bäume) zu dicht. Daher erfolgte hier beim ersten Eingriff bei der Anlage der Rückegassen zusätzliche schematische Reduktion der Bestandesdicht durch Anlage 2m breiter von den Rückegassen ausgehender „Leitergängen“ im Abstand von 7m. Die Z-Baum-orientierten Durchforstung wurde dann erst beim folgenden Eingriff (bei 18m Höhe) gestartet.

Die bei Anlage von Rückegassen bzw. Leitergängen entstehende bestockungsfreien Flächenanteile (10 bzw. 36% der Hbfl.) wurden als Eingriff zur Absenkung der Bestandesdichte gewertet und so in die Berechnung und Simulation der Wachstumsdynamik des Bestandes integriert.

Unabhängig vom Beginn der Z-Baum-Durchforstung bei 15 bzw. 18m Oberhöhe erfolgte die Behandlung nach folgendem, einheitlichem Regime:

- Auswahl von 200 Z-Bäumen /ha aus dem Kollektiv der 500 stärksten Fichten /ha und Z-Baum-Durchforstung in 5jährigen Intervallen. Für die Eingriffsstärken kamen die im Wachstumssimulator hinterlegten, aus Versuchsflächen abgeleiteten

grundflächenorientierten Vorgaben zur Anwendung; diese entsprechen den waldbaulichen Vorgaben in Baden-Württemberg für Fichte [17, 18].

- Bei 30m Oberhöhe Übergang zu *Vorratspflege* durch Entnahme von 60% des Grundflächenzuwachses in 5jährigen Intervallen.
- Bei Erreichen der Hiebsreife (300 Vfm/ha von Bäumen in Zielstärke BHD 50cm); *zielstärkenorientierte Endnutzung* des Bestandes durch 3 Eingriffe innerhalb eines Jahrzehnts.

2.2 Simulationswerkzeuge

2.2.2 Wachstumskundliche Entwicklung

Die Simulation der naturalen Wachstumsentwicklung der Bestände erfolgte mithilfe des Wachstumssimulators W+ [13].

Die Fortschreibung der Jungbestände der Versuche Fi466, Fi471 und Fi477 bis zu einer Oberhöhe von 15m basierte dabei auf den Messdaten der aktuellsten nutzbaren Aufnahme unter Verwendung der versuchsspezifischen Oberhöhenbonität und Annahme ausschließlich dichtebedingter Mortalität. Deren Modellierung folgt bei W+ den Prinzipien des *stand density index* [19]. Beigemischte Baumarten wurden für diese Fortschreibung wie Fichte behandelt.

Für den Start der Durchforstungssimulationen wurde die Durchmesserverteilungen der bei rd. 15m Oberhöhe in den Beständen vorhandenen lebenden Bäume an den Simulator übergeben. Beigemischte Baumarten wurden dabei wie Fichte behandelt.

Da die vorgesehene ökonomische Bewertung der Szenarien zinsbedingt zeitsensitiv ist, wurden sie allerdings nicht mit den standortsbedingt variierenden Wachstumsgeschwindigkeiten des jeweiligen Versuchs simuliert, sondern unter Verwendung einer einheitlichen - für Baden-Württemberg typischen - Oberhöhen-Bonität von 33m im Alter 100 Jahre fortgeschrieben (entspricht ca. dGZ₁₀₀ 12,5 nach LFV [20]). Damit erreichen die Bestände in der Simulation die Oberhöhe 15m im Alter von 35 Jahren und 18m im Alter von 42 Jahren.

2.2.2 Holzernte

Verwendet wurde hierzu die im Programm HOLZERTE 8¹ [14] verfügbare Option zur automatisierten Berechnung ganzer Hiebsserien. Dazu wurden die unter W+ erzeugten Baumlisten an HOLZERTE 8 übergeben und unter Vorgaben für vollmechanisierte Harvesteraufarbeitung bearbeitet. Die ausgegebenen Aufwendungen wurden dann für die ökonomische Bewertung auf aktuelle Kostensätze angepasst und ggfs. zusammen mit zusätzlichen Erschwerniszuschlägen bewertet.

Analog wurden aus HOLZERTE 8 die nach Losen getrennte, aufgearbeiteten Holzmassen ausgelesen und für die ökonomische Bewertung qualitätsdifferenziert und mit aktuellen Preisen bewertet umgerechnet. Grundlage dafür bildete die Aufarbeitung und Sortierung in folgende Lose (hierarchische Reihenfolge):

1. Fixlängen aus Erdstammbereichen
3 – 5 m (in 0,5m Teilungen); ausgehalten bei Mittendurchmesser min. 10cm und Zopfdurchmesser min. 7cm bis zu einer Schafthöhe von 20m.

¹ <https://www.fva-bw.de/daten-und-tools/tools/holzernte-8>

2. Fixlängen aus höheren Stammbereichen („Gipfel-Los“)
 - Aushaltung wie Los 1 für Schafteile zwischen 20 – 30m Höhe
3. Industrieholz
 - Aushaltung als 2m Schichtholz bis Zopfdurchmesser min. 7cm.

3. Ökonomische Bewertung

3.1 Bewertungsgrundlagen

3.1.1 Aufwand Jungbestandspflege

Aus einer Umfrage in Betrieben, die schematische Reduktion von baumzahlreichen Jungbeständen mit dem Freischneider praktizieren, lagen 52 Angaben zum Zeitbedarf vor (**Abbildung A-1**). Der abgerundete Mittelwert dieser Meldungen (30 Std/ha) wurde mit einem Stundensatz von 35 € umgerechnet (1.050 €/ha) und für die ökonomische Bewertung verwendet.

Zur Ermittlung des Pflegeaufwandes für die in der Praxis ausgesprochen selten praktizierte Auskesselung standen keine quantitativ belastbaren Grundlagen zur Verfügung. Ersatzweise wurde dafür der Aufwand für eine schematische Reduktion im Anhalt an sehr optimistische gutachtliche Einschätzungen forstlicher Praktiker pauschal um 30% gekürzt und der Bewertung zugrunde gelegt (735 €/ha).

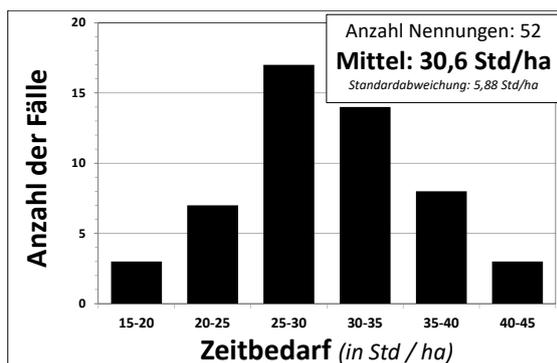


Abbildung A-1: Nennungen aus der forstlichen Praxis zum Zeitbedarf für schematische Reduktionen baumzahlreicher Jungwüchse mit dem Freischneider.

3.1.2 Aufwand Holzernte

Der Aufwandsberechnung für die Harvester-Aufarbeitung lag in HOLZERENTE 8 ein Systemkostensatz von 130 €/h zugrunde. Dieser Satz wurde nachträglich pauschaliert auf ein Niveau von 180 €/h aktualisiert.

Die Forwarder-Bringung wurde dimensionsunabhängig pauschal mit einem Aufwand von 11 €/Efm bewertet; zugrunde gelegt wurden dazu Systemkosten von 110 €/h bei einer Leistung von 10 Efm/h.

3.1.3 Berücksichtige Ernte-Erschwernisse

Erschwernisse bei Anlage von Erschließungslinien

Die Herleitung des bei der Anlage der Erschließungslinien (Rückegassen, Leitergänge) durch den Harvester entstehenden Aufwandes erfolgte auf Basis zweier verschiedener Ansätze:

- A) Zum einen wurde auf die oben beschriebene Aufwandsermittlung in HOLZERENTE zurückgegriffen.

B) Zum anderen wurde eine rein aus der Entnahmestückzahl abgeleitete Abschätzung verwendet.

Basis für die Abschätzung nach Ansatz (B) waren Arbeiten von Rein [21, 22] und Kieser [23], die Angaben zu fünf in diesem Zusammenhang auswertbaren Hieben enthalten: Bei einer Spanne der Entnahmestückzahl von 130 – 153 Stück/ha lag die Leistung im Mittel dieser fünf Hiebe bei 138 Stück/h. Umgerechnet mit Systemkosten von 180 €/h ergibt sich bei Anlage der Linien daraus ein Aufwand von rd. 1.300 € für die Entnahme von 1.000 Stück.

Für die ökonomische Gesamtbewertung wurde dann der Aufwand für die Anlage der Linien mit einem gewichteten Mittelwert veranschlagt, in den der mit HOLZERNTEN hergeleitete Aufwand (A) mit 25% und der rein Entnahmestückzahl-bezogen hergeleitete Aufwand (B) mit 75% einbezogen wurden.

Durchforstungs-Erschwernisse durch abgestorbene Bäume

Außerdem war zu berücksichtigen, dass in baumzahlreichen Jungbeständen nicht nur das Aufschneiden der Erschließungslinien erschwert sein kann. Tatsächlich wird auch die Durchforstung der übrigen Fläche durch bereits abgestorbene Bäume zusätzlich behindert, die noch im Bestand stehen.

Für alle Pflegevarianten wurde daher beim ersten Eingriff die Anzahl solcher abgestorbenen Bäume zusätzlich zu den lebenden Bäumen berücksichtigt. Die Abschätzung erfolgte dabei hilfsweise aus der Differenz der Anzahl lebender Bäume fünf Jahre vor dem ersten Eingriff und zum Zeitpunkt des ersten Eingriffs. Im Mittel der fünf Versuche ergaben sich dabei folgende Zuschläge für im Lauf des vorhergehenden Jahrfünfts abgestorbene Bäume: +100% der lebenden Bäume in unbehandelten Beständen (*genaues Mittel*: +114%), +70% nach Auskesselung (+76%) und +30% nach schematischer Reduktion (+41%).

Ernteschwernisse durch abgestorbene Bäume wurden auch in den Fällen berücksichtigt, in denen die erste Durchforstung auf der verbleibenden Fläche erst fünf Jahre nach Anlage der Linien erfolgte (nur in unbehandelten Beständen bzw. nach Auskesselung). In solchen Fällen wurde der für die erste Durchforstung erhöhte Aufwand durch einen Zuschlag in Höhe von 40% berücksichtigt.

Erschwernisse durch Zufällung

Beim für die Feinerschließung in den Simulationen veranschlagten Abstand von 40m zwischen den Rückegassen ist nur etwa die Hälfte des zwischen Gassen liegenden Bestandes direkt mit dem Harvester greifbar. Aus dem Mittelblock (etwa der Hälfte der Fläche) müssen die Bäume zugefällt werden.

Der dadurch verursachte zusätzliche Aufwand wurde in Abhängigkeit der Bestandeshöhe zum Durchforstungszeitraum veranschlagt. Ausgegangen wurde davon, dass bei einer Durchforstung bei Oberhöhe 15m (Alter 35 Jahre) ein Zusatzaufwand von +8 €/Efm zugefallter Masse entsteht, der mit zunehmender Baumhöhe auf einen Wert von +3 €/Efm bei 25m sinkt (Alter 63 Jahre). Die rückläufigen Zusatzaufwendungen wurden polynomisch über dem Alter ausgeglichen und bei Eingriffen bis zum Alter 65 Jahre mit veranschlagt; Eingriffe in >65 Jahre alten Beständen wurden ohne Zusatzaufwendungen für Zufällen kalkuliert.

3.1.4 Holzpreise

Stammholz der Stärkeklasse 3a diente als Leitsortiment und wurde mit einem Preis für B-Qualität von 68 €/Efm veranschlagt (**Abbildung A-2 linke Grafik**). Für schwächeres

Stammholz wurde der Preis bei abnehmender Stärke um bis zu 16 €/Efm (L1a) reduziert; bei stärkerem Holz wurden bei zunehmender Stärke Abschläge bis 12 €/Efm (L6) verrechnet.

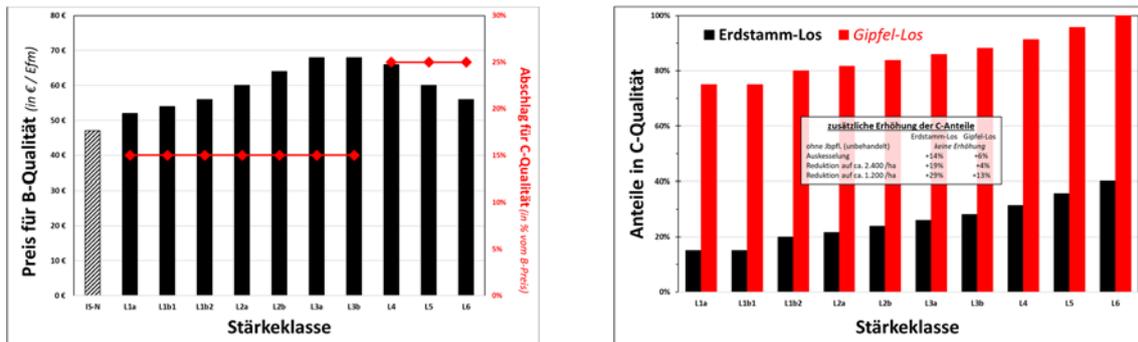


Abbildung A-2: Holzpreise.

Grafik links: nach Stärkeklassen gestaffelte Preise für normale B-Qualitäten und C-Abschläge.

Grafik rechts: Nach Stärkeklassen und Pflege-Varianten differenzierte Anteile reduzierter C-Qualität.

Die Anteile von Stammholz mit (reduzierter) C-Qualität wurden zum einen zwischen Erdstamm- und Gipfellos differenziert (Abbildung A-2 rechte Grafik). Außerdem wurden die C-Anteile zusätzlich in Abhängigkeit der bewerteten Jungbestandspflege-Variante variiert:

Zwar gaben die beim Versuch Fi472 exemplarisch durchgeführten Aststärkenmessungen keinen Hinweis darauf, dass bei einer der Behandlungsvarianten die für B-Qualität einschlägige Aststärkengrenze (4cm) in nennenswertem Ausmaß überschritten wurde. Da die Aststärken jedoch mit zunehmendem Standraum der Bäume die erwartete zunehmende Tendenz zeigten (vgl. Kap. 4.1), wurden die für die Holzerlöse verrechneten C-Anteile aus Gründen kaufmännischer Vorsicht in Abhängigkeit der Standraumerweiterung der Bestände bei Jungbestandspflege pauschal erhöht (Abbildung A-2 rechte Grafik).

3.2 Ertragswirtschaftliches Bewertungskriterium: Annuität

Für die ökonomische Gesamtbewertung wurde für die gesamte Produktionszeit des jeweiligen Bestandes die *Annuität* berechnet (Zinssatz bis 0,0001 – 5%). Sie eignet sich sehr gut dafür, die unterschiedlichen Zeitpunkte zu denen Erträge und Aufwände anfallen in ein ausgewogenes Gesamtbild der mittleren jährlichen Ertragsleistung zu integrieren.

Diese Größe des „jährlichen Holzproduktionswertes“ erscheint in der Praxis gut kommunizierbar und mit anderen auf den Hektar bezogenen Erfolgsgrößen gut vergleichbar [15]. Dabei bilden für marginale Zinssätze nahe 0% berechnete Annuitäten eine sehr gute Annäherung an den von der forstlichen Praxis häufig nachgefragten zinsfrei berechneten jährlichen Hektar-Reinertrag.

4. Ergänzende Untersuchungen: Qualität, Stabilität, Risiko

4.1 Aststärken

Im Versuch Fi472 wurden bei der letzten Aufnahme 2019 (Oberhöhe rd. 15m) Aststärken gemessen. Dazu wurden je Pflegevariante 10 Probestämme gefällt, die Höhe der Quirle am Stamm bestimmt, Anzahl und Status der Äste (lebend/tot) im Quirl erfasst und der Basisdurchmesser (ohne Rinde) des stärksten Asts im Quirl aus zwei kreuzweisen Messungen (auf mm genau) gemittelt. Erwartungsgemäß [24-27] hatten die Aststärken tendenziell mit der Intensität der Standraumerweiterung zugenommen (Abbildung A-3). Trotz dieser Tendenz zeigte sich jedoch, dass es selbst in den schematisch reduzierten Beständen **nicht** zu

nennenswerten Überschreitungen der für B-Qualität relevanten Aststärkengrenze (4cm) gekommen war.

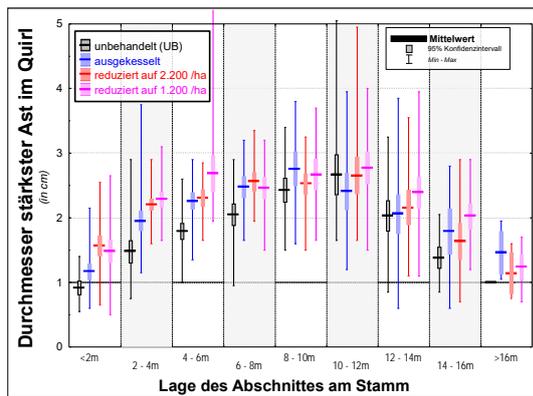


Abbildung A-3: Mittelwert (waagerechte Linie), 95%-Konfidenzintervall (Box) und Spannweite (min-max; senkrechte Linie) des Basisdurchmessers des jeweils stärksten Astes innerhalb der 2m langen Abschnitte. Untersucht wurden jeweils 10 Probestämme (Fichte) je Pflegevariante des Versuchs Fi472 (Aufnahme August 2019; schwarz: unbehandelt, blau: Auskesselung; rot: schematisch reduziert auf 2.200 /ha, magenta: schematisch reduziert auf 1.200 /ha).

4.2 Verankerungsfestigkeit und Bewurzelung

Im Rahmen einer Masterarbeit [12] wurden im Versuch Fi473 versucht, im Winterhalbjahr 2018/19 die Entwicklung von Verankerungsfestigkeit und Bewurzelung der Fichten auf quantitativer Grundlage zu beurteilen. Hierbei wurde auf die Methode der Umzugsversuche zurückgegriffen, die schon wiederholt für solche Beurteilungen angewendet worden ist (z.B. [28, 29]). Dazu wurde die vor kurzem bei relativ kleinen Douglasien-Pflanzen angewendete Technik [30] an die Anforderungen zur Messung der deutlich größeren Fichten angepasst. Details zur technischen Durchführung finden sich in [12].

Für die Umzugsversuche wurden jeweils 20 Probestämme (Fichten) in der unbehandelten Kontrolle bzw. den schematisch reduzierten Feldern (verteilt auf die Varianten 1.100 /ha bzw. 2.500 /ha) gutächtlich über das gesamte Durchmesserpektrum der Bestände ausgewählt. Zwischen den ausgewählten Probestämmen und ihren Nachbarn wurden die Konkurrenzverhältnisse erfasst (Durchmesser, Abstand und Winkel). Anschließend wurden die Probestämme mittels Seilwinde umgezogen. Ermittelt wurde das dabei maximal gemessene Drehmoment. Außerdem wurde in 30cm Distanz zum Wurzelstockmittelpunkt an der stärksten Wurzel die Querschnittsfläche auf Basis acht gemessener Radien berechnet. **Tabelle A-2** fasst die Messbefunde zusammen.

Tabelle A-2. Höhe, Durchmesser, Verankerungsfestigkeit und Größe der Hauptwurzel von Probestämmen, die in selbstdifferenzierenden, unbehandelten Jungbeständen bzw. Jungbeständen nach schematischer Reduktion aufgewachsen waren (Versuch Fi473).

	unbehandelte Kontrolle (n=20)		schematische Reduktion (n=20)	
	Median	(min – max)	Median	(min – max)
Höhe	11,8 ⁿ m	(8,9–14,0)	11,7 ⁿ m	(7,2–16,1)
Durchmesser	9,3 ^a cm	(7,0–16,2)	11,9 ^b cm	(7,0–23,8)
Drehmoment_{max}¹	4,4 ^c kNm	(1,86–12,80)	10,6 ^d kNm	(1,76–31,26)
Wurzelquerschnitt (stärkste Wurzel)	8,5 ⁿ cm ²	(3,6–47,2)	12,4 ⁿ cm ²	(5,2–67,8)

¹maximales beim Umziehen des Probestaums gemessenes Drehmoment

^{a-d} Unterschiede zwischen Medianen in Spalten gefolgt von unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant (p<0,05); ⁿ nicht signifikant

4.3 H/D-Werte – Schneebruchrisiko

Das vor allem in jüngeren Beständen bestehende Risiko von Schäden durch *Schnee* lässt sich gut anhand des H/D-Werts einschätzen. Er ist bereits seit geraumer Zeit [9] als dafür bestens geeigneter Kennwert etabliert und liefert für die untersuchten Bestände folgende Reihung: Zu Beginn der Durchforstung bei 15m Höhe besteht in den Jungbeständen aus schematischer Reduktion das mit deutlichem Abstand geringste Risiko. Gefolgt von ausgekesselten und unbehandelten Beständen (Abbildung A-4).

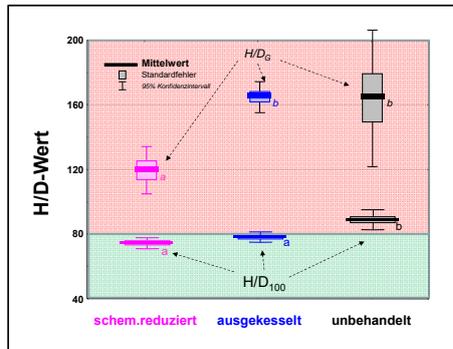


Abbildung A-4: H/D-Werte charakteristischer Kollektive in unterschiedlich gepflegten Fichten-Bürstenwüchsen bei Beginn der Durchforstung (Höhe 15m; H/D_G : Grundflächenmittelstamm; H/D_{100} : 100 stärksten Fi/ha). Der Bereich mit hohem Risiko ($> H/D 80$) ist rot hinterlegt, der mit akzeptablerem Risiko ($< H/D 80$) grün. Mittelwerte gefolgt von unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($p < 5\%$).

4.4 Sturmschadensrisiko

4.4.1 Grundlagen

Da das Risiko von Schäden durch Sturm *ceteris paribus* mit zunehmender Baumhöhe deutlich ansteigt [10, 11], erfolgte die Abschätzung dieses Risikos auf Basis der Höhenentwicklung der Bestände. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

Grundlage bildet der in der Fig. 5 der Arbeit von Schmidt et al. [10] abgebildete Kurvenverlauf der Entwicklung der Schadenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Baumhöhe. Hierfür wurden die für den im baden-württembergischen Neckarland gelegenen Ort Nr. 3 modellierten Grenzen des 95%-Prognoseintervalls für den Wertebereich von 0 – 50 graphisch abgegriffen, die daraus für die jeweilige Baumhöhe spezifischen mittleren Erwartungswerte interpoliert und polynomisch über der Höhe ausgeglichen (Abbildung A-5 linke Grafik; $R^2=0,99$).

Für eine Produktionszeit-bezogene Beurteilung der Risikoentwicklung, erfolgte eine Umrechnung der Oberhöhenentwicklung in Alter auf der Grundlage der für die Oberhöhen-Bonität 33m gültigen Alters-/Höhen-Beziehung (Abbildung A-5 mittlere Grafik; $R^2 > 0,99$).

Abschließend wurde dann über dem Alter die für das jeweilige Alter gültige (höhen-spezifische) Schadenswahrscheinlichkeit aufgetragen und polynomisch ausgeglichen (Abbildung A-5 rechte Grafik; $R^2 > 0,99$):

- Der einem konkreten Alter zugeordnete Wert der Ordinate indiziert dabei das Risiko, dem der Bestand zu diesem Zeitpunkt ausgesetzt ist.
- Die bis zu diesem Alter summierte Fläche unter der Kurve lässt sich als Indikator des kumulierten Gesamtrisikos interpretieren, dem der Bestand während seiner bisherigen Entwicklung ausgesetzt war.

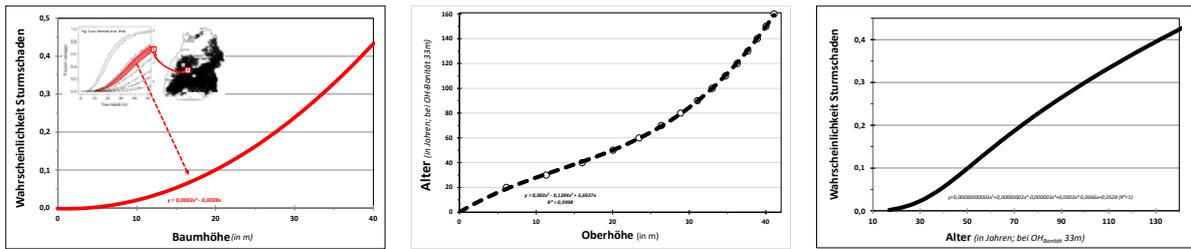


Abbildung A-5: Risiko Sturmschaden; Modellierungsgrundlagen.

Grafik links: Polymischer Ausgleich der Wahrscheinlichkeit eines Sturmschaden in Abhängigkeit der Höhe von Fichten (Werte aus [10] Graphik Nr. 5, Ort 3).

Grafik Mitte: Darstellung Alter über Höhe abgeleitet aus der für Oberhöhen-Bonität 33m gültigen Alters-Höhen-Beziehung.

Grafik rechts: Darstellung der Entwicklung der Wahrscheinlichkeit eines Sturmschadens in Abhängigkeit dem Alter eines Bestandes mit Oberhöhen-Bonität 33m.

4.4.2 Auswirkungen der Pflegevarianten

Die Kurve in **Abbildung A-6 (Grafik links)** stellt die Entwicklung des Sturmschadensrisikos der aus unterschiedlicher Jungbestandspflege hervorgegangen Bestände exemplarisch für den bei Oberhöhen-Bonität 33m typischen Verlauf des Höhenwachstums dar; und zwar umgerechnet in eine altersabhängige Darstellung.

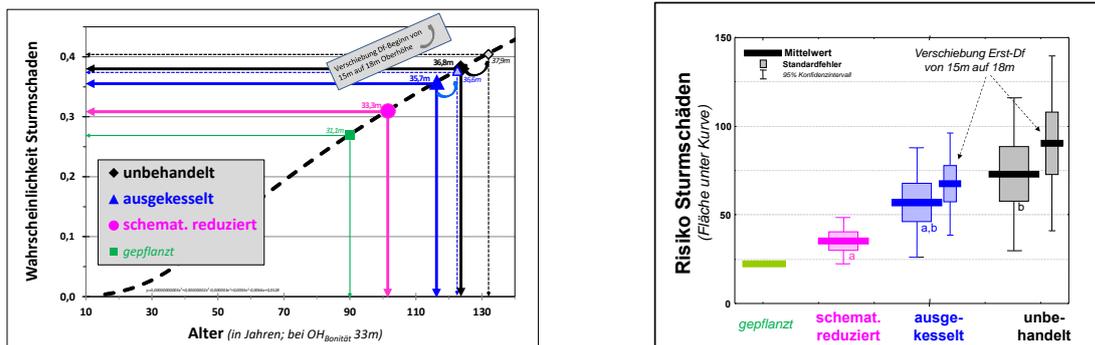


Abbildung A-6: Auswirkungen der Pflegevarianten auf das Sturmschadensrisiko.

Grafik Links - Wahrscheinlichkeit eines Schadens in Abhängigkeit der Entwicklung von Beständen, die aus unterschiedlich intensiv gepflegten Fichten-Bürstenwüchsen hervorgegangen sind. Farblich auf der Kurve abgetragen sind die Zeitpunkte (und Oberhöhen) der abschließenden Nutzung der jeweiligen Bestände (Mittelwerte).

Grafik Rechts – Gesamtrisiko kumuliert für die Produktionszeit (indiziert durch die Fläche unter der Kurve der Bestände) Mittelwerte gefolgt von unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($p < 5\%$).

Nimmt man die Fläche unter der jeweiligen Kurve als Maß für das gesamte Risiko, dem Bestände während ihrer Lebensdauer ausgesetzt sind, wird deutlich, wie bei zunehmender Länge der erforderlichen Produktionszeit und damit zunehmender Höhe das Gesamtrisiko rapide zunimmt (**Abbildung A-6, Grafik rechts**). Außerdem wirkt sich eine Verschiebung der Erst-Durchforstung von 15m auf 18m deutlich risikoerhöhend aus.