

Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft
und Angewandte Informatik

**Holzernteschäden an Fichten-Buchen-Verjüngung –
Ausmaß, Verteilung, Prognose
und Bewertungsansätze**

Sven Korten

Vollständiger Abdruck der vom Promotionsausschuss
der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement
an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors rer. silv.

genehmigten Dissertation.

Betreuer: Prof. Dr. W. Warkotsch

Prüfer der Dissertation

1. Prof. Dr. W. Warkotsch
2. Prof. Dr. H. Pretzsch
3. Prof. Dr. M. Moog

eingereicht im Oktober 2004
mündliche Prüfung am 27.01.2005

Abstract

The changes in silviculture from even-aged stands to management strategies according to nature comprehending long periods of natural regeneration and pronounced horizontal and vertical structure lead to an increasing spatiotemporal overlapping of timber harvesting in the old stand and its regeneration. Therefore damages on the regeneration caused by timber harvesting become more important.

This study describes the effects of motor-manual, mechanized and combined (motor-manual + mechanized) harvesting methods as well as of wind throw on spruce-beech-regeneration. Motor-manual harvesting damaged and destroyed an average of 16% (8-21%) of the regeneration. The mechanized felling with harvesters and extraction by forwarders affected (damaged or destroyed) 33% (20-46%) of the saplings, while combined harvesting resulted in a rate of 37% (26-46%) affected regeneration. Wind throw and ensuing logging operations damaged and destroyed 56% of the saplings. All of the studied harvesting methods showed a spatial concentration of the damages along the skid trails.

A prediction model was developed for the motor-manual harvesting as the standard method in preregenerated stands. The model calculates the affected area of the stand as an indicator for the emerging felling damages. Thus a decoupling of the classical design of experiments using sample areas could be achieved. For that purpose the influencing factors were split into the parameters of the harvesting operation (characteristics of the harvesting method, of the removed trees and of the skid trails) and the parameters of the regeneration. This approach enables the simulation of different situations regarding skid trails, composition of the tree species, cutting intensity etc. in their effects on various regenerations. The knowledge gained can be used to compile recommendations how to minimise damages to regeneration caused by timber harvesting.

To implement a silvicultural assessment of the damages to regeneration several procedures were tested in reference to their fundamental applicability. Among the change of different regeneration indices a method for assessing game damage already used in practise, considering the spatial distribution of undamaged saplings was applied for assessing purposes of the harvesting damages to regeneration. Furthermore the development of regeneration with and without consideration of the harvesting damages was compared using the growth simulator SILVA.

Kurzfassung

Durch den waldbaulichen Wandel vom Altersklassenwald zu „naturnahen“ bzw. „naturgemäßen“ Bewirtschaftungsformen mit langen Verjüngungszeiträumen, starker horizontaler und vertikaler Struktur sowie der Bevorzugung von Naturverjüngung überschneiden sich die Nutzung des Altbestandes und seine Verjüngung zeitlich und räumlich zunehmend. Infolgedessen gewinnen Holzernteschäden an der Verjüngung zunehmend an Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen von motormanuellen, hochmechanisierten und kombinierten Holzernteverfahren sowie Windwurf auf Fichten-Buchen-Verjüngung. Durch die motormanuelle Holzernte wurden im Mittel 16% (8-21%) der Verjüngungsbäume betroffen. Die hochmechanisierten Verfahren mit Radharvestern beschädigten und zerstörten durchschnittlich 33% (20-46%) der Verjüngungsbäume, während es bei den kombinierten Verfahren im Mittel 37% (26-46%) waren. Durch den Windwurf und die Aufarbeitung des Sturmholzes wurde 56% der Verjüngung betroffen. Die Schäden konzentrierten sich bei allen Verfahren an den Rückegassen.

Für die motormanuelle Holzernte als dem Standardarbeitsverfahren in vorausverjüngten Beständen wurde ein Prognosemodell entwickelt, das die Fällschäden über die Berechnung der betroffenen Bestandesfläche ermittelt und damit eine Entkopplung von der klassischen Versuchsflächenanlage erreicht. Dazu wurden die Einflussfaktoren aufgeteilt in die Rahmenbedingungen des Hiebes (Eigenschaften des Arbeitsverfahrens, des entnommenen Altbestandes und der Feinerschließung) auf der einen und in Eigenschaften der Verjüngung auf der anderen Seite. Durch diese Vorgehensweise können unterschiedlichste Situationen bezüglich Feinerschließung, Baumartenzusammensetzung, Eingriffstärke etc. in ihren Auswirkungen auf verschiedene Verjüngungen simuliert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in Empfehlungen zur Minimierung der Holzernteschäden an Verjüngung.

Für die waldbauliche Bewertung von Holzernteschäden an Verjüngung wurden verschiedene Bewertungsansätze auf ihre grundsätzliche Eignung hin überprüft. Neben der Veränderung verschiedener Kennziffern der Verjüngung wurde ein Verfahren der Bewertung von Wildschäden, das die räumliche Verteilung unbeschädigter Verjüngungsbäume berücksichtigt, für die Bewertung der Holzernteschäden verwendet. Weiterhin wurde mit dem Waldwachstumssimulator SILVA die unterschiedliche Entwicklung der Verjüngung eines Beispielbestandes mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden verglichen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der Technischen Universität München erstellt. In ihr werden die Ergebnisse verschiedener Projekte zusammengeführt, die in der Zeit von 1999 bis 2003 bearbeitet wurden. In erster Linie ist dies das Teilprojekt „Holzernteschäden an Naturverjüngung“ des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierten Verbundforschungsprojektes ZEUS („Entwicklung eines zukunftsorientierten Entscheidungsunterstützungssystems für die Forstwirtschaft“). Daneben fließen die Ergebnisse der beiden vom Kuratorium der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) geförderten Projekte ST87 („Auswirkungen von Windwurf und anschließender Aufarbeitung auf Fichten-Buchen-Vorausverjüngung“) und ST122 („Schäden an Naturverjüngung durch Holzernte mit Harvestern“) in die vorliegende Arbeit ein. Mein besonderer Dank gebührt somit den Geldgebern.

Herr Prof. Dr. Walter Warkotsch, Inhaber des Lehrstuhls für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, war Leiter dieser drei Projekte und gab wichtige Anregungen, insbesondere zum Aufbau und der Gliederung dieser Arbeit. Sein Interesse an dieser Arbeit hat auch mein Interesse wach gehalten. Dafür bedanke ich mich an dieser Stelle besonders herzlich.

Für seine unschätzbare Hilfe bei der Konzeption und Durchführung dieser Arbeit sowie für unzählige Diskussionen und Hinweise, vor allem in statistischen Belangen, bin ich Dr. Reinhard Pausch zu sehr großem Dank verpflichtet. Sein Wissensdurst und Forschungsdrang hat mich stets motiviert. Herrn Prof. Dr. Hans-Dietrich Quednau, Leiter des Fachgebiets für Biometrie und Angewandte Informatik, sei ebenfalls für seine Hinweise zur Statistik gedankt.

Herrn Prof. Dr. Hans Pretzsch, Inhaber des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde, möchte ich für sein Interesse an der Integration der Funktionen des Schadenermittlungsmodells in den Waldwachstumssimulator SILVA danken. Die fachübergreifende Forschung, die einer der Grundgedanken des Verbundprojektes ZEUS war, wird hier tatsächlich praktiziert. Seinem Mitarbeiter und meinem ZEUS-Kollegen Hans Herling gebührt großer Dank für die Umsetzung dieser Vision. Die Zahlen und Abbildungen in Kapitel 5.4. sind die ersten Ergebnisse seiner Arbeit.

Ebenfalls herzlich danken möchte ich „meinem“ Diplomanden Johannes Wurm, der mit stetig gewachsenem Eifer und erheblichem persönlichen Einsatz zahllose Arbeiten innerhalb des Projektes ST122 erledigt und einige Teile dieses Werkes Korrektur gelesen hat. Die Zusammenarbeit mit mir scheint ihm glücklicherweise nicht die Freude am wissenschaftlichen Arbeiten verdorben zu haben.

Die Programmierung des ersten Teils des Hiebstrukturmodells in der Programmiersprache C wurde von Dr. Alexander Riedel durchgeführt, die des zweiten Teils in der ArcView-Sprache Avenue von Martin Döllerer. Ich bin beiden aufgrund ihres großen (und überwiegend in ihrer Freizeit erfolgten) Engagements zu tiefstem Dank verpflichtet.

Innerhalb des Verbundforschungsprojektes ZEUS war es „unser“ Projektkoordinator Dr. Bernhard Felbermeier, der die oft undankbare Aufgabe hatte, die verschiedenen Interessen der Einzelprojekte zusammenzuführen. Dafür und für seinen enormen Einsatz bei der (überhaupt nicht einfachen) Suche nach Versuchsflächen, die den Ansprüchen aller Teilprojekte genügten, ein großer Dank an ihn.

Die schier unendlichen Datenerhebungen wären nicht möglich gewesen ohne die Heerscharen an fleißigen und hochmotivierten Hilfskräften und ohne ihren „Vorarbeiter“ Ruppert Martin. Seine zum großen Teil eigenständige Organisation und souveräne Durchführung der Außenaufnahmen machten mein Leben beträchtlich

leichter. Die regelmäßigen Einsatzbesprechungen im Betrieb waren das Herzstück dieser Untersuchung. Großen Dank dafür!

Johannes Wurm, Christian Gick, Michael Schott, Ingrid Ducke, Florian Vogel, Birgit Tögel, Christian Webert, Frank Günsche, Matthias Holzmann, Andreas Hahn, Renate van Beek, Kay Ponitz, Martin Nagl, Silke Lautner, Stephanie Ruge, Christoph Schmid, Ludwig Schön und Dominik Schwegler bildeten die mobile und zeitlich sehr flexible Einsatztruppe, der ich hiermit ebenfalls sehr danke. Auch unter extrem unkomfortablen Arbeitsbedingungen verloren sie selten die Nerven und gaben nie auf. Ohne gute studentische Hilfskräfte ist eine Untersuchung wie diese mit derartig umfangreichen Datenerhebungen nicht möglich.

Genauso wenig wie ohne das Geld, mit dem die Hilfskräfte bezahlt werden. Und so möchte ich Dr. habil. Thomas Knoke ebenfalls danken für die großzügige Mittelverlagerung, die den Abschluss der Datenerhebung erst ermöglichte.

Das gesamte Lehrstuhlteam hat in verschiedenen Formen Anteil an dieser Arbeit. Besonders erwähnen möchte ich Michael Miesl, der bei den Außenaufnahmen einsprang, wenn Not am Mann war. Auch Pauline Rettenbeck, Hildegard Naderer und Elli Kleidorfer waren eine große Hilfe, indem sie mir den „Verwaltungskram“ mindestens so weit vom Hals hielten, dass er zu ertragen war. Allen Lehrstuhlmitarbeitern danke ich hiermit herzlich.

Allen Mitarbeitern der beteiligten Forstämter, Forstdirektionen und Maschinenbetriebe der Bayerischen Staatsforstverwaltung danke ich sehr für ihre (im Allgemeinen) große Kooperationsbereitschaft. Selbst in Augenblicken von ungeheurem Vandalismus („Bitte diesen Baum VOLL in die Verjüngung reinfällen“) blieben sie höflich und verständnisvoll. Gleiches gilt für Herrn Christoph Dimke, den Leiter des Universitätswaldes in Landshut. Dank auch an alle beteiligten Forstunternehmer, denen die Untersuchungen im Regelfall keine Steigerung ihrer Tagesleistungen bescherten.

An letzter Stelle (und dass, obwohl sie eigentlich an die erste Stelle gehört) danke ich meiner Pia für ihre unendliche Geduld mit den Tücken der Zeitplanung und ihr Verständnis gegenüber meinen gegen Ende dieser Untersuchung immer rascher wechselnden Stimmungen und Launen.

Ich hoffe sehr, dass die Ergebnisse dieser Arbeit dem Interesse, das den verschiedenen Untersuchungen von vielen Seiten entgegengebracht worden ist, gerecht werden.

Freising, Oktober 2004

Sven Korten

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	<i>Ausgangssituation</i>	1
1.2	<i>Stand des Wissens</i>	2
1.3	<i>Datenmaterial und Ziele der Untersuchung</i>	6
2	Methodik der Datenerhebungen	9
2.1	<i>Lage der Versuchsbestände</i>	9
2.2	<i>Auswahl und Aufbau der Versuchsflächen</i>	10
2.2.1	Versuchsflächen der Projekte ZEUS und ST87	10
2.2.2	Versuchsflächen des Projektes ST122	10
2.2.3	Einzelbäume	11
2.3	<i>Aufnahme der Verjüngung</i>	12
2.3.1	Probekreissystem	12
2.3.2	Aufnahme vor dem Hieb	12
2.3.2.1	Vorgehensweise	12
2.3.2.2	Aufgenommene Daten	12
2.3.2.3	Vorschäden	13
2.3.3	Aufnahme nach dem Hieb	13
2.3.3.1	Vorgehensweise	13
2.3.3.2	Aufgenommene Daten	13
2.3.3.3	Schäden	13
2.4	<i>Aufnahme des entnommenen Altbestandes</i>	15
2.4.1	Versuchsflächen des Projektes ZEUS	15
2.4.2	Versuchsfläche des Projektes ST87	15
2.4.3	Versuchsflächen des Projektes ST122	16
2.4.4	Einzelbäume	16
2.5	<i>Aufnahme der Feinerschließung</i>	16
3	Ergebnisse der Datenerhebungen	17
3.1	<i>Versuchsflächen</i>	17
3.1.1	Motormanuelle Holzernteverfahren	17

3.1.1.1	Arbeitsverfahren und Holzerntemaßnahmen	17
3.1.1.2	Die Verjüngung vor dem Hieb	18
3.1.1.3	Auswirkungen des Hiebes auf die Verjüngung	20
3.1.2	Hochmechanisierte Holzernteverfahren	24
3.1.2.1	Arbeitsverfahren und Holzerntemaßnahmen	24
3.1.2.2	Die Verjüngung vor dem Hieb	26
3.1.2.3	Auswirkungen des Hiebes auf die Verjüngung	29
3.1.3	Kombinierte Holzernteverfahren	33
3.1.3.1	Arbeitsverfahren und Holzerntemaßnahmen	33
3.1.3.2	Die Verjüngung vor dem Hieb	35
3.1.3.3	Auswirkungen des Hiebes auf die Verjüngung	38
3.1.4	Hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung	42
3.1.4.1	Arbeitsverfahren und Daten zum Windwurf	42
3.1.4.2	Die Verjüngung vor dem Windwurf	43
3.1.4.3	Auswirkungen von Windwurf und Aufarbeitung auf die Verjüngung	44
3.1.5	Vergleich der Ergebnisse	47
3.1.5.1	Vergleich der Arbeitsverfahren	47
3.1.5.2	Vergleich der Verfahrensgruppen	48
3.2	<i>Einzelbäume</i>	51
3.2.1	Rahmenbedingungen für die Auswertungen	51
3.2.2	Merkmale der gefällten Bäume und Verjüngungsschäden	53
3.2.2.1	Baumart	53
3.2.2.2	BHD	54
3.2.2.3	Stamm- und Kronenbereich	55
3.2.2.4	Lage im Kronenbereich	56
3.2.2.4.1	<i>Entfernung vom Stamm</i>	56
3.2.2.4.2	<i>Entfernung vom Kronenansatz</i>	57
3.2.2.5	Belaubung der gefällten Buchen	58
3.2.3	Merkmale der Verjüngung und Verjüngungsschäden	59
3.2.3.1	Baumart	59
3.2.3.2	Höhe	60
3.2.3.3	Belaubung der Buchenverjüngung	61

4	Prognosemodell	62
4.1	Vorgehensweise	62
4.2	Hiebsstrukturmodell (HSM)	63
4.2.1	Funktionsweise des Hiebsstrukturmodells	63
4.2.1.1	Die virtuelle Versuchsfläche	63
4.2.1.2	Eingangsdaten	63
4.2.1.2.1	<i>Daten zur Feinerschließung</i>	63
4.2.1.2.2	<i>Daten zum ausscheidenden Bestand</i>	64
4.2.1.2.3	<i>Daten zum Arbeitsverfahren</i>	64
4.2.1.2.4	<i>Anzahl der Simulationsläufe</i>	65
4.2.1.3	Ablauf des Programms	65
4.2.1.3.1	<i>Berechnung der Einheitsbäume</i>	65
4.2.1.3.2	<i>Verteilung der Bäume des Hiebes</i>	66
4.2.1.3.3	<i>Berechnung der Fällwinkel</i>	66
4.2.1.3.4	<i>Berechnung der Koordinaten der liegenden Bäume</i>	66
4.2.1.3.5	<i>Berechnung der Ergebnisvariablen</i>	66
4.2.1.4	Ergebnisvariablen	67
4.2.1.4.1	<i>betroffene Bestandesfläche</i>	67
4.2.1.4.2	<i>räumliche Verteilung der Schäden im Bestand</i>	68
4.2.1.4.3	<i>räumliche Verteilung der entnommenen Bäume</i>	69
4.2.2	Anzahl benötigter Durchläufe	70
4.2.3	Änderung der Eingangsvariablen	71
4.2.3.1	Rückegassenabstand	71
4.2.3.2	Rückegassenbreite	73
4.2.3.3	Eingriffsstärke	74
4.2.3.4	Einzelbaumdimensionen	75
4.2.3.5	Baumartenzusammensetzung (Mischbestände)	75
4.2.3.5.1	<i>Fichten-Buchen-Bestand</i>	75
4.2.3.5.2	<i>Eichen-Buchen-Bestand</i>	76
4.2.3.6	Mindestabstand der Bäume	77
4.2.3.7	Fällwinkel	78
4.2.3.7.1	<i>maximale Fällwinkelabweichung</i>	78
4.2.3.7.2	<i>maximaler Fällwinkel</i>	79

4.2.3.7.3	<i>semi-fixer Fällwinkel Variante A: zur Rückegasse hin</i>	79
4.2.3.7.4	<i>semi-fixer Fällwinkel Variante B: von Rückegasse weg</i>	80
4.2.3.7.5	<i>fixer Fällwinkel</i>	80
4.2.4	Test des Hiebsstrukturmodells	81
4.2.4.1	Schongau	82
4.2.4.2	Biburg	83
4.2.4.3	Krumbach	83
4.3	Schadensermittlungsmodell (SEM)	84
4.3.1	Funktionsweise des Schadensermittlungsmodells	84
4.3.2	Berechnung der Funktionen	84
4.3.2.1	Schadenswahrscheinlichkeiten	86
4.3.2.2	Schadprozente	92
4.3.3	Test des Schadensermittlungsmodells	96
4.3.3.1	Test an Versuchsflächen	97
4.3.3.1.1	Schongau	97
4.3.3.1.2	Biburg	98
4.3.3.2	Test an Probekreisen	99
4.4	Test des Prognosemodells	100
4.4.1	Fichten-Buchen-Flächen	101
4.4.2	Eichen-Buchen-Flächen	103
4.5	weitere Anwendungen des Prognosemodells	106
4.5.1	Hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung	106
4.5.2	Hochmechanisierte Holzernteverfahren	108
4.5.3	Kombinierte Holzernteverfahren	111
5	Bewertung von Holzernteschäden an der Verjüngung	114
5.1	Kennziffern der Verjüngung	115
5.1.1	Durchschnittliche Abnahme der Stammzahl der Verjüngung	115
5.1.2	Durchschnittliche Veränderung der mittleren Verjüngungshöhe	116

5.1.3	Durchschnittliche Abnahme der maximalen Verjüngungshöhe	118
5.1.4	Veränderung der Baumartenanteile.....	119
5.1.5	Veränderung des Varianz-Mittelwert-Index.....	120
5.2	Verjüngungsfreie Bestandesfläche	122
5.3	Verfahren zur Bewertung von Wildschäden.....	125
5.3.1	Wild- und Holzernteschäden	125
5.3.2	Bestehende Verfahren der Wildschadensbewertung	126
5.3.3	Das Verfahren der FVA Baden-Württemberg.....	127
5.3.4	Anwendung des Verfahrens auf die Versuchsflächen.....	129
5.4	Simulation der Verjüngungsentwicklung mit SILVA	132
6	Diskussion	136
6.1	Diskussion der Aufnahmemethodik.....	136
6.2	Diskussion der Ergebnisse	137
6.2.1	zu Aufbau und Struktur der Verjüngung	137
6.2.2	zum entnommenen Altbestand	140
6.2.3	zu den untersuchten Holzernteverfahren	142
6.3	Diskussion des Prognosemodells	143
6.3.1	zur Vorgehensweise	143
6.3.2	zum Hiebsstrukturmodell.....	144
6.3.3	zum Schadensermittlungsmodell	145
6.3.4	zur Anwendung des Prognosemodells.....	146
6.3.5	zum „Rückefaktor“	147
6.4	Diskussion der Bewertungsansätze.....	148
6.4.1	zu den Kennziffern der Verjüngung	148
6.4.2	zur verjüngungsfreien Bestandesfläche.....	149
6.4.3	zum Verfahren der FVA Baden-Württemberg	150
6.4.4	zum Waldwachstumssimulator SILVA	151
6.5	Folgerungen für die forstliche Praxis	152

6.6 Forschungsbedarf	153
7 Zusammenfassung	155
8 Literaturverzeichnis	158
9 Anhang	166
9.1 Lage der Versuchsflächen	166
9.2 Technische Daten der eingesetzten Harvester	167
9.3 Schadenswahrscheinlichkeiten	168
9.3.1 Schadenswahrscheinlichkeit "fehlend".....	168
9.3.2 Schadenswahrscheinlichkeit "beschädigt".....	168
9.3.3 Schadenswahrscheinlichkeit "Bruch".....	169
9.3.4 Schadenswahrscheinlichkeit "Rindenschaden".....	169
9.3.5 Schadenswahrscheinlichkeit "Lageveränderung".....	170
9.3.6 Schadenswahrscheinlichkeit "Mehrfachschaden".....	170
9.4 Schadprozent	171
9.4.1 Fichte.....	171
9.4.1.1 Schadprozent "fehlend".....	171
9.4.1.2 Schadprozent "beschädigt".....	171
9.4.1.3 Schadprozent "Bruch".....	172
9.4.1.4 Schadprozent "Rindenschaden".....	172
9.4.1.5 Schadprozent "Lageveränderung".....	172
9.4.1.6 Schadprozent "Mehrfachschaden".....	173
9.4.2 Buche.....	173
9.4.2.1 Schadprozent "fehlend".....	173
9.4.2.2 Schadprozent "beschädigt".....	174
9.4.2.3 Schadprozent "Bruch".....	174
9.4.2.4 Schadprozent "Rindenschaden".....	174
9.4.2.5 Schadprozent "Lageveränderung".....	175
9.4.2.6 Schadprozent "Mehrfachschaden".....	175
9.5 Untergruppen (Konsistenz des Modells)	176
9.5.1 Schadenswahrscheinlichkeit "fehlend".....	176
9.5.2 Schadenswahrscheinlichkeit "beschädigt".....	177

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufbau der Arbeit	7
Abbildung 2:	Lage der Versuchsflächen in Bayern	9
Abbildung 3 a-e:	Lage gefälltter ausgewählter Einzelbäume und die Lage der zugehörigen zwölf Probekreise	11
Abbildung 4 a-d:	Stammzahlverteilung je Höhenstufe; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS	18
Abbildung 5 a-d:	Anteile der Baumarten an der Verjüngung je Höhenstufe; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS	19
Abbildung 6 a-d:	Maximale Höhe der Verjüngung vor den Hieben; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS	19
Abbildung 7 a-d:	Dichte der Verjüngung vor den Hieben; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS	20
Abbildung 8 a+b:	Anteile unbeschädigter, beschädigter und fehlender Verjüngung (a) und Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen (b); motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS	21
Abbildung 9 a+b:	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS	22
Abbildung 10 a-d:	Räumliche Verteilung der Schäden im Bestand; betroffene Verjüngung, motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS	23
Abbildung 11 a+b:	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Entfernung von der Rückegasse nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS	23
Abbildung 12 a+b:	Rückegassen, Kranzonen und entnommene Bäume; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb	24
Abbildung 13 a+b:	Rückegassen, Kranzonen und entnommene Bäume; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Heigenbrücken	26

Abbildung 14 a-d:	Stammzahlverteilung je Höhenstufe; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken	27
Abbildung 15 a-d:	Anteile der Baumarten an der Verjüngung je Höhenstufe; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken	27
Abbildung 16 a-d:	Maximale Höhe der Verjüngung vor den Hieben; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken	28
Abbildung 17 a-d:	Dichte der Verjüngung vor den Hieben; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken	28
Abbildung 18 a+b:	Anteile unbeschädigter, beschädigter und fehlender Verjüngung (a) und Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen (b); hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken	30
Abbildung 19 a+b:	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken	30
Abbildung 20 a-d:	Räumliche Verteilung der Schäden im Bestand; betroffene Verjüngung, hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken	31
Abbildung 21 a+b:	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Entfernung von der Rückegasse nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken	32
Abbildung 22 a+b:	Rückegassen, Kranzonen und entnommene Bäume; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut	34
Abbildung 23 a+b:	Rückegassen, Kranzonen und entnommene Bäume; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Heigenbrücken	35
Abbildung 24 a-d:	Stammzahlverteilung je Höhenstufe; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken	36

Abbildung 25 a-d:	Anteile der Baumarten an der Verjüngung je Höhenstufe; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken	37
Abbildung 26 a-d:	Maximale Höhe der Verjüngung vor den Hieben; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken	37
Abbildung 27 a-d:	Dichte der Verjüngung vor den Hieben; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken	38
Abbildung 28 a+b:	Anteile unbeschädigter, beschädigter und fehlender Verjüngung (a) und Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen (b); kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken	39
Abbildung 29 a+b:	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; kombinierte Holzernte; Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken	40
Abbildung 30 a-d:	Räumliche Verteilung der Schäden im Bestand; betroffene Verjüngung, kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken	40
Abbildung 31 a+b:	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Entfernung von der Rückegasse nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken	41
Abbildung 32 a+b:	Stammzahlverteilung je Höhenstufe (a) und Anteile der Baumarten an der Verjüngung je Höhenstufe (b); hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach	43
Abbildung 33 a+b:	Maximale Höhe (a) und Dichte (b) der Verjüngung vor dem Windwurf; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach	44
Abbildung 34:	Anteile der Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach	45

Abbildung 35 a+b:	Wahrscheinlichkeit, mit der eine Fichte (a) bzw. Buche (b) in der Verjüngung in Abhängigkeit von ihrer Höhe nach dem Hieb beschädigt, fehlend bzw. betroffen war; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach	45
Abbildung 36 a+b:	Räumliche Verteilung der Schäden im Bestand; betroffene Verjüngung, hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach	46
Abbildung 37:	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Entfernung von der Rückegasse nach dem Hieb beschädigt, fehlend bzw. betroffen war; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach	46
Abbildung 38 a+b:	Anteile unbeschädigter, beschädigter und fehlender Verjüngung (a) und Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen (b) je Arbeitsverfahren	47
Abbildung 39 a+b:	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe (a) oder seiner Entfernung von der Rückegasse (b) nach dem Hieb betroffen war; getrennt nach Arbeitsverfahren	48
Abbildung 40 a+b:	Anteile unbeschädigter, beschädigter und fehlender Verjüngung (a) und Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen (b) je Verfahrensgruppe	49
Abbildung 41 a+b:	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; getrennt nach Verfahrensgruppen	49
Abbildung 42 a+b:	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Entfernung von der Rückegasse nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; getrennt nach Verfahrensgruppen	50
Abbildung 43 a+b:	(a) Anzahl betroffener Probekreise nach Baumart und Stamm- und Kronenbereichen (b) Verteilung der Anteile betroffener Probekreisfläche (nur betroffene Probekreise)	51
Abbildung 44 a+b:	(a) Anteil der Baumarten an der Verjüngung nach der Höhe (ungewichtet) (b) Stammzahlverteilung der Verjüngung nach der Höhe (ungewichtet)	52

Abbildung 45 a+b:	Boxplots der Ergebnisvariablen Anteil fehlender, beschädigter und betroffener Verjüngung (a) sowie Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Baumart des gefälltten Altbestandsbaums	53
Abbildung 46 a+b:	Boxplots der Ergebnisvariablen Anteil fehlender, beschädigter und betroffener Verjüngung (a) sowie Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig vom BHD des gefälltten Altbestandsbaums	54
Abbildung 47 a+b:	Boxplots der Ergebnisvariablen Anteil fehlender, beschädigter und betroffener Verjüngung (a) sowie Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig vom Bereich (Stamm/Krone) des gefälltten Altbestandsbaums	55
Abbildung 48 a+b:	Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Verjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Entfernung vom Stamm im Kronenbereich	56
Abbildung 49 a+b:	Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Verjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Entfernung vom Kronenansatz im Kronenbereich	57
Abbildung 50 a+b:	Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Verjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Belaubung der gefälltten Buchen	58
Abbildung 51 a+b:	Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Verjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Baumart der Verjüngung	59
Abbildung 52 a+b:	Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Verjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Höhe der Verjüngung	60
Abbildung 53 a+b:	Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Buchenverjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Buchenverjüngung (b) abhängig von der Belaubung der Buchenverjüngung	61
Abbildung 54:	Zusammenspiel der Komponenten des Prognosemodells	62

Abbildung 55:	Flächen der liegenden Bäume nach Baumart, BHD und Stamm-/Kronenbereich	65
Abbildung 56:	Visualisiertes Ergebnis eines Simulationslaufs des ArcView-Programms	67
Abbildung 57 a+b:	betroffene Bestandesfläche als Summe (a) und als Projektion der Einzelbaumflächen (b)	67
Abbildung 58:	Ergebnis-Grid für die Simulation der Versuchsfläche im FoA Illertissen	68
Abbildung 59 a+b:	Die aus dem Ergebnis-Grid ermittelte Schadenswahrscheinlichkeiten (a) sowie die errechnete logistische Ausgleichsfunktion (b) für die Versuchsfläche im FoA Illertissen	69
Abbildung 60 a-c:	Fehlerbalken der Ergebnisvariable „betroffene Bestandesfläche“ in Abhängigkeit von der Anzahl der Durchläufe (a, b) und der zugehörige Standardfehler (c)	70
Abbildung 61 a-c:	Fehlerbalken der Ergebnisvariable „Aggregationsindex R korrigiert“ in Abhängigkeit von der Anzahl der Durchläufe (a, b) und der zugehörige Standardfehler (c)	71
Abbildung 62 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche (a) und der Anteil betroffener an der gesamten Bestandesfläche (b) in Abhängigkeit vom Rückegassenabstand	72
Abbildung 63 a+b:	Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Rückegassenabstand und der absoluten (a) sowie der relativen (b) Entfernung von der Rückegasse	72
Abbildung 64 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche (a) und der Anteil betroffener an der gesamten Bestandesfläche (b) in Abhängigkeit von der Rückegassenbreite	73
Abbildung 65 a+b:	Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Rückegassenbreite und der absoluten (a) sowie der relativen (b) Entfernung von der Rückegasse	73
Abbildung 66 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Eingriffsstärke (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Eingriffsstärke und der Entfernung von der Rückegasse (b)	74
Abbildung 67:	Aggregationsindex R nach CLARK und EVANS mit der Randkorrektur nach DONNELLY in Abhängigkeit von der Anzahl entnommener Bäume	74

Abbildung 68 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom BHD (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom BHD und der Entfernung von der Rückegasse (b)	75
Abbildung 69 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Buchenanteil (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Buchenanteil und der Entfernung von der Rückegasse (b)	76
Abbildung 70 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Eichenanteil (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Eichenanteil und der Entfernung von der Rückegasse (b)	76
Abbildung 71 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Mindestabstand (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Mindestabstand und der Entfernung von der Rückegasse (b)	77
Abbildung 72:	Aggregationsindex R nach CLARK und EVANS mit der Randkorrektur nach DONNELLY in Abhängigkeit vom Mindestabstand	77
Abbildung 73 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Fällwinkelabweichung (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Fällwinkelabweichung und der Entfernung von der Rückegasse (b)	78
Abbildung 74 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom maximalen Fällwinkel (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom maximalen Fällwinkel und der Entfernung von der Rückegasse (b) ...	79
Abbildung 75 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom semi-fixen Fällwinkel Variante A (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom semi-fixen Fällwinkel Variante A und der Entfernung von der Rückegasse (b)	80
Abbildung 76 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom semi-fixen Fällwinkel Variante B (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom semi-fixen Fällwinkel Variante B und der Entfernung von der Rückegasse (b)	80
Abbildung 77 a+b:	Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom fixen Fällwinkel (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom fixen Fällwinkel und der Entfernung von der Rückegasse (b)	81

Abbildung 78 a-d:	Schadenswahrscheinlichkeiten für Fichten in der Verjüngung nach Schadensursachen	90
Abbildung 79 a-d:	Schadenswahrscheinlichkeiten für Buchen in der Verjüngung nach Schadensursachen	91
Abbildung 80 a-d:	Schadprozent Fichtenverjüngung nach Schadensursachen	95
Abbildung 81 a-d:	Schadprozent Buchenverjüngung nach Schadensursachen	96
Abbildung 82 a+b:	Vergleich von Realität und Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand, Versuchsflächen Schongau (a) und Illertissen (b)	103
Abbildung 83 a+b:	Vergleich von Realität und Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand, Versuchsflächen Biburg (a) und Schwabmünchen (b)	105
Abbildung 84:	Vergleich von Realität und Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand, Versuchsfläche hochmechanisierte Windwurfauflösung	108
Abbildung 85 a-d:	Vergleich von Realität und Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand, Versuchsflächen hochmechanisierte Holzernteverfahren	110
Abbildung 86 a-d:	Vergleich von Realität und Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand, Versuchsflächen kombinierte Holzernteverfahren	113
Abbildung 87:	Räumliche Verteilung der Abnahme der Stammzahl pro Hektar um die betroffene Verjüngung; Versuchsfläche Biburg, motormanuelle Holzernte	116
Abbildung 88:	Räumliche Verteilung der Veränderung der mittleren Höhe je Probekreis; Versuchsfläche Biburg, motormanuelle Holzernte	117
Abbildung 89:	Räumliche Verteilung der Abnahme der maximalen Höhe je Probekreis; Versuchsfläche Biburg, motormanuelle Holzernte	119
Abbildung 90:	Verjüngungsfreie Bereiche vor und nach dem Hieb; Versuchsfläche Biburg, motormanuelle Holzernte	122
Abbildung 91 a+b:	Zusammenhang zwischen dem Gesamtschadprozent (a) bzw. der Schadklasse (b) und der Eingriffsstärke auf den Versuchsflächen	131

Abbildung 92:	Beispielbestand für die Simulation der Verjüngungsentwicklung mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden an der Verjüngung mit SILVA	132
Abbildung 93 a-l:	Entwicklung des Beispielbestandes ohne (a-f) und mit (g-l) Berücksichtigung der Holzernteschäden an der Verjüngung, Perioden 4, 6, 8, 10, 11, 12	133
Abbildung 94:	Vergleich der Stammzahl/ha für den Beispielbestand mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden an der Verjüngung	134
Abbildung 95:	Vergleich der mittleren Verjüngungshöhe für den Beispielbestand mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden an der Verjüngung	134
Abbildung 96:	Vergleich der maximalen Verjüngungshöhe für den Beispielbestand mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden an der Verjüngung	135
Abbildung 97 a-k:	Auszüge aus den Forstbetriebskarten mit der Lage der Versuchsflächen	166
Abbildung 98 a-d:	Eingesetzte Harvester	167

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kenndaten zum ausscheidenden Altbestand; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS, je ha	17
Tabelle 2:	Kenndaten zur Verjüngung; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS	18
Tabelle 3:	Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; motormanuelle Holzernte, FI/BU-Versuchsflächen ZEUS	20
Tabelle 4:	Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; motormanuelle Holzernte, EI/BU-Versuchsflächen ZEUS	21
Tabelle 5:	Daten zum entnommenen Bestand; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb, je 0,25ha	24
Tabelle 6:	Daten zum entnommenen Bestand; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Heigenbrücken, je 0,25ha	25
Tabelle 7:	Kenndaten zur Verjüngung; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken	26
Tabelle 8:	Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb	29
Tabelle 9:	Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Heigenbrücken	29
Tabelle 10:	Daten zum entnommenen Bestand; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut, je 0,25ha	33
Tabelle 11:	Daten zum entnommenen Bestand; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Heigenbrücken, je 0,25ha	35
Tabelle 12:	Kenndaten zur Verjüngung; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken	36
Tabelle 13:	Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut	38
Tabelle 14:	Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Heigenbrücken	39

Tabelle 15:	Kenndaten zum geworfenen Altbestand; hochmechanisierte Windwurfauflaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach, 1ha	42
Tabelle 16:	Kenndaten zur Verjüngung; hochmechanisierte Windwurfauflaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach	43
Tabelle 17:	Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; hochmechanisierte Windwurfauflaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach	44
Tabelle 18:	Rückegassenabstände und die zugehörige Anzahl an Rückegassen	64
Tabelle 19:	Eingangsdaten zum Testen des Hiebsstrukturmodells	81
Tabelle 20:	Vergleich von Realität und Prognose für die Versuchsfläche Schongau	82
Tabelle 21:	Vergleich von Realität und Prognose für die Versuchsfläche Biburg	83
Tabelle 22:	Vergleich von Realität und Prognose für die Versuchsfläche Krumbach	84
Tabelle 23:	Berücksichtigte Variablen und Wechselwirkungen bei den binär logistischen Regressionen zur Ermittlung der Schadenswahrscheinlichkeiten	86
Tabelle 24:	Berücksichtigte Variablen und Wechselwirkungen bei den Logit-Transformationen zur Ermittlung der Schadprozente	92
Tabelle 25:	Vergleich der vom Schadensermittlungsmodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsfläche Biburg; nur Buchenverjüngung	97
Tabelle 26:	Vergleich der vom Schadensermittlungsmodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsfläche Biburg; nur Buchenverjüngung	98
Tabelle 27:	Vergleich der vom Schadensermittlungsmodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten; 74 Probekreise, 708 Verjüngungsbäume	99
Tabelle 28:	Vergleich der vom Schadensermittlungsmodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten; 15 Probekreise, 161 Verjüngungsbäume	99

Tabelle 29:	Eingangsdaten in das Prognosemodell, Versuchsflächen motormanuelle Holzernteverfahren	100
Tabelle 30:	Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsfläche Schongau ...	101
Tabelle 31:	Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsfläche Illertissen	102
Tabelle 32:	Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsflächen Biburg und Schwabmünchen; nur Buchen-Verjüngung	104
Tabelle 33:	Eingangsdaten in das Prognosemodell, Versuchsfläche hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung	106
Tabelle 34:	Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsfläche hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung	107
Tabelle 35:	Eingangsdaten in das Prognosemodell, Versuchsflächen hochmechanisierte Holzernteverfahren	109
Tabelle 36:	Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsflächen hochmechanisierte Holzernteverfahren	109
Tabelle 37:	Eingangsdaten in das Prognosemodell, Versuchsflächen kombinierte Holzernteverfahren	111
Tabelle 38:	Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsflächen kombinierte Holzernteverfahren	112
Tabelle 39:	Stammzahlen vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Abnahme, jeweils im Durchschnitt der vorher verjüngten Probekreise	115
Tabelle 40:	Mittlere Höhe vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Veränderung, jeweils im Durchschnitt der vorher verjüngten Probekreise	117
Tabelle 41:	Maximale Höhe vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Abnahme, jeweils im Durchschnitt der vorher verjüngten Probekreise	118

Tabelle 42:	Anteile der Baumart Fichte an der Verjüngung vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Veränderung	119
Tabelle 43:	Anteile der Baumart Buche an der Verjüngung vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Veränderung	120
Tabelle 44:	Varianz-Mittelwert-Indices vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Veränderung	121
Tabelle 45:	Anteile verjüngungsfreier Bestandesfläche vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Zunahme	123
Tabelle 46:	Mittlere Flächengrößen der verjüngungsfreien Bereiche vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Zunahme	123
Tabelle 47:	Mindestpflanzenzahlen und Soll-Werte für verschiedene Baumarten (nach BURGHARDT et al. 2003)	127
Tabelle 48:	Angepasste Mindestpflanzenzahlen und Soll-Werte für verschiedene Baumarten	129
Tabelle 49:	Schadklasse nach dem modifizierten Verfahren der FVA Baden-Württemberg	130
Tabelle 50:	Vergleich von Gesamtschadklasse und Gesamtschadprozent	130
Tabelle 51:	Vergleich von Kennziffern der Verjüngung mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden, Simulation mit SILVA, Periode 12	132
Tabelle 52:	Technische Daten der eingesetzten Harvester	167

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

In den letzten 25 Jahren vollzog sich in der deutschen Forstwirtschaft ein spürbarer Wandel vom Prinzip des Altersklassenwaldes hin zu so genannten „naturnahen“ und „naturgemäßen“ Formen der Waldbewirtschaftung. Die Kernelemente dieser beiden Konzepte wurden von PAUSCH und RÖDER (1997) bzw. PAUSCH (2002) unter Anwendung der formalen Begriffsanalyse wie folgt identifiziert:

- Verzicht auf Kahlschlag, keine Räumung
- Bevorzugung von Naturverjüngung
- langfristige Verjüngungsverfahren
- frühe bzw. mehrfache Eingriffe
- biologische Automation (Nutzung natürlicher Abläufe)

Zudem fordert „naturgemäße“ Waldbewirtschaftung einzelstammweise Nutzung und eine starke vertikale Differenzierung der Bestände (stufiger Waldaufbau, Dauerwaldstrukturen). Bei „naturnaher“ Forstwirtschaft können neben einzelstammweisen auch kleinräumige Nutzungen durchgeführt werden.

Das Ausmaß und die Auswirkungen dieser strukturellen Veränderungen für den bayerischen Staatswald dokumentieren ROTHE und BORCHERT (2003). So befindet sich heute über ein Drittel der gesamten Waldfläche der bayerischen Staatsforstverwaltung in Verjüngung. Dabei sind ein Viertel der Waldfläche Verjüngungsnutzungen und weitere 10% „Langfristige Behandlungen“ („Wälder, in denen eine Dauerbestockung mit allen Altersstadien auf engem Raum angestrebt wird, wie z.B. Plenterwälder“). Der durchschnittliche, geplante Verjüngungszeitraum stieg dabei auf rund 40 Jahre. Durch die Umstellung der Verjüngungsverfahren in Verbindung mit der Anpassung der Schalenwildbestände werden mittlerweile zwei Drittel der Waldfläche natürlich verjüngt. Gleichzeitig wuchs auch die Fläche der Verjüngung, die im Schutz der Altbäume nachwächst, um 90.000 ha an. Auf rund 45% der Waldfläche sind heute bereits Verjüngungspflanzen zu finden. ROTHE und BORCHERT betonen weiterhin die Bedeutung der Naturverjüngung für die biologische Automation. Der hohe Anteil an Naturverjüngung bedeutet eine gewaltige Kosteneinsparung, da auf teure Pflanzung verzichtet werden kann.

Das frühere zeitliche Nacheinander des Altersklassenwaldes wird also zunehmend durch ein räumliches Nebeneinander verschiedener Entwicklungsstadien der Bäume ersetzt. Anders betrachtet überschneiden sich die Nutzung des Altbestandes und seine Verjüngung zeitlich und räumlich über einen immer länger werdenden Zeitraum. Durch die langen Verjüngungszeiträume und eher einzelstammweise Nutzung kommt es zu regelmäßigen geringen Entnahmen von Altbestandsbäumen in Beständen mit etablierter Vorausverjüngung. Im Zuge dieser Eingriffe entstehen zwangsläufig Schäden an der vorhandenen Verjüngung. Da diese aber den Folgebestand bilden soll, sind Schäden an der Verjüngung zunächst einmal negativ zu beurteilen. Während für die bisher zumeist untersuchten Schäden am verbleibenden Altbestand vor allem Rückevorgänge des geernteten Holzes verantwortlich sind („Rückeschäden“, MENG 1978), kommt bezüglich der Verjüngung bei motormanueller Holzernte den durch die Fällung der entnommenen Bäume verursachten Schäden („Fällschäden“) erhebliche Bedeutung zu (KORTEN 1999, VON SCHMIDT 2003).

BØRSET schließlich stellte bereits 1976 bezüglich des gesunkenen Anteils natürlicher Verjüngung in den Wäldern Skandinaviens fest: „Das Problem ist also nicht biologischer, sondern rein betriebstechnischer Art, nämlich die großen Bäume zu entfernen, ohne die Vorausverjüngung zu vernichten.“ Auch fast dreißig Jahre später ist dieses Problem kaum gelöst. Es wird sogar durch die erwähnten Änderungen der waldbaulichen Rahmenbedingungen weiter verschärft.

1.2 *Stand des Wissens*

Die Anzahl an Veröffentlichungen zu Holzernteschäden an Verjüngung ist, gemessen an der Fülle von Publikationen zu Holzernteschäden am verbleibenden Altbestand, weltweit eher gering. Die existierenden Untersuchungen lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

1. Einzelfalluntersuchung: Ein konkretes Arbeitsverfahren wurde in einem typischen Einsatz hinsichtlich der Auswirkungen auf die Verjüngung untersucht.
2. Verfahrensvergleiche: Mehrere verschiedene Arbeitsverfahren wurden miteinander verglichen, um das für die Verjüngung pfleglichste Verfahren zu ermitteln und um somit der forstlichen Praxis Empfehlungen zu geben.
3. Verjüngungsentwicklung: Die Entwicklung der Verjüngung nach Räumungshieben wurde beobachtet. Dabei wurden sowohl Reaktionen der Verjüngung auf das veränderte Umfeld als auch auf Holzernteschäden ermittelt.

Die **Einzelfalluntersuchungen** zum Thema Holzernteschäden an Verjüngung sind gut nach den verwendeten Arbeitsverfahren unterteilbar.

In Deutschland untersuchten PREUHSLER und JACOBI (1996) und KORTEN (1999) bzw. KORTEN und PAUSCH (2000) die Auswirkungen von **motormanueller Fällung und Schlepperrückung** in Fichten-Tannen-Buchen-Beständen, VON SCHMIDT (2003) in reinen Buchenbeständen. Bei der ersten Untersuchung wurden zwischen 5% und 8% der überwiegend aus Bergahorn und Tanne zusammengesetzten Verjüngung vernichtet, während bei der zweiten Studie knapp 9% der Fichten-Tannen-Buchen-Verjüngung vernichtet und gut 4% beschädigt wurden. In den reinen Buchenbeständen wurden bei Großschirmschlägen und Einzelbaumentnahmen zwischen 5% und 32% der Buchenvorausverjüngung vernichtet und weitere 10% bis 20% der noch vorhandenen Verjüngung beschädigt. In Schweden fanden ANDERSSON und FRIES (1979), dass durch motormanuelle Holzernte und Schlepperrückung in Kieferbeständen 13% der Verjüngungskiefern beschädigt und weitere 4% vernichtet wurden. In gemischten nordamerikanischen Nadelholzbeständen stellten GOTTFRIED (1987) und GORDON (1973) holzerntebedingte Stammzahlreduktionen von 14% bzw. 18% fest. SAVENEH und DIGNAN (1997) schließlich beobachteten einen motormanuellen Räumungshieb mit anschließender Rückung durch Seilschlepper in einem Eukalyptus-Bestand im süd-östlichen Australien und fanden große Schäden an der Verjüngung vor. Zwischen 30% und 72% der Verjüngung in den nach dem Hieb noch bestockten Probekreisen wurde zerstört oder beschädigt.

MEEK und PLAMONDON (1996) untersuchten die Schäden an Verjüngung durch **hochmechanisierte Holzernte mit dem Harvester-Forwarder-System** in Kanada und ermittelten Stammzahlreduktionen zwischen 27% und 44% bei der beobachteten Tannenverjüngung. VOROB et al. (1994) stellten bei Einsätzen von Harvestern und Forwardern in russischen Birkenwäldern zwischen 40% und 45% vernichteter und zwischen 11% und 12% beschädigter Nadelholz-Verjüngung fest. HAGSTRÖM (1994) notierte bei einer hochmechanisierten Auslesedurchforstung in Schweden allein durch den Harvester verursachte Schäden in Höhe von 2% bis 16%, ohne allerdings Schäden auf den Rückegassen zu berücksichtigen. Die Auswirkungen von hochmechanisierter Holzernte mit Radharvestern wurden auch von KORTEN (2003) und WURM (2004) bzw. KORTEN et al. (2004) untersucht. Einige Ergebnisse der Studie sind Teil dieser Arbeit, ebenso wie die von KORTEN (2001, 2002) untersuchten Auswirkungen von Windwurf und anschließender hochmechanisierter Aufarbeitung des Sturmholzes auf Fichten-Buchen-Verjüngung.

Die durch **hochmechanisierte Holzernte mit Raupenharvestern** verursachten Verjüngungsschäden wurden von FELLER et al. (1997) und WEIXLER et al. (1997) untersucht. Die erste Studie, die sich mit dem Impex 1880 Hannibal beschäftigte, fand zwischen den Rückegassen kaum Schäden vor. Die zweite Untersuchung zum Impex 1650T Königstiger stellte 17% beschädigte Verjüngung fest, ohne auf den Anteil zerstörter Verjüngung einzugehen.

PLAMONDON und BRAIS (2000) verfolgten in Kanada den Einsatz eines **Feller-Bunchers und die nachfolgende Rückung mit einem Grapple-Skidder**. Dabei fuhr die Fällmaschine auf so genannten „ghost trails“ (temporären Gassen) zwischen den permanenten Rückegassen. Die Stammzahl der Fichtenverjüngung nahm insgesamt um knapp 60% ab.

TESCH et al. (1986a, 1986b) untersuchten die Auswirkungen von **motormanueller Fällung und Bringung mit einem Seilkran (running skyline)** im Steilhang in den USA. Über 40% der aus Douglasien und Kiefern bestehenden Verjüngung wurde zerstört. Auch BENSON und GONSIOR (1981) untersuchten die Auswirkungen dieses Arbeitsverfahrens und fanden nach der Räumung eines Lärchen-Douglasien-Bestandes 40% fehlende oder schwer beschädigte Verjüngung vor.

Die **Verfahrensvergleiche** bringen die regionalen Unterschiede in der Art der Bewirtschaftung der Wälder und in der Wahl der eingesetzten Arbeitsverfahren deutlich zum Ausdruck.

In **Skandinavien** verglichen FJELD und GRANHUS (1998), GRANHUS und FJELD (2001) bzw. GRANHUS (2001) in norwegischen Fichtenbeständen die Auswirkungen von motormanuellen und hochmechanisierten Holzernteverfahren auf die Verjüngung bei einzelbaumweisen Eingriffen miteinander. Ähnliches untersuchten WESTERBERG und BERG (1994) bei der Entnahme von Saatsäumen in schwedischen Kieferbeständen. Während bei den norwegischen Untersuchungen 33% der Verjüngung durch das motormanuelle und 41% durch das hochmechanisierte Holzernteverfahren vernichtet oder beschädigt wurde, stellt die schwedische Untersuchung keine Unterschiede zwischen den Verfahren fest und gibt Schadprozentage bis 54% an. In Schweden verglichen GLÖDE (2002), SIKSTRÖM und GLÖDE (2000), SIKSTRÖM und WESTERBERG (1996) bzw. WESTERBERG und SIKSTRÖM (1996) die durch den Einsatz von Single-Grip- und Double-Grip-Harvestern entstandenen Schäden an Fichten- und Birkenverjüngung miteinander. Dabei konnten sie keine Unterschiede zwischen den Maschinentypen feststellen. Insgesamt wurden bei den untersuchten Räumungshieben zwischen 38% und 65% der Verjüngung vernichtet oder beschädigt.

GLÖDE und SIKSTRÖM (2001) verglichen bei Räumungshieben in Fichten-Kiefern-Beständen das konventionelle Single-Grip-Harvesterverfahren mit einem „tossing the caber“ genannten Verfahren, bei dem die Kronen der gefällten Bäume auf die Rückegassen gefällt werden. Es wurden keine größeren Unterschiede zwischen den Verfahren festgestellt. Der Anteil beschädigter Verjüngung lag bei 19%, während 21% bis 24% der Verjüngung vernichtet wurde.

In **Deutschland** verglichen SCHÖTTLE et al. (1998) die Raupenharvester Impex 1880 Hannibal und Atlas TTW miteinander und fanden v.a. nach dem Einsatz der ersten Maschine kaum Schäden vor. WEIXLER (2000) untersuchte ebenfalls Raupenharvester und stellte weniger als 20% vernichteter Verjüngung fest.

In **Kanada** wurden eine Vielzahl an vergleichenden Studien durchgeführt. Oft sind aber die Rahmenbedingungen nicht mit denen in Europa vergleichbar. So untersuchten GINGRAS et al. (1991) verschiedene Schleppertypen bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Verjüngung. Die sehr hohe Befahrungsintensität (nahezu flächige Befahrung) führte zu hohen Schadprozenten von 22% bis 44%. Gleiches gilt für die Untersuchungen von FRISQUE et al. (1978) und GROOT (1995), der dazu noch hauptsächlich Feller-Buncher untersuchte. MCINNIS und ROBERTS (1994) beschäftigten sich ebenfalls mit diesem in Mitteleuropa kaum eingesetzten Maschinentyp. GINGRAS (1990) untersuchte neben anderen Verfahren auch die Kombination aus Harvester und Forwarder. Diese verursachte mit 30% die niedrigste Stammzahlreduktion aller untersuchten Verfahren. POTHIER (1996) wies bei den von ihm untersuchten Verfahren zwischen 25% und 40% zerstörte Verjüngung nach, auch bei motormanueller Fällung und Schlepperrückung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen aus den **USA** von YOUNGBLOOD (1990) und ARCHIBALD und ARNUP (1993) sind aus denselben oben genannten Gründen kaum auf mitteleuropäische Verhältnisse übertragbar. Gleiches gilt für eine bulgarische Untersuchung von KHRISTOV (1993), eine Studie aus dem Iran von HOSSEINI et al. (2000) und für Ergebnisse aus der Tschechoslowakei von SANIGA (1987, 1988a, 1988b, 1991).

Untersuchungen zur **Entwicklung beschädigter Verjüngung** nach Holzerntemaßnahmen sind in ihrer Übertragbarkeit auf mitteleuropäische Verhältnisse zumeist wegen der untersuchten Baumarten problematisch. So fanden TESCH et al. (1990, 1993) keine nennenswerten Unterschiede zwischen der Entwicklung beschädigter und unbeschädigter **Douglasien** (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Eine Kombination aus Schiefstand und einem Rindenschaden war der Schaden mit der größten Mortalität. MCINNIS und ROBERTS (1994), FRISQUE et al. (1978), GROOT (1995), RUEL et al. (1995) sowie POTHIER (1996) untersuchten die Entwicklung beschädigter **Schwarzfichten** (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), **Balsamtannen** (*Abies balsamea* (L.) Mill.) und **Rotahorne** (*Acer rubrum* L.) und wiesen vor allem im ersten Jahr nach dem Hieb deutliche Verluste nach, die zu einem großen Anteil auf Holzernteschäden zurückzuführen waren. SKOKLEFALD (1967), ÖRLANDER und KARLSSON (2000) sowie GLÖDE (2002) beobachteten die Entwicklung von **Fichten** (*Picea abies* (L.) Karst. (Lam.) Link) unter skandinavischen Verhältnissen und stellten keine nennenswerten Unterschiede in der Höhenentwicklung zwischen beschädigten und unbeschädigten Exemplaren fest. GRANHUS (2001) dagegen beobachtete nach fünf Jahren eine deutlich höhere Mortalität bei beschädigten (59%) gegenüber unbeschädigten Fichten (18%). Demnach starben bei Brüchen 64-74% und bei Schiefstand 31% der Verjüngungsbäume. Rindenschäden allein und in Kombination mit anderen Schäden endeten fast immer tödlich.

Insgesamt betrachtet gibt es bezüglich der **Übertragbarkeit der Ergebnisse** der vorgestellten Untersuchungen auf mitteleuropäische Verhältnisse im weiteren und deutsche Verhältnisse im engeren Sinne zahlreiche Probleme. Diese resultieren zunächst aus Unterschieden in der **Aufnahmemethodik**. Die Definition eines Schadens an der einzelnen Verjüngungspflanze und die aufgenommenen Schadensarten differieren zwischen den verschiedenen Studien, auch in Abhängigkeit von Anzahl, Art und Zeitpunkt der Verjüngungsaufnahmen, beträchtlich. Wenn keine Aufnahme vor dem Hieb durchgeführt wurde, so können lediglich die nach dem Hieb beschädigten oder abgestorbenen, aber noch vorhandenen Verjüngungsbäume betrachtet werden. Wurde die Verjüngung auch vor dem Hieb erfasst, so kommen die durch die Holzerntemaßnahme fehlenden Verjüngungsbäume hinzu. Gelegentlich findet man auch eine Einteilung der Schäden in leichte, mittlere und schwere Schäden, wobei die Klassifizierung zwischen den Untersuchungen uneinheitlich ist und oft subjektiv erscheint. Auch ist die Definition, welche Teile des Bestandes zur Verjüngung gerechnet werden, sehr verschieden und hängt stark von regionalen waldbaulichen Praktiken ab.

Daneben existieren bei der Übertragung der Ergebnisse weitere Probleme durch die weltweit unterschiedlichen **Arbeitsverfahren**. Während in Kanada Feller-Delimer und Feller-Buncher untersucht wurden, wurde in Bulgarien die Rückung mit dem Ochsen beobachtet. Nur ein kleiner Ausschnitt der weltweit angewandten Holzernteverfahren wird (derzeit) in Deutschland eingesetzt. Auch die v.a. in Skandinavien und Nordamerika bis vor wenigen Jahren gängige Praxis der flächigen Befahrung von Waldbeständen schlägt sich in den Ergebnissen der Untersuchungen nieder. Und selbst bei aktuellen Studien fahren Harvester oder Feller-Buncher mitunter auf „ghost trails“ (temporären Gassen), während die Forwarder auf den permanenten Gassen bleiben. Auch unterschiedliche Sortimenten sind beim Vergleich von Ergebnissen mit Vorsicht zu betrachten. Bei der Rückung von Kurzholz oder von Vollbäumen wird die Verjüngung unterschiedlich stark beschädigt.

Weitere Probleme entstehen durch Unterschiede bei den **waldbaulichen Verfahren**, der **Eingriffsstärke** sowie der **Bestandesstruktur**. Die meisten skandinavischen und nordamerikanischen Untersuchungen beschäftigten sich mit „final cutting“ (Räumung) oder „seed tree removal“ (Fällung der Saatbäume). Diese Eingriffe unterscheiden sich deutlich von den meisten Hieben in Verjüngungsnutzungen, die in Deutschland durchgeführt werden. Insgesamt ist von Einzelbaumentnahmen bis Kahlschlägen die ganze Spannweite waldbaulicher Verfahren vertreten, sogar Durchforstungen, bei denen bis zu 70% der Grundfläche des Bestandes entnommen wurden. Des Weiteren werden teilweise andere Baumarten untersucht, auch wenn Fichte und Kiefer bei den skandinavischen Untersuchungen eine große Rolle spielen. Wichtige Unterschiede bestehen auch bezüglich der Dimensionen der entnommenen Bäume. Die Spanne reicht hier von den (für bayerische Verhältnisse) eher schwachen Fichten Skandinaviens bis zu riesigen nordamerikanischen Douglasien. Und während in borealen Wäldern eine Stammzahl von 10.000 Fichten/ha in niedriger Verjüngung sehr hoch ist und oft weniger als 2.500 Fichten/ha anzutreffen sind, sind in den meisten Wäldern Deutschlands bei entsprechender Behandlung deutlich höhere Stammzahlen vorhanden und zumeist auch waldbaulich gewünscht.

Entscheidende Probleme beim Vergleich verschiedener Untersuchungen bestehen auch hinsichtlich der **Darstellung der Ergebnisse**. Diese sind natürlich Ausdruck der Zielsetzung der Arbeit. Wenn verschiedene Arbeitsverfahren bezüglich ihrer Verjüngungspfleglichkeit untersucht werden sollen, resultiert dies zwangsläufig in anderen Ergebnisvariablen als bei einer Untersuchung, in der Einflussfaktoren auf Art

und Höhe der Schäden identifiziert werden sollen. Die wichtigste und häufigste Ergebnisvariable, das Schadprozent oder die Stammzahlreduktion, ist dabei stark von der Wahl der Methodik abhängig. Je nach Definition des Schadens (oder der Schadensarten) und nach Anzahl und Zeitpunkt der verschiedenen Verjüngungsaufnahmen wird hier der Anteil fehlender, beschädigter oder vernichteter Verjüngungspflanzen (bzw. eine Kombination davon) angegeben. Sollen Einflussfaktoren identifiziert werden, so werden meist die Höhe und die Baumarten der Verjüngung sowie die Entfernung von der Rückegasse überprüft. Bei vergleichenden Studien sind die untersuchten Arbeitsverfahren ebenfalls Einflussfaktoren. Oft wird auch der Einfluss der Verjüngungsdichte (Stammzahl/ha), der Jahreszeit, der Anzahl entnommener Bäume (bzw. Efm) pro Hektar oder der Schneelage betrachtet. Selten werden die Baumarten des Hiebes, die aufgearbeiteten Sortimenten, der Abstand des Probekreises zum nächsten entnommenen Altbestandsbaum, die Schlagordnung oder die Menge des Schlagabraums in die Überlegungen mit einbezogen. Dabei findet lediglich eine bestandesweise Betrachtung bezüglich des Hiebes in allen Fällen und bezüglich der Verjüngung in fast allen Fällen statt. Zwei Arbeiten, die die **Schadens- bzw. Überlebenswahrscheinlichkeit für einen einzelnen Verjüngungsbaum** mit Hilfe eines logistischen Modells zu beschreiben versuchen, bilden hier die Ausnahme. YOUNGBLOOD (1990) erstellte für Kanadische Weiß- oder Schimmel-Fichte (*Picea glauca* (Moench) Voss) ein Modell, in das das Arbeitsverfahren, die Höhe des Verjüngungsbaums und dessen Abstand von der Rückegasse bzw. Seiltrasse einfließen. GRANHUS und FJELD (2001) berechneten ein Modell für die Fichte (*Picea abies* (L.) Karst. (Lam.)), in dem neben den drei oben genannten Faktoren auch der Abstand des Verjüngungsbaumes zum nächsten entnommenen Altbestandsbaum und die Eingriffsstärke in m³/ha berücksichtigt werden.

1.3 Datenmaterial und Ziele der Untersuchung

Die vorliegende Arbeit führt die Ergebnisse aus drei verschiedenen Projekten zusammen. Im **Projekt ST87** der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) wurden an einem Einzelfall die „Auswirkungen von Windwurf und anschließender Aufarbeitung auf Fichten-Buchen-Vorausverjüngung“ (KORTEN 2001) untersucht. Diese Untersuchung war dadurch möglich geworden, dass durch den Orkan Lothar vom 26. Dezember 1999 im Forstamt Krumbach unter anderem ein nahezu flächig verjüngter Fichten-Buchen-Bestand geworfen wurde. Auf der in diesem Bestand gelegenen Versuchsfläche des Verbundforschungsprojektes ZEUS war die Verjüngung bereits detailliert erfasst worden. Somit bot sich hier durch bloßen Zufall die einmalige Gelegenheit, die **Auswirkungen des Windwurfs und der anschließenden Aufarbeitung** des Sturmholzes auf die Naturverjüngung zu dokumentieren. Die Windwurfsituation kann dabei als „worst case“ regulärer Holzernte bezüglich Verjüngungsschäden angesehen werden.

Das **Projekt ST122** des Kuratoriums der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) beschäftigte sich mit „Schäden an Naturverjüngung durch Holzernte mit Harvestern“ (KORTEN 2003b). Auf acht Versuchsflächen wurden vier verschiedene **hochmechanisierte und kombinierte Arbeitsverfahren** auf ihre Pfléglichkeit bezüglich der Verjüngung untersucht.

Das Herzstück dieser Arbeit bilden die Ergebnisse des Teilprojektes „Holzernteschäden an Naturverjüngung“ (KORTEN 2003a) innerhalb des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierten **Projektes ZEUS** („Entwicklung eines zukunftsorientierten Entscheidungsunterstützungssystems für die

Forstwirtschaft“). Hier wurden die Auswirkungen von **motormanueller Holzernte** auf vier Versuchsflächen beobachtet. Daneben wurden 150 einzelne Altbestandsbäume in Verjüngung gefällt, um auf der Grundlage der so gewonnenen Daten ein **Modell zur Prognose von Verjüngungsschäden** zu erstellen.

Alle drei Untersuchungen beschäftigen sich dabei hauptsächlich mit **Fichte und Buche**, den beiden wichtigsten Baumarten für die deutsche Forstwirtschaft. Die eingesetzten Arbeitsverfahren spiegeln (mit Ausnahme der hier nicht untersuchten Raupenharvester) die Bandbreite der in Verjüngungsnutzungen in Deutschland derzeit eingesetzten Holzernteverfahren wieder.

Nach der Darstellung der Ergebnisse der Versuchsflächen in Kapitel 3 und der Entwicklung und Verprobung des Prognosemodells mit seinen Teilkomponenten in Kapitel 4 werden Ideen und Konzepte zur Bewertung von Holzernteschäden an Verjüngung entwickelt (Kap. 5). Dabei wird bewusst auf die Erstellung eines praxistauglichen Bewertungsverfahrens verzichtet, da dies den zeitlichen (Langzeitbeobachtung der Verjüngungsentwicklung) und inhaltlichen Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte. Abbildung 1 gibt den grundsätzlichen Aufbau der Arbeit wieder.

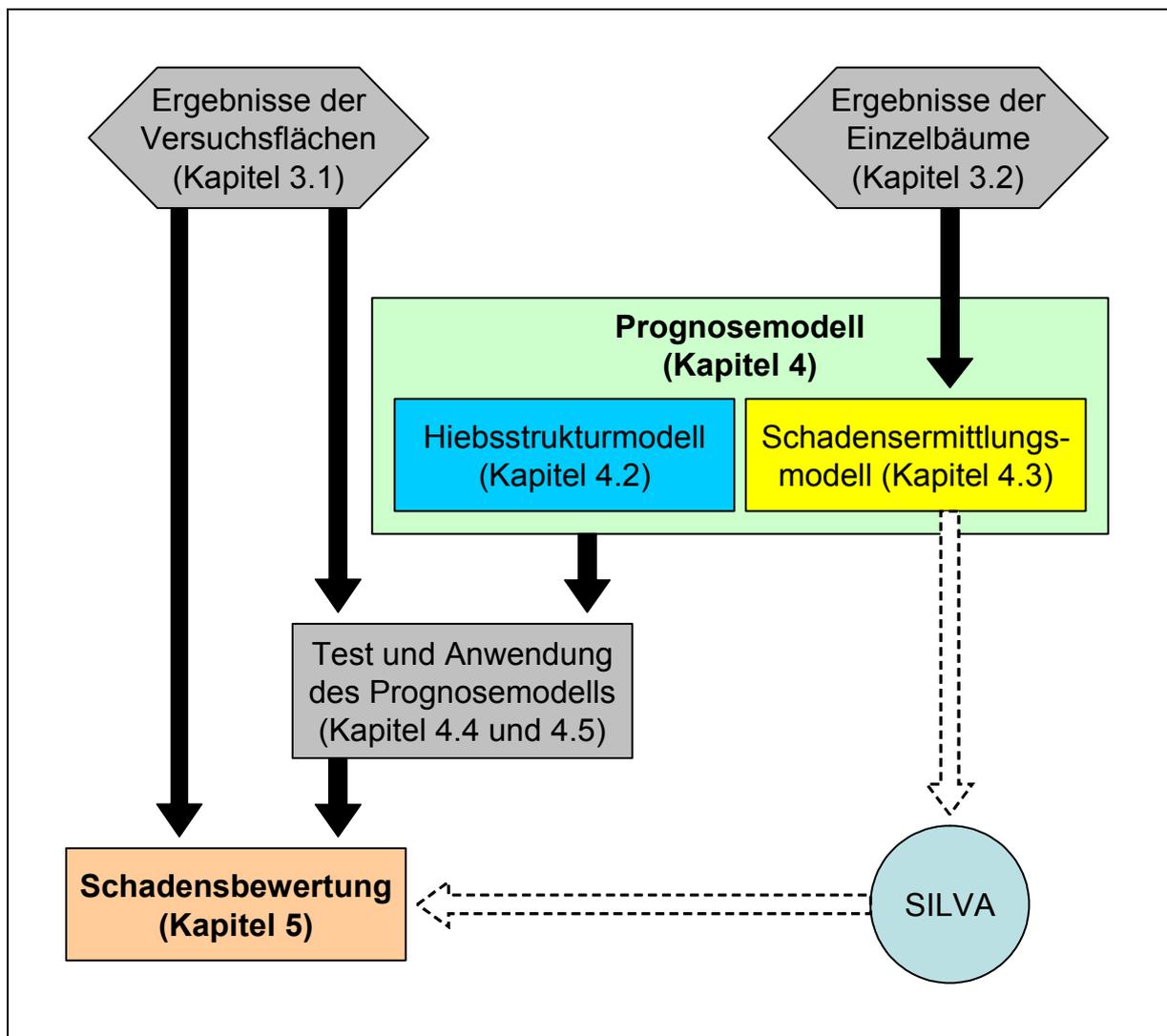


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Als Ziele der Arbeit sollen konkret folgende Ergebnisse gewonnen werden:

- Die **Art und Höhe der Schäden an Naturverjüngung** sollen auf den Versuchsflächen ermittelt werden.
- Die **räumliche Verteilung der Schäden im Bestand** in Bezug zur Feinerschließung (Rückegassennetz) soll untersucht werden. Grundsätzlich ist dabei eine Konzentration der Schäden an den Rückegassen zu erwarten.
- Die verschiedenen **Schadensursachen** (Fällung, Rückung, Krone, Stamm) sollen identifiziert und in ihrer Bedeutung für die Gesamtschäden beurteilt werden.
- Weiterhin sollen **Unterschiede zwischen den untersuchten Arbeitsverfahren** bezüglich Art und Höhe der Schäden sowie deren räumlicher Verteilung im Bestand identifiziert werden.
- Die relevanten **Einflussfaktoren** auf Art und Höhe der Schäden sollen ermittelt werden. Dabei sind Altbestands- und Verjüngungsmerkmale zu berücksichtigen.
- Anschließend soll ein **Modell zur Prognose der Schäden** erstellt werden. Dieses soll auf einzeln gefälltten Altbestandsbäumen basieren und durch Trennung der Einflussfaktoren in Eigenschaften der Verjüngung auf der einen Seite und in Eigenschaften von Altbestand und Holzerntemaßnahme auf der anderen Seite eine Entkopplung von Versuchsflächen erreichen.
- Weiterhin sollen **Kriterien zur Bewertung von Verjüngungsschäden** auf ihre grundsätzliche Brauchbarkeit hin getestet werden. Wichtige Ansätze sind dabei die Ermittlung der verjüngungsfreien Bestandesfläche mit dem GIS-Programm ArcView, die Adaption von Methoden der Wildverbissbewertung und die Simulation der Verjüngungsentwicklung mit Hilfe des Waldwachstums-simulators SILVA.
- Abschließend sollen **Empfehlungen für die forstliche Praxis** zu den **Möglichkeiten der Schadensminimierung** entwickelt werden.

2 Methodik der Datenerhebungen

2.1 Lage der Versuchsbestände

Die nachfolgende Karte (Abb. 2) zeigt die Lage der Versuchsflächen der verschiedenen Projekte in Bayern.

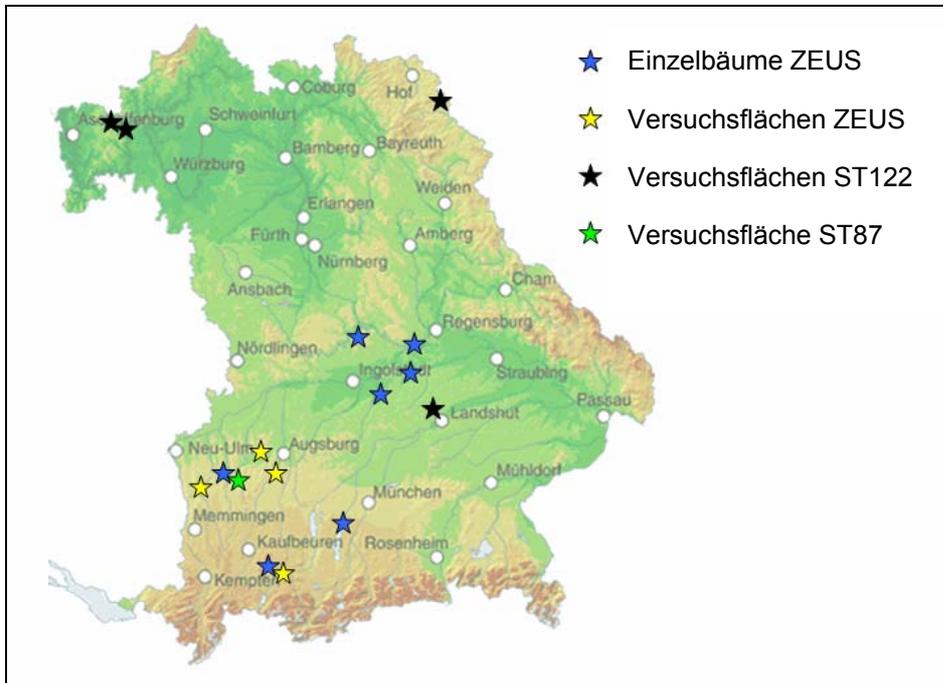


Abbildung 2: Lage der Versuchsflächen in Bayern

Im **Verbundforschungsprojekt ZEUS** wurden auf vier Versuchsflächen in der Untersuchungsregion „Mittelschwaben“ die Auswirkungen motormanueller Holzernte auf etablierte Vorausverjüngung untersucht. Die zwei Versuchsflächen der Fichten-Buchen-Wuchsreihe liegen im Gebiet der Forstämter Illertissen und Schongau, die beiden Versuchsflächen der Eichen-Buchen-Wuchsreihe im Gebiet der Forstämter Schwabmünchen und Biburg. Die gefälltten Einzelbäume befanden sich in sieben verschiedenen bayerischen Forstämtern, teilweise dort auch in verschiedenen Beständen. Diese Forstämter waren Geisenfeld, Kelheim, Kipfenberg, Krumbach, Schongau, Siegenburg und Starnberg.

Im **Projekt ST87** wurde die Auswirkung von Windwurf und anschließender Aufarbeitung des Sturmholzes mit einem Harvester auf die vorhandene Naturverjüngung untersucht. Die im Forstamt Krumbach gelegene Versuchsfläche entstammte ursprünglich der Fichten-Buchen-Wuchsreihe des Projektes ZEUS, war aber nach dem Orkan „Lothar“ für die ursprünglich vorgesehenen Zwecke unbrauchbar.

Die Versuchsflächen des **Projektes ST122** zur Untersuchung der Schäden an Naturverjüngung bei hochmechanisierter bzw. kombinierter Holzernte liegen räumlich weit auseinander und orientieren sich zumeist am Einsatzgebiet der Maschinenbetriebe der bayerischen Staatsforstverwaltung, mit denen während dieses Projekts eng zusammengearbeitet wurde. Ein Harvester vom Typ Ponsse Ergo des Maschinenbetriebes Rechtenbach wurde in verschiedenen Beständen des Forstamtes Heigenbrücken sowohl im reinen Harvesterverfahren als auch im kombinierten Königsbronner Harvesterverfahren (KHV) eingesetzt. Ein Harvester

vom Typ Timberjack 1270 des Maschinenbetriebes Bayreuth wurde in einem Bestand des Forstamtes Selb untersucht. Im Wald der Ludwig-Maximilians-Universität München, der vom Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der Technischen Universität München betreut wird, wurde ein Unternehmereinsatz mit einem Harvester vom Typ Ponsse HS10 Cobra durchgeführt. Durch die motormanuelle Zufällung weit von den Rückegassen entfernter Bäume handelte es sich dabei um ein kombiniertes Verfahren.

Auszüge aus den Forstbetriebskarten mit der genauen Lage der Versuchsflächen finden sich im Anhang 9.1.

2.2 Auswahl und Aufbau der Versuchsflächen

2.2.1 Versuchsflächen der Projekte ZEUS und ST87

Bei der Auswahl dieser jeweils ein Hektar (80x125m) großen Versuchsbestände der Altersklasse „Verjüngungsnutzung mit etablierter Vorausverjüngung“ der ZEUS-Wuchsreihen Fichte-Buche und Eiche-Buche waren die Anforderungen jedes Teilprojektes des Verbundforschungsprojektes ZEUS zu berücksichtigen. Die meisten Kriterien bezogen sich dabei auf die spezifischen Anforderungen an zueinander passende Wuchsreihenflächen wie Standort, Lage und bestimmte Altbestandsparameter, einige allerdings auch auf die vorhandene Verjüngung. In erster Linie sollte die Verjüngung auf der Versuchsfläche möglichst flächendeckend vorhanden sowie im Mittel zumindest kniehoch sein. Daneben sollte sie sich überwiegend aus Fichte und Buche bzw. Buche und Eiche zusammensetzen.

Die Versuchsflächen wurden in einem 5x5m-Raster verpflockt, so dass je Versuchsfläche 400 (16x25) systematische Stichprobenpunkte vorhanden waren. Das Raster wurde so angelegt, dass die Pflöckreihen nicht parallel zu den Rückegassen liefen. Durch die dadurch entstehenden differenzierteren Entfernungen der Probekreise von den Rückegassen sollte bei der späteren Auswertung der Einfluss der Entfernung deutlicher werden.

Für jede der beiden Wuchsreihen wurden zwei Versuchsflächen angelegt. Hinzu kommt die vom Orkan „Lothar“ geworfene Versuchsfläche in Krumbach, die während des ZEUS-Projektes angelegt und im Zuge des Projektes ST87 ausgewertet wurde.

2.2.2 Versuchsflächen des Projektes ST122

Die Versuchsflächen zur Untersuchung der Verjüngungsschäden bei hochmechanisierter und kombinierter Holzernte wurden ebenfalls im 5x5m-Raster verpflockt. Allerdings wurden hier mit 0,25ha großen Einzelflächen deutlich kleinere Flächengrößen zugunsten einer größeren Anzahl an Versuchsflächen gewählt. Je 50x50m-Versuchsfläche wurden somit 100 Stichprobenpunkte angelegt.

Die Versuchsflächen einschließlich eines 15m breiten Randstreifens sollten dabei möglichst vollständig und überwiegend mit Fichte und/oder Buche verjüngt sein. Die Verjüngung sollte im Mittel über kniehoch sein. Daneben war ein Harvestereinsatz in dem projektbedingt sehr schmalen Zeitfenster zu realisieren. Je Versuchsbestand und damit je Arbeitsverfahren wurden zwei Versuchsflächen angelegt.

2.2.3 Einzelbäume

Durch den methodischen Ansatz, eine Reihe von Altbestandsbäumen einzeln und vollständig in die bestehende Verjüngung zu fällen, um zu ermitteln, wie hoch der maximale Schaden ist, den ein Altbestandsbaum verursacht, entstanden teilweise sehr deutliche (und nicht völlig unverständliche) Akzeptanzprobleme bei einer Reihe von Revierförstern. Deswegen gestaltete sich auch hier die Suche nach geeigneten Beständen (bzw. Bäumen) nicht einfach. Meist war die „Schmerzgrenze“ bei zehn Bäumen erreicht, selten war mehr möglich. Insgesamt wurden 159 Bäume (80 Fichten, 79 Buchen) ausgewählt und gefällt. Neun der gefällten Bäume fielen völlig an dem vorgesehenen, erfassten Bereich vorbei (Abb. 3a), so dass schließlich 150 Einzelbäume (77 Fichten, 73 Buchen) für die Auswertung herangezogen werden konnten.

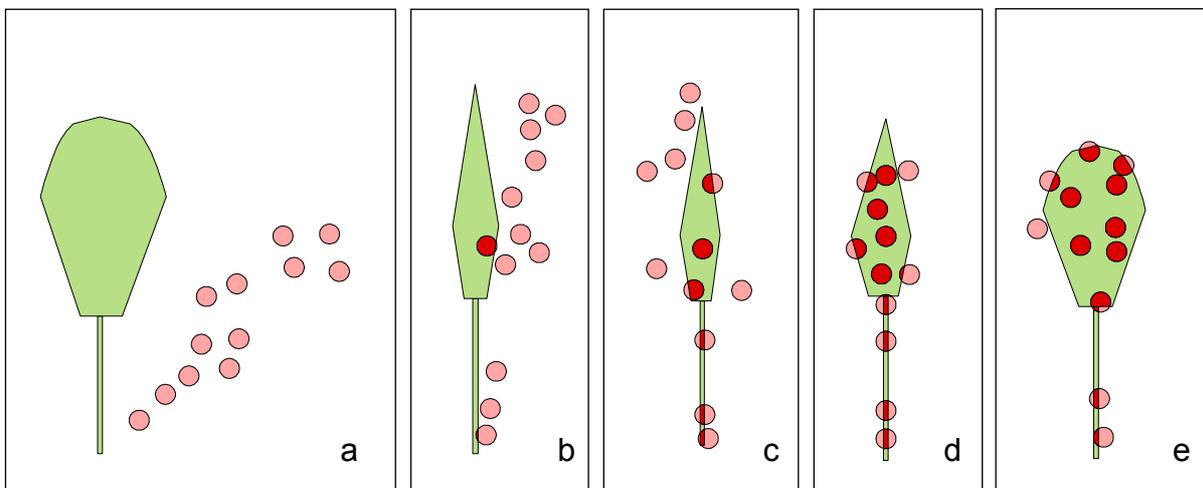


Abbildung 3 a-e: Lage gefällter ausgewählter Einzelbäume und die Lage der zugehörigen zwölf Probekreise

Die vorgesehene Fällrichtung des Baumes wurde vor Ort in Absprache mit dem zuständigen Revierbeamten festgelegt und in einiger Entfernung vom Baum im Gelände mit einem nummerierten Pfahl markiert. Damit war den Waldarbeitern die Fällrichtung vorgegeben. Aus den gemessenen Baumdimensionen (Höhe, Kronenansatzhöhe, Lote) wurde die theoretische Lage des gefällten Baumes ermittelt und im Gelände markiert. Innerhalb dieses potentiellen Lagebereichs wurde die Verjüngung vor der Fällung an 12 Stichprobenpunkten je Baum erhoben. Diese Stichprobenpunkte wurden in Bezug zum Stammfußpunkt des Baumes eingemessen, so dass die Lage der Stichprobenpunkte bezüglich des liegenden Baumes ermittelt und dargestellt werden konnte. Im idealen Fall konnten so je Baum zwischen 10 und 12 betroffene Probekreise in die Auswertung einbezogen werden (Abb. 3d und 3e). Aber auch bei weniger guter Einhaltung der Fällrichtung (Abb. 3b) oder Ungenauigkeiten bei der Messung der Kronenparameter und/oder ihrer Absteckung im Bestand (Abb. 3c) waren bei den meisten Bäumen einige Stichprobenpunkte brauchbar. Von den 1908 vor der Fällung aufgenommenen Probekreisen konnten letztlich 1196 (63%) in die Auswertung mit einbezogen werden.

2.3 Aufnahme der Verjüngung

Bei der Aufnahme wurde jeder einzelne Verjüngungsbaum in den Probekreisen mit mindestens 20cm Höhe erfasst. Kleinere Bäume wurden lediglich nach Baumarten getrennt gezählt und als Sämlinge angesehen. Der jeweils höchste Sämling wurde gemessen. Bei den Aufnahmen vor der Holzernte wurden Vorschäden, bei den Aufnahmen nach dem Hieb die entstandenen Holzernteschäden aufgenommen.

2.3.1 Probekreissystem

Auch wenn sich die Anordnung der Pflöcke und damit der Stichprobenpunkte in den einzelnen Versuchen teils deutlich unterschied, so wurde die Verjüngung doch in allen Fällen nach einem einheitlichen Schema erfasst. Sie wurde in zwei verschiedenen Probekreisen um jeden Stichprobenpunkt (Pflock) aufgenommen. Verjüngungsbäume mit einer Höhe über 0,5m wurden in dem größeren der beiden Probekreise mit einer Fläche von 2,5m² (r=0,89m) erfasst. Verjüngung bis 0,5m Höhe wurde in einem kleineren Probekreis mit einer Fläche von 0,5m² (r=0,4m) erhoben. Durch diese reduzierte Form der Aufnahme der (in der Regel sehr stammzahlreichen) niedrigen Verjüngung wurde der Erhebungsaufwand deutlich reduziert, ohne aber zu viel an Information zu verlieren. Um hohe Verjüngung repräsentativ zu erfassen, ist ein relativ großer Probekreis notwendig, bei niedriger Verjüngung sind kleinere Probekreise ausreichend. Dies ist auf die negative Korrelation von Höhe und Stammzahl in der Verjüngung zurückzuführen. Die unterschiedliche Größe der Probekreise wurde bei den späteren Auswertungen mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt.

2.3.2 Aufnahme vor dem Hieb

2.3.2.1 Vorgehensweise

Bei der Aufnahme vor dem Hieb wurden neben der Baumart, der Baumhöhe und der Baumlänge (wenn diese bei schief stehenden Bäumen von der Baumhöhe abwich, siehe Kap. 2.3.3.3) auch mögliche Schäden, z.B. aus vorangegangenen Hieben, an der Verjüngung aufgenommen.

Jeder aufgenommene Verjüngungsbaum wurde unten am Stamm mit Sprühfarbe markiert. Dadurch wurden Doppelzählungen vermieden, und bei einem durch den Hieb bedingten Verlust des Pflockes konnte bei der Aufnahme nach dem Hieb die Lage der Probekreise trotzdem ausreichend genau rekonstruiert werden.

2.3.2.2 Aufgenommene Daten

Je Verjüngungsbaum wurden folgende Daten erhoben:

- Nummer des Stichprobenpunktes
- kleiner oder großer Probekreis
- Baumart
- Baumhöhe
- Baumlänge (wenn von der Baumhöhe abweichend)
- Vorschäden

2.3.2.3 Vorschäden

Die aufgenommenen Vorschäden lassen sich in vier Gruppen unterteilen.

- unbefriedigender Wuchs (z.B. Säbelwuchs, Tiefzwiesel, Schiefstand)
- alter Fällschaden (z.B. Bruch, Rindenschaden)
- unzureichende Vitalität (z.B. Baum wipfeldürr oder absterbend)
- Wildverbiss

Die erhobenen Vorschäden dienen der besseren Zuordnung der bei der Aufnahme nach dem Hieb erfassten Bäume zu den vorher aufgenommenen Bäumen. Außerdem konnten Schäden aus älteren Hieben eindeutig erkannt werden, wodurch eine sichere Identifikation der tatsächlich auf den untersuchten Hieb zurückzuführenden Schäden möglich war.

2.3.3 Aufnahme nach dem Hieb

2.3.3.1 Vorgehensweise

Die Verjüngungsaufnahmen nach den Hieben wurden analog zu den Aufnahmen vor den Hieben durchgeführt. Es bestand hierbei allerdings das Problem, dass nicht alle Pflöcke wieder aufgefunden werden konnten. In diesen Fällen wurde der Pflock neu eingemessen. Dabei war die Markierung der einzelnen Verjüngungsbäume im Zuge der Vorheraufnahme sehr hilfreich, denn dadurch konnte die Lage des Pflocks und damit auch des Probekreises sehr genau rekonstruiert werden.

Die aufgenommenen Verjüngungsbäume wurden mit einer anderen Farbe als bei der Vorheraufnahme markiert.

2.3.3.2 Aufgenommene Daten

Es wurden dieselben Daten wie vor dem Hieb erhoben. Zusätzlich zu möglichen Vorschäden wurden aber nun auch durch die Holzerntemaßnahme verursachte Schäden erfasst.

2.3.3.3 Schäden

Die Einteilung der Schäden an der Verjüngung wurde im Anhalt an die Klassifikation von KORTEN (1999) wie folgt vorgenommen:

a) Fehlende Bäume

Nach dem Hieb war eine bestimmte Anzahl von Verjüngungsbäumen nicht wieder aufzufinden. Sie wurden entweder entwurzelt oder so erdnah abgebrochen, dass sie bei der Nachheraufnahme nicht erfasst wurden. Daneben wurden sie möglicherweise auch im Zuge der Aufarbeitung abgesägt, um Zugang zum liegenden Stamm zu ermöglichen oder Rückweichen zu schaffen.

Die Anzahl fehlender Bäume ergab sich im Unterschied zu den anderen Schadensarten erst aus dem Vergleich von Vorher- und Nachheraufnahme. Da es sich außerdem natürlich um den endgültigsten aller möglichen Schäden handelt und die Bewertung dieses Schadens eindeutig ist, hat diese Schadensart eine Sonderstellung inne.

b) Brüche

Bei den Aufnahmen wurden vorhandene Brüche nach ihrer Lage am Stamm unterteilt. Brüche in den unteren zwei Dritteln des Baumes wurden als Schaftbrüche, Brüche im oberen Drittel als Wipfelbrüche definiert. War lediglich der letzte Jahrestrieb abgebrochen, so wurde ein Jahrestriebbruch notiert. Während Schaft- und Wipfelbrüche oft letal sind oder den Verjüngungsbaum zumindest erheblich in seiner Entwicklung zurückwerfen, sind Jahrestriebbrüche deutlich weniger schwerwiegend und in ihrer Auswirkung wohl ähnlich wie einmaliger Leittriebverbiss zu werten.

c) Rindenschäden

Als Rindenschäden wurden Schäden im Stammbereich angesprochen, bei denen durch den Verlust der Rinde der Holzkörper oder das Kambium freigelegt wurde. Bei den erfassten Rindenschäden wurde die Länge und die Breite des Schadens gemessen, um die Gesamtgröße errechnen zu können. Bei mehreren Rindenschäden an einem Baum wurde jeder Schaden einzeln aufgenommen. Rindenschäden sind in ihrer Wirkung auf den Verjüngungsbaum den Schäl- oder auch Fegeschäden ähnlich. Häufig gehen sie allerdings mit anderen Schäden einher.

d) Lageveränderungen

Jede Abweichung des einzelnen Verjüngungsbaumes von der Senkrechten wurde erfasst, indem bei schief stehenden Bäumen sowohl die Baumhöhe als auch die Baumlänge gemessen wurde. Aus diesen beiden Werten wurde der Winkel errechnet, der die Abweichung des Baumes von der Senkrechten angibt. Ab einem Winkel von 15° wurde von einem Schaden ausgegangen.

Daneben wurde zusätzlich erfasst, wenn der Baum umgedrückt oder von Kronenmaterial begraben wurde.

e) Wurzelschäden

Bei offensichtlich locker stehenden Bäumen wurde ein Wurzelschaden notiert. Wurzelschäden kommen ausschließlich in Kombination mit anderen Schäden vor. Zumeist sind dies Lageveränderungen und Rindenschäden, da diese Bäume wegen der gerissenen Wurzeln einen starken Schlag erhalten haben müssen. Daher kommen Wurzelschäden bei den Auswertungen lediglich als Mehrfachschäden vor.

f) Astverluste

Ab einem geschätzten Verlust von mehr als einem Drittel der lebenden (grünen) Krone wurde dies als Schaden erfasst. Zumeist war bei größeren Verjüngungsbäumen die Hälfte der Baumkrone „abrasiert“. Bei der Auswertung wurden Astverluste zu den Brüchen (b) gezählt.

g) Stammschnitt

Durch das Freischneiden von Rückweichen vor der Fällung eines Altbestandbaumes wurde in einigen Fällen Verjüngung umgesägt. Auch bei der Aufarbeitung des liegenden Stammes wurden gelegentlich Verjüngungsbäume, die bei der Arbeit behinderten oder die durch die Fällung schwer beschädigt waren, mit der Motorsäge entfernt. War dies an vorhandenen Stöcken zu erkennen, so wurde es aufgenommen. Stammschnitte wurden bei der Auswertung der Kategorie „fehlend“ (a) zugerechnet.

h) Mehrfachschäden

Oft traten Kombinationen der Schadensarten b) bis f) auf. Zumeist waren dies schief stehende Bäume mit einem Bruch oder einem Rindenschaden.

In der späteren Darstellung (Kap. 3) wurden die verschiedenen Arten von Brüchen zu einer Schadensgruppe zusammengefasst. Die weiteren Schadensgruppen sind Lageveränderungen, Rindenschäden und Mehrfachschäden.

2.4. Aufnahme des entnommenen Altbestandes

2.4.1. Versuchsflächen des Projektes ZEUS

Auf den Versuchsflächen des Projektes ZEUS wurde der Altbestand vollständig erfasst. Von allen Altbestandsbäumen auf der eigentlichen Versuchsfläche sowie auf dem 15m breiten Umfangsstreifen waren folgende Kenngrößen bekannt:

- Baumart
- BHD
- Baumhöhe
- Kronenansatzhöhe
- 4 oder 8 Kronenradien (nach Himmelsrichtungen)
- Koordinaten des Stammfußpunktes (nur Biburg und Schongau)

Während des Hiebes wurden außerdem bei den entnommenen Bäumen die Lage des liegenden Baumes (Fällrichtung, Lage des Stammfußes) und die ausgehaltenen Sortimente festgehalten.

2.4.2 Versuchsfläche des Projektes ST87

Der Altbestand der Windwurffläche in Krumbach wurde teilweise analog zu den ZEUS-Versuchsflächen erhoben. Allerdings war zum Zeitpunkt des Windwurfs der Altbestand noch nicht vollständig aufgenommen. Zwar war jeder Baum mit einem BHD größer 5cm auf der eigentlichen, ein Hektar großen Versuchsfläche sowie in dem 15m breiten Umfangsstreifen mit Baumart und BHD erfasst. Die geplanten Höhenmessungen, Kronenablotungen und die Einmessung der Stammfußkoordinaten aber konnten wegen des Windwurfs nicht mehr abgeschlossen werden. Der Altbestand war allerdings bereits vollständig und durchgehend nummeriert.

Die notwendige Aufnahme des Altbestandes zwischen Windwurf und Aufarbeitung bereitete nicht unerhebliche Probleme, vor allem durch die mangelnde Begehrbarkeit der Fläche. Bei dem Teil des Altbestandes, der durch den Sturm geworfen wurde, wurden zusätzlich erhoben:

- Baumhöhe
- Kronenansatzhöhe
- Lage des liegenden Baumes

Derjenige Teil des Altbestandes, der nach dem Sturm stehen geblieben war, wurde ebenfalls erfasst. Dabei wurden je Baum zusätzlich aufgenommen:

- Baumhöhe
- Kronenansatzhöhe
- Stammfußkoordinaten in Bezug auf das 5x5m-Raster
- vier Kronenradien (nach Himmelsrichtungen)
- eventuelle Schäden durch den Windwurf

2.4.3 Versuchsflächen des Projektes ST122

Auf den Versuchsflächen sowie dem Umfassungstreifen wurden von allen ausgezeichneten Bäumen der BHD, die Baumhöhe und die Kronenansatzhöhe mit Kluppe und dem Höhenmessgerät Vertex ermittelt. Des Weiteren wurden die Kronen der zu entnehmenden Bäume in Richtung der vier Haupthimmelsrichtungen abgelotet. Zuletzt wurde die Lage aller ausgezeichneten Bäume auf der Fläche festgehalten. Hierzu wurde von einem Pflock in der Nähe eines der markierten Stämme aus auf die Stammmitte mit einem Kompass gepeilt und der Azimut bestimmt. Mit Hilfe eines Maßbandes wurde danach die Entfernung vom Pflock zum Stammfuß gemessen. Daneben wurde bei den kombinierten Verfahren notiert, welche Bäume motormanuell und welche durch den Harvester gefällt wurden.

2.4.4 Einzelbäume

Bei jedem der einzeln in Verjüngung gefällten Bäume wurden vor dem Hieb folgende Werte erfasst:

- Baumart
- BHD
- Baumhöhe
- Kronenansatzhöhe
- vorgesehene Fällrichtung
- 8 Kronenradien (nach vorgesehener Fällrichtung)

Zusätzlich wurde nach dem Hieb die tatsächliche Lage des gefällten Baumes eingemessen.

2.5 Aufnahme der Feinerschließung

Auf allen Versuchsflächen wurde die Lage der Rückegassenmitte in Bezug zum 5x5m-Raster eingemessen und mit Hilfe eines elektronischen Zeichenbretts in das GIS-Programm ArcView übertragen. Auch die mittlere Breite der Rückegassen wurde erfasst und bei der späteren graphischen Aufbereitung berücksichtigt.

Da die Einzelbäume voll in Verjüngung gefällt wurden, wurden dort keine Rückegassen erfasst.

3 Ergebnisse der Datenerhebungen

3.1 Versuchsflächen

3.1.1 Motormanuelle Holzernteverfahren

3.1.1.1 Arbeitsverfahren und Holzerntemaßnahmen

Der Holzeinschlag auf den ZEUS-Versuchsflächen erfolgte motormanuell. Es wurde in aller Regel Langholz ausgehalten, das mit Seilschleppern gerückt wurde. Die vier Versuchsflächen unterschieden sich deutlich bezüglich der Feinerschließung. Während die beiden **Fichten-Buchen-Flächen in Schongau und Illertissen** ein sehr systematisches Rückegassennetz aufwiesen, verliefen die Rückegassen auf den beiden **Eichen-Buchen-Flächen in Biburg und Schwabmünchen** deutlich unregelmäßig (siehe z.B. Abb. 6 a-d, S. 19). Die mittleren Abstände von Rückegassenmitte zu Rückegassenmitte betragen in Schongau gut 36m und in Illertissen knapp 38m. Während der mittlere Rückegassenabstand in Biburg gut 35m betrug, war er in Schwabmünchen mit knapp 58m deutlich größer.

Auf den vier Versuchsflächen wurden praxisübliche Hiebe durchgeführt. Der dabei entnommene Teil des Altbestandes wird in Tabelle 1 detailliert aufgeführt. Der schwächste Eingriff fand dabei in Biburg mit 64Efm, der stärkste in Illertissen mit 106Efm statt.

Tabelle 1: Kenndaten zum ausscheidenden Altbestand; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS, je 1ha

Versuchsfläche	Baumart	N	Ø BHD [cm]	Ø h [m]	G [m ²]	V ₁ [Vfm m.R.]	V ₂ [Efm o.R.]
Schongau	Fichte	23	46.2	34.5	4.0	62.4	50.6
	Buche	11	43.9	32.6	1.8	30.1	25.4
	Gesamt	34			5.8	92.5	76.0
Illertissen	Fichte	40	44.6	33.7	6.5	97.4	78.9
	Buche	14	40.3	29.7	1.9	31.8	26.9
	Gesamt	54			8.4	129.2	105.8
Biburg	Buche	18	44.5	27.7	3.0	44.4	37.6
	Eiche	10	50.4	29.6	2.1	32.9	26.0
	Gesamt	28			5.0	77.3	63.6
Schwabmünchen	Fichte	9	47.2	33.5	1.7	24.9	20.1
	Buche	14	56.8	31.4	3.8	65.0	55.0
	Eiche	5	48.5	31.8	1.0	16.2	12.8
	Gesamt	28			6.4	106.1	87.9

3.1.1.2 Die Verjüngung vor dem Hieb

Tabelle 2 gibt die wichtigsten Daten der Verjüngung auf den Versuchsflächen vor dem Hieb wieder. Die Fichten-Buchen-Flächen in Schongau und Illertissen wiesen deutlich mehr und niedrigere Verjüngung auf als die Buchen-Eichen-Flächen in Biburg und Schwabmünchen.

Tabelle 2: Kenndaten zur Verjüngung; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS

Versuchsfläche		Fichte	Buche	Sonstige	Gesamt
Schongau	N/ha	6100	45850	220	52170
	h mitt [cm]	87.7	76.5	70.7	77.8
	h max [cm]	380	394	233	394
Illertissen	N/ha	31330	20820	110	52260
	h mitt [cm]	49.2	122.8	77.1	78.6
	h max [cm]	629	580	605	629
Biburg	N/ha	120	11170	180	11470
	h mitt [cm]	106.8	153.1	306.5	155.0
	h max [cm]	256	800	768	800
Schwabmünchen	N/ha	2080	22770	520	25370
	h mitt [cm]	70.7	148.8	15.8	139.6
	h max [cm]	522	763	140	763

Die Abbildungen 4a bis 4d zeigen die Stammzahlverteilungen auf den Probekreisen in Abhängigkeit von der Höhenstufe. Die beiden Fichten-Buchen-Flächen und die beiden Eichen-Buchen-Flächen waren jeweils gut miteinander vergleichbar.

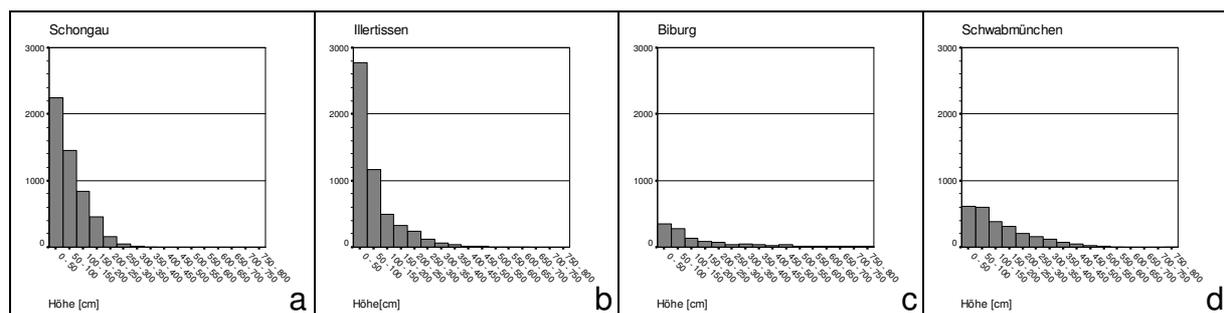


Abbildung 4 a-d: Stammzahlverteilung je Höhenstufe; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS

Andere Baumarten außer Fichten und Buchen waren auf den Versuchsflächen kaum in der Verjüngung vorhanden. Fichten traten in nennenswertem Umfang lediglich auf den Fichten-Buchen-Flächen auf (Abb. 5 a-d) und hatten ihren Schwerpunkt in Illertissen im niedrigen Höhenbereich.

Ergebnisse der Datenerhebungen

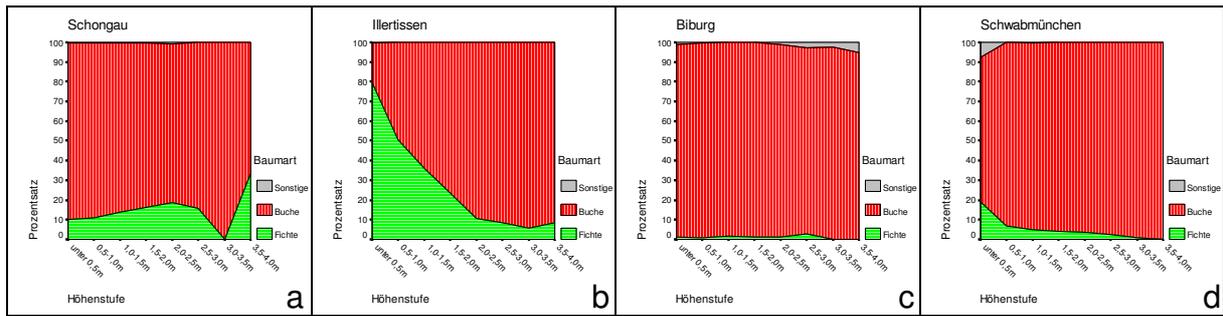


Abbildung 5 a-d: Anteile der Baumarten an der Verjüngung je Höhenstufe; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS

Die folgenden Abbildungen wurden mit dem GIS-Programm ArcView erstellt und geben die Verjüngungsverhältnisse auf den Versuchsflächen vor den Hieben räumlich wieder. Die Informationen der Probekreise wurden dabei interpoliert. Daneben werden verjüngungsfreie Bereiche und Rückegassen visualisiert. Die Abbildungen 6a bis 6d zeigen die maximalen Höhen der Verjüngungsbäume. Entlang der Rückegassen war entweder keine Verjüngung vorhanden oder sie war deutlich niedriger als in der Bestandestiefe. Die bereits angesprochene höhere Verjüngung auf den Eichen-Buchen-Flächen ist gut erkennbar. Auffällig sind außerdem die wenig systematisch angelegten Rückegassen auf den beiden Eichen-Buchen-Flächen (Abb. 6c und 6d).

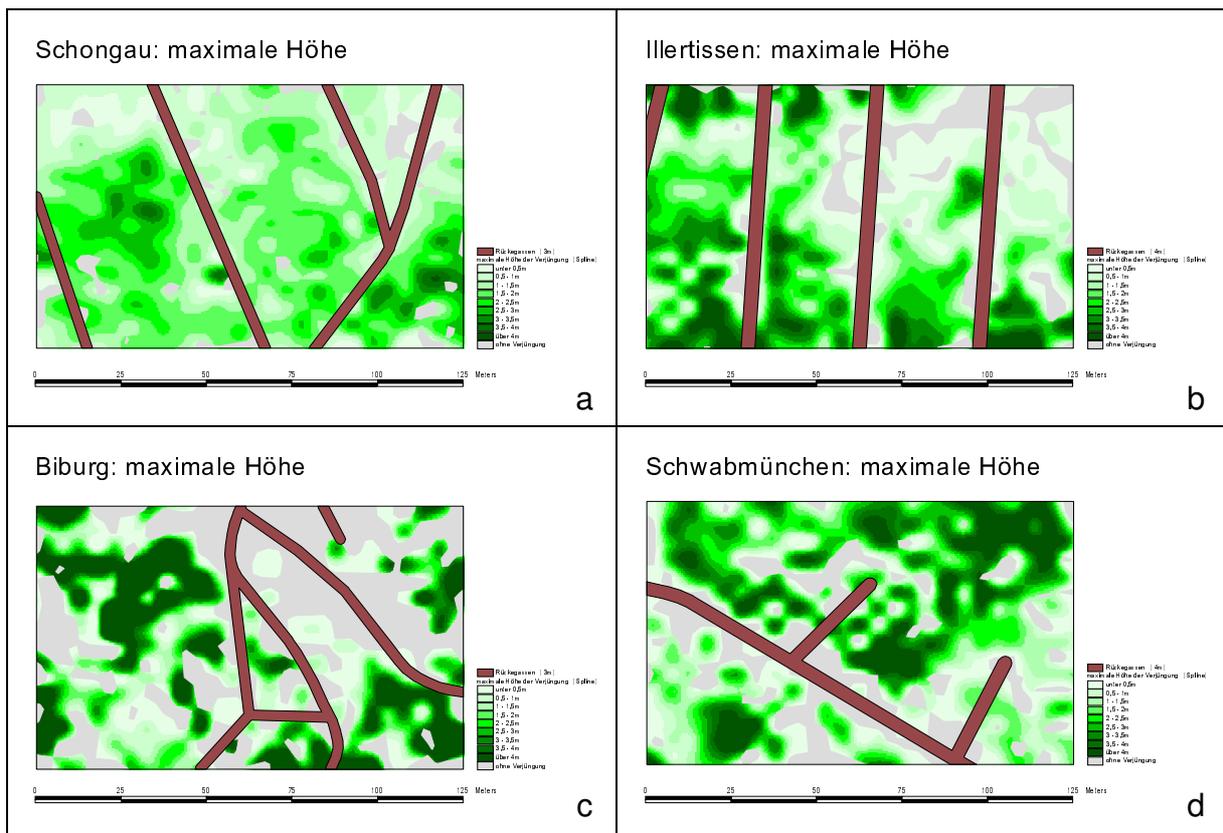


Abbildung 6 a-d: Maximale Höhe der Verjüngung vor den Hieben; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS

Die Abbildungen 7a bis 7d zeigen die bereits in der Abbildung 4 a-d erkennbaren deutlich höheren Stammzahlen der Verjüngung auf den beiden Fichten-Buchen-Flächen. Auf den beiden Eichen-Buchen-Flächen, vor allem in Biburg, war der Anteil an verjüngungsfreier Bestandesfläche vergleichsweise hoch.

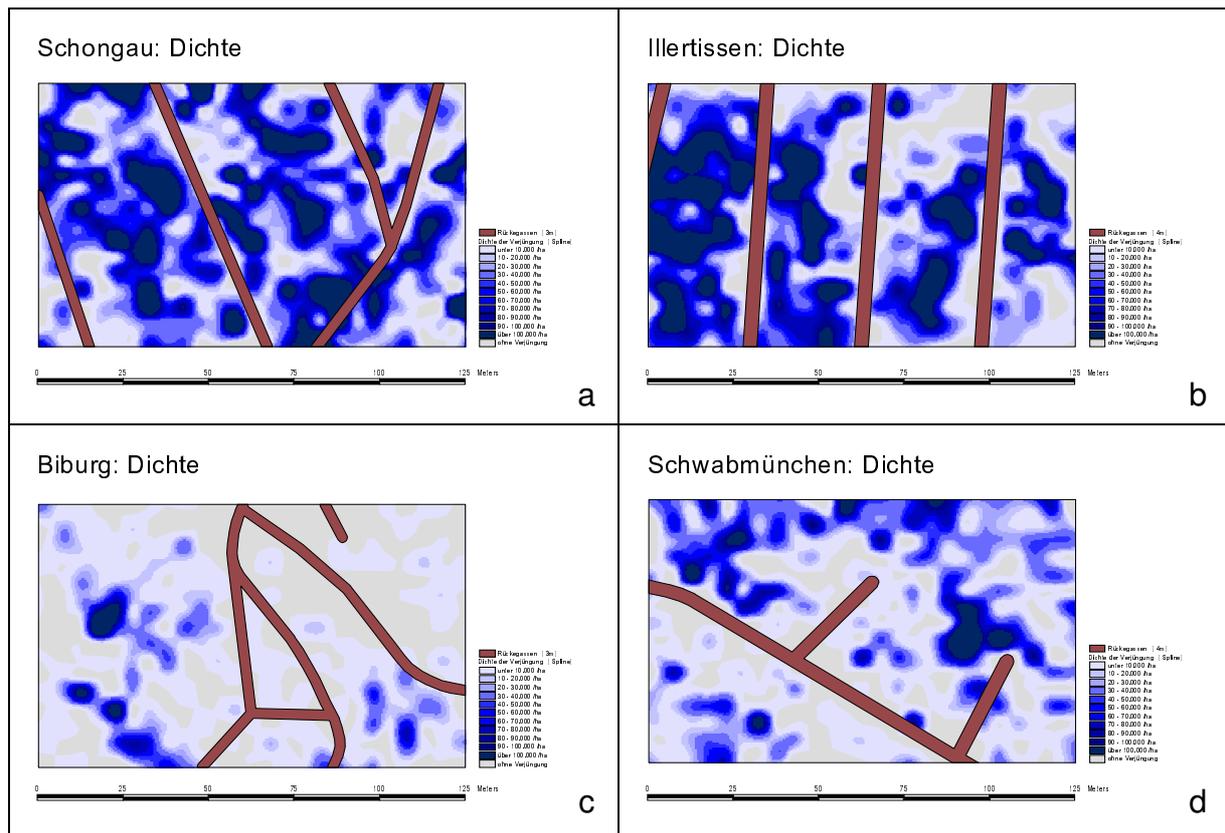


Abbildung 7 a-d: Dichte der Verjüngung vor den Hieben; motormanuelle Holzernte, Versuchsfächen ZEUS

3.1.1.3 Auswirkungen des Hiebes auf die Verjüngung

Das Gesamtschadprozent (der Anteil vom Hieb betroffener Bäume) unterschied sich auf den Versuchsfächen deutlich. Auf der Versuchsfäche im FoA Schongau war mit 8,1% sehr wenig Verjüngung betroffen, während auf der zweiten Fichten-Buchen-Fäche im FoA Illertissen das Gesamtschadprozent mit 16,9% mehr als doppelt so hoch ausfiel (Tab. 3). Dies lässt sich wahrscheinlich auf die in Illertissen höhere Anzahl entnommener Bäume zurückführen. Außerdem wurden in Schongau viele Bäume aus der Versuchsfäche heraus gefällt (siehe Abb. 10a, S. 23) und verursachten so wenig bis keine Schäden auf der Versuchsfäche.

Tabelle 3: Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozent) nach Baumarten; motormanuelle Holzernte, FI/BU-Versuchsfächen ZEUS

	Schongau			Illertissen		
	fehlend	beschädigt	betroffen	fehlend	beschädigt	betroffen
Fichte	5.4	2.6	8.0	13.3	4.4	17.7
Buche	7.0	1.1	8.1	10.0	5.4	15.4
Sonstige	0	4.6	4.6	45.5	0	45.5
Gesamt	6.8	1.3	8.1	12.1	4.8	16.9

Ähnlich viele Verjüngungsbäume waren mit 15,9% auf der Versuchsfläche im FoA Schwabmünchen betroffen, während es auf der anderen Eichen-Buchen-Fläche (FoA Biburg) sogar 21,1% waren (Tab. 4).

Tabelle 4: Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; motormanuelle Holzernte, EI/BU-Versuchsflächen ZEUS

	Biburg			Schwabmünchen		
	fehlend	beschädigt	betroffen	fehlend	beschädigt	betroffen
Fichte	0	0	0	9.6	3.4	13.0
Buche	15.3	6.1	21.4	14.0	2.1	16.0
Sonstige	11.1	5.6	16.7	19.2	0	19.2
Gesamt	15.1	6.0	21.1	13.7	2.1	15.9

Die Anteile fehlender Bäume lagen für jede Baumart und jede Versuchsfläche deutlich über den Anteilen beschädigter Bäume. In der Regel fehlten mehr Buchen als Fichten, Ausnahme war die Fläche im FoA Illertissen. Hier war allerdings die Fichtenverjüngung mit im Mittel knapp 50cm Höhe deutlich niedriger als die Buchenverjüngung mit durchschnittlich gut 120cm Höhe (siehe Tab. 2, S. 18). Die Unterschiede in den Schäden lassen sich in Abbildung 8a gut erkennen.

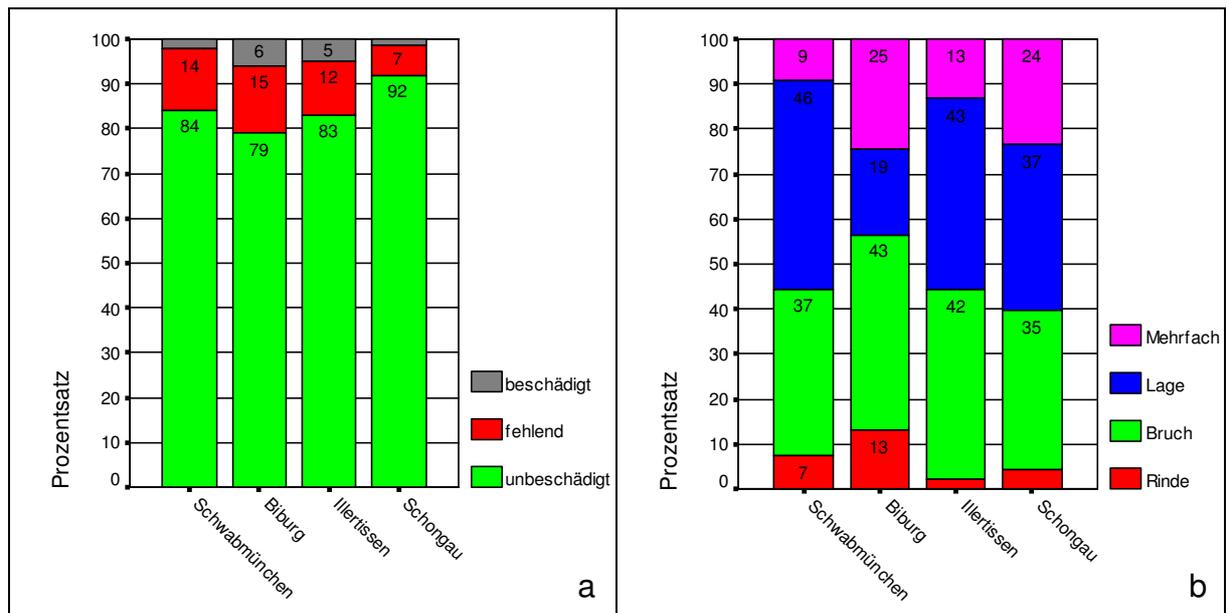


Abbildung 8 a+b: Anteile unbeschädigter, beschädigter und fehlender Verjüngung (a) und Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen (b); motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS

Die beschädigten Bäume können verschiedenen Gruppen von Schäden zugeordnet werden (siehe Kap. 2.3.3.3). Die Abbildung 8b zeigt die Anteile der vier Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen auf den vier Versuchsflächen. Zwischen den Versuchsflächen bestanden teils gravierende Unterschiede, die wohl nur teilweise auf die unterschiedliche Zusammensetzung und Höhe der Verjüngung zurückgeführt werden können. Bei den Fichten-Buchen-Flächen wies Schongau mehr als doppelt so große Anteile an Rinden- und Mehrfachschäden auf. In Illertissen dagegen kamen mehr Rindenschäden und Lageveränderungen vor. Die Eichen-Buchen-Flächen unterschieden sich dahingehend noch deutlicher. In Biburg

waren die Anteile von Rinden- und Mehrfachschäden ungefähr doppelt so hoch wie in Schwabmünchen, dafür wies Illertissen drastisch mehr Lageveränderungen auf. Die Abbildungen 9a und 9b geben für die einzelnen Versuchsflächen die mittels binär logistischer Regression hergeleiteten Wahrscheinlichkeiten für einen Verjüngungsbaum bestimmter Höhe an, nach dem Hieb vernichtet, beschädigt vorhanden oder insgesamt betroffen gewesen zu sein. Die Funktionen für fehlende und beschädigte Verjüngung (Abb. 9a) wurden dabei getrennt voneinander berechnet, die Kurve „betroffen“ ergibt sich aus der Addition der Kurven „fehlend“ und „beschädigt“ (Abb. 9b).

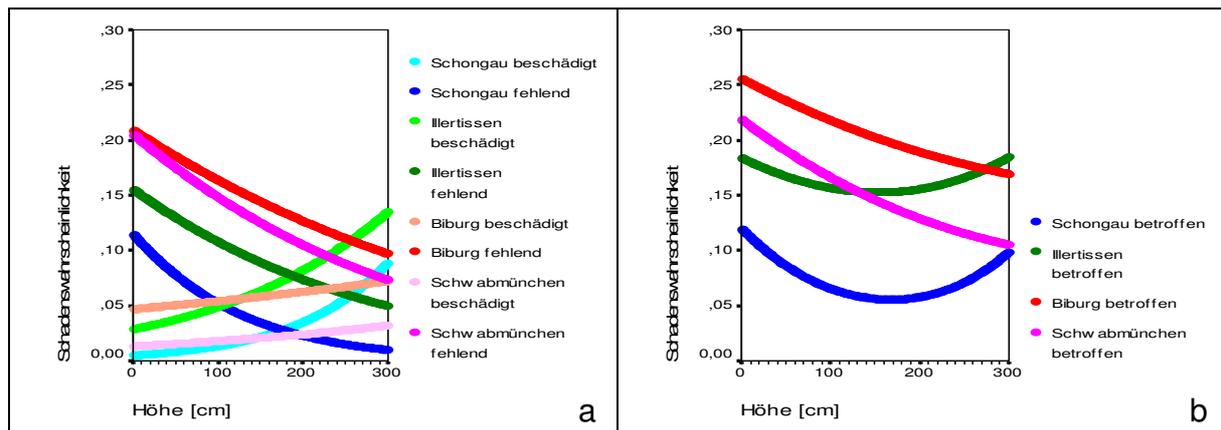


Abbildung 9 a+b: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS

Auf allen vier Flächen stieg mit zunehmender Höhe eines Verjüngungsbaums für ihn die Wahrscheinlichkeit an, nach dem Hieb beschädigt zu sein, während die Wahrscheinlichkeit, nach dem Hieb zu fehlen, sank. Die Wahrscheinlichkeit, insgesamt vom Hieb betroffen zu sein, sank mit zunehmender Höhe des Verjüngungsbaums auf den beiden Eichen-Buchen-Flächen. Auf den Fichten-Buchen-Flächen dagegen zeigte sich insgesamt eine minimale Schadenswahrscheinlichkeit im Höhenbereich zwischen einem und zwei Metern (Abb. 9b). Die folgenden Abbildungen 10a bis 10d zeigen die Verteilung der gesamten Schäden im Bestand sowie die Lage der gefällten Bäume (nur bei den Versuchsflächen Schongau und Biburg). Vor allem bei den Fichten-Buchen-Flächen Schongau und Illertissen lässt sich eine Konzentration der Schäden an den Rückegassen gut erkennen. In Schwabmünchen und vor allem in Biburg wurde dieser Effekt durch die wenig homogene Feinerschließung verwischt. Diese Beobachtungen werden auch durch die Abbildungen 11a und 11b bestätigt. Diese geben die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Verjüngungsbaum abhängig von seiner Entfernung zur nächsten Rückegasse fehlend oder beschädigt (Abb. 11a) bzw. insgesamt betroffen (Abb. 11b) war. Das Risiko zu fehlen nahm bei allen Flächen außer in Biburg mit zunehmender Entfernung von der Rückegasse ab, während sich das Risiko einer Beschädigung kaum mit zunehmender Entfernung von der Rückegasse veränderte. In Rückegassennähe fehlten also vermehrt Bäume.

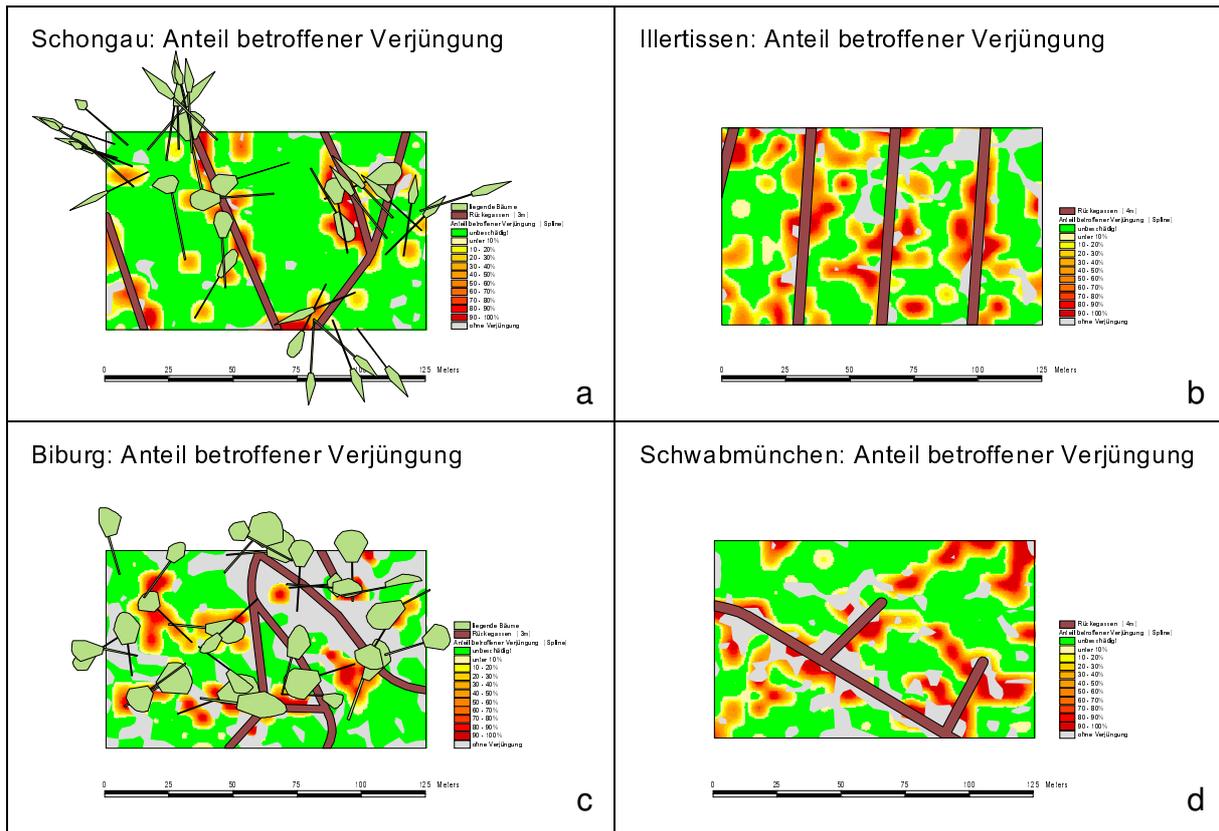


Abbildung 10 a-d: Räumliche Verteilung der Schäden im Bestand; betroffene Verjüngung, motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS

Die bereits angesprochene (Abb. 10a+b) deutliche Konzentration der Gesamtschäden an den Rückegassen im Falle der beiden Fichten-Buchen-Flächen zeigt sich ebenfalls in Abbildung 11b. Bei den Eichen-Buchen-Flächen war dies dagegen kaum (Schwabmünchen) oder gar nicht (Biburg) zu beobachten. Diese deutlichen Unterschiede bei der Verteilung der Schäden im Bestand sind vermutlich größtenteils auf die völlig unterschiedliche Feinerschließung zurückzuführen.

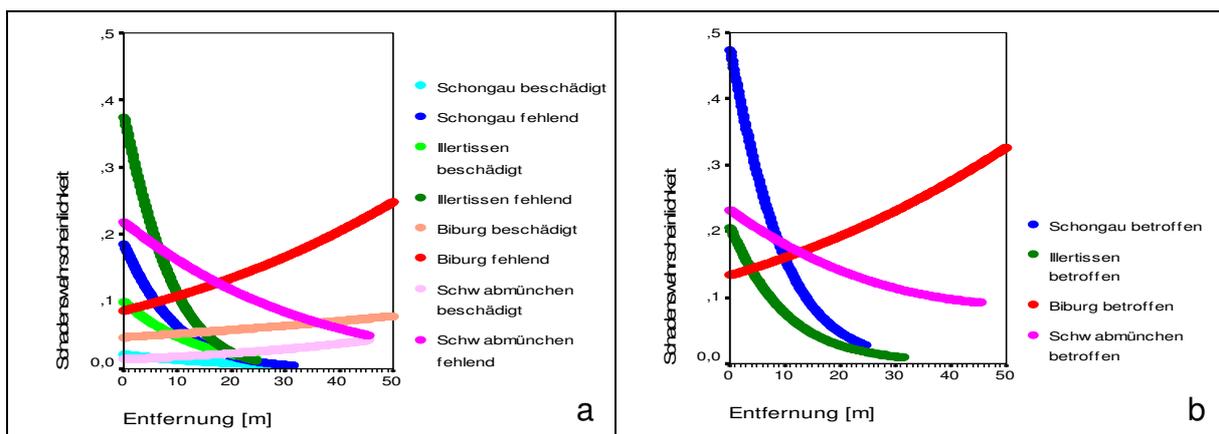


Abbildung 11 a+b: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Entfernung von der Rückegasse nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; motormanuelle Holzernte, Versuchsflächen ZEUS

3.1.2 Hochmechanisierte Holzernteverfahren

3.1.2.1 Arbeitsverfahren und Holzerntemaßnahmen

Die Bearbeitung der beiden Versuchflächen im **Forstamt Selb** wurde vom Maschinenbetrieb Bayreuth übernommen. Zur Durchführung wurde ein Harvester des Typs Timberjack 1270A mit einer maximalen Kranreichweite von 10m eingesetzt. Die technischen Daten der Maschine finden sich im Anhang 9.2.

Der Einschlag erfolgte ausschließlich mit dem Harvester ohne motormanuelle Unterstützung. Der Bestand wurde von den Rückegassen aus systematisch bearbeitet. Die zu entnehmenden Bäume wurden vom Vollernter im rechten Winkel zur Rückegasse gefällt, um dann vom Erdstammstück her aufgearbeitet zu werden. Die entstehenden Stammabschnitte wurden seitlich an der Rückegasse abgelegt. Dieses Arbeitsverfahren entspricht der normalen Vorgehensweise bei der Holzernte mit Harvestern in Vornutzungsbeständen.

Die Daten zu den durchgeführten Hieben finden sich in Tabelle 5 wieder. Es wurden auf beiden Versuchflächen ausschließlich Fichten gefällt.

Tabelle 5: Daten zum entnommenen Bestand; hochmechanisierte Holzernte, Versuchflächen FoA Selb, je 0,25ha

	N	Ø BHD [cm]	Ø h [m]	Ø kra [m]	G [m ²]	V ₁ [Vfm m.R.]	V ₂ [Efm o.R.]
Selb 1	21	32.7	26.5	13.8	1.8	23.7	19.2
Selb 2	17	32.2	26.3	12.9	1.4	18.6	15.1

Die Rückegassenabstände betragen bei beiden Versuchflächen fast genau 30m. Dadurch blieb eine schmale Zwischenzone, die nicht vom Harvester bearbeitet werden konnte (Abb. 12 a+b). Einzelne ausgezeichnete Bäume konnten daher nicht mit dem Kran erreicht werden und blieben stehen.

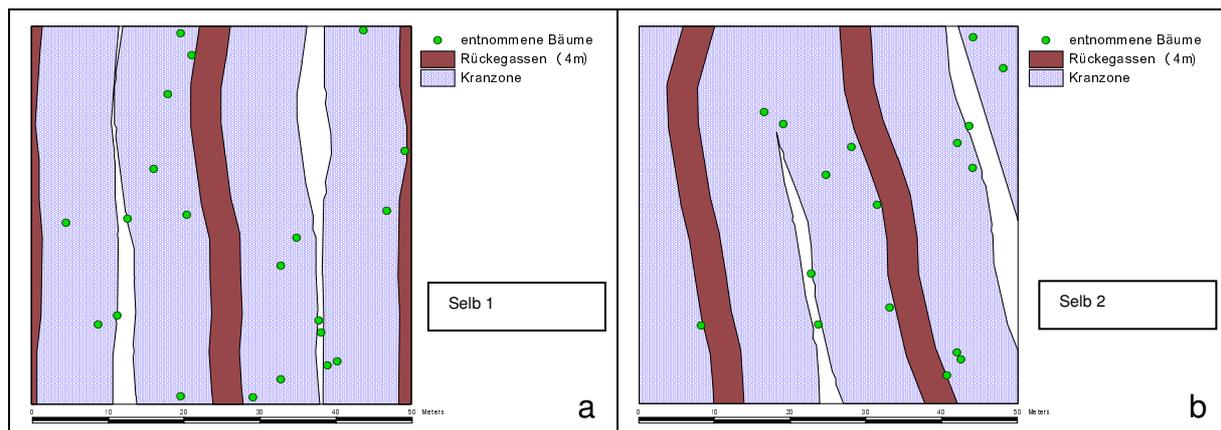


Abbildung 12 a+b: Rückegassen, Kranzonen und entnommene Bäume; hochmechanisierte Holzernte, Versuchflächen FoA Selb

Im **Forstamt Heigenbrücken** war der Maschinenbetrieb Rechtenbach mit dem Harvester Ponsse Ergo im Einsatz. Die Maschine verfügt über einen 10m-Kran, an dem das Ponsse Harvesteraggregat H73 angebracht ist (siehe Anhang 9.2).

Weil die Holzstärke der beiden Bestände am oberen Limit der eingesetzten Maschine lag, wurde dort das bereits beschriebene Standard-Harvesterverfahren der Holzdimension angepasst. Bei standardmäßigem Vorgehen war zwar die Fällung stärkerer Baumindividuen noch möglich, ein zum Aufarbeiten notwendiges, seitliches Beiziehen allerdings überschritt die Kraft des Harvesters - insbesondere bei größeren Entfernungen zur Rückegasse. Zum einen spielte dabei das hohe Gewicht der einzelnen Bäume eine entscheidende Rolle, zum anderen erschwerten die im Versuchsbestand verhältnismäßig großen Kronen die Aufarbeitung. Sie verhängten sich zwischen den Bäumen des verbleibenden Bestandes bzw. verankerten sich mit den Ästen, die durch die Fällung in den Boden gerammt wurden. Aus diesem Grund wurden derart starke Stämme von der gerade befahrenen Rückegasse aus auf eine benachbarte Gasse mit dem Harvester zugefällt und zunächst liegen gelassen. War die Rückegasse, auf die zugefällt wurde, erreicht, so arbeitete die Maschine alle zu entnehmenden Bäume auf, bis sie an dem beigefällten Vollbaum angekommen war. Wurde dagegen auf eine bereits bearbeitete Rückegasse gefällt, so musste diese nochmals befahren und die zugefallten Bäume aufgearbeitet werden.

Es wurde zunächst der Kronenteil abgetrennt und aufgearbeitet. Der verbleibende Schaftteil wurde danach seitlich beigezogen, bis das erdseitige Stammende mit dem Aggregat erreicht werden konnte. Ein Teilentasten bei diesem Arbeitsschritt verminderte möglicherweise die Schäden in dem Bestandesteil, in den der Stamm eingeschoben wurde. Anschließend wurde mit dem Aufarbeiten nach dem Standardschema begonnen und der Stamm vollends aufgearbeitet. Bei besonders starken oder langen Stämmen war ein Aufarbeiten vom Zopf her notwendig, weil die Restschäfte auch nach Abtrennen der Krone immer noch nicht ausreichend manipulierbar waren.

Auf Versuchsfläche 1 wurden nur Fichten, auf Versuchsfläche 2 daneben auch drei Stroben gefällt. Die wichtigsten Daten zum entnommenen Bestand sind in Tabelle 6 zu finden. Der mittlere BHD lag mit knapp 40cm deutlich über dem mittleren BHD der Versuchsflächen im FoA Selb (~32cm, siehe Tab. 5).

Tabelle 6: Daten zum entnommenen Bestand; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Heigenbrücken, je 0,25ha

	N	Ø BHD [cm]	Ø h [m]	Ø kra [m]	G [m ²]	V ₁ [Vfm m.R.]	V ₂ [Efm o.R.]
Heigenbrücken 1	18	39.8	29.8	14.5	2.3	33.4	27.1
Heigenbrücken 2	21	39.0	31.1	17.2	2.6	38.6	31.1

Der mittlere Abstand von Rückegassenmitte zu Rückegassenmitte war bei Versuchsfläche 1 mit 27m etwas kleiner als bei Versuchsfläche 2 mit 33m (Abb. 13 a+b). Die Rückegassen wurden teilweise im Zuge des Hiebes neu angelegt, da das bestehende Rückegassennetz Abstände von über 50m aufwies. Die beiden Bäume am linken Rand der zweiten Versuchsfläche wurden offensichtlich von der nächsten Gasse außerhalb der Fläche entnommen.

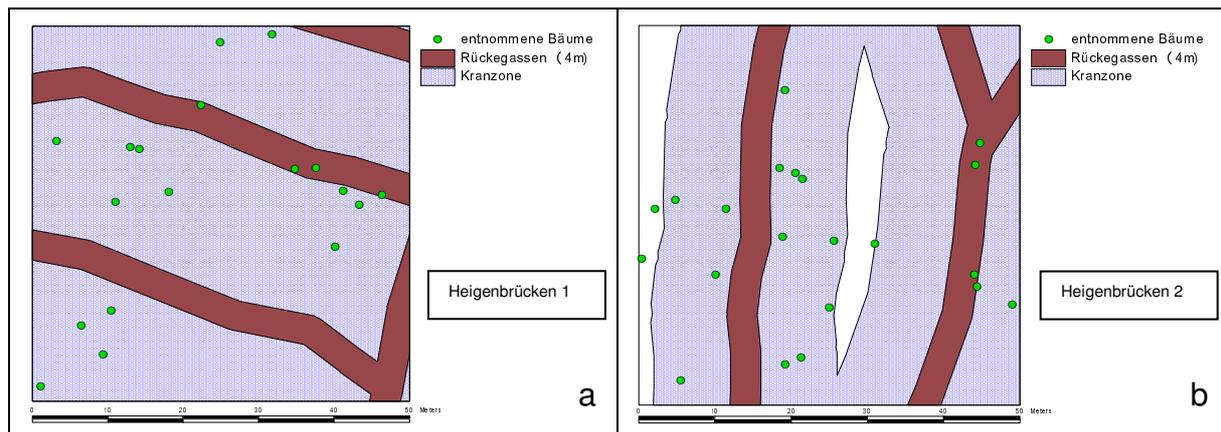


Abbildung 13 a+b: Rückegassen, Kranzonen und entnommene Bäume; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsfelder FoA Heigenbrücken

3.1.2.2 Die Verjüngung vor dem Hieb

Aus Sicht der Verjüngung waren sich die vier Versuchsfelder zu den Auswirkungen von hochmechanisierter Holzernte ähnlich. Mit Ausnahme der Fläche Heigenbrücken 2 war die Fichte fast die einzige Baumart in der Verjüngung (Tab. 7). Dabei lag die mittlere Höhe der Verjüngungsfichten zwischen 40cm und 65cm, und auf allen Flächen kamen einzelne Exemplare mit Höhen über 5m vor. Buchen kamen nur in Heigenbrücken vor, allerdings auch dort in kaum nennenswertem Umfang. Auf der Versuchsfeld Heigenbrücken 2 waren dazu neben Stroben auch gelegentlich Douglasien in der Verjüngung zu finden.

Tabelle 7: Kenndaten zur Verjüngung; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsfelder FoA Selb und FoA Heigenbrücken

Versuchsfeld		Fichte	Buche	Sonstige	Gesamt
Selb 1	N/ha	46440	0	40	46480
	h mitt [cm]	64.9		177.5	65.0
	h max [cm]	545		178	545
Selb 2	N/ha	57160	0	40	57200
	h mitt [cm]	50.9		512.0	51.2
	h max [cm]	548		512	548
Heigenbrücken 1	N/ha	80120	2520	1160	83800
	h mitt [cm]	40.2	143.1	54.5	43.5
	h max [cm]	508	390	212	508
Heigenbrücken 2	N/ha	32400	560	8480	41440
	h mitt [cm]	58.1	102.8	81.0	63.4
	h max [cm]	518	178	488	518

Die Stammzahlverteilungen in den Abbildungen 14a bis 14d demonstrieren ebenfalls die Ähnlichkeit der Versuchsfelder. Allerdings sind bei der Versuchsfeld Heigenbrücken 1 (Abb. 14c) die im Vergleich mit den anderen Flächen deutlich höheren und die auf der Fläche Heigenbrücken 2 (Abb. 14d) etwas niedrigeren Stammzahlen zu erkennen.

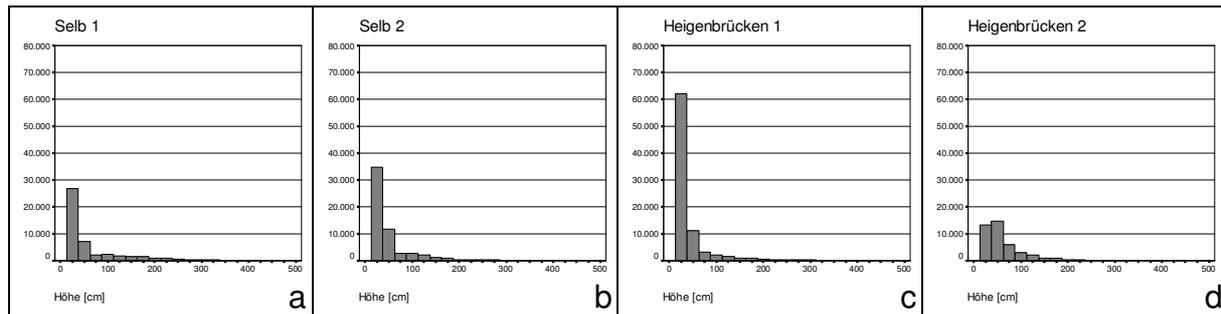


Abbildung 14 a-d: Stammzahlverteilung je Höhenstufe; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsfelder FoA Selb und FoA Heigenbrücken

Die folgenden Abbildungen 15a bis 15d machen deutlich, dass auf den beiden Flächen im FoA Selb neben der Fichte kaum andere Baumarten vorkamen. Auf der Versuchsfeldfläche Heigenbrücken 1 hatte die Buche im mittleren Höhenbereich zwischen 1m und 3m durchaus nennenswerte Anteile an der Verjüngung, während bei der Fläche Heigenbrücken 2 die erwähnten Stroben und Douglasien eher im unteren Höhenbereich (bis 2m) zu finden waren.

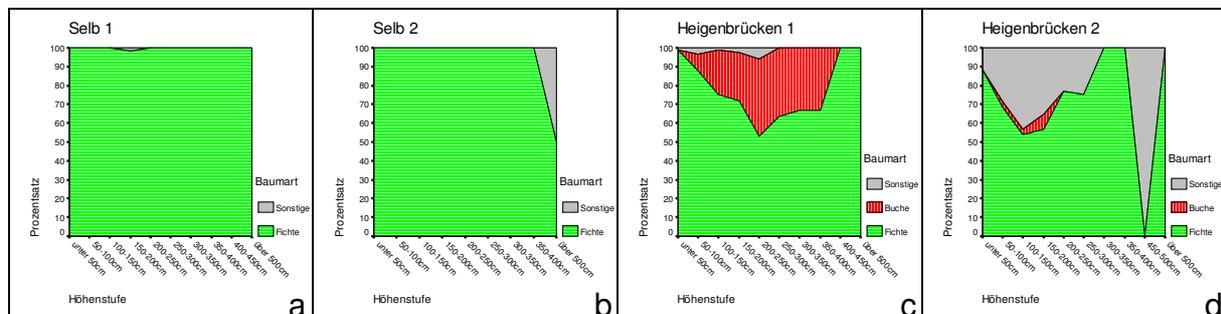


Abbildung 15 a-d: Anteile der Baumarten an der Verjüngung je Höhenstufe; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsfelder FoA Selb und FoA Heigenbrücken

Die räumliche Darstellung der Verjüngungssituation vor den Hieben (Abb. 16 a-d) offenbart auf allen vier Flächen eine recht gleichförmige Verjüngung mit einzelnen, kleineren verjüngungsfreien Bereichen und verstreuten Gruppen höherer Verjüngung. Hier lassen sich außerdem hervorragend im Zuge der Holzernte neu angelegte Rückegassen von bereits vorher bestehenden unterscheiden. So führt beispielsweise die mittlere der drei Gassen auf der Fläche Selb 1 teils direkt durch höhere Verjüngungsbereiche hindurch, ein deutlicher Hinweis auf eine neu angelegte Gasse. Im Gegensatz dazu bestand die linke Gasse bereits vor der Holzerntemaßnahme, sie führt durch niedrige oder gar verjüngungsfreie Bereiche. Hier wurde die Verjüngung, die sich in der Umgebung der Rückegasse befand, im Zuge früherer Hiebe bereits zerstört. Die Abbildungen 17a bis 17d schließlich zeigen die räumliche Verteilung der Stammzahl der Verjüngung. Die im Vergleich höhere Stammzahl auf der Fläche Heigenbrücken 1 ist gut zu erkennen.

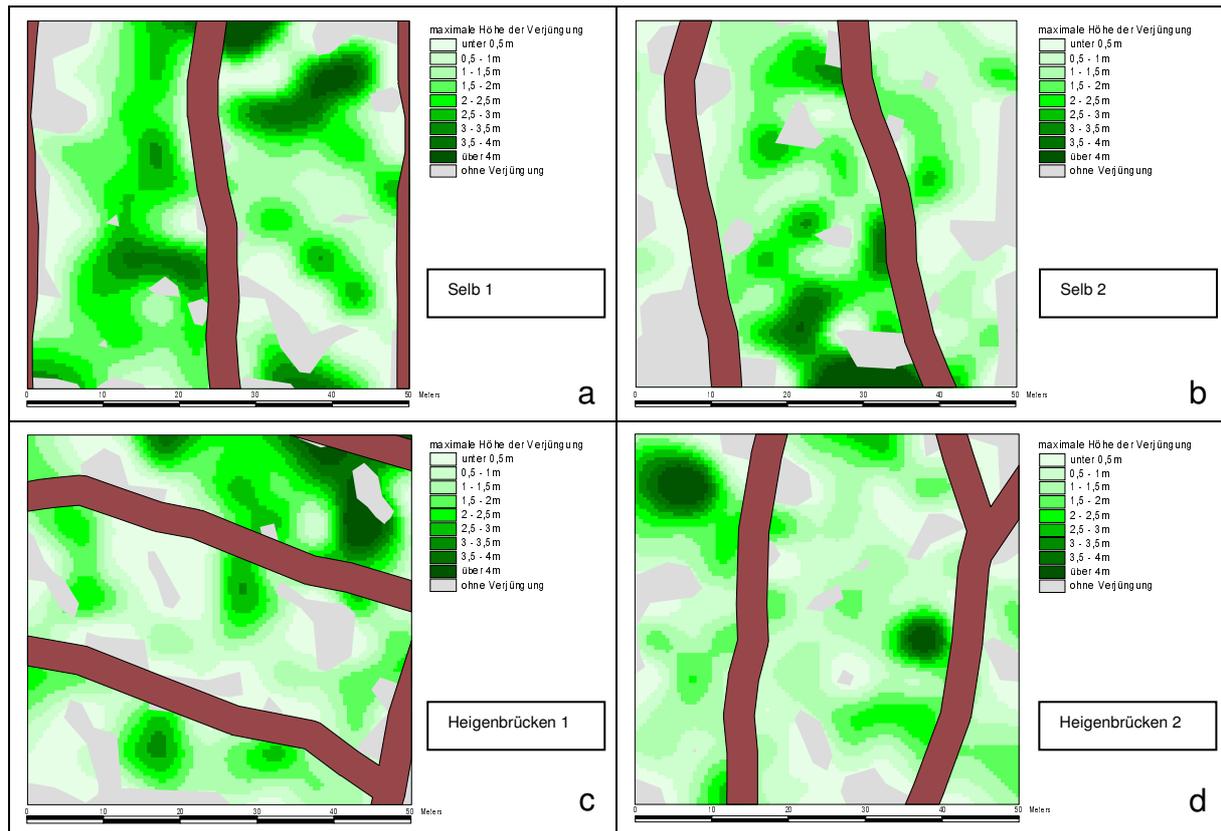


Abbildung 16 a-d: Maximale Höhe der Verjüngung vor den Hieben; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsfächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken

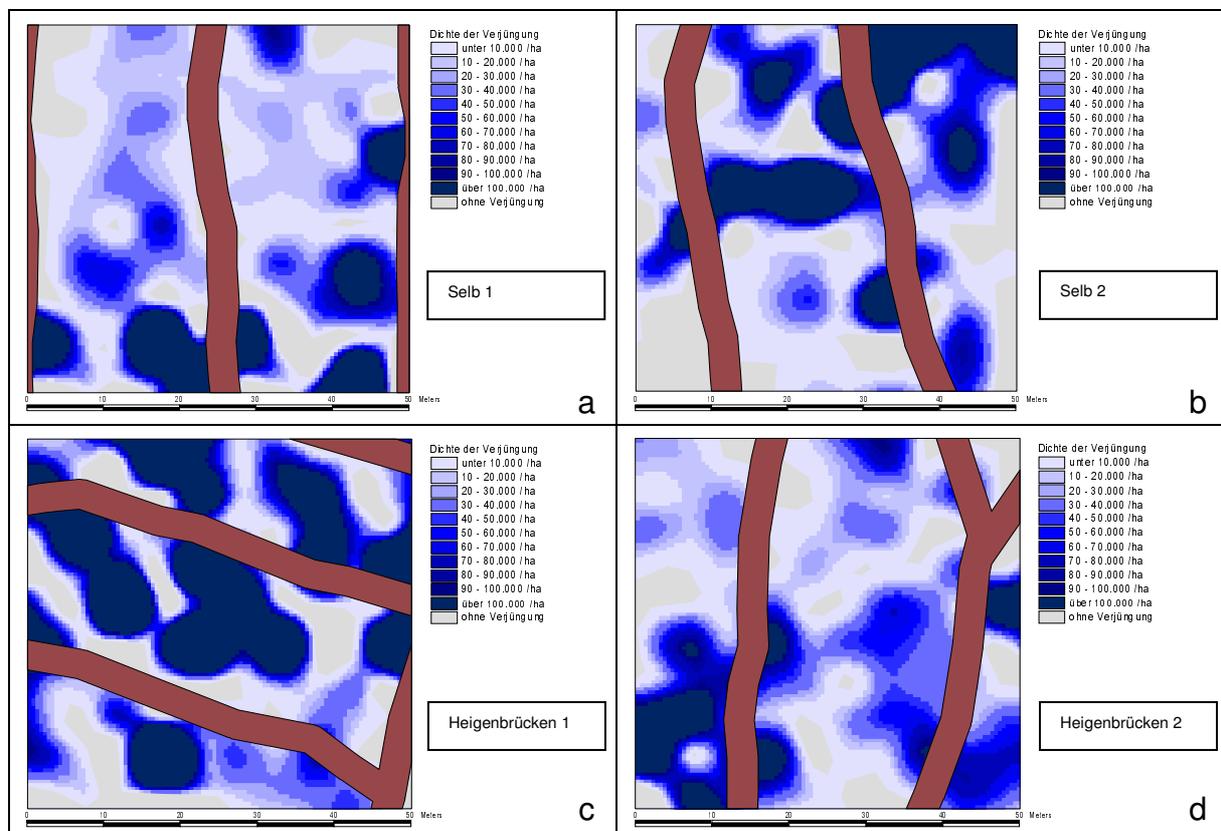


Abbildung 17 a-d: Dichte der Verjüngung vor den Hieben; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsfächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken

3.1.2.3 Auswirkungen des Hiebes auf die Verjüngung

Die Auswirkungen der einzelnen Hiebe auf die Verjüngung der vier Versuchsflächen unterschieden sich teilweise sehr deutlich. So betrug der Anteil fehlender Verjüngungsbäume zwischen knapp 8% auf der Fläche Selb 2 und über 25% auf der Fläche Heigenbrücken 2 (Tab. 8 und 9). Der Anteil beschädigt vorhandener Verjüngung schwankte dagegen weniger stark. Er lag zwischen gut 12% auf der Fläche Selb 2 und über 20% auf der Fläche Heigenbrücken 2.

Tabelle 8: Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb

	Selb 1			Selb 2		
	fehlend	beschädigt	betroffen	fehlend	beschädigt	betroffen
Fichte	19.3	14.7	34.0	7.6	12.2	19.7
Buche	-	-	-	-	-	-
Sonstige	0.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0
Gesamt	19.3	14.8	34.1	7.6	12.2	19.7

Vergleicht man die beiden von den Rahmenbedingungen her sehr ähnlichen Versuchsflächen Selb 1 und 2 miteinander (Tab. 8), so fällt vor allem der deutlich höhere Anteil fehlender Verjüngung auf der ersten Fläche auf. Er war fast dreimal so hoch wie bei der zweiten Versuchsfläche. Infolgedessen unterschied sich auch das Gesamtschadprozent, also der Anteil vom Hieb betroffener Verjüngungsbäume, mit 34% bzw. knapp 20% beträchtlich voneinander. Bemerkenswerterweise wurden auf der Fläche Selb 2 zudem mehr Bäume beschädigt als vernichtet („fehlend“).

Tabelle 9: Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Heigenbrücken

	Heigenbrücken 1			Heigenbrücken 2		
	fehlend	beschädigt	betroffen	fehlend	beschädigt	betroffen
Fichte	20.1	12.9	33.0	23.7	19.6	43.3
Buche	17.5	22.2	39.7	7.1	28.6	35.7
Sonstige	51.7	24.1	75.9	34.0	23.6	57.6
Gesamt	20.5	13.4	33.8	25.6	20.6	46.1

Im Vergleich dazu waren sich die Schäden auf den beiden Versuchsflächen im FoA Heigenbrücken ähnlicher. Es fehlten mehr Fichten, als beschädigt vorhanden waren, während es bei der Buche genau entgegengesetzt war. Im Vergleich der beiden Baumarten fehlten mehr Fichten als Buchen, während mehr Buchen als Fichten beschädigt wurden (Tab. 9). Insgesamt wies die zweite Fläche mit 46% gegenüber knapp 34% allerdings deutlich mehr Schäden auf. Sowohl der Anteil fehlender als auch der Anteil beschädigter Bäume lag höher als auf der ersten Fläche. Die Abbildung 18a zeigt die deutlichen Unterschiede zwischen den vier Versuchsflächen bezüglich der entstandenen Verjüngungsschäden.

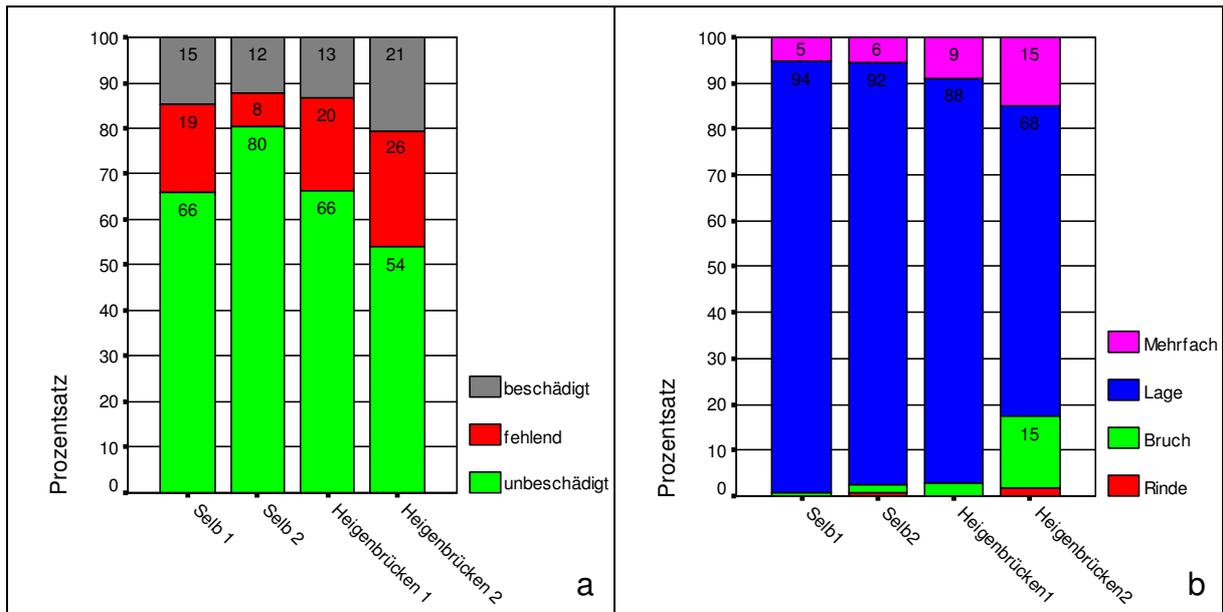


Abbildung 18 a+b: Anteile unbeschädigter, beschädigter und fehlender Verjüngung (a) und Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen (b); hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken

Bei den beschädigten Bäumen waren es auf allen Flächen vor allem Veränderungen der Lage, die den Großteil der Schäden ausmachten (Abb. 18b). Andere Schäden traten deutlich seltener auf, Rindenschäden z.B. waren kaum zu finden. Brüche konnten lediglich auf der Versuchsfläche Heigenbrücken 2 in nennenswertem Umfang beobachtet werden. Hier waren auch die häufigsten Mehrfachschäden, also Kombinationen einzelner Schadensarten, zu finden.

Die Abbildungen 19a und 19b zeigen den Zusammenhang von Schaden und Höhe der Verjüngung als Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum bestimmter Höhe nach dem Hieb beschädigt, fehlend oder betroffen war.

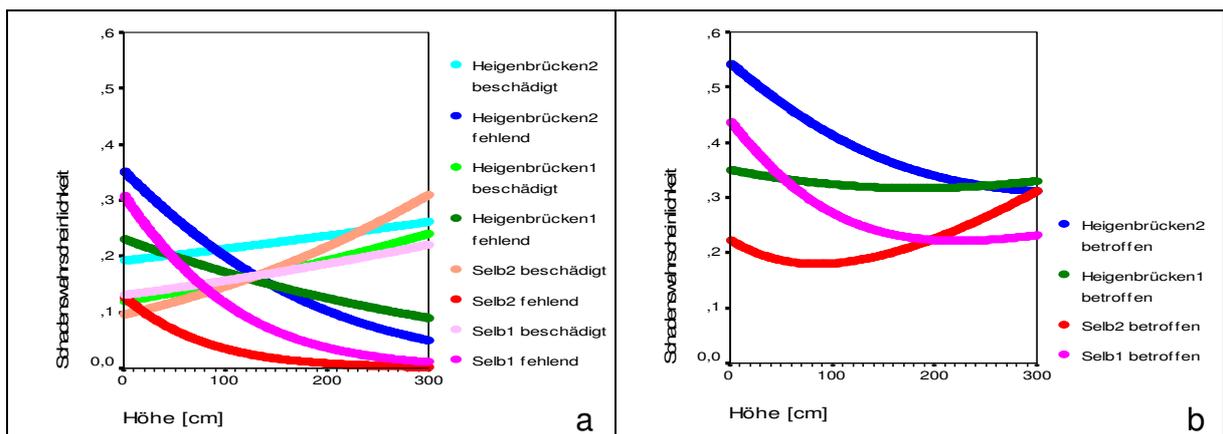


Abbildung 19 a+b: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken

Die Wahrscheinlichkeit, nach dem Hieb zu fehlen, nahm auf allen Versuchsflächen mit steigender Höhe ab, wohingegen die Wahrscheinlichkeit, nach dem Hieb beschädigt zu sein, mit steigender Höhe zunahm (Abb. 19a). Als Summe dieser gegenläufigen Trends resultieren die Kurven in Abbildung 19b, die die

Wahrscheinlichkeit angeben, mit der ein Verjüngungsbaum vom Hieb betroffen wurde. Mit Ausnahme der Fläche Heigenbrücken 2 ist bei allen Versuchsflächen ein Höhenbereich vorhanden, in dem die Gesamtschadenswahrscheinlichkeit minimal wird. Dieser liegt auf der Fläche Selb 2 bei ungefähr einem Meter, auf den Flächen Selb 1 und Heigenbrücken 1 zwischen 1,5m und 2,5m.

Die Verteilung der Schäden auf den Versuchsflächen orientierte sich in allen Fällen deutlich am Rückegassennetz (Abb. 20 a-d). Unbeschädigte (grüne) Bereiche existieren fast nur in den Zonen zwischen den einzelnen Gassen. Daneben sind bei Betrachtung der Abbildungen 20a bis 20d sowohl das vergleichsweise hohe Schadprozent auf der Versuchsfläche Heigenbrücken 2 als auch das vergleichsweise niedrige Schadprozent auf der Versuchsfläche Selb 2 gut erkennbar.

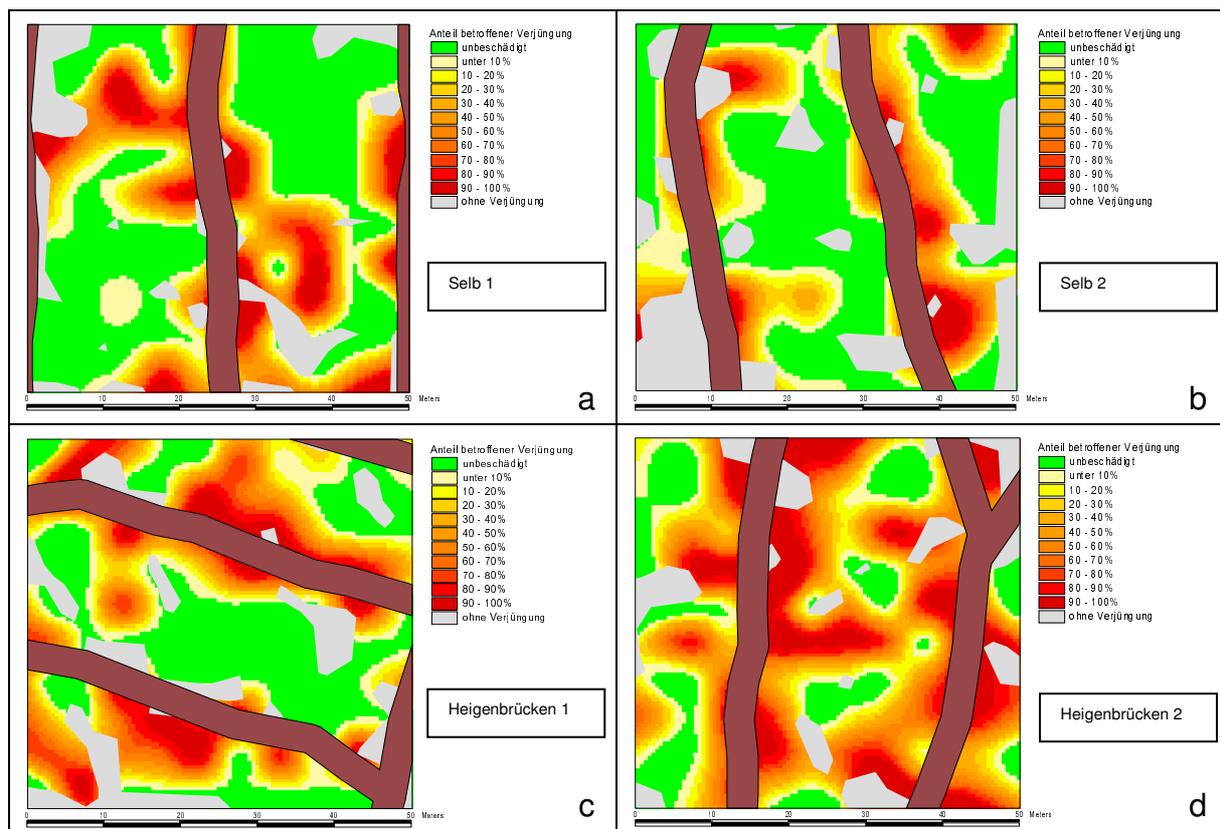


Abbildung 20 a-d: Räumliche Verteilung der Schäden im Bestand; betroffene Verjüngung, hochmechanisierte Holzerte, Versuchsflächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken

Die Konzentration der Schäden an den Rückegassen wird in den Abbildungen 21a und 21b noch deutlicher. Die Kurven wurden mittels logistischer Regression errechnet und zeigen die Schadenswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Entfernung des Verjüngungsbaumes von der nächsten Rückegasse.

Die Wahrscheinlichkeit für einen Verjüngungsbaum, nach dem Hieb zu fehlen, nahm auf allen vier Versuchsflächen mit zunehmender Entfernung von der Rückegasse ab (Abb. 21a). Die fehlenden Bäume konzentrierten sich somit deutlich an den Rückegassen. Bei den beschädigten Bäumen dagegen zeigte sich keine solche Konzentration. Die Beschädigungen verteilten sich fast gleichmäßig im Bestand.

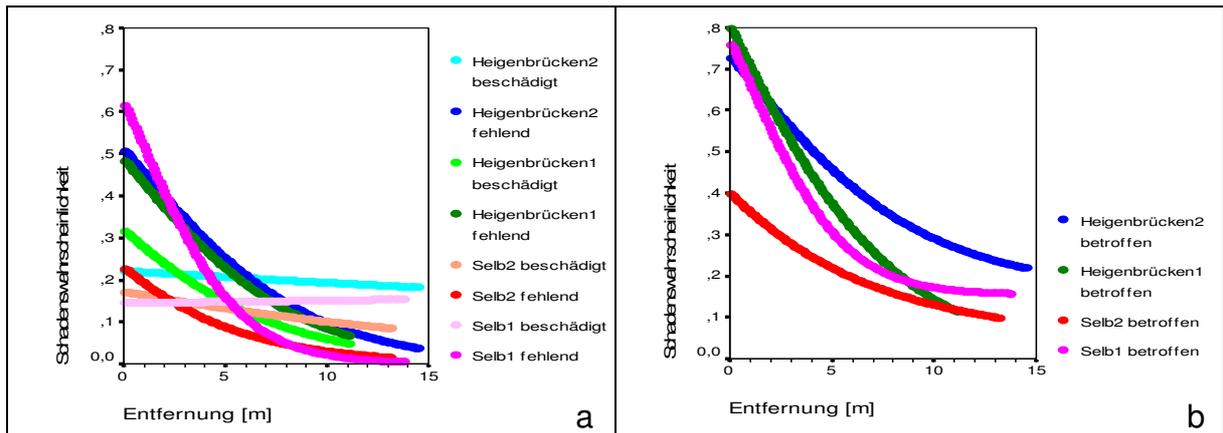


Abbildung 21 a+b: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Entfernung von der Rückegasse nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; hochmechanisierte Holzernte, Versuchsfächen FoA Selb und FoA Heigenbrücken

Insgesamt nahm auf allen vier Versuchsfächen die Schadenswahrscheinlichkeit mit zunehmender Entfernung von den Gassen ab (Abb. 21b).

3.1.3 Kombinierte Holzernteverfahren

3.1.3.1 Arbeitsverfahren und Holzerntemaßnahmen

Im **Universitätswald bei Landshut** wurde der Versuchshieb durch einen Unternehmer durchgeführt. Zum Einsatz kam der Harvester Ponsse HS10 Cobra mit einem Kran von 10 Metern Reichweite, an dem das Ponsse Harvesteraggregat H60 montiert war. Die technischen Daten der Maschine finden sich in Anhang 9.2.

In Anbetracht der Rückegassenabstände von 30m und mehr wurde ein Verfahren gewählt, das trotz beschränkter Maschinenreichweite eine Bearbeitung der ganzen Fläche ermöglichte. Der Harvestereinsatz wurde deswegen in **Kombination mit motormanuellem Zufällen** durchgeführt. Alle Bäume, die mit dem Harvester entnehmbar waren, wurden von diesem gefällt und aufgearbeitet. Alle anderen zu erntenden Bäume wurden motormanuell etwa im 90° Winkel auf die Rückegasse zugefällt, um sie für den Harvester erreichbar zu machen. Der lichte, stellenweise lückige Bestand erlaubte es, die Beifällung vor dem Harvestereinsatz vorzunehmen und somit ein wiederholtes Befahren des Bestandes durch den Vollernter zu vermeiden. Die Entnahme und Aufarbeitung der vom Harvester gefällten Bäume erfolgte nach dem Standard-Harvesterverfahren. Die Stämme wurden dabei im rechten Winkel zur Rückegasse gefällt, um danach vom Erdstammstück her aufgearbeitet zu werden. Die entstehenden Fixlängen wurden am Rückegassenrand abgelegt. Die Aufarbeitung der zugefällten Vollbäume begann damit, dass der gesamte Baum in den gegenüberliegenden Bestandesteil geschoben wurde, bis das Erdstammstück vom Harvesterkopf erreicht werden konnte. Danach wurde der Stamm in gewohnter Weise vollmechanisch aufgearbeitet. Das hier eingesetzte Verfahren kann derzeit als das kombinierte Standard-Holzernteverfahren für Bestände mit Rückegassenabständen von über 20m angesehen werden.

Tabelle 10 gibt die wichtigsten Daten zu den entnommenen Bäumen auf den beiden Versuchsflächen wieder. Auf der ersten Fläche wurden neben Fichten auch zwei Kiefern und fünf Tannen entnommen, auf der zweiten Fläche außer Fichten eine Tanne und eine Lärche. Auf der zweiten Versuchsfläche waren zudem fünf der entnommenen Fichten schneegebrochen.

Tabelle 10: Daten zum entnommenen Bestand; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut, je 0,25ha

	N	Ø BHD [cm]	Ø h [m]	Ø kra [m]	G [m ²]	V ₁ [Vfm m.R.]	V ₂ [Efm o.R.]
Landshut 1	28	30.6	29.9	19.1	2.2	32.5	26.3
Landshut 2	20	39.3	30.3	17.0	2.5	36.7	29.7

Während bei der ersten Versuchsfläche der mittlere Abstand von Rückegassenmitte zu Rückegassenmitte 30m betrug (Abb. 22a), waren bei der zweiten Versuchsfläche die Gassen mit einem Abstand von gut 38m deutlich weiter auseinander (Abb. 22b). Deswegen wurden auf der ersten Fläche vier Bäume (14%) zugefällt, auf der zweiten Fläche wegen des unregelmäßigen Rückegassennetzes dagegen mit zwölf Bäumen (60%) deutlich mehr.

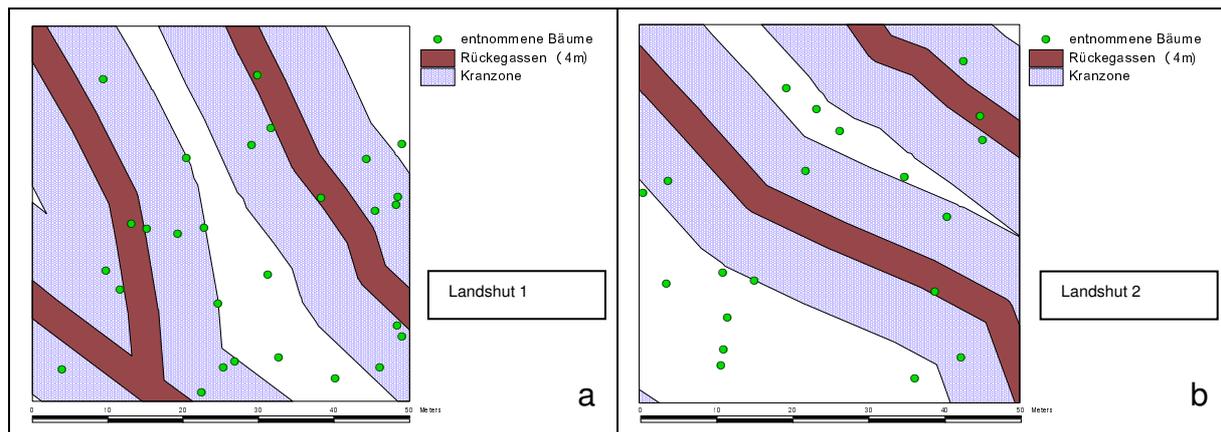


Abbildung 22 a+b: Rückegassen, Kranzonen und entnommene Bäume; kombinierte Holzernte, Versuchsfelder Universitätswald Landshut

Auf zwei weiteren Versuchsfeldern im **Forstamt Heigenbrücken** wurde ebenfalls der Vollernter Ponsse Ergo (siehe Anhang 9.2) vom Maschinenbetrieb Rechtenbach eingesetzt. Im Gegensatz zu den beiden anderen Flächen kam hier jedoch das so genannte „**Königsbronner Harvesterverfahren**“ nach KIESER und TEUFFEL (2002) zur Anwendung. Der Grund für die Anwendung dieses sehr komplexen Arbeitsverfahrens lag in den hohen Einzelbaumdimensionen, die von Radharvestern beim derzeitigen Stand der Technik kaum bewältigt werden können.

Ebenso wie das Arbeitsverfahren in Landshut zählt auch das Königsbronner Harvesterverfahren (KHV) zu den so genannten kombinierten Verfahren. „Kombiniert“ meint, dass motormanuelle und mechanisierte Arbeitsschritte miteinander verknüpft werden. Im Unterschied zu dem in Landshut angewendeten Verfahren wurden beim Königsbronner Harvesterverfahren Bäume nicht nur zugefällt, sondern auch motormanuell teilvermessen und teilaufgearbeitet. Wie bei den bereits beschriebenen Verfahren wurden alle Bäume, die für den Harvester erreichbar (Kranreichweite) und fällbar (Durchmesser) waren, von diesem gefällt und aufgearbeitet. Bäume hingegen, die entweder außerhalb der Kranreichweite standen oder den maximalen Fälldurchmesser des Harvesteraggregats überschritten, wurden motormanuell zugefällt. Auf den Versuchsfeldern in Heigenbrücken wurden alle zu entnehmenden Bäume, die weiter als 8m von der Rückegasse entfernt waren, und alle ausgezeichneten Bäume, die einen BHD von über 45cm aufwiesen, zugefällt. Die Zufällung erfolgte im rechten Winkel zur Rückegasse. Die gefällten Bäume wurden von den Waldarbeitern der Aushaltung entsprechend gesund geschnitten. Eventuell vorhandene Wurzelanläufe wurden beigeschnitten. Im Gegensatz zu dem in Landshut angewendeten Verfahren mit motormanueller Zufällung wurde der Stamm nun auch teilvermessen. Die Forstwirte hielten dabei solange Fixlängen mit einer verfahrensbedingten Längenzugabe von 10cm aus, bis die Rückegasse oder ihre unmittelbare Nähe erreicht war. Dort wurde der Kronenteil abgetrennt und etwa eine Harvesterkopflänge weit entastet. Diese Art der Vorbereitung erleichterte das spätere Greifen und anfängliche Entasten mit dem Aggregat wesentlich. Um den Harvesterfahrer über die Anzahl der ausgehaltenen Fixlängen im unteren Schaffteil zu informieren, wurden daraufhin Markierungen am Zopf angebracht. Bewährt haben sich besonders Einkerbungen mit der Motorsäge oder Markierungen mit Sprühfarbe. Der Vollernter bearbeitete nach diesen Vorarbeiten systematisch eine Gasse nach der anderen. Noch stehende, ausgezeichnete Bäume wurden vom Harvester nach dem Standardschema gefällt und aufgearbeitet. Bei den bereits zugefallenen Stämmen wurde zunächst der Kronenteil vom stärkeren Ende her fertig entastet, vermessen und eingeschnitten. Daraufhin wurde das untere Stammstück vom dünneren Ende in

Richtung Erdstamm aufgearbeitet. Das Einschleichen des Stammes in den gegenüberliegenden Bestandesteil konnte so vermieden werden. Alle abgetrennten Fixlängen wurden am Rückegassenrand abgelegt.

Auf beiden Versuchsfeldern wurden ausschließlich Fichten gefällt. Die genauen Daten zum Hieb zeigt Tabelle 11.

Tabelle 11: Daten zum entnommenen Bestand; kombinierte Holzernte, Versuchsfeldern FoA Heigenbrücken, je 0,25ha

	N	Ø BHD [cm]	Ø h [m]	Ø kra [m]	G [m ²]	V ₁ [Vfm m.R.]	V ₂ [Efm o.R.]
Heigenbrücken 3	14	41.4	32.5	18.9	2.0	29.8	24.2
Heigenbrücken 4	13	38.0	30.3	16.6	1.5	21.7	17.6

Auf der ersten Fläche wurden lediglich drei Bäume aufgrund zu großer Entfernung von der Gasse (>8m) und fünf Bäume wegen zu großem BHD (>45cm) zugefälligt, insgesamt also knapp 60%. Der Rückegassenabstand betrug 30m (Abb. 23a). Auf der zweiten Fläche wurde jeder der neun zugefälligten Bäume wegen zu großem Abstand von der Gasse zugefälligt (knapp 70%). Dies ist auf den großen Rückegassenabstand von 55m zurückzuführen (vgl. Abb. 23b).

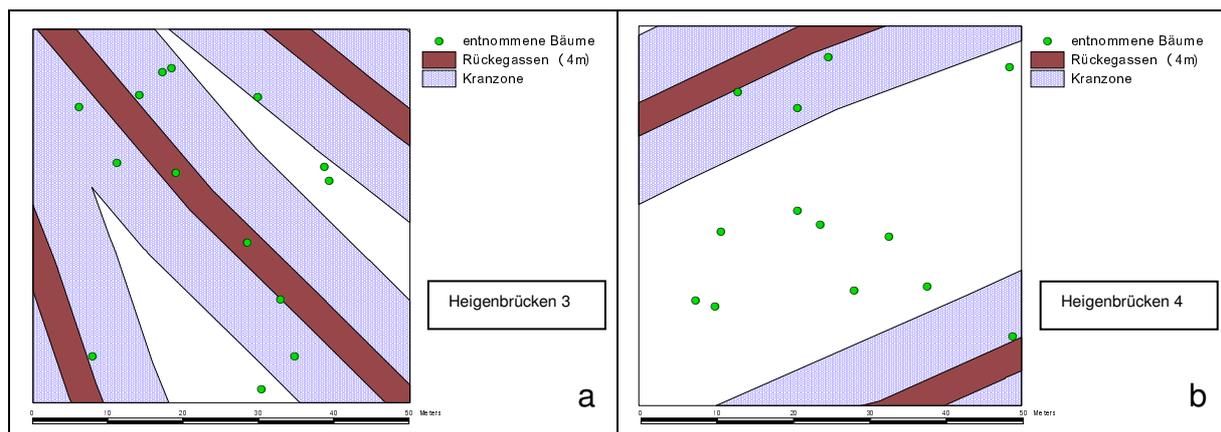


Abbildung 23 a+b: Rückegassen, Kranzonen und entnommene Bäume; kombinierte Holzernte, Versuchsfeldern FoA Heigenbrücken

3.1.3.2 Die Verjüngung vor dem Hieb

Die Versuchsfeldern im Universitätswald Landshut und im FoA Heigenbrücken unterschieden sich aus Sicht der Verjüngung deutlich voneinander. Die Verjüngung in Landshut bestand überwiegend aus Fichten mit einer mittleren Höhe zwischen 60cm und 70cm, daneben waren ebenfalls Tannen zu finden (Tab. 12). Die Stammzahl war dabei mit 10.500 bzw. 17.000 Pflanzen pro Hektar vergleichsweise niedrig.

In Heigenbrücken dagegen waren die Stammzahlen extrem hoch (94.000 bzw. 146.000 Pflanzen/ha). Zum weit überwiegenden Teil bestand die Verjüngung hier ebenfalls aus Fichten mit mittleren Höhen von 43cm bzw. 56cm, vereinzelt kamen auch deutlich höhere Buchen, Stroben und Douglasien vor.

Ergebnisse der Datenerhebungen

Tabelle 12: Kenndaten zur Verjüngung; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken

Versuchsfläche		Fichte	Buche	Sonstige	Gesamt
Landshut 1	N/ha	10480	0	4440	14920
	h mitt [cm]	69.7		76.3	71.7
	h max [cm]	226		288	288
Landshut 2	N/ha	16960	0	5520	22480
	h mitt [cm]	64.3		50.0	60.8
	h max [cm]	224		227	227
Heigenbrücken 3	N/ha	146280	1840	920	149040
	h mitt [cm]	43.0	232.5	109.1	45.7
	h max [cm]	290	457	338	457
Heigenbrücken 4	N/ha	94080	1080	2480	97640
	h mitt [cm]	55.9	210.8	128.0	59.4
	h max [cm]	505	366	429	505

Die Unterschiede zwischen den Flächen in Landshut und Heigenbrücken lassen sich aus den Stammzahlverteilungen der Abbildungen 24a bis 24d gut ablesen. Die Verjüngung auf den beiden Flächen in Landshut und den beiden Flächen in Heigenbrücken waren allerdings jeweils miteinander durchaus vergleichbar.

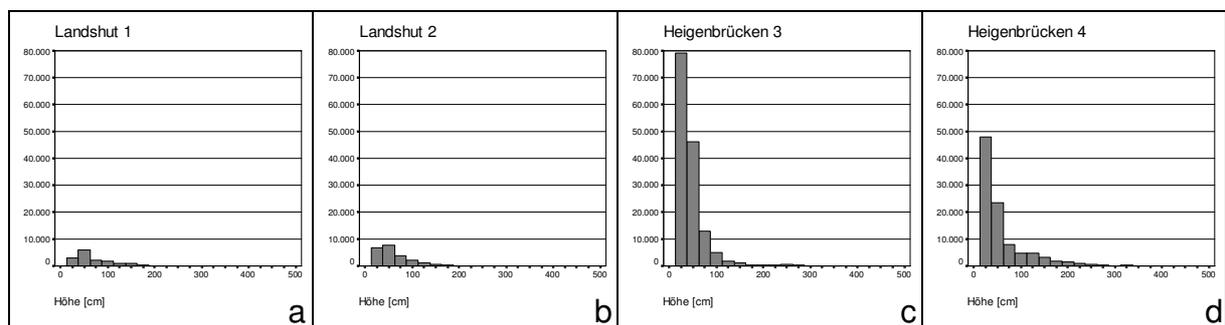


Abbildung 24 a-d: Stammzahlverteilung je Höhenstufe; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken

Dies zeigt sich auch in Abbildung 25 a-d. Auf den beiden Versuchsflächen im Universitätswald Landshut war der Anteil der sonstigen Baumarten (überwiegend Tanne) über die Höhenstufen hinweg relativ konstant. In Heigenbrücken lag der Schwerpunkt der Fichtenverjüngung in den niedrigeren Höhenbereichen, Buche und sonstige Baumarten kamen mit steigender Verjüngungshöhe hinzu.

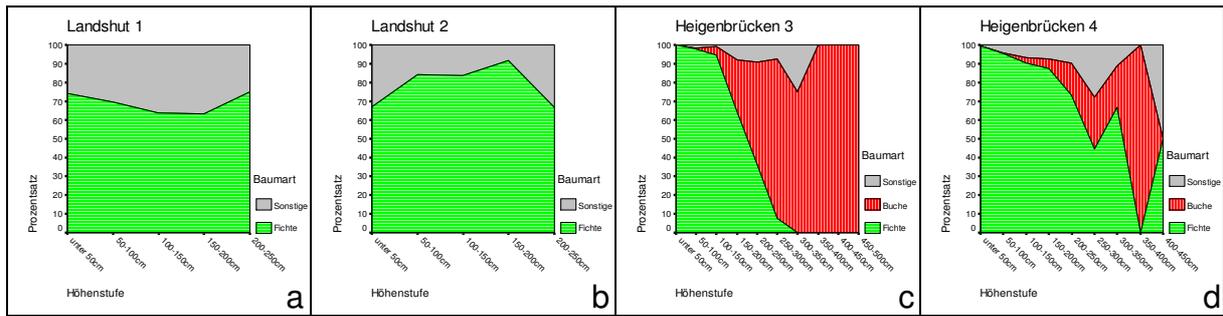


Abbildung 25 a-d: Anteile der Baumarten an der Verjüngung je Höhenstufe; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken

Die Unterschiede in der Höhenstruktur der Verjüngung zwischen den beiden Flächen in Landshut und den beiden Flächen in Heigenbrücken demonstrieren die Abbildungen 26a bis 26d sehr anschaulich. In Landshut war die Verjüngung recht gleichförmig mit wenigen höheren Bereichen, dazu gab es einige größere verjüngungsfreie Stellen. In Heigenbrücken dagegen war die Verjüngung in der Höhe stark heterogen und nahezu flächig vorhanden.

Auch bezüglich der Verteilung der Verjüngung auf den Versuchsflächen werden diese Unterschiede deutlich. In Landshut (Abb. 27 a+b) war die Dichte der Verjüngung fast überall gering, in Heigenbrücken (Abb. 27 c+d) dagegen, vor allem auf der ersten Fläche, war die Dichte der Verjüngung sehr hoch.

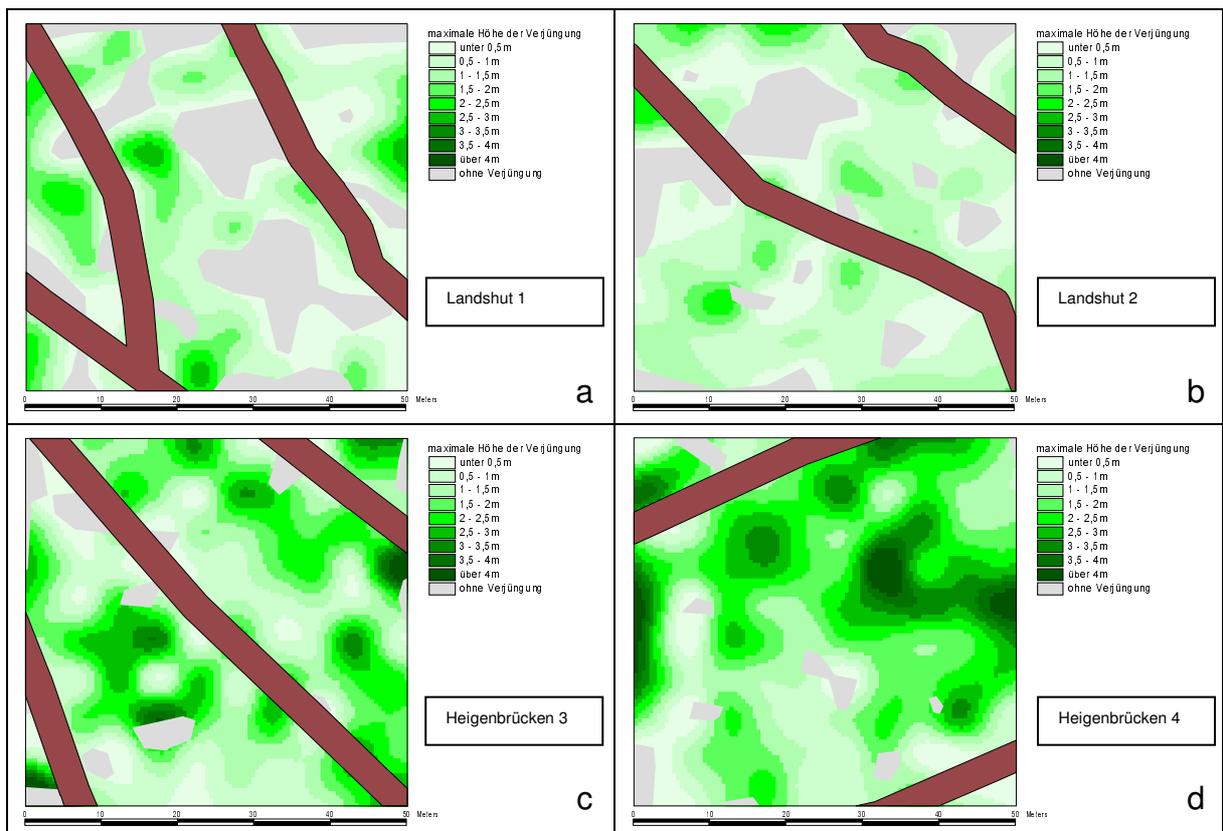


Abbildung 26 a-d: Maximale Höhe der Verjüngung vor den Hieben; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken

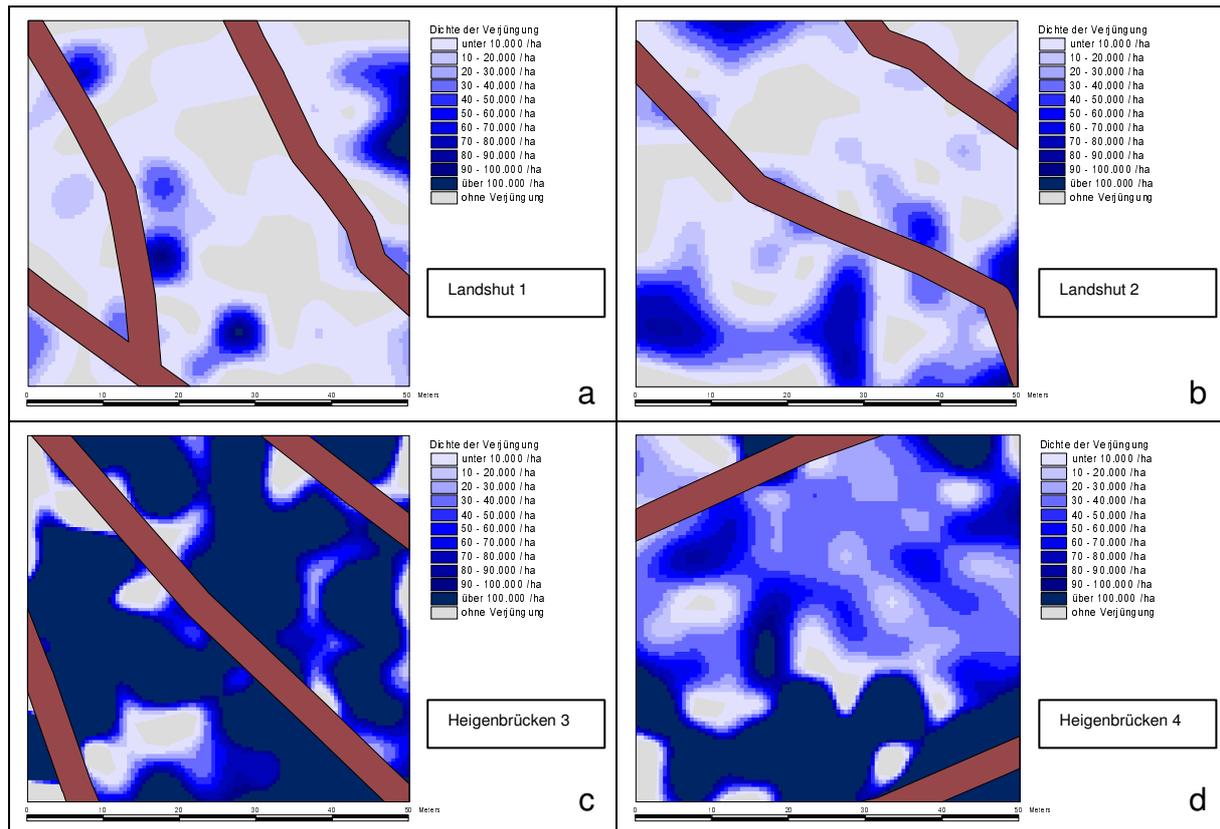


Abbildung 27 a-d: Dichte der Verjüngung vor den Hieben; kombinierte Holzernte, Versuchsfelder Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken

3.1.3.3 Auswirkungen des Hiebes auf die Verjüngung

Die einzelnen Hiebe waren in ihren Auswirkungen auf die Verjüngung sehr verschieden. In Landshut (Tab. 13) wurden mit 13% und 16% deutlich mehr Bäume beschädigt als in Heigenbrücken (Tab. 14) mit 8% bzw. 9%. Dafür war in Heigenbrücken der Anteil fehlender Bäume mit 29% bzw. 36% höher als in Landshut mit 22% bzw. 13%.

Tabelle 13: Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; kombinierte Holzernte, Versuchsfelder Universitätswald Landshut

	Landshut 1			Landshut 2		
	fehlend	beschädigt	betroffen	fehlend	beschädigt	betroffen
Fichte	24.4	18.3	42.8	16.8	14.4	31.1
Buche	-	-	-	-	-	-
Sonstige	17.1	9.9	27.0	2.2	9.4	11.6
Gesamt	22.3	15.8	38.1	13.2	13.2	26.3

Bei der Fichte waren auf allen vier Flächen mehr Bäume fehlend als beschädigt. Während dieser Unterschied in Heigenbrücken sehr groß war (Tab. 14), war er in Landshut weniger deutlich ausgeprägt. Von den Tannen in Landshut wurden auf beiden Versuchsfeldern knapp 10% beschädigt.

Ergebnisse der Datenerhebungen

Tabelle 14: Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen FoA Heigenbrücken

	Heigenbrücken 3			Heigenbrücken 4		
	fehlend	beschädigt	betroffen	fehlend	beschädigt	betroffen
Fichte	29.2	8.0	37.1	36.7	8.8	45.5
Buche	6.5	23.9	30.4	3.7	33.3	37.0
Sonstige	4.4	52.2	56.5	37.1	21.0	58.1
Gesamt	28.7	8.4	37.1	36.4	9.4	45.8

Während aber auf der ersten Fläche zudem 17% der Tannen fehlten, waren es auf der zweiten Fläche lediglich 2%. Ähnlich uneinheitlich wurden die sonstigen Baumarten in Heigenbrücken betroffen. Allerdings waren hier verschiedene Baumarten zusammengefasst, die zudem nur in sehr geringen Anzahlen vertreten waren, so dass die große Streuung verständlich ist. Bei der Buche in Heigenbrücken zeigte sich wie bei den hochmechanisierten Verfahren (Kap. 3.1.2.3) der zu den Fichten gegensätzliche Sachverhalt. Hier waren deutlich mehr Buchen beschädigt als fehlend. Insgesamt waren zwischen gut 26% (Landshut 2) und knapp 46% (Heigenbrücken 2) der Verjüngungsbäume von den Hieben betroffen (Abb. 28a).

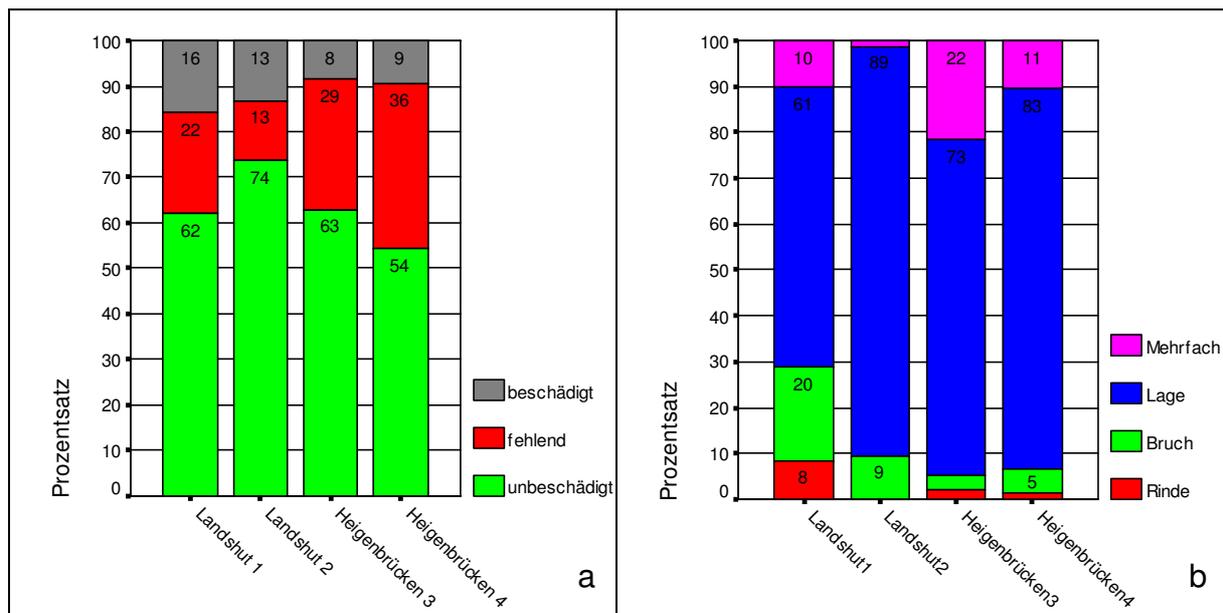


Abbildung 28 a+b: Anteile unbeschädigter, beschädigter und fehlender Verjüngung (a) und Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen (b); kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken

Die Abbildung 28b zeigt die Anteile der Schadensgruppen für die einzelnen Flächen. Auf allen Versuchsflächen kamen Veränderungen der Lage am weitaus häufigsten vor. Rindenschäden traten in nennenswertem Umfang lediglich auf der Fläche Landshut 1 auf. Brüche kamen auf allen Versuchsflächen vor, ihr Anteil schwankte allerdings beträchtlich zwischen knapp 3% auf der Fläche Heigenbrücken 3 und über 20% auf der Fläche Landshut 1. Gleiches galt für die Mehrfachschäden, also die Kombination verschiedener Einzelschäden, zumeist eine Lageveränderung mit Rindenschaden oder Bruch. Ihr Anteil bewegte sich zwischen gut 1% auf der Fläche Landshut 2 und knapp 22% auf der Fläche Heigenbrücken 3. Insgesamt zeigte sich hier ein recht uneinheitliches Bild.

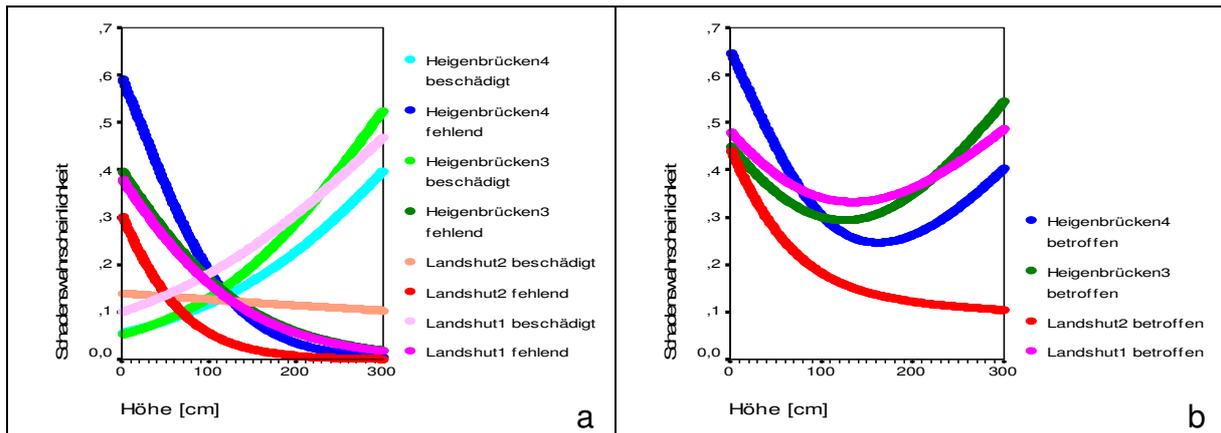


Abbildung 29 a+b: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; kombinierte Holzernte; Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken

Die Wahrscheinlichkeit für einen vernichteten Verjüngungsbaum nahm auf allen Versuchsflächen mit steigender Baumhöhe ab (Abb. 29a). Dagegen nahm die Wahrscheinlichkeit, dass ein Verjüngungsbaum vom Hieb beschädigt war, mit Ausnahme von Landshut 2 mit steigender Baumhöhe zu. Insgesamt findet sich mit Ausnahme der Fläche Landshut 2 überall eine Höhe, bei der die Gesamtschadenwahrscheinlichkeit minimal wird (Abb. 29b). Die Minima liegen eng beisammen bei einer Höhe von ungefähr 1,5m.

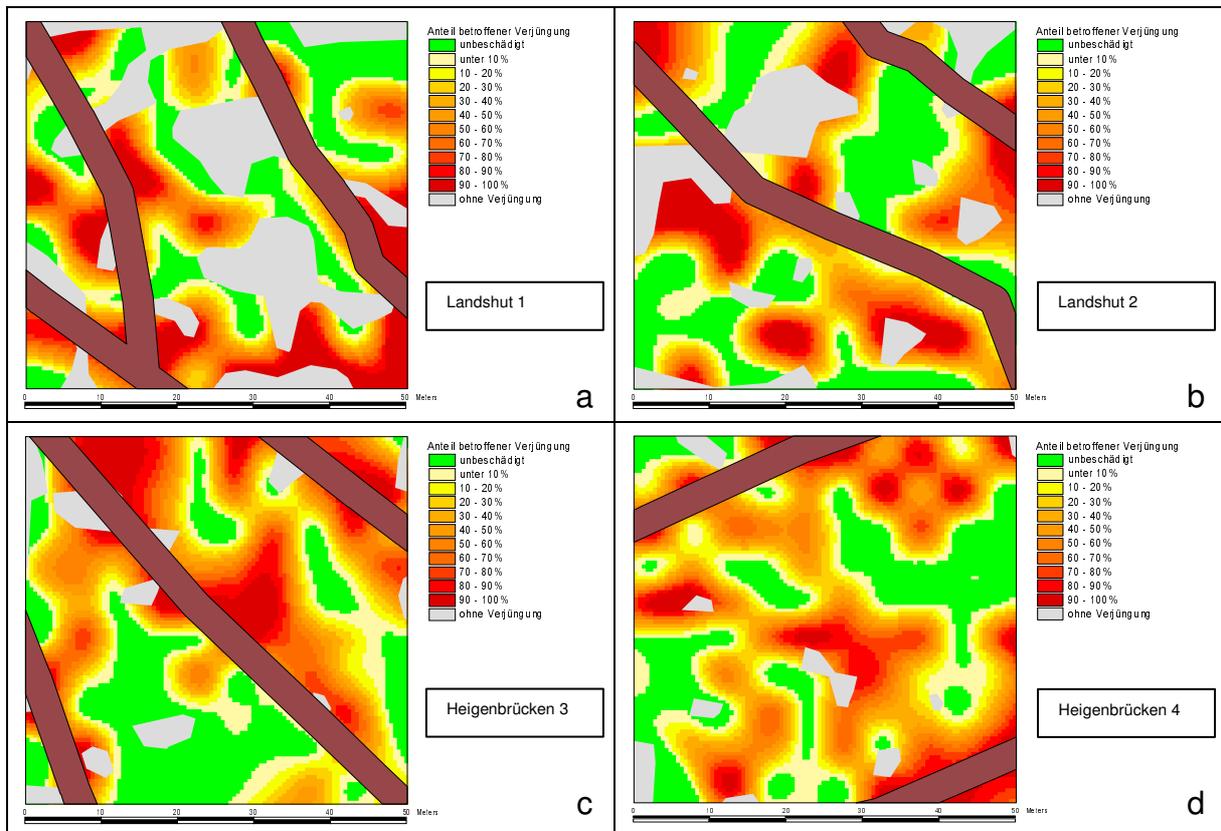


Abbildung 30 a-d: Räumliche Verteilung der Schäden im Bestand; betroffene Verjüngung, kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken

Die räumliche Verteilung der entstandenen Schäden auf den Versuchsflächen wird in den Abbildungen 30a bis 30d dargestellt. Während sich auf den Flächen im FoA Heigenbrücken die Schäden erkennbar an den Rückegassen konzentrierten, war dies auf den Flächen im Universitätswald Landshut kaum oder zumindest weniger deutlich der Fall.

Dies wird in den Abbildungen 31a und 31b besonders deutlich. Die Kurven in Abbildung 31b geben die Wahrscheinlichkeit für einen betroffenen Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von dessen Entfernung zur nächsten Rückegasse an und entsprechen damit inhaltlich den in Abbildung 30 a-d visualisierten räumlichen Verteilungen der Gesamtschäden auf den Flächen.

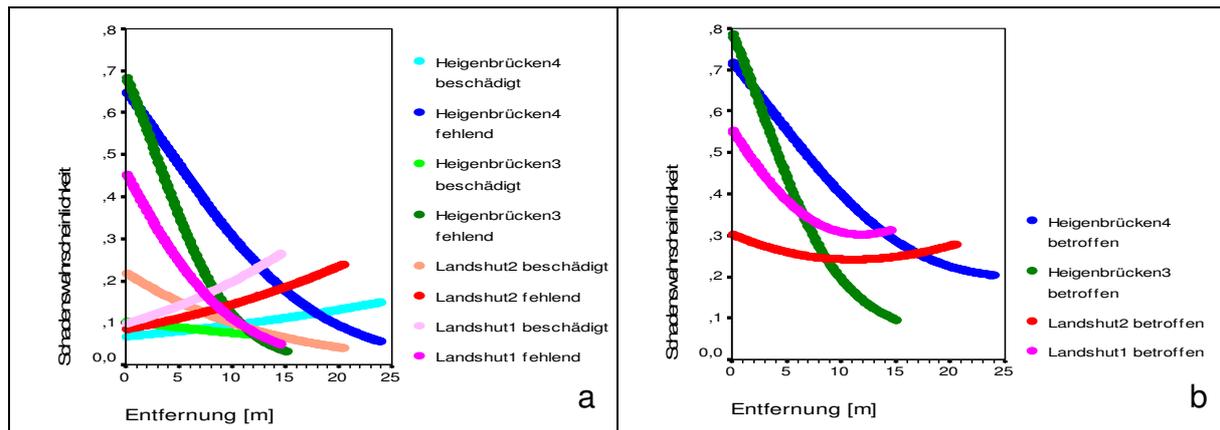


Abbildung 31 a+b: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Entfernung von der Rückegasse nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; kombinierte Holzernte, Versuchsflächen Universitätswald Landshut und FoA Heigenbrücken

Mit Ausnahme der Fläche Landshut 2 konzentrierten sich die fehlenden Bäume deutlich an den Rückegassen (Abb. 31a). Bei den beschädigten Bäumen zeigte sich dagegen ein heterogenes Bild. Während es bei den Flächen Heigenbrücken 3 und Landshut 2 zu einer leichten Abnahme der Schadenswahrscheinlichkeit mit zunehmender Entfernung von der Gasse kam, zeigte sich in Heigenbrücken 4 und Landshut 1 eine leichte Zunahme.

Während die Gesamtschadenswahrscheinlichkeit (Abb. 31b) als Summe der beiden Einzelwahrscheinlichkeiten auf den beiden Flächen in Heigenbrücken deutlich mit steigender Entfernung fiel, verlief sie bei den beiden Landshuter Flächen indifferent. Hier war keine klare Konzentration der Schäden an den Gassen feststellbar. Vor allem auf der Versuchsfläche Landshut 2 verteilten sich die Schäden offenbar sehr gleichmäßig im Bestand.

3.1.4 Hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung

3.1.4.1 Arbeitsverfahren und Daten zum Windwurf

Am 26. Dezember 1999 warf der Orkan „Lothar“ einen nahezu flächig verjüngten Fichten-Buchen-Bestand im **FoA Krumbach**. Auf der in diesem Bestand gelegenen einen Hektar großen Versuchsfläche des Verbundforschungsprojektes ZEUS war die Verjüngung bereits erfasst worden. Somit bot sich die seltene Gelegenheit, die Auswirkungen des Windwurfs und der anschließenden Aufarbeitung des Sturmholzes auf die Verjüngung zu untersuchen, ohne auf Schätzungen der Verjüngungssituation vor dem Windwurf angewiesen zu sein.

Bei der Aufarbeitung des Sturmholzes wurde beim Nadelholz zunächst in Regiearbeit motormanuell abgestockt. Bei Bäumen mit einem Durchmesser größer 45cm wurden von unten her 5m-Anschnitte ausgehalten, bis der Durchmesser kleiner 45cm und damit der Stamm für den Harvester problemlos manipulierbar war. Anschließend wurden die Fichten und Lärchen mit einem Harvester Meindl RH180 (technische Daten im Anhang 9.2) aufgearbeitet, wobei ebenfalls Kurzholz (5m) ausgehalten wurde. Der Harvesterfahrer hatte dabei die bereits vor dem Windwurf vorhandenen Rückegassen zu nutzen und durfte diese nur in Ausnahmefällen verlassen. Der mittlere Rückegassenabstand betrug 20m. Nach der Aufarbeitung wurde mit einem Forwarder gerückt.

Die geworfenen Buchen und Eichen wurden ebenfalls motormanuell abgestockt und die Kronen mit dem Harvester aufgearbeitet. Das Stammholz wurde jedoch motormanuell als Langholz ausgehalten und mit einem Seilschlepper zur Waldstraße gerückt.

Tabelle 15 gibt die wichtigsten Daten zum geworfenen und anschließend aufgearbeiteten Teil des Altbestandes auf der Versuchsfläche wieder.

Tabelle 15: Kenndaten zum geworfenen Altbestand; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach, 1ha

Baumart	N	Ø BHD [cm]	Ø h [m]	G [m ²]	V ₁ [Vfm m.R.]	V ₂ [Efm o.R.]
Fichte	80	50.2	37.4	16.4	275.3	223.0
Lärche	4	56.5	38.4	1.0	16.2	11.7
Buche	17	46.6	35.1	3.2	61.4	51.9
Eiche	4	67.0	38.2	1.4	30.0	23.7
Gesamt	105	50.4	37.0	22.0	382.9	310.3

Gut 75% der Fichten und knapp 40% der Buchen wurden durch den Sturm geworfen, bei der Buche vor allem der stärkere Teil des Bestandes. Bei der Fichte dagegen war das gesamte Durchmesserspektrum recht gleichmäßig vom Windwurf betroffen. Insgesamt wurden ca. 60% des Altbestandes geworfen.

3.1.4.2 Die Verjüngung vor dem Windwurf

Vor dem Windwurf spiegelte die Verjüngung annähernd die Verhältnisse des Altbestandes auf der Versuchsfläche wieder. Auch in der Verjüngung dominierte die Fichte mit über 60% Stammzahlanteil, gefolgt von der Buche mit über 35%. Tabelle 16 gibt einen Überblick über die wichtigsten Kennwerte der Verjüngung vor dem Windwurf.

Tabelle 16: Kenndaten zur Verjüngung; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach

	Fichte	Buche	Sonstige	Gesamt
N/ha	12250	7180	330	19760
h mitt [cm]	59.9	162.8	251.9	100.5
h max [cm]	583	850	724	850

Es fällt auf, dass die mittlere Höhe der Buche mehr als einen Meter über der der Fichte lag. Zudem wird die große Höhendifferenzierung deutlich: Die maximale Höhe betrug bei der Fichte fast sechs Meter und bei der Buche über acht Meter. Die in Bezug auf die Höhe sehr heterogene Verjüngung resultierte auch hier aus der Struktur des auf Teilflächen bereits sehr lückigen Altbestandes. Allerdings war der Großteil der Verjüngung kleiner als einen Meter, wie die Abbildung 32a illustriert.

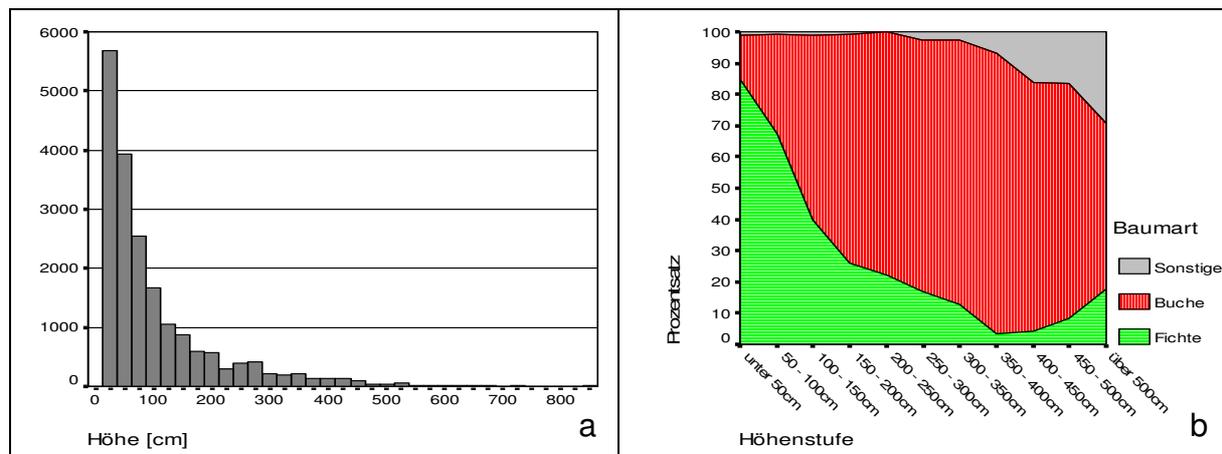


Abbildung 32 a+b: Stammzahlverteilung je Höhenstufe (a) und Anteile der Baumarten an der Verjüngung je Höhenstufe (b); hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach

Die auf die Stammzahl bezogenen Anteile, die die einzelnen Baumarten an der Verjüngung je Höhenstufe einnahmen (Abb. 32b), zeigen, dass der Großteil der Verjüngung unter einem Meter von Fichten gebildet wurde. In der Höhe über einem Meter dominierte dagegen die Buche deutlich. Die sonstigen Baumarten Tanne, Lärche, Eiche und Eberesche, die insgesamt spärlich in der Verjüngung vertreten waren, nahmen erst ab ungefähr vier Metern nennenswerte Anteile ein.

Die nachfolgende Abbildung 33a visualisiert die bereits angesprochene stark höhendifferenziertere Verjüngung auf der Versuchsfläche. Bereiche mit deutlichem Dickungscharakter wechselten sich ab mit sehr niedrigen Verjüngungsbereichen an den Stellen, wo die Überschirmung des Altbestandes stärker war.

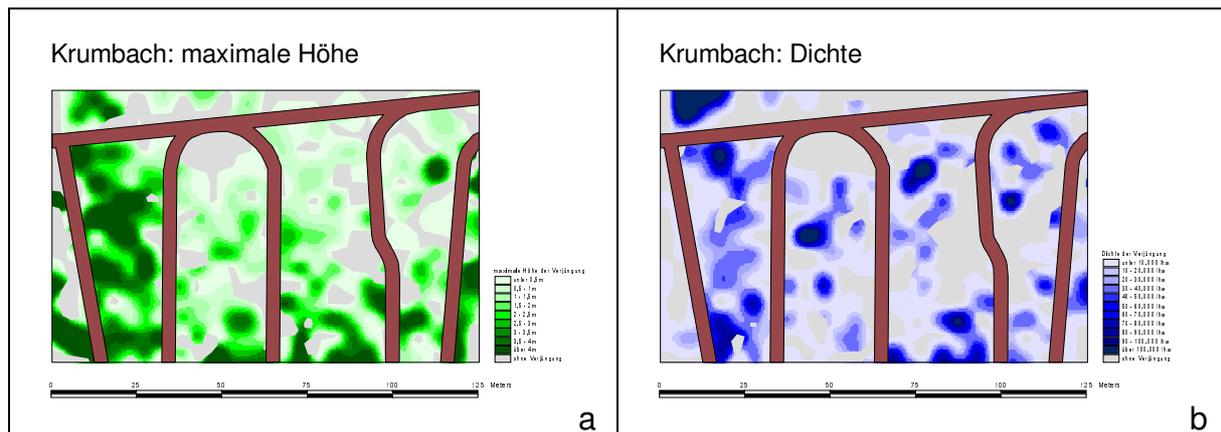


Abbildung 33 a+b: Maximale Höhe (a) und Dichte (b) der Verjüngung vor dem Windwurf; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach

Die ebenfalls sehr ungleichmäßige Verteilung der Verjüngungsbäume auf der Versuchsfläche wird in Abbildung 33b deutlich. Sehr stammzahlreiche Verjüngungsbereiche wechselten sich ab mit den zahlreichen verjüngungsarmen oder -freien Stellen.

3.1.4.3 Auswirkungen von Windwurf und Aufarbeitung auf die Verjüngung

Durch den Windwurf und die anschließende Aufarbeitung der geworfenen Bäume wurde insgesamt fast 56% der Verjüngung betroffen. Der überwiegende Teil der betroffenen Verjüngung, nämlich jeder zweite vor dem Windwurf vorhandene Verjüngungsbaum, fehlte nach der Aufarbeitung (Tab. 17). Die ungeheure Menge an Kronenmaterial sorgte dafür, dass insbesondere niedrige Verjüngungsbäume sehr oft begraben wurden. Sie wurden dann bei der Aufnahme nach der Aufarbeitung nicht wieder gefunden und damit als fehlend klassifiziert.

Tabelle 17: Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Bäume (Schadprozente) nach Baumarten; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach

	fehlend	beschädigt	betroffen
Fichte	46.8	4.5	51.3
Buche	53.3	8.8	62.1
Sonstige	73.7	15.2	88.9
Gesamt	49.6	6.2	55.8

Die Fichte wies dabei geringere Anteile fehlender und beschädigter Bäume auf als die Buche. Die sonstigen Baumarten waren am stärksten betroffen.

Bei den Schadensarten waren Brüche, Lageveränderungen und Mehrfachschäden mit jeweils ca. 30% vertreten. Rindenschäden traten bei gut 8% der beschädigten Bäume auf (Abb. 34).

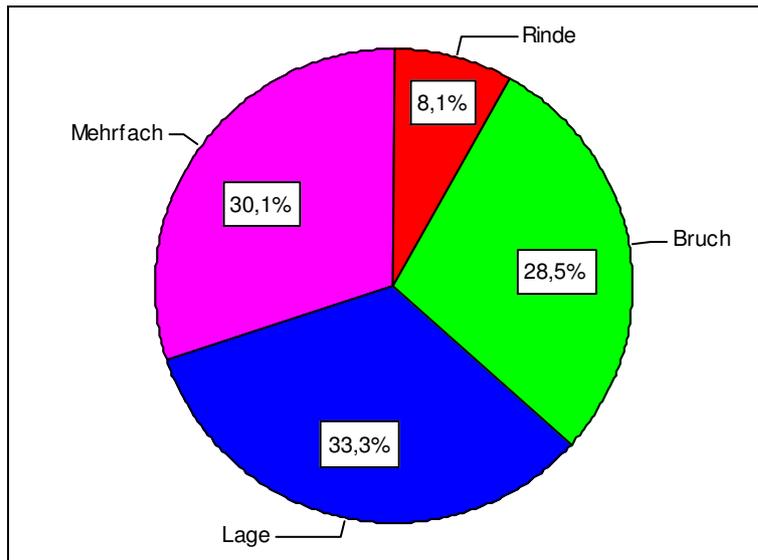


Abbildung 34: Anteile der Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach

Höhere Verjüngungsbäume fehlten seltener, waren aber häufiger beschädigt als niedrigere Verjüngungsbäume. Die folgenden Abbildungen zeigen diesen Zusammenhang für die Baumarten Fichte (Abb. 35a) und Buche (Abb. 35b). Die Gesamtschadenswahrscheinlichkeit (blaue Linien) zeigt bei beiden Baumarten ein Minimum. Dieses liegt für Fichte im Höhenbereich zwischen 3m und 4m, während es bei der Buche mit ungefähr 6m deutlich höher liegt.

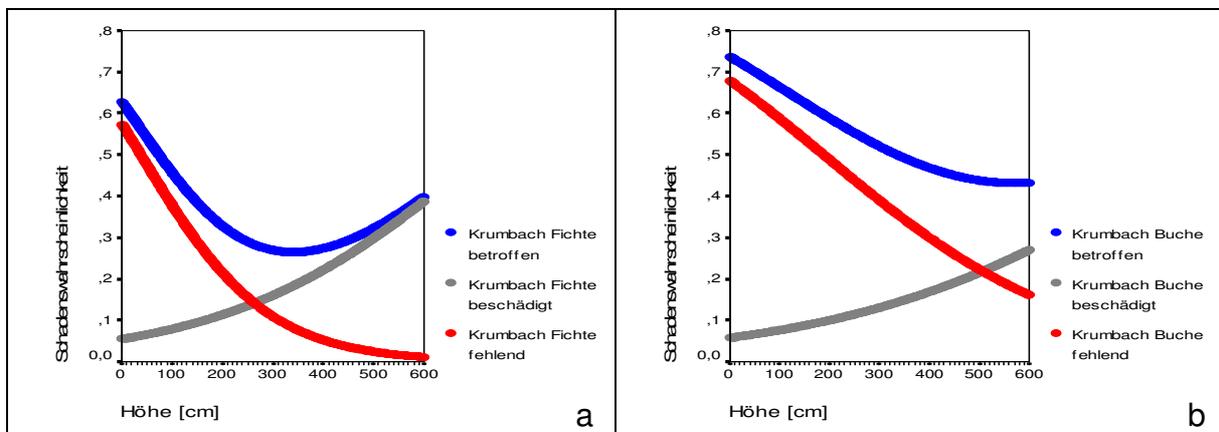


Abbildung 35 a+b: Wahrscheinlichkeit, mit der eine Fichte (a) bzw. Buche (b) in der Verjüngung in Abhängigkeit von ihrer Höhe nach dem Hieb beschädigt, fehlend bzw. betroffen war; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach

Die Abbildungen 36a und 36b geben die räumliche Verteilung der Schäden auf der Versuchsfläche wieder. Der besseren Übersichtlichkeit halber wurden in Abbildung 36b lediglich die Umrissse der liegenden Bäume eingezeichnet.

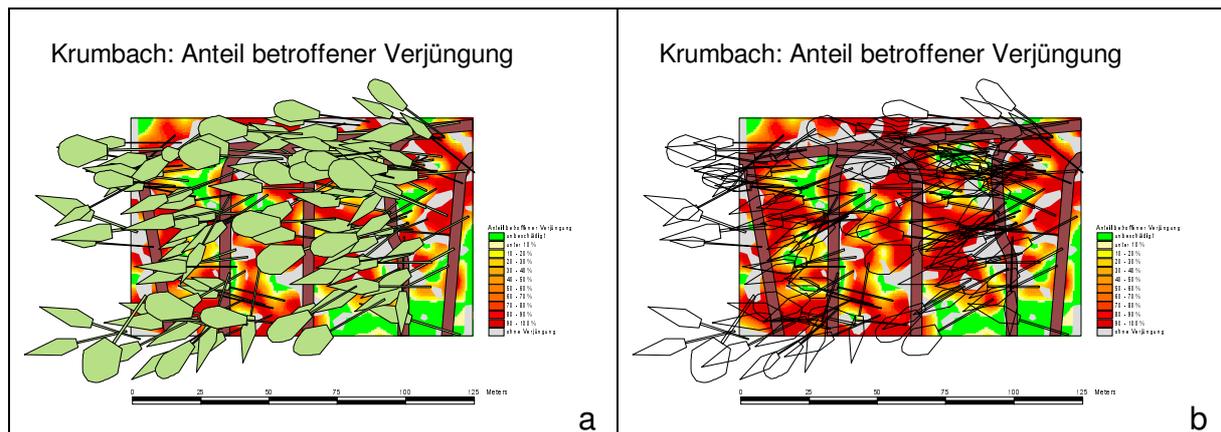


Abbildung 36 a+b: Räumliche Verteilung der Schäden im Bestand; betroffene Verjüngung, hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach

Die Schäden traten auf ganzer Fläche auf, was bei der Menge geworfener Bäume nicht verwundert. Die kaum beschädigte (grüne) untere rechte Ecke der Versuchsfläche wurde lediglich durch die Tatsache verschont, dass sich im Anschluss an die Versuchsfläche eine Dichtung befand, über der keine Altbestandsbäume mehr standen, die geworfen werden konnten.

Abbildung 37 macht deutlich, dass sich auch bei der Windwurfaufarbeitung die Schäden leicht an den Rückegassen konzentrierten. Dies ist auf die Aufarbeitung der geworfenen Bäume auf und die Ablage des aufgearbeiteten Holzes an den Rückegassen zurückzuführen. Bei getrennter Betrachtung der rein durch den Windwurf verursachten Schäden (siehe KORTEN 2001) ist eine solche Konzentration nicht feststellbar.

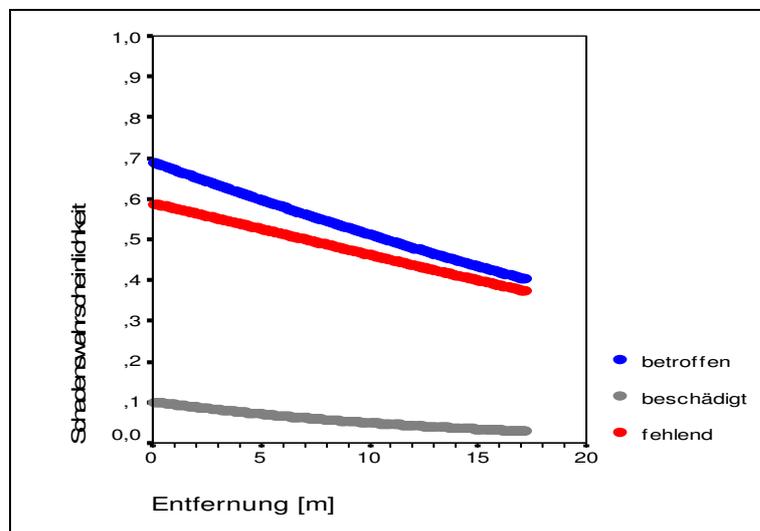


Abbildung 37: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Entfernung von der Rückegasse nach dem Hieb beschädigt, fehlend bzw. betroffen war; hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung, Versuchsfläche Krumbach

3.1.5 Vergleich der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen einander gegenüber gestellt. Dabei werden nicht nur Art und Höhe der Schäden an der Verjüngung berücksichtigt, sondern auch die räumliche Verteilung der Schäden bezüglich der Feinerschließung verglichen. Da die Rahmenbedingungen bei den einzelnen Versuchen sehr unterschiedlich waren, wird der Vergleich zwischen den Schadprozenten gezogen. Aus dem gleichen Grund ist bei den dargestellten Kurven der Verlauf interessanter als die konkrete Lage der Kurve. Zuerst werden dabei die Versuchsflächen zu Arbeitsverfahren zusammengefasst, welche anschließend zu Verfahrensgruppen aggregiert werden.

3.1.5.1 Vergleich der Arbeitsverfahren

Der Vergleich der verschiedenen Arbeitsverfahren offenbart deutliche Unterschiede bezüglich der Schadprozente (Abb. 38a). Der Windwurf und die anschließende hochmechanisierte Aufarbeitung des geworfenen Holzes verursachten mit deutlichem Abstand die meisten Schäden insgesamt. Dies ist auf den sehr hohen Anteil fehlender Bäume zurückzuführen (50%). Wenige Schäden entstanden bei den beiden motormanuellen Arbeitsverfahren in den Fichten-Buchen- und Eichen-Buchen-Beständen. Die kombinierten und hochmechanisierten Arbeitsverfahren verursachten die höchsten Anteile beschädigt vorhandener Verjüngungsbäume.

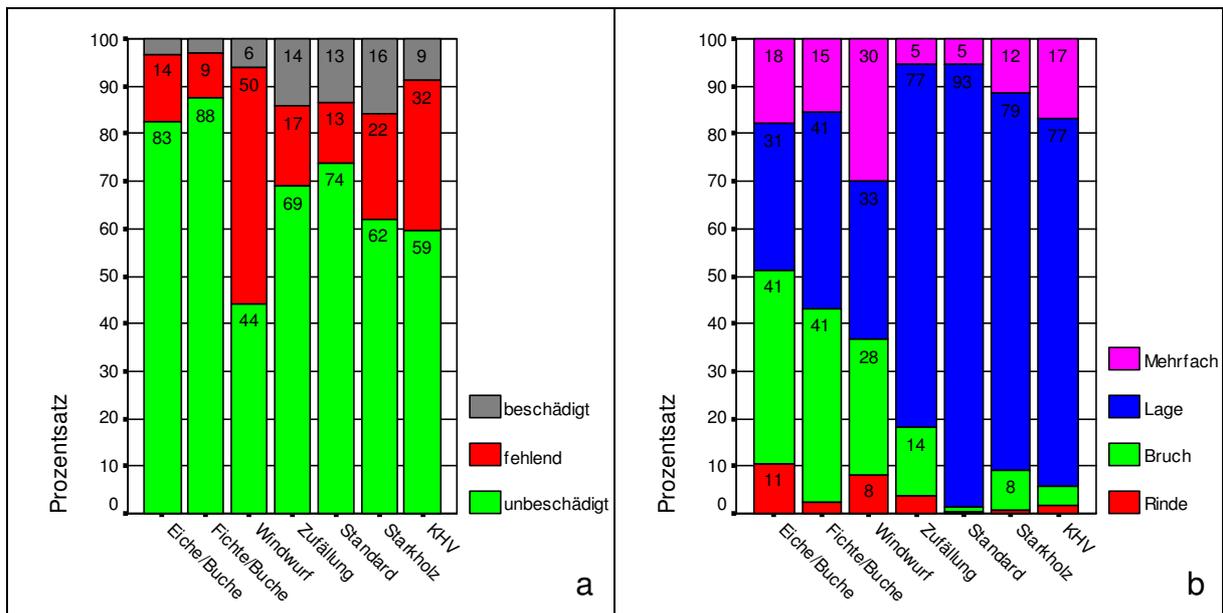


Abbildung 38 a+b: Anteile unbeschädigter, beschädigter und fehlender Verjüngung (a) und Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen (b) je Arbeitsverfahren

Bei den Schadensarten entstanden bei motormanuellen Verfahren anteilmäßig sehr viele Brüche und Mehrfachsäden (Abb. 38b). Die kombinierten und hochmechanisierten Verfahren dagegen verursachten überwiegend Veränderungen der Lage der Verjüngungsbäume.

Die Wahrscheinlichkeit für einen Verjüngungsbaum, in Abhängigkeit von seiner Höhe nach dem Eingriff betroffen zu sein, zeigte bei allen Arbeitsverfahren ein Minimum (Abb. 39a). **Im Höhenbereich zwischen einem Meter und zwei Metern war in der Regel die Schadenswahrscheinlichkeit am geringsten.** Ausnahmen waren lediglich die Windwurffläche (Minimum bei ca. 4m) und die Eichen-Buchen-Flächen (Minimum bei 4m-6m). Die beiden Kurven der jeweiligen Verfahrensgruppen (motormanuell, hochmechanisiert, kombiniert) sind sich bezüglich ihres Verlaufs dabei durchaus ähnlich.

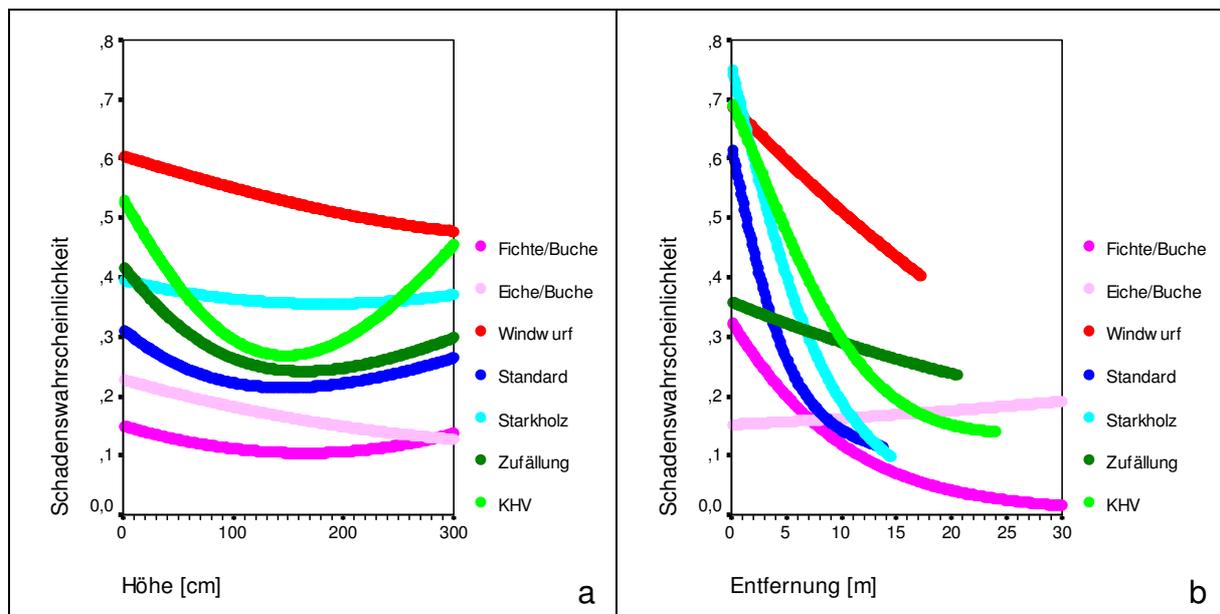


Abbildung 39 a+b: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe (a) oder seiner Entfernung von der Rückegasse (b) nach dem Hieb betroffen war; getrennt nach Arbeitsverfahren

Die Abnahme der Schadenswahrscheinlichkeiten und damit der Schäden mit zunehmender Entfernung von den Rückegassen (Abb. 39b) war bei allen Arbeitsverfahren außer auf den beiden Eichen-Buchen-Flächen erkennbar. Diese Ausnahme lässt sich offensichtlich auf die unsystematische Feinerschließung auf diesen beiden Flächen zurückführen. Die Konzentration der Schäden an den Rückegassen war bei den beiden reinen Harvesterverfahren (blaue Linien) am deutlichsten ausgeprägt.

3.1.5.2 Vergleich der Verfahrensgruppen

Der Vergleich der Gruppen von Arbeitsverfahren zeigt bei den motormanuellen Verfahren mit Abstand am wenigsten Schäden (Abb. 40a). Die meisten Schäden traten bei der Windwurfaufarbeitung auf. Bei den kombinierten Verfahren waren 15% der Bäume beschädigt, während es bei den motormanuellen Verfahren lediglich 3% waren. Hier fehlten auch nur 11% der Verjüngungsbäume, während bei den kombinierten Verfahren 30% fehlten.

Bei den beschädigt vorhandenen Bäumen traten bei den motormanuellen Verfahren mit über 40% extrem viele Brüche auf, während es bei den kombinierten und hochmechanisierten Verfahren nur ca. 5% waren (Abb. 40b). Insgesamt waren bei den motormanuellen Verfahren und bei der Windwurfaufarbeitung viele als schwerwiegend zu beurteilende Schäden (Brüche, Rindenschäden und Mehrfach-

schäden) zu finden, während bei den kombinierten und hochmechanisierten Verfahren die weniger schwerwiegenden Lageveränderungen dominierten.

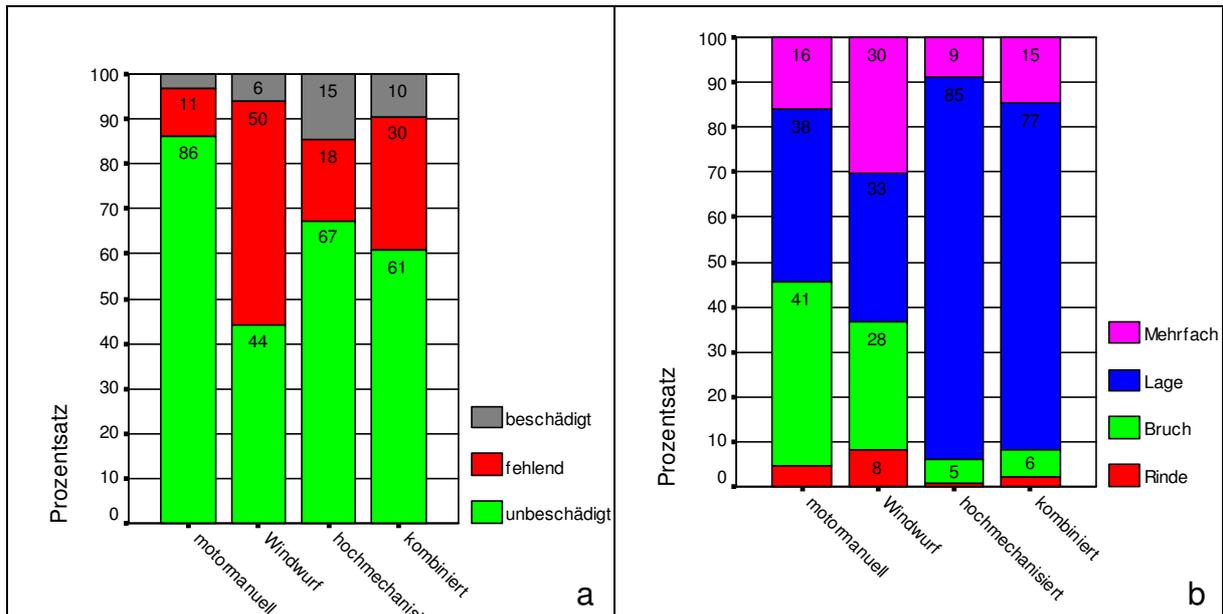


Abbildung 40 a+b: Anteile unbeschädigter, beschädigter und fehlender Verjüngung (a) und Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen (b) je Verfahrensgruppe

Die Wahrscheinlichkeit für den einzelnen Verjüngungsbaum, nach dem Hieb zu fehlen, nahm bei allen Verfahrensgruppen mit zunehmender Höhe des Baumes ab (Abb. 41a). Die Wahrscheinlichkeit für eine Beschädigung nach dem Hieb nahm dagegen bei allen Verfahrensgruppen zu.

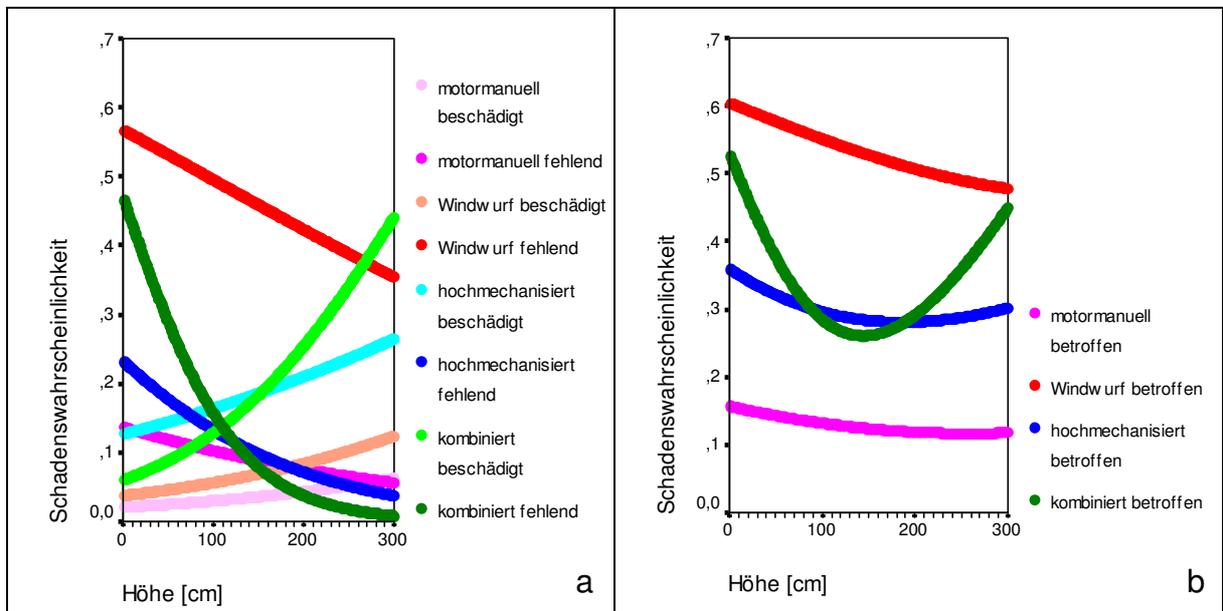


Abbildung 41 a+b: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; getrennt nach Verfahrensgruppen

Auffallend ist, dass bei allen Verfahrensgruppen die „fehlend“-Kurve in etwa so stark abfällt, wie die „beschädigt“-Kurve ansteigt. Bei den kombinierten Verfahren beispielsweise fällt die „fehlend“-Kurve sehr stark ab, während die „beschädigt“-

Kurve ebenso steil ansteigt. Bei den motormanuellen Verfahren dagegen verlaufen beide Kurven eher flach.

Die Kurven für die Gesamtschadenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Höhe des Verjüngungsbaums (Abb. 41b) weisen alle Minima auf. Bei den hochmechanisierten und kombinierten Verfahren liegt dieses bei 1,5m bis 2m, während es bei den motormanuellen Verfahren und der Windwurfaufarbeitung im Bereich von 4m bis 6m und damit deutlich höher liegt.

Während die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum nach dem Hieb fehlte, bei allen Verfahrensgruppen mit steigender Entfernung von der Rückegasse abnahm (Abb. 42a), war der Einfluss der Entfernung von der Rückegasse bei den Beschädigungen deutlich weniger stark ausgeprägt. In der Nähe der Rückegassen wurden offensichtlich viele Verjüngungsbäume vernichtet, während sich die beschädigten Bäume gleichmäßiger auf der Fläche verteilten.

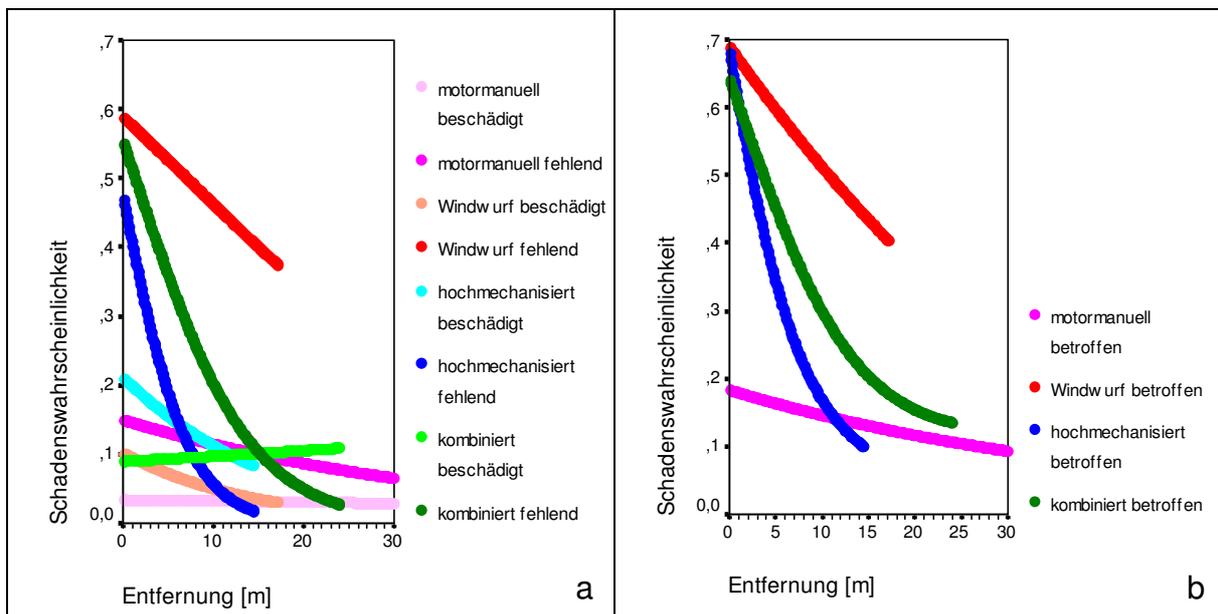


Abbildung 42 a+b: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Entfernung von der Rückegasse nach dem Hieb beschädigt oder fehlend (a) bzw. betroffen (b) war; getrennt nach Verfahrensgruppen

Bei allen Verfahrensgruppen nahm die Wahrscheinlichkeit für einen Verjüngungsbaum, vom Hieb betroffen zu sein, mit zunehmender Entfernung von der Rückegasse ab (Abb. 42b). Während bei den hochmechanisierten und kombinierten Verfahren diese Konzentration der Schäden an den Gassen sehr deutlich war, verteilten sich die Schäden bei den motormanuellen Verfahren und auf der Windwurffläche gleichmäßiger im Bestand.

Die Verfahren, bei denen ein Harvester zum Einsatz kam, zeigten also alle eine deutliche Konzentration der Schäden an den Rückegassen, während sich die Schäden bei der motormanuellen Holzernte kaum an den Gassen häuften. Allerdings könnte dieser Effekt zumindest teilweise auch auf die unsystematischen Rückegassennetze auf den beiden Eichen-Buchen-Flächen zurückzuführen sein.

3.2 Einzelbäume

3.2.1 Rahmenbedingungen für die Auswertungen

Zur Ermittlung der reinen Fällschäden an Verjüngungen wurden 158 Altbestandsbäume einzeln in verjüngte Bestandesbereiche gefällt (siehe Kap. 2.2.3). Von diesen fielen acht Bäume vollkommen am vorgesehenen Bereich vorbei, so dass letztlich die Daten von 150 Einzelbäumen für die Auswertungen herangezogen werden konnten. Insgesamt waren bei diesen 150 Bäumen 1800 Stichprobenpunkte (12 pro Baum) angelegt worden, an denen die Verjüngung vor und nach der Fällung in Probekreisen aufgenommen wurde. Fast genau zwei Drittel dieser Probekreise (1196) wurden durch die Fällung der Bäume betroffen. Abbildung 43a zeigt die Verteilung der betroffenen Probekreise auf die Baumarten im Altbestand und auf die Stamm- und Kronenbereiche.

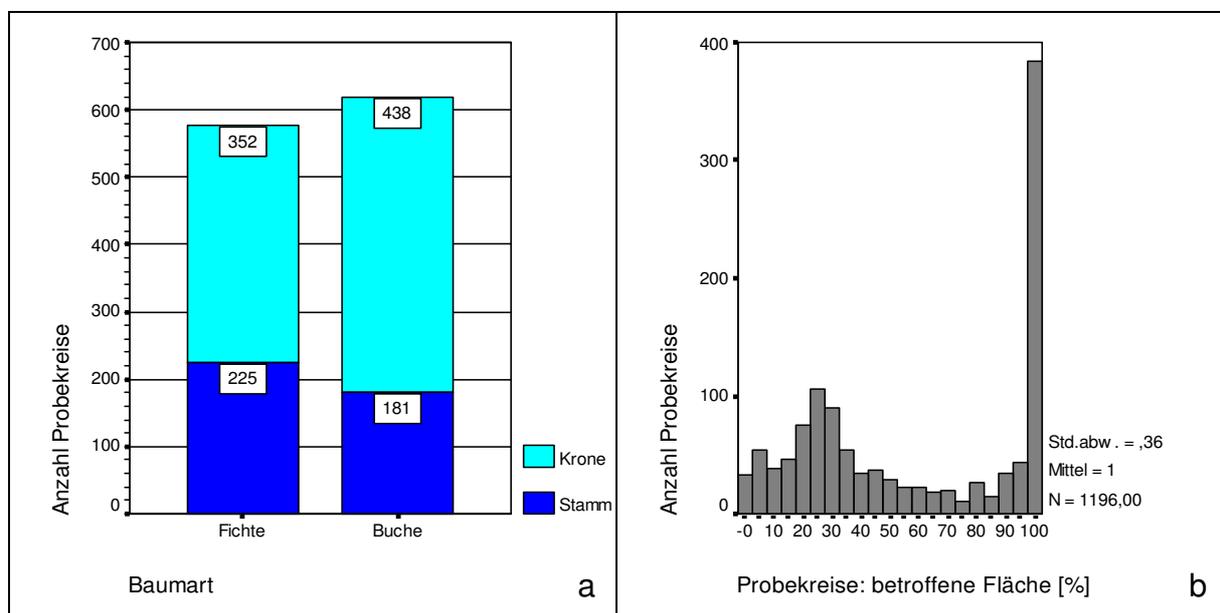


Abbildung 43 a+b: (a) Anzahl betroffener Probekreise nach Baumart und Stamm- und Kronenbereichen
(b) Verteilung der Anteile betroffener Probekreisfläche (nur betroffene Probekreise)

Diese 1196 Probekreise wurden allerdings nicht alle vollständig von den gefällten Bäumen betroffen, im Stammbereich war dies (bei Probekreisen mit einem Durchmesser von 1,8m) sogar unmöglich (vgl. Kap. 2.2.3, Abb. 3a-e auf S. 11). Die Verteilung der mit dem GIS-Programm ArcView ermittelten Anteile betroffener Probekreisfläche zeigt die Abbildung 43b. Nur ein knappes Drittel der von der Fällung betroffenen Probekreise wurde vollständig betroffen. Bei späteren Auswertungen wurde dieser unterschiedliche Anteil betroffener Probekreisfläche berücksichtigt, um die Schäden ermitteln zu können, die auf der betroffenen Bestandesfläche entstehen. Beispielsweise wurde der Anteil betroffener Probekreisfläche als Variable in die logistischen Regressionen des Schadensermittlungsmodells (Kap. 4.3) aufgenommen.

Die verschiedenen Verjüngungen, in die die 150 Bäume gefällt wurden, unterschieden sich teilweise deutlich voneinander. Während die Verjüngungsbäume in einzelnen Beständen kaum kniehoch waren, besaßen sie auf anderen Flächen

bereits Dickungsdimensionen. Diese breite Streuung war erwünscht, um die Schäden im ganzen Höhenbereich einer Verjüngung ermitteln zu können. Insgesamt standen in den 1196 Probekreisen vor der Fällung der Altbestandsbäume über 11000 einzelne Verjüngungsbäume. Die mittlere Höhe der Verjüngung betrug dabei 130cm. Bei den Auswertungen wurden allerdings Verjüngungsbäume mit einer Höhe unter 50cm, die lediglich im kleineren Probekreis erfasst worden waren, mit dem Faktor 5 hochgerechnet. Dadurch wurde die lediglich 20% der Fläche des großen Probekreises betragende Fläche des kleinen Probekreises ausgeglichen. Bei entsprechender Gewichtung ergab sich eine Anzahl von insgesamt über 18000 Verjüngungsbäumen mit einer mittleren Höhe von 92cm.

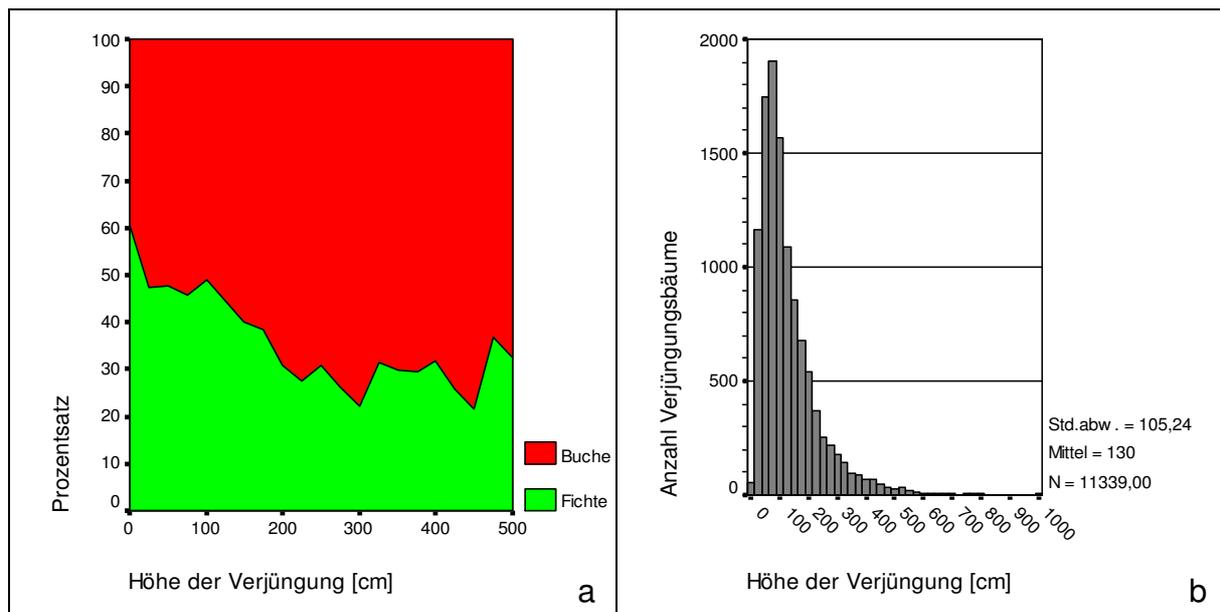


Abbildung 44 a+b: (a) Anteil der Baumarten an der Verjüngung nach der Höhe (ungewichtet)
(b) Stammzahlverteilung der Verjüngung nach der Höhe (ungewichtet)

Die Anteile der Baumarten Fichte und Buche an der Verjüngung vor der Fällung der Einzelbäume stellt Abbildung 44a dar. Der Fichtenanteil sinkt mit steigender Verjüngungshöhe, während der Buchenanteil steigt. Trotzdem sind in allen Höhenbereichen, zumindest bis 4m Höhe, insgesamt ausreichend Bäume (Abb. 44b) und auch ausreichend Fichten und Buchen (Abb. 44a) für die spätere Modellbildung vorhanden. Die sonstigen Baumarten in der Verjüngung wurden bei den Auswertungen aufgrund zu geringer Stückzahlen nicht berücksichtigt.

In den folgenden Kapiteln werden die Auswirkungen der Fällungen auf die Verjüngung beschrieben. Zudem werden verschiedene Merkmale der gefällten Bäume (Kap. 3.2.1) und der Verjüngung (Kap. 3.2.2) auf die Ergebnisvariablen „Anteil fehlender/beschädigter/betroffener Verjüngung“ sowie auf die verschiedenen Schadensarten geprüft. Es werden Hypothesen zum Einfluss der verschiedenen Variablen auf die Schäden an der Verjüngung aufgestellt, die in Kapitel 4.3 bei der Ermittlung der Modellgleichungen überprüft werden.

Dabei geht es bei den Einzelbäumen (im Gegensatz zu den Versuchsflächen) immer um die Schäden pro Flächeneinheit, die vom gefällten Altbestandsbaum vollständig betroffen wurde.

3.2.2 Merkmale der gefälltten Bäume und Verjüngungsschäden

3.2.2.1 Baumart

Die Boxplots in Abbildung 45a stellen die verschiedenen Schadprozentage als wichtigste Ergebnisvariablen in Abhängigkeit von der Baumart des gefälltten Altbestandsbaumes dar. Der Median des Anteils fehlender Bäume und der Median des Anteils beschädigter Bäume lagen bei den gefälltten Fichten etwas niedriger als bei den gefälltten Buchen. Der Median des Anteil betroffener Verjüngungsbäume dagegen war bei den gefälltten Fichten und Buchen fast identisch. Zudem waren die Bereiche der mittleren 50% der Werte bei allen drei Ergebnisvariablen vergleichbar.

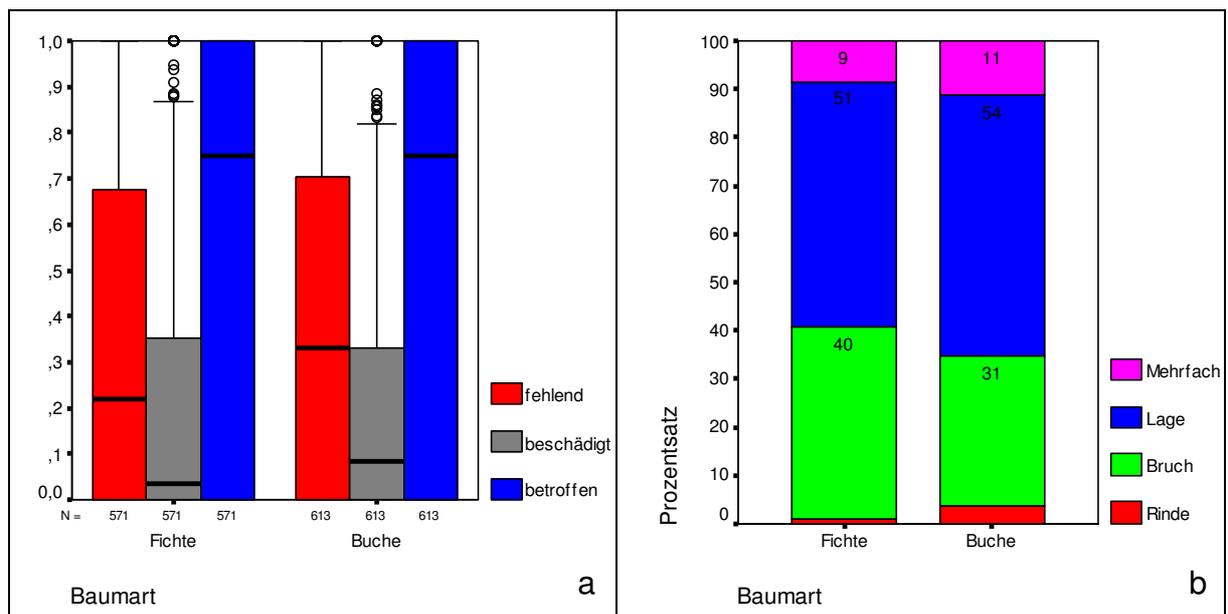


Abbildung 45 a+b: Boxplots der Ergebnisvariablen Anteil fehlender, beschädigter und betroffener Verjüngung (a) sowie Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Baumart des gefälltten Altbestandsbaums

Die Anteile der einzelnen Schadensgruppen (Abb. 45b) unterschieden sich bei gefälltten Fichten und gefälltten Buchen lediglich leicht. Während bei gefälltten Fichten mehr Brüche auftraten, verursachten gefällte Buchen etwas mehr Lageveränderungen sowie Rinden- und Mehrfachsäden.

Die Fällung von Fichten oder Buchen unterschied sich in ihren Auswirkungen auf die Verjüngung pro betroffener Flächeneinheit lediglich leicht.

3.2.2.2 BHD

Obwohl bei den Einzelbäumen die Schäden an der Verjüngung pro betroffener Flächeneinheit betrachtet werden, ist ein Einfluss des Brusthöhendurchmessers des gefällten Altbestandsbaumes denkbar, da mit steigenden BHD die Masse des Baumes ebenfalls steigt. Mehr Masse bedeutet aber zum einen eine höhere Wucht beim Aufprall, zum anderen aber auch mehr Kronenmaterial, dass Verjüngungsbäume begraben kann.

Die Abbildung 46a zeigt die Boxplots zu den Schadprozenten in Abhängigkeit vom BHD der gefällten Bäume. Bei keinem Schadprozent konnte ein eindeutiger Trend mit zunehmendem BHD festgestellt werden.

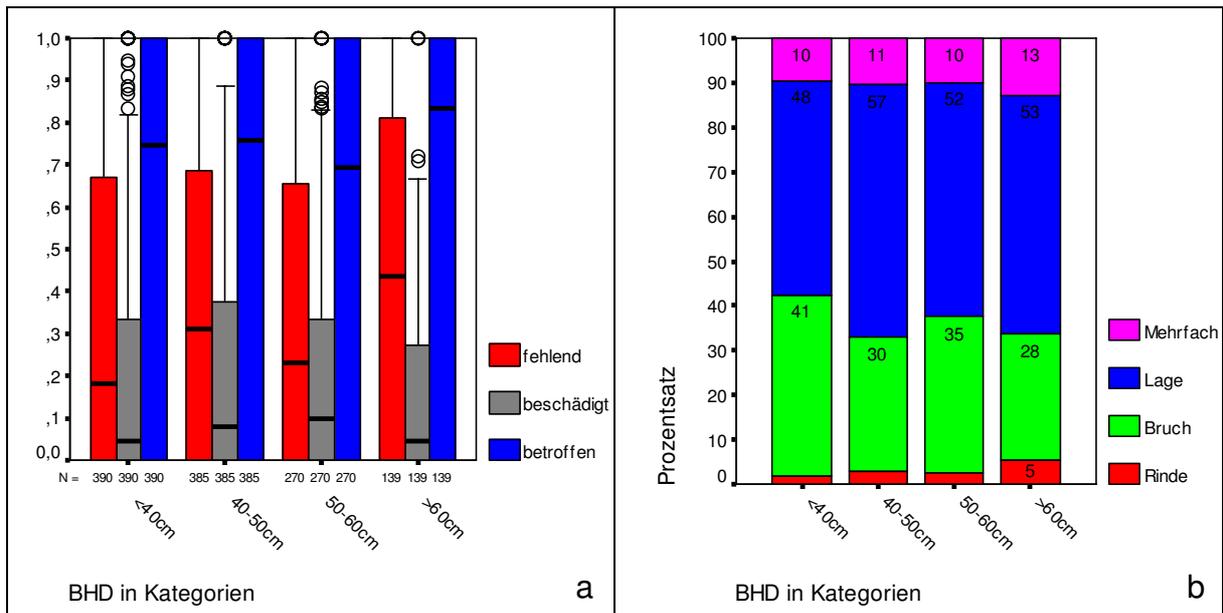


Abbildung 46 a+b: Boxplots der Ergebnisvariablen Anteil fehlender, beschädigter und betroffener Verjüngung (a) sowie Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig vom BHD des gefällten Altbestandsbaums

Gleiches galt für die Schadensgruppen (Abb. 46b). Auch hier waren keine eindeutigen Trends zu erkennen, wenn auch Rinden- und Mehrfachschäden mit zunehmendem BHD leicht zuzunehmen schienen und Brüche möglicherweise abnahmen.

Der BHD des gefällten Altbestandsbaums besaß also keinen deutlichen Einfluss auf die Schäden pro Flächeneinheit.

3.2.2.3 Stamm- und Kronenbereich

Die Abbildung 47a stellt die Schadprozentage getrennt nach Stamm- und Kronenbereichen als Boxplot dar. Augenscheinlich bestanden zwischen Stamm- und Kronenbereichen deutliche Unterschiede. Die Mediane der drei Schadprozentage lagen im Stammbereich deutlich höher als im Kronenbereich. Auch die Bereiche der mittleren 50% Werte unterschieden sich erheblich. Die Stammbereiche verursachten pro Flächeneinheit deutlich mehr Schäden als die Kronenbereiche.

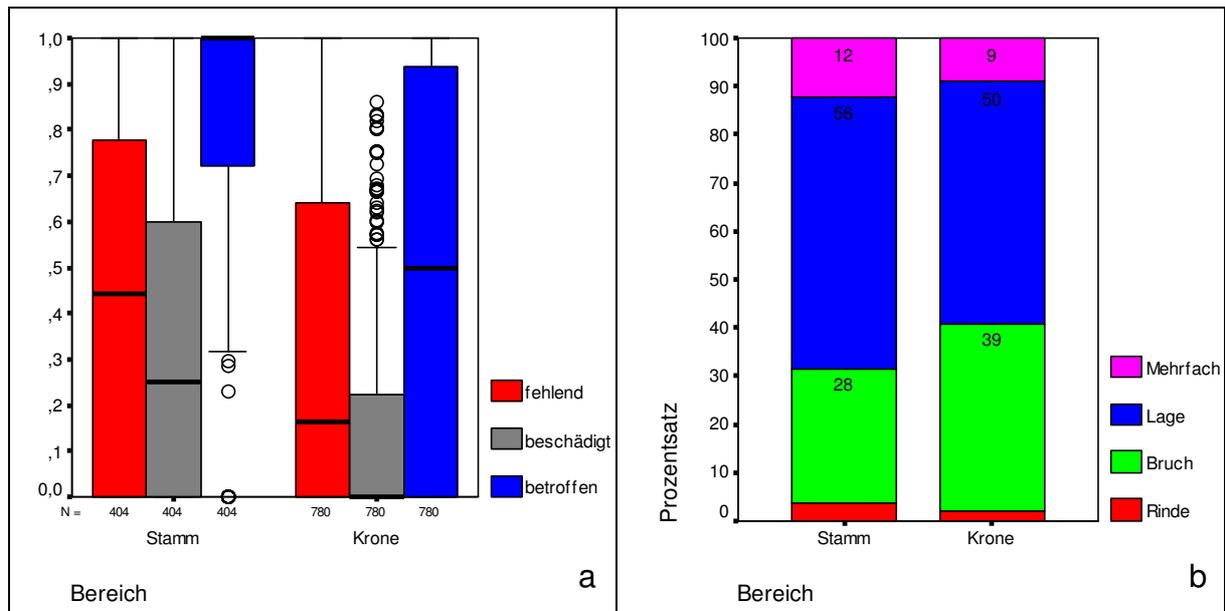


Abbildung 47 a+b: Boxplots der Ergebnisvariablen Anteil fehlender, beschädigter und betroffener Verjüngung (a) sowie Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig vom Bereich (Stamm/Krone) des gefällten Altbestandsbaums

Auch bei den Schadensgruppen (Abb. 47b) waren Unterschiede feststellbar. Während die Kronenbereiche anteilmäßig mehr Brüche verursachten als die Stammbereiche, traten die anderen Schadensgruppen dort häufiger auf. Insgesamt gesehen existierten erwartungsgemäß deutliche Unterschiede zwischen den Stamm- und Kronenbereichen der gefällten Bäume in ihren Auswirkungen auf die Verjüngung.

3.2.2.4 Lage im Kronenbereich

Die liegenden Kronen der gefällten Bäume weisen eine sehr heterogene Struktur auf. Während im mittleren Bereich sehr viel Kronenmaterial und der Stamm zu liegen kommen, nimmt das Kronenmaterial zu den Rändern hin deutlich ab. Die folgenden beiden Kapitel sollen klären, ob Unterschiede bezüglich der Schäden zwischen Teilbereichen der Kronen existieren.

3.2.2.4.1 Entfernung vom Stamm

Die Entfernung der Verjüngung vom liegenden Stamm hatte einen deutlichen Einfluss auf die entstandenen Schäden, wie Abbildung 48a demonstriert. Der Anteil fehlender Bäume nahm deutlich mit zunehmender Entfernung vom Stamm ab, der Anteil beschädigter Bäume blieb einigermaßen konstant. Allerdings veränderten sich die Schadensarten, wie Abbildung 48b zeigt.

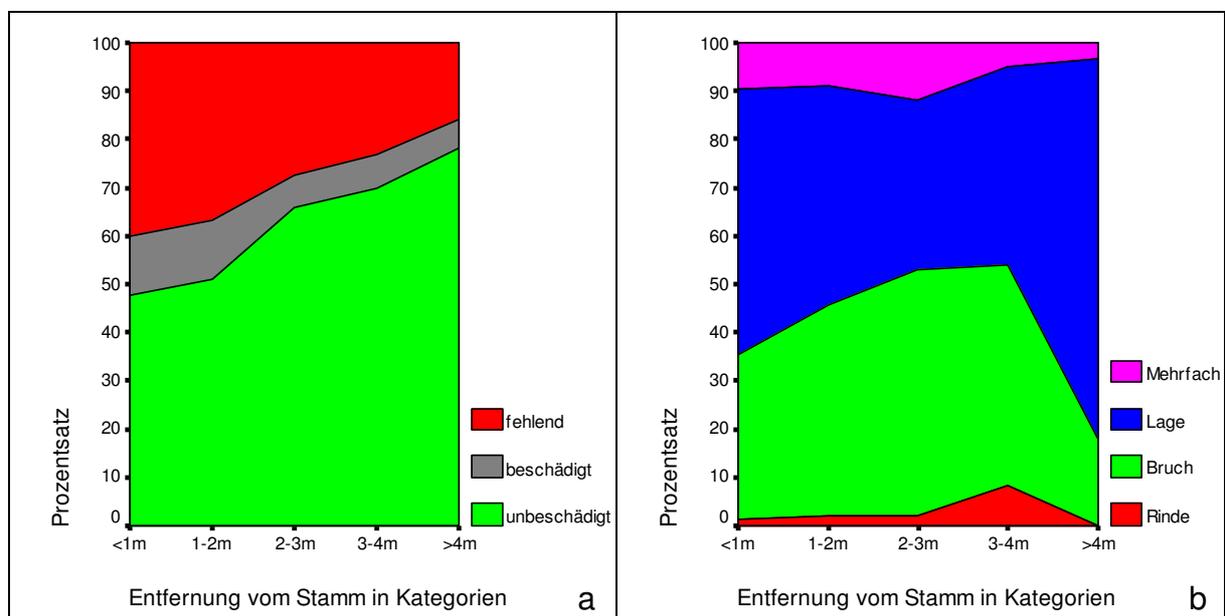


Abbildung 48 a+b: Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Verjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Entfernung vom Stamm im Kronenbereich

So stieg der Anteil an Brüchen mit zunehmender Entfernung vom Stamm tendenziell an, während der Anteil an Lageveränderungen abnahm. Rinden- und Mehrfachschäden veränderten ihre Anteile kaum.

Es machte also einen sichtbaren Unterschied aus, ob die Verjüngung vom mittleren Kronenbereich oder vom Kronenrandbereich getroffen wurde. Die Entfernung der Verjüngung vom Stamm innerhalb der Krone hatte einen deutlichen Einfluss auf die Schäden an der Verjüngung.

3.2.2.4.2 Entfernung vom Kronenansatz

Auch die „vertikale“ Lage in der Krone könnte die Schäden an der Verjüngung beeinflussen. Abbildung 49a gibt die Anteile der fehlenden und beschädigten Bäume in Abhängigkeit von der Entfernung der Verjüngung vom Kronenansatz wieder.

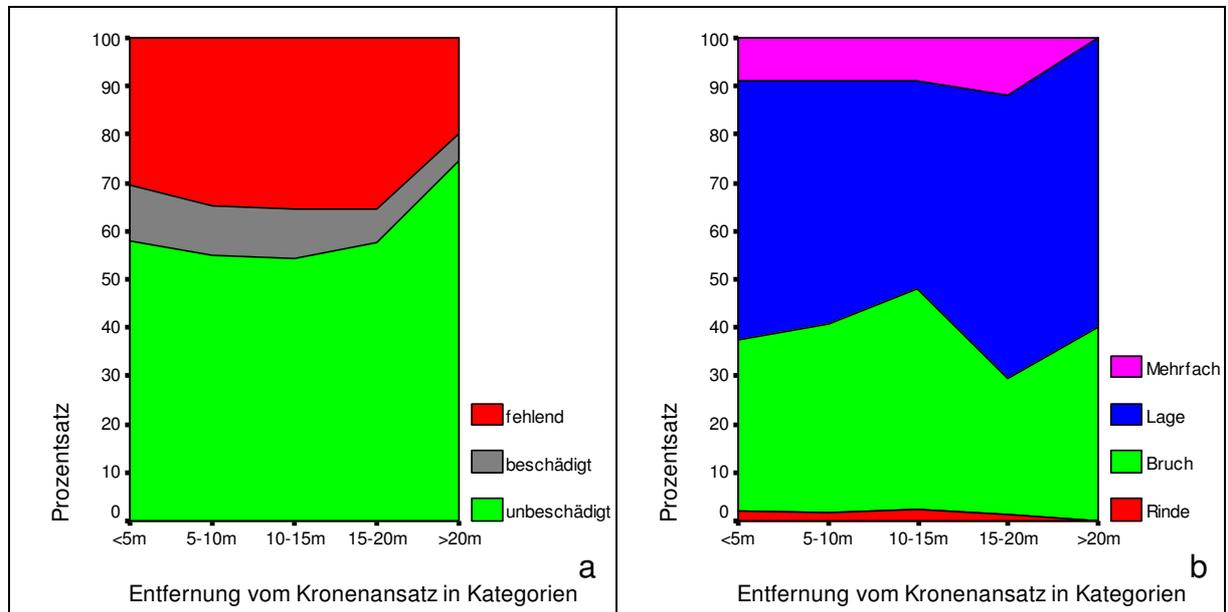


Abbildung 49 a+b: Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Verjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Entfernung vom Kronenansatz im Kronenbereich

Im Gegensatz zur Entfernung vom Stamm ließen sich hier keine deutlichen Zusammenhänge erkennen. Der Anteil beschädigter Verjüngung nahm tendenziell leicht ab.

Auch bei den Schadensgruppen waren keine Trends erkennbar (Abb. 49b). Innerhalb der Krone hatte die Entfernung der Verjüngung vom Kronenansatz offensichtlich keinen Einfluss auf die entstandenen Schäden.

3.2.2.5 Belaubung der gefälltten Buchen

Eine weitere Rolle bei den Auswirkungen der Fällung könnte die Belaubung der gefälltten Buchen spielen. Zwar fanden die Fällungen alle erst ab Oktober statt (keine Sommerfällung!), eine gewisse Restbelaubung war aber an vielen der gefälltten Buchen zu finden.

Die Abbildung 50a informiert über mögliche Unterschiede zwischen unbelaubten und (rest-)belaubten Buchen bezüglich der Schadprozentage als Ergebnisvariablen.

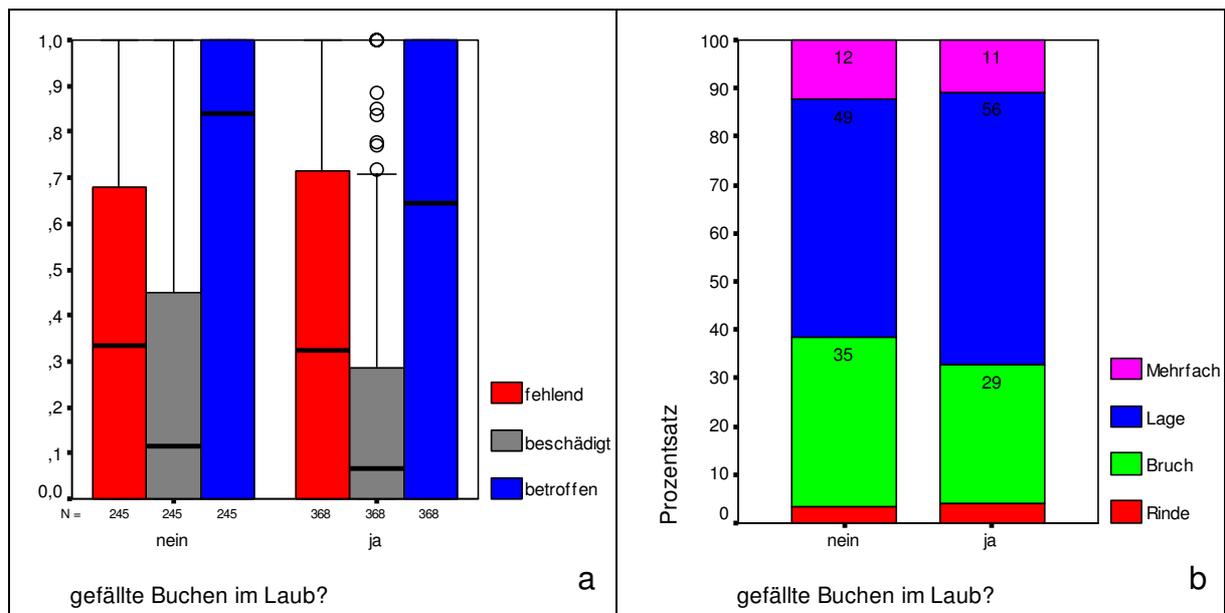


Abbildung 50 a+b: Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Verjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Belaubung der gefälltten Buchen

Während der Median des Anteils fehlender Verjüngung in beiden Fällen nahezu identisch war, waren die Mediane des Anteils beschädigter und des Anteils betroffener Verjüngung im unbelaubten Zustand höher als im belaubten Zustand (Abb. 50a). Die Bereiche der mittleren 50% Werte unterschieden sich nur beim Anteil beschädigter Bäume nennenswert.

Die Anteile der Schadensarten unterschieden sich wenig (Abb. 50b). Im unbelaubten Zustand verursachten die Buchen etwas weniger Lageveränderungen und etwas mehr Brüche.

Bei einer Fällung ab Oktober hatte eine mögliche Restbelaubung der Buchen bezüglich der Schäden an der Verjüngung offensichtlich keinen nennenswerten Einfluss.

3.2.3 Merkmale der Verjüngung und Verjüngungsschäden

3.2.3.1 Baumart

Die Abbildungen 51a und 51b zeigen die unterschiedlichen Schäden an Fichten und Buchen in der Verjüngung.

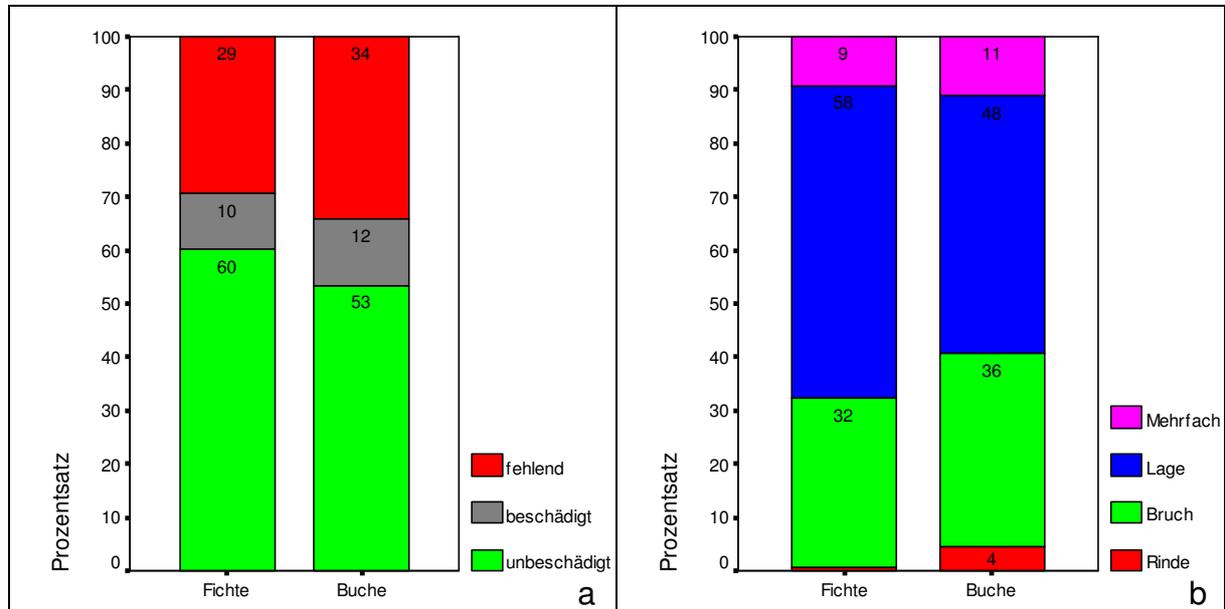


Abbildung 51 a+b: Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Verjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Baumart der Verjüngung

Sowohl der Anteil fehlender als auch der Anteil beschädigter Bäume war bei der Buche höher als bei der Fichte. Auch der Vergleich der Anteile der Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen zeigte Unterschiede. Während die Fichte anteilig mehr Lageveränderungen aufwies, kamen bei der Buche mehr Rindenschäden, Brüche und Kombinationen von Schäden vor.

Die beiden untersuchten Baumarten in der Verjüngung wurden durch die gefällten Bäume offensichtlich unterschiedlich in Art und Höhe beschädigt.

3.2.3.2 Höhe

Die Abbildungen 52a und 52b stellen die Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Bäume in Abhängigkeit von der Höhe der Verjüngung und die Anteile der einzelnen Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen dar.

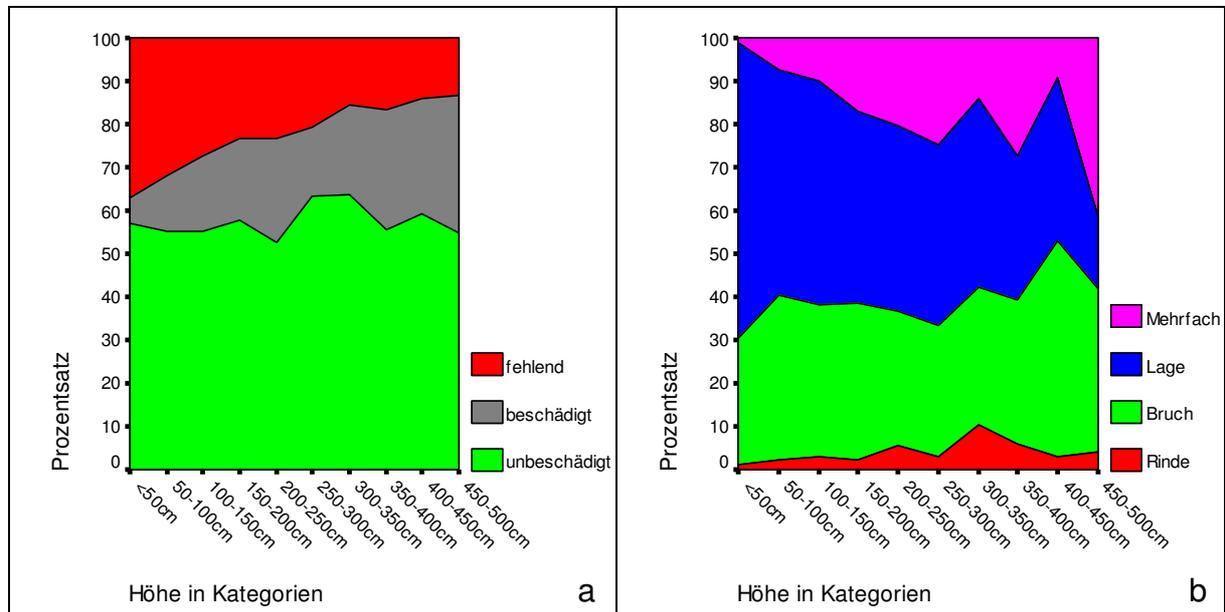


Abbildung 52 a+b: Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Verjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung (b) abhängig von der Höhe der Verjüngung

Der Anteil unbeschädigter Verjüngungsbäume blieb bei zunehmender Verjüngungshöhe in etwa konstant. Allerdings nahm der Anteil fehlender Verjüngung mit steigender Verjüngungshöhe deutlich ab, während der Anteil beschädigter Bäume ebenso deutlich zunahm.

Bei den Schadensgruppen zeigten sich eine Zunahme der Mehrfachschäden und eine Abnahme der Lageveränderungen mit zunehmender Verjüngungshöhe. Bei den Brüchen und Rindenschäden waren keine deutlichen Trends erkennbar.

Art und Höhe der Schäden an der Verjüngung hingen also deutlich mit der Höhe der Verjüngung zusammen. Vor allem die Anteile fehlender und beschädigter Verjüngung wurden durch die Verjüngungshöhe beeinflusst.

3.2.3.3 Belaubung der Buchenverjüngung

Als weiterer möglicher Einflussfaktor auf die Schäden an der Buchenverjüngung kommt deren Belaubungszustand in Frage. Auch hier gilt wieder, dass keine Sommerfällungen durchgeführt wurden. Die ersten Hiebe wurden Anfang Oktober durchgeführt, so dass es sich auch bei der Buchenverjüngung eher um Restbelaubung handelte.

Die Abbildung 53 a+b vergleicht Fällungen in belaubte und unbelaubte Buchenverjüngung miteinander.

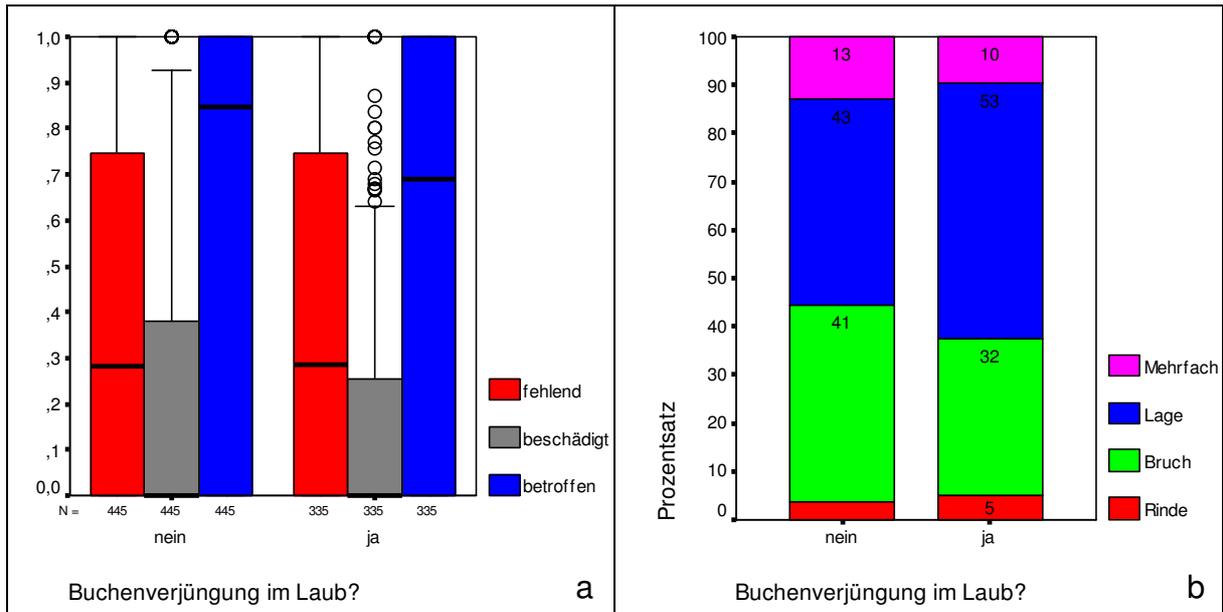


Abbildung 53 a+b: Anteile fehlender, beschädigter und unbeschädigter Buchenverjüngung (a) und Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Buchenverjüngung (b) abhängig von der Belaubung der Buchenverjüngung

Die Mediane und Bereiche der mittleren 50% der Werte waren sich bei den drei Schadprozenten sehr ähnlich, lediglich die Mediane der betroffenen Buchen unterschieden sich voneinander.

Ein Einfluss der Belaubung der Buchenverjüngung auf die Höhe der Fällschäden war (bei Fällung ab Anfang Oktober) nicht zu erkennen.

4 Prognosemodell

4.1 Vorgehensweise

Das Prognosemodell zur Abschätzung der Fällschäden an Verjüngung bei motormanueller Holzernte besteht im Wesentlichen aus den beiden Komponenten „Hiebsstrukturmodell“ und „Schadensermittlungsmodell“. Die Abbildung 54 zeigt die einfließenden Daten, das Zusammenspiel der Komponenten sowie die wichtigsten Ergebnisse.

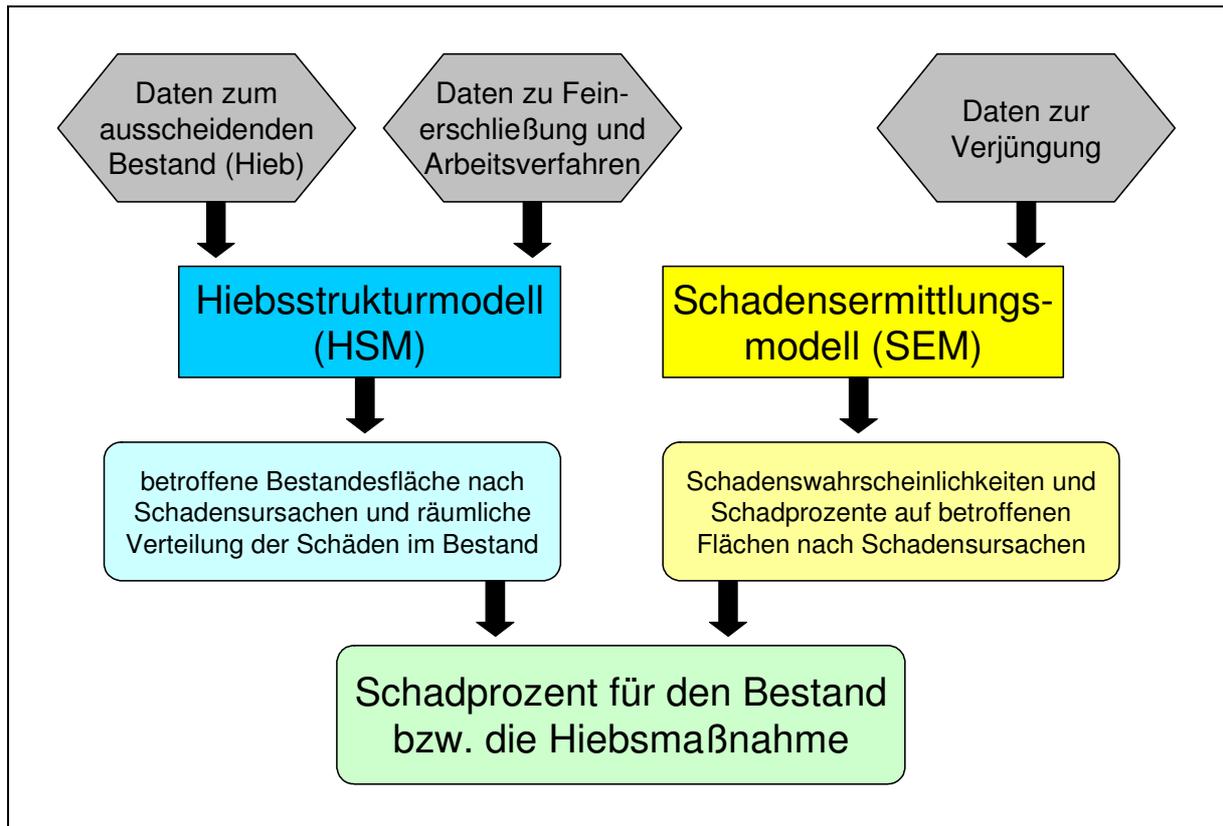


Abbildung 54: Zusammenspiel der Komponenten des Prognosemodells

Im folgenden Kapitel 4.2 wird zunächst die Funktionsweise des Hiebsstrukturmodells näher erläutert (Kap. 4.2.1) und anschließend die Reaktionen des Modells bezüglich der Ergebnisse bei sich ändernden Eingangsvariablen untersucht (Kap. 4.2.3). Dann wird das Hiebsstrukturmodell an drei Versuchsflächen getestet (Kap. 4.2.4).

In Kapitel 4.3 wird zunächst kurz das Prinzip des Schadensermittlungsmodells vorgestellt (Kap. 4.3.1), um danach die ermittelten Funktionen zur Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeiten für den einzelnen Verjüngungsbaum (Kap. 4.3.2.1) und zur Berechnung der Schadprozent je Flächeneinheit (Kap. 4.3.2.2) darzustellen. Anschließend wird in Kapitel 4.3.3 das Schadensermittlungsmodell an zwei Versuchsflächen und ausgewählten Probekreisen getestet.

Zum Abschluss wird das gesamte Prognosemodell auf alle Versuchsflächen angewendet (Kap. 4.4 und 4.5). Dazu werden aus den Ergebnissen des Hiebsstrukturmodells und des Schadensermittlungsmodells die prognostizierten Schadprozent für die jeweiligen Hiebe berechnet und mit den tatsächlich ermittelten Schäden (Kap. 3.1) verglichen.

4.2 Hiebsstrukturmodell (HSM)

4.2.1 Funktionsweise des Hiebsstrukturmodells

Das Hiebsstrukturmodell beschäftigt sich ausschließlich mit der Ursache von Fällschäden an der Verjüngung, der Fällung von Bäumen des Altbestandes. Daher wird auch nicht der gesamte Altbestand betrachtet, sondern lediglich die gefällten Altbestandsbäume. Da allerdings nur derjenige Teil der gefällten Altbestandsbäume Schäden verursachen kann, der in den Bestand (nicht auf die Rückegasse) und damit möglicherweise in die Verjüngung fällt, sind auch Lage und Abmessungen der Rückegassen von Bedeutung. Das Hiebsstrukturmodell simuliert also die Fällung einer bestimmten Anzahl von Bäumen unter festgelegten Rahmenbedingungen (Kap. 4.2.1.2). Daten zur Verjüngung gehen nicht in das Hiebsstrukturmodell ein, sie werden erst bei der Ermittlung der Schäden (Kap. 4.3) berücksichtigt. Da bei jedem Modelldurchlauf die Koordinaten der entnommenen Bäume sowie gegebenenfalls Fällwinkelkorrekturen (in gewissen Grenzen) zufällig sind, ist eine bestimmte Anzahl von Simulationsläufen notwendig, um in den Mittelwerten aus den einzelnen Durchläufen stabile Ergebnisse zu erhalten. Die benötigte Anzahl an Simulationsläufen wird in Kapitel 4.2.2 ermittelt.

4.2.1.1 Die virtuelle Versuchsfläche

Die Größe der virtuellen Versuchsfläche beträgt ein Hektar. Um den Fall zu vermeiden, dass Bäume östlich oder westlich aus der Versuchsfläche herausfallen (Randeffekte), wurde die Breite der Versuchsfläche in Ost-West-Richtung auf 120m festgelegt. Bei den praxisüblichen Rückegassenabständen von 20m, 30m oder 40m bildet somit immer eine Bringungsgrenze den West- und den Ostrand der Versuchsfläche. Die Ausdehnung der virtuellen Versuchsfläche in Nord-Süd-Richtung beträgt dementsprechend 83,33m. Außerdem wurde definiert, dass alle Bäume (außer bei fixen Fällwinkeln) in nördliche Richtungen und auf die am nächsten gelegene Rückegasse fallen müssen, um eine plausible Schlagordnung zu erhalten. In nördlicher Richtung können daher Bäume aus der Versuchsfläche herausfallen. Es wird davon ausgegangen, dass dies der Anzahl an Bäumen entspricht, die von Süden her in die Versuchsfläche hereinfallen würden, wäre diese ein Ausschnitt aus einem größeren Hieb. Für die Ergebnisse aus den Modelldurchläufen ist dies also ohne Bedeutung.

4.2.1.2 Eingangsdaten

4.2.1.2.1 Daten zur Feinerschließung

In dem Modell ist der **Rückegassenabstand** grundsätzlich zwischen 10m und 120m frei wählbar. Zumeist werden allerdings Abstände zwischen 20m und 40m zur Anwendung kommen. Je nach Holzernteverfahren, Sortiment und Bundesland (rechtliche Vorgaben) finden sich in diesem Bereich die meisten der Bestände in Deutschland außerhalb des Kleinprivatwaldes. Sinnvollerweise werden die Abstände allerdings so gewählt, dass jeweils eine Bringungsgrenze auf den linken und rechten Rand der virtuellen Versuchsfläche fällt, damit keine Bäume dort aus der Versuchsfläche herausfallen (siehe Kap. 4.2.1.1). Die mit dieser Vorgabe

realisierbaren Rückegassenabstände sowie die zugehörige Anzahl an Rückegassen zeigt die nachfolgende Tabelle 18.

Tabelle 18: Rückegassenabstände und die zugehörige Anzahl an Rückegassen

Anzahl	1	2	3	4	5	6	8	10	12
Abstand [m]	120	60	40	30	24	20	15	12	10

Es kann eine **Rückegassenbreite** zwischen 1m und 10m gewählt werden. Damit wird auch der durch die unterschiedlichen Holzernte- und/oder Rückefahrzeuge entstehende praxisübliche Bereich zwischen 3m und 5m abgedeckt.

4.2.1.2.2 Daten zum ausscheidenden Bestand

In dem Modell ist (zunächst) die Entnahme der **Baumarten** Fichte, Buche und Eiche möglich. Die Dimensionen des einzelnen Baumes werden dabei ausschließlich über den **mittleren Brusthöhendurchmesser** der entnommenen Bäume je Baumart gesteuert. Dabei muss je Baumart ein BHD zwischen 0 und 150cm eingegeben werden. Das Modell arbeitet mit „Einheitsbäumen“, d.h. es wird je Baumart immer der gleiche Baum erzeugt.

Die Stärke des Eingriffs wird über die **Anzahl der entnommenen Bäume** gesteuert. Da die Anzahl entnommener Bäume einen deutlich höheren Einfluss auf die Schäden in der Verjüngung hat als etwa das entnommene Gesamtvolumen (KORTEN 1999), ist auf eine andere Möglichkeit der Festlegung der Eingriffsstärke (z.B. in Efm) verzichtet worden.

4.2.1.2.3 Daten zum Arbeitsverfahren

Das Arbeitsverfahren fließt nur indirekt in das Modell ein. Die wichtigste Einstellmöglichkeit ist dabei die Eingabe von **Fällwinkelkorrekturen**. Bezüglich des Fällwinkels können drei Modifikationen eingegeben werden. Zunächst einmal kann durch die Eingabe negativer Fällwinkel ein **fixer Fällwinkel** festgelegt werden. Alle Bäume werden in die gleiche Richtung gefällt. Damit lassen sich beispielsweise Windwurfsituationen simulieren. Dann kann ein **semi-fixer Fällwinkel** eingegeben werden, womit sich sehr strikte Schlagordnungen simulieren lassen. Die Bäume werden in einem bestimmten Winkel zur Gasse hin (180°-360°) oder von der Gasse weg (0°-180°) geworfen. Dadurch können sowohl motormanuelle als auch hochmechanisierte Arbeitsverfahren simuliert werden (vgl. GRANHUS und FJELD 2001, S. 1906). Des Weiteren kann ein **maximaler Fällwinkel** festgelegt werden, womit beispielsweise praxisunübliche Fällungen senkrecht zur Rückegasse bei sehr großen Rückegassenabständen vermieden werden können. Und schließlich kann eine **zufällige Fällwinkelabweichung** von der idealen Fällrichtung (Krone landet maximal auf der Rückegasse) bis zu einem Maximalwert von 45° eingegeben werden, womit deutlich realistischere Szenarien gestaltet werden können. Diese Fällwinkelabweichung greift auch, wenn ein fixer, semi-fixer oder maximaler Fällwinkel festgelegt wurde. Neben den Fällwinkelkorrekturen gibt es durch die Festlegung des **Mindestabstands** der entnommenen Bäume zueinander die Möglichkeit, ansatzweise die Verteilung der Hiebsbäume und damit die Art des Eingriffs zu beeinflussen. Gleichmäßige Entnahmen über die gesamte Fläche bis femelartige Hiebe können simuliert werden. Dabei wird als Mindestabstand der entnommenen Bäume zueinander wahlweise der kleinste oder der größte

Kronendurchmesser der beteiligten Baumarten angenommen, es kann aber auch eine konkrete Zahl in Metern eingegeben werden.

4.2.1.2.4 Anzahl der Simulationsläufe

Die Anzahl der Simulationsläufe muss festgelegt werden. Dabei sind zwischen einem und 9999 Durchläufen möglich.

4.2.1.3 Ablauf des Programms

Im Folgenden soll die Funktionsweise des Modells nach der Eingabe der Eingangsdaten kurz erläutert werden. Bei mehr als einem Durchlauf erfolgt der Ablauf entsprechend oft. Die Punkte 4.2.1.3.1 bis 4.2.1.3.4 erfolgen dabei mittels eines C-Programms, der Punkt 4.2.1.3.5 wird mit dem GIS-Programm ArcView durchgeführt.

4.2.1.3.1 Berechnung der Einheitsbäume

Zunächst wird für jede Baumart die Form des liegenden Baumes berechnet. Dabei wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass diese der Form des stehenden Baumes entspricht. Für jede Baumart wird in Abhängigkeit vom BHD die Form des Einheitsbaumes berechnet. Dies erfolgt auf der Basis von allometrischen Funktionen, die aus dem BHD die Baumhöhe, die Kronenansatzhöhe, den Kronendurchmesser und weitere Werte ableiten. Die Funktionen zur Berechnung der Baumkronen finden sich bei PRETZSCH (2001). Alle Bäume sind hierbei rotationssymmetrisch. Bei der Fichte werden zur Beschreibung der Baumform neun Punkte verwendet. Bei Buche und Eiche werden für die Rundung der Lichtkrone weitere 20 Punkte berechnet. Für die Form des Stammes wird ein Zylinder mit der Breite des Brusthöhendurchmessers angenommen. Das Ergebnis dieses Teilschritts sind je Baumart abhängig vom eingegebenen BHD die Formen der Einheitsbäume. Die Flächen der liegenden Bäume nach Baumart, BHD und Stamm- bzw. Kronenbereich zeigt Abbildung 55.

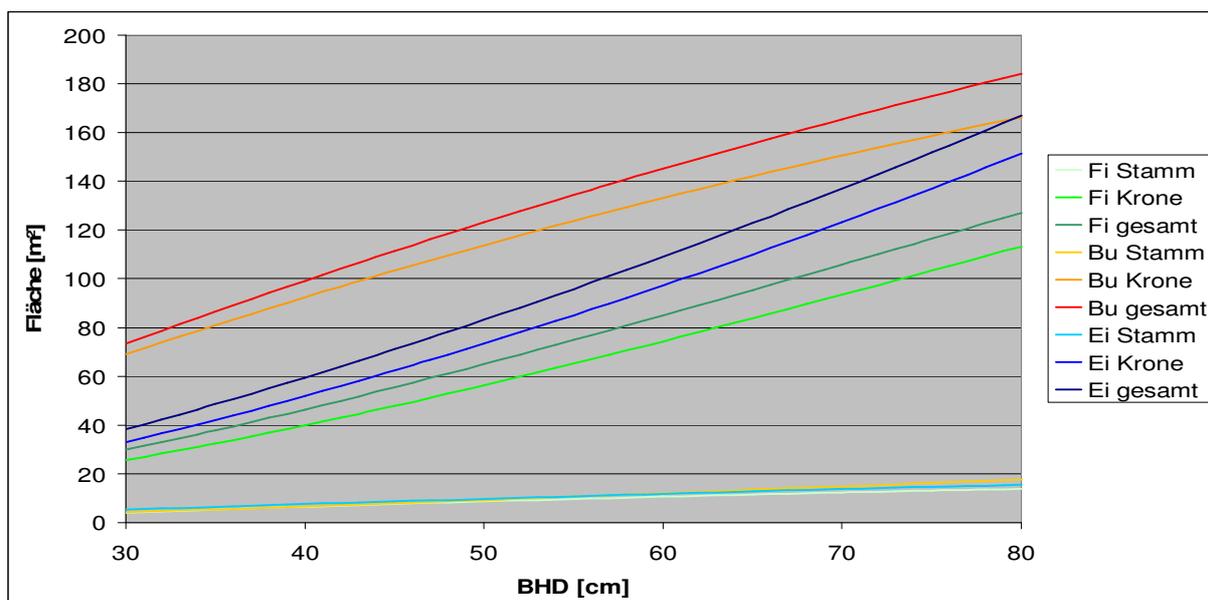


Abbildung 55: Flächen der liegenden Bäume nach Baumart, BHD und Stamm-/Kronenbereich

4.2.1.3.2 Verteilung der Bäume des Hiebes

Danach werden die zu entnehmenden Bäume des Hiebes zufällig verteilt. Das Programm erzeugt die entsprechende Anzahl von Stammfußkoordinaten. Bäume dürfen dabei nicht auf Rückegassen stehen, daher muss der Abstand zur Rückegasse mindestens dem BHD des Baumes entsprechen. Auch sollen die Bäume einen gewissen Abstand zueinander haben. Der Mindestabstand zwischen zwei Bäumen entspricht daher im Regelfall dem maximalen Kronendurchmesser, andere Mindestabstände können aber eingegeben werden. Das Ergebnis dieses Teilschritts sind die Stammfußkoordinaten der entnommenen Bäume.

4.2.1.3.3 Berechnung der Fällwinkel

Als nächstes wird für jeden Baum der ideale Fällwinkel berechnet. Ideal ist der Fällwinkel dann, wenn ein Minimum an Bestandesfläche beeinträchtigt und somit ein Minimum an vorhandener Verjüngung beschädigt wird. Dies wird dadurch erreicht, dass möglichst viel der Baumkrone auf der Rückegasse zu liegen kommt. Daher wurde zur Berechnung des idealen Fällwinkels festgelegt, dass der Schnittpunkt von Baumachse und breitester Stelle der Krone (Kronenmitte) auf der Mitte der Rückegasse liegen soll. In Kombination mit den Stammfußkoordinaten der Bäume und dem Verlauf der Rückegassen sowie den Bedingungen, dass die Bäume in nördliche Richtungen und zur nächstgelegenen Rückegasse fallen sollen, wird so die Berechnung des idealen Fällwinkels für jeden Baum ermöglicht. Gegebenenfalls werden die berechneten idealen Fällwinkel anschließend noch modifiziert, wenn entsprechende Fällwinkelkorrekturen (siehe Kap. 4.2.1.2.3) eingegeben wurden. Daraus ergeben sich als Teilergebnis die tatsächlich zur Anwendung kommenden Fällwinkel.

4.2.1.3.4 Berechnung der Koordinaten der liegenden Bäume

Aus den Stammfußkoordinaten, den Einheitsbaumformen und den Fällwinkeln werden nun für jeden Baum die entsprechenden Koordinaten berechnet. Dabei wird der jeweilige Einheitsbaum zunächst in Richtung des Fällwinkels gedreht und anschließend auf seine Stammfußkoordinaten verschoben. Als Ergebnis existieren nun für jeden liegenden Baum die konkreten Koordinaten, die nun an das GIS-Programm ArcView übergeben werden.

4.2.1.3.5 Berechnung der Ergebnisvariablen

Die eigentliche Berechnung der Ergebnisvariablen erfolgt mit dem GIS-Programm ArcView. Die einzelnen liegenden Bäume werden als Polygone erzeugt, wobei der Stamm- und der Kronenbereich getrennt behandelt werden. Neben den Informationen über die liegenden Bäume benötigt ArcView auch die Koordinaten der Rückegassen, um zwischen betroffener Bestandesfläche und betroffener Rückegassenfläche unterscheiden zu können. Die Abbildung 56 zeigt die Ausgabe des ArcView-Programms für den Simulationsdurchlauf einer Beispielsimulation.

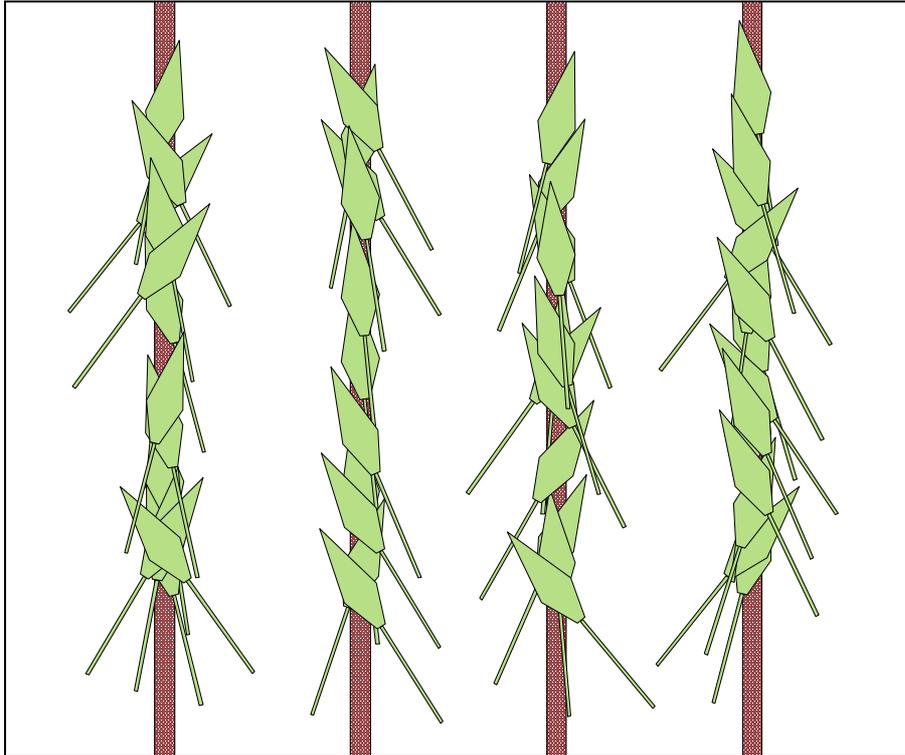


Abbildung 56: Visualisiertes Ergebnis eines Simulationslaufs des ArcView-Programms

4.2.1.4 Ergebnisvariablen

4.2.1.4.1 *betroffene Bestandesfläche*

Die wichtigste Ergebnisvariable ist die von den gefälltten Altbestandsbäumen betroffene Bestandesfläche (in m^2). Sie ist die Differenz aus betroffener Gesamtfläche und betroffener Rückegassenfläche.

Je Baumart wird zunächst die Summe der Stamm- und der Kronenflächen der einzelnen Bäume ausgegeben. Diese Gesamtflächen werden weiterhin aufgeschlüsselt in Flächen im Bestand und in Flächen auf den Rückegassen. Durch diese Flächen lassen sich die Anteile der Baumarten und der jeweiligen Stamm- und Kronenbereiche an der betroffenen Bestandesfläche ermitteln.

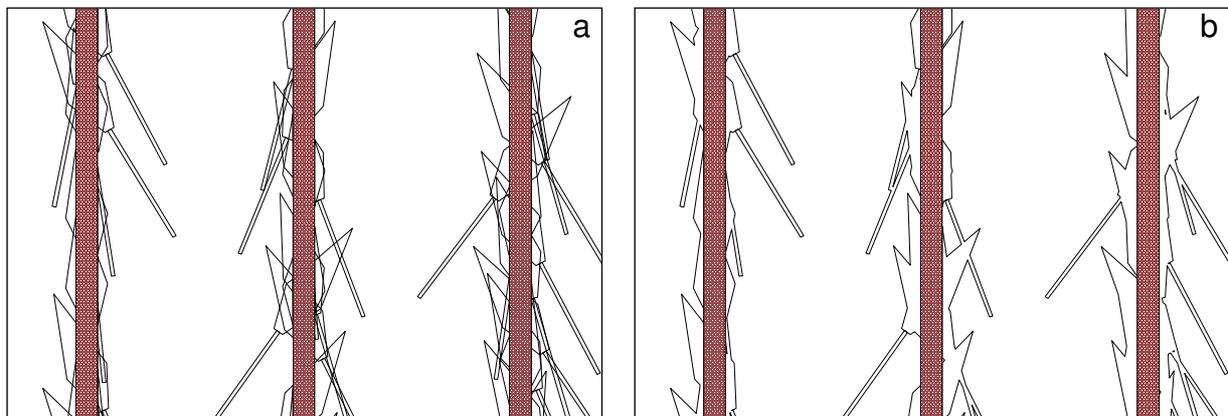


Abbildung 57 a+b: betroffene Bestandesfläche als Summe (a) und als Projektion der Einzelbaumflächen (b)

Die insgesamt **betroffene Bestandesfläche** ist in aller Regel kleiner als die Summe der Flächen der einzelnen Bäume und Bereiche. Dies liegt daran, dass sich die Flächen der gefälltten Bäume oft überschneiden (Abb. 57a). Die betroffene Bestandesfläche ist also die Projektionsfläche aller im Bestand liegenden Bäume und Baumteile zusammen (Abb. 57b).

Die Differenz der Summe der Einzelbaumflächen und der betroffenen Bestandesfläche stellt die **Überschneidungsfläche** dar, auf der mehr als ein Baum zu liegen kommt. Vereinfachend wird dabei angenommen, dass diese Überschneidungsfläche nur von Kronen gebildet wird, die auf andere Kronen fallen. Diese Vereinfachung ist tolerierbar, da Bäume in der Regel parallel und nicht übereinander gefällt werden und sich somit kaum im Stammbereich schneiden. Da die Stammflächen zudem sehr schmal sind, sind etwaige Überschneidungsflächen sehr klein und daher vernachlässigbar. Eine weitere Vereinfachung stellt die Annahme dar, dass auf den Überschneidungsflächen genau zwei Kronen aufeinander liegen. Eine Fehlerabschätzung dieser Annahme findet sich in der Diskussion in Kapitel 6.3.2.

Durch diese Vereinfachungen lässt sich die betroffene Bestandesfläche in drei Teilflächen unterteilen:

- einfach durch Stammbereiche betroffene Bestandesfläche
- einfach durch Kronenbereiche betroffene Bestandesfläche
- doppelt durch Kronenbereiche betroffene Bestandesfläche

4.2.1.4.2 räumliche Verteilung der Schäden im Bestand

Neben den Informationen über Art und Höhe der Schäden ist die räumliche Verteilung dieser Schäden im Bestand von großem Interesse. Als Maß für diese räumliche Verteilung ist die Entfernung des einzelnen Schadens von der nächsten Rückegasse verwendbar. Aus der Summe der einzelnen Schäden und ihrer jeweiligen Entfernung lassen sich Funktionen berechnen, die die Konzentration der Schäden an den Rückegassen wiedergeben. So wurde bei den verschiedenen Versuchsflächen vorgegangen. Das Hiebsstrukturmodell ermittelt auf ähnliche Weise die räumliche Verteilung der Schäden auf der virtuellen Versuchsfläche.

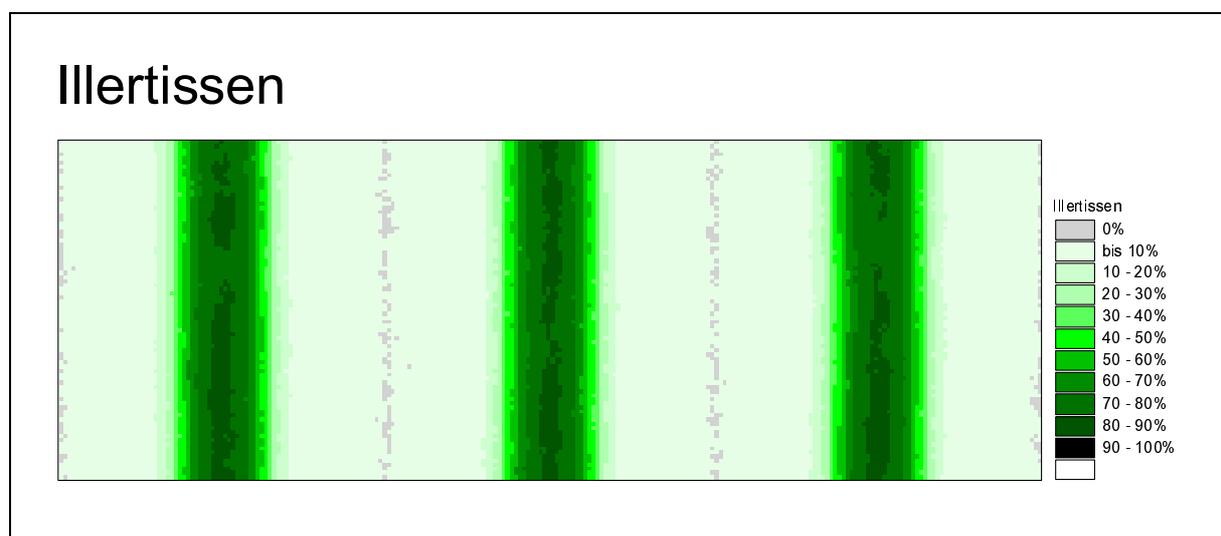


Abbildung 58: Ergebnis-Grid für die Simulation der Versuchsfläche im FoA Illertissen

Mit dem GIS-Programm ArcView wird bei jedem Simulationslauf ein so genannter Grid erzeugt, der die virtuelle Versuchsfläche in 50x50cm große Pixel einteilt. Es wird nun für jeden Pixel ermittelt, ob er von den gefälltten Bäumen betroffen wurde oder nicht. Die Summe aller Grids der einzelnen Simulationsläufe ist der **Ergebnis-Grid**. Wurde ein Pixel beispielsweise bei 20 von 100 Simulationsläufen betroffen, so besteht für diesen Pixel eine Schadenswahrscheinlichkeit von 20%. Diese Schadenswahrscheinlichkeiten lassen sich mit ArcView sehr gut darstellen. Die Abbildung 58 (S. 68) zeigt als Beispiel den Ergebnis-Grid für die Simulation (1000 Simulationsläufe) der ZEUS-Versuchsfläche im FoA Illertissen.

Aus dem Ergebnis-Grid kann nun problemlos eine **Funktion** berechnet werden, die die Schadenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Entfernung des Pixels von der nächsten Rückegasse angibt. Abbildung 59a zeigt die ermittelten Werte für die Modelldurchläufe der Versuchsfläche Illertissen. Die zugehörige logistische Ausgleichsfunktion gibt Abbildung 59b wieder.

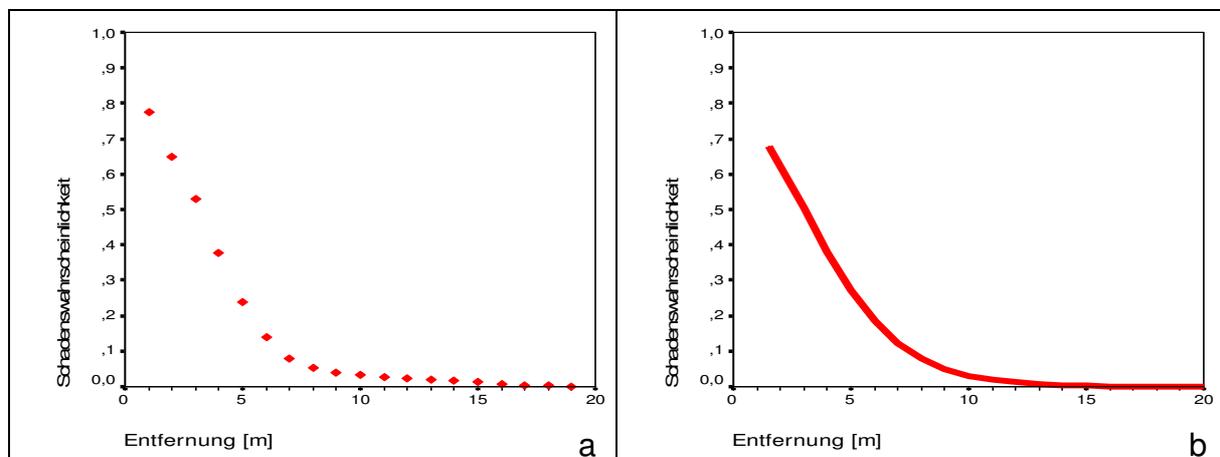


Abbildung 59 a+b: Die aus dem Ergebnis-Grid ermittelte Schadenswahrscheinlichkeiten (a) sowie die errechnete logistische Ausgleichsfunktion (b) für die Versuchsfläche im FoA Illertissen

Zu beachten ist allerdings, dass diese ermittelte Funktion nicht die Schadenswahrscheinlichkeit für einen einzelnen Verjüngungsbaum angibt. Vielmehr gibt sie die Wahrscheinlichkeit wieder, mit der ein 50x50cm großer Teil des Bestandes mit einer bestimmten Entfernung von der nächsten Rückegasse von mindestens einem gefälltten Altbestandsbaum getroffen wird. Auch wenn diese Fläche vom Hieb betroffen sein sollte, bedeutet dies nicht automatisch, dass die Verjüngungsbäume auf dieser Fläche ebenfalls betroffen sind. Hier sind nämlich zusätzlich die Funktionen des Schadensermittlungsmodells zu berücksichtigen, die eben die Wahrscheinlichkeit für einen betroffenen Verjüngungsbaum auf einer betroffenen Fläche (bzw. den Anteil betroffener Verjüngung) angeben.

4.2.1.4.3 räumliche Verteilung der entnommenen Bäume

Als Kenngröße der Verteilung der entnommenen Bäume wird je Simulationslauf der **Aggregationsindex R von CLARK und EVANS** berechnet. Dieser wird normalerweise auf die Bäume eines Bestandes angewendet und ist dann ein Maß für eine regelmäßige, zufällige oder geklumpte Verteilung dieser Bäume im Bestand. Er kann theoretisch Werte zwischen 0 und 2,1491 annehmen, wobei Werte kleiner eins

Klumpungen, Werte um eins zufällige Verteilungen und Werte größer eins regelmäßige Verteilungen anzeigen.

Um die bei der Entnahme weniger Bäume extrem verfälschenden Randeffekte zu berücksichtigen, wird zusätzlich der **Aggregationsindex R von CLARK und EVANS mit der Randkorrektur nach DONNELLY** ausgegeben.

Die räumliche Verteilung der entnommenen Bäume ist streng genommen keine „echte“ Ergebnisvariable des Programms, das ja direkt die betroffene Bestandesfläche und indirekt die Schäden an der Verjüngung zum Ziel hat. Da sich der Aggregationsindex aber ohne zusätzlichen Aufwand berechnen lässt und gute Rückschlüsse auf die Verteilung der entnommenen Altbestandsbäume erlaubt, sei er an dieser Stelle erwähnt. Die Berechnung des Aggregationsindex findet sich beispielsweise bei PRETZSCH (2001).

4.2.2 Anzahl benötigter Durchläufe

Durch die zufällige Verteilung der entnommenen Bäume auf der virtuellen Versuchsfläche und die zufällige Fällwinkelabweichung kommt es zu einer Streuung der Ergebnisse der Einzeldurchläufe bei ansonsten identischen Eingangsgrößen. Als Maß für die Streuung der Mittelwerte der unterschiedlich großen Stichproben um den Mittelwert der Grundgesamtheit wird üblicherweise der Standardfehler des Mittelwertes herangezogen. Zu dessen Berechnung wird die Standardabweichung der Stichprobe durch die Quadratwurzel des Stichprobenumfangs geteilt. Üblicherweise wird ein Standardfehler kleiner 5% als ausreichend betrachtet. Um die für eine ausreichende Genauigkeit notwendige Anzahl an Durchläufen zu ermitteln, wurde der im nachfolgenden Kapitel 4.2.3 näher erläuterte Testbestand mit bis zu 1000 Durchläufen gerechnet. Dabei wurde eine Fällwinkelabweichung von 0°, 10°, 20° und 30° eingegeben, um die Auswirkungen unterschiedlich großer Fällwinkelabweichungen auf die Ergebnisse zu ermitteln.

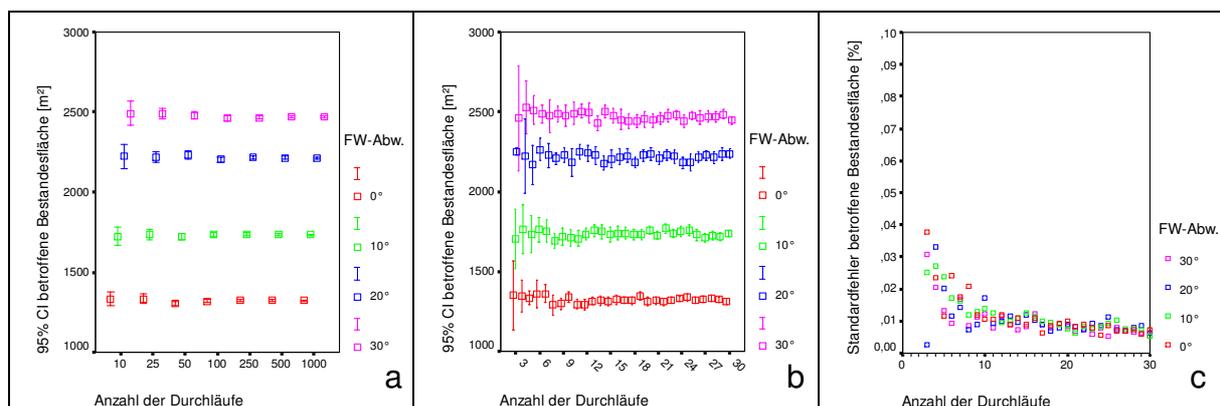


Abbildung 60 a-c: Fehlerbalken der Ergebnisvariable „betroffene Bestandesfläche“ in Abhängigkeit von der Anzahl der Durchläufe (a, b) und der zugehörige Standardfehler (c)

Die Abbildungen 60a und 60b zeigen die Fehlerbalken der wichtigsten Ergebnisvariablen „betroffene Bestandesfläche“ in Abhängigkeit von der Fällwinkelabweichung und der Anzahl der Durchläufe. Abbildung 60c zeigt den zugehörigen Standardfehler.

Analog zeigt die Abbildung 61 a-c die Fehlerbalken für den Aggregationsindex nach CLARK & EVANS mit der Randkorrektur nach DONNELLY sowie den zugehörigen Standardfehler. Bereits bei 10 Durchläufen liegt der Standardfehler beider

Ergebnisvariablen unter 2%, bei 30 Durchläufen liegt er bei 1%. Die Fällwinkelabweichung hat dabei keinen eindeutigen Einfluss auf den Standardfehler. Zur Ermittlung stabiler Werte sind daher bereits **10 Durchläufe** ausreichend.

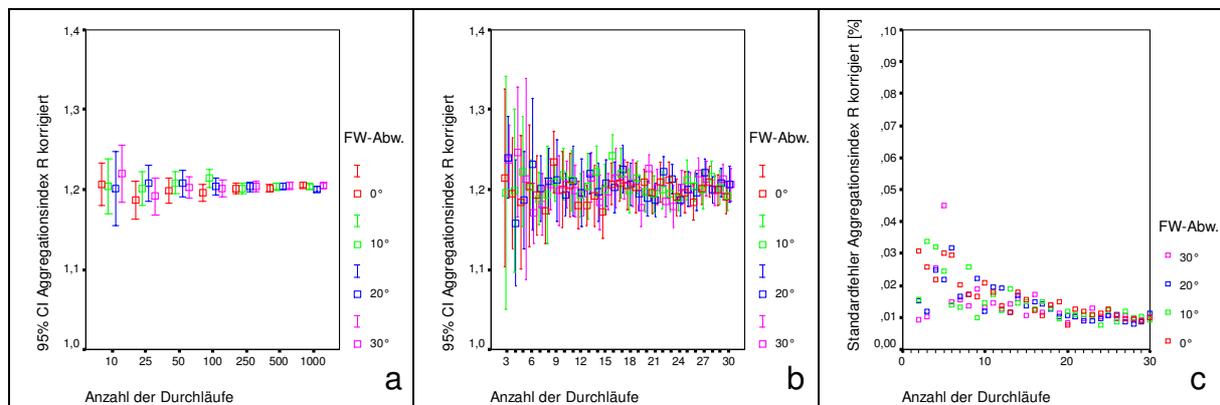


Abbildung 61 a-c: Fehlerbalken der Ergebnisvariable „Aggregationsindex R korrigiert“ in Abhängigkeit von der Anzahl der Durchläufe (a, b) und der zugehörige Standardfehler (c)

Die nachfolgenden Veränderungen der einzelnen Eingangsgrößen zum Testen des Modells wurden mit jeweils 100 Durchläufen durchgeführt. Zur Verprobung des Modells mit den Versuchsflächen wurden jeweils 1000 Durchläufe gerechnet.

4.2.3 Änderung der Eingangsvariablen

Um das Modell auf Plausibilität und die Auswirkungen der einzelnen Eingangsvariablen auf die Ergebnisse zu untersuchen, wird im Folgenden jeweils eine Eingangsvariable verändert, während die Übrigen konstant bleiben.

Der zugrunde liegende **virtuelle Testbestand** von 1ha Größe weist ein Rückegassennetz mit einem Abstand von 30m und einer Gassenbreite von 3m auf. Es werden 50 Fichten mit einem BHD von 50cm entnommen. Diese entnommenen Bäume stehen mindestens einen Kronendurchmesser voneinander entfernt. Der Fällwinkel wird nicht korrigiert oder eingeschränkt.

Als Ergebnis dieser Untersuchung ist in erster Linie die Veränderung der **betreffenen Bestandesfläche** als der wichtigsten Ergebnisvariablen des Modells interessant. Beim Testen der beiden Eigenschaften des Rückegassennetzes wird daneben der **Anteil der betroffenen an der gesamten Bestandesfläche** gezeigt, da sich bei Änderung von Rückegassenabstand und Rückegassenbreite auch die gesamte Bestandesfläche ändert.

Daneben wird die **räumliche Verteilung** des Anteils der betroffenen an der gesamten Bestandesfläche angegeben. Diese wurde aus den mit ArcView erzeugten Ergebnis-Grids errechnet (siehe Kap. 4.2.1.4.2).

Bei der Eingriffsstärke und beim Mindestabstand wird zusätzlich der **Aggregationsindex R nach CLARK & EVANS mit der Randkorrektur nach DONNELLY** angegeben. Die anderen Eingangsvariablen sind ohne Einfluss auf diesen Index, daher wurde bei ihnen auf diese Darstellung verzichtet.

4.2.3.1 Rückegassenabstand

Es wurde mit Rückegassenabständen zwischen 10m und 60m (vgl. Kap. 4.2.1.2.1) gerechnet. Die betroffene Bestandesfläche steigt dabei mit steigendem

Rückegassenabstand leicht an (Abb. 62a). Dies stimmt mit den Erwartungen überein. Der Anteil der betroffenen an der gesamten Bestandesfläche (Abb. 62b) verändert sich dagegen kaum mit steigendem Rückegassenabstand. Dies liegt sicher an den gesetzten Rahmenbedingungen. Die entnommenen Fichten des Testbestandes mit einem BHD von 50cm besitzen eine Höhe von gut 35m. Somit ist es selbst bei einem Rückegassenabstand von 60m in den meisten Fällen möglich, die Krone zum größten Teil auf die Rückegassen zu fallen.

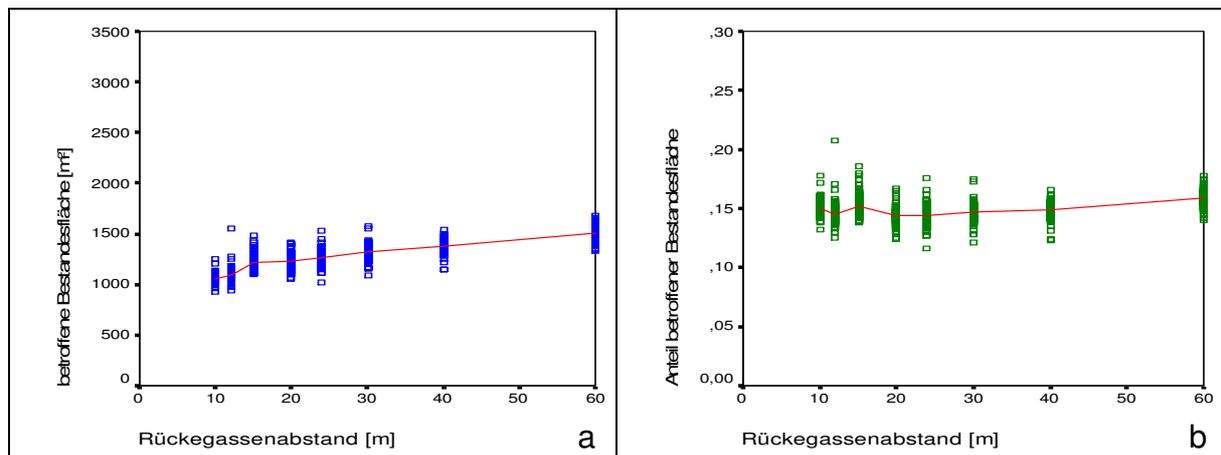


Abbildung 62 a+b: Die betroffene Bestandesfläche (a) und der Anteil betroffener an der gesamten Bestandesfläche (b) in Abhängigkeit vom Rückegassenabstand

Auch der Anteil der betroffenen Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Entfernung von der Rückegasse (Abb. 63a) verhält sich bei den einzelnen Rückegassenabständen plausibel. Die unterschiedlichen Verläufe der Kurven resultieren lediglich aus der hier gewählten Art der Darstellung, die den Anteil betroffener Bestandesfläche abhängig vom Abstand zur Rückegasse in Metern zeigt.

Um den Verlauf der einzelnen Kurven besser miteinander vergleichen zu können, wird in Abbildung 63b der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit von der relativen Entfernung von der Rückegasse dargestellt. Zur Berechnung der relativen Entfernung wurde die absolute Entfernung durch die jeweils maximal mögliche Entfernung geteilt. Wie zu erkennen ist, verlaufen die Kurven bei Rückegassenabständen zwischen 20m und 60m annähernd gleich. Die abweichenden Verläufe der Kurven der drei niedrigsten Rückegassenabstände sind daher sehr wahrscheinlich auf die geringe Anzahl von Punkten bei diesen Kurven zurückzuführen.

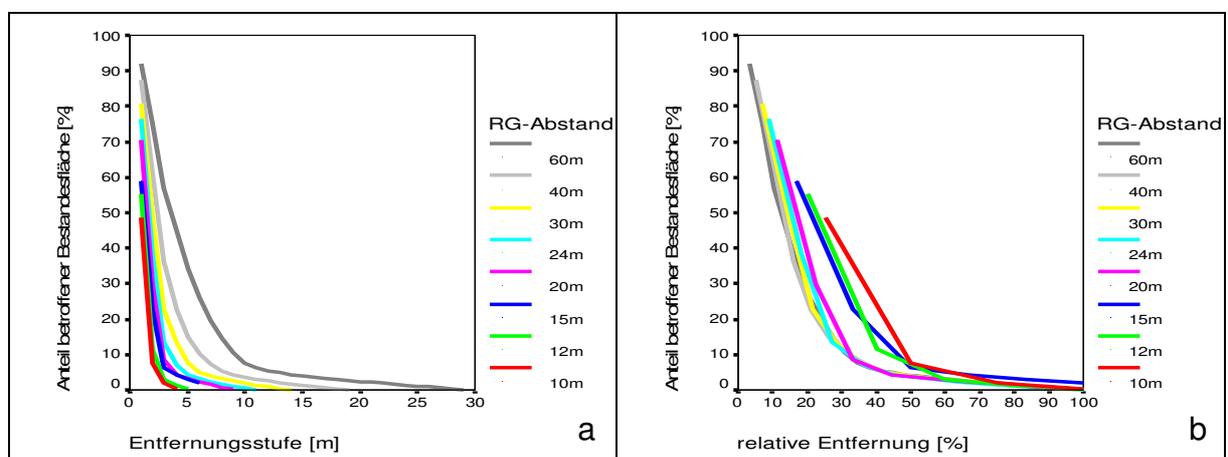


Abbildung 63 a+b: Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Rückegassenabstand und der absoluten (a) sowie der relativen (b) Entfernung von der Rückegasse

4.2.3.2 Rückegassenbreite

Die Breite der Rückegassen wurde von 1m bis 10m variiert. Dadurch wird der Verlauf der Kurven auch für den praxisüblichen Bereich zwischen 3m und 5m besser dargestellt.

Die Abbildungen 64a und 64b zeigen die Veränderung der betroffenen Bestandesfläche bzw. die Veränderung ihres Anteils an der Bestandesfläche mit steigender Rückegassenbreite.

Mit zunehmender Breite der Rückegassen wird ein steigender Anteil der Baum-, v.a. der Kronenfläche auf die Rückegassen gefällt. Damit sinkt die betroffene Bestandesfläche. Obwohl die Bestandesfläche mit steigender Rückegassenbreite abnimmt, nimmt der Anteil betroffener Bestandesfläche an der gesamten Bestandesfläche ebenfalls ab.

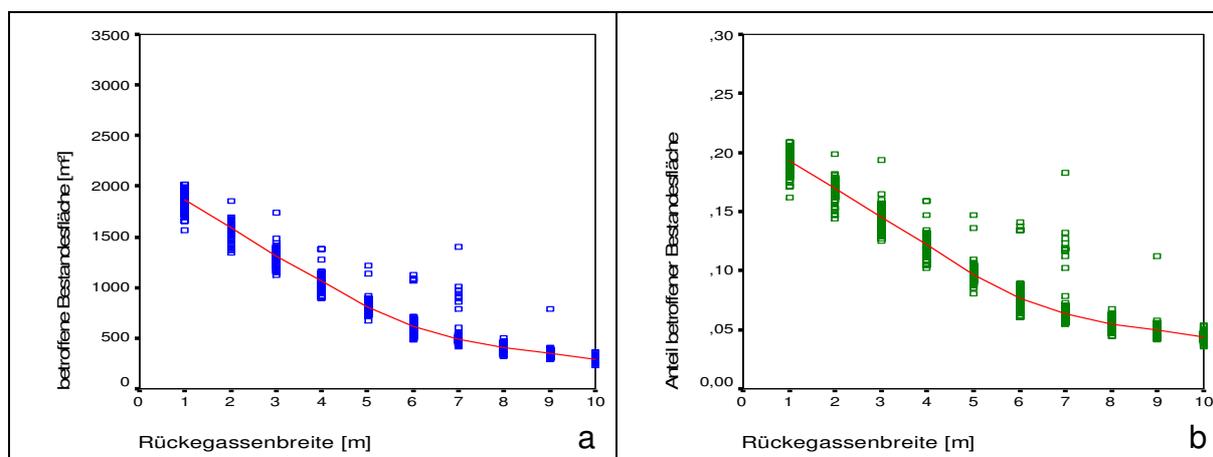


Abbildung 64 a+b: Die betroffene Bestandesfläche (a) und der Anteil betroffener an der gesamten Bestandesfläche (b) in Abhängigkeit von der Rückegassenbreite

Die Abbildungen 65a und 65b zeigen die räumliche Verteilung der betroffenen Bestandesfläche. Alle Kurven zeigen den erwarteten Abfall mit steigender Entfernung von der Rückegasse. Dabei verlaufen die Kurven alle sehr ähnlich. Im Prinzip handelt es sich hier um eine Verschiebung der roten 1m-Kurve nach links, da die Bäume prinzipiell gleich fallen und lediglich ein steigender Anteil Baumflächen auf die breiter werdenden Rückegassen und damit nicht in den Bestand fällt.

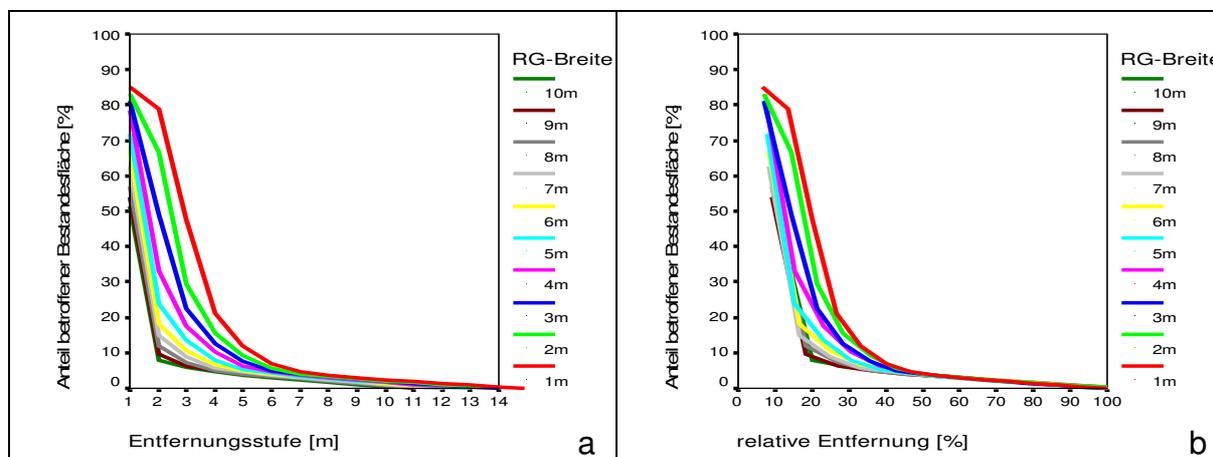


Abbildung 65 a+b: Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Rückegassenbreite und der absoluten (a) sowie der relativen (b) Entfernung von der Rückegasse

4.2.3.3 Eingriffsstärke

Die Auswirkungen der Eingriffsstärke wurden untersucht, indem die Entnahme von 10 bis 150 Fichten modelliert wurde. Erwartungsgemäß steigt die betroffene Bestandesfläche mit steigender Anzahl entnommener Bäume an (Abb. 66a). Das dies nicht linear geschieht, liegt vor allem an der steigenden Anzahl an Überschneidungen, also an Bäumen, die auf- und übereinander fallen. Mit steigender Anzahl entnommener Bäume steigt zudem die Streuung der Ergebnisse an. Auch die räumliche Verteilung der betroffenen Bestandesfläche verhält sich erwartungsgemäß (Abb. 66b).

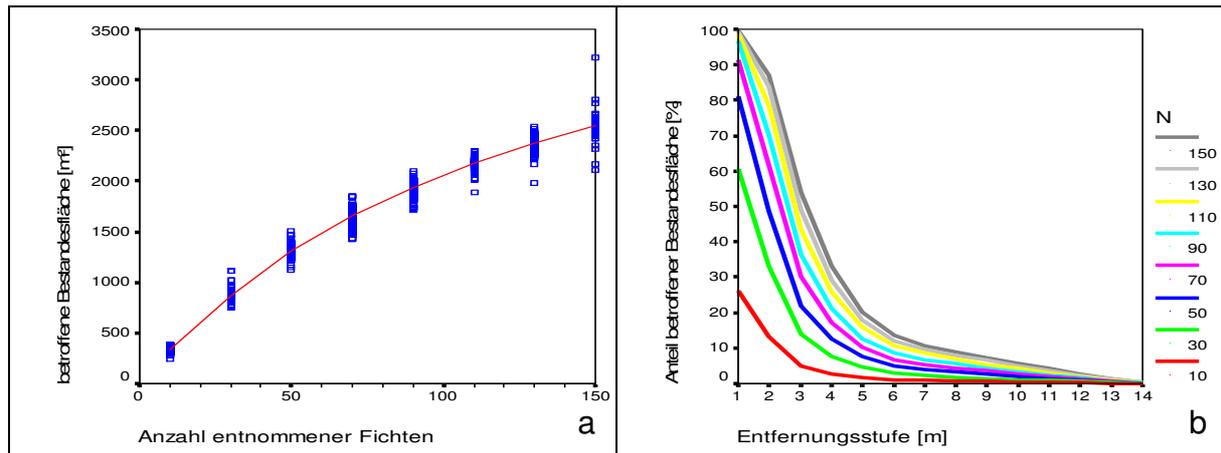


Abbildung 66 a+b: Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Eingriffsstärke (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Eingriffsstärke und der Entfernung von der Rückegasse (b)

Die Anzahl entnommener Bäume hat zudem Einfluss auf die Regelmäßigkeit der Verteilung der Bäume. Abbildung 67 zeigt den nach DONNELLY korrigierten Aggregationsindex R nach CLARK und EVANS der entnommenen Bäume. Werden 10 Bäume entnommen, so streuen die Werte recht stark um den Wert 1, der eine zufällige Verteilung anzeigt. Bei 150 entnommenen Bäumen streuen die Ergebnisse kaum noch und liegen bei knapp 1,5. Dieser Wert weist bereits auf eine eher regelmäßige Verteilung hin.

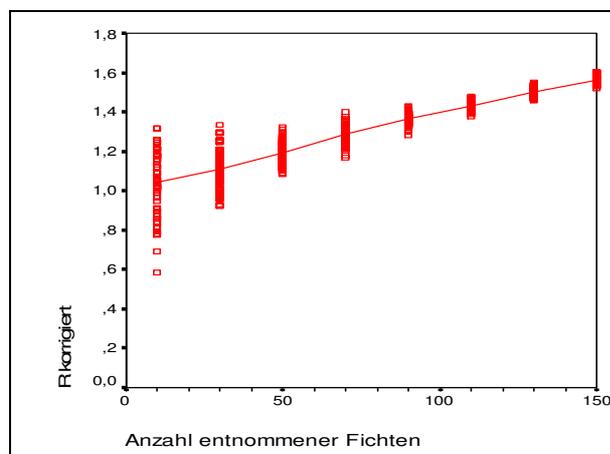


Abbildung 67: Aggregationsindex R nach CLARK und EVANS mit der Randkorrektur nach DONNELLY in Abhängigkeit von der Anzahl entnommener Bäume

4.2.3.4 Einzelbaumdimensionen

Die Berechnung der Dimensionen der entnommenen Bäume erfolgt mittels allometrischer Funktionen über den BHD. Daher wurde dieser zwischen 30cm und 80cm variiert, um seinen Einfluss auf die betroffene Bestandesfläche aufzuzeigen. Abbildung 68a zeigt diesen annähernd linearen Zusammenhang. Der Anteil der betroffenen Bestandesfläche abhängig von der Entfernung von der Rückegasse wird in Abbildung 68b dargestellt. In der Nähe der Rückegasse sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Durchmessern größer als an der Bringungsgrenze. Dies liegt am flächenbezogen großen Einfluss der Kronen, die auf und in die Nähe der Rückegassen fallen.

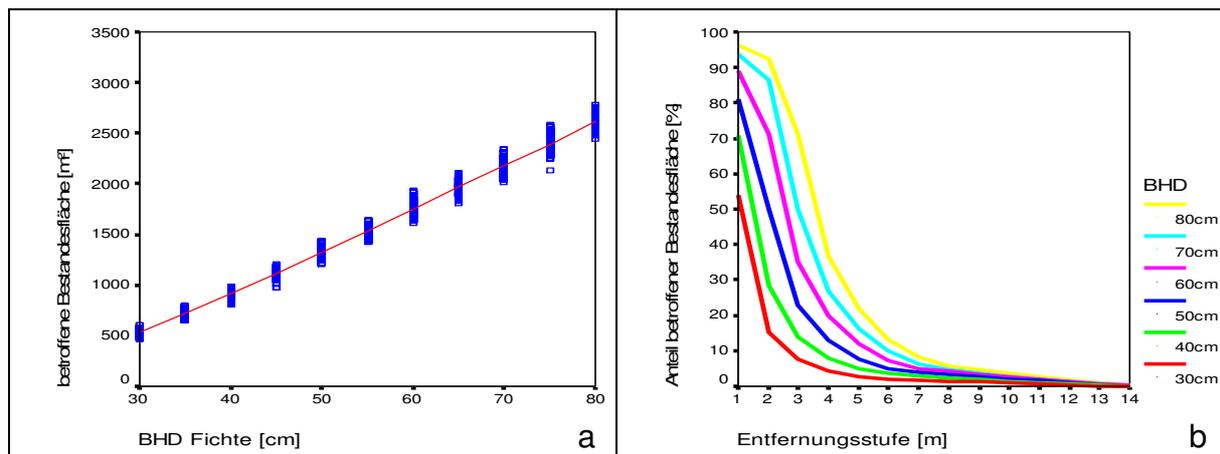


Abbildung 68 a+b: Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom BHD (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom BHD und der Entfernung von der Rückegasse (b)

4.2.3.5 Baumartenzusammensetzung (Mischbestände)

Um den Einfluss verschiedener Baumartenmischungen zu testen, werden im Folgenden ein Fichten-Buchen-Bestand und ein Eichen-Buchen-Bestand modelliert. Die verschiedenen Baumarten haben jeweils einen BHD von 50cm, was normalerweise sicher nicht der Realität entspricht. Zum Testen des Modells auf Plausibilität ist dies aber irrelevant.

4.2.3.5.1 Fichten-Buchen-Bestand

Der Buchenanteil wird von 0% bis 100% variiert. Die Kurve in Abbildung 69a verläuft bis zum Buchenanteil von 90% sehr regelmäßig. Ein reiner Buchenbestand fügt sich allerdings nicht optimal in die Reihe ein. Bemerkenswert ist hier auch die sehr geringe Streuung der Ergebnisse.

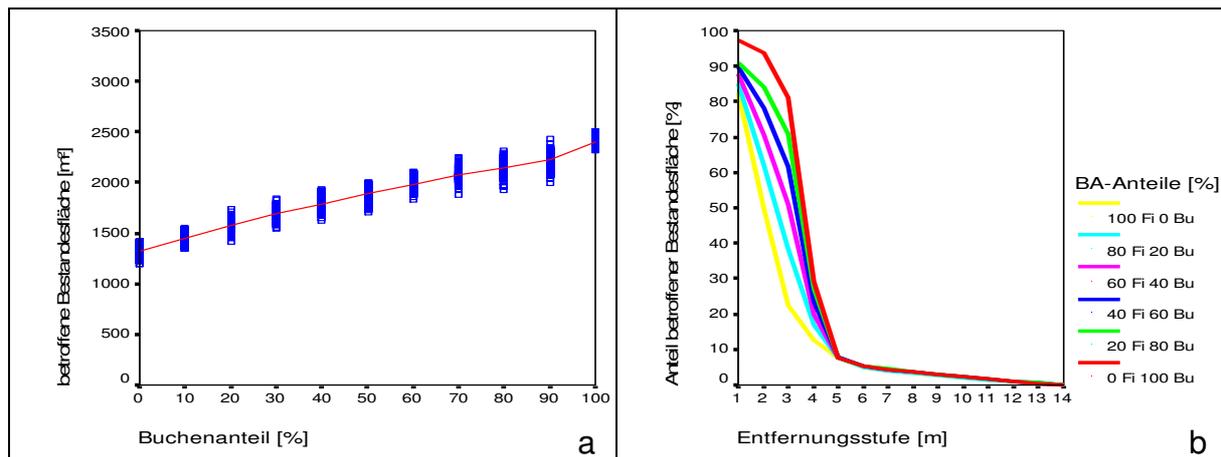


Abbildung 69 a+b: Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Buchenanteil (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Buchenanteil und der Entfernung von der Rückegasse (b)

Die Abweichung beim reinen Buchenbestand wird auch in Abbildung 69b deutlich. Der Verlauf der roten Linie in Rückegassennähe unterscheidet sich deutlich vom Verlauf der anderen Kurven. Zudem ist gut zu erkennen, dass ab 5m Entfernung von der Rückegasse lediglich Stämme zu der betroffenen Bestandesfläche beitragen, da ab dieser Entfernung alle Kurven gleich verlaufen. Dies liegt daran, dass Fichten- und Buchenstammflächen genau gleich als Rechtecke berechnet werden.

4.2.3.5.2 Eichen-Buchen-Bestand

Beim getesteten Eichen-Buchen-Bestand wurde mit Eichenanteilen von 0% bis 100% gerechnet. Mit steigendem Eichenanteil sinkt der Anteil betroffener Bestandesfläche (Abb. 70a) aufgrund der bei Eichen gegenüber Buchen mit gleichem BHD geringeren Baumfläche (vgl. Kap. 4.2.1.3.1). Bei der räumlichen Verteilung der betroffenen Bestandesfläche (Abb. 70b) zeigt sich das gleiche Phänomen wie bereits beim getesteten Fichten-Buchen-Bestand (Abb. 69b).

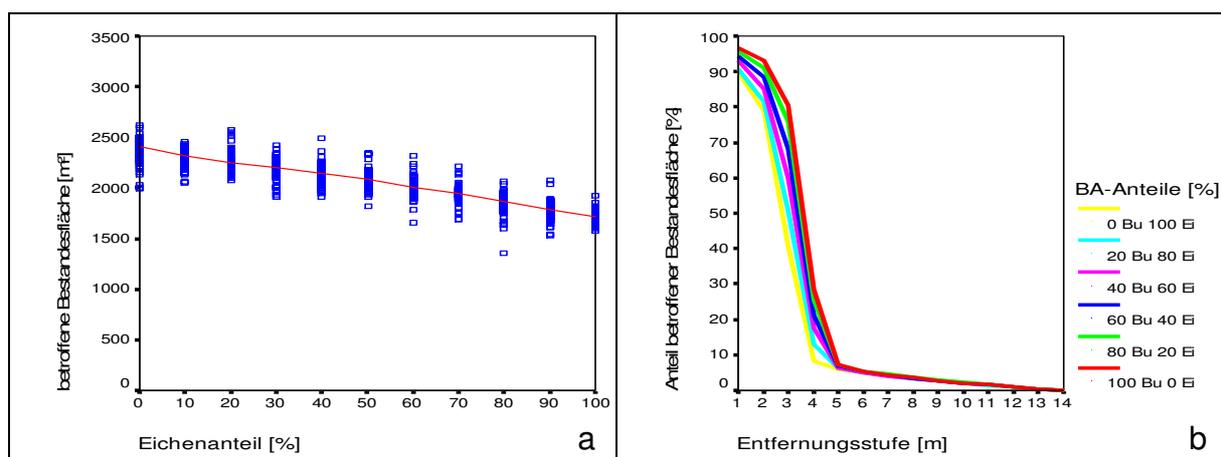


Abbildung 70 a+b: Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Eichenanteil (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom Eichenanteil und der Entfernung von der Rückegasse (b)

Ab einer Entfernung von 5m von der Rückegasse verändert die Wahl der Baumarten nicht mehr den Anteil betroffener Bestandesfläche. Wie bereits erwähnt liegt dies am bei beiden Baumarten gleich groß gewählten BHD. Im Vergleich zum Fichten-

Buchen-Bestand verlaufen hier die Kurven im Bereich bis 5m deutlich enger zusammen. Die Unterschiede bezüglich Kronenform und Kronenfläche zwischen einer Eiche und einer Buche gleichen BHD's sind deutlich geringer als die Unterschiede zwischen einer Fichte und einer Buche.

4.2.3.6 Mindestabstand der Bäume

Der Mindestabstand zwischen den entnommenen Bäumen kann entweder konkret als Zahl oder gleich dem Kronendurchmesser festgelegt werden. Bei mehreren Baumarten kann dabei entweder der kleinste oder der größte Kronendurchmesser gewählt werden. Um die Auswirkungen unterschiedlich großer Mindestabstände aufzuzeigen, wurde hier der Mindestabstand von 1 bis 12m verändert.

Die Abbildungen 71a und 71b machen deutlich, dass sich sowohl die betroffene Bestandesfläche als auch deren räumliche Verteilung nicht nennenswert verändern. Dies wäre bei einer geklumpten Verteilung der entnommenen Bäume denkbar gewesen.

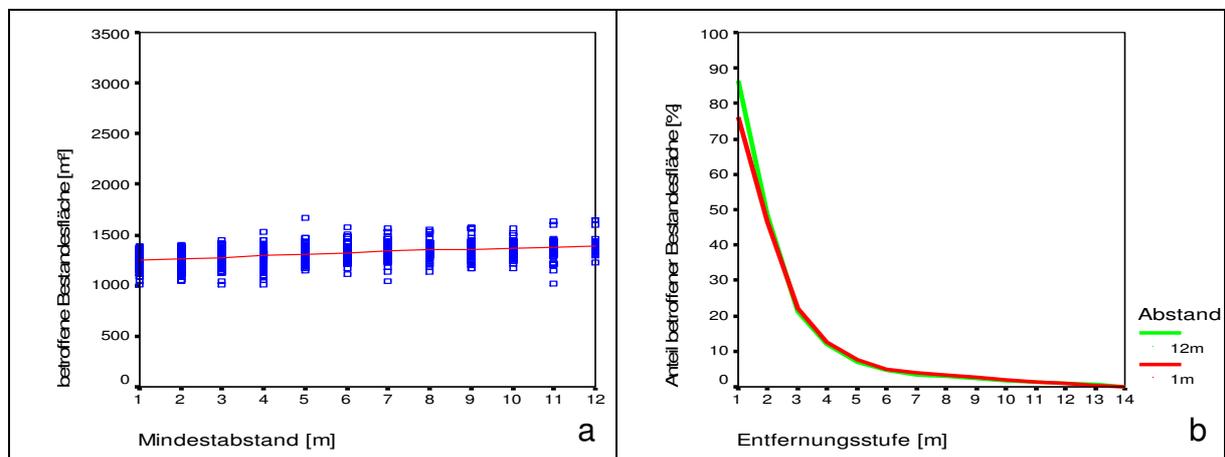


Abbildung 72 liefert die Erklärung, warum dies nicht der Fall ist. Sie zeigt den Aggregationsindex R nach CLARK und EVANS mit der Randkorrektur nach DONNELLY.

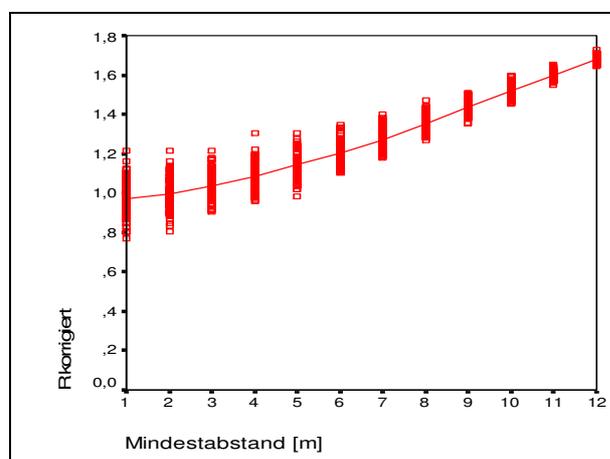


Abbildung 72: Aggregationsindex R nach CLARK und EVANS mit der Randkorrektur nach DONNELLY in Abhängigkeit vom Mindestabstand

Die Mittelwerte der einzelnen Aggregationsindices steigen von 1 (zufällige Verteilung) bei einem Mindestabstand von 1m bis auf über 1,6 (regelmäßige Verteilung) bei einem Mindestabstand von 12m. Auch bei sehr klein gewählten Mindestabständen nimmt R kaum Werte kleiner 1 an, die für eine geklumpfte Verteilung stehen würden.

4.2.3.7 Fällwinkel

Der zugrunde liegende ideale Fällwinkel kann verschiedenen Modifikationen unterzogen werden, um realistische Hiebssituationen zu modellieren. Dabei können Ungenauigkeiten bei der Fällung, strikte Schlagordnungen oder auch Extremsituationen wie beispielsweise Windwurf simuliert werden.

4.2.3.7.1 maximale Fällwinkelabweichung

Grundsätzlich werden im Modell die Bäume so gefällt, dass die Mitte der Krone auf der Mitte der Rückegasse zu liegen kommt. Diese ideale Situation ist in der Praxis kaum realisierbar, da Baumhöhe und Abstand zur Rückegasse nicht genau bekannt sind, in die ideale Richtung oft nicht gefällt werden kann und es naturgemäß Ungenauigkeiten bei der Einhaltung der Fällrichtung gibt. Daher kann der ideale Fällwinkel durch Eingabe einer maximalen Fällwinkelabweichung modifiziert werden. Der ideale Fällwinkel wird dann durch einen zufällig aus dem Bereich von minus maximaler Fällwinkelabweichung bis plus maximaler Fällwinkelabweichung ermittelten Winkel verändert.

Um die Auswirkungen unterschiedlicher maximaler Fällwinkelabweichungen zu untersuchen, wurde diese im Testbestand zwischen 0° und 45° variiert. Dabei zeigte sich, dass bis 35° die betroffene Bestandesfläche wie erwartet kontinuierlich zunahm (Abb. 73a). Ab 35° ist unter den gegebenen Rahmenbedingungen scheinbar das Maximum erreicht. Dies bestätigt sich auch in Abbildung 73b. Ab 35°, spätestens ab 40° beträgt der Anteil betroffener Bestandesfläche unabhängig von der Entfernung von der Rückegasse ca. 30%. Je größer also die maximale Fällwinkelabweichung, desto weniger konzentrieren sich die Schäden an den Rückegassen und desto mehr verteilen sie sich im Bestand.

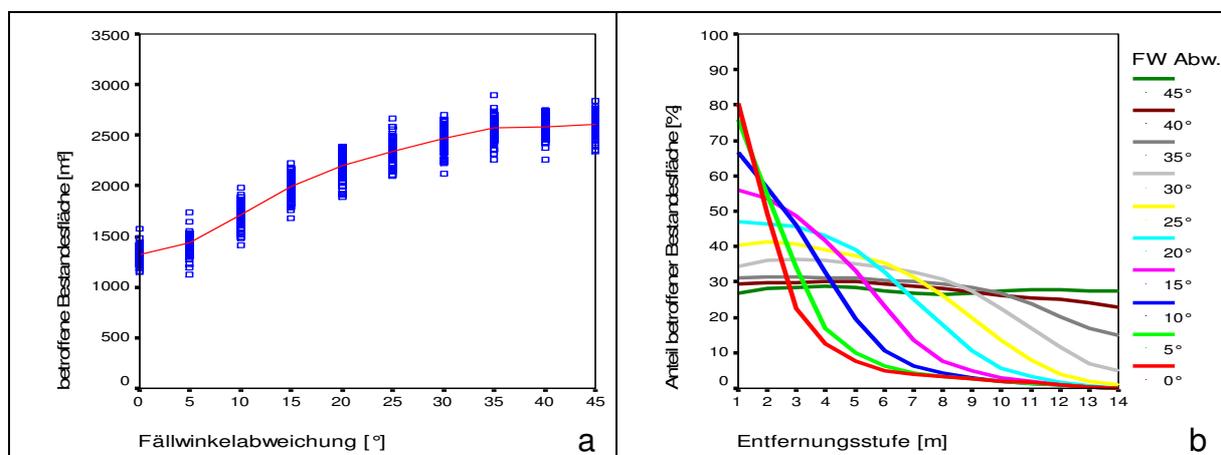


Abbildung 73 a+b: Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Fällwinkelabweichung (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit von der Fällwinkelabweichung und der Entfernung von der Rückegasse (b)

4.2.3.7.2 maximaler Fällwinkel

Um bei großen Rückegassenabständen das senkrechte Fällen zur Rückegasse zu vermeiden und damit eine sinnvolle und realistische Schlagordnung zu modellieren, kann ein maximaler Fällwinkel angegeben werden. Bei einem maximalen Fällwinkel von beispielsweise 25° werden alle idealen Fällwinkel kleiner 25° nicht verändert. Alle ermittelten idealen Fällwinkel größer 25° werden in 25° umgewandelt. Bei einem maximalen Fällwinkel von 0° werden alle Bäume parallel zu den Rückegassen gefällt.

Abbildung 74a zeigt die betroffene Bestandesfläche beim Testbestand mit unterschiedlich großen maximalen Fällwinkeln. Je größer der maximale Fällwinkel wird, desto mehr Bäume können ideal gefällt werden. Daher sinkt die betroffene Bestandesfläche zunächst. Ab einem maximalen Fällwinkel von 30° ist das Minimum erreicht. Alle idealen Fällwinkel sind dann im gewählten Testbestand kleiner als 30° . Gleiches ist in Abbildung 74b ersichtlich. Ab einem maximalen Fällwinkel von 30° verlaufen die Kurven nahezu identisch und zeigen den typischen Verlauf, wie er beispielsweise aus Abbildung 71b bekannt ist.

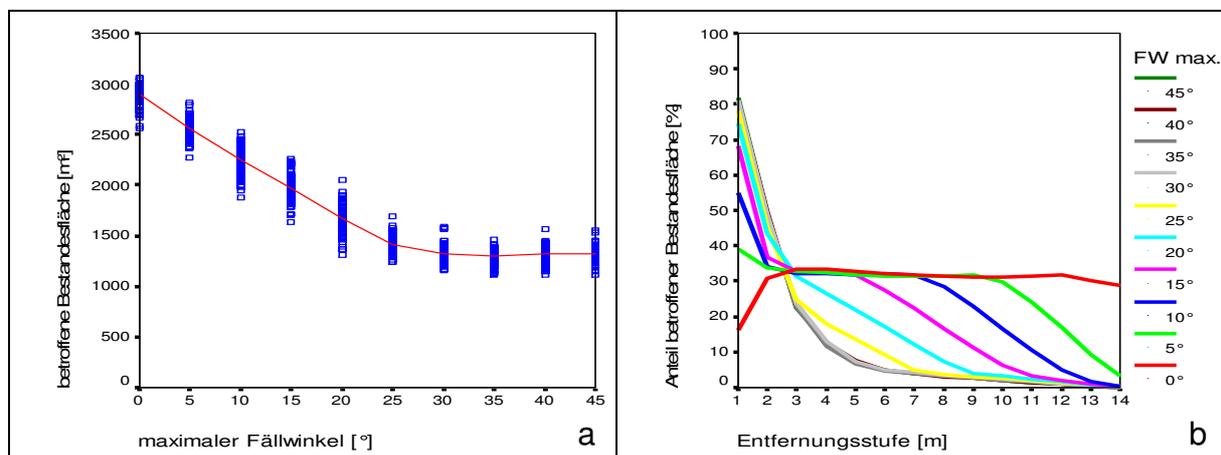


Abbildung 74 a+b: Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom maximalen Fällwinkel (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom maximalen Fällwinkel und der Entfernung von der Rückegasse (b)

4.2.3.7.3 semi-fixer Fällwinkel Variante A: zur Rückegasse hin

Wenn ein semi-fixer Fällwinkel der Variante A eingegeben wird, so werden alle Bäume in diesem Winkel zur Rückegasse hin gefällt. Die Bäume fallen also in genau zwei verschiedene Richtungen. Sehr strikte Schlagordnungen mit dünnörtigem Rücken können so modelliert werden.

Die betroffene Bestandesfläche weist bei einem Winkel von 20° ein Minimum auf (Abb. 75a). Der Verlauf der Kurve scheint hier sehr durch den gewählten Rückegassenabstand von 30m und den BHD der Fichten von 50cm beeinflusst zu sein. Auch bei der räumlichen Verteilung der betroffenen Bestandesfläche (Abb. 75b) sind bei anderen Rahmenbedingungen deutlich andere Kurvenverläufe zu erwarten. Hier verlaufen die Kurven zwischen 60° und 90° sehr ähnlich.

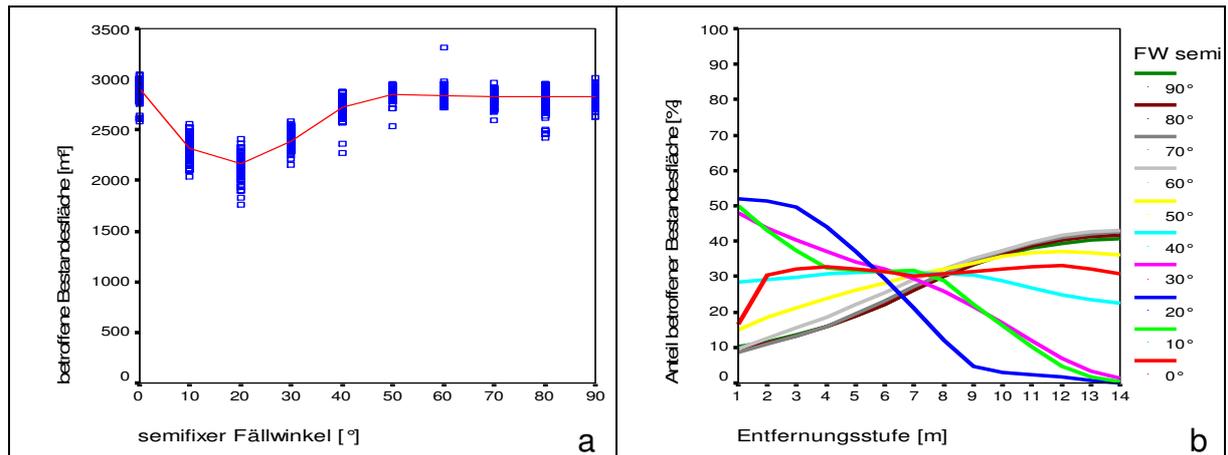


Abbildung 75 a+b: Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom semi-fixen Fällwinkel Variante A (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom semi-fixen Fällwinkel Variante A und der Entfernung von der Rückegasse (b)

4.2.3.7.4 semi-fixer Fällwinkel Variante B: von Rückegasse weg

Bei einem semi-fixen Fällwinkel Variante B werden die Bäume von der Rückegasse weg gefällt. Strikte Schlagordnung mit dickkörtigem Rücken kann so simuliert werden.

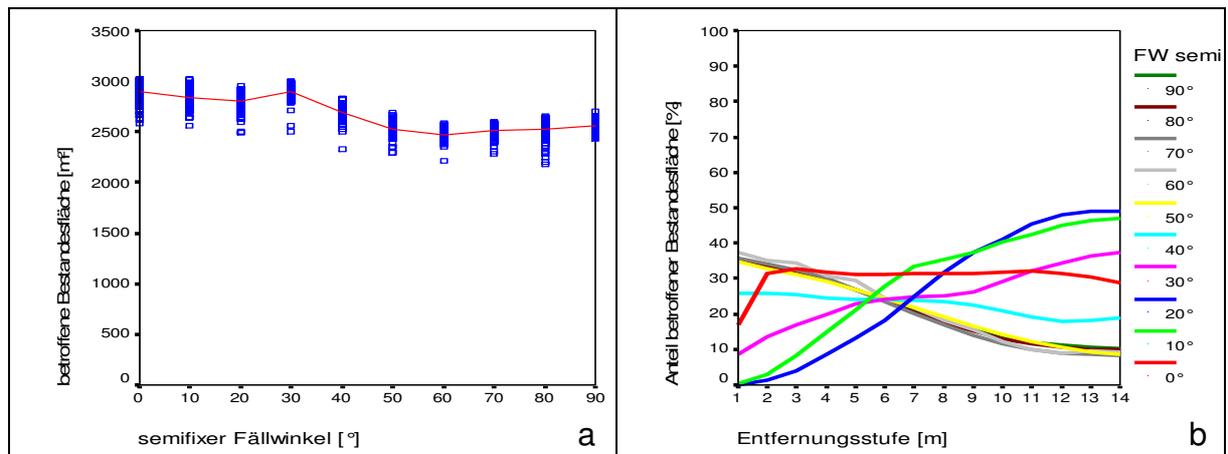


Abbildung 76 a+b: Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom semi-fixen Fällwinkel Variante B (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom semi-fixen Fällwinkel Variante B und der Entfernung von der Rückegasse (b)

Ähnlich wie beim semi-fixen Fällwinkel der Variante A sind auch hier keine eindeutigen Trends bei der betroffenen Bestandesfläche (Abb. 76a) oder ihrer Verteilung im Bestand (Abb. 76b) erkennbar. Allerdings verlaufen hier die Kurven bereits ab 50° annähernd identisch.

4.2.3.7.5 fixer Fällwinkel

Bei einem fixen Fällwinkel werden alle Bäume in die gleiche Richtung gefällt. So lässt sich beispielsweise ein Windwurf wie auf der Versuchsfläche zur hochmechanisierten Windwurfaufarbeitung im FoA Krumbach modellieren.

Die betroffene Bestandesfläche (Abb. 77a) bleibt erwartungsgemäß mit steigendem fixen Fällwinkel annähernd gleich. Auch der Anteil betroffener Bestandesfläche (Abb. 77b) bleibt nicht nur bei steigender Entfernung von der Rückegasse konstant, auch bei steigendem fixen Fällwinkel verändert sich das Niveau nicht.

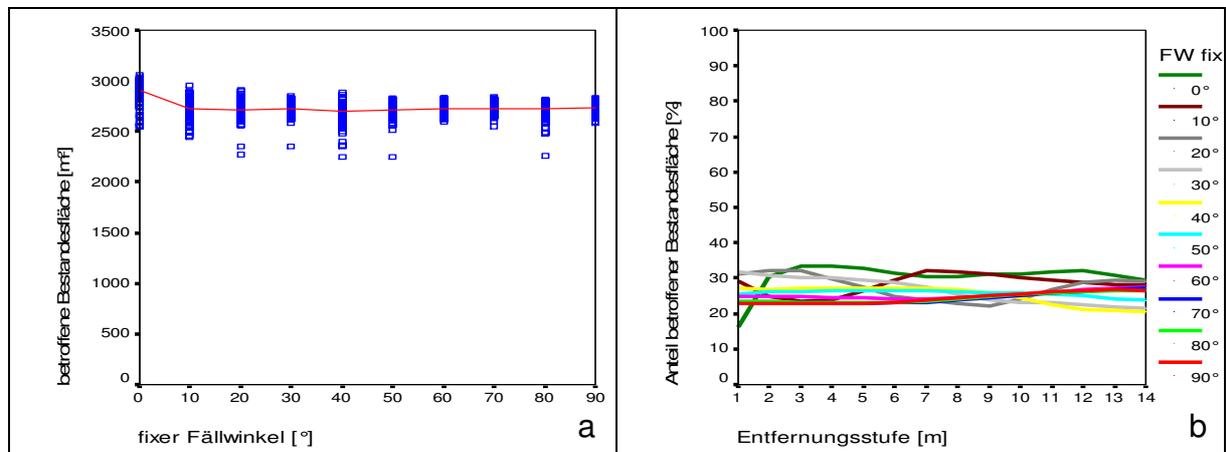


Abbildung 77 a+b: Die betroffene Bestandesfläche in Abhängigkeit vom fixen Fällwinkel (a) sowie der Anteil betroffener Bestandesfläche in Abhängigkeit vom fixen Fällwinkel und der Entfernung von der Rückegasse (b)

4.2.4 Test des Hiebsstrukturmodells

Um zu überprüfen, ob das Hiebsstrukturmodell realistische Ergebnisse liefert, wird es auf die drei Versuchsflächen angewendet, bei denen die genaue Lage der liegenden Bäume bekannt ist. Dies sind aus dem ZEUS-Projekt die Versuchsflächen Schongau (Fichten-Buchen-Wuchsreihe) und Biburg (Eichen-Buchen-Wuchsreihe) sowie die Windwurffläche im FoA Krumbach (Projekt ST87).

Das Hiebsstrukturmodell wurde mit den in Tabelle 19 dargestellten Eingangsdaten gestartet.

Tabelle 19: Eingangsdaten zum Testen des Hiebsstrukturmodells

	Schongau	Biburg	Krumbach
Rückegassenabstand	40	40	20
Rückegassenbreite	3	3	4
Fichte Anzahl	23	0	91
Fichte BHD	46	0	50
Buche Anzahl	11	18	20
Buche BHD	44	45	47
Eiche Anzahl	0	10	4
Eiche BHD	0	50	67
Fällwinkelabweichung	10	30	36
maximaler Fällwinkel	0	0	0
fixer Fällwinkel	0	0	-95

Die Daten zum Hieb (bzw. Windwurf) entstammen dabei den Messungen auf den Flächen und stimmen somit mit der Realität überein. Bei den Daten zu den Rückegassennetzen mussten leichte Abweichungen hingenommen werden, da das Hiebsstrukturmodell nicht alle Rückegassenabstände sinnvoll verarbeiten kann (siehe Kap. 4.2.1.2.1). Bei den Fällwinkeln wurde versucht, plausible und begründbare Fällwinkelabweichungen zu wählen. Bei der Fläche im FoA Schongau wurde mit 10° maximaler Abweichung eine sehr kleine Fällwinkelabweichung gewählt, da das Rückegassennetz hier recht regelmäßig ausgeprägt war (siehe z.B. Abb. 6a auf S. 19). Bei der Versuchsfläche im FoA Biburg hingegen wurde aufgrund der extrem unregelmäßigen Feinerschließung (Abb. 6c, S. 19) eine große maximale Fällwinkelabweichung von 30° gewählt. Dadurch wurde erreicht, dass eine größere Anzahl an Bäumen nicht ideal fallen und damit nicht oder nur teilweise auf den Rückegassen liegen.

Bei der Windwurffläche im FoA Krumbach wurde als fixer Fällwinkel die mittlere Richtung der geworfenen Bäume gewählt (-95°). Daneben konnte aufgrund des sehr regelmäßigen Rückegassennetzes (siehe Abb. 33, S. 44) auch die mittlere Fällwinkelabweichung ermittelt werden, aus der dann auf die maximale Fällwinkelabweichung von 36° geschlossen wurde. Die vier geworfenen Lärchen wurden dabei wie Fichten behandelt.

In den folgenden Kapiteln werden die mittels ArcView berechneten Kennwerte der drei Versuchsflächen mit den vom Hiebsstrukturmodell prognostizierten Werten verglichen. Der Vergleich zwischen Prognose und Realität bezüglich der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand wird in Kapitel 4.4 durchgeführt.

4.2.4.1 Schongau

Die nachfolgende Tabelle 20 gibt die mittels ArcView auf der Basis konkreter Messungen ermittelten Kennwerte für die Versuchsfläche in Schongau wieder („Realität“). Daneben werden die geschätzten Werte des Hiebsstrukturmodells („Prognose“) und die Abweichung der Prognose von der Realität angegeben.

Tabelle 20: Vergleich von Realität und Prognose für die Versuchsfläche Schongau (Abweichung der Prognose von der Realität in Prozent)

	Realität	Prognose	Abweichung
Bestandesfläche [m ²]	9180	9250	+0.8
Rückegassenfläche [m ²]	820	750	-8.5
betroffene Bestandesfläche [m²]	1361	1370	+0.7
betroffene Rückegassenfläche [m ²]	215	520	+141.9
Anteil betroffener Bestandesfläche	0.148	0.148	0
Anteil betroffener Rückegassenfläche	0.263	0.693	+163.5
Anteil Kronenbereiche	0.800	0.859	+7.4
Anteil Stammbereiche	0.200	0.141	-29.5
Überschneidungsfläche [m ²]	117	368	+214.5

Die ersichtlichen Abweichungen bezüglich der Anteile von Stamm- und Kronenbereichen resultieren hier in erster Linie daraus, dass die Kronen der entnommenen Bäume in der Realität deutlich kleiner sind als von den im Hiebsstrukturmodell verwendeten allometrischen Funktionen errechnet. Dadurch

sollte die betroffene Bestandesfläche eigentlich merklich überschätzt werden. Da das Modell allerdings die betroffene Rückegassenfläche sowie die Überschneidungsfläche deutlich überschätzt und zudem viele der gefälltten Bäume aus der Versuchsfläche heraus fielen, stimmen Prognose und Realität bezüglich der betroffenen Bestandesfläche nahezu perfekt überein.

4.2.4.2 Biburg

Tabelle 21 gibt die Ergebnisse des Vergleichs zwischen Realität und Prognose bei der Versuchsfläche Biburg wieder. Die Abweichungen bei der betroffenen Bestandesfläche als der wichtigsten Ergebnisvariablen sind minimal. Auch die geschätzten Flächenanteile der Stamm- und Kronenbereiche stimmen gut mit der Realität überein. Deutliche Abweichungen gibt es bezüglich der betroffenen Rückegassenfläche und den Überschneidungsflächen im Bestand. Dies ist in erster Linie auf das wiederholt erwähnte sehr unregelmäßige Rückegassennetz in Biburg zurückzuführen.

Tabelle 21: Vergleich von Realität und Prognose für die Versuchsfläche Biburg (Abweichung der Prognose von der Realität in Prozent)

	Realität	Prognose	Abweichung
Bestandesfläche [m ²]	9182	9250	+0.7
Rückegassenfläche [m ²]	818	750	-8.3
betroffene Bestandesfläche [m²]	2157	2151	-0.3
betroffene Rückegassenfläche [m ²]	207	306	+47.8
Anteil betroffener Bestandesfläche	0.235	0.233	-0.9
Anteil betroffener Rückegassenfläche	0.253	0.408	+61.3
Anteil Kronenbereiche	0.917	0.911	-0.7
Anteil Stammbereiche	0.083	0.089	+7.2
Überschneidungsfläche [m ²]	217	319	+47.0

4.2.4.3 Krumbach

Interessanterweise funktioniert das Hiebsstrukturmodell bezüglich der drei getesteten Versuchsflächen bei der Windwurffläche im FoA Krumbach am besten. Tabelle 22 offenbart kaum Unterschiede zwischen Realität und Prognose. Lediglich die Überschneidungsfläche ist in der Realität merklich größer als in der Prognose, was sich aber kaum auf die betroffene Bestandesfläche auszuwirken scheint. Wahrscheinlich wird dies durch eine etwas unterschätzte betroffene Rückegassenfläche ausgeglichen.

Tabelle 22: Vergleich von Realität und Prognose für die Versuchsfläche Krumbach
(Abweichung der Prognose von der Realität in Prozent)

	Realität	Prognose	Abweichung
Bestandesfläche [m ²]	8101	8000	-1.2
Rückegassenfläche [m ²]	1899	2000	+5.3
betreffene Bestandesfläche [m²]	5251	5280	+0.6
betreffene Rückegassenfläche [m ²]	1272	1219	-4.2
Anteil betroffener Bestandesfläche	0.648	0.660	+1.9
Anteil betroffener Rückegassenfläche	0.670	0.610	-9.0
Anteil Kronenbereiche	0.891	0.889	-0.2
Anteil Stammbereiche	0.109	0.111	+1.8
Überschneidungsfläche [m ²]	2367	1818	-23.2

4.3 Schadensermittlungsmodell (SEM)

4.3.1 Funktionsweise des Schadensermittlungsmodells

Das Schadensermittlungsmodell basiert auf den Daten zu den Einzelbäumen (Kap. 3.2). Sein Zweck ist es, die Schäden zu ermitteln, die auf vom Hieb betroffenen Bestandesflächen entstehen. Dabei werden einerseits Schadenswahrscheinlichkeiten für den einzelnen Verjüngungsbaum und andererseits Schadprozente für eine bestimmte Anzahl von Verjüngungsbäumen ermittelt. Zur konkreten Anwendung im Schadensermittlungsmodell kommen dabei die Funktionen zur Ermittlung der Schadprozente.

Es lassen sich also mit Hilfe des Schadensermittlungsmodells für die im Hiebsstrukturmodell ermittelten betroffenen Bestandesflächen je Altbestandbaumart (Fichte/Buche) und Schadensbereich (Stamm/Krone) die entstandenen Schäden im Sinne von fehlenden und beschädigten Bäumen ermitteln. Die beschädigt vorhandenen Bäume können zusätzlich aufgeschlüsselt nach Schadensgruppen betrachtet werden.

4.3.2 Berechnung der Funktionen

Zur Modellbildung wurden binär logistische Regressionen (Schadenswahrscheinlichkeiten) und Logit-Transformationen (Schadprozente) verwendet. Allgemein können logistische Funktionen ihrer Natur nach lediglich Werte zwischen Null und Eins annehmen und sind für die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten und Prozenten (Anteilen) bestens geeignet.

Die allgemeine Gleichung einer logistischen Funktion mit nur einer Variablen lautet:

Gleichung 1

$$f [x] = \exp (a + b * x) / [1 + \exp (a + b * x)] = 1 / \{1 + \exp [- (a + b * x)]\}$$

Dabei ist a der so genannte Intercept (eine Konstante) und b der (Regressions-) Koeffizient der Variablen x . Der Term $\exp(a + b \cdot x)$ wird als Logit bezeichnet (siehe HOSMER und LEMESHOW 1989). Bei der Modellbildung wurde (im Anhalt an KLEINBAUM 1994) zunächst mit allen Variablen und Wechselwirkungen begonnen, die nach inhaltlichen Überlegungen relevant waren (Tab. 23 und 24). Danach wurden sukzessive mittels Likelihood-Quotienten-Tests die irrelevanten Variablen und Wechselwirkungen entfernt. Dabei wurden zunächst die Wechselwirkungen geprüft, wobei bei signifikanten Wechselwirkungen alle enthaltenen Regressoren im Modell belassen wurden, unabhängig ihrer eigenen Signifikanz (nach KLEINBAUM 1994). Die Konsistenz des Modells wurde danach überprüft, indem getrennt für zwei zufällig ausgewählte gleich große Untergruppen des Datenpools analog vorgegangen wurde. Dabei waren die gleichen Einflussgrößen und Wechselwirkungen signifikant wie in dem Hauptmodell. Auch die Richtung des Einflusses der Variablen war in beiden Untergruppen und in dem Hauptmodell jeweils identisch. Die Ergebnisse der logistischen Regressionen für die Untergruppen finden sich im Anhang 9.5.

Der Anteil betroffener Probekreisfläche (PKPROZ) wurde logarithmiert in die logistischen Regressionen aufgenommen (LNPKPROZ). Diese Transformation sorgte dafür, dass bei nicht betroffenen Probekreisen (PKPROZ=0) die Schadenswahrscheinlichkeit nicht vorhanden ist, was bei Berücksichtigung des nicht transformierten Anteils betroffener Probekreisfläche nicht gegeben gewesen wäre. Ohne Ursache ist aber eine Wirkung nicht plausibel. Bei den ermittelten Funktionen dagegen taucht der Anteil betroffener Probekreisfläche nicht auf. Da die ermittelten Schadenswahrscheinlichkeiten für betroffene Bestandesflächen gelten sollen, ist der Anteil betroffener Probekreisfläche immer 100% (PKPROZ=1). Damit wird der Logarithmus des Anteils betroffener Probekreisfläche 0 und der gesamte Term fällt schließlich weg. Die Funktionen mit dem Anteil betroffener Probekreisfläche lassen sich aus Anhang 9.3 bzw. 9.4 konstruieren. Ein signifikanter Einfluss des Brusthöhendurchmessers (BHD) des gefälltten Altbestandsbaums (Kap. 3.2.2.2) konnte weder für fehlende noch für beschädigte Verjüngungsbäume nachgewiesen werden. Auch eine Restbelaubung der gefällten Buchen (Kap. 3.2.2.5) oder der Buchenverjüngung (Kap. 3.2.3.3) wirkte sich auf die Schäden an der Verjüngung nicht signifikant aus. Die Lage des Verjüngungsbaums in der liegenden Krone (Kap. 3.2.2.4) wurde aufgrund der Konzeption des Prognosemodells nicht berücksichtigt. Das Hiebsstrukturmodell ist nicht in der Lage, die dafür benötigten Informationen dem Schadensermittlungsmodell zur Verfügung zu stellen.

Für fehlende und für beschädigt vorhandene Verjüngung wurden getrennte Regressionen gerechnet, da zu vermuten war, dass sich vor allem die Höhe der Verjüngung stark gegensätzlich auf die Wahrscheinlichkeit für fehlende oder für beschädigte Verjüngung auswirkt. Während die Wahrscheinlichkeit für einen fehlenden Baum mit steigender Höhe des Baumes sinkt, steigt die Wahrscheinlichkeit für einen beschädigten Baum mit steigender Höhe des Baumes an (siehe Kap. 3.2.3.2).

Die Wahrscheinlichkeit für einen insgesamt vom Hieb betroffenen Verjüngungsbaum ergibt sich als Summe der Wahrscheinlichkeit für einen fehlenden und der Wahrscheinlichkeit für einen beschädigten Verjüngungsbaum. Aufgrund der zwei getrennten Berechnungen ist allerdings theoretisch eine gesamte Schadenswahrscheinlichkeit von über 1 möglich. Daher wurde ein zweistufiges Vorgehen gewählt. Zuerst wird die Wahrscheinlichkeit für einen fehlenden Verjüngungsbaum berechnet. Danach wird, bezogen auf die noch vorhandenen (also nicht fehlenden) Verjüngungsbäume die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden ermittelt. Die in den folgenden Kapiteln angegebenen Gleichungen beziehen sich

allerdings alle auf die Verjüngung vor dem Hieb, um Vergleiche und auch die Berechnung zu vereinfachen.

Die Gleichungen zu den Wahrscheinlichkeiten für einzelne Schadensgruppen wurden wie die Wahrscheinlichkeit für einen beschädigten Verjüngungsbaum auf die nicht fehlende Verjüngung bezogen berechnet. Anschließend wurden die einzelnen Funktionen auf die Wahrscheinlichkeit für einen beschädigten Verjüngungsbaum normiert. Die angegebenen Gleichungen beziehen sich ebenfalls auf die Verjüngung vor dem Hieb. Die bei der Wahrscheinlichkeit für eine Beschädigung und für die einzelnen Schadensgruppen angegebenen Logits (G) hingegen beziehen sich auf die nach dem Hieb noch vorhandene Verjüngung.

4.3.2.1 Schadenswahrscheinlichkeiten

Als Datenpool zur Ermittlung der Schadenswahrscheinlichkeiten mittels binär logistischer Regressionen dienten die ungewichtet 12.000 Verjüngungsbäume aus Kapitel 3.2.

Tabelle 23: Berücksichtigte Variablen und Wechselwirkungen bei den binär logistischen Regressionen zur Ermittlung der Schadenswahrscheinlichkeiten

Variablen		
NVHOEHE	Höhe des Verjüngungsbaums	cm
NVBART	Baumart des Verjüngungsbaums	0 = Fichte 1 = Buche
ABBART	Baumart des Altbestandsbaums	0 = Fichte 1 = Buche
BEREICH	Bereich des Altbestandsbaums	0 = Stamm 1 = Krone
LNPCKPROZ	Logarithmierter Anteil betroffener Probekreisfläche	0 - 1
berücksichtigte Wechselwirkungen		
WW1	NVHOEHE * NVBART	
WW2	NVHOEHE * ABBART	
WW3	NVHOEHE * BEREICH	
WW4	NVBART * ABBART	
WW5	NVBART * BEREICH	
WW6	ABBART * BEREICH	
WW7	NVHOEHE * NVBART * ABBART	
WW8	NVHOEHE * NVBART * BEREICH	
WW9	NVHOEHE * ABBART * BEREICH	

Allerdings wurden lediglich Verjüngungsbäume bis 4m Höhe berücksichtigt. Oberhalb dieses Grenzwertes war der Stichprobenumfang für gesicherte Aussagen zu gering. Eine mögliche Wechselwirkung der drei Dummy-Variablen wurde nicht berücksichtigt.

Die Tabelle 23 gibt die Variablen und ihre Wechselwirkungen an, die zu Beginn der Modellbildung in die binär logistischen Regressionen aufgenommen wurden.

Aus den binär logistischen Regressionen ergeben sich folgende Gleichungen zur Schätzung der Wahrscheinlichkeit für einen Verjüngungsbaum, nach dem Hieb zu fehlen. Die Wahrscheinlichkeit wird geschätzt, indem man die Gleichung 2 in Gleichung 3 einsetzt. Dabei gelten die Codierungen aus Tabelle 23. Weitere Angaben zur Absicherung der Funktionen und der Signifikanz des Einflusses der Variablen finden sich in Anhang 9.3.

Gleichung 2

$$G_{p(\text{fehlend})} = -0.849 + 0.00018 * NVHOEHE + 0.37 * NVBART + 0.881 * ABBART + 0.912 * BEREICH - 0.00342 * WW1 - 0.00297 * WW2 - 0.0073 * WW3 - 1.596 * WW6 + 0.00555 * WW8 + 0.00472 * WW9$$

NVHOEHE nicht signifikant.

Gleichung 3

$$p(\text{fehlend}) = \exp(G_{p(\text{fehlend})}) / [1 + \exp(G_{p(\text{fehlend})})]$$

Analog ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für einen Verjüngungsbaum, nach dem Hieb beschädigt zu sein, indem Gleichung 4 in Gleichung 5 eingesetzt wird.

Gleichung 4

$$G_{p(\text{beschädigt})} = -1.573 + 0.00769 * NVHOEHE + 0.28 * NVBART + 1.011 * ABBART - 0.514 * BEREICH - 0.00384 * WW1 - 0.00347 * WW2 - 0.00304 * WW3 - 1.008 * WW4 + 0.448 * WW5 - 0.514 * WW6 + 0.00707 * WW7$$

NVBART nicht signifikant.

Gleichung 5

$$p(\text{beschädigt}) = [1 - p(\text{fehlend})] * \exp(G_{p(\text{beschädigt})}) / [1 + \exp(G_{p(\text{beschädigt})})]$$

Die Wahrscheinlichkeit für einen Verjüngungsbaum, vom Hieb betroffen zu sein, ergibt sich somit aus der Summe der Wahrscheinlichkeit zu fehlen und der Wahrscheinlichkeit für einen Schaden (Gleichung S6).

Gleichung 6

$$p(\text{betroffen}) = p(\text{fehlend}) + p(\text{beschädigt})$$

Die folgenden Gleichungen geben die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Schadensgruppen wieder. Die Wahrscheinlichkeit für einen Bruch ergibt sich, wenn

man Gleichung 7 in Gleichung 8 einsetzt. Da sich diese Wahrscheinlichkeit allerdings auf die nicht fehlende Verjüngung nach dem Hieb bezieht, wird sie in Gleichung 9 auf die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden normiert.

Gleichung 7

$$G_{p(\text{Bruch})} = - 2.949 + 0.0071 * NVHOEHE + 1.426 * NVBART - 0.421 * ABBART - 0.634 * BEREICH - 0.00892 * WW1 - 0.682 * WW4 + 0.535 * WW5 + 0.00442 * WW7$$

Gleichung 8

$$p(\text{Bruch}) = \exp(G_{p(\text{Bruch})}) / [1 + \exp(G_{p(\text{Bruch})})]$$

Gleichung 9

$$p_{\text{norm}}(\text{Bruch}) = \frac{p(\text{Bruch}) * p(\text{beschädigt})}{[p(\text{Bruch}) + p(\text{Rinde}) + p(\text{Lage}) + p(\text{Mehrfach})]}$$

Analog geben die Gleichungen 10 bis 12 die Wahrscheinlichkeit für einen Rindenschaden wieder, die Gleichungen 13 bis 15 die Wahrscheinlichkeit für eine Lageveränderung und die Gleichungen 16 bis 18 die Wahrscheinlichkeit für eine Kombination einzelner Schäden.

Gleichung 10

$$G_{p(\text{Rinde})} = - 7.047 + 0.00722 * NVHOEHE + 2.044 * NVBART - 1.205 * BEREICH$$

Gleichung 11

$$p(\text{Rinde}) = \exp(G_{p(\text{Rinde})}) / [1 + \exp(G_{p(\text{Rinde})})]$$

Gleichung 12

$$p_{\text{norm}}(\text{Rinde}) = \frac{p(\text{Rinde}) * p(\text{beschädigt})}{[p(\text{Bruch}) + p(\text{Rinde}) + p(\text{Lage}) + p(\text{Mehrfach})]}$$

Gleichung 13

$$G_{p(\text{Lage})} = - 1.998 + 0.00545 * NVHOEHE - 0.997 * NVBART + 1.352 * ABBART - 0.143 * BEREICH - 0.00401 * WW2 - 0.00682 * WW3 + 0.389 * WW5 - 1.221 * WW6 + 0.00351 * WW7 + 0.00538 * WW9$$

BEREICH nicht signifikant.

Gleichung 14

$$p(\text{Lage}) = \exp(G_{p(\text{Lage})}) / [1 + \exp(G_{p(\text{Lage})})]$$

Gleichung 15

$$p_{\text{norm}}(\text{Lage}) = \frac{p(\text{Lage}) * p(\text{beschädigt})}{[p(\text{Bruch}) + p(\text{Rinde}) + p(\text{Lage}) + p(\text{Mehrfach})]}$$

Gleichung 16

$$G_{p(\text{Mehrfach})} = -4.727 + 0.1084 * \text{NVHÖEHE} - 0.036 * \text{NVBART} + 1.905 * \text{ABBART} - 1.182 * \text{BEREICH} - 0.00804 * \text{WW2} - 1.26 * \text{WW4} + 0.00661 * \text{WW7}$$

NVBART nicht signifikant.

Gleichung 17

$$p(\text{Mehrfach}) = \frac{\exp(G_{p(\text{Mehrfach})})}{[1 + \exp(G_{p(\text{Mehrfach})})]}$$

Gleichung 18

$$p_{\text{norm}}(\text{Mehrfach}) = \frac{p(\text{Mehrfach}) * p(\text{beschädigt})}{[p(\text{Bruch}) + p(\text{Rinde}) + p(\text{Lage}) + p(\text{Mehrfach})]}$$

Die Abbildung 78 a-d zeigt die Schadenswahrscheinlichkeiten für eine Fichte in der Verjüngung in Abhängigkeit von ihrer Höhe getrennt nach Altbestandsbaumart und Schadensbereichen, also nach Schadensursachen. Jede Einzelgrafik gibt dabei die Wahrscheinlichkeiten für eine betroffene, fehlende und beschädigte Fichte sowie für die einzelnen Schadensgruppen wieder.

Während die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden bei allen vier Schadensursachen mit zunehmender Höhe der Verjüngungsfichte ansteigt, sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass die Fichte nach dem Hieb fehlt, mit steigender Höhe der Fichte. Ausnahme ist hier der Fichtenstamm als Schadensursache, wo die Wahrscheinlichkeit leicht ansteigt. Allerdings war die Höhe des Verjüngungsbaums (NVHÖEHE) als Variable in der Regression für die Wahrscheinlichkeit zu fehlen nicht signifikant und wurde lediglich aufgrund ihrer Wechselwirkungen im Modell belassen. Die Stammbereiche verursachen durchweg mehr fehlende und beschädigte Verjüngungsfichten als die Kronenbereiche.

Die Wahrscheinlichkeit, insgesamt vom Hieb betroffen zu sein, verhält sich aufgrund der gegenläufigen Trends der beiden Teilwahrscheinlichkeiten wenig einheitlich. Allerdings scheint bei den Stammbereichen ein Anstieg der Gesamtschadenswahrscheinlichkeit mit steigender Höhe der Verjüngungsfichte gegeben zu sein, während bei den Kronenbereichen ein Minimum existiert.

Bei den Schadensgruppen kommen Rindenschäden kaum vor. Bei den Stammbereichen sind Lageveränderungen die häufigsten Schäden, bei den Kronenbereichen sind Brüche ebenfalls oft vorhanden. Gefällte Fichten verursachen mehr Brüche und Mehrfachschäden als gefällte Buchen, diese allerdings mehr Lageveränderungen.

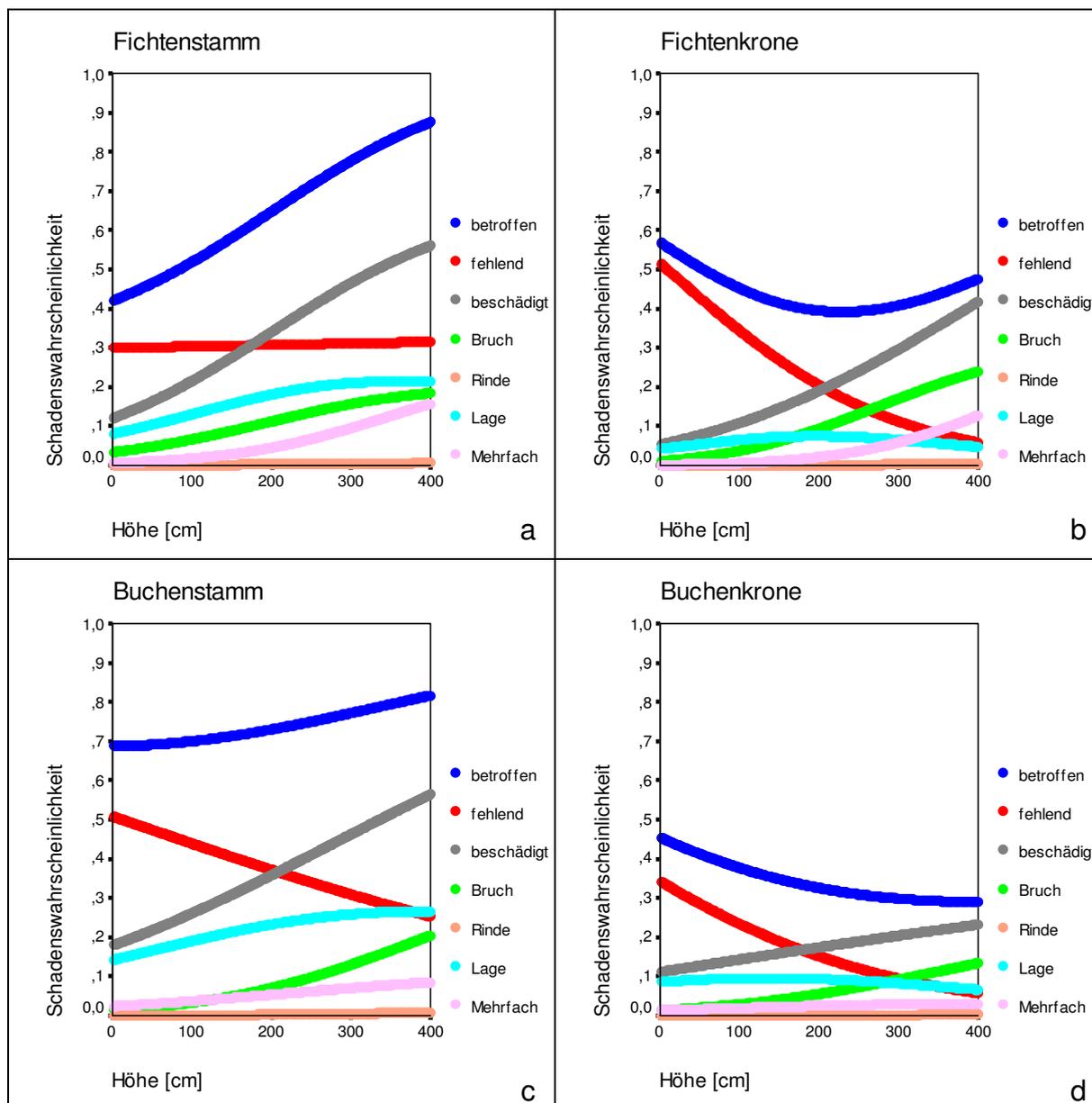


Abbildung 78 a-d: Schadenswahrscheinlichkeiten für Fichten in der Verjüngung nach Schadensursachen

Die Abbildung 79 a-d gibt den gleichen Sachverhalt für die Buchenverjüngung wieder. Die Wahrscheinlichkeit für eine fehlende Buche sinkt mit zunehmender Höhe des Baums, während die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden mit zunehmender Höhe ansteigt. Die Wahrscheinlichkeit für eine Buche, vom Hieb betroffen zu sein, besitzt bei allen vier Schadensursachen ein Minimum. Bei der Fichtenkrone liegt es aber in größeren Höhenbereichen als den dargestellten.

Bei den Schadensgruppen verursachen die Stammbereiche mehr Lageveränderungen und Mehrfachschäden als die Kronenbereiche. Insgesamt verursacht eine gefällte Buche mehr beschädigte Verjüngungsbuchen als eine gefällte Fichte.

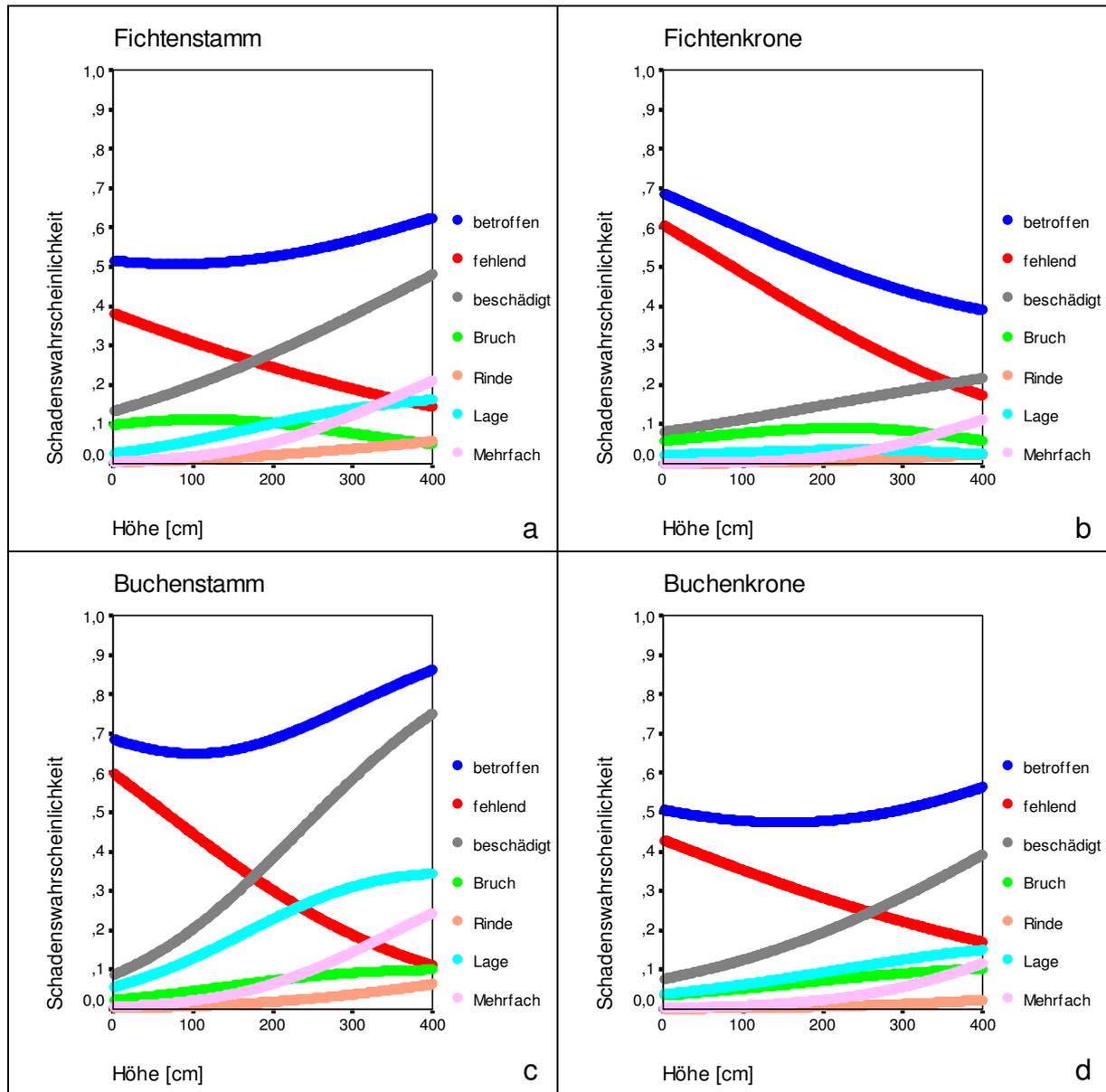


Abbildung 79 a-d: Schadenswahrscheinlichkeiten für Buchen in der Verjüngung nach Schadensursachen

4.3.2.2 Schadprozente

Der Datenpool zur Ermittlung der Schadprozente mittels Logit-Transformation bestand aus den knapp 1200 Probekreisen, die in Kapitel 3.2 näher beschrieben sind. Es wurden lediglich Probekreise mit einer mittleren Höhe kleiner 3m in den Regressionen berücksichtigt. Eine Berücksichtigung der Verjüngungsbaumart als Einflussfaktor war bei dieser Betrachtung schwierig. Der Versuch, beispielsweise den Anteil an Buchen in der Verjüngung als Variable aufzunehmen, führte zu wenig sinnvollen Ergebnissen. Daher wurden getrennte Regressionen für Fichten- und Buchenverjüngung durchgeführt. Infolgedessen konnten auch weniger Wechselwirkungen berücksichtigt werden.

Tabelle 24 gibt die Variablen und ihre Wechselwirkungen an, die zu Beginn der Modellbildung in die Logit-Transformationen aufgenommen wurden.

Tabelle 24: Berücksichtigte Variablen und Wechselwirkungen bei den Logit-Transformationen zur Ermittlung der Schadprozente

Variablen		
FIHMITT BUHMITT	mittlere Höhe der Fichtenverjüngung mittlere Höhe der Buchenverjüngung	cm
ABBART	Baumart des Altbestandsbaums	0 = Fichte 1 = Buche
BEREICH	Bereich des Altbestandsbaums	0 = Stamm 1 = Krone
LNPKPROZ	logarithmierter Anteil betroffener Probekreisfläche	0 - 1
berücksichtigte Wechselwirkungen		
WW1	ABBART * BEREICH	
WW2	FIHMITT * ABBART bzw. BUHMITT * ABBART	
WW3	FIHMITT * BEREICH bzw. BUHMITT * BEREICH	
WW4	FIHMITT * ABBART * BEREICH bzw. BUHMITT * ABBART * BEREICH	

Nachfolgend werden lediglich die ermittelten Logits (G) für die einzelnen Schadprozente angegeben. Die Berechnung der eigentlichen Schadprozente erfolgt analog zur Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeiten in Kapitel 4.3.2.1. Genau wie dort bezieht sich der Anteil beschädigter Verjüngung zunächst auf die nicht fehlende Verjüngung und muss analog zu Gleichung 5 auf die Verjüngung vor dem Hieb umgerechnet werden. Gleiches gilt für die einzelnen Schadensgruppen, die ebenfalls zusätzlich auf den Anteil beschädigter Verjüngung normiert werden müssen. Bei den folgenden Gleichungen 19 bis 30 gelten die Codierungen aus Tabelle 24. Die statistische Absicherung der Modellgleichungen und Angaben zur Signifikanz des Einflusses der Variablen sind im Anhang 9.4 zu finden.

Prognosemodell

Gleichung 19

$$\mathbf{G}_{\text{SP(FI fehlend)}} = - 0.889 + 0.00159 * \text{FIHMITT} + 0.735 * \text{ABBART} + 0.882 * \text{BEREICH} - 1.292 * \text{WW1} - 0.00722 * \text{WW3}$$

Gleichung 20

$$\mathbf{G}_{\text{SP(BU fehlend)}} = - 0.558 - 0.00259 * \text{BUHMITT} + 0.599 * \text{ABBART} + 1.219 * \text{BEREICH} - 1.883 * \text{WW1} - 0.00318 * \text{WW3} + 0.00619 * \text{WW4}$$

Gleichung 21

$$\mathbf{G}_{\text{SP(FI beschädigt)}} = - 1.763 + 0.01058 * \text{FIHMITT} + 1.37 * \text{ABBART} - 0.268 * \text{BEREICH} - 0.92 * \text{WW1} - 0.00481 * \text{WW2} - 0.00584 * \text{WW3}$$

BEREICH nicht signifikant.

Gleichung 22

$$\mathbf{G}_{\text{SP(BU beschädigt)}} = - 1.342 + 0.00646 * \text{BUHMITT} - 0.438 * \text{ABBART} - 1.023 * \text{BEREICH} + 0.819 * \text{WW1} + 0.00439 * \text{WW2} - 0.0051 * \text{WW4}$$

ABBART nicht signifikant.

Gleichung 23

$$\mathbf{G}_{\text{SP(FI Bruch)}} = - 3.17 + 0.01003 * \text{FIHMITT} - 0.109 * \text{ABBART} - 0.672 * \text{BEREICH} - 0.00463 * \text{WW4}$$

ABBART nicht signifikant.

Gleichung 24

$$\mathbf{G}_{\text{SP(BU Bruch)}} = - 2.106 + 0.00254 * \text{BUHMITT} - 1.045 * \text{ABBART} + 0.00389 * \text{WW2}$$

BUHMITT nicht signifikant.

Gleichung 25

$$\mathbf{G}_{\text{SP(FI Rinde)}} = - 7.537$$

Gleichung 26

$$\mathbf{G}_{\text{SP(BU Rinde)}} = - 4.728 + 0.00667 * \text{BUHMITT} - 1.3 * \text{BEREICH}$$

Gleichung 27

$$\mathbf{G}_{\text{SP(FI Lage)}} = - 2.053 + 0.00628 * \text{FIHMITT} + 1.773 * \text{ABBART} \\ - 0.007 * \text{BEREICH} - 1.734 * \text{WW1} - 0.007 * \text{WW2} \\ - 0.00822 * \text{WW3} + 0.00831 * \text{WW4}$$

BEREICH nicht signifikant.

Gleichung 28

$$\mathbf{G}_{\text{SP(BU Lage)}} = - 2.777 + 0.00782 * \text{BUHMITT} + 0.666 * \text{ABBART} \\ - 1.83 * \text{BEREICH} + 1.457 * \text{WW1} - 0.00543 * \text{WW4}$$

Gleichung 29

$$\mathbf{G}_{\text{SP(FI Mehrfach)}} = - 4.603 + 0.01319 * \text{FIHMITT} + 0.903 * \text{ABBART} \\ - 1.44367 * \text{BEREICH} + 1.54 * \text{WW1} - 0.01357 * \text{WW4}$$

Gleichung 30

$$\mathbf{G}_{\text{SP(BU Mehrfach)}} = - 4.253 + 0.01145 * \text{BUHMITT} - 1.222 * \text{BEREICH}$$

Die Abbildungen 80a bis 80d zeigen die Schadprozente für die Fichte, also die Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Fichten sowie die Anteile der Schadensgruppen, abhängig von der mittleren Höhe und aufgeteilt nach Schadensursachen.

Der Anteil beschädigter Fichten steigt bei allen Schadensursachen mit zunehmender mittlerer Höhe an. Er ist bei den Stammbereichen deutlich größer als bei den Kronenbereichen. Der Anteil fehlender Fichtenverjüngung sinkt mit zunehmender mittlerer Höhe bei den Kronenbereichen erwartungsgemäß, während er bei den Stammbereichen leicht ansteigt. Insgesamt steigt der Anteil betroffener Fichten bei den Stammbereichen mit zunehmender mittlerer Höhe an, während er bei den Kronenbereichen abfällt (Buchenkrone) oder ein Minimum aufweist (Fichtenkrone). Dabei werden durch einen Buchenstamm mehr Fichten betroffen als durch einen Fichtenstamm, während eine Fichtenkrone mehr betroffene Fichten verursacht als eine Buchenkrone.

Bei den einzelnen Schadensgruppen fallen vor allem die vielen Brüche bei der Fichtenkrone auf. Bei allen Schadensursachen ist der Anteil an Rindenschäden gleich bleibend niedrig, da Gleichung 25 lediglich aus einer Konstanten besteht. Allgemein sind in niedrigeren Höhenbereichen Lageveränderungen die bestimmende Schadensgruppe, während mit zunehmender mittlerer Höhe der Fichtenverjüngung Brüche und Mehrfachschäden einen größeren Anteil einnehmen.

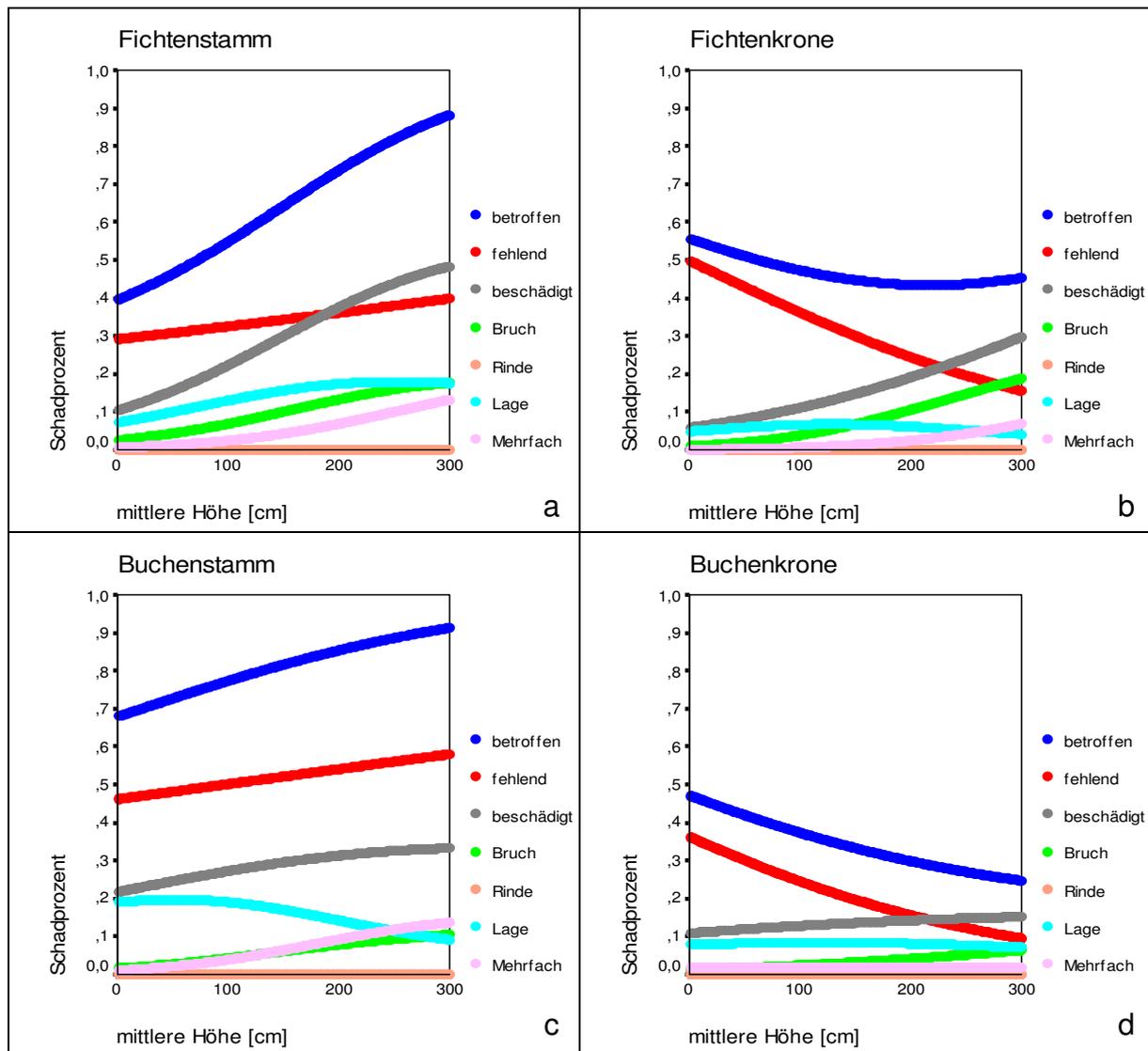


Abbildung 80 a-d: Schadprozente Fichtenverjüngung nach Schadensursachen

Die Abbildung 81 a-d gibt die Schadprozente für die Buchenverjüngung wieder. Der Anteil beschädigter Buchen steigt bei allen Schadensursachen mit zunehmender mittlerer Höhe an, während der Anteil fehlender Buchen außer bei der Buchenkrone abnimmt. Die Stammbereiche verursachen deutlich mehr Schäden als die Kronenbereiche. Insgesamt wächst der Anteil vom Hieb betroffener Buchen mit zunehmender mittlerer Höhe der Buchen. Lediglich bei der Fichtenkrone zeigt sich ein Minimum im Bereich zwischen 2,0m und 2,5m.

Von den Schadensgruppen sind in den Stammbereichen vor allem Änderungen der Lage zu finden, während in den Kronenbereichen, vor allem bei der Fichte, Brüche am häufigsten auftreten.

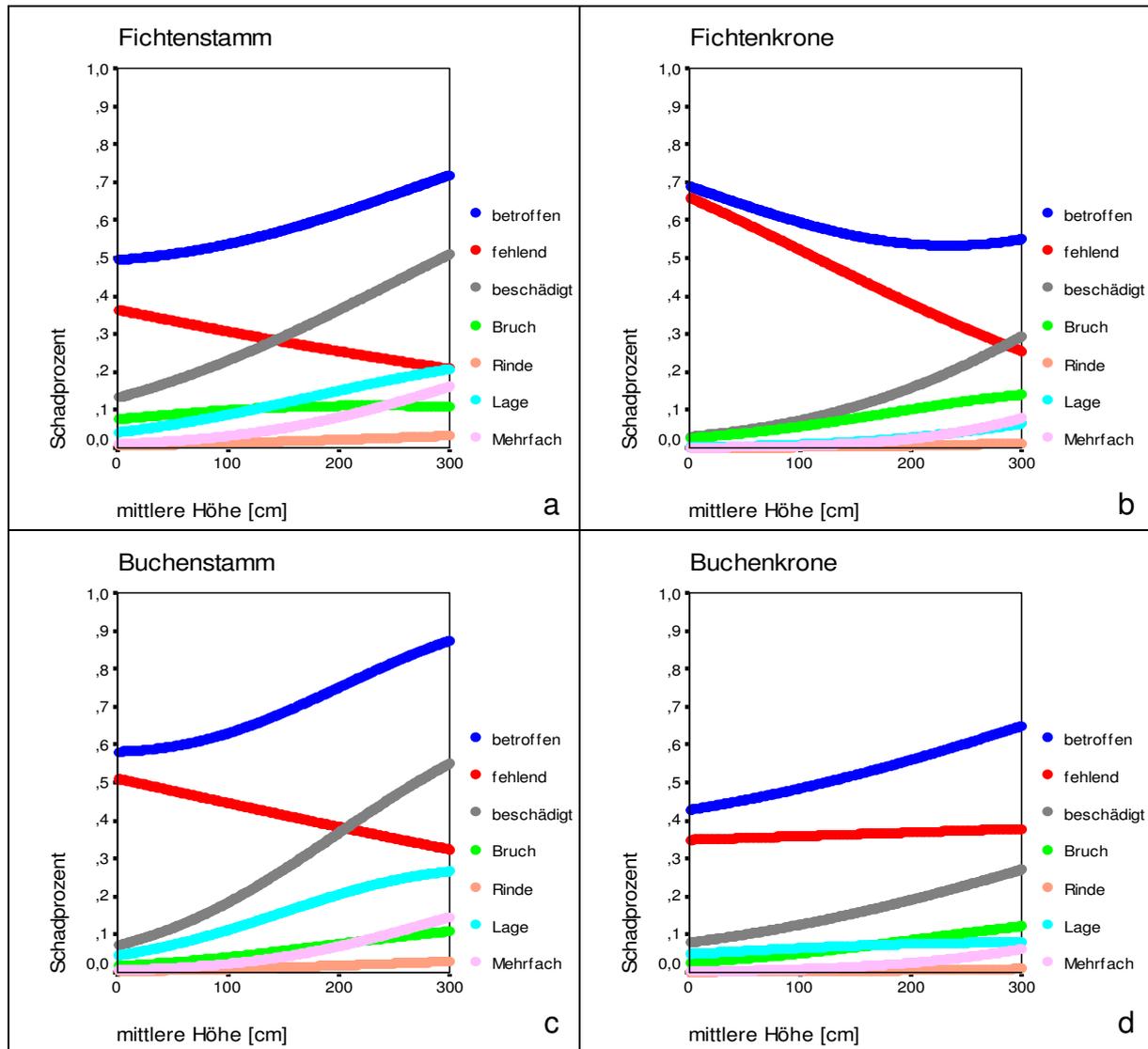


Abbildung 81 a-d: Schadprozente Buchenverjüngung nach Schadensursachen

4.3.3 Test des Schadensermittlungsmodells

Die Überprüfung der Funktionen des Schadensermittlungsmodells (Schadprozente, Kap. 4.3.2.2) gestaltete sich schwierig. Das Schadensermittlungsmodell berücksichtigt wie das Hiebsstrukturmodell lediglich Fällschäden, nicht aber Schäden durch die Rückung des geernteten Holzes. Die auf den Versuchsflächen (siehe Kapitel 3.1) erhobenen Schäden an der Verjüngung beinhalten aber eben auch die Rückeschäden. Trotzdem wird im folgenden Kapitel 4.3.3.1 das Schadensermittlungsmodell an den **Versuchsflächen** Biburg und Schongau getestet. Die Flächenanteile der einzelnen Schadensursachen wurden dabei mit Hilfe des GIS-Programms ArcView ermittelt. Eine weitere Ungenauigkeit bei diesen Tests ist allerdings, dass die Schäden auf der Grundlage der mittleren Höhe der gesamten Versuchsfläche ermittelt werden. Daher wird außerdem in Kapitel 4.3.3.2 das Schadensermittlungsmodell an einzelnen ausgewählten **Probekreisen** der beiden Versuchsflächen getestet. Dadurch können die bei der Überprüfung der Funktionen zur Prognose der Fällschäden störenden Effekte der Rückung möglicherweise verringert werden. Außerdem sind die Funktionen des Schadensermittlungsmodells

auf der Grundlage von Daten zu gleich großen Probekreisen entstanden. Deshalb sollten sie hier sehr gut passen.

4.3.3.1 Test an Versuchsflächen

4.3.3.1.1 Schongau

Die Ergebnisse des Tests finden sich getrennt nach Baumarten in Tabelle 25. Bei der Fichte werden die entstehenden Schäden leicht unterschätzt. Es werden weniger fehlende, beschädigte und insgesamt betroffene Bäume prognostiziert, als sie auf der Fläche tatsächlich zu finden waren. Bei der Buchenverjüngung hingegen wird der Anteil beschädigter Bäume überschätzt, die fehlende und betroffene Buchenverjüngung aber ebenfalls leicht unterschätzt. Insgesamt werden die fehlenden Bäume leicht unterschätzt, die beschädigten Bäume dagegen leicht überschätzt. Das beobachtete Gesamtschadprozent von 8,1% wird mit 7,8% recht genau prognostiziert.

Tabelle 25: Vergleich der vom Schadensermittlungsmodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsfläche Biburg; nur Buchenverjüngung

Schongau		Prognose	Realität	Abweichung	Faktor
FICHTE	fehlend	4.8	5.4	-0.6	1.13
	beschädigt	2.3	2.6	-0.4	1.16
	betroffen	7.0	8.0	-1.0	1.14
	% Bruch	20.8	25.0	-4.2	1.20
	% Rinde	0.4	0.0	+0.4	
	% Lage	65.9	56.3	+9.6	0.85
	% Mehrfach	12.8	18.8	-6.0	1.47
BUCHEN	fehlend	6.1	7.0	-0.9	1.16
	beschädigt	1.8	1.1	+0.7	0.62
	betroffen	7.9	8.1	-0.3	1.03
	% Bruch	41.1	37.3	+3.8	0.91
	% Rinde	3.3	5.9	-2.6	1.79
	% Lage	47.8	31.4	+16.4	0.66
	% Mehrfach	7.8	25.5	-17.7	3.27
GESAMT	fehlend	5.9	6.8	-0.9	1.15
	beschädigt	1.9	1.3	+0.6	0.70
	betroffen	7.8	8.1	-0.3	1.04
	% Bruch	38.7	34.3	+4.4	0.89
	% Rinde	3.0	4.5	-1.5	1.50
	% Lage	49.9	37.3	+12.6	0.75
	% Mehrfach	8.4	23.9	-15.5	2.85

Bei den Schadensgruppen stimmt die Schätzung des Anteils an Brüchen gut mit der Realität überein. Auch die selten auftretenden Rindenschäden werden in einer der

Realität ähnlichen Größenordnung prognostiziert. Größere Unterschiede treten hingegen bei den Lageveränderungen auf, die vom Schadensermittlungsmodell durchgehend überschätzt werden. Noch größere Abweichungen sind bei den Kombinationen einzelner Schäden zu finden. Insgesamt sind hier in der Realität fast dreimal so viele Mehrfachschäden zu finden wie vom Modell vorhergesagt werden. Insgesamt erreicht das Schadensermittlungsmodell bei der Versuchsfläche im FoA Schongau eine passable Anpassung. Die Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Verjüngung werden recht gut geschätzt, allerdings ist der Einfluss der Rückung hier eine unbekannte Größe. Da die Rückeschäden bei der Prognose im Gegensatz zur Realität nicht berücksichtigt wurden, wäre eine deutlichere Unterschätzung der Schäden hier wünschenswert gewesen. Betrachtet man allerdings die Lage der gefällten Bäume in Schongau (Abb. 10a, S. 23), so fällt auf, dass verhältnismäßig viele der Bäume aus der Fläche heraus gefällt wurden. Dadurch lässt sich möglicherweise die lediglich leichte Unterschätzung der Schäden durch das Schadensermittlungsmodell erklären.

4.3.3.1.2 Biburg

Für den Test des Schadensermittlungsmodells wurde bei der Versuchsfläche Biburg lediglich die Buchenverjüngung berücksichtigt, da Fichten in der Verjüngung kaum vorkamen. Tabelle 26 gibt die vom Schadensermittlungsmodell prognostizierten sowie die tatsächlich gemessenen Schadprozente wieder. Es zeigt sich, dass alle drei Schadprozente deutlich unterschätzt werden. Vom Schadensermittlungsmodell werden lediglich ungefähr zwei Drittel der fehlenden, beschädigten und insgesamt betroffenen Buchen vorhergesagt.

Bei den Anteilen der Schadensgruppen sind es lediglich die Brüche, die einigermaßen genau geschätzt werden. Rinden- und Mehrfachschäden werden deutlich unterschätzt, während Lageveränderungen überschätzt werden.

Tabelle 26: Vergleich der vom Schadensermittlungsmodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsfläche Biburg; nur Buchenverjüngung

Biburg	Prognose	Realität	Abweichung	Faktor	
BUCHEN	fehlend	9.3	15.3	-6.1	1.66
	beschädigt	4.3	6.1	-1.8	1.41
	betroffen	13.6	21.4	-7.8	1.58
	% Bruch	39.7	44.1	-4.4	1.11
	% Rinde	3.0	13.2	-10.2	4.40
	% Lage	46.6	19.1	+27.5	0.41
	% Mehrfach	10.8	23.5	-12.7	2.18

Hier scheint sich der Einfluss der Rückung deutlich zu offenbaren. Das Modell, das lediglich die Fällschäden berücksichtigt, sagt lediglich zwei Drittel der tatsächlich entstandenen Schäden vorher. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass die Differenz zwischen Prognose und Realität auf die Rückung des gernteten Holzes zurückzuführen ist.

4.3.3.2 Test an Probekreisen

Zur Verprobung der Gleichungen an den einzelnen Probekreisen der Versuchsflächen Biburg und Schongau wurden zunächst von den insgesamt 800 Probekreisen diejenigen ausgesucht, die eindeutig einer einzelnen Schadensursache (Fichtenstamm, Fichtenkrone, Buchenstamm, Buchenkrone) zuzuordnen waren und sich zudem nicht in unmittelbarer Nähe der Rückegassen befanden, da hier ein starker Einfluss der Rückung zu vermuten war. Von den lediglich 90 Probekreisen, auf die diese Kriterien zutrafen, war lediglich auf 74 Probekreisen Verjüngung zu finden. Da nur ein Teil der Probekreise voll betroffen war, wurden die ursprünglichen Gleichungen verwendet, in denen der Anteil der betroffenen Probekreisfläche berücksichtigt wird (siehe Kap. 4.3.2 und Anhang 9.4).

Tabelle 27 gibt die tatsächlichen und die prognostizierten Schäden für diese 74 Probekreise wieder. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs wurde auf eine Verprobung der Gleichungen für die Anteile der Schadensgruppen verzichtet.

Tabelle 27: Vergleich der vom Schadensermittlungsmodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten; 74 Probekreise, 708 Verjüngungsbäume

	Realität	Prognose	Abweichung	Faktor
fehlend	18.8	31.5	+12.7	0.60
beschädigt	5.8	12.5	+6.7	0.46
betroffen	24.5	43.9	+19.4	0.56

Bei diesen 74 Probekreisen überschätzt das Modell die entstandenen Schäden deutlich. Dies liegt einerseits an den teilweise sehr wenig Bäumen in den Probekreisen, wodurch zufällige Effekte einen großen Einfluss gewinnen. Andererseits ist die Genauigkeit der Lage der Probekreise in Bezug auf die liegenden Bäume durch das Raster nicht so hoch wie beispielsweise bei den Einzelbäumen, wo die Probekreise in Bezug zum einzelnen Altbestandsbaum eingemessen wurden. Daher kann hier ein mit ArcView errechneter zu 20% betroffener Probekreis in der Praxis wohl auch bedeuten, dass der Probekreis gar nicht oder voll betroffen wurde. Daher wurden in einem zweiten Schritt von den 74 Probekreisen nur diejenigen ausgewählt, in denen mindestens fünf Verjüngungsbäume zu finden waren und die zu 100% vom Hieb betroffen waren. Dies waren lediglich 15 Probekreise auf den beiden Flächen, in denen aber immerhin 161 Verjüngungsbäume standen. Die Ergebnisse von Datenerhebung und Schätzung gibt Tabelle 28 wieder.

Tabelle 28: Vergleich der vom Schadensermittlungsmodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten; 15 Probekreise, 161 Verjüngungsbäume

	Realität	Prognose	Abweichung	Faktor
fehlend	33.6	37.1	+3.6	0.90
beschädigt	9.8	11.1	+1.3	0.88
betroffen	43.4	48.3	+4.9	0.90

In Bezug auf diese 15 Probekreise überschätzt das Schadensermittlungsmodell die Anteile fehlender, beschädigter und betroffener Verjüngung lediglich leicht. Bei allen drei Schadprozenten liegt der Faktor bei ca. 0,9.

4.4 Test des Prognosemodells

In den folgenden Kapiteln wird das Prognosemodell an den Versuchsflächen aus Kapitel 3.1 getestet. Es wurden keine Baumarten außer Fichte und Buche berücksichtigt, da das Prognosemodell lediglich Funktionen zu diesen beiden Baumarten beinhaltet und andere Baumarten auf den Versuchsflächen nicht in nennenswertem Umfang vorkamen. Zum Einsatz kamen dabei die flächenbezogenen Funktionen zur Ermittlung der Schadprozente aus Kapitel 4.3.2.2.

Da das Prognosemodell aufgrund seiner Konzeption nur in der Lage ist, die bei der Fällung der Bäume entstehenden Verjüngungsschäden (Fällschäden) abzubilden, sind etwaige Abweichungen bei den motormanuell bearbeiteten Flächen ein Hinweis auf die bei der Rückung der gefällten Bäume entstehenden Schäden (Rückeschäden). Bei den kombinierten und hochmechanisierten Verfahren (Kap. 4.5) treten neben den Fällschäden und den Rückeschäden zusätzlich noch Schäden durch die während der Aufarbeitung durch den Harvester quer durch den Bestand gezogenen Kronen der gefällten Bäume auf.

Tabelle 29 gibt die Eingangsdaten in das Prognosemodell für die Versuchsflächen zu den motormanuellen Holzernteverfahren wieder. Die gewählten Rückegassenabstände stellen die bestmögliche Annäherung an die Realität dar.

Tabelle 29: Eingangsdaten in das Prognosemodell, Versuchsflächen motormanuelle Holzernteverfahren

	Schongau	Illertissen	Biburg	Schwabmünchen
Rückegassenabstand	40	40	40	60
Rückegassenbreite	3	4	3	4
Fichte Anzahl	23	40	0	9
Fichte BHD	46	45	0	47
Buche Anzahl	11	14	18	14
Buche BHD	44	40	45	57
Eiche Anzahl	0	0	10	5
Eiche BHD	0	0	50	49
Fällwinkelabweichung	10	10	30	20
maximaler Fällwinkel	0	0	0	0
fixer Fällwinkel	0	0	0	0
Fichte: N/ha	6100	31330	120	2080
Fichte: mittlere Höhe [cm]	87.7	49.2	106.8	70.7
Buche: N/ha	45850	20820	11170	22770
Buche: mittlere Höhe [cm]	76.5	122.8	153.1	148.8

Während die Rückegassen in Schongau und Biburg mit 3m für die motormanuelle Holzernte normal ausgeprägt waren, waren sie in Illertissen und Schwabmünchen deutlich breiter. Hier wurde von einer Breite von 4m ausgegangen. Die Fällwinkelabweichungen wurden bei den Eichen-Buchen-Flächen aufgrund des sehr unregelmäßigen Rückegassennetzes verhältnismäßig groß gewählt.

4.4.1 Fichten-Buchen-Flächen

Die Ergebnisse des Prognosemodells sowie die tatsächlichen Schäden auf der Versuchsfläche im FoA Schongau werden in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsfläche Schongau

Schongau		Prognose	Realität	Abweichung	Faktor
FICHTE	fehlend	5.6	5.4	+0.2	0.96
	beschädigt	2.3	2.6	-0.3	1.15
	betroffen	7.9	8.0	-0.1	1.01
	Anteil Bruch	24.2	25.0	-0.8	1.03
	Anteil Rinde	0.4	0.0	+0.4	
	Anteil Lage	64.5	56.3	+8.2	0.87
	Anteil Mehrfach	10.8	18.8	-8.0	1.74
BUCHEN	fehlend	7.6	7.0	+0.6	0.93
	beschädigt	1.8	1.1	+0.7	0.63
	betroffen	9.3	8.1	+1.2	0.87
	Anteil Bruch	50.3	37.3	+13.0	0.74
	Anteil Rinde	2.8	5.9	-3.1	2.11
	Anteil Lage	40.1	31.4	+8.7	0.78
	Anteil Mehrfach	6.8	25.5	-18.7	3.75
GESAMT	fehlend	7.3	6.8	+0.5	0.93
	beschädigt	1.8	1.3	+0.5	0.71
	betroffen	9.2	8.1	+1.1	0.88
	Anteil Bruch	47.2	34.3	+12.9	0.73
	Anteil Rinde	2.5	4.5	-2.0	1.80
	Anteil Lage	43.0	37.3	+5.7	0.87
	Anteil Mehrfach	7.3	23.9	-16.6	3.27

Die Anteile fehlender Verjüngungsbäume werden vom Prognosemodell leicht überschätzt, ebenso wie die Anteile beschädigter Verjüngungsbäume mit Ausnahme der Fichtenverjüngung. Insgesamt sind aber bei den Schadprozenten die Abweichungen gering.

Die geschätzten Anteile der Schadensgruppen an den beschädigten Bäumen stimmen in ihrer Größenordnung ebenfalls mit der Realität überein. Dabei scheinen Lageveränderungen vom Modell überschätzt zu werden, während Mehrfachschäden recht deutlich unterschätzt werden.

Bei der Versuchsfäche Illertissen, die die einzige der vier Versuchsfächen zur motormanuellen Holzernte mit systematisch angelegter Feinerschließung war, werden alle Schadprozent unterschätzt (Tab. 31). Das Modell prognostiziert dabei im Schnitt lediglich zwei Drittel der tatsächlich aufgetretenen Verjüngungsschäden. Der Anteil beschädigter Verjüngung wird dabei deutlicher unterschätzt als der Anteil fehlender Verjüngung.

Tabelle 31: Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsfäche Illertissen

Illertissen		Prognose	Realität	Abweichung	Faktor
FICHTE	fehlend	7.9	13.3	-5.4	1.69
	beschädigt	2.4	4.4	-2.1	1.87
	betroffen	10.3	17.7	-7.5	1.73
	Anteil Bruch	19.6	33.8	-14.2	1.72
	Anteil Rinde	0.4	0.7	-0.3	1.75
	Anteil Lage	70.4	54.7	+15.7	0.78
	Anteil Mehrfach	9.6	10.8	-1.2	1.13
BUCHHE	fehlend	8.8	10.0	-1.2	1.14
	beschädigt	2.8	5.4	-2.6	1.94
	betroffen	11.6	15.4	-3.8	1.33
	Anteil Bruch	53.0	52.7	+0.3	0.99
	Anteil Rinde	3.2	3.6	-0.4	1.13
	Anteil Lage	34.2	27.7	+6.5	0.81
	Anteil Mehrfach	9.6	16.1	-6.5	1.68
GESAMT	fehlend	8.3	12.0	-3.8	1.45
	beschädigt	2.5	4.8	-2.3	1.90
	betroffen	10.8	16.8	-6.0	1.56
	Anteil Bruch	32.9	42.2	-9.3	1.28
	Anteil Rinde	1.5	2.0	-0.5	1.33
	Anteil Lage	55.9	42.6	+13.3	0.76
	Anteil Mehrfach	9.6	13.1	-3.5	1.36

Die Anteile der Schadensgruppen werden vom Modell dabei recht zufrieden stellend prognostiziert. Die geschätzten Anteile an Rinden- und Mehrfachschäden werden leicht unterschätzt und die Anteile an Lageveränderungen überschätzt. Eine nahezu perfekte Prognose liefert das Modell bezüglich des Anteils gebrochener Buchen. Neben den reinen Schadprozenten liefert das Prognosemodell ebenfalls eine Abschätzung der räumlichen Verteilung der Schäden auf der Bestandesfläche in Form einer Funktion, die die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Fläche angibt, in Abhängigkeit von der Entfernung des Baumes von der Rückegasse vom Hieb betroffen zu sein (grüne Kurven, Abb. 82). Diese Betrachtungsweise unterscheidet sich von derjenigen, die den roten Kurven aus den tatsächlich erhobenen Daten zugrunde liegt. Diese beziehen sich nämlich auf den einzelnen Verjüngungsbaum. Genauere Erläuterungen sind in Kapitel 4.2.1.4.2 zu finden. Wichtig an dieser Stelle

ist, dass die beiden Kurven schwerlich gleich verlaufen können, zum einen wegen unterschiedlicher Berechnung, Aussage und Bezug, zum andern wegen der Rückschäden, die auch hier in der Realität zu finden sind, in der Prognose aber nicht berücksichtigt werden. Zudem wirken sich die Unterschiede zwischen dem streng systematischen Rückegassennetz des Prognosemodells und der in der Realität oft unregelmäßigen Feinerschließung deutlich aus.

Trotz all dieser Probleme bei der Vergleichbarkeit der beiden Kurven lassen sich wenigstens grundsätzliche Aussagen zu Gemeinsamkeiten und Unterschieden bezüglich der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand in Realität und Prognose treffen.

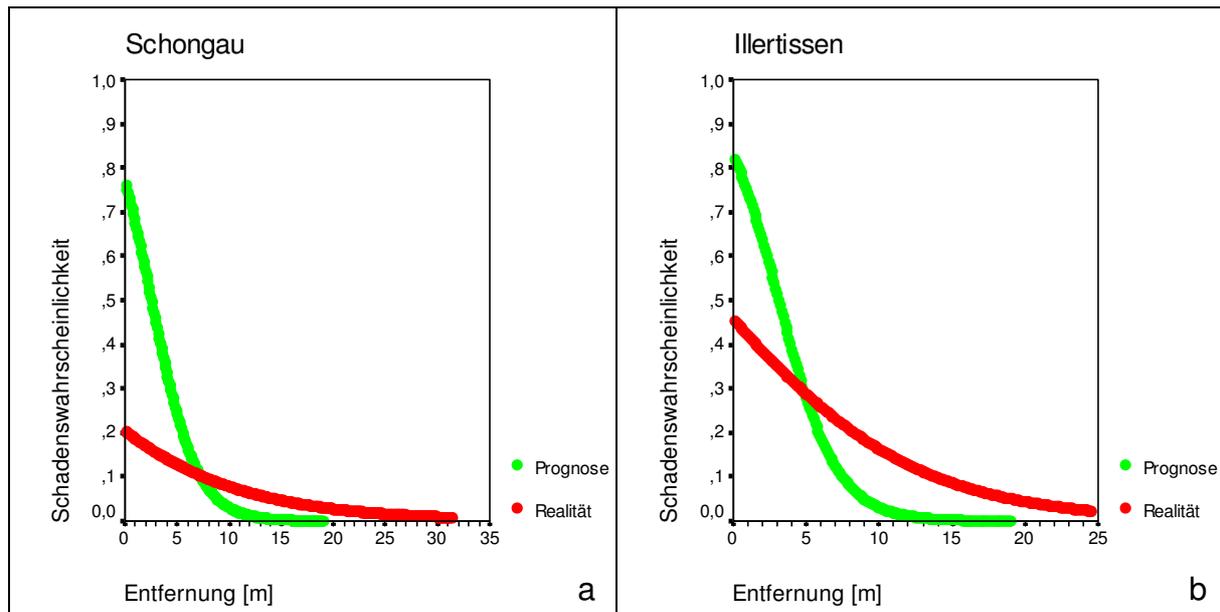


Abbildung 82 a+b: Vergleich von Realität und Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand, Versuchsflächen Schongau (a) und Illertissen (b)

So zeigt die räumliche Verteilung der Schäden im Bestand bei den Fichten-Buchen-Flächen in Realität und Prognose eine Konzentration der Schäden an den Rückegassen (Abb. 82 a+b). Allerdings überschätzt das Hiebsstrukturmodell die Konzentration deutlich, in Schongau mehr als in Illertissen.

4.4.2 Eichen-Buchen-Flächen

Zum Testen des Prognosemodells mit den beiden Eichen-Buchen-Flächen im FoA Biburg und im FoA Schwabmünchen werden lediglich die Buchen in der Verjüngung betrachtet, da Fichten auf beiden Flächen nicht in nennenswertem Umfang auftraten. Die Ergebnisse des Vergleichs von Modell und Realität finden sich in Tabelle 32. Das Modell prognostiziert bei allen Schadprozenten mit Ausnahme der beschädigten Buchen in Schwabmünchen ungefähr 60% bis 70% der tatsächlich durch die Hiebe verursachten Schäden an der Verjüngung. Der Anteil beschädigter Buchen in Schwabmünchen wird allerdings überschätzt.

Die Anteile von Brüchen an den beschädigten Buchen werden auf beiden Flächen gut geschätzt. Der Anteil an Rindenschäden wird vom Modell deutlich unterschätzt.

Tabelle 32: Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsflächen Biburg und Schwabmünchen; nur Buchen-Verjüngung

		Prognose	Realität	Abweichung	Faktor
Biburg					
BUCHEN	fehlend	9.4	15.3	-6.0	1.64
	beschädigt	4.4	6.1	-1.7	1.40
	betroffen	13.7	21.4	-7.7	1.56
	Anteil Bruch	40.5	44.1	-3.6	1.09
	Anteil Rinde	3.0	13.2	-10.2	4.40
	Anteil Lage	46.1	19.1	+27.0	0.41
	Anteil Mehrfach	10.5	23.5	-13.0	2.24
Schwabmünchen					
BUCHEN	fehlend	8.1	14.0	-5.9	1.73
	beschädigt	3.5	2.1	+1.5	0.59
	betroffen	11.6	16.0	-4.5	1.39
	Anteil Bruch	43.7	36.2	+7.5	0.83
	Anteil Rinde	3.1	6.4	-3.3	2.06
	Anteil Lage	42.6	48.9	-6.3	1.15
	Anteil Mehrfach	10.6	8.5	+2.1	0.80

Während bei der Versuchsfläche Schwabmünchen die Anteile der Lageveränderungen und Mehrfachs Schäden gut vorhergesagt werden, ist die Prognose bei diesen beiden Schadensgruppen bei der Versuchsfläche Biburg deutlich schlechter. Bei der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand sorgt das auf beiden Flächen, vor allem aber in Biburg sehr unregelmäßige Rückegassennetz für beträchtliche Abweichungen zwischen Realität und Prognose. So kommen auf der Versuchsfläche Biburg (Abb. 83a) in der Realität Entfernungen zur nächsten Rückegasse von 55m vor, während das Prognosemodell von maximalen Entfernungen von 20m ausgeht. Während in der Realität die Schäden mit steigender Entfernung von der Rückegasse sogar zunehmen, findet beim Hiebsstrukturmodell durch die Grundeinstellung, nach der die Kronen auf die Rückegasse gefällt werden sollen, trotz der recht hohen maximalen Fällwinkelabweichung von 30° eine Konzentration an den Gassen statt.

Bei der Versuchsfläche Schwabmünchen (Abb. 83b) ist sowohl in der Realität als auch bei der Prognose ein vermehrtes Auftreten der Schäden in Rückegassennähe festzustellen. Der Verlauf beider Kurven unterscheidet sich allerdings deutlich voneinander.

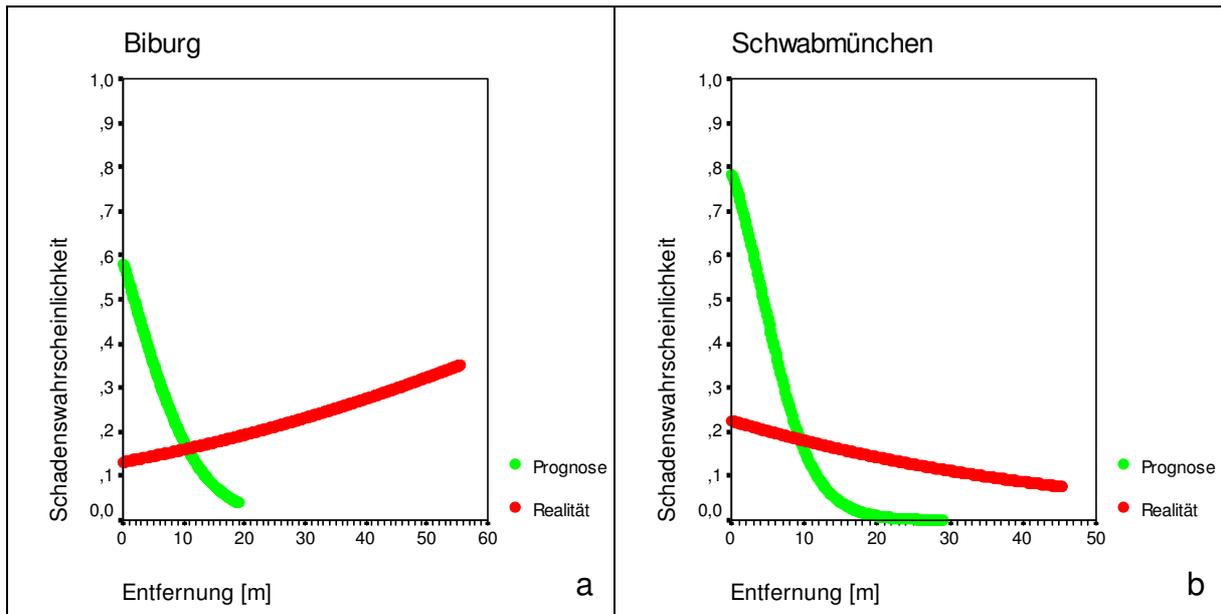


Abbildung 83 a+b: Vergleich von Realität und Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand, Versuchsflächen Biburg (a) und Schwabmünchen (b)

4.5 weitere Anwendungen des Prognosemodells

Das Prognosemodell wurde zur Schätzung der Fällschäden an Verjüngung bei **motormanueller Holzernte** konzipiert. Vor allem die der Ermittlung der betroffenen Bestandesfläche im Hiebsstrukturmodell zugrunde liegenden Überlegungen sowie die auf Daten zur motormanuellen Holzernte basierenden Funktionen des Schadensermittlungsmodells sind Unsicherheitsfaktoren bei der **Anwendung des Prognosemodells auf andere Arbeitsverfahren**. Da aber Daten von Versuchsflächen zur hochmechanisierten Windwurfaufarbeitung (Kap. 3.1.4) sowie zu hochmechanisierten (Kap. 3.1.2) und kombinierten (Kap. 3.1.3) Arbeitsverfahren vorliegen und das Hiebsstrukturmodell mit den verschiedenen Fällwinkel-einstellungen Möglichkeiten aufweist, die speziellen Eigenschaften dieser Arbeitsverfahren zu simulieren, soll in diesem Kapitel dennoch der Versuch einer Prognose unternommen werden.

4.5.1 Hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung

Auf die Eingangsdaten in das Hiebsstrukturmodell zur Prognose der Schäden bei der hochmechanisierten Windwurfaufarbeitung auf der Versuchsfläche im FoA Krumbach wurde bereits in Kapitel 4.2.4 eingegangen. Die zusätzlichen Daten zur Verjüngung finden sich in Tabelle 33 wieder.

Tabelle 33: Eingangsdaten in das Prognosemodell, Versuchsfläche hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung

	Krumbach
Rückegassenabstand	20
Rückegassenbreite	4
Fichte Anzahl	91
Fichte BHD	50
Buche Anzahl	20
Buche BHD	47
Eiche Anzahl	4
Eiche BHD	67
Fällwinkelabweichung	36
maximaler Fällwinkel	0
fixer Fällwinkel	-95
Fichte: N/ha	12250
Fichte: mittlere Höhe [cm]	59.9
Buche: N/ha	7180
Buche: mittlere Höhe [cm]	162.8

Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen prognostizierten und tatsächlich vorhandenen Schäden finden sich in Tabelle 34. Das Prognosemodell schätzt lediglich ca. 60% der tatsächlich fehlenden Bäume, während es die beschädigten Bäume recht deutlich überschätzt. Die Faktoren zur Umrechnung der

prognostizierten auf die tatsächlich beobachteten Schäden liegen für die betroffenen Fichten (1,32) und die betroffenen Buchen (1,4) auf gleichem Niveau. Auch die Überschätzungen der beschädigten Fichten und Buchen ähneln sich.

Tabelle 34: Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsfläche hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung

Krumbach		Prognose	Realität	Abweichung	Faktor
FICHTE	fehlend	29.8	46.8	-17.0	1.57
	beschädigt	8.9	4.5	+4.4	0.50
	betroffen	38.7	51.3	-12.5	1.32
	Anteil Bruch	22.1	21.8	+0.3	0.99
	Anteil Rinde	0.3	3.6	-3.3	12.00
	Anteil Lage	69.0	47.3	+21.7	0.69
	Anteil Mehrfach	8.6	27.3	-18.7	3.17
BUCHE	fehlend	32.0	53.3	-21.4	1.67
	beschädigt	12.4	8.8	+3.7	0.71
	betroffen	44.4	62.1	-17.7	1.40
	Anteil Bruch	55.4	34.9	+20.5	0.63
	Anteil Rinde	3.4	12.7	-9.3	3.74
	Anteil Lage	29.0	20.6	+8.4	0.71
	Anteil Mehrfach	12.2	31.7	-19.5	2.60
GESAMT	fehlend	30.6	49.2	-18.6	1.61
	beschädigt	10.2	6.1	+4.1	0.59
	betroffen	40.8	55.3	-14.5	1.35
	Anteil Bruch	34.4	28.8	+5.6	0.84
	Anteil Rinde	1.4	8.5	-7.1	6.07
	Anteil Lage	54.2	33.1	+21.1	0.61
	Anteil Mehrfach	9.9	29.7	-19.8	3.00

Die Fehler bei der Schätzung der Schadensgruppenanteile ähneln den Fehlern bei der motormanuellen Holzernte. Rinden- und Mehrfachschäden werden unterschätzt und Lageveränderungen überschätzt, während die Prognose des Anteils an Brüchen einigermaßen mit der Realität übereinstimmt.

Bei der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand (Abb. 84) war in der Realität eine leichte Konzentration der Schäden an den Rückegassen zu erkennen, während das Prognosemodell eine leichte Zunahme der Schäden mit steigender Entfernung von der Rückegasse vorhersagt. Diese Unterschiede sind allerdings weniger extrem als beispielsweise bei der Versuchsfläche Biburg (Kap. 4.4.2) und sehr gut durch die in der Realität zusätzlich auftretenden Rucke- und Aufarbeitungsschäden erklärbar, die sich an den Gassen konzentrieren, auf denen der Harvester gefahren ist.

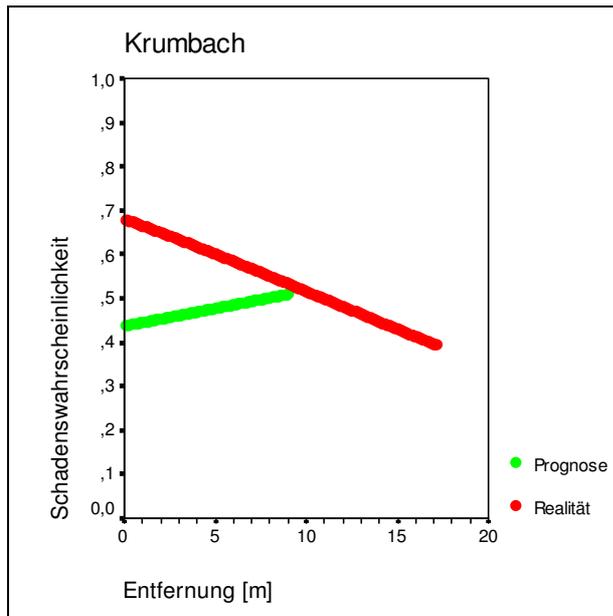


Abbildung 84: Vergleich von Realität und Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand, Versuchsfläche hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung

Somit funktioniert das Prognosemodell bei der Windwurffläche im FoA Krumbach bezüglich der Schadprozentage ähnlich gut wie bei den Flächen zur motormanuellen Holzernte, auch der „Rückefaktor“ liegt in einer ähnlichen Größenordnung.

4.5.2 Hochmechanisierte Holzernteverfahren

Bei der Simulation der hochmechanisierten Holzernteverfahren wurde auf einen Vergleich der prognostizierten und tatsächlichen Anteile der Schadensgruppen verzichtet, da aufgrund der gegenüber den motormanuell bearbeiteten Flächen geringeren Versuchsflächengröße und des selteneren Auftretens der einzelnen Gruppen der Stichprobenumfang sehr gering war.

Es wurden die Daten aus Tabelle 35 für die einzelnen Versuchsflächen in das Prognosemodell eingegeben. Dabei wurde von einer für Harvester typischen mittleren Rückegassenbreite von 4m ausgegangen. Bei der Wahl des Rückegassenabstands gab es keine Probleme, alle vier Versuchsflächen wiesen Abstände von ca. 30m auf.

Um die hochmechanisierte Holzernte zu simulieren, wurde ein semi-fixer Fällwinkel von 90° von der Gasse weg gewählt. Alle Bäume wurden im Hiebsstrukturmodell also im rechten Winkel zur Rückegasse und von dieser weg „gefällt“. Dies stellt das übliche Verfahren bei der Holzernte mit Harvestern dar (vgl. GRANHUS und FJELD 2001, S. 1906). Daneben wurde eine leichte maximale Fällwinkelabweichung von 10° eingegeben.

Tabelle 35: Eingangsdaten in das Prognosemodell, Versuchsflächen hochmechanisierte Holzernetverfahren

	Selb1	Selb2	Heigenbrücken1	Heigenbrücken2
Rückegassenabstand	30	30	30	30
Rückegassenbreite	4	4	4	4
Fichte Anzahl	84	68	72	84
Fichte BHD	33	32	40	39
Buche Anzahl	0	0	0	0
Buche BHD	0	0	0	0
Eiche Anzahl	0	0	0	0
Eiche BHD	0	0	0	0
Fällwinkelabweichung	10	10	10	10
maximaler Fällwinkel	0	0	0	0
semi-fixer Fällwinkel	90	90	90	90
Fichte: N/ha	16960	57160	80120	32400
Fichte: mittlere Höhe [cm]	64.3	50.9	40.2	58.1
Buche: N/ha	0	0	2520	560
Buche: mittlere Höhe [cm]			143.1	102.8

Tabelle 36: Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsflächen hochmechanisierte Holzernetverfahren

		Prognose	Realität	Abweichung	Faktor
FICHTE	Selb1				
	fehlend	9.6	19.3	-9.7	2.02
	beschädigt	2.6	14.7	-12.2	5.73
	betroffen	12.1	34.0	-21.9	2.81
	Selb2				
	fehlend	7.7	7.6	+0.1	0.98
	beschädigt	1.8	12.2	-10.4	6.69
	betroffen	9.5	19.7	-10.2	2.07
	Heigenbrücken1				
	fehlend	11.7	20.1	-8.4	1.72
	beschädigt	2.5	12.9	-10.4	5.17
	betroffen	14.2	33.1	-18.8	2.32
	Heigenbrücken2				
	fehlend	12.5	23.7	-11.2	1.90
	beschädigt	3.2	19.6	-16.5	6.23
	betroffen	15.6	43.3	-27.7	2.77

Die Ergebnisse der Simulationsläufe und die tatsächlich ermittelten Schäden gibt Tabelle 36 wieder. Es zeigt sich, dass das Prognosemodell die entstandenen Schäden an der Verjüngung teilweise drastisch unterschätzt. Während mit Ausnahme der Fläche Selb 2 lediglich die Hälfte der fehlenden Verjüngung geschätzt wird, ist der Unterschied bei den beschädigten Bäumen sehr viel größer. Hier werden vom Prognosemodell lediglich 10% bis 20% der beschädigten Bäume vorhergesagt. Trotzdem ähneln sich die Ergebnisse der vier Versuchsfelder. Der „Rückefaktor“ zur Umrechnung der prognostizierten Fällschäden auf die tatsächliche Summe aus Fäll- und Rückeschäden liegt zwischen 2,1 und 2,8. Damit ist er bei der hochmechanisierten deutlich größer als bei der motormanuellen Holzernte. Ein Grund dafür ist mit Sicherheit die vom Hiebsstrukturmodell deutlich unterschätzte betroffene Bestandesfläche. Diese vergrößert sich bei der hochmechanisierten Holzernte durch die Kronen, die im Zuge der Harvesteraufarbeitung durch den Bestand gezogen werden.

Die realen und prognostizierten räumlichen Verteilungen der Schäden geben die Abbildungen 85a bis 85d wieder.

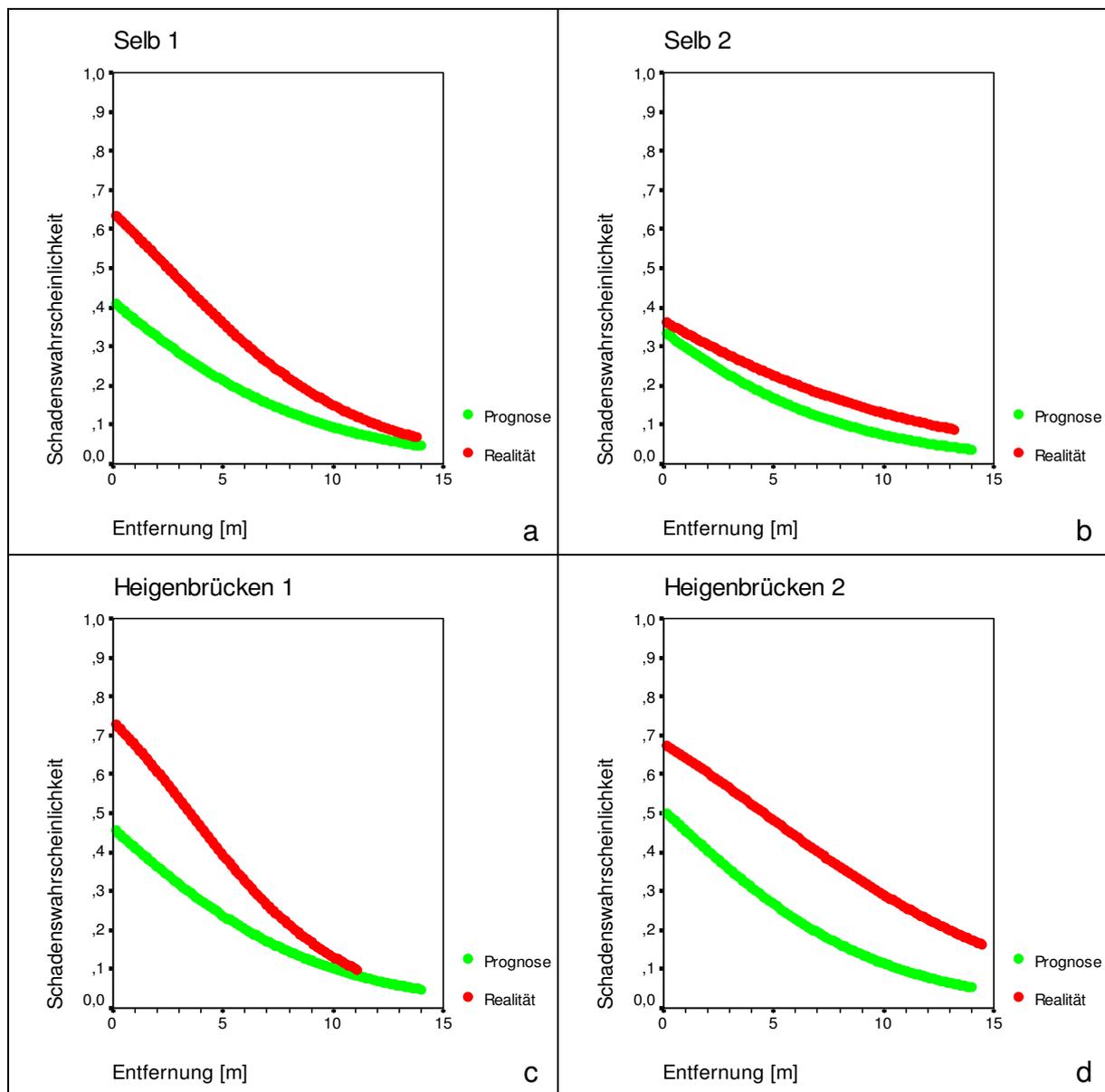


Abbildung 85 a-d: Vergleich von Realität und Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand, Versuchsfelder hochmechanisierte Holzernteverfahren

Im Gegensatz zu den Schäden bei motormanueller Holzernte ähneln sich hier die Kurven von Prognose und Realität jeweils sehr. Dabei liegen die realen durchweg über den prognostizierten Schäden, was zu den Schadprozenten sehr gut passt. Die Konzentration der Schäden bei der hochmechanisierten Holzernte wird vom Prognosemodell sehr gut vorhergesagt.

4.5.3 Kombinierte Holzernteverfahren

Zur Modellierung der Schäden auf den vier Versuchsfeldern zu den kombinierten Holzernteverfahren wurde das Prognosemodell mit den Eingangsdaten aus Tabelle 37 gestartet. Wie bei den hochmechanisierten Verfahren wurde auch hier von einer für Harvester typischen Rückegassenbreite von 4m ausgegangen. Bei der Wahl des Rückegassenabstands traten keine größeren Differenzen zwischen der Realität und den gewählten, vom Modell sinnvoll zu bearbeitenden Werten auf.

Tabelle 37: Eingangsdaten in das Prognosemodell, Versuchsfeldern kombinierte Holzernteverfahren

	Landshut1	Landshut2	Heigenbrücken3	Heigenbrücken4
Rückegassenabstand	30	40	30	60
Rückegassenbreite	4	4	4	4
Fichte Anzahl	112	80	56	52
Fichte BHD	31	39	41	38
Buche Anzahl	0	0	0	0
Buche BHD	0	0	0	0
Eiche Anzahl	0	0	0	0
Eiche BHD	0	0	0	0
Fällwinkelabweichung	20	20	15	15
maximaler Fällwinkel	0	0	0	0
semi-fixer Fällwinkel	270	270	270	270
Fichte: N/ha	10480	16960	146280	94080
Fichte: mittl. Höhe [cm]	69.7	64.3	43	55.9
Buche: N/ha	0	0	1840	1080
Buche: mittl. Höhe [cm]			232.5	210.8

Es wurde analog zu den hochmechanisierten Verfahren ein semi-fixer Fällwinkel gewählt, der allerdings zu den Rückegassen hin gerichtet war. Damit sollte die große Anzahl von motormanuell senkrecht auf die Rückegassen zugefallenen Bäumen berücksichtigt werden. Zudem wurde die maximale Fällwinkelabweichung ebenfalls wegen der motormanuellen Zufällung etwas größer gewählt als bei den hochmechanisierten Verfahren. Aufgrund der strikteren Vorgaben des Königsbronner Harvesterverfahrens (Heigenbrücken) in Bezug auf die Fällrichtung wurde dort die maximale Fällwinkelabweichung mit 15° niedriger als bei der Zufällung in Landshut (20°) gewählt.

Die Ergebnisse des Vergleichs von prognostizierten und realen Schäden an der Verjüngung gibt Tabelle 38 wieder. Es werden nur Schäden an der Fichtenverjüngung betrachtet, da auf den Flächen sehr wenig Buchen standen.

Tabelle 38: Vergleich der vom Prognosemodell geschätzten (Prognose) mit den tatsächlichen (Realität) Schäden; Abweichung der Prognose von der Realität in Prozentpunkten, Versuchsflächen kombinierte Holzernteverfahren

		Prognose	Realität	Abweichung	Faktor
F I C H T E	Landshut1				
	fehlend	14.3	24.4	-10.1	1.71
	beschädigt	3.8	18.3	-14.6	4.86
	betroffen	18.1	42.8	-24.7	2.37
	Landshut2				
	fehlend	13.7	16.8	-3.0	1.22
	beschädigt	3.5	14.4	-10.9	4.14
	betroffen	17.2	31.1	-13.9	1.81
	Heigenbrücken3				
	fehlend	12.2	29.2	-16.9	2.39
	beschädigt	2.5	8.0	-5.5	3.18
	betroffen	14.7	37.1	-22.4	2.52
	Heigenbrücken4				
	fehlend	8.0	36.7	-28.7	4.59
	beschädigt	1.9	8.8	-6.9	4.61
	betroffen	9.9	45.5	-35.6	4.59

Wie bei den hochmechanisierten Verfahren werden auch bei den kombinierten Verfahren die Verjüngungsschäden vom Prognosemodell deutlich unterschätzt. Auch hier liegt der Fehler überwiegend bei der Schätzung der beschädigten Bäume, von denen lediglich zwischen 20% und 30% vorhergesagt werden. Die Abweichung zwischen den prognostizierten und tatsächlich fehlenden Fichten variiert zwischen den vier Versuchsflächen deutlich. Während die fehlende Verjüngung auf der Fläche Landshut 2 lediglich leicht unterschätzt wird, ist die Differenz auf der Versuchsfläche Heigenbrücken 4 beträchtlich.

Der Umrechnungsfaktor von den prognostizierten Fällschäden auf die tatsächlich entstandenen Fäll- und Rückeschäden ist nicht so einheitlich wie bei den hochmechanisierten Verfahren. Er schwankt zwischen 1,8 und 4,6. Die Fläche Heigenbrücken 4 scheint aber (vor allem bei den fehlenden Bäumen) eher ein Ausreißer zu sein (vgl. Kap. 6.1). Die Prognose scheint zudem bei den Flächen mit Zufällung etwas besser zu funktionieren.

Bei der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand (Abb. 86 a-d) zeigt sich bei der Fläche Landshut 2 eine sehr gute Übereinstimmung von Prognose und Realität. Allerdings zeigt die Prognose höhere Schäden als die Realität, was im Widerspruch zu den Ergebnissen aus Tabelle 38 steht. Bei den anderen Versuchsflächen sind extreme Unterschiede zwischen der prognostizierten und der tatsächlichen räumlichen Verteilung der Schäden zu erkennen. Hier gibt das Prognosemodell keinerlei Hinweise auf die tatsächliche Verteilung der Schäden im Bestand.

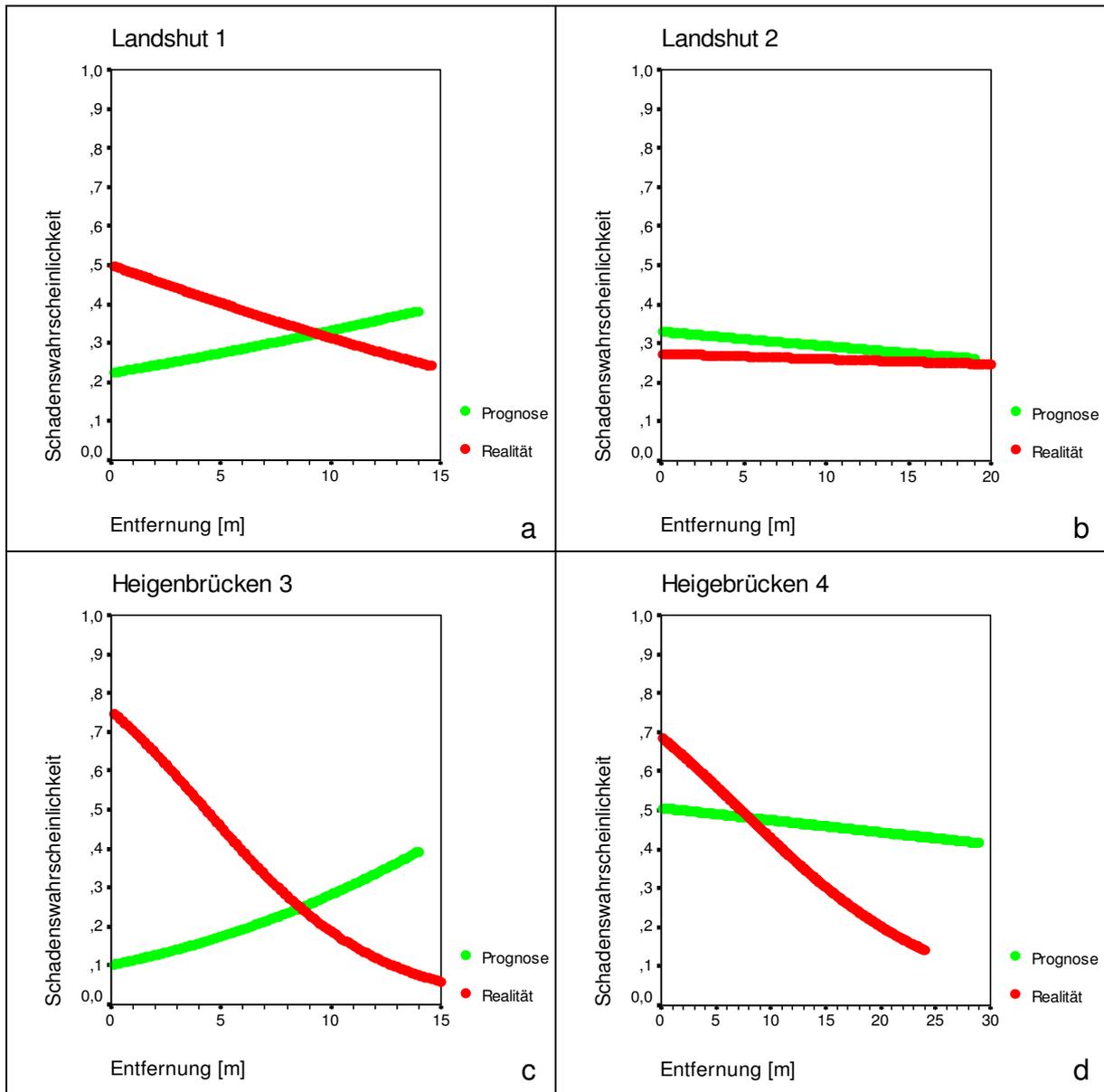


Abbildung 86 a-d: Vergleich von Realität und Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand, Versuchsflächen kombinierte Holzernteverfahren

5 Bewertung von Holzernteschäden an der Verjüngung

Eine Bewertung der durch die Holzernte entstandenen Schäden an Verjüngung ist grundsätzlich auf zwei verschiedenen Ebenen möglich.

Bei der **einzelbaumweisen Betrachtung** werden die Auswirkungen der verschiedenen Schadensarten auf die Entwicklung des einzelnen Verjüngungsbaums bewertet. Eindeutig bekannt in ihrer Bedeutung für den Verjüngungsbaum ist hier lediglich die Schadensart „fehlend“. Fehlende Bäume wurden durch die Holzerntemaßnahme vernichtet, sie fallen vollständig aus. Die Auswirkungen aller anderen Arten von Schäden auf den einzelnen Verjüngungsbaum sind nicht bekannt. Hinzu kommt noch das Ausmaß des Schadens, das die Bedeutung des einzelnen Schadens zusätzlich beeinflusst. Auch wirken sich möglicherweise Konkurrenz, Standort oder Lichtverhältnisse auf die Bedeutung des einzelnen Schadens zusätzlich aus. Somit lässt sich die Frage, wie sich mittel- bis langfristig ein Rindenschaden mit einer Fläche von 4cm² in 55cm Höhe auf eine 140cm hohe Fichte auswirkt, die direkt neben einer 20cm kleineren Buche auf einer vergrasteten Freifläche steht, nicht sofort beantworten, zumal der Zeitraum, der von Interesse ist, sich über etliche Jahre erstreckt. Hier wären sehr umfangreiche und zeitaufwändige Untersuchungen nötig, um den einzelnen Schadensarten beispielsweise Überlebenswahrscheinlichkeiten oder Wachstumsreduktionsfaktoren zuzuordnen.

In den zumeist sehr stammzahlreichen Naturverjüngungen tritt das Schicksal des einzelnen Verjüngungsbaums zudem hinter das Schicksal der gesamten Verjüngung zurück. Daher steht der einzelbaumweisen die **bestandesweise Betrachtung** gegenüber. Diese beschäftigt sich im weiteren Sinne mit der Frage, ob und wie sich die durch die Holzerntemaßnahme verursachten Veränderungen auf die weitere Entwicklung der gesamten Verjüngung auswirken. ***Im engeren Sinne dreht es sich um die (entscheidende) Frage, ob das Verjüngungsziel trotz der Holzernteschäden weiterhin erreicht werden kann. Dazu ist neben einer Mindeststammzahl pro Hektar auch eine geeignete räumliche Verteilung der Verjüngungspflanzen im Bestand erforderlich.*** Daher sind Bereiche ohne Verjüngung (ab einer gewissen Größe) als negativ zu bewerten, genau wie ein Rückgang der Höhe der Verjüngung, der Zuwachs- und damit Zeitverluste bedeutet. In den folgenden Kapiteln soll nun der Versuch unternommen werden, die durch die Holzernte verursachten Veränderungen der Verjüngungen auf den Versuchsflächen auf verschiedene Arten zu quantifizieren. ***Dabei sollen keine praxistauglichen Bewertungsverfahren entwickelt, sondern lediglich verschiedene Lösungsansätze aufgezeigt werden.***

Da die langfristigen Auswirkungen der einzelnen Schadensarten auf den einzelnen Verjüngungsbaum unbekannt sind, werden bei den Veränderungen der Kennziffern (Kap. 5.1) und bei der Betrachtung der mit dem GIS-Programm ArcView ermittelten verjüngungsfreien Bestandesfläche (Kap. 5.2) immer Wertepaare bzw. Wertebereiche für den Zustand nach dem Hieb angegeben. Der eine Wert berücksichtigt dabei **alle noch vorhandenen Verjüngungsbäume**, also auch beschädigte, während der andere Wert lediglich die **unbeschädigt vorhandene Verjüngung** kennzeichnet. Die Realität findet sich somit in dem Bereich zwischen diesen beiden Werten wieder. Daneben wird in Kapitel 5.3 der Versuch unternommen, Methoden der Wildschadensbewertung zur Bewertung von Holzernteschäden an Verjüngung einzusetzen. In Kapitel 5.4 schließlich wird mit Hilfe des Waldwachstumssimulators SILVA untersucht, ob sich eine Modellverjüngung mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden unterschiedlich entwickelt.

5.1 Kennziffern der Verjüngung

5.1.1 Durchschnittliche Abnahme der Stammzahl der Verjüngung

Die augenfälligste Kennziffer einer Verjüngung, die sich durch Holzerntemaßnahmen ändert, ist die Stammzahl pro Hektar. Betrachtet man die gesamte Verjüngung, so entspricht die Abnahme der Stammzahl grundsätzlich dem Schadprozent. Um aber die Auswirkungen von Holzerntemaßnahmen unter Berücksichtigung der räumlichen Verteilung der Schäden sowie der verjüngungsfreien Bereiche vor den Hieben zu beurteilen, bietet sich die **durchschnittliche Abnahme der Stammzahl** der vor dem Hieb verjüngten Probekreise an. Diese wird für die untersuchten Versuchsflächen in Tabelle 39 dargestellt. Die angegebenen Wertepaare geben dabei die Bereiche der extremsten Bewertungen der Schäden an. Der eine Wert berücksichtigt alle nach dem Hieb noch vorhandenen Verjüngungsbäume, der andere Wert lediglich die unbeschädigt vorhandene Verjüngung.

Tabelle 39: Stammzahlen vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Abnahme, jeweils im Durchschnitt der vorher verjüngten Probekreise

AV	Versuchsfläche	Ø Stammzahl pro Hektar		Ø Abnahme [%]
		vorher	nachher	
MM	Schongau	58783	54017 - 54783	8.5 - 10.5
	Illertissen	66786	55527 - 58735	14.9 - 20.4
	Biburg	21143	16682 - 17954	12.8 - 21.1
	Schwabmünchen	35986	30284 - 31050	13.6 - 17.4
HM	Selb1	56683	37366 - 45756	14.1 - 27.9
	Selb2	75263	60421 - 69579	13.1 - 22.2
	Heigenbrücken1	102195	67610 - 81268	19.9 - 37.7
	Heigenbrücken2	49928	26892 - 37157	24.7 - 46.6
KO	Landshut1	23683	14667 - 18413	22.0 - 42.3
	Landshut2	30378	22378 - 26378	15.2 - 30.8
	Heigenbrücken3	160258	100731 - 114237	25.0 - 36.3
	Heigenbrücken4	102779	55747 - 65389	24.6 - 36.0
WW	Krumbach	30284	13379 - 15264	49.4 - 59.6

Bei den vier motormanuell (MM) bearbeiteten Flächen ist die durchschnittliche Abnahme der Stammzahl in Schongau deutlich niedriger als bei den restlichen Flächen, deren Wertebereiche einander sehr ähnlich sind. Etwas höher liegen die Werte für die Stammzahlreduktion bei den beiden Flächen in Selb, die anderen beiden hochmechanisiert (HM) bearbeiteten Flächen in Heigenbrücken weisen deutlich höhere Änderungen auf. Auch auf den vier Versuchsflächen, die mit kombinierten Holzernteverfahren (KO) bearbeitet wurden, nehmen die mittleren Stammzahlen deutlich ab. Auf der Windwurflläche (WW) im FoA Krumbach ist die durchschnittliche Abnahme der Stammzahl mit 50% bis 60% dramatisch hoch.

Die räumliche Verteilung der durchschnittlichen Abnahme der Stammzahl pro Hektar wird exemplarisch für die Versuchsfläche Biburg in Abbildung 87 wiedergegeben.

Dabei wird der „worst case“ dargestellt, nämlich die Abnahme um alle betroffenen (fehlenden und beschädigten) Verjüngungsbäume.

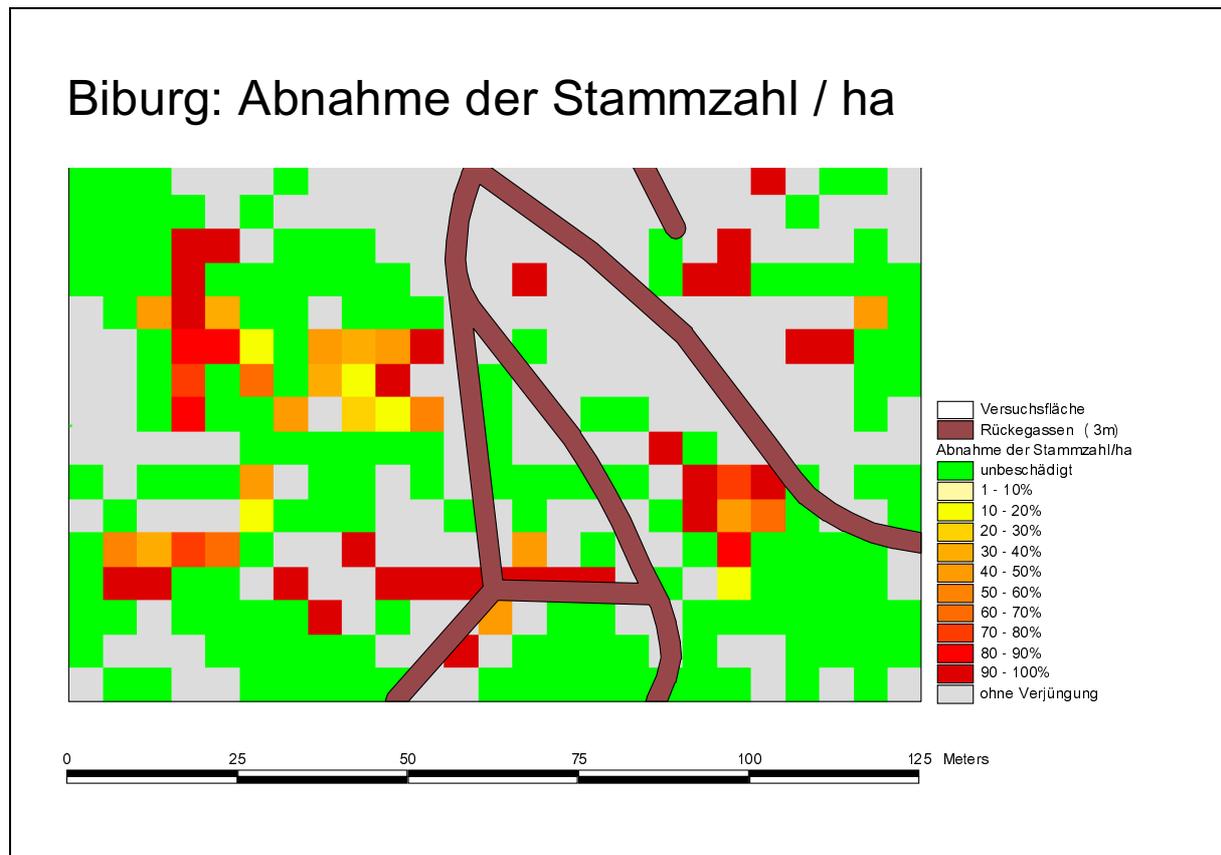


Abbildung 87: Räumliche Verteilung der Abnahme der Stammzahl pro Hektar um die betroffene Verjüngung; Versuchsfläche Biburg, motormanuelle Holzernte

5.1.2 Durchschnittliche Veränderung der mittleren Verjüngungshöhe

Die mittlere Höhe wird häufig zur Charakterisierung von Verjüngungen herangezogen. Durch den hiebsbedingten Ausfall einzelner Verjüngungspflanzen ergeben sich je Probekreis Veränderungen bei der mittleren Höhe. Analog zu den Veränderungen der Stammzahl wurde hier neben den durchschnittlichen mittleren Höhen der Probekreise vor und nach den Hieben auch die **durchschnittliche Veränderung der mittleren Verjüngungshöhe** berechnet, um die vertikale Heterogenität der Verjüngungen zu berücksichtigen (Tab. 40, S. 117).

Es fällt auf, dass auf den meisten Versuchsflächen eine Abnahme der mittleren Höhe zu verzeichnen war. Allerdings war auf vier der Flächen auch eine leichte Zunahme möglich, wenn man lediglich die unbeschädigten Verjüngungsbäume betrachtete. Insgesamt waren die Veränderungen auf den verschiedenen Flächen einander ähnlich. Bei den regulären Hieben war lediglich auf der Fläche Landshut 2 eine merklich größere Abnahme festzustellen. Und auch die Windwurffläche in Krumbach zeigte eine deutlich größere durchschnittliche Abnahme der mittleren Verjüngungshöhe als die anderen Versuchsflächen. Hier war ein durchschnittlicher Rückgang der mittleren Höhe von 25% bis 40% zu verzeichnen. Generell ist die Aussagekraft der durchschnittlichen Veränderung der mittleren Verjüngungshöhe für eine Bewertung der Verjüngungsschäden als gering einzuschätzen. Nur ein Bruchteil der Verjüngungspflanzen, die mit ihrer Höhe Eingang in die Berechnung finden, ist von tatsächlicher Bedeutung für die Entwicklung der Verjüngung.

Bewertung von Holzernteschäden an der Verjüngung

Tabelle 40: Mittlere Höhe vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Veränderung, jeweils im Durchschnitt der vorher verjüngten Probekreise

AV	Versuchsfläche	Ø mittlere Höhe [m]		Ø Veränderung [%]
		vorher	nachher	
MM	Schongau	86.8	84.2 - 86.9	- (4.7 - 13.9)
	Illertissen	91.4	86.1 - 92.3	-5.7 - +0.1
	Biburg	222.2	191.9 - 212.4	- (7.0 - 11.2)
	Schwabmünchen	150.6	136.4 - 142.4	- (0.4 - 4.0)
HM	Selb1	110.4	96.4 - 105.8	- (4.9 - 14.0)
	Selb2	91.6	83.4 - 87.5	- (5.6 - 10.7)
	Heigenbrücken1	73.9	59.4 - 69.1	- (6.6 - 13.9)
	Heigenbrücken2	75.7	63.6 - 76.8	-13.2 - +0.3
KO	Landshut1	82.2	64.9 - 76.7	- (9.8 - 20.0)
	Landshut2	69.6	62.7 - 67.8	- (3.5 - 12.0)
	Heigenbrücken3	63.6	56.3 - 67.0	-10.7 - +7.9
	Heigenbrücken4	93.5	87.3 - 96.0	-6.8 - +3.2
WW	Krumbach	125	73.8 - 95.8	- (25.5 - 38.9)

Die Abbildung 88 zeigt beispielhaft für die Versuchsfläche Biburg die räumliche Verteilung der Veränderungen der mittleren Verjüngungshöhe je Probekreis. Neben den Abnahmen der mittleren Höhen sind auch zahlreiche Zunahmen erkennbar.

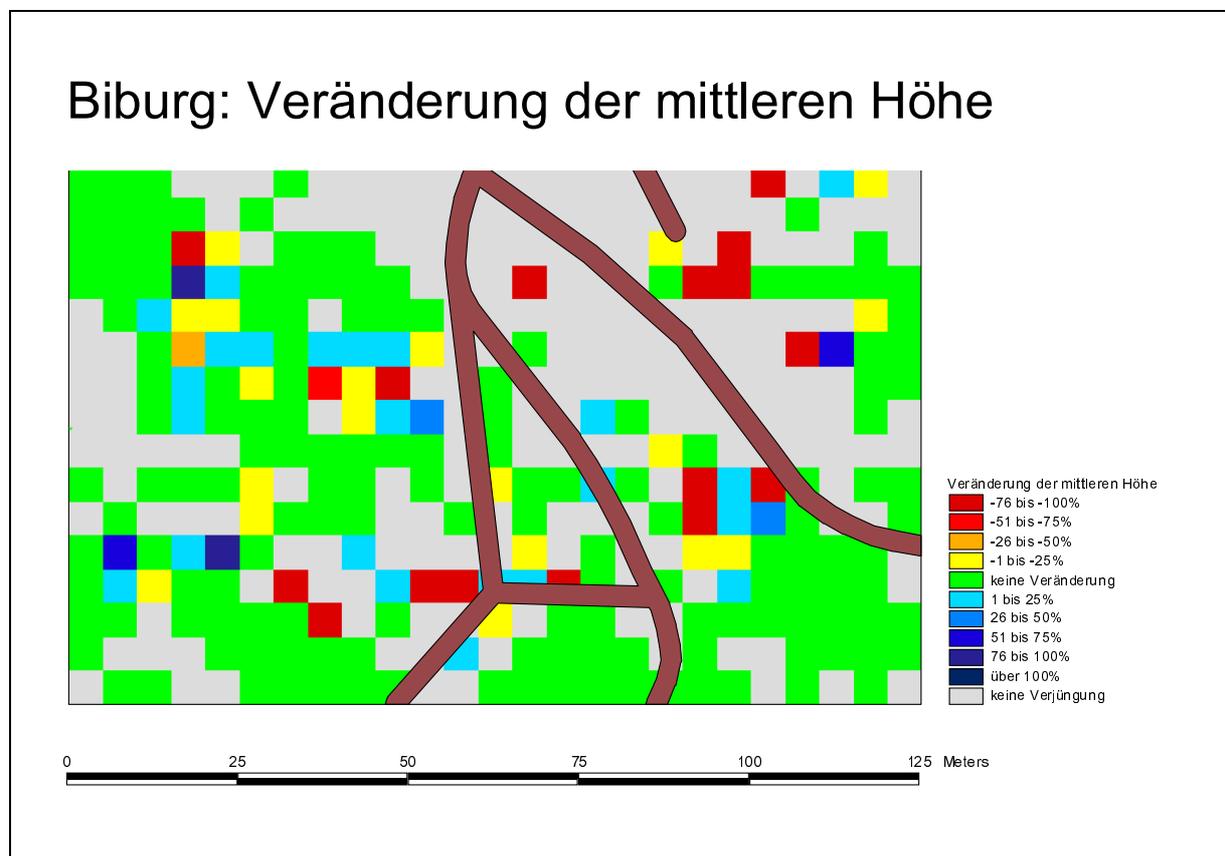


Abbildung 88: Räumliche Verteilung der Veränderung der mittleren Höhe je Probekreis; Versuchsfläche Biburg, motormanuelle Holzernte

5.1.3 Durchschnittliche Abnahme der maximalen Verjüngungshöhe

Die maximale Höhe der Verjüngung ist von besonderem Interesse, da es die höchsten Bäume der Verjüngung sind, die die besten Chancen haben, den zukünftigen Altbestand zu bilden. Daher wurden als Kennziffern für die hiebsbedingten Veränderungen an der Verjüngung die durchschnittlichen maximalen Höhen vor und nach den Hieben berechnet. Noch besser geeignet als Indikator für Zuwachsverluste (und damit Zeitverluste) erscheint die **durchschnittliche Abnahme der maximalen Verjüngungshöhe** (Tab. 41). In die Berechnungen gingen alle Probekreise ein, die vor dem Hieb Verjüngung aufwiesen.

Tabelle 41: Maximale Höhe vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Abnahme, jeweils im Durchschnitt der vorher verjüngten Probekreise

AV	Versuchsfläche	Ø maximale Höhe [m]		Ø Abnahme [%]
		vorher	nachher	
MM	Schongau	155.2	147.7 - 151.0	4.6 - 7.0
	Illertissen	197.4	175.3 - 189.7	6.4 - 12.2
	Biburg	311.7	263.5 - 291.5	7.8 - 16.9
	Schwabmünchen	242.9	215.1 - 223.5	10.3 - 14.2
HM	Selb1	182.2	152.6 - 170.8	10.2 - 23.2
	Selb2	158.7	137.5 - 149.9	9.8 - 16.9
	Heigenbrücken1	162.8	123.4 - 149.3	11.9 - 27.7
	Heigenbrücken2	139.2	106.0 - 130.1	9.0 - 27.5
KO	Landshut1	121.3	88.2 - 106.6	15.9 - 29.4
	Landshut2	102.6	86.7 - 97.2	8.5 - 20.7
	Heigenbrücken3	162.6	120.4 - 155.3	7.3 - 26.0
	Heigenbrücken4	191.1	153.9 - 179.1	9.0 - 21.2
WW	Krumbach	214.3	111.7 - 145.3	37.1 - 49.7

Bei den regulären Hieben beträgt die durchschnittliche Abnahme der maximalen Verjüngungshöhe bei Berücksichtigung aller nachher vorhandenen Verjüngungsbäume zwischen 5% und 16%. Berücksichtigt man lediglich die nachher unbeschädigten Bäume, so beträgt die durchschnittliche Abnahme zwischen 7% und 29%. Wie bei den Stammzahlreduktionen schneiden auch hier die motormanuell bearbeiteten Flächen in der Regel am besten ab.

Auf der Windwurffläche in Krumbach beträgt die durchschnittliche Abnahme der maximalen Verjüngungshöhe sogar 50%, wenn man lediglich die nachher unbeschädigte Verjüngung betrachtet.

Die räumliche Verteilung des Rückgangs der maximalen Höhe der Verjüngung auf der Versuchsfläche Biburg wird in Abbildung 89 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Veränderungen der maximalen Höhe sich auf einem kleinen Teil der Versuchsfläche abspielen. Lediglich bei 37 der 217 vor dem Hieb verjüngten Probekreise ändert sich die maximale Höhe. Dies entspricht 17% der verjüngten und 9% der gesamten Bestandesfläche.

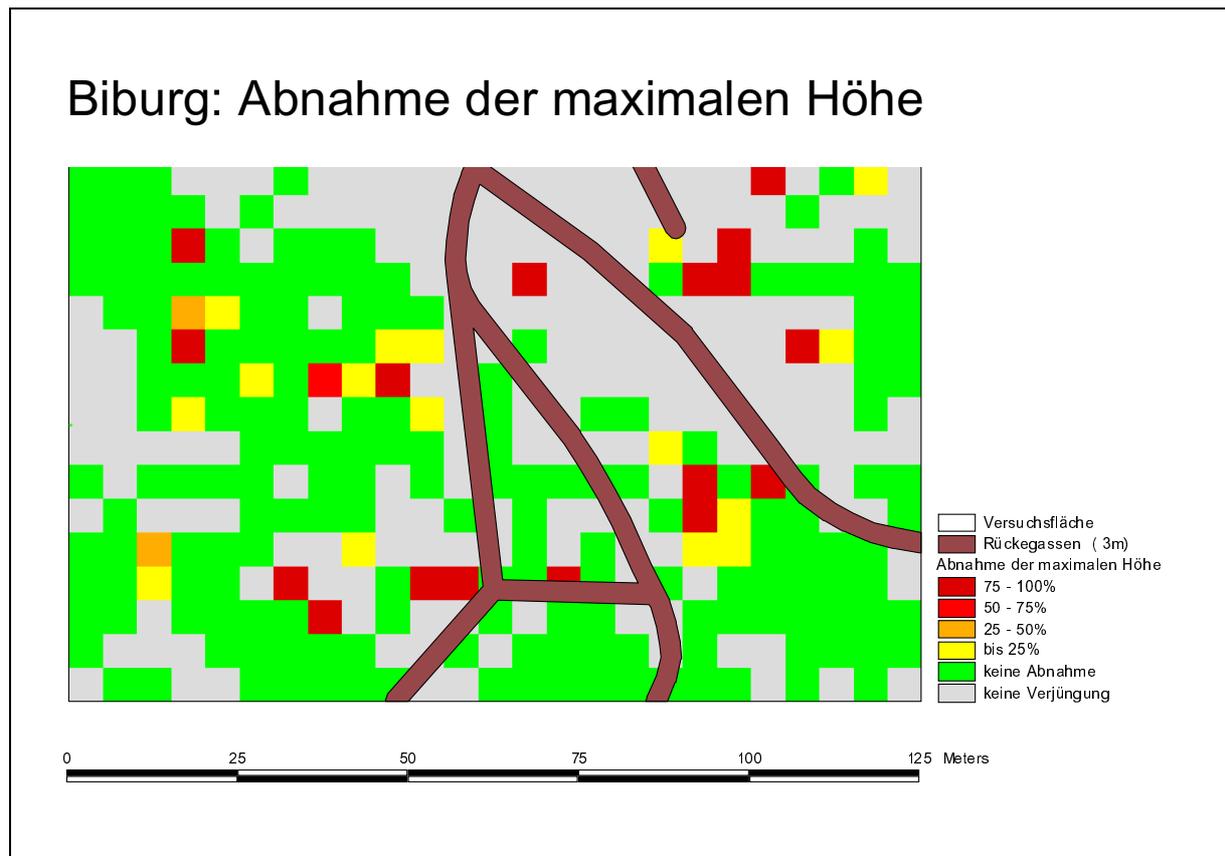


Abbildung 89: Räumliche Verteilung der Abnahme der maximalen Höhe je Probekreis; Versuchsfläche Biburg, motormanuelle Holzernte

5.1.4 Veränderung der Baumartenanteile

Neben der reinen Vernichtung von Verjüngung oder der Höhenreduktion können auch **Entmischungseffekte** zu den Schäden an Verjüngungen zählen.

Tabelle 42: Anteile der Baumart Fichte an der Verjüngung vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Veränderung

AV	Versuchsfläche	Anteil Fichte [%]		Veränderung [%]
		vorher	nachher	
MM	Schongau	11.7	11.7 - 11.9	+ (0.1 - 1.5)
	Illertissen	60.0	59.1 - 59.3	- (1.0 - 1.4)
	Biburg	1.1	1.2 - 1.3	+ (17.1 - 26.7)
	Schwabmünchen	8.2	8.5 - 8.6	+ (3.4 - 4.8)
HM	Heigenbrücken1	95.6	96.0 - 96.8	+ (0.4 - 1.2)
	Heigenbrücken2	78.2	80.2 - 82.3	+ (2.5 - 5.2)
KO	Landshut1	70.2	64.9 - 68.3	- (2.8 - 7.5)
	Landshut2	75.4	70.5 - 72.3	- (4.1 - 6.5)
	Heigenbrücken3	98.2	97.6 - 98.2	-0.6 - +0.1
	Heigenbrücken4	96.4	95.8 - 96.8	-0.6 - +0.4
WW	Krumbach	62.0	65.5 - 68.4	+ (5.6 - 10.3)

Die Tabellen 42 (S. 119) bzw. 43 geben die Baumartenanteile sowie ihre Veränderung für Fichte bzw. Buche in der Verjüngung wieder. Die Versuchsflächen in Selb wurden dabei nicht berücksichtigt, da dort die Verjüngung fast ausschließlich aus Fichten bestand. Daneben wurden die Landshuter Flächen bei Betrachtung der Buchenanteile nicht dargestellt, da der Buchenanteil hier unter einem Prozent lag. Die Veränderungen der Fichtenanteile auf den Versuchsflächen (Tab. 42) sind wenig einheitlich. Deutliche Veränderungen treten lediglich in Biburg auf, wo wenige Fichten konzentriert in einem Bestandesteil standen, der vom Hieb nicht betroffen wurde. Auch bei der Windwurffläche ist eine deutliche Zunahme des Fichtenanteils festzustellen.

Tabelle 43: Anteile der Baumart Buche an der Verjüngung vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Veränderung

AV	Versuchsfläche	Anteil Buche [%]		Veränderung [%]
		vorher	nachher	
MM	Schongau	87.9	87.7 - 87.9	- (0 - 0.2)
	Illertissen	39.8	40.5 - 40.8	+ (1.7 - 2.3)
	Biburg	97.4	97.0 - 97.1	- (0.3 - 0.4)
	Schwabmünchen	89.8	89.5 - 89.6	- (0.2 - 0.3)
HM	Heigenbrücken1	3.0	2.7 - 3.1	-9.0 - +3.7
	Heigenbrücken2	1.4	1.6 - 1.7	+ (19.3 - 25.2)
KO	Heigenbrücken3	1.2	1.4 - 1.6	+ (11.4 - 31.7)
	Heigenbrücken4	1.1	1.3 - 1.7	+ (15.3 - 50.5)
WW	Krumbach	36.3	31.2 - 33.6	- (7.5 - 14.3)

Der Anteil der Buche an der Verjüngung (Tab. 43) nimmt auf der Windwurffläche in Krumbach dagegen merklich ab. Offensichtlich wurde hier die Buche deutlich stärker betroffen als die Fichte. Auf den anderen Versuchsflächen dagegen findet sich kein nennenswerter Rückgang des Buchenanteils. Auf den Versuchsflächen zwei bis vier in Heigenbrücken dagegen ist sogar ein deutlicher Anstieg des Buchenanteils zu verzeichnen. Allerdings waren auf diesen Flächen vor dem Hieb Buchen nur sehr spärlich an der Verjüngung beteiligt.

5.1.5 Veränderung des Varianz-Mittelwert-Index

Der Varianz-Mittelwert-Index (auch relative Varianz oder Dispersionskoeffizient) ist nach PRETZSCH (2001) ein geeignetes Maß für die Charakterisierung der **Verteilung von Verjüngungspflanzen**. Er basiert auf den in den einzelnen Probekreisen ermittelten Pflanzenzahlen. Die Varianz der Pflanzenzahlen je Probekreis wird ins Verhältnis zur mittleren Pflanzenzahl je Probekreis gesetzt. Sind Varianz und mittlere Pflanzenzahl gleich und damit der Varianz-Mittelwert-Index gleich 1, so liegt eine zufällige Verteilung der Verjüngung vor. Werte unter 1 zeigen regelmäßige Verteilungen an, während Werte über 1 Klumpungen bedeuten. Bei sehr hohen Werten kommen also viele Probekreise mit sehr hohen und sehr niedrigen Pflanzenzahlen vor. Die Verjüngung ist dann bezüglich der horizontalen Verteilung sehr heterogen. Bei Naturverjüngungen sind in aller Regel Werte deutlich über 1 zu erwarten.

Tabelle 44 zeigt die Varianz-Mittelwert-Indices für die Versuchsflächen vor und nach den Holzerntemaßnahmen. Daneben wird die prozentuale Veränderung der Indices angegeben.

Tabelle 44: Varianz-Mittelwert-Indices vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Veränderung

AV	Versuchsfläche	Varianz-Mittelwert-Index		Veränderung [%]
		vorher	nachher	
MM	Schongau	11.2	11.5 - 11.8	+ (2.7 - 5.4)
	Illertissen	13.8	14.8 - 15.4	+ (7.2 - 11.6)
	Biburg	9.3	7.8 - 8.0	- (14.0 - 16.1)
	Schwabmünchen	10.5	10.1 - 10.4	- (1.0 - 3.8)
HM	Selb1	40.2	32.8 - 38.7	- (3.7 - 18.4)
	Selb2	45.7	42.1 - 45.8	-7.9 - +0.2
	Heigenbrücken1	45.0	40.3 - 41.2	- (8.4 - 10.4)
	Heigenbrücken2	12.5	14.0 - 15.7	+ (12.0 - 25.6)
KO	Landshut1	8.8	9.9 - 11.1	+ (12.5 - 26.1)
	Landshut2	6.7	7.6 - 7.8	+ (13.4 - 16.4)
	Heigenbrücken3	42.9	44.8 - 45.6	+ (4.4 - 6.3)
	Heigenbrücken4	45.5	23.2 - 24.8	- (45.5 - 49.0)
WW	Krumbach	9.7	10.6 - 11.4	+ (9.3 - 17.5)

Auf allen Versuchsflächen beträgt der Varianz-Mittelwert-Index vor den Hieben deutlich über 1. Besonders heterogen ist die Verteilung der Verjüngungsbäume in Heigenbrücken und Selb.

Bei der Veränderung der Indices durch die Holzernte gibt es sowohl Zu- als auch Abnahmen. Zumeist scheinen sehr hohe Indices vorher durch die Holzernte abzunehmen (Selb 1 und 2, Heigenbrücken 1 und 4), während vergleichsweise niedrige Indices vorher durch die Holzernte eher zunehmen (Schongau, Illertissen, Heigenbrücken 2, Landshut 1 und 2, Krumbach). Eher homogene Verjüngungen werden also möglicherweise durch Holzerntemaßnahmen heterogener, während stark heterogene Verjüngungen durch einen Hieb etwas homogener werden.

5.2 Verjüngungsfreie Bestandesfläche

Von besonderem Interesse bei der Beurteilung der Verjüngung eines Bestandes sind die **Bereiche ohne Verjüngungsbäume**, da hier der Erfolg des Verjüngungsverfahrens fraglich ist. Die verjüngungsfreien Bereiche sollten daher natürlich möglichst wenig Anteil an der Bestandesfläche haben und der einzelne Bereich sollte möglichst klein sein.

Mit Hilfe des GIS-Programms ArcView wurden für die einzelnen Versuchsflächen die verjüngungsfreien Bereiche vor und nach dem Hieb ermittelt. Dabei wurden die Stammzahlen für den einzelnen Probekreis interpoliert, wodurch die in Abbildung 90 für die Versuchsfläche Biburg exemplarisch dargestellten Bereiche ohne Verjüngung entstanden. Diese stimmen sicher nicht vollständig mit der Realität überein. Die berechneten Veränderungen der verjüngungsfreien Bereiche allerdings sind für Vergleiche der verschiedenen Versuchsflächen gut brauchbar.

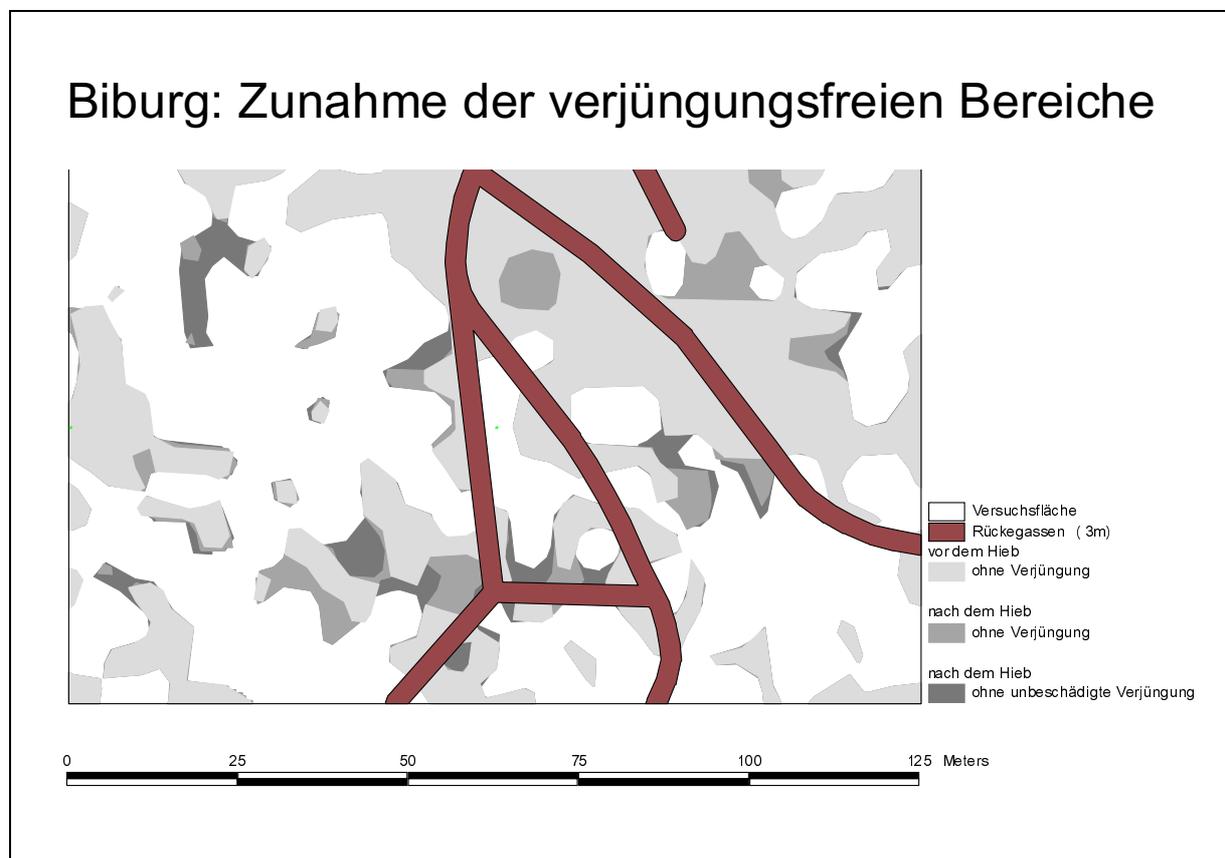


Abbildung 90: Verjüngungsfreie Bereiche vor und nach dem Hieb; Versuchsfläche Biburg, motormanuelle Holzernte

Die hellgrauen Flächen geben die verjüngungsfreien Bereiche vor dem Hieb wieder. Sie stimmen mit den Bereichen ohne Verjüngung der Abbildungen aus Kapitel 3.1 überein. Die mittelgrauen Flächen sind durch den Hieb zusätzlich entstandene Bereiche ohne Verjüngung. Die dunkelgrauen Flächen schließlich sind zusätzlich durch den Hieb entstandene Bereiche ohne unbeschädigte Verjüngung. Auch hier wird also der Ergebnisbereich deutlich, der durch das fehlende Wissen über die Entwicklung der einzelnen Schadensarten entsteht.

Die Zunahme der verjüngungsfreien Bestandesfläche auf den Versuchsflächen wird in Tabelle 45 dargestellt.

Bewertung von Holzernteschäden an der Verjüngung

Tabelle 45: Anteile verjüngungsfreier Bestandesfläche vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Zunahme

AV	Versuchsfläche	verjüngungsfreie Bestandesfläche [%]		Zunahme [%]
		vorher	nachher	
MM	Schongau	7	10 - 11	39 - 50
	Illertissen	14	17 - 19	26 - 36
	Biburg	38	42 - 45	11 - 20
	Schwabmünchen	22	27 - 29	25 - 32
HM	Selb1	15	19 - 25	26 - 64
	Selb2	22	24 - 25	13 - 17
	Heigenbrücken1	17	19 - 23	14 - 41
	Heigenbrücken2	11	17 - 27	46 - 132
KO	Landshut1	28	35 - 42	26 - 50
	Landshut2	17	22 - 28	28 - 62
	Heigenbrücken3	8	11 - 14	29 - 66
	Heigenbrücken4	4	7 - 9	84 - 124
WW	Krumbach	24	45 - 52	93 - 120

Besonders deutlich wird die Zunahme der Bereiche ohne Verjüngung bei den Versuchsflächen Heigenbrücken 2 und 4 sowie auf der Windwurffläche Krumbach. Bei den motormanuell bearbeiteten Flächen ist die Zunahme insgesamt eher gering, am deutlichsten noch bei der Versuchsfläche Schongau. Bei den hochmechanisierten Verfahren ist die Zunahme etwas größer als bei den motormanuellen Verfahren, allerdings etwas kleiner als bei den kombinierten Verfahren.

Tabelle 46: Mittlere Flächengrößen der verjüngungsfreien Bereiche vor und nach den Hieben sowie deren prozentuale Zunahme

AV	Versuchsfläche	mittlere Flächengröße		Zunahme [%]
		vorher	nachher	
MM	Schongau	19	27 - 32	42 - 68
	Illertissen	60	82 - 85	37 - 42
	Biburg	145	181 - 251	25 - 73
	Schwabmünchen	60	97 - 115	62 - 92
HM	Selb1	22	34 - 62	55 - 182
	Selb2	36	44 - 49	22 - 36
	Heigenbrücken1	32	39 - 64	22 - 100
	Heigenbrücken2	22	32 - 83	45 - 277
KO	Landshut1	63	124 - 130	97 - 106
	Landshut2	39	55 - 116	41 - 197
	Heigenbrücken3	17	24 - 31	41 - 82
	Heigenbrücken4	11	13 - 16	18 - 45
WW	Krumbach	67	266 - 518	297 - 673

Neben dem Anteil verjüngungsfreier Bestandesfläche ist vor allem auch die mittlere Größe einer Teilfläche ohne Verjüngung von Interesse. Je größer eine verjüngungsfreie Teilfläche ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie bis zum Ende des Verjüngungszeitraums nicht ausreichend bestockt ist und somit möglicherweise sogar nachgepflanzt werden muss.

Tabelle 46 (S. 123) zeigt die mit ArcView ermittelten mittleren Flächengrößen ohne Verjüngung vor und nach den Hieben sowie deren Zunahme in Prozent. Die Zunahme der mittleren Flächengröße ist auf der Windwurffläche Krumbach mit knapp 300% bis fast 700% am deutlichsten. Aber auch die Flächen Selb 1, Heigenbrücken 2 und Landshut 2 weisen deutliche Zunahmen auf.

Es zeigt sich aber auch, dass die Zunahme der mittleren verjüngungsfreien Flächengröße bei allen Versuchsflächen deutlich über der Zunahme des Anteils verjüngungsfreier Bestandesfläche liegt. Offensichtlich werden im Zuge der Holzerntemaßnahmen ohnehin verjüngungsfreie Bereiche stark vergrößert. Dies liegt zum einen sicher an der Konzentration der Schäden an den Rückegassen, zum anderen werden (zumindest bei der motormanuellen Holzernte) auch Bäume in (vermeintlich) verjüngungsfreie Bereiche gefällt, die dadurch vergrößert werden.

5.3 Verfahren zur Bewertung von Wildschäden

5.3.1 Wild- und Holzernteschäden

Mit den Verfahren zur Bewertung von Wildschäden existieren bereits eine Reihe von Methoden, mit deren Hilfe Schäden an Bäumen in der Praxis bewertet werden. An Verjüngungspflanzen tritt dabei vor allem Verbiss auf, während sich Schältschäden eher an älteren Bäumen finden. Daher erscheint grundsätzlich die Anwendung eines geeigneten Verfahrens der Verbissbewertung auch zur Ermittlung und Bewertung von Holzernteschäden an Verjüngungsbäumen möglich. Die **Gemeinsamkeiten** der Bewertung von Verbiss- und Holzernteschäden an Verjüngung gehen dabei über das identische Bewertungsobjekt hinaus. So sind auch die Voraussetzungen für einen Schaden auf Bestandesebene identisch, denn in beiden Fällen kommt es auf die Verteilung und Dichte von unbeschädigten Verjüngungsbäumen an.

Die Übertragung von Verfahren zur Wildschadensbewertung auf Holzernteschäden ist jedoch auch mit einigen Problemen behaftet. Ein Grund hierfür sind deutliche **Unterschiede** zwischen Holzernteschäden und Verbisschäden:

- Das **zeitliche Auftreten** von Holzernteschäden ist zwangsläufig auf den Holzeinschlag beschränkt. Ihr Eintreten ist damit im Gegensatz zu Wildschäden zeitlich genau bestimmbar. Die Schadenshöhe ist dabei wesentlich von der Eingriffsstärke abhängig.
- Bei Holzernteschäden gibt es keine **Verjüngungshöhe**, ab der Bäume nicht mehr gefährdet sind. Bei Verbisschäden hingegen entwächst die Verjüngung ab einer bestimmten Höhe (ca. 1,3m) dem Äser.
- Durch den selektiven Wildverbiss kann es zu **Entmischungseffekten** kommen, während die eher geringen Unterschiede zwischen den Schadenswahrscheinlichkeiten der Baumarten keine derartigen Effekte bei der Holzernte vermuten lassen (siehe Kap. 5.2.1.4).
- Bei der Holzernte findet sich eine **Konzentration der Schäden** an den Rückegassen. Dies ist bei Wildschäden eindeutig nicht der Fall.
- Die auftretenden **Schadensarten** unterscheiden sich deutlich. Wild verbeißt entweder den Terminaltrieb oder Seitenäste, andere Schadensarten kommen nicht vor. Verbisschäden gefährden daher das Leben eines Bäumchens nur in Extremfällen. Demgegenüber bedeutet die Schadensart „fehlend“ bei Holzernteschäden immer den Ausfall der betroffenen Bäume. Mit Ausnahme des Jahrtriebbruches hängt bei den anderen Schadensarten die Überlebenschance des beschädigten Verjüngungsbaums sehr von der Ausprägung des Schadens ab.

5.3.2 Bestehende Verfahren der Wildschadensbewertung

Bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens wurde darauf geachtet, dass dieses die **räumliche Verteilung der unbeschädigten Verjüngung** im Bestand berücksichtigt. Verfahren, die lediglich Schadprozent oder die Anzahl verbissener Pflanzen ermitteln (z.B. POLLANSCHÜTZ 1995), schieden deshalb von vornherein aus. Auch das Verfahren von KROTH et al. (1985), das zur Bewertung das tatsächliche mit dem wirtschaftlichen Alter der Verjüngung vergleicht, kam nicht in Betracht.

Als geeignet hingegen erschienen das Bewertungssystem von MOOG und SCHALLER (2002) sowie das an der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg entwickelte Bewertungskonzept von BURGHARDT et al. (2003). Beide Verfahren beziehen auf unterschiedliche Art sowohl die **Dichte** als auch die **räumliche Verteilung** der unbeschädigten Verjüngungspflanzen mit in die Bewertung ein.

Das Verfahren nach MOOG und SCHALLER wurde in Anlehnung an das Stammabstandsverfahren der Forstinventur entwickelt. Die Schadenshöhe ist dabei abhängig vom Abstand einer verbissenen Pflanze zur nächsten unverbissenen Pflanze (alternativ auch zu den zwei nächsten unverbissenen Pflanzen). Der Dichte der unverbissenen Verjüngung wird damit automatisch Rechnung getragen. Da die nächste unverbissene Pflanze in der Lage sein muss, die verbissene zu ersetzen, wird gefordert, dass diese mindestens die gleiche Höhe wie die geschädigte Pflanze haben muss. Als Aufnahmeverfahren schlagen MOOG und SCHALLER das Prinzip der Rasterstichprobe vor. Entlang von Geraden, die sich in einer vorgegeben Entfernung parallel durch die Verjüngung ziehen, werden in definierten Abständen Rasterpunkte festgelegt. Um diese Rasterpunkte werden Probekreise einer bestimmten Größe gelegt. Zum weiteren Vorgehen machen MOOG und SCHALLER mehrere Vorschläge. Sie reichen von der Berücksichtigung aller verbissenen Pflanzen innerhalb des Probekreises bis hin zur Aufnahme von lediglich ein oder zwei verbissenen Pflanzen mit der geringsten Entfernung zum Probekreismittelpunkt. Unabhängig von der berücksichtigten Pflanzenzahl wird immer der Abstand von jeder verbissenen Pflanze zur nächsten unverbissenen gemessen. Bei Überschreiten einer bestimmten Grenzentfernung wird ein Schaden angenommen. Konkrete Vorschläge zu Grenzabständen oder Probekreisgrößen machen MOOG und SCHALLER nicht. Viele Angaben sind eher vage gehalten. Das Verfahren scheint daher noch nicht vollends entwickelt zu sein. Allerdings war eine Anwendung auf die vorgestellten Versuchsflächen auch grundsätzlich nicht möglich, weil die Abstände der beschädigten Pflanzen zu den nächsten unverbissenen Pflanzen nicht nachträglich ermittelt werden konnten. Die notwendigen Informationen waren in den erhobenen Daten nicht enthalten.

Das zweite Verfahren, das für eine Anwendung in Betracht kam, wurde speziell für Aufnahmen in Naturverjüngungen entwickelt und ist daher an deren Eigenheiten angepasst. BURGHARDT et al. (2003) sehen diese in den unterschiedlichen **Pflanzenhöhen**, den zum Teil extrem hohen **Pflanzenzahlen** und der ungleichmäßigen **Verteilung**. Die Kernfrage bei der Bewertung von Verbisschäden ist für BURGHARDT et al., ob genügend unverbissene Pflanzen der waldbaulich gewünschten Baumarten in der richtigen Verteilung und in der angestrebten Höhenrelation auf der Fläche vorhanden sind, um das waldbauliche Ziel zu erreichen. Das Verfahren basiert auf Mindest- und Soll-Pflanzenzahlen für einzelne Probekreise und wird im folgenden Kapitel genauer dargestellt.

5.3.3 Das Verfahren der FVA Baden-Württemberg

Für eine Bewertung halten BURGHARDT et al. es für notwendig, eine „Anzahl von Bäumen zu definieren, die notwendig ist, um ein vom Waldbesitzer definiertes waldbauliches Ziel quantitativ und qualitativ zu erreichen“. Die geforderten Baumzahlen wurden in Soll-Werten festgeschrieben. Um auf die räumliche Verteilung der Verjüngungspflanzen zu achten, wurden probekreisbezogene Soll-Werte festgelegt. Hektarbezogene Werte, wie bisher üblich, erschienen „wenig praxistauglich, da diese die extrem ungleiche Verteilung der Pflanzen auf der Fläche nicht berücksichtigen“ (BURGHARDT et al. 2003). Weiterhin wurde auch die Höhe der Verjüngungspflanzen mit in die Überlegungen einbezogen, indem die Soll-Werte nach der Höhenstufe gewichtet wurden. Basis hierfür waren die Arbeiten von REINEKE (1933) und eigene Messungen von BURGHARDT et al. Den Untersuchungen zufolge besteht eine strenge Korrelation zwischen der Baumhöhe und dem Standraum, also der Baumzahl pro Hektar. Auf die Soll-Pflanzenzahlen übertragen bedeutet dies, dass die geforderte Zahl mit zunehmender Verjüngungshöhe immer weiter abnehmen muss. In Ergänzung dazu wurden auch Mindestpflanzenzahlen bestimmt. Nach BURGHARDT et al. gelten Probekreise, die die Mindestpflanzenzahlkriterien nicht erreichen, als nicht verjüngt. Sie sind damit nicht schadensfähig und werden nicht bewertet. Die Soll-Werte und Mindestpflanzenzahlen sind in Tabelle 47 zusammengestellt.

Tabelle 47: Mindestpflanzenzahlen und Soll-Werte für verschiedene Baumarten (nach BURGHARDT et al. 2003)

		Höhenstufen		
		10-20cm	21-50cm	51-130cm
Nadelbäume (Fi, Ta, Dou, Lä)	Soll-Wert	12	6	3
	Mindestpflanzenzahl	4	2	1
Buche	Soll-Wert	40	20	10
	Mindestpflanzenzahl	8	4	2
Sonstige Laubbäume	Soll-Wert	20	10	5
	Mindestpflanzenzahl	4	2	1

Für die Erhebungen verwenden BURGHARDT et al. streng systematisch verteilte Probekreise. Die Anzahl der Probekreise richtet sich dabei nach der Flächegröße und der geschätzten Pflanzendichte pro Hektar. BURGHARDT et al. halten eine Probekreisgröße von 10m² (Radius 1,79m) für ideal. Bei den Aufnahmen werden ausschließlich Baumarten berücksichtigt, die waldbaulich gewünscht sind. **Die Bewertung erfolgt probekreisweise und getrennt nach Baumarten, wobei nur Leittriebverbiss untersucht wird.** Das Grundprinzip der Bewertung besteht darin, die Ist-Zahl unverbissener Pflanzen mit der Soll-Zahl zu vergleichen. Es werden fünf Schadklassen unterschieden:

- Schadklasse 0: kein Schaden
- Schadklasse 1: 1-25% Schaden
- Schadklasse 2: 26-50% Schaden
- Schadklasse 3: 51-75% Schaden
- Schadklasse 4: 76-100% Schaden

Die Einteilung in die verschiedenen Schadklassen erfolgt nach folgenden Regeln: Befinden sich mindestens so viele unverbissene Pflanzen im Probekreis, wie durch den waldbaulichen Soll-Wert gefordert ist, so gilt der Probekreis als unbeschädigt und gehört damit der Schadklasse 0 an. Sind demgegenüber alle Pflanzen in einem Probekreis verbissen, so liegt Schadklasse 4 vor. Dazwischen ist entscheidend, welchen Anteil die verbissenen Pflanzen an der Gesamtpflanzenzahl im Probekreis haben. Die Sollpflanzenzahl dient dabei als Maximum, das an Pflanzen in einem Probekreis aufgenommen wird. Je nach dem, wie viel Prozent der Verjüngungspflanzen verbissen sind, werden die Probekreise entsprechend der obigen Aufstellung den verschiedenen Schadklassen zugeteilt.

Zur konkreten Bewertung der einzelnen Probekreise wird zunächst anhand der **Mindestpflanzenzahl** geprüft, ob der Probekreis verjüngt ist. Ist dies der Fall, so wird mit der eigentlichen Bewertung begonnen. Dazu wird die **Oberhöhe** der betrachteten Baumart im Probekreis bestimmt. Hierzu muss festgestellt werden, welcher Höhenstufe die höchsten Bäume des Probekreises angehören. BURGHARDT et al. unterscheiden derer drei: 10-20cm, 21-50cm, 51-130cm. Die Betrachtung der höchsten Verjüngungsbäume ist deswegen sinnvoll, weil diese den zukünftigen Bestand verkörpern und damit auch die entscheidenden Zuwachsträger sind. Als Nächstes werden nun die unverbissenen Pflanzen in der zu betrachtenden Höhenstufe gezählt. Ist die Anzahl mindestens so groß wie die **Soll-Pflanzenzahl**, so wird die Probefläche als nicht beschädigt eingestuft. Es spielt dabei keine Rolle, wie viele verbissene Bäumchen vorhanden sind. Ist die Zahl der unverbissenen Pflanzen kleiner als der Soll-Wert, so müssen auch die verbissenen Bäumchen gezählt werden. Maximal werden nur so viele Pflanzen aufgenommen, wie die Soll-Pflanzenzahl vorgibt. Die Schadklasse des Probekreises ergibt sich nach der oben beschriebenen Vorgehensweise aus dem Anteil der verbissenen Pflanzen an der Gesamtzahl der aufgenommenen Bäumchen. Diese Form der Bewertung wird für alle zu bewertenden Baumarten und alle Probekreise wiederholt. Nach Abschluss der Aufnahmen wird für die Gesamtfläche getrennt nach Baumarten eine mittlere Schadklasse errechnet. Diese ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der Schadklassen über alle Probekreise.

Abgeschlossen wird die Wildschadensbewertung mit der Umrechnung in einen Schadensbetrag in Euro pro Hektar und Jahr. Als Berechnungsgrundlage dienen durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge der wichtigsten Baumarten und Standorte. Für eine schnelle, praxisnahe Bewertung wurden die exakten Werte auf Werte für Nadelholz (470€/ha*Jahr) und Laubholz (170€/ha*Jahr) reduziert. Bei der Errechnung des Schadensbetrages wurde angenommen, dass ein vollständiger Leittriebverbiss zu einem Zuwachsverlust von einem Jahr führt. Der maximale Schadensbetrag wurde daher mit dem durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeitrag gleichgesetzt. „Zur Berechnung des Schadensbetrags pro Hektar pro Baumart wird der jeweilige Maximalschadensbetrag durch vier geteilt (= vier Schadklassen) und mit der durchschnittlichen Schadklasse multipliziert“ (BURGHARDT et al. 2003). Danach muss der Schadensbetrag pro Baumart mit der bewerteten Fläche multipliziert werden. Ausschließlich der Anteil an der Gesamtfläche, der auch bezüglich der Baumart als verjüngt eingestuft wurde, wird hier berücksichtigt. Die Schadensbeträge für die einzelnen Baumarten sind nun ermittelt.

Die einzelnen baumartenbezogenen Schadensbeträge werden entsprechend dem Anteil der Baumart im Verjüngungsziel gewichtet. Der Baumartenanteil im Verjüngungsziel darf den tatsächlichen Anteil dabei nicht überschreiten. Addiert man nun alle gewichteten baumartenbezogenen Schadensbeträge auf, so erhält man den Schadensbetrag über alle Baumarten pro Hektar und Jahr.

5.3.4 Anwendung des Verfahrens auf die Versuchsflächen

Bei der Anwendung des Verfahrens zur Ermittlung der Holzernteschäden auf den untersuchten Versuchsflächen mussten die bestehenden Probekreisverteilungen und Probekreisgrößen übernommen werden. Um die Größe der kleinen Probekreise (0,5m²) an die der großen Probekreise (2,5m²) anzupassen, wurden die Verjüngungsbäume in den kleinen Probekreisen fünffach gewichtet.

Die erste Anpassung des Bewertungsverfahrens selbst erfolgte mit Umrechnung der Soll-Werte und Mindestpflanzanzahlen auf die verwendeten kleineren Probekreise. Die Angaben von BURGHARDT et al. (2003), die sich auf Probekreisgrößen von 10m² bezogen, wurden hierzu durch vier geteilt und auf ganze Werte gerundet. Bei Werten unter 1 (0,25, 0,5 und 0,75) wurde einheitlich von Soll- oder Mindest-Werten von einer Pflanze ausgegangen, um eine sinnvolle Bewertung zu ermöglichen. Die angepassten **Mindest- und Sollpflanzanzahlen** sind in Tabelle 48 zusammengestellt. Weiterhin wurden alle Arten von Holzernteschäden einem Schaden im Sinne des Bewertungsverfahrens gleichgesetzt. Es wurden somit keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Schadensarten gemacht. Bei der Umsetzung konnte ein Baum daher lediglich **beschädigt oder unbeschädigt** sein.

Die Höhenstufe 10-20cm wurde nicht berücksichtigt, da bei den Aufnahmen zu den Holzernteschäden Pflanzen erst ab einer Höhe von 20cm aufgenommen wurden. Die Höhenstufe 51-130cm wurde auf 51-800cm erweitert.

Tabelle 48: Angepasste Mindestpflanzanzahlen und Soll-Werte für verschiedene Baumarten

		Höhenstufen	
		21-50cm	51-800cm
Nadelbäume (Fi, Ta, Dou, Lä)	Soll-Wert	2	1
	Mindestpflanzanzahl	1	1
Buche	Soll-Wert	5	3
	Mindestpflanzanzahl	1	1
Sonstige Laubbäume	Soll-Wert	3	1
	Mindestpflanzanzahl	1	1

Weil die Bewertung in erster Linie waldbaulicher Natur ist, wird auf die Berechnung eines Schadensbetrages verzichtet. Zudem unterscheiden sich Holzernteschäden stark von Verbisschäden. Bei Holzernteschäden kann nur im Fall eines Jahrtriebbruches von verbissähnlichen Auswirkungen ausgegangen werden. Alle anderen Formen der Beschädigung können mit Verbisschäden nicht gleichgesetzt werden. Die Annahme, dass ein Schaden lediglich eine Wuchsverzögerung um ein Jahr bewirkt, ist bei Holzernteschäden deswegen nicht haltbar. Die maximalen Schadensbeträge vom BURGHARDT et al. beruhen allerdings genau auf dieser Annahme.

Um die durchschnittlichen Schadklassen der Baumarten zu einer durchschnittlichen Schadklasse zusammenführen, wurden die Einzelwerte zuletzt noch gemittelt. Die Baumarten wurden dabei ihrem Anteil an der Verjüngung entsprechend gewichtet, da keine Zahlen zu den Verjüngungszielen vorlagen.

Die Ergebnisse des abgeänderten Bewertungsverfahrens sind in Tabelle 49 aufgeführt.

Tabelle 49: Schadklasse nach dem modifizierten Verfahren der FVA Baden-Württemberg

AV	Versuchsfläche	Schadklassen				
		Fichte	Buche	Tanne	Strobe	GESAMT
MM	Schongau	0.38	0.94	0	0	0.87
	Illertissen	0.64	1.49	0	0	0.99
	Biburg	0	1.67	0	0	1.67
	Schwabmünchen	0.67	1.17	0	0	1.13
HM	Selb1	0.88	0	0	0	0.88
	Selb2	0.65	0	0	0	0.65
	Heigenbrücken1	1.14	0	0	0	1.14
	Heigenbrücken2	1.64	0	0	1.71	1.65
KO	Landshut1	1.41	0	0.97	0	1.28
	Landshut2	1.38	0	1.06	0	1.30
	Heigenbrücken3	1.10	0	0	0	1.10
	Heigenbrücken4	0.70	0	0	0	0.70
WW	Krumbach	1.85	2.91	0	0	2.26

Bei Betrachtung der Ergebnisse fallen die Versuchsflächen Selb 2 und Heigenbrücken 4 durch besonders geringe Schadklassen auf. Demgegenüber ist bei den regulären Hieben die Schadklasse in Heigenbrücken 2 und Biburg ausgesprochen hoch. Die höchste Schadklasse wurde erwartungsgemäß für die Windwurffläche Krumbach ermittelt.

Im Vergleich von Schadprozent und Schadklasse (Tab. 50) stimmen diese beiden Werte in ihrer Aussage zumeist überein. Für Flächen mit niedrigen Schadprozenten wurden in der Regel auch niedrige Schadklassen ermittelt und umgekehrt. So weist die Windwurffläche im FoA Krumbach sowohl das höchste Schadprozent als auch die höchste Schadklasse auf.

Tabelle 50: Vergleich von Gesamtschadklasse und Gesamtschadprozent

AV	Versuchsfläche	Gesamtschadklasse	Gesamtschadprozent
MM	Schongau	0.87	8.1
	Illertissen	0.99	16.9
	Biburg	1.67	21.1
	Schwabmünchen	1.13	15.9
HM	Selb1	0.88	34.1
	Selb2	0.65	19.7
	Heigenbrücken1	1.14	33.8
	Heigenbrücken2	1.65	46.1
KO	Landshut1	1.28	38.1
	Landshut2	1.30	26.3
	Heigenbrücken3	1.10	37.1
	Heigenbrücken4	0.70	45.8
WW	Krumbach	2.26	55.8

Eine Ausnahme hiervon bildet allerdings die Versuchsfläche Biburg. Hier ist die Schadklasse vergleichsweise hoch, während das Gesamtschadprozent eher niedrig ist. Eine weitere, derartige Abweichung liegt in Heigenbrücken 4 vor. Hier stellt sich der Sachverhalt genau anders herum dar. Für die Fläche wurde eine niedrige Schadklasse von nur 0,7 errechnet, das Schadprozent für betroffene Verjüngung liegt allerdings bei 45,8%!

Die Ergebnisse stellen allerdings durchaus keinen Widerspruch dar. Bei der Ermittlung der Schadklasse wird geprüft, ob ausreichend unbeschädigte Verjüngung in geeigneter Verteilung vorhanden ist. Der Anteil insgesamt betroffener Pflanzen an der gesamten Verjüngung spielt keine Rolle. Es ist somit durchaus möglich, dass bei geringer Stammzahl der Verjüngung und ungünstiger räumlicher Verteilung der Schäden bereits geringe Schadprozent ausreichen, um deutliche Bestandeschäden zu verursachen. Auch der gegenteilige Fall ist bei entsprechend hohen Stammzahlen und günstiger räumlicher Verteilung der Schäden denkbar - wie offenbar in Heigenbrücken 4 der Fall. Das Rückegassensystem übt hier einen merklichen Einfluss aus.

Beide Ausnahmen lassen sich in Abbildung 91 a+b leicht wieder finden, in der der Zusammenhang von Schadprozent (Abb. 91a) bzw. Schadklasse (Abb. 91b) und der Eingriffsstärke auf den Versuchsflächen ersichtlich ist. Der Ausreißer nach oben (KHV) in der linken Abbildung ist die Versuchsfläche Heigenbrücken 4, der Ausreißer in der rechten Abbildung (Eiche/Buche) die Versuchsfläche Biburg.

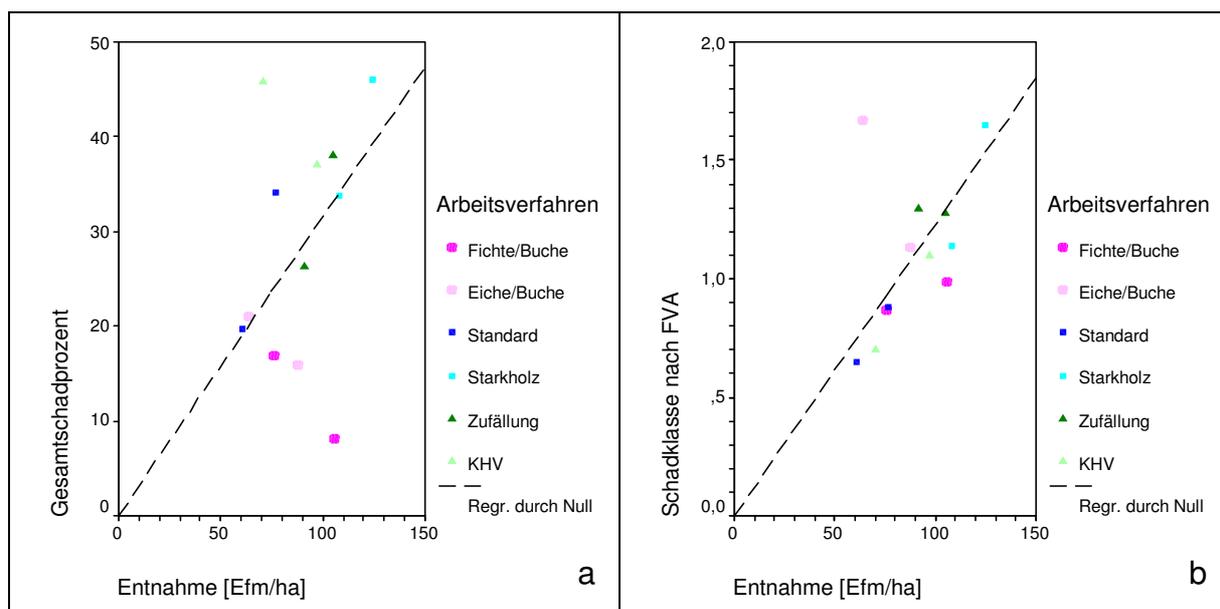


Abbildung 91 a+b: Zusammenhang zwischen dem Gesamtschadprozent (a) bzw. der Schadklasse (b) und der Eingriffsstärke auf den Versuchsflächen

Bemerkenswert ist der deutliche lineare Zusammenhang zwischen Schadklasse und Eingriffsstärke (Abb. 91b). Lediglich die Versuchsfläche Biburg mit dem sehr unregelmäßigen Rückegassennetz fällt hier aus der Reihe. Der Zusammenhang zwischen Schadprozent und Eingriffsstärke (Abb. 91a) ist dagegen weit weniger deutlich. Trotzdem scheint ein Schadprozent von 50 einer Schadklasse von 2 zu entsprechen, was unter Berücksichtigung der Berechnung der Schadklassen durchaus plausibel erscheint.

5.4 Simulation der Verjüngungsentwicklung mit SILVA

Die Funktionen des Schadensermittlungsmodells wurden in das derzeit noch in Entwicklung befindliche Verjüngungsmodul des Waldwachstumssimulators SILVA integriert. Die Holzernteschäden an der Verjüngung können nach Wunsch des Benutzers wahlweise berücksichtigt werden oder nicht. Durch den Vergleich der Entwicklung einer Verjüngung mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden können wichtige Informationen über die Bedeutung dieser Schäden auf Bestandes- bzw. Verjüngungsebene gewonnen werden. In einem ersten Versuch wurde die Entwicklung des nachfolgenden 0.5ha großen Beispielbestandes (Abb. 92) über 12 Perioden á 5 Jahre, insgesamt also über 60 Jahre simuliert. Der Beispielbestand besteht aus 217 Fichten (mittlerer BHD 28.8cm) und 48 Buchen (mittlerer BHD 28.5cm). Insgesamt weist der Beispielbestand einen Vorrat von 265Vfm auf.

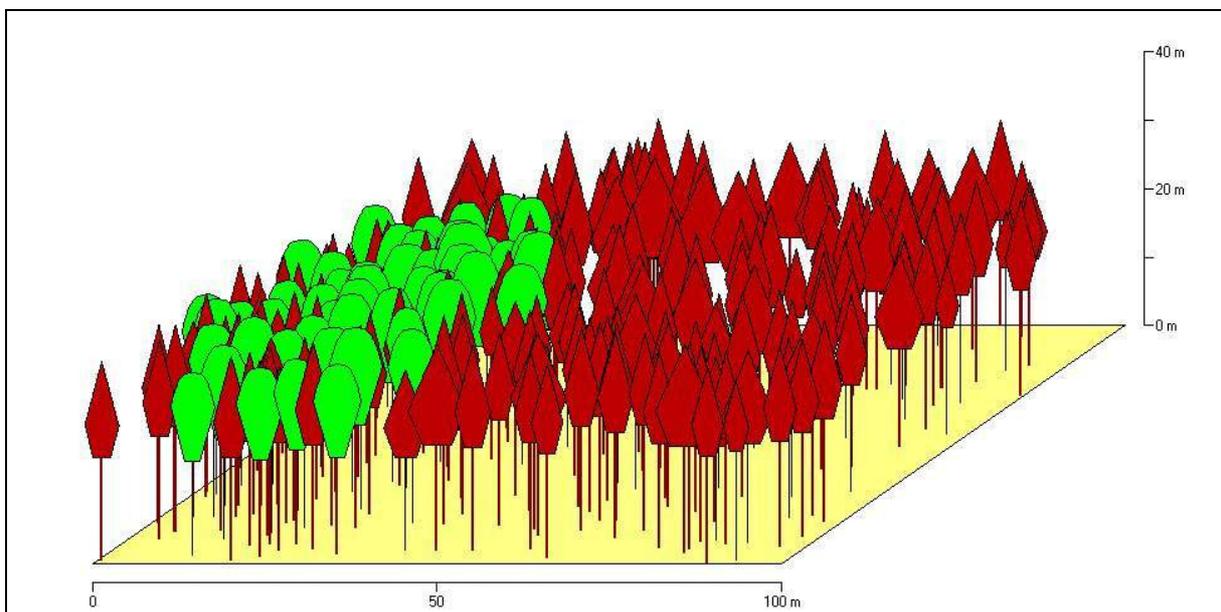


Abbildung 92: Beispielbestand für die Simulation der Verjüngungsentwicklung mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden an der Verjüngung mit SILVA

Die Entwicklung der Verjüngung mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden zeigen die Abbildungen 93a bis 93l (S. 133). Tabelle 51 gibt die Unterschiede bei abgeschlossener Verjüngung des Bestandes (Periode 12) bezüglich der wichtigsten Kennziffern wieder.

Tabelle 51: Vergleich von Kennziffern der Verjüngung mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden, Simulation mit SILVA, Periode 12

Verjüngung		Berücksichtigung der HE-Schäden?		Differenz [%]
		nein	ja	
Fichte	mittlere Höhe [m]	2.39	1.99	-16.7
	Ø maximale Höhe [m]	3.30	3.93	+19.1
	Stammzahl / ha	78910	47124	-40.3
Buche	mittlere Höhe [m]	1.00	0.95	-5.0
	Ø maximale Höhe [m]	2.99	2.50	-16.4
	Stammzahl / ha	20108	10230	-49.1

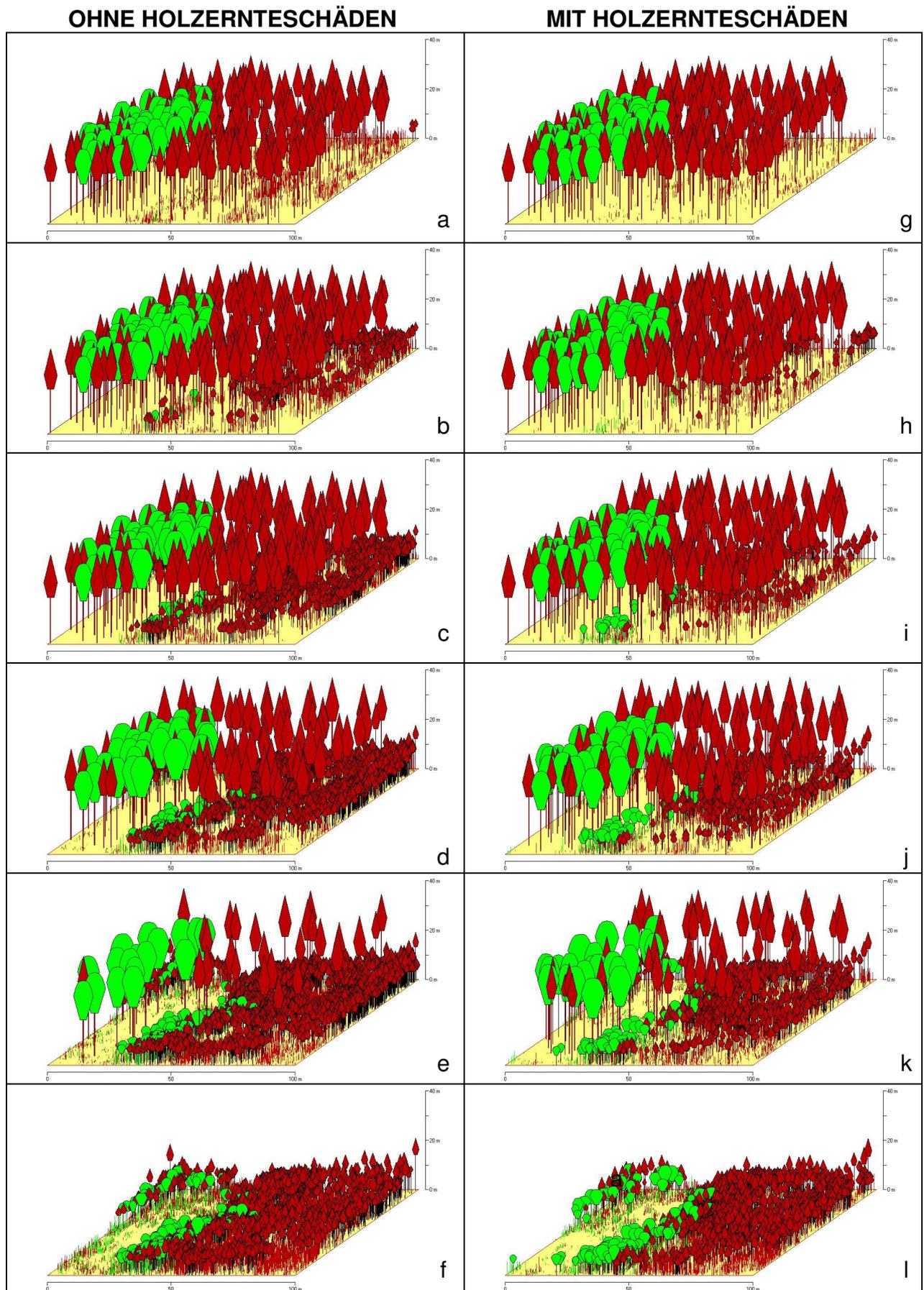


Abbildung 93 a-l: Entwicklung des Beispielbestandes ohne (a-f) und mit (g-l) Berücksichtigung der Holzernteschäden an der Verjüngung, Perioden 4, 6, 8, 10, 11, 12

Sowohl bei Fichte als auch bei Buche in der Verjüngung sind die Unterschiede bei den Stammzahlen je Hektar am deutlichsten. Bei Berücksichtigung der Holzernteschäden stehen 40-50% weniger Verjüngungspflanzen nach Abschluss der Verjüngung in dem Beispielbestand. Diese Differenz ist vor allem, aber nicht ausschließlich auf die letzten beiden stärkeren Hiebe in den Perioden 11 und 12 zurückzuführen. Abbildung 94 zeigt, dass die Unterschiede in den Stammzahlen bereits in den frühen Perioden bestehen.

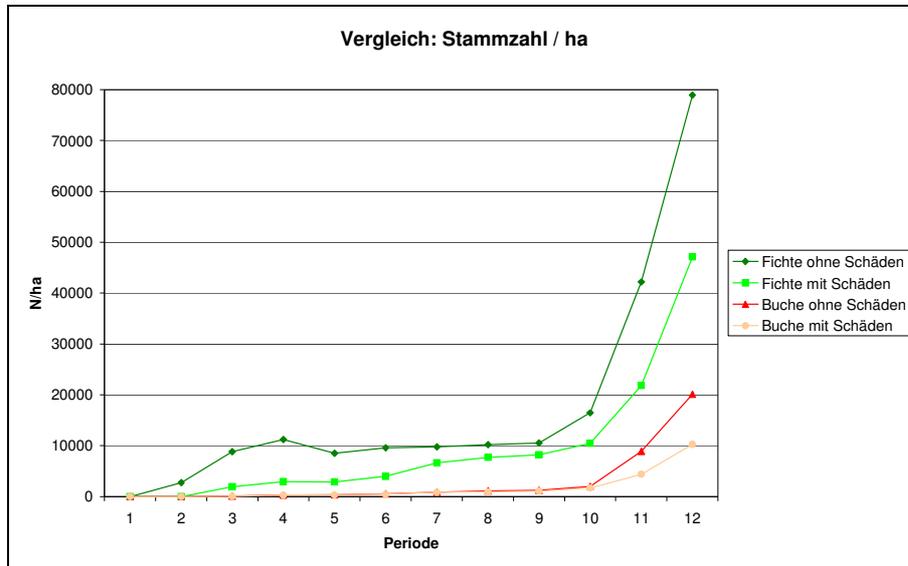


Abbildung 94: Vergleich der Stammzahl/ha für den Beispielbestand mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden an der Verjüngung

Auch die mittlere Verjüngungshöhe als arithmetisches Mittel der Höhe aller Verjüngungspflanzen unterscheidet sich zwischen den beiden Varianten nach abgeschlossener Verjüngung des Bestandes (Tab. 51, S. 132). Die Differenz ist aber weniger deutlich als bei den Stammzahlen und auch im zeitlichen Verlauf von ihrer Richtung her nicht immer gleich bleibend (siehe Buche, Abb. 95). Der Rückgang der mittleren Höhe ab Periode 10 ist auf die zahlreichen Neuansammlungen infolge der stärkeren Hiebe zurückzuführen, die die mittlere Höhe senken.

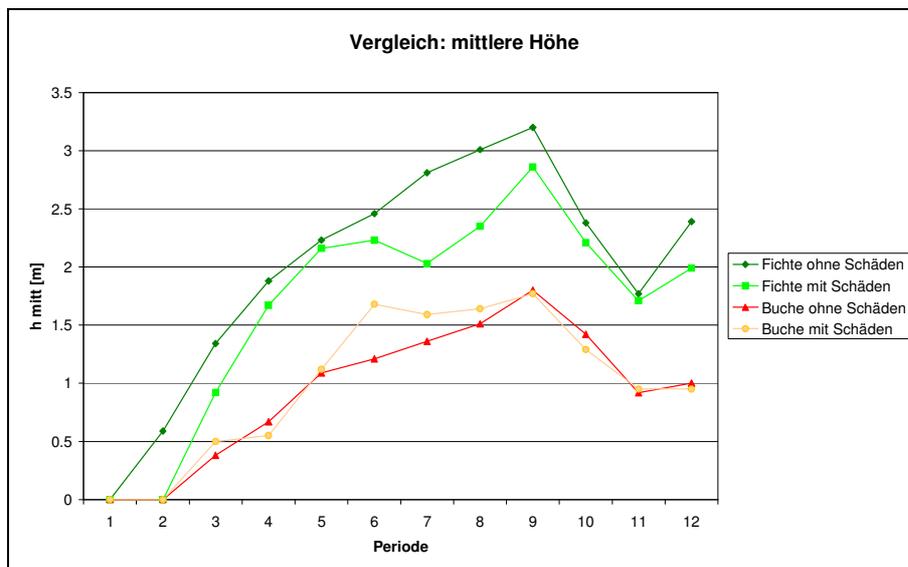


Abbildung 95: Vergleich der mittleren Verjüngungshöhe für den Beispielbestand mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden an der Verjüngung

Die gering ausfallenden Unterschiede bei den mittleren Höhen sind darauf zurückzuführen, dass sich hier zwei gegenläufige Trends ausgleichen. Durch die stärkeren Schäden bei der niedrigeren Verjüngung würde die mittlere Höhe zwar zunehmen, jedoch wird durch die Neuansamungen die mittlere Höhe gesenkt. Zur generellen Aussagekraft der mittleren Höhe als Kennziffer zur Charakterisierung von Verjüngungen und ihrer Veränderungen sei auf Kapitel 5.1.2 verwiesen.

Besser als die mittlere Höhe ist die durchschnittliche maximale Höhe für die Dokumentation der hiebsbedingten Veränderungen an Verjüngungen geeignet. In SILVA wird allerdings, anders als in Kapitel 5.1.3, das arithmetische Mittel der Maximalhöhen nur derjenigen 2,5mx2,5m-Verjüngungsquadrate, die jeweils Verjüngung aufweisen, berechnet (Abb. 96).

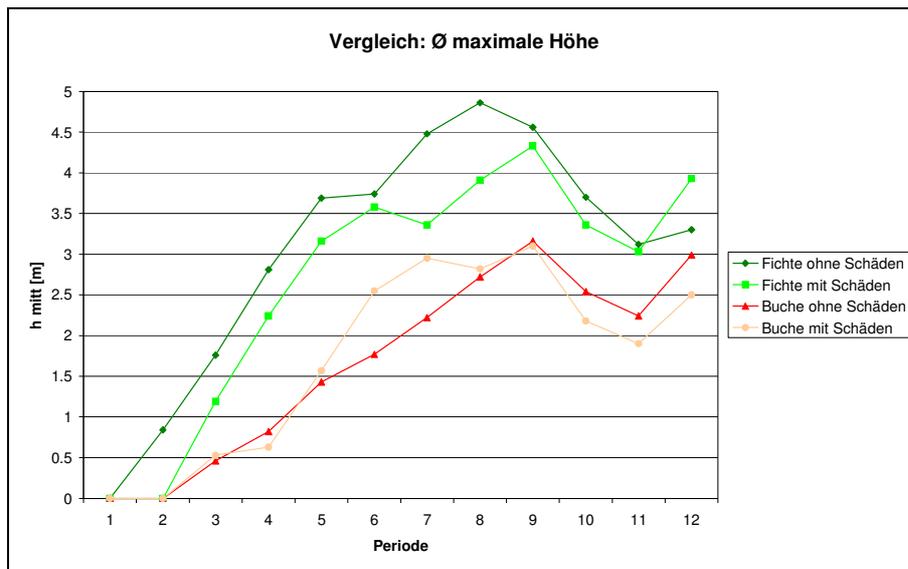


Abbildung 96: Vergleich der maximalen Verjüngungshöhe für den Beispielbestand mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden an der Verjüngung

Die durchschnittliche Maximalhöhe der Fichtenverjüngung liegt ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden lediglich in der letzten Periode über dem Wert bei Berücksichtigung der Schäden (siehe auch Tab. 51, S. 132). Bei der Buchenverjüngung dagegen ist hier kein klarer Trend erkennbar.

Der Vergleich der beiden Varianten miteinander ist allerdings problematisch, da durch die ausschließliche Einbeziehung der Quadrate mit Verjüngung in die Berechnung je Variante eine völlig andere Bezugsbasis entsteht. So gut dieser Wert für die Charakterisierung einer Verjüngung geeignet ist, so wenig brauchbar ist er für den Vergleich dieser beiden Varianten.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Aufnahmemethodik

Bei der Entwicklung der Aufnahmemethodik konnte auf die Erfahrungen aus einer früheren Untersuchung (KORTEN 1999) zurückgegriffen werden. Daher erwies sich die gewählte Vorgehensweise für die angestrebten wissenschaftlichen Auswertungen als grundsätzlich geeignet. Einige Besonderheiten bedürfen dennoch der Diskussion. Da die Rückegassen eine dauerhafte Erschließung der Waldbestände gewähren sollen und daher regelmäßig befahren werden, fallen sie grundsätzlich als Produktionsfläche aus. Vernichtete und beschädigte Verjüngungsbäume auf den Gassen sind deshalb in der Praxis ohne Bedeutung für die Verjüngung des Bestandes. Durch das **systematische Stichprobenraster** wurde die **Verjüngung auf den Rückegassen** aber ebenfalls erfasst. Dies führte unter Umständen zu Verzerrungen bei den Ergebnissen der Versuchsflächen, falls Verjüngung auf den Rückegassen stand oder falls Rückegassen neu aufgeschlagen wurden. War Verjüngung auf den Rückegassen vorhanden, so wurde diese durch die Befahrung und bei Harvestereinsatz zusätzlich durch die Reisigmatte meist völlig zerstört. Derartige Flächen schnitten gegenüber Parzellen ohne Verjüngung auf den Gassen schlechter ab. Ähnliches galt, wenn Rückegassen neu aufgeschlagen wurden, wie dies beispielsweise auf den Versuchsflächen in Landshut der Fall war. In beiden Fällen ist ein höheres Schadprozent daher nicht auf das Arbeitsverfahren oder die Eingriffsstärke zurückzuführen. Letztendlich ist Verjüngung auf der Rückegasse wahrscheinlich eine Erklärung für die große Streuung der Anteile fehlender Verjüngungsbäume zwischen den Versuchsflächen. Die Auswirkungen von anderen Einflussfaktoren könnten dadurch überlagert worden sein, was den Vergleich zwischen den Versuchsflächen bzw. Arbeitsverfahren erschwerte. Eine **Aussparung der Rückegassen** bei den Verjüngungsaufnahmen wäre daher denkbar gewesen. Dies erschien allerdings problematisch, weil eine exakte Festlegung des Gassenrandes im Vorfeld eines Hiebes praktisch nicht möglich ist. Selbst bei bereits angelegten Rückegassen ist der Verlauf der Gasse oft nicht genau erfassbar. So wachsen die Rückegassen teilweise mit Verjüngung zu. Überdies sind Rückegassenlinien in lichten Verjüngungsnutzungen manchmal von vornherein schwer zu erkennen. Zudem unterschätzt ein nur in den Bereichen zwischen den Gassen angelegtes systematisches Raster die Schäden, da sich diese an den Rückegassen konzentrieren. Weitere Probleme treten bei sehr unregelmäßigen Rückegassennetzen auf. Beim hier verwendeten systematischen Raster, das die Rückegassen nicht ausspart, entstand dagegen das Problem, dass es bei den zahlreichen Probekreisen im Übergangsbereich zwischen Rückegasse und Bestandesfläche im Nachhinein unmöglich ist, den einzelnen Verjüngungsbaum der Rückegasse oder dem Bestand zuzuordnen. In dieser Untersuchung wurden daher alle Verjüngungspflanzen in die Auswertung mit einbezogen.

Eine Aufnahme der Verjüngung in **Transekten**, die von Rückegassenrand zu Rückegassenrand verlaufen, wäre grundsätzlich ebenfalls realisierbar gewesen. Der Erhebungsaufwand, der notwendig gewesen wäre, um ähnlich genaue Informationen über die räumliche Verteilung der Schäden zu gewinnen wie bei dem verwendeten Raster, wäre aber drastisch höher gewesen.

Durch das verwendete streng systematische Stichprobenraster kommt es somit tendenziell zu einer Überschätzung der Schäden.

Das verwendete **Probekreissystem** aus zwei verschiedenen großen Probekreisen für unterschiedliche Höhenbereiche der Verjüngung reduzierte den Erhebungsaufwand deutlich. Probleme traten allerdings beim „Anteil betroffener Probekreisfläche“ (Kapitel 4.3, Schadensermittlungsmodell) auf. Da die Verwendung von zwei verschiedenen Anteilen betroffener Probekreisfläche in den Modellfunktionen wenig sinnvoll erschien, wurde für den kleinen Probekreis der gleiche Anteil betroffener Fläche angenommen wie für den großen Probekreis. Dies entspricht bei teilweise betroffenen Probekreisen normalerweise nicht der Realität und führt zu einer schlechteren Anpassung der Funktionen des Schadensermittlungsmodells an die Realität. Auch bei der Anwendung des Verfahrens der FVA Baden-Württemberg zur Bewertung der Schäden traten Probleme auf (siehe Kap. 6.4.3).

Eine höhere **Genauigkeit bei der Einmessung der Probekreise** bei den Einzelbäumen wäre wünschenswert gewesen. Sowohl der liegende Baum als auch die Probekreise wurden bezüglich des Stammfußpunktes mit Kompass und Maßband eingemessen. Aus der Lage der Probekreise und der Lage des in seiner Form idealisierten liegenden Baumes wurde mit dem GIS-Programm ArcView der Anteil betroffener Probekreisfläche berechnet. Die daraus resultierende Ungenauigkeit in Zusammenhang mit dem Unterschied zwischen den in der Realität unregelmäßigen und in ArcView idealisierten Kronenformen führte zu einer merklichen Ungenauigkeit bei der Berechnung der betroffenen Probekreisfläche. Möglicherweise hätte hier eine direkte Abschätzung der betroffenen Probekreisfläche vor Ort unmittelbar nach der Fällung bessere Ergebnisse gebracht.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln 6.2.1 bis 6.2.3 werden die wichtigsten Ergebnisse der Versuchsflächen (Kap. 3.1) und Einzelbäume (Kap. 3.2) mit den wichtigsten Aussagen des Hiebsstrukturmodells (Kap. 4.2) und der Funktionen des Schadensermittlungsmodells (Kap. 4.3) zusammengeführt. Dabei wird zunächst das eigentliche Untersuchungsobjekt, die Verjüngung, betrachtet (Kap. 6.2.1), während anschließend die „Schadensverursacher“ entnommener Altbestand (Kap. 6.2.2) und Holzernteverfahren (Kap. 6.2.3) behandelt werden. Weiterhin werden die aus der Untersuchung gewonnenen Ergebnisse anderen Veröffentlichungen gegenüber gestellt, um Übereinstimmungen oder Gegensätze herauszuarbeiten. Der Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Studien beschränkt sich dabei wegen der zumeist stark unterschiedlichen Methoden (Schadensarten etc., siehe Kap. 1.2) im Wesentlichen auf Kausalzusammenhänge und Einflussfaktoren.

6.2.1 zu Aufbau und Struktur der Verjüngung

Die hier untersuchten **Baumarten** Fichte und Buche werden in der Verjüngung unterschiedlich stark von den Holzerntemaßnahmen beschädigt. Insgesamt betrachtet werden in den betroffenen Teilen des Bestandes bei gleicher Höhe Buchen häufiger als Fichten betroffen, besonders wenn Kronen die Schadenverursacher sind (siehe Kap. 4.3.2). Dies ist vor allem auf den deutlich höheren Anteil an fehlenden Buchen im Vergleich zum Anteil an fehlenden Fichten zurückzuführen. Offensichtlich werden insbesondere kleinere Buchen häufig von Kronenmaterial begraben und sind dann nach dem Hieb nicht mehr aufzufinden. Deutliche Unterschiede zwischen den Baumarten bezüglich des Anteils beschädigt

vorhandener Verjüngung können nicht festgestellt werden. Allerdings treten bei der Buche mehr Rindenverletzungen und Mehrfachschäden auf, während bei der Fichte tendenziell mehr Lageveränderungen festzustellen sind (vgl. Kap. 3.2.3.1). Während im Höhenbereich bis ca. zwei Meter mehr Brüche bei der Buche auftreten, scheint sich dieser Sachverhalt bei Verjüngung über ca. zwei Metern Höhe umzudrehen (Kap. 4.3.2). Diese Zusammenhänge zeigen sich auch auf den beiden Versuchsflächen mit ausreichender Fichten- und Buchenverjüngung, Schongau und Illertissen (siehe Kap. 3.1.1.3). In Schongau mit ungefähr gleich hoher Fichten- und Buchenverjüngung werden mehr Buchen als Fichten betroffen, v.a. aber fehlen deutlich mehr Buchen als Fichten. Auf der Versuchsfläche Illertissen scheint dies zunächst nicht der Fall zu sein. Berücksichtigt man allerdings, dass die Buchen im Schnitt über 70cm höher sind als die Fichten, so lässt sich dieser scheinbare Widerspruch leicht auflösen. Und auch auf der Windwurffläche im FoA Krumbach (Kap. 3.1.4.3) zeigt sich (obwohl die Buche deutlich höher ist), dass **in der Verjüngung Buchen insgesamt stärker als Fichten von Hiebsmaßnahmen betroffen werden.**

Dies stimmt mit den Ergebnissen von KORTEN (1999) überein, der in der Einzelfalluntersuchung einer motormanuellen Holzerntemaßnahme in einem Fichten-Tannen-Buchen-Bestand feststellte, dass in der Verjüngung Buchen stärker als Fichten (und beide stärker als Tannen) von Holzernteschäden betroffen werden.

Wie oben bereits angesprochen, besitzt die **Höhe der Verjüngung** einen starken Einfluss auf die entstehenden Holzernteschäden. Bezüglich der fehlenden und der beschädigt vorhandenen Verjüngung sind die Zusammenhänge dabei eindeutig. Bei allen Versuchsflächen (bis auf die Fläche Landshut 2) und damit bei allen untersuchten Arbeitsverfahren (Kap. 3.1.5) sowie beim Schadensermittlungsmodell (Kap. 4.3, Ausnahme Fichtenstamm in Fichtenverjüngung) **nimmt der Anteil fehlender Verjüngung mit steigender Verjüngungshöhe ab, während der Anteil beschädigter Verjüngung zunimmt.** Kleinere Verjüngungsbäume werden durch die bei der Holzernte wirkenden Kräfte leichter entwurzelt oder tief gebrochen und durch das im Bestand verbleibende Kronenmaterial begraben, so dass sie bei den Aufnahmen nach den Hieben nicht mehr aufgefunden werden. Höhere Verjüngungsbäume haben eine größere Wahrscheinlichkeit, beschädigt vorhanden zu sein, schon weil sie mit geringerer Wahrscheinlichkeit nach dem Hieb fehlen. Dabei nehmen Lageveränderungen mit zunehmender Verjüngungshöhe ab, während die Anteile an Mehrfachschäden (siehe Kap. 3.2.3.2) und Brüchen (siehe Kap. 4.3.2) steigen. **Aus den beiden gegenläufigen Trends für fehlende und beschädigte Verjüngung ergeben sich in der Regel Höhenbereiche, in denen die Gesamtschadenswahrscheinlichkeit minimal wird.** Beim Schadensermittlungsmodell (Abb. 78 und 79, S. 90 und 91) zeigen sich diese Minima vor allem bei der Wirkung von Fichtenkronen auf Fichtenverjüngung und von Buchenkronen auf Buchenverjüngung, den am häufigsten auftretenden Fällen. **Demnach entstehen bei einer Verjüngungshöhe von 2,0m bis 2,5m die geringsten Schäden, wenn Fichten über Fichtenverjüngung gefällt werden. Werden Buchen über Buchenverjüngung gefällt, so liegt der Höhenbereich mit den geringsten Schäden zwischen 1,0m und 2,0m.** Auf den Versuchsflächen zu den hochmechanisierten und kombinierten Verfahren mit fast reiner Fichtenverjüngung befand sich der Höhenbereich mit der geringsten Gesamtschadenswahrscheinlichkeit zwischen 1,0m und 2,0m (Abb. 39a, S. 48). Ausnahme ist hier lediglich die Fläche Landshut 2, die sehr geringe Anteile beschädigter höherer Verjüngung aufwies. Gleiche Höhenbereiche zeigten sich auf den motormanuell bewirtschafteten Fichten-Buchen-

Flächen, die zusätzlich zur Fichte hohe Buchenanteile in der Verjüngung aufwiesen. Auf den beiden Eichen-Buchen-Flächen mit nahezu reiner Buchenverjüngung waren dagegen die wenigsten Schäden im Höhenbereich zwischen 4m und 6m zu finden. Auch auf der Windwurffläche zeigen sich die wenigsten Schäden bei einer ähnlichen Höhe der Buchenverjüngung, nämlich zwischen 5m und 6m (siehe Abb. 35b, S. 45). Die geringsten Schäden bei der Fichtenverjüngung wurden bei einer Höhe von ca. 4m festgestellt. Die Versuchsflächen können damit die Höhenbereiche des Schadensermittlungsmodells nicht bestätigen. Die Unterschiede zwischen Versuchsflächen und Schadensermittlungsmodell lassen sich aber dadurch erklären, dass auf den Versuchsflächen neben den Fällschäden auch die Rückeschäden aufgenommen wurden, die möglicherweise völlig anders durch die Höhe der Verjüngung beeinflusst werden. Daneben wurden höhere Verjüngungsbereiche auf den Versuchsflächen durch den Einfluss (Fällrichtung) des Menschen (Waldarbeiters) vermutlich geschont, vor allem Bereiche mit hoher Buchenverjüngung. Dadurch zeigten sich dort die geringsten Schäden. Dieser Einfluss des Menschen kann auf der Windwurffläche dagegen ausgeschlossen werden. Allerdings sorgte dort die riesige Menge an Kronenmaterial dafür, dass niedrigere Verjüngung mit hoher Wahrscheinlichkeit begraben und damit als fehlend eingestuft wurde. Der drastisch höhere Anteil fehlender Verjüngung gegenüber dem Anteil beschädigter Verjüngung (siehe Tab. 17, S. 44) ist ein Indiz hierfür.

Die Höhe der Verjüngung wurde in anderen Publikationen als wichtiger Einflussfaktor auf das Ausmaß der Verjüngungsschäden identifiziert (z.B. HAGSTRÖM 1994, GINGRAS 1990). So fand KORTEN (1999) übereinstimmend mit dieser Untersuchung bei motormanueller Holzernte zunehmende Anteile beschädigt vorhandener und abnehmende Anteile fehlender Verjüngung mit zunehmender Verjüngungshöhe und führte dies vor allem auf Schlagraum sowie den lenkenden Eingriff des Waldarbeiters zurück. Insgesamt nahm das Gesamtschadprozent mit steigender Verjüngungshöhe leicht ab. Dies beobachteten auch GRANHUS und FJELD (2001) bei motormanueller Holzernte in Fichtenbeständen, während bei hochmechanisierter Holzernte der gegenteilige Effekt auftrat. PREUHLER und JACOBI (1996) stellten bei motormanueller Holzernte im Bergmischwald mit steigender Verjüngungshöhe eine Zunahme des Anteils betroffener Verjüngung fest. Dies war zu großen Teilen auf gebrochenen Bergahorn zurückzuführen. Steigende Anteile beschädigter Verjüngung mit steigender Verjüngungshöhe stimmen mit den Ergebnissen dieser Untersuchung überein.

Die **Entfernung eines Verjüngungsbaums zur Rückegasse** hat großen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, mit der er nach dem Hieb fehlt oder beschädigt vorhanden ist. Fehlende Verjüngung konzentriert sich bei fast allen Versuchsflächen deutlich an den Rückegassen (Ausnahmen: Biburg und Landshut 2), während beschädigte Bäume eher auf der Fläche verteilt auftreten. Die Zunahme des Anteils fehlender Verjüngung mit zunehmender Nähe zur Rückegasse ist selbst auf der Windwurffläche im FoA Krumbach vorhanden und darauf zurückzuführen, dass die auf den Rückegassen vorhandene Verjüngung durch das systematische Probekreisraster ebenfalls berücksichtigt wurde. Da bei der Rückung des geernteten Holzes und gegebenenfalls auch beim Befahren der Gassen mit den Harvestern diese (für die Verjüngung des Bestandes irrelevanten) Bäume zumeist vollständig vernichtet und somit als fehlend berücksichtigt wurden, scheint die Konzentration der Schäden an den Rückegassen in den meisten Fällen deutlicher zu sein, als sie in der Realität tatsächlich ist. ***Trotzdem existiert in den meisten Fällen für einen Verjüngungsbaum mit zunehmender Entfernung von der Rückegasse eine sinkende***

Wahrscheinlichkeit, vom Hieb insgesamt betroffen zu sein. Anders formuliert findet sich eine **Konzentration der Schäden an den Rückegassen**. Auch KORTEN (1999) stellte bei motormanueller Holzernte und wenig schematischem Rückegassennetz eine Konzentration der Verjüngungsschäden an den Rückegassen fest, ebenso wie YOUNGBLOOD (1990). Bei GRANHUS und FJELD (2001) war die Konzentration bei motormanueller Holzernte durch die gerichtete Fällung der Bäume auf die Gassen ebenfalls deutlich, bei hochmechanisierter Holzernte aber durch die rechtwinklige Fällung zur Rückegasse nur schwach ausgeprägt. GLÖDE und SIKSTRÖM (2001) bestätigen diesen Sachverhalt bei konventioneller hochmechanisierter Holzernte und notieren bei zielgerichtetem Fällen auf die Rückegasse mit Harvestern („tossing the caber“-Methode) eine deutlich höhere Konzentration an den Gassen.

Dieser auch hier erwartete Effekt der stärkeren Konzentration bei motormanueller Holzernte lässt sich zwar beim Prognosemodell beobachten, konnte aber auf den Versuchsflächen durch die stark unterschiedlichen Feinerschließungsnetze nicht nachgewiesen werden. Tatsächlich war die Konzentration der Schäden an den Rückegassen auf den Harvesterflächen sehr viel deutlicher als auf den motormanuell bearbeiteten Flächen (vgl. Kap. 3.1.5.2). Auch HAGSTRÖM (1994) fand bei hochmechanisierter Holzernte eine deutliche Konzentration der Schäden an den Rückegassen vor, ohne die Schäden durch die Rückung mit Forwarder und ohne die Schäden auf den Rückegassen selbst zu berücksichtigen.

6.2.2 zum entnommenen Altbestand

Gefällte Bäume der untersuchten **Baumarten** Fichte, Buche und Eiche verursachen unterschiedliche Schäden an Verjüngung. Überraschenderweise zeigt das Schadensermittlungsmodell (Kap. 4.3.2), dass **Buchenstämme mehr Schäden pro betroffener Flächeneinheit als Fichtenstämme verursachen**. Grund hierfür dürfte sein, dass trotz des Bezugs auf die vom liegenden Stamm bedeckte Fläche die Dimension des Stamms „durchschlägt“. Die Buchenstämme waren mit einem mittleren BHD von 50cm im Schnitt fast zehn Zentimeter dicker als die Fichtenstämme mit 41cm. Die höhere Masse und vor allem die auf die Fläche bezogen kleineren Randbereiche, in denen die Schadenswirkung des Stamms durch seinen kreisförmigen Querschnitt vermutlich geringer ist als im mittleren Bereich, dürften für dieses zunächst wenig plausible Ergebnis verantwortlich sein. Dies steht allerdings im Widerspruch zu den Ergebnissen aus Kapitel 3.2.2.2. Im Gegensatz zu den Stammbereichen **werden durch Fichtenkronen mehr Schäden pro Einheit betroffener Fläche verursacht als durch Buchenkronen**. Die kompaktere Form der Nadelholzkrone sorgt hier für hohe Schadprozente, während die Laubholzkrone offensichtlich mehr Lücken bietet. Zusätzlich bleiben bei motormanueller Aufarbeitung die Äste der Nadelholzkrone meist sehr dicht liegen, wodurch zahlreiche, in der Regel kleinere Verjüngungspflanzen begraben werden. Hier bringt die weitergehende Aufarbeitung der Laubholzkronen mehr Platz für die Verjüngung. Zudem verursachen gefällte Fichten häufiger Brüche als gefällte Buchen, während diese mehr (der oft weniger schwerwiegenden) Lageveränderungen produzieren. Die unterschiedlichen Kronenformen der Baumarten sorgen weiterhin dafür, dass sich die betroffene Bestandesfläche bei gleichem BHD unterscheidet. **Die betroffene Bestandesfläche ist bei Buche etwas größer als bei Eiche und am geringsten bei Fichte** (vgl. Kap. 4.2.3.5).

Die unterschiedliche Wirkung der **Stamm- und Kronenbereiche** der gefällten Altbestandsbäume wurde oben bereits angedeutet. Stammbereiche verursachen deutlich mehr beschädigt vorhandene Verjüngungsbäume als Kronenbereiche pro Flächeneinheit. Bei fehlender Verjüngung ist dieser Effekt weniger deutlich (siehe Kap. 4.3.2). Da die Stammbereiche aber lediglich 10% (Buche) bis 20% (Fichte) der Fläche der Kronenbereiche einnehmen, tritt dieser Effekt deutlich in den Hintergrund. **Somit werden durch die Stammbereiche relativ mehr und absolut weniger Verjüngungsschäden verursacht als durch die Kronenbereiche.** Dabei scheint es eine Wechselwirkung mit der Höhe der Verjüngung zu geben. **Während nämlich in den Stammbereichen die Gesamtschäden mit steigender Verjüngungshöhe tendenziell pro Flächeneinheit zunehmen, sinken sie in den Kronenbereichen mit steigender Verjüngungshöhe ab** (vgl. Kap. 4.3.2). Niedrigere Verjüngung kann dem Stamm also möglicherweise in den Randbereichen noch „entkommen“, während hohe Verjüngung fast sicher beschädigt oder gar vernichtet wird. In der Krone hingegen ist Höhe ein Vorteil. Hier wird höhere Verjüngung weniger leicht vom Kronenmaterial begraben. Bei den Schadensarten treten in den Kronenbereichen häufiger Brüche auf, während durch Stämme vor allem Lageveränderungen und Mehrfachschäden (v.a. Rindenschaden plus Lageveränderung) entstehen (Kap. 3.2.2.3).

Die **Einzelbaumdimensionen** der gefällten Altbestandsbäume wirken sich indirekt über die betroffene Bestandesfläche aus (Kap. 4.2.3.4). Diese steigt mit zunehmendem BHD nahezu linear an. **Je größer der gefällte Baum, desto größer die absoluten Schäden, während die Schäden pro Flächeneinheit nicht beeinflusst werden.**

Die **Eingriffsstärke in Stammzahl pro Hektar** wirkt sich ebenfalls auf die betroffene Bestandesfläche und damit auf das Gesamtschadprozent aus (Kap. 4.2.3.3). Die Zunahme der betroffenen Bestandesfläche mit steigender Eingriffsstärke erfolgt dabei nicht linear, sondern die Zunahme läuft zusehends gegen Null. Aufgrund der endlichen Anzahl gefällter Bäume (Maximalwert betroffene Bestandesfläche) und des zunehmenden Anteils an Überschneidungsflächen (mehrere Bäume liegen aufeinander) gibt es offensichtlich einen maximalen Schaden. Dies wird auch auf der Windwurffläche im FoA Krumbach ersichtlich, die als „worst case“ eines regulären Hiebs betrachtet werden kann. **Auch bei der „Entnahme“ von über 100 Bäumen pro Hektar überlebt noch die Hälfte der Verjüngungspflanzen.**

Die **Eingriffsstärke in Volumen (Efm) pro Hektar** resultiert aus den Einzelbaumdimensionen und der Stammzahl pro Hektar, und daher sind auch die Auswirkungen der Eingriffsstärke auf die Schäden an der Verjüngung die Summe der Auswirkungen der beiden Komponenten. Stärkere Eingriffe haben demgemäß auch höhere Schadprozentage zur Folge. **Bei Berücksichtigung der Verteilung unbeschädigter Verjüngungspflanzen, wie dies bei dem modifizierten Wildverbissverfahren der FVA Freiburg der Fall ist, ist der Zusammenhang zwischen der Eingriffsstärke und den Verjüngungsschäden (hier: Schadklassen) nahezu linear gegeben** (siehe Abb.91b auf S. 131). Ausreißer ist hier lediglich die Versuchsfläche Biburg, bei der allerdings auch die Schadprozentage sehr hoch waren. Wieder einmal ist das chaotische Rückegassennetz dafür verantwortlich zu machen.

Auch GRANHUS und FJELD (2001) berücksichtigen in ihrem Modell zur Prognose der Überlebenswahrscheinlichkeit die Eingriffsstärke. Mit steigender Eingriffsstärke (in m² Grundfläche pro Hektar) sinkt die Überlebenswahrscheinlichkeit, steigt also die Schadenswahrscheinlichkeit und damit auch das Schadprozent. Auch HAGSTRÖM

(1994) fand steigende Schadprozente mit steigender Entnahmemenge vor. KORTEN (1999) dagegen konnte keinen Einfluss der Eingriffsstärke auf die Schadprozente nachweisen, führte dies aber auf eine zu geringe Variation der Entnahmemengen in der Untersuchung zurück.

6.2.3 zu den untersuchten Holzernteverfahren

Die **Schlagordnung**, also die Richtung, in der die Bäume bezüglich der Rückegassen gefällt werden, hat deutlichen Einfluss auf die Verjüngungsschäden. **Die betroffene Bestandesfläche wird minimal, wenn die Kronen der gefällten Bäume maximal auf den Gassen zu liegen kommen. Daher bringt jede schematische (z.B. fischgrätenartige) Fällordnung eine Erhöhung der Fällschäden mit sich.** Bei weiten Rückegassenabständen und damit sehr stumpfen Fällwinkeln bezüglich der Rückegasse ist dafür allerdings mit stark erhöhten Rückeschäden zu rechnen.

Bei schematischen Schlagordnungen konzentrieren sich die Schäden weniger an den Rückegassen, sondern verteilen sich mehr auf der Fläche. **Die Fällung mit Harvestern im Standardverfahren (Fällung im rechten Winkel weg von der Gasse) verursacht eine ungefähr doppelt so große betroffene Bestandesfläche gegenüber dem zielgerichteten Fällen auf die Rückegassen.** Auch die Fällgenauigkeit spielt eine große Rolle. Je größer die Streuung der Fällwinkel wird, also je ungenauer gefällt wird, desto mehr Schäden entstehen (Abb. 73a, S. 78) und desto geringer ist die Konzentration der Schäden an den Rückegassen (Abb. 73b, S. 78). **Entscheidend für eine Minimierung der Holzernteschäden an Verjüngung ist also eine sorgfältige und flexible (nicht schematische) Schlagordnung. Die Kronen sollten unbedingt auf die Rückegassen gefällt werden.**

Bei der **Feinerschließung** wirkt sich der Rückegassenabstand (Kap. 4.2.3.1) kaum auf die betroffene Bestandesfläche und damit auf die Schäden an der Verjüngung aus. Bei praxisüblichen Abständen zwischen 20m und 40m können die Kronen der gefällten Altbestandsbäume immer auf die Rückegasse gefällt werden. Die Breite der Rückegassen wirkt sich dagegen sehr deutlich auf die Verjüngungsschäden aus (siehe Kap. 4.2.3.2). Da aber in der Praxis die Rückegassenbreite durch die Arbeitsverfahren bedingt werden und zumeist eine so geringe Breite wie möglich angestrebt wird, um keine Produktionsfläche zu verlieren, ist dieser Wert kaum variabel. **Rückegassenabstand und -breite haben somit keinen entscheidenden direkten Einfluss auf die Holzernteschäden an Verjüngung. Eine systematische Anlage der Rückegassen senkt die Schäden allerdings deutlich.**

Das gewählte **Arbeitsverfahren** wirkt sich über die bereits genannten Parameter Schlagordnung und Feinerschließung aus. Darüber hinaus wird bei der Holzernte mit Radharvestern die gesamte **Krone** während der Aufarbeitung durch den Bestand und damit auch durch vorhandene Verjüngung gezogen, wodurch deutlich mehr Schäden entstehen als bei der Holzernte mit großen Raupenharvestern oder bei motormanuellen Verfahren. Die großen Raupenharvester (Impex Hannibal, Impex Königstiger, Atlas TTW) können aufgrund deutlich höherer Hubkräfte den stehenden oder liegenden Baum aus der Verjüngung heben. Bei der motormanuellen Holzernte wird lediglich der **Stamm** mit einem Schlepper aus der Verjüngung gezogen. Allerdings verbleibt in diesem Fall deutlich mehr **Kronenmaterial** (Schlagraum) im Bestand und kann Verjüngung unter sich begraben, während es bei der hochmechanisierten Holzernte auf den Rückegassen als **Reisigmatte** konzentriert wird.

Durch die größere betroffene Bestandesfläche (Schlagordnung) und das Ziehen der Kronen durch die Verjüngung verursachen hochmechanisierte Verfahren insgesamt mehr Verjüngungsschäden als motormanuelle Verfahren. Die Schadprozente der kombinierten Verfahren, die theoretisch zwischen denen der motormanuellen und der hochmechanisierten Verfahren liegen sollten, liegen vermutlich deshalb über denen der beiden anderen Verfahrensgruppen, weil auf den Flächen zum Königsbronner Harvesterverfahren sehr viele kleine Verjüngungspflanzen auf den Rückegassen standen und vernichtet wurden, während in Landshut (Zufällung) teilweise neue Rückegassen angelegt wurden. Während bei den motormanuellen Verfahren anteilmäßig viele Brüche und Mehrfachschäden entstehen, treten bei den kombinierten und hochmechanisierten Verfahren sehr viele Lageveränderungen auf. Die deutlich geringere Konzentration der Schäden an den Rückegassen bei den motormanuellen gegenüber allen anderen Verfahren (Abb. 42b, S. 50) ist dabei in erster Linie auf die sehr unregelmäßigen Rückegassennetze der beiden Eichen-Buchen-Flächen zurückzuführen (vgl. Abb. 39b, S. 48).

GRANHUS und FJELD (2001) stellten ebenfalls fest, dass bei hochmechanisierter Holzernte mit im Mittel 41% höhere Gesamtschadprozente als bei motormanuellen Verfahren (Mittel: 31%) entstehen. Auch VOROB et al. (1994) mit 52-56% sowie SIKSTRÖM und GLÖDE (2000) mit 40-54% betroffener Verjüngung geben für hochmechanisierte Holzernte sehr hohe Schadprozente an. Untersuchungen zu den Auswirkungen von motormanueller Holzernte zeigen in der Regel deutlich weniger Schäden. KORTEN (1999) gibt 13% betroffener Verjüngung an, bei ANDERSSON und FRIES (1979) waren es 17%. PREUHSLER und JACOBI (1996) notierten einen Ausfall von 5-8% der Verjüngungspflanzen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden also durchweg bestätigt.

6.3 Diskussion des Prognosemodells

6.3.1 zur Vorgehensweise

Sowohl YOUNGBLOOD (1990) als auch GRANHUS und FJELD (2001) ermittelten logistische Funktionen, mit denen die Schadens- bzw. Überlebenswahrscheinlichkeit eines Verjüngungsbaums berechnet werden können (siehe Kap. 1.2). Grundlage beider Modelle bilden die Daten von Versuchsflächen. Die jeweils untersuchten beiden Arbeitsverfahren gehen als Dummy-Variable in die Funktionen ein. Für die auf den Versuchsflächen vorhandenen Rahmenbedingungen ergeben sich so brauchbare Prognosemodelle, die Übertragung auf andere Situationen (Feinerschließung, Baumartenzusammensetzung, Arbeitsverfahren) ist allerdings problematisch. Diese Modelle bleiben somit im Bereich „case study“.

Das in der vorliegenden Untersuchung erstellte Modell dagegen versucht, über die Ermittlung der betroffenen Bestandesfläche eine **Entkopplung von der klassischen Versuchsflächenanlage** zu erreichen und die wichtigen Fällschäden zu prognostizieren. Die Einflussfaktoren werden aufgeteilt in Eigenschaften des Arbeitsverfahrens und des Hiebes auf der einen und in Eigenschaften der Verjüngung auf der anderen Seite. Das Hiebsstrukturmodell ermittelt aus den erstgenannten beiden die betroffene Bestandesfläche, das Schadensermittlungsmodell berechnet die auf dieser betroffenen Bestandesfläche entstandenen Schäden. Durch diese Vorgehensweise können unterschiedlichste Situationen bezüglich Feinerschließung, Baumartenzusammensetzung etc. simuliert werden. Selbst verschiedene Arbeitsverfahren lassen sich über den Fällwinkel darstellen.

Probleme entstehen allerdings bei der hochmechanisierten Holzernte mit Harvestern. Durch das Ziehen der Krone durch die Verjüngung während der Aufarbeitung verändert sich die betroffene Bestandesfläche gegenüber der im Modell vorausgesetzten motormanuellen Holzernte deutlich. Bei dieser werden nämlich lediglich die bereits aufgearbeiteten Stämme bzw. die ausgehaltenen Abschnitte aus der Verjüngung zu den Rückegassen vorgerückt. Dadurch unterschätzt das Prognosemodell die Schäden durch hochmechanisierte Holzernte sehr deutlich (siehe Kap. 4.5). Die Lösung hierfür liegt möglicherweise in der Korrektur der Baumformen (z.B. Verlängerung der Krone bis zum Stammfuß) und damit in der Korrektur der betroffenen Bestandesfläche (evtl. durch Korrekturfaktor). Allerdings sind durch das Schleifen der Kronen durch die Verjüngung andere Schäden, als sie bei der Fällung der Albestandsbäume entstehen, zu erwarten. Hier wären ergänzende Untersuchungen notwendig. Eine pragmatische Lösung ist in der Modifikation des „Rückefaktors“ zu sehen, auf den in Kapitel 6.3.5 noch genauer eingegangen wird.

6.3.2 zum Hiebsstrukturmodell

Das Hiebsstrukturmodell verwendet zwangsläufig eine Reihe von Vereinfachungen der Realität. Die Auswirkungen dieser notwendigen Anpassungen sollen hier kurz diskutiert werden.

Die Berechnung der betroffenen Bestandesfläche mit **idealisierten Baumformen** ist eine zwingende Notwendigkeit. Der hierdurch entstehende Fehler ist aber eher gering. Von größerer Bedeutung ist die Verwendung der idealisierten Baumformen beim Schadensermittlungsmodell. Dies wird in Kapitel 6.3.3 diskutiert werden.

Die Verwendung von „**Einheitsbäumen**“ (alle entnommenen Bäume sind gleich) erwies sich als deutlich weniger aufwändig in der C-Programmierung als die Verwendung individueller Bäume auf der Basis einer tatsächlichen BHD-Verteilung. Zwar wird hierdurch die Streuung der Ergebnisvariablen, allen voran der betroffenen Bestandesfläche, erheblich verringert, die mittleren Ergebnisse allerdings dürften sich gegenüber z.B. einer Normalverteilung der BHD kaum verändern. Diese Vereinfachung erscheint also akzeptabel und fällt beispielsweise bei der Einbindung des Modells in den Waldwachstumssimulator SILVA ohnehin weg, da dieser natürlich mit individuellen Baumdurchmessern arbeitet.

Eine weitere Vereinfachung wurde hinsichtlich der **Überschneidungsflächen** getroffen. In der Realität überschneiden sich die Lagebereiche der gefällten Bäume auf unterschiedlichste Art und Weise. Stamm- und Kronenbereiche verschiedener Baumarten können in unterschiedlicher Anzahl übereinander liegen. Dies war mit dem GIS-Programm ArcView nicht in dieser Auflösung simulierbar. Daher wurden die Überschneidungsflächen (und damit die entstehenden Schäden) unter der Annahme berechnet, dass auf diesen immer genau zwei Kronen aufeinander liegen. Die fehlende Berücksichtigung der Stammbereiche erscheint hierbei wenig problematisch, da diese eine gegenüber den Kronenbereichen sehr geringe Fläche einnehmen (ca. 10% bei Buche, ca. 20% bei Fichte). Zudem kommen in der Realität durch die Schlagordnung wenige Stamm-Stamm-Überschneidungen zustande, während Krone-Krone-Überschneidungen sehr häufig sind. Insgesamt findet hierdurch eine leichte Unterschätzung der Schäden statt, da Stammbereiche pro Flächeneinheit mehr Schäden verursachen als Kronenbereiche (siehe Kap. 6.2.2). Die Annahme, dass auf den Überschneidungsflächen immer genau zwei Kronen aufeinander liegen, stellt in gewisser Weise das „worst case“-Szenario dar, da insgesamt umso weniger Schäden entstehen, je mehr Kronen aufeinander gefällt

werden. Der Fehler ist dabei abhängig vom Anteil der Überschneidungsfläche an der betroffenen Bestandesfläche, von der tatsächlichen mittleren Anzahl an Überschneidungen und vom Schaden, den eine Krone verursacht. Bei einem Anteil von ca. 10% Überschneidungsfläche an der betroffenen Bestandesfläche (das ist in etwa der Wert der Versuchsflächen Biburg und Schongau) und einem angenommenen Schadprozent von 50% liegt die rechnerische Abweichung bei ca. 1%, wenn tatsächlich drei Kronen im Mittel aufeinander fallen, und bei unter 3%, wenn es tatsächlich fünf Kronen sind. Damit erscheint der Fehler dieser Vereinfachung akzeptabel. Durch die hier erfolgte leichte Überschätzung der Schäden wird die durch die fehlende Berücksichtigung der Stammbereiche erfolgte Unterschätzung tendenziell ausgeglichen.

Die Tatsache, dass nicht alle denkbaren **Rückegassenabstände** im Modell realisierbar sind, ist ebenfalls unproblematisch. Sinnvolle Fällrichtungen und Grenzen der virtuellen Versuchsfläche waren an dieser Stelle wichtiger, zumal die in der Praxis üblichen Abstände wählbar sind und der Einfluss des Rückegassenabstands auf die betroffene Bestandesfläche, vor allem aber auf den Anteil der betroffenen an der gesamten Bestandesfläche eher gering ist (siehe Kap. 4.2.3.1).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei allen drei getesteten Versuchsflächen (Kap. 4.2.4) die Berechnung der betroffenen Bestandesfläche mit dem Hiebsstrukturmodell hervorragend mit den tatsächlichen Daten übereinstimmende Ergebnisse erbrachte. Bezüglich der anderen Ergebnisvariablen existierende Unterschiede zwischen Realität und Prognose sind auf sehr unsystematisch angelegte Rückegassenetze oder deutlich von den verwendeten Funktionen abweichende Baumformen zurückzuführen. Einzig die räumliche Verteilung der Schäden im Bestand unterscheidet sich zumeist erheblich zwischen Theorie und Praxis, was aber auf die unterschiedliche Art der Berechnung zurückzuführen ist. Möglicherweise ist dies auch ein Zeichen dafür, dass die theoretischen Fällrichtungen in der Realität nicht eingehalten werden (können).

6.3.3 zum Schadensermittlungsmodell

Bei der Berechnung der Schäden pro betroffener Flächeneinheit sind einige Besonderheiten bezüglich der Vorgehensweise zu diskutieren.

Da die Probekreise in den wenigsten Fällen auf ganzer Fläche von liegenden Bäumen bedeckt waren (Stammbereiche!), die Funktionen sich aber auf die betroffene Bestandesfläche beziehen sollten, wurde der **Anteil betroffener Probekreisfläche** logarithmiert in die logistischen Regressionen aufgenommen. Die Berechnung des Anteils betroffener Probekreisfläche mit dem GIS-Programm ArcView war aber mit einigen Unsicherheiten behaftet. Diese resultierten zum einen daraus, dass die Lage der Probekreise nicht in Bezug zur Lage des gefällten Baumes, sondern zur Lage des stehenden Baumes aufgenommen wurde. Daher ist es möglich, dass in der Realität nicht betroffene Probekreise als betroffen eingestuft wurden (und umgekehrt). Auch durch den Unterschied zwischen realer und idealisierter Baumform kam es zu Fehlklassifizierungen. Die Streuung der Ergebnisse wurde dadurch beträchtlich erhöht. Die einzige Lösung wäre eine Einschätzung des Anteils betroffener Probekreisfläche vor Ort gewesen, die allerdings einen sehr hohen Mehraufwand bedeutet hätte und daher nicht realisierbar war. Die mäßige Anpassung der Funktionen an die Realität ist wahrscheinlich zu großen Teilen hierauf zurückzuführen.

Auch die Verwendung des Probekreisystems führte zu einer weiteren Verschlechterung der Funktionsanpassung (vgl. Kap. 6.1).

Das **zweistufige Vorgehen bei der Berechnung der Funktionen** für fehlende und beschädigte Verjüngung bedarf ebenfalls der Diskussion. Dieses Vorgehen wurde aufgrund der völlig gegenläufigen Auswirkung der Höhe der Verjüngung auf die Schadenswahrscheinlichkeit bzw. das Schadprozent für fehlende und beschädigte Verjüngung gewählt. Die Vorteile dieser Vorgehensweise sind bei der Addition beider Teilfunktionen zu einer Gesamtschadenfunktion (betroffene Verjüngung) zu erkennen. Diese kann keinesfalls Werte über 1 bzw. 100% aufweisen, was nur plausibel ist. Sie kann möglicherweise Minima oder Maxima zeigen, die eine einzelne logistische Funktion nicht besitzen kann. Und die gegenläufigen Trends der beiden Teilfunktionen bezüglich der Verjüngungshöhe sind deutlicher zu erkennen. Der Nachteil ist, dass so ein zeitliches Nacheinander entsteht (erst wird Verjüngung vernichtet, dann die noch vorhandene beschädigt), wo ein gleichzeitiges Entstehen der Schadensarten plausibler erscheint.

Die **Normierungen bei den Schadensgruppen** waren notwendig, damit die Summe der Einzelfunktionen die Funktion „beschädigt“ ergab. Dass sich dies nicht automatisch ergab, ist auf die geringe Anzahl einzelner Schadensarten vor allem in den höheren Verjüngungsbereichen aufgrund der dort geringeren Stammzahlen zurückzuführen. Auch hier wurde eine pragmatische Lösung gewählt, um das gesamte Schadensermittlungsmodell in sich stimmig zu gestalten.

Die schwierige Verprobung der Funktionen des Schadensermittlungsmodells (siehe Kap. 4.3.3) ergab bei den Versuchsflächen leichte bis deutliche Unterschätzungen der Schäden durch das Modell. Die Unterschiede sind allerdings leicht durch die Rückeschäden erklärbar, die in der Realität zu den Fällschäden hinzukommen, die aber vom Schadensermittlungsmodell nicht berücksichtigt werden (siehe Kap. 6.3.5). Bei den Probekreisen ergab sich bei Berücksichtigung der speziellen Probleme eine leichte Überschätzung, insgesamt aber eine akzeptable Prognose der Schäden durch das Teilmodell.

6.3.4 zur Anwendung des Prognosemodells

Bei der Anwendung des Prognosemodells auf Bestandesebene existieren grundsätzliche Unsicherheiten bezüglich der Funktionen des Schadenermittlungsmodells zu den Anteilen vom Hieb betroffener Verjüngung (Schadprozente), da diese auf der Grundlage von Probekreisdaten berechnet wurden. Die Anwendung dieser Funktionen mit der mittleren Höhe der gesamten Verjüngung des Bestandes führt möglicherweise bei einer in Bezug auf die Höhe sehr heterogenen Verjüngung zu von der Realität deutlich abweichenden Ergebnissen. Gleiches gilt für sehr unregelmäßig im Bestand verteilte Verjüngungspflanzen, beispielsweise ehemals gezäunte Flächen oder Voranbauten. Je nach Größe lassen sich Schäden an diesen Verjüngungsblöcken durch geeignete Wahl der Fällrichtungen weitgehend vermeiden.

Eine einigermaßen gleichmäßige räumliche Verteilung der Verjüngung ist daher Voraussetzung dafür, dass das Prognosemodell plausible Ergebnisse liefert.

Die Möglichkeiten, das Prognosemodell an realen (motormanuellen) Hieben zu verproben, waren leider auf vier Versuchsflächen begrenzt (vgl. Kap. 4.4.3). Zudem stellte sich auf den beiden Eichen-Buchen-Flächen das chaotische Rückegassennetz als Störfaktor heraus. Auch die sehr kleinen Kronen der gefällten Bäume in Schongau, die zudem oft aus der Versuchsfläche heraus gefällt wurden, vereinfachten einen Vergleich von Realität und Prognose nicht. ***Trotzdem scheint das Prognosemodell bezüglich der Schadprozente Werte zu liefern, die ungefähr zwei Drittel der tatsächlich ermittelten Werte betragen.*** Unterstellt man,

dass das Prognosemodell die Fällschäden sauber abschätzt, so betrüge der „Rückefaktor“ zur Ermittlung der Gesamtschäden ca. 1,5 (siehe Kap. 6.3.5).

Bei der Schätzung der Anteile der Schadensgruppen an der beschädigten Verjüngung arbeitet das Prognosemodell bei der Gruppe „Brüche“ sehr gut. Die selten auftretenden Rindenschäden sowie die Mehrfachschäden werden eher unterschätzt, während Lageveränderungen nahezu durchgehend überschätzt werden.

Die Prognose der räumlichen Verteilung der Schäden im Bestand stimmt lediglich bei der Versuchsfläche Illertissen ansatzweise mit der Realität überein. Hier scheint sich eine unregelmäßige Feinerschließung deutlich niederschlagen. Auch die völlig unbekannte räumliche Verteilung der Rückeschäden ist bei der Prognose ein großer Unsicherheitsfaktor.

6.3.5 zum „Rückefaktor“

Als Rückefaktor wurde der sich rechnerisch ergebende Umrechnungsfaktor definiert, der multipliziert mit dem vom Prognosemodell vorhergesagten Schadprozent (nur Fällschäden!) das tatsächlich vorgefundene Gesamtschadprozent (Fällung und Rückung) ergibt (siehe Kap. 4.4).

Bei den mit **motormanuellen Arbeitsverfahren** bearbeiteten Versuchsflächen lag der Rückefaktor zwischen 1,3 und 1,7. Die Ausnahme bildete die Versuchsfläche Schongau (Rückefaktor 0,9 bis 1,0), bei der allerdings die Kronen der entnommenen Bäume deutlich kleiner waren, als dies von den verwendeten allometrischen Funktionen geschätzt wurde. Zudem wurde der Großteil der Bäume aus der Versuchsfläche heraus gefällt, so dass diese Versuchsfläche zur Bestimmung eines Rückefaktors nicht geeignet ist. **Somit kann aufgrund der durchgeführten Untersuchungen bei motormanueller Holzernte ein Rückefaktor von 1,5 festgelegt werden.**

Dies stimmt recht gut mit den Beobachtungen von KORTEN (1999) überein. Dieser stellte nach Analyse der Schadensursachen für Holzernteschäden an Verjüngung bei einem motormanuellen Hieb fest, dass Stammbereiche bei der Fällung an 45%, Kronenbereiche bei der Fällung an 75% und die Rückung der gefällten Stämme an 40% der entstandenen Schäden beteiligt waren. Dies ergibt ein Verhältnis der Fällung zur Rückung von 3:1 oder einen rechnerischen Rückefaktor von 1,33. Dieser liegt im Bereich der bei dieser Untersuchung festgestellten Rückefaktoren.

Auch VON SCHMIDT (2003) notierte bei einem motormanuellen Hieb die Ursachen der Schäden und fand heraus, dass 60% der Schäden auf Fällung und lediglich 10% auf Rückung zurückzuführen waren. Die restlichen 30% der Schäden wurden durch eine Kombination von Fällung und Rückung verursacht. Damit ergibt sich ein Verhältnis der Fällung zur Rückung von 9:4 und damit ein rechnerischer Rückefaktor von 1,44. Auch dieser Wert passt zu der vorliegenden Untersuchung.

Bei **hochmechanisierter Holzernte** ergaben sich für die Versuchsflächen Rückefaktoren zwischen 2,1 und 2,8. Das Ziehen der Kronen durch den Bestand und damit durch vorhandene Verjüngung im Zuge der Aufarbeitung des Baumes mit dem Harvester verursacht deutlich mehr Schäden als die motormanuelle Holzernte, bei der lediglich die bereits aufgearbeiteten Stämme bzw. Abschnitte vorgerückt werden. Allerdings verbleibt bei motormanueller Holzernte das Kronenmaterial (Schlagabraum) im Bestand, während der Harvester dieses auf der Rückegasse in Form der so genannten Reisigmatte konzentriert. Dies zeigt auch der Vergleich zwischen Realität und Prognose in Tabelle 36 (S. 109). Der größte Unterschied besteht bei den beschädigten Verjüngungsbäumen (Faktor 5,2 bis 6,7), der Anteil fehlender

Verjüngung wird ähnlich genau wie bei den motormanuellen Verfahren geschätzt (Faktor 1,0-2,0). Durch das Ziehen der Krone durch die Verjüngung entsteht vermutlich vor allem beschädigt vorhandene Verjüngung.

Auch VOROB et al. (1994) stellten fest, dass bei hochmechanisierter Holzernte die Fällung der Bäume lediglich 20% der Verjüngungsschäden verursachte. Die Aufarbeitung, also das Vorliefern und Einschneiden der Bäume war dagegen für 73% der Schäden verantwortlich. Die anschließende Rückung mit einem Forwarder verursachte kaum Schäden (7%). Da das Prognosemodell lediglich die Fällungsschäden schätzt, ist eine deutliche Unterschätzung der Gesamtschäden bei der hochmechanisierten Holzernte unvermeidlich.

Bei den **kombinierten Arbeitsverfahren** schließlich wurden Rückefaktoren zwischen 1,8 und 4,6 festgestellt. Die Streuung ist hier aufgrund der teilweise erfolgten Gassenaufliefe und den sehr hohen Pflanzenzahlen auf den bereits vorhandenen Gassen vor den Hieben sehr groß. Die Erwartung, dass die Rückefaktoren zwischen denen der motormanuellen und der hochmechanisierten Verfahren lägen, wurde daher nicht erfüllt.

Die **hochmechanisierte Windwurfaufarbeitung** weist trotz des Harvestereinsatzes einen überraschend geringen Rückefaktor von 1,3-1,4 auf. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass durch den Windwurf bereits ein extrem hoher Schaden verursacht wurde (42% betroffene Verjüngung). Die anschließende Aufarbeitung und Rückung verursachte lediglich ein Drittel der Windwurfschäden, da in den betroffenen Bereichen nur noch wenig unbeschädigte Verjüngung vorhanden war.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Rückefaktoren in den meisten Fällen in einer plausiblen Größenordnung liegen. Dies macht auch deutlich, dass das Prognosemodell grundsätzlich für die Fällschäden realistische Werte liefert.

6.4 Diskussion der Bewertungsansätze

Die verschiedenen Ansätze zur Bewertung der holzerntebedingten Schäden an vorhandener Verjüngung können hier nicht endgültig beurteilt werden. Dies resultiert aus der Ungewissheit bezüglich der Entwicklung des einzelnen beschädigten Verjüngungsbaums, wodurch sich eine Unschärfe bei der Betrachtung der gesamten Verjüngung ergibt. Die Entwicklung von Verjüngungen nach Holzerntemaßnahmen ist in Verbindung mit den verschiedenen Bewertungsverfahren und ihrer jeweiligen Aussagekraft noch sehr viel genauer zu untersuchen.

Trotzdem ist es möglich, die Vor- und Nachteile der einzelnen Bewertungsansätze kurz herauszuarbeiten und ihre Brauchbarkeit für eine bestandesweise Bewertung der entstandenen Verjüngungsschäden abzuschätzen.

6.4.1 zu den Kennziffern der Verjüngung

Die Kennziffern bieten allgemein den Vorteil, dass sie mit geringem Aufwand zu ermitteln sind. Daneben ist die Methodik der Datenerhebung in gewissen Grenzen flexibel. Probekreise unterschiedlicher Größe, angelegt im Raster oder entlang von Transekten liefern bei ausreichender Anzahl sehr ähnliche Werte (repräsentative Stichprobe).

Durch das arithmetische Mittel der Probekreise wird bei der **durchschnittlichen Abnahme der Stammzahl der Verjüngung** im Gegensatz zum Schadprozent die räumliche Verteilung der Schäden mit berücksichtigt. Ohne den Bezug zu der noch

verbleibenden Anzahl an Verjüngungsbäumen erscheint diese Kennziffer aber zur Schadensbewertung wenig geeignet.

Die beiden **durchschnittlichen Veränderungen der Verjüngungshöhen** dienen der Quantifizierung von Zuwachs- und damit Zeitverlusten bei der Verjüngung eines Bestandes. Hier erscheint der Bezug auf die maximale Höhe (Oberhöhe) der Verjüngung zielführender, da die höchsten Bäume der Verjüngung die besten Chancen haben, den nachfolgenden Bestand zu bilden. Beim Bezug auf die mittlere Verjüngungshöhe waren die Ergebnisse bei den regulären Hieben eher undeutlich. Zwischen den Versuchsfeldern waren wenige Unterschiede erkennbar. Für den Vergleich verschiedener Arbeitsverfahren ist diese Kennziffer demnach kaum geeignet.

Die **Veränderungen der Baumartenanteile** waren auf den Versuchsfeldern gering. Im Gegensatz zu Wildschäden sind bei Holzernteschäden kaum Entmischungseffekte zu erwarten, dafür sind die Unterschiede bei den Schäden zwischen den Baumarten zu gering. Deutliche Veränderungen traten nur bei sehr geringen Baumartenanteilen auf und sind mit dem geringen Stichprobenumfang erklärbar. Daher ist diese Kennziffer für eine Schadensbewertung wohl nicht notwendig.

Die Interpretation der **Veränderung des Varianz-Mittelwert-Index** für eine Bewertung der Holzernteschäden an Verjüngung erwies sich als schwierig. Die Frage, ob eher eine homogene oder eine heterogene Verjüngung waldbaulich gewünscht ist und welche Varianz-Mittelwert-Indices optimal sind, ist kaum zu beantworten. Der zudem erkennbare Trend, dass durch die Holzernte eher homogene Verjüngungen heterogener und eher heterogene Verjüngungen homogener werden, erschwert die Brauchbarkeit des Varianz-Mittelwert-Index für eine Schadensbewertung zusätzlich.

Insgesamt erscheint bei den Kennziffern eine Kombination der durchschnittlichen Stammzahlreduktion mit der durchschnittlichen Veränderung der maximalen Verjüngungshöhe am sinnvollsten. Allerdings müssten aus waldbaulicher Sicht zusätzlich Mindeststammzahlen definiert werden.

6.4.2 zur verjüngungsfreien Bestandesfläche

In der Praxis bedeuten relevante Verjüngungsschäden immer Bereiche ohne Verjüngung. Die **Veränderung des Anteils verjüngungsfreier Bestandesfläche** ist daher zur Bewertung der Schäden sicher grundsätzlich geeignet. Ein Bezug auf die absoluten Werte vor dem Hieb wäre aber notwendig.

Auch die **Veränderung des mittleren verjüngungsfreien Bereiches** ist ein wichtiger Weiser. Je größer ein verjüngungsfreier Bereich ist, desto größer ist der Schaden zu bewerten. Da die Daten auf einem Probekreisraster basieren, existiert aber eine große Unsicherheit bezüglich der Güte der Realitätsabbildung. Zudem werden die Veränderungen durch die verwendete Spline-Funktion zwar sehr ansprechend visualisiert (siehe Abb. 90, S. 122), die berechneten absoluten Werte entsprechen aber sicher nicht vollständig der Realität. Die Veränderung der Werte ist hier aber wahrscheinlich präziser. Für den Vergleich verschiedener Arbeitsverfahren erscheinen die beiden Kennwerte prinzipiell geeignet.

Allerdings sind sie in dieser Form nur sehr aufwändig über das GIS-Programm ArcView zu ermitteln. Möglicherweise reicht bei der Veränderung des Anteils verjüngungsfreier Bestandesfläche die Anzahl verjüngter Probekreise vor und nach dem Hieb aus, wodurch auf die Berechnung mit ArcView verzichtet werden könnte. Bei der Veränderung des mittleren verjüngungsfreien Bereiches ist dies aber keinesfalls möglich.

6.4.3 zum Verfahren der FVA Baden-Württemberg

Die Übertragung des Verfahrens der FVA Baden-Württemberg (BURGHARDT et al. 2003) auf die untersuchten Versuchsflächen verursachte eine Reihe von Problemen. Die einzelnen kritischen Punkte werden daher nachfolgend diskutiert.

Die ersten Schwierigkeiten verursachten die unterschiedlichen **Probekreisgrößen**. Auf allen Versuchsflächen wurden 2,5m² große Probekreise verwendet. BURGHARDT et al. verwendeten allerdings 10m² große Probekreise. Infolgedessen mussten die Soll- und Mindestpflanzenzahlen umgerechnet werden. Es ergaben sich dabei teilweise Werte mit Nachkommastellen, die auf ganze Zahlen gerundet werden mussten. Bei Werten unter eins wurde hier grundsätzlich aufgerundet, ansonsten wurde nach den üblichen mathematischen Regeln gerundet. In drei von vier Fällen erfolgte daher eine Rundung auf die nächst höhere, ganze Zahl. Insgesamt gesehen erhöhten sich die probekreisbezogenen Soll- und Mindestpflanzenzahlen aufgrund der überwiegenden Aufrundungen gegenüber den ursprünglichen Werten.

Mit der Umrechnung der Soll- und Mindestpflanzenzahlen wurde außerdem die Abstufung der Schadklassen in Teilen hinfällig. Wenn zum Beispiel als Mindest- und als Sollpflanzenzahl nur ein Baum gefordert war, so waren nur zwei Zustände denkbar. Die Schadklasse der Probekreise war entweder 0 oder 4. Ähnliches galt, wenn die Mindestpflanzenzahl eins war und der Soll-Wert bei zwei lag.

Weitere Probleme verursachte das Hochrechnen der 0,5m²-Probekreise („kleine Probekreise“) auf die Fläche der 2,5m²-Probekreise („große Probekreise“). Die Anzahl der Bäume in den kleinen Probekreisen wurde dazu mit fünf multipliziert. In der Höhenstufe 21-50cm waren daher entweder keine Pflanzen oder aber Vielfache von fünf vorhanden. Als Folge davon konnten Probekreise, bei denen diese Höhenstufe bewertet wurde, nur der Schadklasse 0 oder 4 angehören.

Ein weiteres Problem ergab sich bei der Bewertung von **Verjüngung über 1,3m**. Die vorgegebenen Mindest- und Sollwerte aus dem ursprünglichen Verfahren sind nur für Verjüngung bis zu einer Höhe von 1,3m („Äserhöhe“) vorgesehen. Da der vom Einzelbaum beanspruchte Standraum sich mit zunehmender Baumhöhe vergrößert, nehmen die geforderten Stammzahlen immer weiter ab. Soll also höhere Verjüngung bewertet werden, so müssten angepasste Soll- und Mindestwerte zu Grunde gelegt werden. Eine Einteilung in weitere Höhenstufen machte hier aufgrund der geringen Probekreisgröße allerdings keinen Sinn, denn die geforderten Pflanzenzahlen in der ehemaligen Höhenstufe 51-130cm hatten alle bereits den Wert eins erreicht (Ausnahme: Sollwert für Buche). Die Soll- und Mindestwerte weiterer Höhenstufen hätten daher Werte unter eins annehmen müssen. Da aber eine Bewertung von Bäumen immer nur als Ganzes möglich ist, ist eins der kleinste mögliche Wert für Mindest- und Sollwerte. Wäre die ursprüngliche Probekreisgröße von 10m² verwendet worden, wäre die Einführung von weiteren Höhenstufen mit neuen Soll- und Mindestwerten aber in jedem Fall sinnvoll und notwendig gewesen.

Schließlich bedarf die **Gleichsetzung von Holzernteschäden und Verbisschäden** einer näheren Betrachtung. Das ursprüngliche Bewertungsverfahren unterscheidet in Bezug auf Schäden nur zwei Zustände der Verjüngungspflanzen, nämlich „verbissen“ oder „unverbissen“. Bei der Anwendung auf Holzernteschäden wurden diese beiden Attribute in „betroffen“ bzw. „nicht betroffen“ übersetzt. Die Anwendung des Bewertungsverfahrens war damit grundsätzlich möglich.

Allerdings muss bei der Betrachtung der Ergebnisse bedacht werden, dass sehr unterschiedliche Schadensarten in der Kategorie „betroffen“ zusammengefasst wurden. Nur „fehlende“ Pflanzen sind tatsächlich nach dem Hieb nicht mehr vorhanden. „Beschädigte“ Verjüngung existiert hingegen weiter und nimmt am

Bestandesleben (möglicherweise) weiterhin teil. Wie bereits erwähnt, liegen nur wenig Erkenntnisse über die weitere Entwicklung der beschädigten Verjüngung in Abhängigkeit von Schadensart und Schadensausprägung vor. Allerdings kann man sicherlich nicht davon ausgehen, dass alle beschädigten Pflanzen absterben oder im Bestandeskollektiv völlig absinken. Es ist durchaus denkbar, dass zumindest ein Teil der beschädigten Verjüngung die Aufgaben im Bestand weiterhin erfüllen kann.

Die errechneten mittleren Schadklassen bilden insofern den „worst case“ ab, weil keine Unterschiede zwischen den Schadensarten gemacht wurden. Man kann daher annehmen, dass in Wirklichkeit der Schaden etwas weniger hoch ausfällt, als die mittlere Schadklasse vermuten lässt. Es bleibt damit etwas Raum für waldbauliche Flexibilität und auch für Schäden durch zukünftige Hiebe.

Alles in allem darf die Anwendung dieses Verfahrens aus der Wildschadensbewertung nur als ein erster Versuch gesehen werden, Holzernteschäden differenziert und auf der Grundlage von waldbaulichen Kriterien zu betrachten. Das Verfahren von BURGHARDT et al. (2003) ist in seinen Grundzügen durchaus auf Holzernteschäden anwendbar. Bereits die ersten Versuche erbrachten interessante Ergebnisse (vgl. Kap. 5.3.4). Der sehr plausible deutliche Einfluss der Eingriffsstärke in Verbindung mit der Eliminierung von Ausreißern, die beim Schadprozent auftraten, deutet grundsätzlich auf ein **sehr gutes Funktionieren dieses Verfahrens hin**.

Ein grundlegender Vorteil der „Schadklasse“ gegenüber dem Schadprozent ist die differenziertere Betrachtung der Verjüngung. Dies wird erreicht durch den Bezug auf den einzelnen Probekreis und die Einteilung der Verjüngung in Höhenstufen. Außerdem wird in jedem Probekreis maximal die Soll-Stammzahl berücksichtigt. Rechnerische Verschiebungen, wie sie beim Schadprozent auftreten, können dadurch weitgehend vermieden werden.

Allerdings sind für zukünftige Anwendungen des Verfahrens weitere Anpassungen notwendig. So könnte beispielsweise die Probekreisgröße überdacht werden, um auch für sehr hohe Verjüngung sinnvolle Mindest- und Sollwerte zu gewährleisten. Eine variable Probekreisgröße in Abhängigkeit von der Verjüngungshöhe könnte hier zielführend sein. Außerdem erscheint die Einführung weiterer Höhenstufen mit entsprechenden Mindest- und Sollwerten notwendig. Und auch eine differenzierte Betrachtung der Schäden wäre wichtig, um konkretere Aussagen über die Bestandesentwicklung treffen zu können.

Die mittlere Schadklasse könnte als Bewertungsgrundlage von Holzernteschäden für Waldbesitzer dienen. Auch als Vergleichsindex für die Pfléglichkeit verschiedener Hiebsmaßnahmen bzw. Holzernteverfahren erscheint sie grundsätzlich geeignet.

Die Errechnung der mittleren Schadklasse darf aber nicht als die abschließende Bewertung von Holzernteschäden an Verjüngung gesehen werden. Die eigentliche Bewertung eines Schadens im engeren Sinne kann letztendlich immer nur Sache des Waldbesitzers sein, der zu entscheiden hat, ob er eine bestimmte mittlere Schadklasse toleriert oder nicht.

6.4.4 zum Waldwachstumssimulator SILVA

Die Verwendung des Waldwachstumssimulators SILVA ermöglicht grundsätzlich die vergleichende Betrachtung der Verjüngungsentwicklung mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden. Die Differenz zwischen diesen beiden Fällen kann in idealer Weise als Maß zur Bewertung der Holzernteschäden herangezogen werden. Zusätzlich können mit Hilfe des Simulators Grenzwerte ermittelt werden, ab denen eine Gefährdung des Verjüngungsziels droht.

Das verwendete Verjüngungsmodul befand sich allerdings noch in der Testphase. Zudem konnten verschiedene Holzernteverfahren (noch) nicht simuliert werden, da eine Modifikation der Fällwinkel nicht möglich war. Auch die Unsicherheit bezüglich der Bedeutung verschiedener Schadensarten für die Entwicklung des einzelnen Verjüngungsbaums wirkt sich auf die Genauigkeit der Simulation der Holzernteschäden aus. Der bisher gewählte pragmatische Ansatz reduziert die Höhe beschädigter Verjüngungsbäume einfach auf die Hälfte.

Als Kennziffer für eine Schadensbewertung wäre ein Bezug der durchschnittlichen maximalen Verjüngungshöhe auf die gesamte Anzahl der Verjüngungsquadrate möglicherweise zielführender. Die dadurch entstehende Dämpfung der Ergebnisse durch Quadrate ohne Verjüngung würde durch eine erhöhte Vergleichbarkeit der Ergebnisse mehr als ausgeglichen.

Des Weiteren sollte nicht vergessen werden, dass eine gewisse Anzahl von Durchläufen bei der riesigen Anzahl an Zufallsfaktoren, die in SILVA berücksichtigt werden, notwendig ist, um gesicherte Ergebnisse zu liefern. Allein der Zeitpunkt von Samenjahren kann das Ergebnis drastisch beeinflussen.

Trotzdem ist dieser Bewertungsansatz äußerst Erfolg versprechend. Der Einbau der Funktionen des Schadensermittlungsmodells funktionierte bereits hervorragend. Bei Einbau der verschiedenen Optionen des Hiebsstrukturmodells und mit genauerer Kenntnis der Entwicklung beschädigter Verjüngungspflanzen könnten wichtige Erkenntnisse für die Bewertung von Holzernteschäden an Verjüngung gewonnen werden. Im Gegenzug sorgt der Einbau der Funktionen zu den Schadenswahrscheinlichkeiten für die Berechnung von „realistischeren“ Stammzahlen innerhalb des Verjüngungsmoduls.

6.5 Folgerungen für die forstliche Praxis

Zwischen den untersuchten **Arbeitsverfahren** wurden teils deutliche Unterschiede in Bezug auf die Schadenshöhe festgestellt. So verursachen die motormanuellen Verfahren aufgrund der Möglichkeit, die Kronen zielgerichtet auf die Rückegassen zu fällen, geringere Schäden als die hochmechanisierten und kombinierten Verfahren. Allerdings wurden hier die speziell für den Einsatz in vorausverjüngten Beständen konzipierten großen Raupenharvester (z.B. Impex „Hannibal“, Impex „Königstiger“) nicht untersucht. Diese verursachen anderen Untersuchungen zufolge weit weniger Schäden als die hier untersuchten Radharvester. Bei allen untersuchten Arbeitsverfahren scheinen die entstandenen Schäden sich aber grundsätzlich auf vertretbarem Niveau zu bewegen, da die Verjüngung der Versuchsbestände trotz der teilweise sehr hohen Schadprozente bei den hochmechanisierten und kombinierten Arbeitsverfahren nicht gefährdet zu sein scheint.

Die **Eingriffsstärke** ist die wahrscheinlich entscheidende Einflussgröße auf die Schadenshöhe. Der Anteil betroffener Verjüngung steigt in etwa proportional mit dem entnommenen Holzvolumen an (zumindest im Bereich einer Entnahme von 60-120Efm/ha). Bei einer Entnahme von 100Efm/ha sind in etwa 30% der Verjüngung vom Hieb betroffen.

Des Weiteren kann die Bedeutung eines systematischen **Rückegassennetzes** nicht hoch genug eingeschätzt werden. Die Rückegassen sind die Bereiche, in denen sich die Schäden konzentrieren. Fehlen sie in größeren Teilbereichen, so verteilen sich die Schäden im Bestand mit weitgehend negativen Folgen. Der **Rückegassenabstand** ist dabei zweitrangig, sollte aber zur Minimierung der Verjüngungsschäden nicht über 40m liegen.

Zur Minimierung der Schäden kann eine optimale **Schlagordnung** wesentlich beitragen. Werden die Kronen der Bäume auf die Rückegassen gefällt, entstehen die wenigsten Schäden im Bestand. Dies ist umso wichtiger, da bei motormanueller Holzernte deutlich mehr Fällschäden als Rückeschäden entstehen und der Hauptteil der Fällschäden auf die Krone zurückzuführen ist.

Die wenigsten Schäden entstehen bei der Fichte im **Höhenbereich** zwischen 2,0m und 2,5m, bei der Buche zwischen 1,0m und 1,5m. Eine Orientierung der waldbaulichen Verfahren an diesen Werten erscheint daher wünschenswert. Die Schadenswahrscheinlichkeit nimmt insgesamt mit steigender Verjüngungshöhe leicht ab. Allerdings entstehen bei höherer Verjüngung durch geringere Stammzahlen eher Lücken als bei niedrigerer Verjüngung. Zudem sind Verluste immer schwerer und zeitraubender zu kompensieren, je höher die Verjüngung ist. Die Entnahme der letzten Altbestandsbäume sollte daher nicht zu lange hinausgezögert werden.

Hinsichtlich der **Bewertung der Holzernteschäden an Verjüngung** erscheint der Bezug auf probekreisbezogene Leitstammzahlen sinnvoll. In jedem Fall ist die mittlere Schadklasse nach BURGHARDT et al. (2003) rechnerischen Verschiebungen weit weniger stark ausgesetzt als das Schadprozent bezogen auf die Gesamtstammzahl einer Parzelle. Die Ergebnisse werden dadurch weniger stark verzerrt, was zu einer Verbesserung der Aussagekraft führt. Für eine zukünftige, praktische Anwendung ist aber eine Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens notwendig. Bei der Festlegung von Leitstammzahlen sollte immer ein Puffer einkalkuliert werden, um dem Waldbauer eine möglichst große Flexibilität zu bieten, insbesondere auch hinsichtlich eventueller Schäden durch zukünftige Hiebe.

Auch die Veränderung der verjüngungsfreien Bestandesfläche und die Simulation der Verjüngungsentwicklung mit dem Waldwachstumssimulator SILVA sind Erfolg versprechende Bewertungsansätze.

6.6 Forschungsbedarf

Weitergehende Untersuchungen erscheinen in folgenden Bereichen notwendig:

- Hinsichtlich des **Arbeitsverfahrens** sollten die großen Raupenharvester (z.B. Impex „Hannibal“, Impex „Königstiger“) zusätzlich untersucht werden. Sie stellen das hochmechanisierte Standardverfahren in vorausverjüngten Beständen dar. Auch der Einfluss der Jahreszeit sollte überprüft werden, genau wie der Einfluss verschiedener Sortimenten (v.a. Kurz-/Langholz). Wünschenswert (aber methodisch schwer lösbar) wäre eine Untersuchung der durch die Rückung des Holzes entstehenden Schäden. Auch die Vorgänge bei der Harvesteraufarbeitung sollten genauer betrachtet werden. Insbesondere der Arbeitsschritt Aufarbeiten/Vorliefern, bei dem die Krone durch den Bestand und damit durch vorhandene Verjüngung gezogen wird, bedarf einer intensiven Untersuchung.
- Weitere **Baumarten** in Altbestand und Verjüngung sollten untersucht werden. Während das Hiebsstrukturmodell grundsätzlich mit nahezu allen Baumarten rechnen kann, ist das Schadensermittlungsmodell hier auf konkrete Daten angewiesen.

- Die **Langzeitbeobachtung** (ca. 3-5 Jahre) der Entwicklung beschädigter Verjüngungsbäume ist dringend notwendig, um alle Schadensarten bewerten zu können. Auch die Gesamtentwicklung unterschiedlicher Verjüngung nach Holzerntemaßnahmen sollte längerfristig dokumentiert werden, um konkrete Methoden der Schadensbewertung hinsichtlich ihrer Aussagekraft überprüfen zu können.
- Eine **praxistaugliche Bewertungsmethode** für Holzernteschäden an Verjüngung sollte entwickelt werden. Damit ließen sich verschiedene Arbeitsverfahren miteinander vergleichen und Grenzwerte definieren. Dabei sollte insbesondere das viel versprechende Verfahren der FVA Freiburg zur Wildschadensbewertung mit den vorgesehenen Probekreisgrößen und Stammzahlen getestet und zusätzlich weiterentwickelt bzw. an die Holzernteschäden angepasst werden.
- Das Hiebsstrukturmodell sollte Eingang in den Waldwachstumssimulator **SILVA** finden. Dadurch könnten die Auswirkungen verschiedener Arbeitsverfahren auf die Entwicklung der Verjüngung deutlich besser simuliert werden.

7 Zusammenfassung

Bei der Holzernte in vorausverjüngten Beständen entstehen zwangsläufig Schäden an den Verjüngungsbäumen. Durch den waldbaulichen Wandel vom Prinzip des Altersklassenwaldes zu „naturnahen“ und „naturgemäßen“ Bewirtschaftungsformen mit langen Verjüngungszeiträumen, stärkerer horizontaler und vertikaler Strukturierung der Bestände und der Bevorzugung von Naturverjüngung überschneiden sich die Nutzung des Altbestandes und seine Verjüngung zeitlich und räumlich zunehmend. Infolgedessen wächst die Bedeutung von Holzernteschäden an Verjüngung, die den Folgebestand bilden soll, immer mehr an.

Die vorliegende Arbeit führt die Ergebnisse von 13 Versuchsflächen aus drei Projekten zusammen und beschäftigt sich mit den Auswirkungen von motormanuellen, hochmechanisierten und kombinierten Holzernteverfahren auf **Fichten-Buchen-Verjüngung**. Des Weiteren werden die Folgen von Windwurf und anschließender hochmechanisierter Aufarbeitung untersucht. Neben den Versuchsflächen, auf denen die Verjüngung in einem systematischen 5x5m-Stichprobenraster erhoben wurde, wurden 150 Einzelbäume (Buchen und Fichten) motormanuell zielgerichtet in Verjüngung gefällt, um die Fällschäden pro betroffener Flächeneinheit zu ermitteln. Die Aufnahme der Verjüngung fand dabei in allen Fällen vor und nach der Holzerntemaßnahme statt. Die durch den Hieb vernichteten Verjüngungsbäume wurden in der Schadenskategorie „**fehlend**“ erfasst. Bei der nach dem Hieb noch vorhandenen, aber **beschädigten** Verjüngung wurden die entstandenen Schäden in die Kategorien Brüche, Rindenschäden, Lageveränderungen und Mehrfachschäden eingeteilt.

Durch die Analyse von Art und Höhe der entstandenen Schäden und ihrer räumlichen Verteilung im Bestand wurden **Unterschiede zwischen den untersuchten Arbeitsverfahren** und die wichtigsten Einflussfaktoren ermittelt. Der Anteil fehlender Verjüngung betrug auf den mit **motormanuellen Verfahren** bearbeiteten Versuchsflächen 7-15%. Weitere 1-6% der Verjüngung waren beschädigt vorhanden, so dass insgesamt **8-21%** der Bäume von den Hieben betroffen wurden. Auf den mit **hochmechanisierten Verfahren** (Radharvester) beernteten Versuchsflächen fehlten nach den Eingriffen 8-26% der Verjüngungsbäume. Hinzu kamen 12-21% beschädigter Verjüngung. Mit insgesamt **20-46%** betroffener Verjüngung traten hier bei vergleichbaren Eingriffsstärken deutlich mehr Schäden auf als bei der motormanuellen Holzernte. Die untersuchten **kombinierten Verfahren** (Zufällung und „Königsbronner Harvesterverfahren“) verursachten 9-29% fehlende und 8-16% beschädigte Verjüngung. Die Schäden lagen mit insgesamt **26-46%** betroffener Verjüngung auf einem ähnlich hohen Niveau wie bei den hochmechanisierten Verfahren. Durch den **Windwurf und die Aufarbeitung des Sturmholzes** wurden 50% der Verjüngung vernichtet. Weitere 6% wurden beschädigt, so dass insgesamt **56%** der Verjüngung betroffen war. Auch bei der „Entnahme“ von über 100 Bäumen pro Hektar überlebte noch die Hälfte der Verjüngungsbäume. In diesem Bereich scheint (bei Konzentration der Befahrung auf die Rückegassen!) der maximal mögliche Schaden zu liegen.

Rückegassenabstand und -breite beeinflussen die Holzernteschäden an Verjüngung kaum, wohingegen die systematische Anlage der Rückegassen für eine Minimierung der Schäden entscheidend ist. Wichtig ist ebenfalls eine sorgfältige und flexible (nicht schematische) **Schlagordnung**, bei der die Kronen möglichst auf die Rückegassen gefällt werden. Bei der Holzernte mit Radharvestern ist dies kaum oder

lediglich eingeschränkt möglich. Durch das Ziehen der gesamten Krone durch den Bestand und damit auch durch vorhandene Verjüngung während der Aufarbeitung entstehen deutlich mehr Schäden als bei der Holzernte mit großen Raupenharvestern oder bei motormanuellen Verfahren. Große Raupenharvester (z.B. Impex „Hannibal“) können aufgrund höherer Hubkräfte den stehenden oder liegenden Baum aus der Verjüngung heben. Bei der motormanuellen Holzernte wird lediglich der Stamm mit einem Schlepper aus der Verjüngung gezogen. Allerdings verbleibt in diesem Fall deutlich mehr **Kronenmaterial** (Schlagraum) im Bestand und kann Verjüngung unter sich begraben, während es bei der hochmechanisierten Holzernte auf den Rückegassen als Reisigmatte konzentriert wird.

Auf allen Versuchsflächen mit regelmäßigem Rückegassennetz stieg die Wahrscheinlichkeit für einen Verjüngungsbaum, durch den Hieb vernichtet zu werden, mit zunehmender Nähe zu den Rückegassen deutlich an. Im Gegensatz dazu war keine eindeutige **Konzentration** der beschädigten, aber noch vorhandenen Verjüngungsbäume an den Rückegassen erkennbar.

Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Höhe der Schäden ist die **Stärke des Eingriffs**. Die Fällung von Buchen und Fichten verursacht dabei unterschiedliche Schäden an der Verjüngung. Pro betroffener Flächeneinheit verursachen Buchenstämme mehr Schäden als Fichtenstämme, während durch Fichtenkronen mehr Schäden als durch Buchenkronen entstehen. Bei gleicher Eingriffsstärke wird allerdings durch die Fällung von Fichten weniger Bestandesfläche betroffen als durch die Fällung von Buchen oder Eichen. **Stammbereiche** verursachen deutlich mehr Schäden pro betroffener Flächeneinheit als Kronenbereiche. Da die **Kronenbereiche** allerdings eine drastisch höhere Fläche betreffen als die Stammbereiche, wird der überwiegende Teil der Schäden durch die Kronen der gefällten Bäume verursacht.

Von den untersuchten **Baumarten der Verjüngung** wurden Buchen insgesamt stärker als Fichten betroffen. Dies war auf den deutlich höheren Anteil fehlender Buchen gegenüber dem Anteil fehlender Fichten zurückzuführen. Deutliche Unterschiede zwischen den Baumarten bezüglich des Anteils beschädigt vorhandener Verjüngung konnten nicht festgestellt werden.

Die Wahrscheinlichkeit für den einzelnen Verjüngungsbaum, durch den Hieb vernichtet zu werden, sank bei allen Verfahren mit zunehmender **Höhe des Baumes**, während die Wahrscheinlichkeit für einen beschädigten, aber noch vorhandenen Verjüngungsbaum mit zunehmender Höhe stieg. Die Wahrscheinlichkeit für einen insgesamt betroffenen Verjüngungsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe zeigte aufgrund dieser beiden gegenläufigen Trends bei allen Versuchsflächen ein Minimum. Bei den hochmechanisierten und kombinierten Verfahren war dieses bei 1,5m bis 2m zu finden, während es bei den motormanuellen Verfahren und der Windwurfauflistung im Bereich von 4m bis 6m und damit deutlich höher lag.

Für den Regelfall der motormanuellen Holzernte wurde ein **Prognosemodell** entwickelt, das die Fällschäden über die Berechnung der betroffenen Bestandesfläche ermittelt und damit eine Entkopplung von der klassischen Versuchsflächenanlage erreicht. Dazu werden die Einflussfaktoren in Eigenschaften des Arbeitsverfahrens und des Hiebes auf der einen und in Eigenschaften der Verjüngung auf der anderen Seite aufgeteilt. Das **Hiebsstrukturmodell** ermittelt aus den erstgenannten beiden Datengruppen die betroffene Bestandesfläche und die räumliche Verteilung der Schäden im Bestand. Das **Schadensermittlungsmodell** berechnet anschließend auf der Grundlage logistischer Funktionen die auf dieser betroffenen Bestandesfläche entstandenen Schäden. Durch diese Vorgehensweise können unterschiedlichste Situationen bezüglich Feinerschließung, Baumarten-

zusammensetzung etc. simuliert werden. Auch unterschiedliche Arbeitsverfahren sind über verschiedene Möglichkeiten, den Fällwinkel zur Gasse zu modifizieren, darstellbar.

Da lediglich die Fällschäden prognostiziert werden, erfolgt die Umrechnung auf die entstandenen Gesamtschäden durch einen „**Rückefaktor**“, der aus der Anwendung des Prognosemodells auf die Versuchsflächen ermittelt wurde. Bei der motormanuellen Holzernte, für die das Prognosemodell entwickelt wurde, beträgt der Rückefaktor 1,5 (1,3-1,7). Damit werden zwei Drittel der Schäden durch die Fällung und ein Drittel der Schäden durch die Rückung verursacht. Bei Anwendung auf hochmechanisierte und kombinierte Verfahren lagen die Faktoren in deutlich höheren Bereichen mit Werten zwischen 2,1 und 2,8 bzw. 1,8 und 4,6, da hier zusätzlich zu den Rückeschäden weitere Schäden durch das Vorliefern und die Aufarbeitung entstehen, die vom Modell nicht berücksichtigt werden.

Für die **Bewertung von Holzernteschäden an Verjüngung** wurden verschiedene Bewertungsansätze auf ihre grundsätzliche Eignung hin überprüft. Neben der Veränderung von Kennziffern der Verjüngung und der mit dem GIS-Programm ArcView berechneten verjüngungsfreien Bestandesfläche wurden Verfahren der Bewertung von Wildverbiss auf ihre Anwendungsmöglichkeiten für die Bewertung von Holzernteschäden untersucht. Das **Verfahren der FVA Baden-Württemberg** erwies sich dabei als sehr gut geeignet, da es mit probekreisbezogenen Leitstammzahlen arbeitet und somit die räumliche Verteilung der Verjüngung berücksichtigt. Eine Anpassung des Verfahrens an die Besonderheiten der Holzernteschäden und weitere Praxistests sind aber notwendig.

Daneben wurde mit dem **Waldwachstumssimulator SILVA** die unterschiedliche Entwicklung der Verjüngung eines Beispielbestandes mit und ohne Berücksichtigung der Holzernteschäden verglichen. Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass hier in Zukunft ein sehr gutes Werkzeug für die Quantifizierung und Bewertung der Auswirkungen von Holzerntemaßnahmen auf die Verjüngungsentwicklung zur Verfügung steht.

8 Literaturverzeichnis

- Andersson, O., Fries, J. 1979. Orientierende försökrörande plantskador vid fröträdsavverkning. [Pilot study on plant damage in a seed tree cutting]. Sver. Skogsvårdsförb. Tidskr. 77(2):123-129. (In Schwedisch mit englischer Zusammenfassung).
- Archibald, D.J., Arnup, R.W. 1993. The management of black spruce advance growth in northeastern Ontario. NEST Tech. Rep. TR-008, VMAP Rep. No. 93-05.
- Bartelheimer, P., Kroth, W., Sinner, H.U. 1985. Hilfsmittel zur Bewertung von Verbiß und Fegeschäden. AFZ/Der Wald 40:549-552.
- Bartl, M. 1999. Zu: Die natürliche Verjüngung der Buche. AFZ/Der Wald 54(23): 1248-1249.
- Benson, R.E., Gonsior, M.J. 1981. Tree damage from skyline logging in a western larch/douglas-fir stand. USDA For. Serv. Res. Paper INT-268.
- Børset, O. 1976. Probleme der Naturverjüngung in den nordischen Wäldern. Schweiz. Z. Forstwes. 127(3):165-181.
- Brang, P., Duc, P. 2002. Zu wenig Verjüngung im Schweizer Gebirgs-Fichtenwald: Nachweis mit einem neuen Modell. Schweiz. Z. Forstwes. 153(6):219-227.
- Burghardt, F., Suchant, R., Schmutz, I., Brandl, H. 2002. Monetäre Bewertung von Rehwildverbiss in Naturverjüngungen. FVA Einblick 6(1):7-8.
- Daxner, P., Gutmann, A., Hager, H., Kroihner, F., Sagl, W., Stampfer, K., Sterba, H. 1999. Naturnahe Waldwirtschaft und deren Auswirkung auf das Ökosystem Wald - eine ökologische, waldwachstumskundliche, forsttechnische und sozioökonomische Studie. Endbericht BOKU Wien, unveröffentlicht.
- Demuth, K. 2001. Modellüberlegungen zur Auswirkung des Wildverbisses auf die Verjüngung. AFZ/Der Wald 56(4):178-180.
- Feller, S., Weixler, H., Pausch, R. 1997. Holzernte in Fichten-Altbeständen mit einem Raupen-Harvester. AFZ/Der Wald 52(9):478-481.
- Ferguson, D.E., Adams, D.L. 1980. Response of advance grand fir regeneration to overstory removal in northern Idaho. For. Sci. 26(4):537-545.
- Fjeld, D., Granhus, A. 1998. Injuries after selection harvesting in multi-stored spruce stands - the influence of operating systems and harvest intensity. Int. J. For. Eng. 9(2):33-40.
- Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg. 2000. Wiederbewaldung von Sturmschadensflächen. Ergebnisse des Kolloquiums vom 21. bis 22.09.2000 in Freiburg. AFZ/Der Wald 55(23):1219-1226.

- Frisque, G., Weetman, G.F., Clemmer, E. 1978. Reproduction and trial projected yields 10 years after cutting 36 pulpwood stands in eastern Canada. FERIC Tech. Rep. No. TR-23.
- Gadow, K. von, Meskauskas, E. 1997. Stichprobenverfahren zur Erfassung von Naturverjüngungen. *AFZ/Der Wald* 54(5):247-248.
- Gingras, J.-F. 1990. Harvesting methods favouring the protection of advance regeneration: Quebec experience. FERIC Tech. Note TN-144.
- Gingras, J.-F. 1994. A comparison of full-tree versus cut-to-length systems in the Manitoba model forest. FERIC Spec. Rep. SR-92.
- Gingras, J.-F., Cormier, D., Ruel, J.-C., Pin, D. 1991. Comparative study of the impact of three skidding methods on advance regeneration". FERIC Tech. Note TN-163.
- Glöde, D. 2002. Survival and growth of picea abies regeneration after shelterwood removal with single- and double-grip harvester systems. *Scand. J. For. Res.* 17(5):417-426.
- Glöde, D., Sikström, U. 2001. Two felling methods in final cutting of shelterwood, single-grip harvester productivity and damage to the regeneration. *Silva Fennica* 35(1):71-83.
- Gordon, D.T. 1973. Released advance reproduction of white and red fir... growth, damage, mortality. USDA For. Serv. Res. Paper PSW-95.
- Gottfried, G.J. 1987. Effects of modified skidding rules on mixed conifer advance regeneration in Arizona". USDA For. Serv. Res. Note RM-479.
- Gottfried, G.J., Jones, J.R. 1975. Logging damage to advance regeneration on an Arizona mixed conifer watershed. USDA For. Serv. Res. Paper RM-147.
- Granhus, A. 2001a. Partial cutting in Norway spruce: impacts on advance regeneration and residual stand. Doctor Scientiarum Thesis 2001:13. Agricultural University of Norway, Department of Forest Sciences.
- Granhus, A. 2001b. Mortality of Norway spruce advance regeneration after selection harvesting. Manuskript, unveröffentlicht.
- Granhus, A., Fjeld, D. 2001. Spatial distribution of injuries to Norway spruce advance growth after selection harvesting. *Can. J. For. Res.* 31:1903-1913.
- Groot, A. 1995. Harvesting method affects survival of black spruce advance growth. *North. J. Appl. For.* 12(1):8-11.
- Hagström, S. 1994. [A study of logging damage to ingrowth in selection logging]. MSc-Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Forestry. (In Schwedisch mit englischer Zusammenfassung).

- Hosmer, D.W., Lemeshow, S. 1989. Applied logistic regression. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Hosseini, S.M., Madjnonian, B., Nieuwenhuis, M. 2000. Damage to natural regeneration in the Hyrcanian forests of Iran: a comparison of two typical timber extraction operations. *Int. J. For. Eng.* 11(2):69-73.
- Kenk, G., Menges, U., Bürger, R. 1991. Natürliche Wiederbewaldung von Sturmwurfflächen? *AFZ/Der Wald* 46(2):96-100.
- Khrstov, K.P. 1993. [Damage of the undergrowth and soil at main fellings in beech forests]. *Nauka Za Gorata* 30(4):27-36. (In Russisch mit englischer Zusammenfassung).
- Klaushofer, F. 1996. Auswertung von Verjüngungs- und Verbißanalysen. *ÖFZ* 107(7):12-13.
- Kleinbaum, D.G. 1994. Logistic regression. A self-learning text. Springer, New York.
- Korten, S. 1999. Art und Höhe von Fäll- und Rückeschäden an der Naturverjüngung eines naturgemäß bewirtschafteten Fichten-Tannen-Buchen-Bestandes im FoA Griesbach. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der LMU München.
- Korten, S. 2001. Auswirkungen von Windwurf und anschließender Aufarbeitung auf Fichten-Buchen-Vorausverjüngung. Abschlußbericht am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München.
- Korten, S. 2002. Schäden an Naturverjüngung durch Windwurf und anschließende Sturmholzaufarbeitung. *AFZ/Der Wald* 57(3):112-113.
- Korten, S. 2003a. Holzernteschäden an Naturverjüngung. Abschlußbericht am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München.
- Korten, S. 2003b. Schäden an Naturverjüngung durch Holzernte mit Harvestern. Abschlußbericht am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München.
- Korten, S., Pausch, R. 2000. Schäden an Naturverjüngung durch einzelstammweise Holzernte. *AFZ/Der Wald* 55(10):508-509.
- Korten, S., Wurm, J., Pausch, R. 2004. Wo gehobelt wird, da fallen Späne – Schäden an Naturverjüngung bei der Holzernte. *LWF aktuell* Nr. 46(4):31-32.
- McInnis, B.G., Roberts, M.R. 1994. The effects of full-tree and tree-length harvests on natural regeneration. *North. J. Appl. For.* 11(4):131-137.
- Meek, P., Plamondon, J.A. 1996. Effectiveness of cut-to-length harvesting at protecting advance regeneration. *FERIC Tech. Note* TN-242.

- Meng, W. 1978. Baumverletzungen durch Transportvorgänge bei der Holzernte. Ausmaß und Verteilung, Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung. Dissertation an der Universität Freiburg. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg.
- Moog, M., Schaller, M. 2002. Wildschadensbewertung im Wald – Ein Verfahrensvorschlag zur Bewertung von Verbisschäden unter Berücksichtigung der Dichte der unverbissenen Pflanzen. Forstarchiv 73:3-10.
- Moog, M., Wittmann, J. 2003. Strittige Fragen zum Ersatz von Verbisschäden im Wald - Erwiderung zur Stellungnahme von G. Oesten und A. Wurz im Forstarchiv 73:149-157. Forstarchiv 74:141-149.
- Moser, O. 2002. Schutzwald: Verjüngung erhalten. ÖFZ 113(5):44-45.
- Mössnang, M., Kühnel, S. 1999. Natürliche Verjüngung auf Sturmwurfflächen vom Februar 1990 in Bayern: Ergebnisse von Dauerbeobachtungen und Folgerungen für die Praxis. Forschung in Sturmwurf-Ökosystemen Mitteleuropas. Forstliche Forschungsberichte München 176:61-69.
- Oesten, G., Wurz, A. 2002. Stellungnahme zu Wildschadensbewertung im Wald - Ein Verfahrensvorschlag zur Bewertung von Verbisschäden unter Berücksichtigung der Dichte der unverbissenen Pflanzen von Martin Moog und Markus Schaller Forstarchiv 73:3-10. Forstarchiv 73:149-157.
- Örlander, G., Karlsson, C. 2000. Influence of shelterwood density on survival and height increment of picea abies advance growth. Scand. J. For. Res. 15:20-29.
- Pausch, R. 1999. Wechselwirkungen zwischen Bestandsstruktur, biologischer Rationalisierung und forstlichen Verfahrenstechniken in Fichten/Buchen-Betrieben Bayerns. Abschlußbericht am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München.
- Pausch, R. 2002. Ein System-Ansatz zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Waldstruktur, Arbeitsvolumina und Kosten der technischen und biologischen Produktion in Forstrevieren ost- und nordbayerischer Mittelgebirge. Dissertation am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München.
- Pausch, R., Röder, H. 1997. Objektive Beschreibung von Waldbewirtschaftungsformen durch die Formale Begriffsanalyse. Forstliche Forschungsberichte München 165:136-149.
- Plamondon, J.A., Brais, S. 2000. Effects of ghost trails on soils and advanced regeneration. FERIC Advantage 1(34).
- Pollanschütz, J. 1995. Bewertung von Verbiß und Fegeschäden - Hilfsmittel und Materialien. Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien Nr. 169.

- Pothier, D. 1996. Évolution de la regeneration après la coupe de peuplements récoltés selon différents procédés d'exploitation. [Development of regeneration after clear felling by various logging methods]. For. Chron. 72(5):519-527. (In Französisch mit englischer Zusammenfassung).
- Pretzsch, H. 2001. Modellierung des Waldwachstums. Parey Buchverlag, Berlin.
- Preuhsler, T., Jakobi, K.-P. 1996. Auswirkungen eines Nachlichtungshiebes auf die Naturverjüngung - Waldwachstumskundliche Untersuchungen im Bergmischwald-Verjüngungsversuch Ruhpolding 111 RUH 110. Forst und Holz 51(7):205-211.
- Reineke, L.H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. J. Agric. Res. 46(7):627-638.
- Rieder, A. 1999. Streiflichter zum Thema Plenterwald. AFZ/Der Wald 54(4):169-171.
- Rothe, A., Borchert, H. 2003. Der Wald für morgen. Eine Naturalbilanz über 25 Jahre naturnahe Forstwirtschaft im Bayerischen Staatswald. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Nr. 39.
- Rüegg, D., Nigg, H. 2003. Mehrstufige Verjüngungskontrollen und Grenzwerte für die Verbissintensität. Schweiz. Z. Forstwes. 154(8):314-321.
- Ruel, J.-C., Doucet, R., Boily, J. 1995. Mortality of balsam fir and black spruce advance growth 3 years after clear-cutting. Can. J. For. Res. 25:1528-1537.
- Sagl, W. 1995. Bewertung in Forstbetrieben. Blackwell-Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- Saniga, M. 1987. [Evaluation of logging systems from the viewpoint of damage to regenerating beech stands during strip felling in cableway terrain]. Medzinarodna vedecka konferencia 1987, Zvolen. Zbornik referatov. Sekcia 1, 221-227. (In Tschechisch mit englischer Zusammenfassung).
- Saniga, M. 1988a. [Der Einfluss der Nutzungs-Rücketechnologie mit Einsatz des Seilsystems KSK 16 auf die Beschädigung des Nachwuchses beim Saumschlag in gleichaltrigen Buchenbeständen]. Acta Facultatis Forestalis Zvolen 30:39-50. (In Tschechisch mit deutscher und englischer Zusammenfassung.)
- Saniga, M. 1988b. [Einfluss der Holzfällung und Holzbringung auf die Beschädigung des nachfolgenden und Mutterbestandes beim Randhieb in reinen Buchenbeständen]. Lesnický Casopis 34(3):211-227. (In Tschechisch mit deutscher und englischer Zusammenfassung).
- Saniga, M. 1991. [Der Einfluss des Einschlagessowie der Bringung mittels LKT-80 und Rückegespann auf die Beschädigung des Folgebestandes beim Saumschlag in gleichaltrigen Buchenbeständen]. Acta Facultatis Forestalis Zvolen 33:115-124. (In Tschechisch mit deutscher und englischer Zusammenfassung).

- Sanktjohanser, L. 1983. Geometrische Zusammenhänge beim Schwenken von Holz im Zuge der Holzbringung. AFZ 38(13):312-313.
- Saveneh, A.G., Dignan, P. 1997. The use of shelterwood in Eucalyptus regnans forest: the effect of overwood removal at three years on regeneration stocking and health. Austral. For. 60(4):251-259.
- Schepp, W. 1991. Wiederbegründung von Windwurfflächen. AFZ/Der Wald 46(9):448-450.
- Schmidt, N.H. von. 2003. Art und Höhe von Fäll- und Rückeschäden an Buchen-Jungwüchsen. Diplomarbeit am Waldbau-Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, unveröffentlicht.
- Schmitz, F. 1993. Unerwartete Waldentwicklung auf einer Sturmfläche. Forst und Holz 48(9):251-254.
- Schölch, M. 2000. Natürliche Wiederbewaldung von Sturmflächen. AFZ/Der Wald 55(23):1216-1218.
- Schölch, M., Eh, M., Kenk, G. 1994. Natürliche Wiederbewaldung von Sturmflächen. AFZ/Der Wald 49(2):92-95.
- Schönenberger, W., Kasper, H., Lässig, R. 1992. Forschungsprojekte zur Wiederbewaldung von Sturmschadensflächen. Schweiz. Z. Forstwes. 143(10):829-847.
- Schöttle, R., Pfeil, C. 1998. Einsatz von Starkholz-Raupenharvestern in naturverjüngten Altholzbeständen. Versuchsbericht 1998/1, FVA Freiburg, Abteilung Arbeitswirtschaft und Forstbenutzung.
- Schöttle, R., Pfeil, C., Kapahnke, F. 1998. Einsatz von Starkholz-Raupenharvestern in naturverjüngten Altholzbeständen. AFZ/Der Wald 53(19):981-984.
- Schwyzler, A., Zinggeler, J. 2000. Eine neue Methode zur Quantifizierung des Wildverbisses. Schweiz. Z. Forstwes. 151(4):107-116.
- Sikström, U., Westerberg, D. 1996. Skarmavveckling. [Final felling of shelterwoods]. SkogForsk Resultat No. 7/96. (In Schwedisch mit englischer Zusammenfassung).
- Sikström, U., Glöde, D. 2000. Damage to picea abies regeneration after final cutting of shelterwood with single- and double-grip harvester systems. Scand. J. For. Res. 15:274-283.
- Sinner, H.-U. 2002. Stellungnahme zu Wildschadensbewertung im Wald - Ein Verfahrensvorschlag zur Bewertung von Verbisschäden unter Berücksichtigung der Dichte der unverbissenen Pflanzen von Martin Moog und Markus Schaller Forstarchiv 73:3-10. Forstarchiv 73:158-159.

- Skoklefald, S. 1967. Fristilling av naturlig gjenvekst av gran. [Release of natural Norway spruce regeneration]. Meddr. Norske SkogforsVes. 23:381-409. (In Norwegisch mit englischer Zusammenfassung).
- Staupendahl, K. 1997. Ein kombiniertes Stichprobenverfahren zur Erfassung und Beschreibung von Naturverjüngung. In: Pelz, D.R. (Hrsg.), 1997: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Forstliche Biometrie und Informatik - 10. Jahrestagung, Freiburg, 24.-26. September 1997, IUFRO, Grüne Reihe: 32-49.
- Suchant, R., Burghardt, F. 2003. Monetäre Bewertung von Verbisschäden in Naturverjüngungen. AFZ/Der Wald 58(13):633-636.
- Tesch, S.D., Lysne, D.H., Mann, J.W., Helgerson, O.T. 1986a. Damage to regeneration during shelterwood overstory removal on steep terrain: a case study. For. Res. Lab., Oregon State University. Res. Note No. 79.
- Tesch, S.D., Lysne, D.H., Mann, J.W., Helgerson, O.T. 1986b. Mortality of regeneration during skyline logging of a shelterwood overstory. J. For. 84(6):49-50.
- Tesch, S.D., Crawford, M.S., Baker-Katz, K. 1990. Recovery of Douglas-fir seedlings from logging damage in southwestern Oregon: Preliminary evidence. Northwest Science 64(3):131-139.
- Tesch, S.D., Baker-Katz, K., Korpela, E.J., Mann, J.W. 1993. Recovery of Douglas-fir seedlings and saplings wounded during overstory removal. Can. J. For. Res. 23(8):1684-1694.
- Traut, A., Wagner, W. 1997. Beschreibung der waldbaulich-ökologischen Situation auf einer nicht aufgearbeiteten Sturmwurf Fläche im Nationalpark Bayerischer Wald. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der LMU München.
- Vorob, V.N., Danchenko, A.M., Bekh, I.A., Panevin, V.S., Burkov, V.P. 1994. [Is it possible to preserve advance growth when using harvesters?]. Lesnoe Khozyaistvo 6:33-34. (In Russisch mit englischer Zusammenfassung).
- Wagner, K. 2000. Sturmholzstudien-Übersicht. ÖFZ 111(5):27-28.
- Weidenbach, P. 1991. Walderneuerung auf Sturmwurf Flächen. AFZ/Der Wald 48(5):216-220.
- Weixler, H. 2000. Pflughlichkeit von Raupen-Harvestern gegenüber Bestand und Boden. Treffen der Sektion Forsttechnik 8.-10.3.2000 in Freising, Tagungsband.
- Weixler, H., Feller, S., Schauer, H. 1997. Produktivität und Pflughlichkeit eines Langkran-Harvesters. Abschlußbericht der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF.

Westerberg, D., Berg, S. 1994. Avverkning av överstandare: forsoksmetod for att bestamma prestation, kostnad och skador pa foryngningen. [Felling of standards: trial method for determining productivity, costs and damage to advance growth]. SkogForsk Redogörelse No. 10. (In Schwedisch mit englischer Zusammenfassung).

Westerberg, D., Sikström, U. 1996. Skarmhuggning. [Shelterwood cutting]. SkogForsk Resultat No. 6. (In Schwedisch mit englischer Zusammenfassung).

Wurm, J. 2004. Schäden an Naturverjüngung durch hochmechanisierte und kombinierte Holzernteverfahren. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München.

Youngblood, A.P. 1990. Effect of shelterwood removal methods on established regeneration in an Alaska white spruce stand. Can. J. For. Res. 20(9):1378-1381.

9 Anhang

9.1 Lage der Versuchsflächen

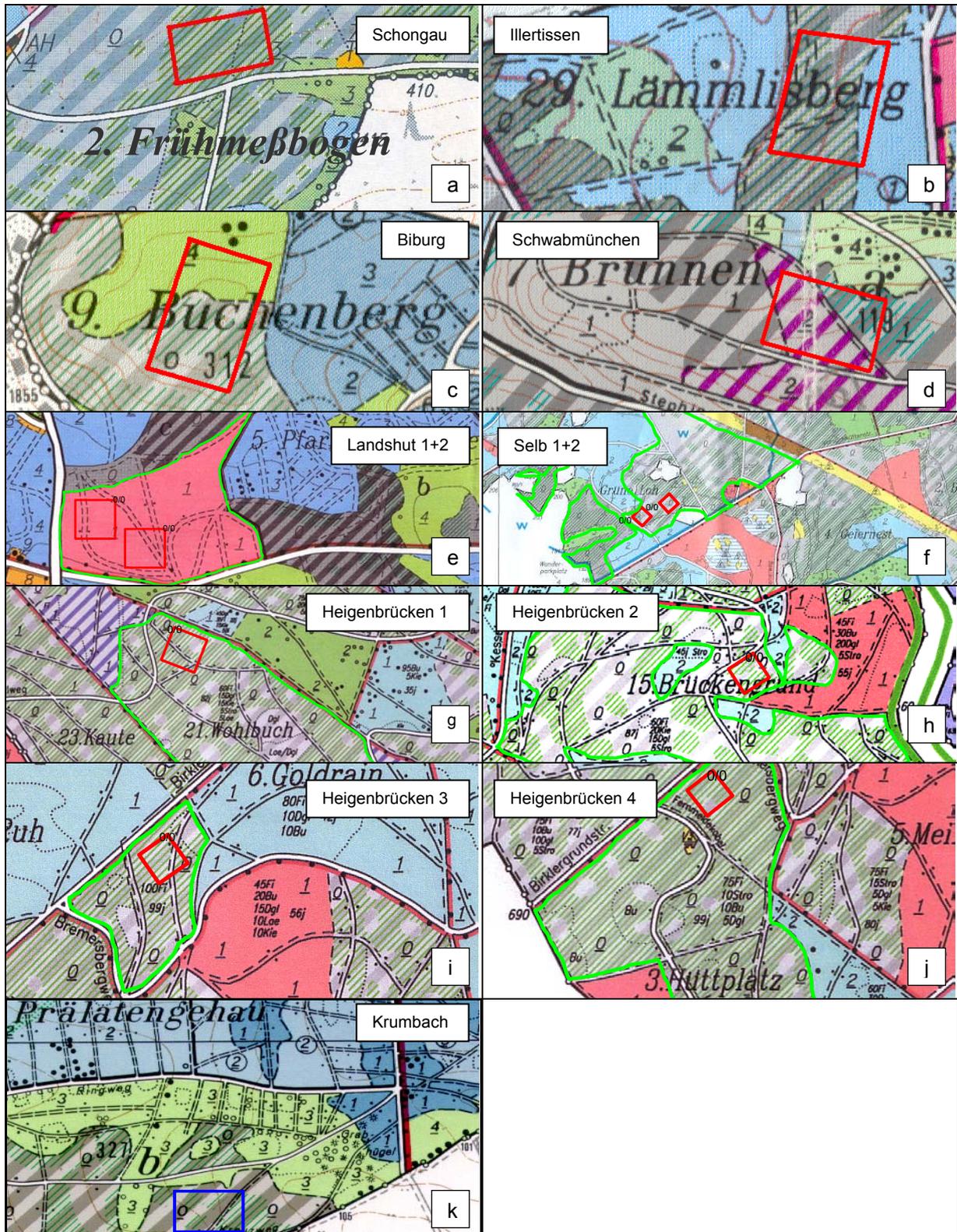


Abbildung 97 a-k: Auszüge aus den Forstbetriebskarten mit der Lage der Versuchsflächen

9.2 Technische Daten der eingesetzten Harvester



Abbildung 98 a-d: Eingesetzte Harvester

Tabelle 52: Technische Daten der eingesetzten Harvester

	Timberjack 1270A	Ponsse HS10 Cobra	Ponsse Ergo	Meindl RH180
Motorleistung	114kW (154PS)	157kW (213PS)	180kW (244PS)	133 kW (180PS)
Motor	Perkins 1006-6T	CAT 3116 TA	MB OM 906 LA	Deutz
Gesamtgewicht	15.000kg	14.500kg	16.800kg	17.000kg
Breite (je nach Reifen)	2680- 2880mm	2610- 2810mm	2640- 2840mm	2750mm
Krantyp	Timberjack L190	Ponsse HN125	Ponsse HN125	Mowi 170L
Kranreichweite	10,0m	10,0m	10,0m	10,7m
Kranhubmoment	147kNm	155kNm	160-190kNm	k. A.
Kranschwenkmoment	30kNm	35kNm	36kNm	k. A.
Harvesteraggregat	Timberjack 746B	Ponsse H60	Ponsse H73	Keto 500L
Max. Fälldurchmesser	500mm	640mm	720mm	600mm
Entastungsdurchmesser	30-390mm	90-490mm	k. A.	max. 600mm

9.3 Schadenswahrscheinlichkeiten

9.3.1 Schadenswahrscheinlichkeit „fehlend“

Variablen in der Gleichung

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95,0% Konfidenzintervall für EXP(B)		
							Unterer Wert	Oberer Wert	
Schritt 1	NVHOEHE	,000	,001	,069	1	,793	1,000	,999	1,002
	NVBART	,370	,072	26,189	1	,000	1,447	1,256	1,667
	ABBART	,881	,101	75,499	1	,000	2,413	1,978	2,943
	BEREICH	,912	,083	121,559	1	,000	2,489	2,117	2,927
	LNPKPROZ	,289	,020	200,126	1	,000	1,334	1,282	1,389
	WW1	-,003	,001	12,904	1	,000	,997	,995	,998
	WW2	-,003	,001	7,618	1	,006	,997	,995	,999
	WW3	-,007	,001	69,294	1	,000	,993	,991	,994
	WW6	-1,596	,106	228,252	1	,000	,203	,165	,249
	WW8	,006	,001	33,225	1	,000	1,006	1,004	1,007
	WW9	,005	,001	15,280	1	,000	1,005	1,002	1,007
	Konstante	-,849	,073	136,434	1	,000	,428		

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: NVHOEHE, NVBART, ABBART, URSACHE, LNPKPROZ, WW1, WW2, WW3, WW6, WW8, WW9.

Modellzusammenfassung

Schritt	-2 Log-Likelihood	Cox & Snell R-Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	21722,295	,050	,070

9.3.2 Schadenswahrscheinlichkeit „beschädigt“

Variablen in der Gleichung

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95,0% Konfidenzintervall für EXP(B)		
							Unterer Wert	Oberer Wert	
Schritt 1	NVHOEHE	,008	,001	153,607	1	,000	1,008	1,006	1,009
	NVBART	,280	,218	1,648	1	,199	1,323	,863	2,029
	ABBART	1,011	,164	38,205	1	,000	2,747	1,994	3,785
	BEREICH	-,514	,109	22,017	1	,000	,598	,483	,741
	LNPKPROZ	,525	,040	173,869	1	,000	1,690	1,563	1,827
	WW1	-,004	,001	11,112	1	,001	,996	,994	,998
	WW2	-,003	,001	7,857	1	,005	,997	,994	,999
	WW3	-,003	,001	26,452	1	,000	,997	,996	,998
	WW4	-1,008	,243	17,233	1	,000	,365	,227	,587
	WW5	,448	,143	9,808	1	,002	1,564	1,182	2,070
	WW6	-,514	,143	12,901	1	,000	,598	,452	,792
	WW7	,007	,002	18,280	1	,000	1,007	1,004	1,010
	Konstante	-1,573	,101	244,685	1	,000	,207		

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: NVHOEHE, NVBART, ABBART, URSACHE, LNPKPROZ, WW1, WW2, WW3, WW4, WW5, WW6, WW7.

Modellzusammenfassung

Schritt	-2 Log-Likelihood	Cox & Snell R-Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	10312,924	,054	,092

9.3.3 Schadenswahrscheinlichkeit „Bruch“

Variablen in der Gleichung

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95,0% Konfidenzintervall für EXP(B)		
							Unterer Wert	Oberer Wert	
Schritt 1	NVHOEHE	,007	,001	116,142	1	,000	1,007	1,006	1,008
	NVBART	1,426	,261	29,780	1	,000	4,161	2,493	6,943
	ABBART	-,421	,177	5,674	1	,017	,656	,464	,928
	BEREICH	-,634	,144	19,495	1	,000	,531	,400	,703
	LNPKEPROZ	,371	,059	39,403	1	,000	1,449	1,290	1,627
	WW1	-,009	,002	33,176	1	,000	,991	,988	,994
	WW4	-,682	,299	5,191	1	,023	,506	,281	,909
	WW5	,535	,172	9,728	1	,002	1,708	1,220	2,391
	WW7	,004	,002	8,452	1	,004	1,004	1,001	1,007
	Konstante	-2,949	,146	405,268	1	,000	,052		

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: NVHOEHE, NVBART, ABBART, URSACHE, LNPKEPROZ, WW1, WW4, WW5, WW7.

Modellzusammenfassung

Schritt	-2 Log-Likelihood	Cox & Snell R-Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	5078,661	,018	,051

9.3.4 Schadenswahrscheinlichkeit „Rindenschaden“

Variablen in der Gleichung

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95,0% Konfidenzintervall für EXP(B)		
							Unterer Wert	Oberer Wert	
Schritt 1	NVHOEHE	,007	,001	34,683	1	,000	1,007	1,005	1,010
	NVBART	2,044	,473	18,658	1	,000	7,721	3,054	19,518
	BEREICH	-,1205	,338	12,706	1	,000	,300	,154	,581
	LNPKEPROZ	,169	,174	,937	1	,333	1,184	,841	1,666
	Konstante	-7,047	,556	160,907	1	,000	,001		

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: NVHOEHE, NVBART, URSACHE, LNPKEPROZ.

Modellzusammenfassung

Schritt	-2 Log-Likelihood	Cox & Snell R-Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	607,614	,007	,127

9.3.5 Schadenswahrscheinlichkeit „Lageveränderung“

Variablen in der Gleichung

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95,0% Konfidenzintervall für EXP(B)		
							Unterer Wert	Oberer Wert	
Schritt 1	NVHOEHE	,005	,001	37,584	1	,000	1,005	1,004	1,007
	NVBART	-,997	,169	34,761	1	,000	,369	,265	,514
	ABBART	1,352	,200	45,546	1	,000	3,865	2,610	5,725
	BEREICH	-,143	,168	,729	1	,393	,867	,624	1,204
	LNPKEPROZ	,562	,056	102,550	1	,000	1,754	1,573	1,956
	WW2	-,004	,002	5,731	1	,017	,996	,993	,999
	WW3	-,007	,001	26,431	1	,000	,993	,991	,996
	WW5	,389	,186	4,384	1	,036	1,476	1,025	2,126
	WW6	-1,221	,242	25,366	1	,000	,295	,183	,474
	WW7	,004	,001	7,494	1	,006	1,004	1,001	1,006
	WW9	,005	,002	11,327	1	,001	1,005	1,002	1,009
	Konstante	-1,998	,138	208,685	1	,000	,136		

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: NVHOEHE, NVBART, ABBART, URSACHE, LNPKEPROZ, WW2, WW3, WW5, WW6, WW7, WW9.

Modellzusammenfassung

Schritt	-2 Log-Likelihood	Cox & Snell R-Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	7000,024	,028	,063

9.3.6 Schadenswahrscheinlichkeit „Mehrfachschaden“

Variablen in der Gleichung

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95,0% Konfidenzintervall für EXP(B)		
							Unterer Wert	Oberer Wert	
Schritt 1	NVHOEHE	,011	,001	89,329	1	,000	1,011	1,009	1,013
	NVBART	-,036	,331	,012	1	,913	,964	,504	1,844
	ABBART	1,905	,391	23,725	1	,000	6,720	3,122	14,463
	BEREICH	-1,182	,204	33,758	1	,000	,307	,206	,457
	LNPKEPROZ	,517	,126	16,841	1	,000	1,678	1,310	2,148
	WW2	-,008	,003	7,990	1	,005	,992	,986	,998
	WW4	-1,260	,490	6,615	1	,010	,284	,109	,741
	WW7	,007	,003	5,775	1	,016	1,007	1,001	1,012
	Konstante	-4,727	,306	238,400	1	,000	,009		

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: NVHOEHE, NVBART, ABBART, URSACHE, LNPKEPROZ, WW2, WW4, WW7.

Modellzusammenfassung

Schritt	-2 Log-Likelihood	Cox & Snell R-Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	1793,488	,019	,127

9.4 Schadprozente

9.4.1 Fichte

9.4.1.1 Schadprozent „fehlend“

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
FIHMITTV	,00159	,00076	2,08920
ABBART	,73457	,10294	7,13576
URSACHE	,88229	,09451	9,33574
LNPkPROZ	,33190	,03189	10,40856
WW1	-1,29234	,12696	-10,17929
WW3FIV	-,00722	,00097	-7,42810

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-,88895	,08620	-10,31284

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 3956,861 DF = 815 P = ,000

9.4.1.2 Schadprozent „beschädigt“

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
FIHMITTN	,01058	,00090	11,69725
ABBART	1,37006	,18848	7,26910
URSACHE	-,26807	,15590	-1,71943
LNPkPROZ	,58567	,06490	9,02408
WW1	-,92007	,18062	-5,09398
WW2FIN	-,00481	,00150	-3,21575
WW3FIN	-,00584	,00118	-4,95594

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-1,76333	,13838	-12,74297

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 2728,711 DF = 754 P = ,000

9.4.1.3 Schadprozent „Bruch“

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
FIHMITTN	,01003	,00086	11,61277
ABBART	-,10929	,23138	-,47234
URSACHE	-,67236	,17030	-3,94808
LNPKPROZ	,42469	,10138	4,18905
WW4FIN	-,00463	,00231	-2,00014

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-3,17035	,20023	-15,83370

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 2248,519 DF = 756 P = ,000

9.4.1.4 Schadprozent „Rindenschaden“

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
LNPKPROZ	-,19771	,42031	-,47040

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-7,53747	,74059	-10,17767

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 1986,914 DF = 760 P = ,000

9.4.1.5 Schadprozent „Lageveränderung“

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
FIHMITTN	,00628	,00118	5,34091
ABBART	1,77300	,27562	6,43267
URSACHE	-,00684	,20133	-,03395
LNPKPROZ	,59967	,08399	7,13973
WW1	-1,73370	,36248	-4,78282
WW2FIN	-,00700	,00288	-2,42782
WW3FIN	-,00822	,00178	-4,62402
WW4FIN	,00831	,00376	2,21055

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-2,05255	,17591	-11,66791

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 2586,545 DF = 753 P = ,000

9.4.1.6 Schadprozent „Mehrfachschaden“

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
FIHMITTN	,01319	,00165	7,98713
ABBART	,90304	,38034	2,37433
URSACHE	-1,44367	,40058	-3,60393
LNPKEPROZ	,69327	,24270	2,85647
WW1	1,54045	,64026	2,40598
WW4FIN	-,01357	,00436	-3,11269

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-4,60342	,44604	-10,32068

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 1576,412 DF = 755 P = ,000

9.4.2 Buche

9.4.2.1 Schadprozent „fehlend“

Parameter estimates converged after 17 iterations.

Optimal solution found.

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
BUHMITTV	-,00259	,00063	-4,09930
ABBART	,59938	,14334	4,18148
URSACHE	1,21915	,22592	5,39637
LNPKEPROZ	,24328	,02632	9,24314
WW1	-1,88265	,22651	-8,31144
WW3BUV	-,00318	,00136	-2,34457
WW4BUV	,00619	,00130	4,77645

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-,55800	,15816	-3,52811

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 4655,591 DF = 694 P = ,000

9.4.2.2 Schadprozent „beschädigt“

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
BUHMITTN	,00646	,00146	4,42214
ABBART	-,43804	,28208	-1,55289
URSACHE	-1,02271	,23237	-4,40117
LNPKPROZ	,48405	,05137	9,42208
WW1	,81924	,27023	3,03169
WW2BUN	,00439	,00169	2,59873
WW4BUN	-,00510	,00106	-4,82579

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-1,34241	,26551	-5,05602

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 2422,727 DF = 619 P = ,000

9.4.2.3 Schadprozent „Bruch“

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
BUHMITTN	,00254	,00174	1,46401
ABBART	-1,04503	,30309	-3,44785
LNPKPROZ	,34381	,05999	5,73104
WW2BUN	,00389	,00189	2,05757

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-2,10628	,28812	-7,31033

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 1831,660 DF = 622 P = ,000

9.4.2.4 Schadprozent „Rindenschaden“

Parameter estimates converged after 28 iterations.
Optimal solution found.

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
BUHMITTN	,00667	,00184	3,62276
URSACHE	-1,30015	,36108	-3,60078
LNPKPROZ	,19318	,18429	1,04827

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-4,72766	,42122	-11,22377

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 2207,772 DF = 623 P = ,000

9.4.2.5 Schadprozent „Lageveränderung“

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
BUHMITTN	,00782	,00092	8,52347
ABBART	,66569	,26142	2,54649
URSACHE	-1,82996	,43010	-4,25476
LNPKEPROZ	,50213	,07412	6,77431
WW1	1,45746	,46453	3,13747
WW4BUN	-,00543	,00127	-4,27800

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-2,77650	,30645	-9,06009

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 2079,891 DF = 620 P = ,000

9.4.2.6 Schadprozent „Mehrfachschaden“

Parameter Estimates (LOGIT model: $(\text{LOG}(p/(1-p))) = \text{Intercept} + \text{BX}$):

	Regression Coeff.	Standard Error	Coeff./S.E.
BUHMITTN	,01145	,00117	9,76599
URSACHE	-1,22192	,25777	-4,74028
LNPKEPROZ	,50247	,15762	3,18787

Intercept	Standard Error	Intercept/S.E.
-4,25286	,31564	-13,47356

Pearson Goodness-of-Fit Chi Square = 1006,193 DF = 623 P = ,000

9.5 Untergruppen (Konsistenz des Modells)

9.5.1 Schadenswahrscheinlichkeit „fehlend“

Variablen in der Gleichung^a

		Regressions koeffizientB	Standardf ehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Schritt 1 ^a	NVHOEHE	,001	,001	,319	1	,572	1,001
	NVBART	,331	,107	9,515	1	,002	1,393
	ABBART	,957	,148	42,029	1	,000	2,603
	BEREICH	1,103	,120	85,052	1	,000	3,014
	LNPKEPROZ	,348	,030	132,293	1	,000	1,416
	WW1	-,003	,001	5,493	1	,019	,997
	WW2	-,004	,002	7,213	1	,007	,996
	WW3	-,010	,001	60,330	1	,000	,990
	WW6	-1,961	,153	164,603	1	,000	,141
	WW8	,006	,001	19,292	1	,000	1,006
	WW9	,008	,002	22,626	1	,000	1,008
	Konstante	-,786	,106	54,592	1	,000	,456

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: NVHOEHE, NVBART, ABBART, BEREICH, LNPKEPROZ, WW1, WW2, WW3, WW6, WW8, WW9.

b. RANDOM = Gruppe 1

Variablen in der Gleichung^a

		Regressions koeffizientB	Standardf ehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Schritt 1 ^a	NVHOEHE	,000	,001	,124	1	,725	1,000
	NVBART	,425	,102	17,387	1	,000	1,530
	ABBART	,853	,142	35,903	1	,000	2,346
	BEREICH	,842	,117	51,521	1	,000	2,320
	LNPKEPROZ	,293	,029	101,157	1	,000	1,341
	WW1	-,004	,001	8,192	1	,004	,996
	WW2	-,003	,001	4,129	1	,042	,997
	WW3	-,007	,001	32,684	1	,000	,993
	WW6	-1,565	,149	110,982	1	,000	,209
	WW8	,006	,001	18,834	1	,000	1,006
	WW9	,004	,002	6,316	1	,012	1,004
	Konstante	-,799	,103	60,303	1	,000	,450

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: NVHOEHE, NVBART, ABBART, BEREICH, LNPKEPROZ, WW1, WW2, WW3, WW6, WW8, WW9.

b. RANDOM = Gruppe 2

Modellzusammenfassung^a

Schritt	-2 Log-Likeli hood	Cox & Snell R-Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	10607,983	,061	,085

a. RANDOM = Gruppe 1

Modellzusammenfassung^a

Schritt	-2 Log-Likeli hood	Cox & Snell R-Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	10961,916	,051	,071

a. RANDOM = Gruppe 2

9.5.2 Schadenswahrscheinlichkeit „beschädigt“

Variablen in der Gleichung^a

		Regressions koeffizientB	Standardf ehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Schritt 1 ^a	NVHOEHE	,008	,001	94,428	1	,000	1,008
	NVBART	,863	,282	9,342	1	,002	2,370
	ABBART	1,177	,234	25,370	1	,000	3,245
	BEREICH	-,582	,154	14,235	1	,000	,559
	LNPCKPROZ	,555	,056	97,247	1	,000	1,743
	WW1	-,007	,002	18,929	1	,000	,993
	WW2	-,005	,002	7,861	1	,005	,995
	WW3	-,003	,001	12,428	1	,000	,997
	WW4	-1,634	,327	24,943	1	,000	,195
	WW5	,723	,200	13,045	1	,000	2,062
	WW6	-,704	,201	12,256	1	,000	,495
	WW7	,011	,002	21,786	1	,000	1,011
	Konstante	-1,605	,141	129,140	1	,000	,201

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: NVHOEHE, NVBART, ABBART, BEREICH, LNPCKPROZ, WW1, WW2, WW3, WW4, WW5, WW6, WW7.

b. RANDOM = Gruppe 1

Variablen in der Gleichung^a

		Regressions koeffizientB	Standardf ehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Schritt 1 ^a	NVHOEHE	,008	,001	85,524	1	,000	1,008
	NVBART	,477	,299	2,544	1	,111	1,611
	ABBART	1,011	,227	19,848	1	,000	2,749
	BEREICH	-,680	,158	18,478	1	,000	,507
	LNPCKPROZ	,613	,062	99,146	1	,000	1,846
	WW1	-,005	,002	9,752	1	,002	,995
	WW2	-,004	,002	4,380	1	,036	,996
	WW3	-,003	,001	12,588	1	,000	,997
	WW4	-1,232	,338	13,307	1	,000	,292
	WW5	,452	,198	5,226	1	,022	1,571
	WW6	-,523	,198	6,950	1	,008	,593
	WW7	,009	,002	13,545	1	,000	1,009
	Konstante	-1,478	,146	102,536	1	,000	,228

a. In Schritt 1 eingegebene Variablen: NVHOEHE, NVBART, ABBART, BEREICH, LNPCKPROZ, WW1, WW2, WW3, WW4, WW5, WW6, WW7.

b. RANDOM = Gruppe 2

Modellzusammenfassung^a

Schritt	-2 Log-Likeli hood	Cox & Snell R-Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	5224,152	,064	,107

a. RANDOM = Gruppe 1

Modellzusammenfassung^a

Schritt	-2 Log-Likeli hood	Cox & Snell R-Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	5028,345	,063	,106

a. RANDOM = Gruppe 2