

Stefan Wilhelm

Forstbetriebliche Untersuchungen zur wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit von Baumarten und Baumartenmischungen von Buche und Fichte



Universitätsdrucke Göttingen

Stefan Wilhelm

Forstbetriebliche Untersuchungen zur wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit
von Baumarten und Baumartenmischungen von Buche und Fichte

Dieses Werk ist lizenziert unter einer

[Creative Commons](#)

[Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen](#)

[4.0 International Lizenz.](#)



erschieden in der Reihe der Universitätsdrucke
im Universitätsverlag Göttingen 2019

Stefan Wilhelm

Forstbetriebliche
Untersuchungen
zur wirtschaftlichen
Leistungsfähigkeit
von Baumarten und
Baumartenmischungen
von Buche und Fichte



Universitätsverlag Göttingen
2019

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Autorenkontakt

Stefan Wilhelm

E-Mail: stefan@geschwisterwilhelm.de

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
der Georg-August-Universität Göttingen

1. Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Möhring
 2. Gutachter: Dir. und Prof. Prof. Dr. Matthias Dieter
- Tag der mündlichen Prüfung: 25.07.2018

Dieses Buch ist auch als freie Onlineversion über die Homepage des Verlags sowie über den Göttinger Universitätskatalog (GUK) bei der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen (<http://www.sub.uni-goettingen.de>) erreichbar. Es gelten die Lizenzbestimmungen der Onlineversion.

Satz und Layout: Stefan Wilhelm

Titelabbildung: Stefan Wilhelm, Fichtennaturverjüngung in einem laubbaumdominierten Mischbestand bei Backnang, Baden-Württemberg

© 2019 Universitätsverlag Göttingen

<https://univerlag.uni-goettingen.de>

ISBN: 978-3-86395-402-4

DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2019-1144>

Vorwort

Die Grundlage der vorliegenden Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Abteilung für Forstökonomie und Forsteinrichtung der Georg-August-Universität Göttingen und baut auf den Forschungen im Rahmen des Verbundprojekts Sicherung der Nadelrohholzversorgung in Norddeutschland auf. Der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) und dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) danke ich vielmals für die finanzielle Förderung des Projektes.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr. Bernhard Möhring, der mich bei dieser Arbeit betreute und mich dabei unterstützte, eine aktuelle und praxisrelevante Themenstellung zu entwickeln. Durch seine Anregungen und Förderung hat er zum Gelingen maßgeblich beigetragen. Dir. und Prof. Prof. Dr. Matthias Dieter danke ich für die freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Koreferates.

Für die technische Anpassung des Wachstumssimulators BWIN-Pro und die Simulation der Misch- und Reinbestände gilt mein besonderer Dank Prof. Dr. Jürgen Nagel, dem Leiter des Sachgebietes Wachstumsmodellierung und Informatik der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Für die Analyse der BWI-Daten und der Zuordnung zu den Waldstandorten Niedersachsens gilt mein Dank seiner Kollegin Julia Rudolph.

Für die Möglichkeit der Datenauswertung des Testbetriebsnetzes Forst und die Betreuung vor Ort am Institut für internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie des Thünen Instituts in Hamburg möchte ich Dir. und Prof. Prof. Dr. Matthias Dieter, Nils Ermisch und Dr. Markus Dög herzlich danken. Sie ermöglichten mir die Datenanalyse für einen Vergleich der Modellergebnisse mit deutschlandweiten forstbetrieblichen Kennzahlen und deren Validierung.

Den Kollegen an der Abteilung für Forstökonomie und Forsteinrichtung danke ich für die zahlreichen geführten anregenden Diskussionen zu dieser Arbeit, für die konstruktiven Anregungen, den Austausch, die Unterstützung und die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre. Meinen Kollegen bei UNIQUE forestry and land use bin ich für den Austausch zu ihren praktischen Erfahrungen und der Möglichkeit, die Modellansätze dieser Arbeit im Rahmen von anderen Projekten mit Förstern in Betrieben deutschlandweit diskutieren zu können, sehr verbunden.

Nicht zuletzt habe ich vielseitige Unterstützung von meiner Frau und meiner Familie bekommen, als ich während meiner Tätigkeit als Seniorberater bei UNIQUE die Arbeit „nebenbei“ fertiggestellt habe. Ihnen und meinen Freunden danke ich ganz herzlich für ihre Nachsicht und Geduld.

Wolfenweiler, Januar 2018

Stefan Wilhelm

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	XII
Formelverzeichnis.....	XVIII
Tabellenverzeichnis.....	XXI
Abkürzungsverzeichnis.....	XXIII
1 Einführung und Problemstellung.....	1
1.1 Geschichte des Waldumbaus.....	1
1.2 Ziele der Arbeit.....	3
1.3 Gliederung der vorliegenden Arbeit.....	5
1.4 Induktion und Deduktion, die Methodik zur betriebswirtschaftlichen Analyse.....	7
1.5 Grundlagen der Modellanalyse.....	8
1.6 Differenzierung von Betriebstypen.....	9
2 Analyse empirischer Betriebsvergleichsdaten zur Erfolgsbeurteilung von Baumarten.....	11
2.1 Testbetriebsnetz Forst als Grundlage für empirische baumartenspezifische Kennzahlen.....	12

2.2	Multiple Regressionsanalyse und baumartengruppenspezifische Deckungsbeiträge.....	13
3	Einzel- und Mischbestandsmodell	19
3.1	Mischbestand	19
3.1.1	Mischungsanteil.....	20
3.1.2	Klassifizierung von Mischungen	21
3.1.2.1	Mischungsart.....	21
3.1.2.2	Mischungsform	22
3.1.3	Bestandesweise Mischung	22
3.1.4	Kleinflächige Mischung	23
3.1.5	Einzelbaumweise Mischung.....	23
3.1.6	Mischungsformen im Vergleich und Standraumbedarf der Baumarten.....	23
3.1.7	Mischungsform im Modell.....	24
3.2	Mischungseffekte und Produktivität in Mischbeständen.....	24
3.2.1	Bestimmung der Produktivität in Mischbeständen	25
3.2.2	Kreuzdiagramm zur Produktivitätsdarstellung im Mischbestand.....	27
3.3	Naturale Grundlagen des Bestandeswuchsmodells	28
3.3.1	Waldentwicklungstypen und Grundlagen für das waldbauliche Modell.....	28
3.3.1.1	Waldentwicklungstyp Buche-Fichte.....	29
3.3.1.2	Waldentwicklungstyp Fichte-Buche.....	29
3.3.2	Waldbauliche Grundlagen	30
3.3.3	Wuchsverhältnis der Baumarten und Standorte	31
3.4	Grundlagen der Simulation und Überführung in Funktionen.....	32
3.4.1	Vorratsentwicklung	33
3.4.2	Nutzungsvolumen und Zuwachs	34
3.4.3	Gesamtwuchsleistung	35
3.4.4	Durchmesser Grundflächenmittelstamm	36
4	Modellierung der Flächendynamik.....	39
4.1	Die Markovsche Kette in der Anwendung für Mischbestände	39
4.1.1	Flächenübergangswahrscheinlichkeit	40
4.1.2	Flächenübergangsmatrix.....	40
4.1.3	Vektor zur Beschreibung des Flächenzustandes	41

4.1.4	Eigenvektor – stationärer Zustand	43
4.2	Risikobedingte Überlebenswahrscheinlichkeit	44
4.2.1	Risikoidentifikation	44
4.2.2	Risikoanalyse und Bewertung	45
4.2.3	Sturmschadensrisiko von Buche und Fichte im Reinbestand	47
4.2.4	Sturmschadensrisiko von Buche und Fichte im Mischbestand.....	49
4.3	Endnutzungswahrscheinlichkeit	51
4.4	Erweiterung Kronenschirmfläche Buche.....	56
4.5	Kombination der Flächenübergangswahrscheinlichkeiten.....	59
4.6	Nutzung und Flächenveränderungen im Modell	61
5	Nachhaltige forstliche Betriebsmodelle.....	63
5.1	Aussetzender Betrieb.....	66
5.2	Nachhaltige Betriebsklasse und Normalwaldmodell	66
5.3	Zielwaldmodell	70
5.4	Mischwaldmodell	74
5.5	Mischungsanteil der Baumarten im Modell	77
5.6	Mischungsanteil der Betriebsklassenvarianten	79
6	Naturale Waldentwicklung aus ökonomischer Sicht.....	81
6.1	Bestandesbegründungskosten	82
6.2	Pflegekosten.....	82
6.3	Holzerntekosten.....	83
6.4	Holzerlöse	83
6.5	Bestandessortentafel	84
6.6	Bewertung von Kalamitätsnutzungen.....	86
6.7	Kapitalkosten und Kalkulationszins	87
6.8	Flächengemeinkosten	89
7	Methoden der Investitionsrechnung zur Beurteilung der Nadelholzanreicherung	91
7.1	Finanzierung von Forstbetrieben	92
7.2	Liquidität als betriebliche Notwendigkeit.....	93
7.3	Zahlungsstrom des forstlichen Produktionsprozesses.....	94
7.4	Investitionsrechnung zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit von Baumarten und Baumartenmischungen.....	96
	Amortisationsrechnung.....	96

7.5	Dynamischen Investitionsrechnung zur Beurteilung von Baumartenmischungen und Baumarten	98
	Bewertung der Teilflächen.....	99
8	Ergebnisse der Modellanalyse.....	101
8.1	Fichtenanteil und Produktivität der Mischbestände.....	101
8.2	Fichtenanteil und Liquidität – Amortisationszeiten der Baumarten und Baumartenmischungen	104
8.3	Fichtenanteil und Rentabilität	106
	Annuität.....	106
8.4	Reinerträge von Rein- und Mischbestandsbetriebsklassen im Vergleich.....	108
8.5	Die Erhöhung des Fichtenanteils – eine Grenzbetrachtung.....	118
8.6	Dynamischer Übergang von der Rein- zur Mischbestandsbetriebsklasse – Anreicherung von Buchenbeständen mit Fichte.....	120
8.7	Sensitivitätsanalyse.....	125
8.7.1	Produktionsdauer der Zeitmischungsbaumart Fichte.....	130
8.7.2	Variantenstudium Risikostärke Fichte – Break-Even- Analyse	132
8.7.3	Kalamitätsnutzungsanteil in Abhängigkeit der Risikostärke.....	133
9	Diskussion.....	135
9.1	Vergleich mit der betrieblichen Realität	136
9.1.1	Validierung der Buchenbetriebsklasse.....	136
9.1.2	Validierung der Fichtenbetriebsklasse.....	138
9.1.3	Analyse der baumartenunabhängigen Kosten.....	139
9.2	Einordnung in bisherige forstökonomische Ergebnisse	140
9.3	Diskussion der Methodik.....	142
9.4	Schlussfolgerung und Empfehlung	145
9.4.1	Modellierung und ihre Aussagekraft für waldbaulich- ökonomisch orientierte Entscheidungen.....	145
9.4.2	Ökonomische Bedeutung von Fichte und Fichtenbeimischungen	146
9.4.3	Risiko und waldbauliche Entscheidungen	147
9.4.4	Mischungsanteil bei Bestandesbegründung und betrieblicher Baumartenanteil.....	147
9.4.5	Auf Buche ausgerichtete Bewirtschaftung.....	148

9.4.6	Erfüllung gesellschaftlicher Anforderungen	148
9.4.7	Ausblick.....	149
10	Zusammenfassung.....	XXVII
11	Literaturverzeichnis	XXXI
12	Anhang.....	XLIX
12.1	Statistische Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse der Privatwaldbetriebe des Testbetriebsnetzes Forst nach Baumartengruppen (Bezugszeitraum 2003 – 2011).....	XLIX
12.2	Übergangsmatrix Mischbestand Variante M ₂	LII
12.3	Bestimmung des Mischungsanteils	LII
12.3.1	Fichtenanteil im erweiterten Normalwaldmodell	LII
12.3.2	Fichtenanteil im erweiterten Zielwaldmodell.....	LVI
12.3.3	Fichtenanteil im Mischwaldmodell	LVIII
12.4	Berechnung des Reduktions- und Erhöhungsfaktors zur Anpassung des Deckungsbeitrags I von Kalamitätsnutzungen – Entwicklung der Formel.....	LXI
12.5	Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung.....	LXII
12.5.1	Kapitalwertmethode.....	LXII
12.5.2	Annuitätenmethode.....	LXIII
12.6	Kennziffern der dynamischen Betriebsklasse	LXV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flächenveränderung der Baumarten für die einzelnen Besitzarten in Deutschland von 2002 bis 2012, Ergebnisse der Bundeswaldinventur 3	3
Abbildung 2: Anteile der Fichtenfläche nach Besitzarten und die Baumartenverteilung in Deutschland, Ergebnisse der Bundeswaldinventur 3	4
Abbildung 3: Exemplarische Darstellung der Produktivität der Baumarten Buche und Fichte im Mischbestand (erweiterte Darstellung in Anlehnung an Pretzsch 2009 S. 29 und Pretzsch et al. 2013 S. 269)	28
Abbildung 4: Volumen der Buche des verbleibenden Bestandes je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche in Abhängigkeit vom Bestandesalter für verschiedene Mischungsanteile sowie entsprechende Ertragstafelwerte (Schober 1995 I. Ertragsklasse)	34
Abbildung 5: Volumen der Fichte des verbleibenden Bestandes je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche in Abhängigkeit vom Bestandesalter für verschiedene Mischungsanteile sowie entsprechende Ertragstafelwerte (Wiedemann 1936/42 0. Ertragsklasse extrapoliert)	34
Abbildung 6: Zuwachs der Buche im Rein- und Mischbestand je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche in Abhängigkeit	

vom Bestandesalter für verschiedene Mischungsanteile sowie entsprechende Ertragstafelwerte (Schober 1995 I. Ertragsklasse)	35
Abbildung 7: Zuwachs der Fichte im Rein- und Mischbestand je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche in Abhängigkeit vom Bestandesalter für verschiedene Mischungsanteile sowie entsprechende Ertragstafelwerte (Wiedemann 1936/42 0. Ertragsklasse extrapoliert)	35
Abbildung 8: Gesamtwuchsleistung Buche im Rein- und Mischbestand je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche und Ertragstafelwerte (Schober 1995 I. Ertragsklasse)	36
Abbildung 9: Gesamtwuchsleistung Fichte im Rein- und Mischbestand je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche und Ertragstafelwerte (Wiedemann 1936/42 0. Ertragsklasse extrapoliert)	36
Abbildung 10: Mittlerer Durchmesser ausscheidender Bestand Buche und Ertragstafelwerte (Schober 1995 I. Ertragsklasse)	37
Abbildung 11: Mittlerer Durchmesser ausscheidender Bestand Fichte und Ertragstafelwerte (Wiedemann 1936/42 0. Ertragsklasse (extrapoliert))	37
Abbildung 12: Risikobedingte Überlebenswahrscheinlichkeiten für Buche und Fichte	47
Abbildung 13: Übergangsgraph Buchenreinbestand (nur Risiko S_{100} 0,967)	48
Abbildung 14: Übergangsgraph Fichtenreinbestand (nur Risiko S_{100} 0,726)	48
Abbildung 15: Vom Mischungsanteil der Fichte abhängige Risikostärken im Alter 100 (S_{100})	51
Abbildung 16: Histogramm der endnutzungsbedingt ausscheidenden Flächenanteile Variante M_2	52
Abbildung 17: Endnutzungswahrscheinlichkeit der Baumarten Buche und Fichte	54
Abbildung 18: Nutzungsbedingte, vom Bestandesalter abhängige Überlebenswahrscheinlichkeit für Buche und Fichte	56
Abbildung 19: Durch Kronenschluss der Buche bedingte prozentuale Veränderung der ursprünglichen Buchenfläche für die Mischbestandsvarianten M_1 , M_2 und M_3	58
Abbildung 20: Kalamitäts- und endnutzungsbedingt ausscheidende Flächen in den einzelnen Altersklassen der Betriebsklasse Variante M_2 (stationärer Zustand)	60
Abbildung 21: Zur Buche und in die Verjüngung übergehende Fläche der Fichte sowie die erneut in die Verjüngung eingehende Fläche der Buche nach Altersklassen für die Betriebsklasse der Variante M_2 (stationärer Zustand)	61
Abbildung 22: Übergangsgraph Buchen- und Fichtenreinbestände im erweiterten Normalwaldmodell	69

Abbildung 23: Flächenverteilung der Reinbestände von Buche und Fichte in den einzelnen Altersklassen im Normalwaldmodell mit einem Anteil der beiden Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung.....	69
Abbildung 24: Zielwaldmodell Buchenbetriebsklasse mit einer S_{100} von 0,967	71
Abbildung 25: Zielwaldmodell Fichtenbetriebsklasse mit einer S_{100} von 0,726	71
Abbildung 26: Flächenverteilung der Reinbestände (ohne Endnutzungsverteilung) des erweiterten Zielwaldmodells bei einer S_{100} für Buche von 0,967 und einer S_{100} für Fichte von 0,726 und einem Anteil beider Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung.....	72
Abbildung 27: Übergangsgraph der Buchen- und Fichtenreinbestände im erweiterten Zielwaldmodell inklusive Endnutzungsverteilung	73
Abbildung 28: Flächenverteilung der Reinbestände im erweiterten Zielwaldmodell inklusive Endnutzungsverteilung bei einer S_{100} für Buche von 0,967 und einer S_{100} für Fichte von 0,726 und einem Anteil beider Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung.....	73
Abbildung 29: Übergangsgraph der Buchen-Fichten-Mischbestände im Mischwaldmodell mit einem Mischungsanteil beider Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung inklusive baumartenspezifischen Risikos (S_{100} der Buche von 0,967 und vom Mischungsanteil abhängigen S_{100} der Fichte von 0,904), Endnutzungsverteilung und Übernahme von Bestandesteilen durch die Kronenausdehnung der Buche bei ausscheidender Fichtenfläche (Variante M_2).....	75
Abbildung 30: Flächenverteilung der Mischbestände inklusive Endnutzungsverteilung bei einer S_{100} für Buche von 0,967 und einer vom Mischungsanteil abhängigen S_{100} für Fichte von 0,904, einem Mischungsanteil beider Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung und der Ausdehnung der Kronenschirmfläche der Buche (Variante M_2)	76
Abbildung 31: Flächenverteilung der Reinbestände von Buche und Fichte in den einzelnen Altersklassen im erweiterten Normalwaldmodell	78
Abbildung 32: Flächenverteilung der Reinbestände im erweiterten Zielwaldmodell (ohne Endnutzungsverteilung) bei einer S_{100} für Buche von 0,967 und einer S_{100} für Fichte von 0,726.....	78
Abbildung 33: Flächenverteilung der Reinbestände im erweiterten Zielwaldmodell bei einer S_{100} (Risikostärke) für Buche von 0,967 und einer S_{100} für Fichte von 0,726 inklusive Endnutzungsverteilung	78

Abbildung 34: Flächenverteilung der Mischbestände im Mischwaldmodell bei einer S_{100} (Risikostärke) für Buche von 0,967 und einer vom Mischungsanteil abhängigen S_{100} für Fichte von 0,904 inklusive Endnutzungsverteilung.....	78
Abbildung 35: Vom Fichtenanteil bei der Begründung abhängiger durchschnittlicher Fichtenanteil an der Betriebsklasse des Mischwaldmodells (mittlere Produktionsdauer der Fichte 80 Jahre und der Buche 120 Jahre)	80
Abbildung 36: BHD-abhängige Holzerntekosten Buche und Fichte (Funktionen und Daten der Waldbewertungsrichtlinie Nordrhein-Westfalen 2014).....	83
Abbildung 37: Sortimentsverteilung Buche in Abhängigkeit vom BHD	85
Abbildung 38: Sortimentsverteilung Fichte in Abhängigkeit vom BHD	85
Abbildung 39: Durchschnittliche vom BHD abhängige Holzerlöse für Buche und Fichte	86
Abbildung 40: Zahlungsstrom eines Buchen-Fichten-Mischbestandes (50% Flächenanteil beider Baumarten bei Begründung (Variante M_2)) im Vergleich mit dem Zahlungsstrom eines reinen Buchenbestandes (Variante M_4) inklusive Kalamitäts- und Zielstärkenutzung	94
Abbildung 41: Verteilung der Flächen und Produktionsdauern der Buche in der Betriebsklasse der Variante M_2 des Mischwaldmodells	100
Abbildung 42: Verteilung der Flächen und Produktionsdauern der Fichte in der Betriebsklasse der Variante M_2 des Mischwaldmodells	100
Abbildung 43: Durchschnittlicher Gesamtwuchs der Simulationsergebnisse in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Mischungsanteil der Baumarten an den Betriebsklassen	102
Abbildung 44: Amortisationszeit der Bestandesbegründungs- und Pflegekosten für den Buchenreinbestand (M_4), die Buchenreinbestandsvariante mit Naturverjüngung (M_4 Nat. Verjüngung), den Fichtenreinbestand (M_0) und die Mischbestände mit einem Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung von 30% (M_3), 50% (M_2) und 70% (M_1).....	104
Abbildung 45: Amortisationszeit der Bestandesbegründungs- und Pflegekosten für Rein- und Mischbestände unter Berücksichtigung des Abtriebswertes für den Buchenreinbestand (M_4), die Buchenreinbestandsvariante mit Naturverjüngung (M_4 Nat. Verjüngung), den Fichtenreinbestand (M_0) und die Mischbestände mit einem Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung von 30% (M_3), 50% (M_2) und 70% (M_1)	105

Abbildung 46: Annuitäten in Abhängigkeit vom Fichtenanteil an der Baumartenmischung (Zeitpunkt der Bestandesbegründung) bei einem Zinssatz von 1,5% (ohne Bodenkosten) und Gerade für den neutralen Ersatz ohne Baumarteninteraktion.....	106
Abbildung 47: Annuitäten der Rein- und Mischbestände (inklusive Mischungseffekten und der vom Mischungsanteil der Fichte abhängigen Risikostärke) in Abhängigkeit vom Kalkulationszins (ohne Erschließungs- und Verwaltungskosten).....	107
Abbildung 48: Reinerträge in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse.....	117
Abbildung 49: Grenzreinertrag in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Fichtenanteil an der Betriebsklasse.....	119
Abbildung 50: Entwicklungsphasen des Deckungsbeitrags II des Übergangsprozesses von einer reinen Buchenbetriebsklasse mit Naturverjüngung zu einer nachhaltigen Fichten-Buchen-Mischbestands-betriebsklasse durch Pflanzung der Fichte	121
Abbildung 51: Auswirkung der Veränderung der Holzerlöse auf den Reinertrag	126
Abbildung 52: Auswirkung der Veränderung der Holzerntekosten auf den Reinertrag	127
Abbildung 53: Auswirkung der Veränderung der Begründungskosten auf den Reinertrag (Buche und Fichte gepflanzt).....	128
Abbildung 54: Auswirkung der Veränderung der Pflegekosten auf den Reinertrag	129
Abbildung 55: Auswirkung der Veränderung der Erschließungskosten auf den Reinertrag.....	129
Abbildung 56: Auswirkung der Veränderung der Verwaltungskosten auf den Reinertrag.....	130
Abbildung 57: Ökonomisch optimale mittlere Produktionsdauer der Fichte in Abhängigkeit vom Kalkulationszins.....	131
Abbildung 58: Überlebensrisiken von Buche und Fichte und das Risiko der Fichte, das einem ökonomisch äquivalenten Reinertrag der Buche entspricht.....	132
Abbildung 59: Außerplanmäßige Nutzungsmenge der Fichte in Abhängigkeit von der Risikostärke im Alter 100. Der Betrag der Abszisse stellt dabei den Wert der Risikostärke (S_{100}) in der Überlebensfunktion dar.....	134
Abbildung 60: Reinertrag der Fichtenbetriebsklasse in Abhängigkeit der Risikostärke. Der Betrag der Abszisse stellt dabei den Wert der Risikostärke (S_{100}) in der Überlebensfunktion dar.	134
Abbildung 61: Stammholzerlöse des Staatswaldes in Niedersachsen (Bitter et al. 2008 und Schade 2013).....	138

Abbildung 62: Reinerträge der Analyse (2015 und 2015 Naturverjüngung) und aus Literaturquellen verschiedener Autoren für Buche und Fichte im Zeitvergleich (1925–2015) (Möhring et al. 2008 S. 330 erweitert) und Winkelhalbierende	141
Abbildung 63: Flächenzusammensetzung der Betriebsklasse (Variante M ₂) des erweiterten Normalwaldmodells	LIII
Abbildung 64: Durchschnittlicher Fichtenanteil an der Betriebsklasse in Abhängigkeit vom Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung und Produktionsdauer der Baumarten. Vergleich der Ergebnisse der Analyse und Berechnungen mit der Näherungsformel	LV
Abbildung 65: Flächenzusammensetzung der Betriebsklasse (Variante M ₂) des erweiterten Zielwaldmodells	LVI
Abbildung 66: Flächenzusammensetzung der Betriebsklasse (Variante M ₂) des Mischwaldmodells	LIX

Formelverzeichnis

Formel 1: Allgemeingültige Schätzgleichung der Kostenfunktion	15
Formel 2: Schätzgleichung der baumartengruppenspezifischen Holzerntekosten in Abhängigkeit von den summierten Holzerntekosten und dem Erntevolumen der jeweiligen Baumartengruppen.....	15
Formel 3: Schätzgleichung der baumartengruppenspezifischen Holzerntekosten in Abhängigkeit von den summierten Holzerntekosten und dem Erntevolumen der jeweiligen Baumartengruppen.....	15
Formel 4: Flächenübergangsmatrix	40
Formel 5: Zustandsinformation und Übergangsmatrix.....	41
Formel 6: Zustandsinformation und Übergangsmatrix (Detailbetrachtung).....	41
Formel 7: Altersklassenvektor	41
Formel 8: Gesamtfläche der Betriebsklasse	41
Formel 9: Gesamtfläche der Betriebsklasse mit der Differenzierung nach Baumarten	42
Formel 10: Gesamtfläche der Betriebsklasse, unterteilt nach Buchen- und Fichtenflächen	42
Formel 11: Flächenvektor einer Mischbestandsbetriebsklasse.....	42
Formel 12: Dichtefunktion Endnutzung.....	53

Formel 13: Verteilungsfunktion nutzungsbedingt ausscheidende Fläche.....	54
Formel 14: Dichtefunktion nutzungsbedingt ausscheidende Fläche	54
Formel 15: Nutzungsbedingte Überlebenswahrscheinlichkeit.....	54
Formel 16: Flächengröße der Altersklasse	67
Formel 17: Flächenübergangsmatrix Normalwaldmodell.....	68
Formel 18: Eigenvektor Mischbestandsbetriebsklasse Variante M_2	77
Formel 19: Faktor zur Reduktion der Holzerlöse und Erhöhung der Erntekosten für Kalamitätsmengen	86
Formel 20: Fläche der Betriebsklasse im erweiterten Normalwaldmodell.....	LIII
Formel 21: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse in Abhängigkeit von der Gesamtfläche von Buche und Fichte.....	LIII
Formel 22: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse des erweiterten Normalwaldmodells in Abhängigkeit von der Fläche der Baumarten bei der Bestandesbegründung und der Umtriebszeit	LIII
Formel 23: Mischungsanteil der Fichte bei der Bestandesbegründung	LIII
Formel 24: Startfläche der Buche bei der Bestandesbegründung im erweiterten Normalwaldmodell	LIV
Formel 25: Mischungsanteil der Fichte bei der Bestandesbegründung unter Berücksichtigung der Gesamtfläche der Betriebsklasse und der individuellen Produktionsdauer der Baumarten im erweiterten Normalwaldmodell.....	LIV
Formel 26: Startfläche der Fichte bei der Bestandesbegründung im erweiterten Normalwaldmodell	LIV
Formel 27: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte im erweiterten Normalwaldmodell	LIV
Formel 28: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte im erweiterten Normalwaldmodell	LIV
Formel 29: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte im erweiterten Normalwaldmodell	LV
Formel 30: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse in Abhängigkeit von der Gesamtfläche der Buche und Fichte.....	LVI
Formel 31: Buchenfläche der Betriebsklasse unter Berücksichtigung von Risiko und Endnutzungsverteilung im erweiterten Zielwaldmodell.....	LVII
Formel 32: Fichtenfläche an der Betriebsklasse unter Berücksichtigung von Risiko und Endnutzungsverteilung im erweiterten Zielwaldmodell.....	LVII

Formel 33: Buchenstartfläche bei der Bestandesbegründung unter Berücksichtigung von Risiko und Endnutzungsverteilung im erweiterten Zielwaldmodell.....	LVIII
Formel 34: Fichtenstartfläche bei der Bestandesbegründung unter Berücksichtigung von Risiko und Endnutzungsverteilung im erweiterten Zielwaldmodell.....	LVIII
Formel 35: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte im erweiterten Zielwaldmodell.....	LVIII
Formel 36: Vom Mischungsanteil der Buche und der Produktionsdauer der Fichte abhängige Kronenausdehnung der Buche.....	LIX
Formel 37: Buchenfläche der Betriebsklasse des Mischwaldmodells unter Berücksichtigung von Risiko und Endnutzungsverteilung, der mittleren Produktionsdauer der Fichte und der vom Mischungsanteil der Baumarten abhängigen Ausdehnung der Buchenkronenschirmfläche.....	LX
Formel 38: Deckungsbeitrag I.....	LXI
Formel 39: Deckungsbeitrag I Kalamitätsnutzungen.....	LXI
Formel 40: Reduktions- bzw. Erhöhungsfaktor zur Bewertung von Kalamitätsnutzungen.....	LXI
Formel 41: Kapitalwert des forstlichen Produktionsprozesses (ohne Verwaltungs-, Erschließungs- und Bodenkosten).....	LXII
Formel 42: Formel zur Berechnung der Annuität auf Grundlage des Kapitalwerts.....	LXIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittliche Deckungsbeiträge des Testbetriebsnetzes für Privatwaldbetriebe nach Baumartengruppen (2003–2011).....	17
Tabelle 2: Übersicht der niedersächsischen Standorte, der Ertragsklassen und der Oberhöhen im Alter 100 (basierend auf Mittelwerten)	32
Tabelle 3: Flächenverteilung einer Beispielmischbestandsbetriebsklasse mit Buche und Fichte in Zeitmischung.....	42
Tabelle 4: Parameter der zweiparametrischen Weibull-Funktion für Buche und Fichte.....	47
Tabelle 5: Risikostärken im Alter 100 (S_{100}) für Fichte im Mischbestand auf Standorten mit einer mittleren Nährstoffversorgung (nach Gries 2012 S. 48)	50
Tabelle 6: Parameter der zweiparametrischen Weibull-Funktion für die planmäßige Endnutzungsverteilung der Buche und Fichte (risikofrei).....	55
Tabelle 7: Übergangswahrscheinlichkeiten der Altersklassen im Normalwaldmodell.....	68
Tabelle 8: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Betriebsklassen im Vergleich bei einem Mischungsanteil beider	

Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung bzw. in der I. Altersklasse	79
Tabelle 9: Holzerlöse Buche in €/Efm (LWK Niedersachsen, Privatwald)	84
Tabelle 10: Holzerlöse Fichte in €/Efm (LWK Niedersachsen, Privatwald)	84
Tabelle 11: Vom Mischungsanteil abhängige Zuwachsfaktoren für Buchen-Fichten-Mischbestände	103
Tabelle 12: Vergleich der Betriebsklassen – Variante M4, reine Buchenbetriebsklasse	109
Tabelle 13: Vergleich der Betriebsklassen – Variante M3 mit durchschnittlichem Fichtenanteil von 20%	110
Tabelle 14: Vergleich der Betriebsklassen – Variante M2 mit durchschnittlichem Fichtenanteil von 35%	111
Tabelle 15: Vergleich der Betriebsklassen – Variante M1 mit durchschnittlichem Fichtenanteil von 51%	112
Tabelle 16: Vergleich der Betriebsklassen – Variante M0 reine Fichtenbetriebsklasse	113
Tabelle 17: Deckungsbeiträge der Rein- und Mischbestandsbetriebsklassen im Vergleich	114
Tabelle 18: Kenngrößen der reinen Buchenbetriebsklasse (Variante M ₄ ohne Pflanzkosten, natürliche Verjüngung)	120
Tabelle 19: Kenngrößen der nachhaltigen Mischbestandsbetriebsklasse am Ende des Übergangszeitraums (Variante M ₂ mit natürlicher Verjüngung und ohne Pflanzkosten)	124
Tabelle 20: Zuwachs bzw. Einschlagsergebnisse der Bundeswaldinventur 3 (vgl. Polley et al. 2014b S. 34) und des Testbetriebsnetzes (Privatwaldbetriebe) im Durchschnitt der Jahre 2003–2011 im Vergleich (vgl. Kapitel 2.2)	137

Abkürzungsverzeichnis

A	Güteklasse A: Holz von überdurchschnittlicher ausgezeichneter Qualität
B	Güteklasse B: Holz von normaler Qualität
BHD	Brusthöhendurchmesser
Bu	Buche
BWI	Bundeswaldinventur
C	Güteklasse C: Holz, das nicht den Güteklassen A und B entspricht, aber gewerblich verwendbar ist
D	Güteklasse D: Holz, das nicht den Güteklassen A, B und C angehört, aber noch zu mindestens 40% gewerblich verwendbar ist
DB I	Deckungsbeitrag I (erntekostenfreier Holzerlös)
DB I _{Kalamitätsnutzungen}	Deckungsbeitrag I (erntekostenfreier Holzerlös der Kalamitätsnutzungen)
DB II	Deckungsbeitrag II
DB III	Deckungsbeitrag III
Dg	Durchmesser (Grundflächen-)Mittelstamm
E	Holzerlöse
Efm	Erntefestmeter
EST	Erweiterter Sortentarif
FFH	Fauna-Flora-Habitat

F_K	Faktor zur Anpassung der erntekostenfreien Kalamitätsnutzungen
F_i	Fichte
F_m	Festmeter
ha	Hektar
IN	Industrieholz gesund, nicht grobstig, keine starke Krümmung (normal)
K	Holzerntekosten
LKW	Landwirtschaftskammer
NLF	Niedersächsische Landesforsten
Sth	Stammholz
TBN	Testbetriebsnetz
TI	Thünen-Institut
TV-Forst	Tarifvertrag Forst
V _{fm}	Vorratsfestmeter
WBR	Waldbewertungsrichtlinie
WET	Waldentwicklungstyp
Z-Baum	Zukunfts-Baum

In der Modellentwicklung verwendete Abkürzungen

a	Gesamtfläche der Betriebsklasse und Flächenvektor
$a_I, a_{II}, a_{III}, a_n$	Flächen in den Altersklassen I-III und n
$a_{I,1}, a_{I,2}$	Fläche der Baumarten 1 und 2 in der Altersklasse I
$a_{I,Bu}, a_{I,Fi}$	Buchen- und Fichtenfläche in der I. Altersklasse
α	Formparameter Weibull-Funktion
$\alpha_{NBu}, \alpha_{NFi}$	Formparameter der Weibull-Funktion für Nutzung (Buche, Fichte)
$\alpha_{RBu}, \alpha_{RFi}$	Formparameter der Weibull-Funktion für Risiko (Buche, Fichte)
β	Skalenparameter
$\emptyset M_{Fi}$	Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte
F, F_{BKL}	Gesamtfläche der Betriebsklasse
F_{Bu}	Fläche Buche an der Betriebsklasse
F_{Fi}	Fläche Fichte an der Betriebsklasse
$f(t)$	Dichtefunktion
$F(t)$	Verteilungsfunktion
f_Λ	Flächengröße der Altersklasse
G	Grundfläche
j	Zustand
l	Faktor für die Berücksichtigung der Periodenlänge
m_{Bu}	Mischungsanteil Buche
m_{Fi}	Mischungsanteil Fichte
$Mi_{St Bu}$	Mischungsanteil der Buche bei der Bestandesbegründung

$Mi_{ST Fi}$	Mischungsanteil der Fichte bei der Bestandesbegründung
n	Anzahl
P	Übergangsmatrix
p	Übergangswahrscheinlichkeiten
P_{Bu}	Produktivität Buche
$P_{Bu,Fi}$	Produktivität Buche und Fichte im Mischbestand
P_{Fi}	Produktivität Fichte
q	Parameter Wachstumsfunktion Kronenschirmfläche
r	Parameter Wachstumsfunktion Kronenschirmfläche
$R(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeit
S_{100}	Index für die risikobedingte Ausfallstärke
$ST_{Fl Bu}$	Flächengröße der Buche bei der Bestandesbegründung
$ST_{Fl Fi}$	Flächengröße der Fichte bei der Bestandesbegründung
t	Zeitpunkt/Alter des Bestandes
T_N	Nutzungsbedingte Lebensdauer
U	Umtriebszeit
$U_{Bu max}$	Maximale Produktionsdauer der Buche
$U_{Fi max}$	Maximale Produktionsdauer der Fichte
X	Zustand oder Reduktionsanteil in %
z	Parameter Wachstumsfunktion Kronenschirmfläche

Für die Methoden der dynamischen Investitionsrechnung verwendete Abkürzungen

a	Annuität
A	Erntekostenfreier Abtriebswert zum Bestandesende
c	Kulturkosten
D	Erntekostenfreie Durchforstungserlöse (hier inklusive der erntekostenfreien Erlöse im Rahmen der Zielstärkennutzung vor dem Erreichen des Bestandesendes)
i	Kalkulationszins
KW	Kapitalwert
n	Produktionsdauer
p	Pflegekosten
t	Zeitindex
v	Jährliche Verwaltungskosten
w	Jährliche Wegebaukosten

Mischungsvarianten der Bestände bzw. der Betriebsklassen

M_0	Fichtenreinbestand bzw. reine Fichtenbetriebsklasse
M_1	Anteil der Fichte bei der Bestandesbegründung 70%
M_2	Anteil der Fichte bei der Bestandesbegründung 50%
M_3	Anteil der Fichte bei der Bestandesbegründung 30%
M_4	Buchenreinbestand bzw. reine Buchenbetriebsklasse

1 Einführung und Problemstellung

1.1 Geschichte des Waldumbaus

Die Baumartenzusammensetzung in Deutschland ist einem ständigen Wandel unterworfen. Bis ins Mesolithikum waren hierfür natürliche Faktoren wie zum Beispiel Klima und Standortseigenschaften verantwortlich. Im Neolithikum begann der Mensch durch die Bewirtschaftung der Wälder und ihrer Anpassung an gesellschaftliche Bedürfnisse das Waldbild und seine Baumartenzusammensetzung weiter zu formen (vgl. Fritz et al. 2006 S. 11). Bis heute sind unsere Wälder durch diese Ansprüche und die aktuelle wirtschaftliche Situation sowie die Besitzstruktur geprägt (vgl. Baumgart und von Teuffel 2005 S. 1).

Die Wälder waren bis zum Mittelalter zu hohen Anteilen buchendominiert (vgl. Nenninger 2001 S. 96 ff.). Mit zunehmender Bevölkerung und der Bildung von Zentren erfolgte eine fortschreitende Rodung. Bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts führten darüber hinaus unterschiedliche Nutzungsinteressen und eine anhaltende Übernutzung zu degradierten und devastierten Flächen, denn der Wald diente als Grundlage für Ernährung, für Energieversorgung, für Handwerk und als Existenzsicherung (vgl. Küster 1998 S. 101 ff.).

Die daraus resultierende Knappheit in der Versorgung mit dem Rohstoff Holz führten neben einer zunehmenden Spezialisierung zur Wahl von zuwachsstarken Nadelbaumarten mit geringen Standortsansprüchen und einer hohen Widerstandsfähigkeit gegen Witterungseinflüsse in der Jugendphase. Hinzu kamen Schwierigkeiten bei der Wiederbestockung von vergrasten oder devastierten Flä-

chen, was zusätzlich zur Bevorzugung von vergleichsweise leicht zu begründenden Nadelhölzern und damit zur Baumartenwahl der Fichte und Kiefer in Reinbeständen führte (vgl. Huss 1987 S. 117).

Dieser planmäßige Wiederaufbau von Wäldern mit dem Ziel der Sicherung und Verbesserung der Holzversorgung stellt den Beginn der modernen Forstwirtschaft dar. Zwar reichen die ersten Anfänge der geregelten Forstwirtschaft bis ins 16. Jahrhundert zurück, aber die Grundlage für die eigentliche Entwicklung wurde mit diesen Maßnahmen und den damit verbundenen Konzepten im 18. Jahrhundert gesetzt (vgl. Baumgart und Teuffel 2005 S. 1). Durch die mit den Aufforstungen verbundene Nadelholzanreicherung verschob sich zwangsläufig das Baumartenverhältnis von ehemals laubholzdominierten Wäldern zu Wäldern mit einem deutlich höheren Nadelholzanteil (vgl. Huss 1987 S. 117).

Zu einem weiteren Höhepunkt im Nadelholzanbau kam es infolge der Reparationshiebe nach dem Zweiten Weltkrieg, bei denen große Waldflächen kahlgeschlagen und mit Fichte oder auch Kiefer wiederbestockt wurden (Fritz et al. 2006 S. 33). Durch die Knappheit von Arbeitskräften und Pflanzmaterial, aufgrund der leichteren Handhabbarkeit bei der Pflanzung, des schnelleren und ertragsreichen Wachstums und aufgrund von Nutzungsaspekten fiel auch hier die Wahl auf Nadelbaumarten.

Die daraus häufig resultierenden Nadelholzreinbestände führten – im Vergleich zu Laubholzbeständen – neben der erhöhten Produktion an Holzvolumen zeitgleich einerseits zu einer höheren Risikoanfälligkeit gegenüber abiotischen Risiken, wie zum Beispiel Stürmen oder Schneebruch, und andererseits zu biotischen Risiken durch eine Vielzahl an Schadorganismen, wie zum Beispiel Borkenkäfern (vgl. Albrecht et al. 2015 S. 63). Diese Risiken führen heute v.a. in den nach dem Zweiten Weltkrieg begründeten Reinbeständen zu Schadholzanteilen, die sich direkt auf den Erfolg von Forstbetrieben auswirken (vgl. Dieter 1997 S. 5).

Die Verringerung dieser Risiken, insbesondere der Auswirkungen von Stürmen und der damit verbundenen Schadholzmengen, wird häufig als eines der wesentlichen Ziele des aktuellen, großflächigen Waldumbaus in Deutschland gesehen, mit der Zielsetzung die Nadelholzanteile, insbesondere den der Fichte durch Laubholz, vornehmlich die Baumart Buche, zu ersetzen. Somit sollen sich die Risikogefährdung für Waldbestände verringern und stabilere Bestände entwickeln.

Der sich zurzeit in der Umsetzung befindende und von Naturschutzverbänden geforderte verstärkte Waldumbau (vgl. Weiger 2015 S. 32) bei gleichzeitig deutlicher Verringerung ertragsstarker Fichtenanteile hat jedoch direkte Auswirkungen auf die Rentabilität und die Liquidität von Forstbetrieben (vgl. Möhring et al. 2008 S. 341) und langfristig auch Auswirkungen auf die Versorgung der Holz be- und verarbeitenden Industrie (vgl. Schmidt 2015 S. 34).

Zwar ist die Buche die Schlüsselbaumart der potentiellen natürlichen Vegetation in Deutschland und bereits heute auf den besser nährstoffversorgten Standorten weit verbreitet, doch in ihrer betriebswirtschaftlichen Leistungsfähigkeit bleibt sie trotz der höheren Risikoanfälligkeit des Nadelholzes im Zuwachs deutlich

hinter diesem zurück (vgl. Möhring et al. 2008 S. 340). Unter den momentanen ökonomischen Rahmenbedingungen ist daher für den nachhaltigen wirtschaftlichen Erfolg von Forstbetrieben ein Nadelholzanteil essentiell. Darum ist es von zentraler wirtschaftlicher Bedeutung, diesen Anteil in den Betrieben langfristig zu erhalten und somit bei der Verjüngung von Beständen zu sichern (vgl. Möhring und Wilhelm 2015 S. 23).

Mit Mischbeständen aus Laub- und Nadelbaumarten wird die Erwartung verbunden, einen Ausweg aus dem Dilemma zwischen der hohen Risikoanfälligkeit des Nadelholzes und der Ertragsschwäche des Laubholzes zu finden. Hierdurch könnten einerseits ein gewisser Nadelholzanteil gehalten und andererseits die Risikoanfälligkeit reiner Nadelholzbestände reduziert werden.

Über die Auswirkung einer solchen Anreicherung von Laubholzbeständen mit Nadelholz auf die finanzwirtschaftlichen Teilziele von Forstbetrieben (Liquidität und Rentabilität) und die Ökonomie von Mischbeständen ist bisher noch wenig bekannt (in Anlehnung an Knoke und Wurm 2006 S. 304). Auch nachhaltige ökonomische Betriebsmodelle, die sowohl baumartenspezifische Risiken, Mischungseffekte der Baumarten wie auch unterschiedliche Produktionszeiten der Baumarten abbilden, fehlen bisher weitgehend.

1.2 Ziele der Arbeit

Vor allem Überlegungen zur Bekämpfung der Rohstoffknappheit führten zum verstärkten Anbau der Fichte. Mit diesem historisch bedingten Nadelholzangebot hat sich die Holz be- und verarbeitende Industrie mitentwickelt. Der Nutzungsanteil des Laubholzes liegt, selbst unter der Einbeziehung des Brennholzes, bei lediglich 23% (vgl. Mantau 2015 S. 24). Dies zeigt sich auch in der Wertschöpfungskette Forst und Holz, die aufgrund dieser Entwicklung und der Holzeigenschaften des Nadelholzes zu ca. 90% von diesem lebt (Schmidt 2015 S. 35).

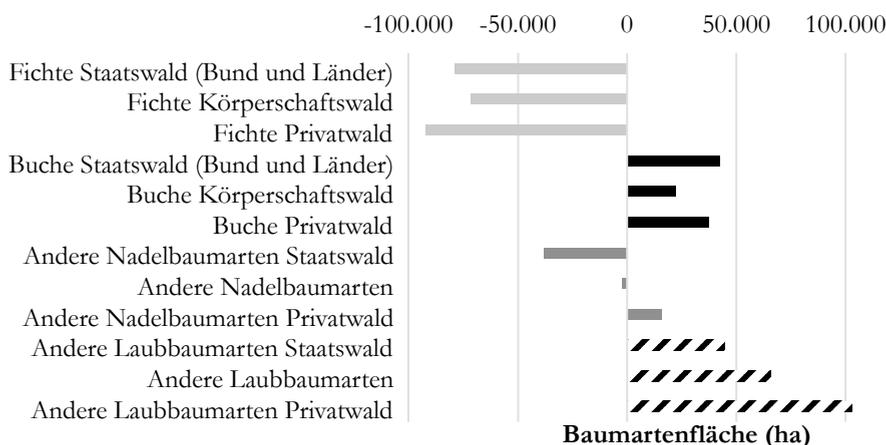


Abbildung 1: Flächenveränderung der Baumarten für die einzelnen Besitzarten in Deutschland von 2002 bis 2012, Ergebnisse der Bundeswaldinventur 3

Dieser Bedeutung des Nadelholzes für die Industrie steht die Entwicklung der in Abbildung 1 dargestellten Veränderung der Nadelbaumartenfläche zwischen den beiden letzten Inventurzeitpunkten der Bundeswaldinventur (2002 und 2012) gegenüber. Dabei zeigt sich der starke Rückgang der Fichtenfläche von 242.487 ha, was ca. 8% der Fichtenfläche des Jahres 2002 entspricht. Der große Flächenrückgang der Fichte und die in hohen Anteilen erfolgte Umwandlung in Laubbaumarten (II 2015a) stellen eine betriebswirtschaftlich problematische Entwicklung dar.

Vor dem Hintergrund der anhaltenden Abnahme der Fichtenfläche verfolgt diese Arbeit das Ziel, Möglichkeiten der Anreicherung von Laubbaumbeständen mit Nadelbaumarten ökonomisch zu beurteilen. Die Begründung dieser Mischbestände soll einer weiteren Abnahme der Nadelbaumartenfläche entgegenwirken. Als Grundlage sollen in einem ersten Schritt hierfür baumarten(gruppen)spezifische Kennzahlen der Deckungsbeitragsrechnung aus empirischen Daten von Forstbetrieben mit multivariaten statistischen Analyseverfahren ermittelt werden, obwohl die Daten von Forstbetrieben nicht baumarten(gruppen)weise erfasst werden.

Für die Analyse der Mischbestände sollen in einem zweiten Schritt nachhaltige ökonomische Betriebsmodelle mit Mischbeständen entwickelt werden. In die Modellentwicklung fließen das baumartenindividuelle Wachstum, die unterschiedlichen Produktionszeiten der Baumarten im Mischbestand und die baumartenindividuelle Risikogefährdung durch Stürme ein. Mit diesen Betriebsmodellen soll die von Knoke und Wurm (2006 S. 304) beschriebene Wissenslücke über die Ökonomie von Mischbeständen weiter geschlossen und die betriebswirtschaftlichen Folgen der Anreicherung reiner Laubbaumbestände mit Nadelbaumarten auf Betriebsebene analysiert werden.

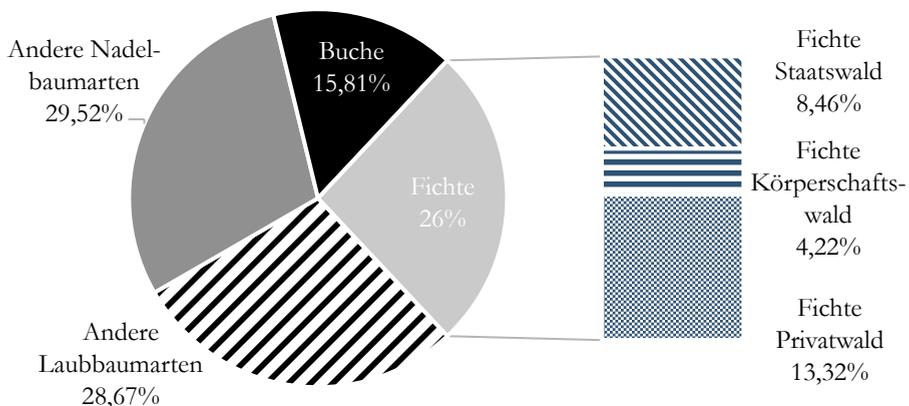


Abbildung 2: Anteile der Fichtenfläche nach Besitzarten und die Baumartenverteilung in Deutschland, Ergebnisse der Bundeswaldinventur 3

Die Modellbildung und Analyse in dieser Arbeit erfolgt mit den flächenmäßig in Deutschland am bedeutendsten Baumarten Buche und Fichte. Die Baumartenver-

teilung der Bundeswaldinventur 3, dargestellt in Abbildung 2, zeigt ihre Flächenanteile. Die Fichte nimmt dabei 26,00% und die Buche 15,81% an der Waldfläche ein (vgl. TI 2015b).

Vor dem Hintergrund betrieblicher Baumartenanteile soll diese Arbeit auch den für einen angestrebten betrieblichen Fichtenanteil benötigten Anteil der Fichte bei der Begründung von Mischbeständen unter Berücksichtigung baumartenindividueller Sturmschadensrisiken und Produktionszeiten herleiten.

1.3 Gliederung der vorliegenden Arbeit

Die eingangs dargestellte Problemstellung des anhaltenden Waldumbaus und der Reduktion des Nadelholzanteils folgen die Erläuterung der Methodik zur betriebswirtschaftlichen Analyse mittels Induktion und Deduktion und die Einführung in die Modellanalyse. Die Einführung schließt mit der Differenzierung von privaten und öffentlichen Betrieben und der Fokussierung auf das Leitbild eines idealtypischen, autonom wirtschaftenden Forstbetriebes.

In Kapitel 2 erfolgt die Ermittlung empirischer baumartengruppenspezifischer Kennzahlen auf der Basis von Betriebsvergleichsdaten. Als Grundlage hierfür wird zuerst die Datengrundlage des Testbetriebsnetzes Forst beschrieben und auf die darin erfassten privaten Forstbetriebe eingegrenzt. Es folgt die Erläuterung der Methodik der multiplen Regressionsanalyse und der forstlichen Deckungsbeitragsrechnung. Sofern einzelne baumartenspezifische Werte der Deckungsbeitragsrechnung in den Erhebungsdaten fehlen, werden diese mit der multiplen Regressionsanalyse ermittelt. Die korrespondierenden statistischen Ergebnisse sind im Anhang der Arbeit dargestellt. Aufgrund fehlender Mischbestandsinformationen der Betriebsvergleichsdaten und der Langfristigkeit des forstlichen Produktionsprozesses muss zur Beantwortung der Fragestellung dieser Arbeit auf Modelle zurückgegriffen.

In Kapitel 3 wird hierfür die Basis durch die Entwicklung der Mischbestandsmodelle gelegt. Zu diesem Zweck werden durch Literaturanalysen der Misch- vom Reinbestand abgegrenzt, Mischungsanteile der Baumarten bestimmt sowie die Bestände anhand von Mischungsart und Mischungsform klassifiziert. Es schließt sich, ebenfalls auf der Grundlage von Literaturangaben, eine Darstellung der Methodik zur Beurteilung der Produktivität von Mischbeständen an. Im abschließenden Teil des Kapitels werden die naturalen Grundlagen des Bestandeswuchsmodells mit den dazugehörigen Waldentwicklungstypen, den waldbaulichen Grundlagen, der Vergleich der Wuchsverhältnisse der Baumarten und die für die Modellierung der Anreicherung von Buchenreinbeständen mit Fichte benötigten waldbaukundlichen Eingangsgrößen dargestellt.

Im 4. und 5. Kapitel erfolgt die eigentliche forstbetriebliche Modellentwicklung. Während in Kapitel 4 die Modellierung der Flächendynamik beschrieben wird, erfolgt in Kapitel 5 die Übertragung auf forstbetriebliche Modelle. Für die Modellierung der Flächendynamik werden anhand von Literaturangaben die An-

wendung von Markovschen Ketten skizziert, risiko- und endnutzungsbedingte Flächenübergangswahrscheinlichkeiten abgeleitet und die aus Literaturanalysen zugrunde gelegten Eingangsparameter der verwendeten Weibull-Funktionen diskutiert. Dabei werden sowohl das baumartenindividuelle naturale Risiko als auch die Endnutzungswahrscheinlichkeiten der Baumarten Buche und Fichte erörtert. Basierend auf Literaturangaben wird im Anschluss daran die Modellierung der Erweiterung der Kronenschirmfläche der Buche nach dem Ausscheiden der Zeitmischungsbaumart Fichte beschrieben.

Zum Abschluss des Kapitels werden die einzelnen Faktoren, die die Flächen- dynamik von einem Bestand von der Kulturbegründung bis zur abschließenden Ernte bestimmen, zusammengefasst. Die daraus resultierenden Auswirkungen der Flächendynamik werden anschließend in Kapitel 5 auf die klassischen nachhaltigen Betriebsmodelle übertragen und sowohl für das Normalwald- als auch für das Zielwaldmodell beschrieben. Diese Modelle werden dann unter den in Kapitel 4 beschriebenen Kriterien, der Risiko- und nutzungsbedingten Flächenentwicklung und der Kronenausdehnung der Buche nach dem Ausscheiden der Fichte, zum sogenannten Mischwaldmodell weiterentwickelt. Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Modelle und die Berechnungsgrundlage für die Bestimmung von Mischungsanteilen der Baumarten in der Betriebsklasse¹ schließen das Kapitel ab.

Die für die ökonomische Bewertung der naturalen Daten verwendeten Eingangsgrößen werden beginnend mit den Begründungskosten des Bestandes bis hin zu den in den Bewertungsmodellen verwendeten Kapitalkosten in Kapitel 6 beschrieben.

Die der ökonomischen Bewertung des Nadelholzanreicherungsprozesses zugrunde liegenden Methoden sind in Kapitel 7 beschrieben. Hierbei werden zunächst die Finanzierungsformen von Forstbetrieben und die Notwendigkeit der betrieblichen Liquidität erläutert. Es folgt die Beschreibung des Zahlungsstroms, der aus der Zuordnung der ökonomischen Größen zum naturalen Modell resultiert. Auf diesem bauen die in diesem Kapitel dargestellten Methoden der Investitionsrechnung auf. Dabei werden sowohl die Grundlagen der Amortisationsrechnung als auch Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung zur Beurteilung ökonomischer Auswirkungen auf die betriebliche Liquidität und Rentabilität verwendet.

Die Ergebnisse, die aus den in den Vorkapiteln entwickelten Modellen resultieren, werden in Kapitel 8 vorgestellt. Den Beginn bildet die Darstellung der naturalen Auswirkungen der Nadelholzanreicherung auf die Produktivität von Mischbeständen. Es schließt sich eine Analyse der Folgen dieser Nadelholzanreicherung auf die Liquidität sowie die Rentabilität von Betrieben an. Hierzu werden zuerst die Amortisationszeiten der Baumartenmischungen dargestellt, um anschließend die Ergebnisse für einzelne Mischungsvarianten anhand ausgewählter Methoden der dynamischen Investitionsrechnung zu diskutieren. Weiter werden

¹ Als Betriebsklasse wird die Zusammenfassung von Beständen bezeichnet, die in ihrer Gesamtheit eine nachhaltige Bewirtschaftung ermöglichen (Speidel 1967 S. 109).

die Reinerträge anhand der forstlichen Deckungsbeitragsrechnung im Detail für die einzelnen Mischungsvarianten dargestellt und erläutert. Zur Analyse der ökonomischen Folgen der Nadelholzanreicherung wird dabei auf eine Grenzbetrachtung (Marginalanalyse) zurückgegriffen.

Ein weiterer Schwerpunkt des Kapitels 8 stellt die Beschreibung des dynamischen Übergangsprozesses von einer reinen Buchenbetriebsklasse zu einer Mischbestandsbetriebsklasse dar. Über die Entwicklung des Deckungsbeitrages II werden die Auswirkungen auf die betriebliche Liquidität analysiert. Mit der Sensitivitätsanalyse, die die Auswirkung einer Veränderung der verwendeten ökonomischen Eingangsgrößen auf die Vergleichsgröße des Reinertrages verdeutlicht, schließt das Kapitel. In diesem Zusammenhang werden sowohl die in den Modellen verwendete Produktionsdauer der Zeitmischungsbaumart Fichte als auch die vom Mischungsanteil der Baumarten abhängige Risikostärke und die damit verbundenen Kalamitätsnutzungsanteile untersucht.

Mit der abschließenden Diskussion in Kapitel 9 wird ein Vergleich sowohl der naturalen als auch der ökonomischen Modellergebnisse dieser Arbeit mit realen betrieblichen Daten vollzogen. Die Diskussion der verwendeten Methodik sowie Schlussfolgerungen und die Ableitung von Empfehlungen schließen die Arbeit ab.

1.4 Induktion und Deduktion, die Methodik zur betriebswirtschaftlichen Analyse

Die Induktion und Deduktion gehören zu den wichtigsten Methoden der betriebswirtschaftlichen Erkenntnisgewinnung (vgl. Häusler 2012 S. 10). Die betriebswirtschaftliche Forschungsmethodik unterscheidet dabei zwei Teilbereiche: die eigentliche Modellbildung und die anschließende Überprüfung des Modells.²

Mit der Induktion wird vom Besonderen auf das Allgemeine geschlossen, indem versucht wird, aus einzelnen Beobachtungen in den Betrieben oder aus vorhandenen Teilkenntnissen durch Verallgemeinerungen und Verdichtung auf ein Gesamtbild zu schließen. Die Induktion kann somit als eine Methode zur Ermittlung von Theorien auf der Basis von (betrieblichen) Beobachtungsdaten (vgl. Schurz 2013 S. 31) verstanden werden. Ausgehend von tatsächlich in Forstbetrieben beobachteten Sachverhalten kann auf allgemeingültige Erklärungen der Wirklichkeit geschlossen werden (in Anlehnung an Peters et al. 2005 S. 11). Die Induktion dient dabei der Entwicklung von Zusammenhängen, Forschungsimpulsen und Hypothesen (vgl. Hagenloch 2009 S. 3). Insbesondere Betriebsvergleichsdaten eignen sich, um mithilfe der Induktion aus Daten der Betriebe allgemeingültige Rückschlüsse und Erkenntnisse für die forstliche Betriebswirtschaft abzuleiten.

Die Deduktion als analytisch-deduktive Methode schließt vom Allgemeinen auf das Besondere. Aus der abstrahierten Realität forstlicher Produktionsmodelle werden auf der Basis von Annahmen Modelle konstruiert, aus denen Schlussfolge-

² Mit der Gliederung dieser Arbeit wird dieser Methodik gefolgt.

rungen für einzelne Sachverhalte abgeleitet werden. Die aus dem Modell abgeleiteten logischen Relationen haben dabei so lange Bestand, bis diese widerlegt werden bzw. an der forstlichen Realität scheitern (in Anlehnung an Hagenloch 2009 S. 3 f.). Wissenschaftstheoretisch wird diese Vorgehensweise als Lehre von der deduktiven Methodik der Nachprüfung bezeichnet (vgl. Popper 2000 S. 118). Dabei wird vorausgesetzt, dass sich eine Hypothese bzw. ein Modell nur empirisch überprüfen lässt, nachdem dieses auch aufgestellt wurde.

Modelle nehmen in der Betriebswirtschaftslehre dort, wo empirische Daten fehlen und Realexperimente nur begrenzt durchführbar sind, traditionell einen hohen Stellenwert ein (vgl. Weber und Kabst 2006 S. 27 f.).

1.5 Grundlagen der Modellanalyse

Aufgrund der langen forstlichen Produktionsdauer sind reale Experimente zur Untersuchung von Bewirtschaftungskonzepten nur begrenzt möglich, denn am selben Bestand lassen sich die Entwicklung von der Kultur bis zur abschließenden Ernte am Bestandesende nicht beobachten, da dies Jahrzehnte bzw. Jahrhunderte dauern würde (vgl. Bossel 2004 S. 50). Die Einheit von Produktionsmittel und Produkt erschwert dies noch weiter, denn der jährliche Zuwachs kann nicht dem forstlichen Produktionsprozess entnommen und am Markt abgesetzt werden. Grund hierfür ist die Tatsache, dass ein weiterer Holzzuwachs nur an den im Bestand stehenden Bäumen erfolgen kann, der aber zu einer Dimensions- und Wert-erhöhung führt. Erst durch die den Produktionsprozess abschließende Ernte entstehen am Markt absatzfähige Produkte (vgl. Möhring 2009 S. 110). Modelle sind daher häufig die einzige Möglichkeit, langfristige Folgen von Entscheidungen und deren betriebliche Zusammenhänge zu untersuchen.

In der Forstwissenschaft weisen Modelle traditionell einen hohen Stellenwert auf. Diese stellen ein vereinfachtes Abbild der betrieblichen Realität dar. Wenn-gleich kein Modell in der Lage ist, die Komplexität und die Vielfalt von Forstbetrieben mit ihrer naturalen Grundlage umfassend abzubilden, so stellen diese in der Forstwirtschaft dennoch die unverzichtbare Grundlage für die betriebliche Entscheidungsfindung dar. Mithilfe von Modellen werden die komplexen Zusammenhänge der betriebswirtschaftlichen Realität auf die wesentlichen Grundzusammenhänge verdichtet und überschaubarer gemacht.

Langfristige Entscheidungen in Forstbetrieben müssen häufig ohne vollständige Informationen mit dem aktuellen Wissensstand getroffen werden. Bei diesen unvollständig vorliegenden Informationen können Modelle durch ein Variantenstudium der unbekanntenen Größe die betriebliche Entscheidungsfindung erleichtern.

Die mit dem Modell zu beantwortende Fragestellung, der Modellzweck, prägt die Modellentwicklung. Somit stellt der Modellzweck die wichtigste Vorgabe der eigentlichen Modellentwicklung dar. Korrespondierende Modellvariablen sind dabei zum Beispiel die Wachstumsdaten der verschiedenen Baumarten, unter-

schiedliche Standortseigenschaften und ökonomische Daten, wie zum Beispiel Holzerlöse und Lohnkosten (vgl. Buongiorno und Gilles 2003 S. 3). Modelle geben jedoch immer nur einen Ausschnitt der Realität wieder und beinhalten insofern eine vereinfachte Abbildung der forstbetrieblichen Realität oder eines Ausschnittes derselben. Das am ehesten geeignete Modell ist dasjenige, das seinen Zweck bei einer geringstmöglichen Komplexität erfüllt. Modelle sind daher so einfach wie möglich und so komplex wie nötig zu gestalten (vgl. Bosch 1971 S. 346).

In Abhängigkeit vom Einsatzzweck kann zwischen Beschreibungs-, Erklärungs- und Entscheidungsmodellen unterschieden werden (in Anlehnung an Hagenloch 2009 S. 5 erweitert):

- Ökonomische Vorgänge lassen sich mit Beschreibungsmodellen darstellen, die empirische Erscheinungen abbilden, ohne jedoch diese zu bewerten oder zu analysieren. Die Buchhaltung von Forstbetrieben stellt beispielsweise ein solches Modell dar, in dem Geschäftsvorfälle systematisch und chronologisch dargestellt werden. Auch die in dieser Arbeit verwendeten waldwachstumskundlichen Modelle sowie die Darstellung der End- bzw. Zielstärkennutzung können dieser Kategorie zugeordnet werden.
- Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge lassen sich mit Erklärungsmodellen beschreiben. Die Produktions- und Kostentheorie stellt ein Beispiel für betriebswirtschaftliche Erklärungsmodelle dar.
- Das Ziel der Entscheidungsmodelle besteht darin, dem Entscheidungsträger Informationen darüber bereitzustellen, wie unter Berücksichtigung der Handlungsalternativen und Rahmenbedingungen betriebliche Ziele erreicht werden können (beispielsweise durch Berechnungen mit Methoden der Investitionsrechnung zur Bestimmung der optimalen Umtriebszeit oder des Zieldurchmessers).

Für die Unterstützung bei der betrieblichen Entscheidungsfindung der Baumarten- und Mischungsanteilwahl im Rahmen der Anreicherung von Laubholzbeständen mit Nadelholz eignen sich somit ökonomische Entscheidungsmodelle, die die Fragestellung, das Entscheidungsproblem, die Rahmenbedingungen, das Zielsystem sowie die Alternativen und die betriebswirtschaftlichen Konsequenzen für den Forstbetrieb abbilden (in Anlehnung an Speidel 1970 S. 26 ff.).

1.6 Differenzierung von Betriebstypen

Der Begriff des Betriebes wird in der betriebs- und volkswirtschaftlichen Literatur unterschiedlich definiert und dementsprechend auch der Betrieb von seiner Umwelt abgegrenzt. Hier wird dem Ansatz von Hagenloch (2009 S. 9 ff.) gefolgt und Wirtschaftseinheiten aufgrund ihrer Bedarfsdeckung in Haushalte auf der einen Seite und Betriebe auf der anderen Seite unterschieden. Betriebe sind demzufolge gegenüber Haushalten durch die im Vordergrund stehende Fremdbedarfsdeckung abgegrenzt. Betriebe produzieren Güter, die von Dritten nachgefragt werden. Sie

werden auf Basis ihrer Anteilseigner in private und öffentliche Betriebe unterschieden. Private Betriebe werden in der Betriebswirtschaft auch als Unternehmen bezeichnet, während öffentliche Betriebe, die vollständig oder überwiegend im Eigentum der öffentlichen Hand sind, als öffentliche Betriebe bezeichnet werden. Mit dieser Differenzierung geht ein wichtiger Unterschied in der Zielsetzung der Wirtschaftstätigkeit einher. Während aus traditioneller betriebswirtschaftlicher Sicht bei privaten Betrieben dem Streben nach Gewinn bzw. der Maximierung des Gewinns eine wesentliche Rolle zukommt, orientieren sich öffentliche Betriebe in der Regel in ihrer Zielsetzung in besonderem Maße an gemeinwirtschaftlichen Zielsetzungen (in Anlehnung an Hagenloch 2009 S. 9 ff.). Die tatsächlichen Ziele von Waldbesitzern sind unabhängig von diesen beiden Kategorien jedoch komplex und äußerst vielfältig (vgl. Weber 2010 S. 293 und Guttenberg 2010 S. 324). Im Folgenden wird der allgemeinere Begriff des Betriebes verwendet, um sowohl öffentliche als auch private Forstbetriebe zu beschreiben.

Im Mittelpunkt größerer Forstbetriebe steht trotz vielfältiger Zielsetzungen insbesondere im Privatwald die Notwendigkeit, laufend Erträge zu erwirtschaften (in Anlehnung an Guttenberg 2010 S. 324) und damit stets die langfristige Existenz des Betriebes zu gewährleisten (in Anlehnung an Züger 2008 S. 57). Aus diesen übergeordneten Zielsetzungen können die finanzwirtschaftlichen Teilziele Liquidität und Erfolg abgeleitet werden (vgl. Gonschorrek und Hoffmeister 2007 S. 214). Die Liquiditätsziele beinhalten die stete Zahlungsbereitschaft und entsprechende Liquiditätsreserven, während zu den Erfolgszielen die Rentabilität und der Reingewinn zählen (in Anlehnung an Züger 2008 S. 57). Basierend auf diesen Zielsetzungen wird das Leitbild eines idealtypischen, autonom wirtschaftenden Forstbetriebs für die ökonomischen Analysen dieser Arbeit zugrunde gelegt.

Große Forstbetriebe mit Beständen unterschiedlichen Alters und mit einer meist vielfältigen Baumartenzusammensetzung und Struktur entwickeln ihr übergeordnetes Wirtschaftsziel und die korrespondierenden finanzwirtschaftlichen Teilziele auf der gesamtbetrieblichen Ebene (vgl. Speidel 1967 S. 161 ff.). Entscheidungen werden für zwei Ebenen abgeleitet: für die Ebene des gesamten Betriebes und für die des einzelnen Bestandes. Aus den Produkt- und monetären Zielen leiten sich zum Beispiel Baumarten- und Mischungsanteile sowie Umtriebszeiten, Zielstärken, Vorräte und Sortimente ab. Für den Einzelbestand werden hieraus Ziele für die Baumartenwahl, Bestandesbegründung, Durchforstung und abschließende Nutzung entwickelt (vgl. Speidel 1972 S. 96).

2 Analyse empirischer Betriebsvergleichsdaten zur Erfolgsbeurteilung von Baumarten

Betriebliche Kennzahlen sind mit die wichtigsten Hilfsmittel bei der Analyse der ökonomischen Leistungskraft von Baumarten und beispielsweise auch bei der Analyse der Folgen der Anreicherung von Buchenbeständen mit Nadelbaumarten. Betriebliche Kennzahlen stellen sowohl die wirtschaftliche Realität des Gesamtbetriebes als auch die Leistung einzelner forstbetrieblicher Produktbereiche dar, wie zum Beispiel des Produktbereichs I (vgl. Möhring und Wilhelm 2013b S. 23), der den forstlichen Produktionsprozess beinhaltet. Die einzelbetrieblichen Kennzahlen enthalten verdichtete Messgrößen, die in präziser, konzentrierter und dokumentierter Form über zahlenmäßig erfassbare Sachverhalte des Betriebes informieren (vgl. Preißler 2008 S. 11). Durch Zeitreihen bilden sie neben der aktuellen wirtschaftlichen Lage auch wirtschaftliche Entwicklungen ab (vgl. Ripken 2002 S. 100).

Betriebliche Kennzahlen erhalten eine höhere Aussagekraft, wenn diese mit realen Branchendurchschnittsdaten im Rahmen eines Betriebsvergleichs verglichen werden (vgl. Posluschny 2010 S. 41). Die Daten aus Betriebsvergleichen stellen eine wichtige Basis im Forstbereich dar, um Aussagen über einzelne Betriebe oder Gruppen von Betrieben zu einem bestimmten Zeitpunkt treffen zu können.³ Die Stärke dieser Vergleiche liegt insbesondere aufgrund der langfristi-

³ Auch wenn die Erfassung und Bereitstellung der Daten auf freiwilliger Basis erfolgen und im Sinne mathematisch-statistischer Überlegungen nicht zu einer repräsentativen Beurteilungs-

gen forstlichen Produktionsprozesse und der Einheit von Produktionsmittel und Produkt (Möhring 2009 S. 110) darüber hinaus in der Erfassung und Darstellung von Entwicklungen über längere Zeiträume. Durch die einheitliche systematische Erfassung einzelbetrieblicher Daten und die im Produktplan Forst definierten Tätigkeitsbereiche ist eine zwischenbetriebliche Vergleichbarkeit und eine betriebsübergreifende Datenauswertung möglich.

2.1 Testbetriebsnetz Forst als Grundlage für empirische baumartenspezifische Kennzahlen

Daten der Betriebe des Betriebsvergleichs Testbetriebsnetz Forst werden für die Beantwortung zahlreicher forstpolitischer Fragestellungen und zur Einschätzung der wirtschaftlichen Lage der Forstwirtschaft in Deutschland ausgewertet. Für dieses Testbetriebsnetz Forst des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft melden rund 350 Betriebe des Staats-, Körperschafts- und Privatwaldes auf einer jährlichen Basis rund 650 naturale und betriebswirtschaftliche Kennzahlen (vgl. Lohner et al. 2016 S. 10).

Brabänder (1967 S. 428) empfiehlt aufgrund der Vielfalt von Forstbetrieben, die sich hinsichtlich ihrer Art und Merkmale deutlich voneinander unterscheiden können, Forstbetriebe für eine zwischenbetriebliche Vergleichbarkeit anhand weniger charakteristischer Eigenschaften zu Gruppen zusammenzufassen. Aufbauend auf diesen Empfehlungen werden Forstbetriebe meist anhand der Eigentumsart, der Betriebsgröße und ggf. der betrieblichen Hauptbaumart differenziert. Insbesondere die Eigentumsform beeinflusst die Betriebsziele wesentlich und übt somit einen direkten Einfluss auf die Organisationsform und die Finanzierung des Betriebes aus. Als ein weiteres prägendes Merkmal wirkt sich die Größe des Betriebes auf die Bewirtschaftungsintensität, die betriebliche Organisation und die Höhe der Fixkosten aus (vgl. Brabänder 1967 S. 430).

Da die Gruppe der Staatswaldbetriebe im Vergleich zu der Anzahl an teilnehmenden Privatwaldbetrieben recht klein ist und nicht in allen Bundesländern jährlich Daten zum Testbetriebsnetz bereitstellt (vgl. Ermisch et al. 2016 S. 30 f.), wird die folgende Analyse auf die Eigentumsart des Privatwaldes bezogen. Durch die Mindestgröße der Waldfläche von 200 ha wird die Vergleichbarkeit hinsichtlich der Bewirtschaftungsintensität und der mit der betrieblichen Organisation verbundenen Fixkosten sichergestellt. Die verwendeten Daten stammen von 125 privaten Forstbetrieben mit einer durchschnittlichen Betriebsfläche von 1.067 ha.

stichprobe führen (vgl. Toscani 2016 S. 4 f.), so eignen sich diese dennoch, um wichtige Entwicklungen der wirtschaftlichen Lage von Forstbetrieben zu beschreiben (vgl. Möhring et al. 2010a S. 77 f.).

Als Betrachtungszeitraum wurden die Jahre 2003 bis 2011 gewählt.⁴ Hierdurch lassen sich sturmbedingte Schwankungen von Einzelbetrieben oder Betrieben einer Region im Holzeinschlag, in der Bestandesbegründung, in der Pflege sowie weiterer auf Sturmereignisse zurückführenden Maßnahmen im Sturmjahr und in den Folgejahren in der Analyse mit abbilden. Bei kleineren lokalen Ereignissen gleichen sie sich aufgrund der großen deutschlandweiten Datengrundlage und der hohen Anzahl von Betrieben aus.

2.2 Multiple Regressionsanalyse und baumartengruppenspezifische Deckungsbeiträge

Mit der Datenerfassung im Betriebsvergleich geht eine Aggregation und Verdichtung von einzelbetrieblichen Daten einher. Diese Vereinfachungen haben zur Folge, dass im Rahmen der klassischen forstlichen Betriebsvergleiche keine Informationen über Einzelbestände vorliegen. Selbst für einzelne Baumarten werden in den einzelnen Betrieben neben den baumartenspezifischen Holzerlösen nur die baumartenspezifischen Einschlagsmengen erfasst und die mit der forstlichen Holzproduktion verbundenen Kosten im Rechnungswesen der Betriebe summarisch für alle Baumarten zusammengefasst und dokumentiert. Für eine Analyse baumartenspezifischer Daten von Forstbetrieben sind daher die in den Betrieben summarisch erfassten Produktionskosten mithilfe mathematisch-statistischer Verfahren verursachungsgerecht den einzelnen Baumarten und den jeweiligen Deckungsbeiträgen zuzuweisen.⁵

Die baumartenspezifischen Produktionskosten, die von der Produktionsmenge bzw. dem Einschlag oder der Fläche der einzelnen Baumart abhängig sind, lassen sich durch entsprechende Kostentreiber identifizieren (in Anlehnung an Horngren et al. 2001 S. 309). Dabei werden entsprechend der forstlichen Deckungsbeitragsrechnung (vgl. Oesten und Roeder 2012 S. 309 ff.) die fixen und variablen Kosten voneinander abgegrenzt. Im Folgenden wird der Schwerpunkt auf die variablen Kosten gesetzt, die direkt von der baumartenspezifischen Produktionsfläche und den korrespondierenden Einschlagsmengen abhängig sind. Mit der Kostenfunktion lässt sich dabei der mathematisch-funktionale Zusammenhang zwischen den einzelnen baumartenspezifischen Produktionskosten für die einzelnen Stufen der Deckungsbeitragsrechnung und den baumartenspezifischen Einschlagsmengen bzw. der Baumartenfläche darstellen.

⁴ Für das Jahr 2003 wurde die Datenerfassung des Testbetriebsnetzes überarbeitet. Demzufolge wurde das Jahr 2003 als Startjahr des Betrachtungszeitraums gewählt. Zum Zeitpunkt der Analyse lagen die Daten für 2012 und weitere Folgejahre noch nicht vor.

⁵ Die Betriebe des Testbetriebsnetzes Forst unterscheiden bei der Datenerhebung lediglich die sogenannten Baumartengruppen Buche, Eiche, Fichte und Kiefer. Aufgrund von Zuordnungsproblemen und geringen Anteilen am Gesamteinschlag wird die Eiche der Baumartengruppe Buche zugeschlagen und diese im Weiteren als Laubholz bezeichnet.

Grundlage für die Schätzung der Kostenfunktion stellt in Anlehnung an Horngren et al. (2001 S. 309) die Annahme dar, dass der Zusammenhang zwischen den baumartenindividuellen Produktionskosten und der Produktionsmenge bzw. der Baumartenfläche durch eine lineare Funktion beschrieben werden kann. Diese wird durch die folgenden Annahmen ergänzt:

- Für die Schätzung der Kostenfunktion wird angenommen, dass jeder zusätzlich geerntete Festmeter der jeweiligen Baumart direkt zu entsprechenden Holzerntekosten führt.
- Die Kostenfunktion verläuft durch den Ursprung.
- Skaleneffekte werden aufgrund der hohen durchschnittlichen Holzbodenfläche der Betriebe und der Ausklammerung kleinerer Betriebe mit einer Holzbodenfläche von unter 200 ha vernachlässigt.
- Große Kalamitätsereignisse wie zum Beispiel Stürme führen zu Schwankungen im Einschlag und den damit verbundenen Holzerlösen im Jahr des Ereignisses und meist auch in den Folgejahren. Ein zu kurz gewählter Zeitraum zum Beispiel auf der Basis von einzelnen Jahren kann daher zu deutlichen Abweichungen zwischen den Werten der Einzeljahre führen. Um die Schwankungen durch die Stürme des letzten Jahrzehnts auszugleichen und gleichzeitig die steigenden Holzerlöse miteinzubeziehen, werden als Zeitraum für die Analyse die Jahre 2003 bis 2011 zusammengefasst.⁶
- Baumartenunspecifische Fixkosten, die unabhängig von der Produktionsintensität und den damit verbundenen flexiblen baumartenspezifischen Kosten anfallen, werden in dieser Analyse, mit Ausnahme der Erschließungs- und Verwaltungskosten, nicht berücksichtigt.

Meist werden Kostenfunktionen aus Daten der Vergangenheit mithilfe statistischer Analysen geschätzt (vgl. Friedl et al. 2010 S. 223 ff.). Hierzu dienen die oben beschriebenen Daten des Testbetriebsnetzes Forst für die Jahre 2003–2011. Dabei wird versucht den Zusammenhang zwischen den Gesamtkosten, beispielsweise für die Holzernte und die eingeschlagenen Holzvolumina, für die einzelnen Baumarten zu ermitteln. Die sich daraus ergebende zentrale Frage bei der Schätzung der Kostenfunktion ist die nach dem Wirkungszusammenhang zwischen den Kostentreibern, bei diesem Beispiel zwischen dem Einschlag der einzelnen Baumarten und den Gesamtkosten des Betriebes für den Holzeinschlag. Diese Verbindung zwischen mehreren unabhängigen und einer abhängigen Variablen, wie bei diesem Beispiel der Zusammenhang zwischen der bekannten Einschlagsmenge verschiedener Baumarten innerhalb einer Periode und den korrespondierenden baumartenunspecifischen Holzerntekosten, lässt sich mit der multiplen Regressionsanalyse ermitteln (in Anlehnung an Horngren et al. 2001 S. 309 ff.). Durch den primären Anwendungszweck der multiplen Regressionsanalyse, der Analyse des

⁶ Hierdurch sind auch die sturmbedingten Schwankungen im vermarkteten Holzvolumen des Sturmjahrs 2007 mit Kyrill sowie die regionalen Auswirkungen auf die Folgejahre mit abgebildet.

kausalen Zusammenhangs, eignet sich die Methode, um die nur in Summe vorliegenden baumartenunspezifischen Holzerntekosten den einzelnen Baumarten in Abhängigkeit von ihrer Einschlagsmenge zuzuordnen (in Anlehnung an Backhaus et al. 2010 S. 56 ff.).

Die Schätzgleichung für den linearen Zusammenhang zwischen mehreren unabhängigen und einer abhängigen Variablen lässt sich wie folgt allgemein formulieren (vgl. Horngren et al. 2001 S. 355):

Formel 1: Allgemeingültige Schätzgleichung der Kostenfunktion

$$Y = b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3$$

Y	=	Kostenvariable (Gesamtkosten)
X_1, X_2, X_3	=	unabhängige Variablen
b_1, b_2, b_3	=	Regressionskoeffizienten

Die Regressionsgleichung zur Zuordnung der Holzerntekosten zu den einzelnen eingeschlagenen Volumina der Baumartengruppen für die Berechnung des baumartengruppenspezifischen Deckungsbeitrags I wird durch die folgende Formel beschrieben:

Formel 2: Schätzgleichung der baumartengruppenspezifischen Holzerntekosten in Abhängigkeit von den summierten Holzerntekosten und dem Erntevolumen der jeweiligen Baumartengruppen

$$\text{Holzerntekosten (gesamt)} = b_1 * \text{Volumen Laubholz} + b_2 * \text{Volumen Fichte} + b_3 * \text{Volumen Kiefer}$$

Die geschätzte Regressionsgleichung für die baumartengruppenspezifischen Holzerntekosten lautet wie folgt:

Formel 3: Schätzgleichung der baumartengruppenspezifischen Holzerntekosten in Abhängigkeit von den summierten Holzerntekosten und dem Erntevolumen der jeweiligen Baumartengruppen

$$\begin{aligned} \text{Holzerntekosten} \\ = 20,33 * \text{Volumen Laubholz} + 18,64 * \text{Volumen Fichte} + 20,42 * \text{Volumen Kiefer} \end{aligned}$$

Für die Schätzgleichung liegen die durchschnittlichen Holzerntekosten für das Laubholz bei 20,33 €/Fm, für die Fichte bei 18,64 €/Fm und für die Kiefer bei 20,42 €/Fm. Diese Regressionskoeffizienten beschreiben die Veränderung der gesamten Holzerntekosten, die mit einer Erhöhung um eine Einheit bei der jeweiligen unabhängigen Variablen einhergehen (Erhöhung des Einschlags einer Baumartengruppe um einen Festmeter). Dabei wird vorausgesetzt, dass die anderen unabhängigen Variablen unverändert bleiben. So steigen beispielsweise die Holzerntekosten um 20,33 €, wenn ein weiterer Festmeter Laubholz gerettet wird, während der Einschlag der Fichte und Kiefer konstant gehalten wird. Die Werte erscheinen insofern ökonomisch plausibel, da sie gemeinsam in Verbindung mit den geretteten Holzvolumina der jeweiligen Baumartengruppe zur Erklärung der Höhe der gesamten baumartenunspezifischen Holzerntekosten beitragen.⁷ Die statistischen Ergebnisse der Modellevaluation für das multiple Regressi-

⁷ Diese Größenordnungen decken sich auch mit Erfahrungswerten aus Betrieben mit entsprechenden Baumartenschwerpunkten.

onsmodell der baumartengruppenspezifischen Holzerntekosten sind in Kapitel 12.1 im Anhang dargestellt.

Während für die Bestimmung der baumartengruppenspezifischen Holzerntekosten, die der Berechnung des Deckungsbeitrags I⁸ zugrunde liegen, das Einschlagsvolumen der jeweiligen Baumartengruppe als unabhängige Variable dient, werden für die weiteren Stufen der Deckungsbeitragsrechnung und für die nach dem oben stehenden Prinzip beschriebene Aufstellung der Schätzgleichung die jeweilige Fläche der Baumartengruppe zur Ermittlung der baumartengruppenspezifischen Produktionskosten und als unabhängige Variable verwendet.

In Tabelle 1 sind die durchschnittlichen Ergebnisse der Deckungsbeitragsrechnung für die jeweilige Baumartengruppe der privaten Forstbetriebe des Testbetriebsnetzes Forst dargestellt, die mit den baumartengruppenspezifischen Ergebnissen der multiplen Regressionsanalyse (in der folgenden Tabelle kursiv dargestellt) ergänzt wurden.⁹

⁸ Der Deckungsbeitrag I, der auch als erntekostenfreier Holzerlös bezeichnet wird, ist der Betrag, der dem Forstbetrieb nach Abzug der Kosten für die Holzernte von den Holzerlösen zufließt.

⁹ Eine Auswahl entsprechender Testergebnisse für die korrespondierenden Regressionsfunktionen findet sich unter 12.1 im Anhang.

Tabelle 1: Durchschnittliche Deckungsbeiträge des Testbetriebsnetzes für Privatwaldbetriebe nach Baumartengruppen (2003–2011)

		Laubholz	Fichte	Kiefer
Einschlag	Fm/ha/Jahr	4,33	11,16	5,74
Holzerlöse	€/Fm	44,12	46,72	33,98
Holzerntekosten	€/Fm	20,33	18,64	20,42
Erntekosten freier Holzerlös	€/Fm	23,79	28,08	13,56
Holzerlöse	€/ha/Jahr	191,17	521,27	195,08
Holzerntekosten	€/ha/Jahr	88,10	207,97	117,22
Deckungsbeitrag I	€/ha/Jahr	103,08	313,30	77,86
Begründungskosten ¹⁰	€/ha/Jahr	7,80	21,73	39,87
Pflegekosten	€/ha/Jahr	4,65	18,34	6,71
Deckungsbeitrag II	€/ha/Jahr	90,63	273,23	31,28
Erschließungskosten	€/ha/Jahr	6,17	26,47	8,79
Deckungsbeitrag III	€/ha/Jahr	84,46	246,77	22,49
Verwaltungskosten	€/ha/Jahr	139,92	127,03	77,42
Reinertrag	€/ha/Jahr	-55,46	119,74	-54,93

Die in der oben stehenden Tabelle und in Kapitel 12.1 dargestellten Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse und die korrespondierenden statistischen Kenngrößen erfüllen sowohl die ökonomischen als auch die statistischen Kriterien und erklären die deutlichen Unterschiede zwischen den Baumartengruppen Laubholz, Fichte und Kiefer in den einzelnen Stufen der Deckungsbeitragsrechnung. Die Baumartengruppen Laubholz und Kiefer weisen dabei ähnlich negative Reinerträge mit -55,46 €/ha/Jahr bzw. -54,93 €/ha/Jahr auf. Lediglich die Reinerträge der Fichte liegen mit 119,74 €/ha/Jahr im positiven Bereich. Im Wesentlichen ist dieses Ergebnis der Fichte auf den im Vergleich zu den anderen Baumartengruppen höheren Einschlag pro Hektar und die vergleichsweise hohen Holzerlöse zurückzuführen.

¹⁰ Zu beachten ist bei den Begründungskosten, dass als Bezugsgröße für die Zuordnung der Begründungskosten zu der jeweiligen Baumartengruppe mit der multiplen Regressionsanalyse die Fläche der Baumartengruppe der Betriebe dient, da die korrespondierende Kulturfläche im TBN nicht erfasst wird. Hierdurch sind jedoch auch Kosten für Vor- bzw. Unterbau mit anderen Baumarten in diesen Begründungskosten enthalten, wenn die Nachfolgebestockung vom noch vorhandenen Altbestand abweicht, dessen Fläche für die Zuordnung der Begründungskosten zu den Baumartengruppen verwendet wird. Dies erklärt beispielsweise die hohen Begründungskosten bei Fichte und Kiefer, die zum Teil auf den Waldumbau zurückzuführen sind.

Mit der multiplen Regressionsanalyse wurden somit die im Betrieb baumartenun-spezifisch erfassten Produktionskosten den einzelnen Baumartengruppen direkt zugeordnet. Erst hierdurch kann der forstliche Produktionsprozess auf der Ebene der einzelnen Baumartengruppen mit der Deckungsbeitragsrechnung beurteilt werden. Die Ergebnisse der Deckungsbeitragsrechnung der Betriebe des Testbetriebsnetzes dienen im Folgenden als Vergleichsbasis für die Analyse der Buchen- und Fichtenreinbestände der Modellentwicklung. Eine Analyse der mit der Anreicherung von Buchenbeständen mit Nadelholz entstehenden Mischbestände und der damit verbundenen ökonomischen Auswirkungen auf den Betrieb mit den Betriebsvergleichsdaten ist auf der Ebene der Baumartengruppen nur begrenzt möglich. Aussagen zu Mischungseffekten, die vom Mischungsanteil und der unterschiedlichen Produktionsdauer der Baumarten im Bestand abhängen, lassen hiermit nicht treffen. Da empirische Daten aus dem Betriebsvergleich aufgrund der Buchungssystematik für Mischbestände fehlen, werden im Folgenden für die Analyse der ökonomischen Auswirkungen der Anreicherung von Buchenbeständen mit Fichte Modellanalysen verwendet.

3 Einzel- und Mischbestandsmodell

Die Bestandeswuchsmodelle stellen durch die Beschreibung der naturalen Vorgänge die Grundlage der forstlichen Produktionsmodelle dar. Sie beschreiben die wachstumskundlichen Vorgänge anhand der Altersentwicklung mittlerer Bestandeskennwerte wie der Bestandeshöhe, des Vorrates und des Zuwachses. Diese Modelle und ihre Daten legen hierdurch die Basis für die Analyse und die Planung forstbetrieblicher Handlungen (vgl. Pretzsch 2002 S. 307).

3.1 Mischbestand

Durch die Anreicherung von Buchenbeständen mit Nadelholz entstehen Mischbestände. Mischbestände werden nach der „FRA 2000 forest classification“ der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO 2000 S. 81) als Bestände beschrieben, deren Überschildung durch maximal 75% Laub- oder Nadelbäume bestimmt werden – eine Beschreibung, die für mitteleuropäische Verhältnisse zu eng gefasst ist, wo natürlicherweise reine Laub- oder Nadelmischwälder vorkommen können (vgl. Bravo-Oviedo et al. 2014 S. 519 f.). Aber auch für Europa gibt es aufgrund der großen Bandbreite verschiedenartiger Mischbestände keine allgemeingültige Definition, die allen Gegebenheiten gerecht würde. Es existiert vielmehr eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen. Im Folgenden wird der Definition der Bundeswaldinventur 3 gefolgt, nach der es sich um einen Mischbestand handelt, sobald eine weitere Baumart mit einem Anteil

von mindestens 10% neben der führenden Baumart vorhanden ist (Polley et al. 2014a). Für die Erträge dieser Mischbestände sind insbesondere der Mischungsanteil der beteiligten Baumarten und deren Mischungsform entscheidend (Assmann 1954 S. 149).

3.1.1 Mischungsanteil

Eine Herausforderung bei der Analyse von Mischbeständen ist die Bestimmung der Mischungsanteile der beteiligten Baumarten (Kennel 1965 S. 150). Dirnberger und Sterba (2014 S. 535) zeigen hierfür drei grundlegende Ansätze auf:

1. Der erste Ansatz baut auf einem Vergleich der Trockenmasse der einzelnen Baumarten im Mischbestand mit der Trockenmasse der Baumarten in vergleichbaren Reinbeständen auf (Dirnberger und Sterba 2014 S. 535).
2. Dem zweiten Ansatz liegt die Grundfläche der an der Mischung beteiligten Baumarten zugrunde. Der Mischungsanteil als Anteilsfläche am Gesamtbestand kann in Anlehnung an Kramer und Akça (2002 S. 172) sowie Pretzsch (2002 S. 241) durch den Vergleich der Grundfläche der jeweiligen Baumart im Mischbestand mit der Grundfläche des entsprechenden Reinbestandes berechnet werden. Diese vergleichsweise einfache Vorgehensweise zur Ermittlung der Mischungsanteile durch die Schätzung der Grundfläche der einzelnen Baumarten mithilfe der Winkelzählprobe (vgl. Bitterlich 1952 S. 215 ff.) ist aufgrund ihrer einfachen Anwendung in der Praxis weit verbreitet.¹¹
3. Assmann (1961 S. 338 f.), Kennel (1965 S. 150) und Pretzsch (2002 S. 241) beschreiben im dritten Ansatz zur Ermittlung des Mischungsanteils die Verwendung der Anteile der Baumarten an der Kronenschirmfläche. Die Mischungsanteile lassen sich dabei aus dem Verhältnis der Baumarten an der Kronenschirmfläche herleiten, wobei durch andere Bäume überschirmte Kronenteile nicht mitberücksichtigt werden (Kennel 1965 S. 150).

Zwischen dem BHD der einzelnen Bäume und deren Kronenbreite besteht ein enger Zusammenhang (vgl. Burger 1949 S. 458 und Hasenauer 1997 S. 197). Dieser enge Zusammenhang kann sowohl bei der Methode, die auf dem Vergleich der Grundfläche basiert, als auch bei der Verwendung der Kronenschirmfläche zur Bestimmung des Mischungsanteils zu ähnlichen Ergebnissen führen. Die Verwendung von Grundfläche oder Kronenschirmfläche zur Bestimmung des Mischungsanteils hat jedoch nicht zwangsläufig immer das gleiche Ergebnis zur Folge, denn Bestockungsgrad und Überschirmungsprozent entwickeln sich nicht stets synchron. Beispielsweise nach einem hochdurchforstungsartigen Eingriff bei

¹¹ Für die Wahrung der Konsistenz bei der Simulation des Bestandeswachstums von Mischbeständen im Rahmen dieser Arbeit werden anstelle der Ertragstafelwerte des Reinbestandes die Ergebnisse der Simulation von Reinbeständen (vgl. Kapitel 3.4) verwendet. Hierdurch werden sowohl der arttypische Standardbedarf der einzelnen Baumarten als auch deren Bestockungsgrad berücksichtigt (vgl. Pretzsch 2002 S. 241).

der Buche, der mit einer Absenkung des Bestockungsgrades einhergeht, vergrößert sich die Kronenschirmfläche aufgrund der hohen Anpassungsfähigkeit der Kronen vergleichsweise schnell, während der Bestockungsgrad erst langsam wieder zunimmt (vgl. Pretzsch 2002 S. 242).¹² Im Folgenden werden aufgrund der höheren Genauigkeit (vgl. Pretzsch 2002 S. 241) die Mischungsanteile mithilfe der Kronenschirmfläche bestimmt.

3.1.2 Klassifizierung von Mischungen

Baumartenmischungen werden im Forstbetrieb auf verschiedene Art und Weise umgesetzt. Mit der Art, der Form und dem Zeitraum der Mischung werden in Abhängigkeit von den beteiligten Baumarten und ihrer Wuchseigenschaften sowie ihres Konkurrenzverhaltens verschiedene waldbauliche Ziele verfolgt, wie zum Beispiel unterschiedliche Mischungsanteile der beteiligten Baumarten. Im Folgenden werden die waldbaulich bedeutendsten Mischungsarten und Mischungsformen dargestellt, die als Grundlage für die Modellentwicklung einer Anreicherung von Laubholzbeständen mit Nadelholz und für die Simulation der daraus resultierenden Buchen-Fichten-Mischbestände dienen.

3.1.2.1 *Mischungsart*

In Anlehnung an Schütz (1994 S. 389) wird in Abhängigkeit von der Konkurrenzsituation der beteiligten Baumarten die Mischungsarten Hauptmischung, untergeordnete Mischung und Zeitmischung unterschieden. Diese Unterscheidung baut auf der Konkurrenzsituation der verschiedenen Baumarten im Mischbestand auf.

Bei einer Hauptmischung weisen die beteiligten Baumarten die gleiche Bedeutung und gleiche Funktion auf und stehen in einem direkten Konkurrenzverhältnis zueinander. Die Mischbaumarten nehmen dabei zumindest zeitweise die gleiche soziale Stellung im Bestand ein bzw. weisen in Abhängigkeit ihrer Mischungsform einen gleichen Anteil an der oberen Kronenschicht auf. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die Mischungsform der Baumarten, da sich diese direkt auf die interspezifische Konkurrenzsituation und die Entwicklungsmöglichkeiten der Baumarten auswirkt. Der Buchen-Fichten-Mischbestand stellt in der Regel eine Hauptmischung dar. Im (hoch-)montanen Bereich kann die Buche jedoch auch im Zwischenstand dienend sein.

Mit untergeordneten Mischungen dagegen werden andere waldbauliche Zielsetzungen verfolgt. Im Gegensatz zur Hauptmischung stehen die Baumarten hier in einer ungleichen sozialen und funktionalen Struktur. Ein hieraus entstehender Nebenbestand ist in bestimmten Bestandesphasen sozial vom Hauptbestand getrennt und diesem in der interspezifischen Konkurrenz unterlegen. Dem Neben-

¹² Bei der Verwendung von waldwachstumskundlichen Simulationsergebnissen kommt jedoch der enge Zusammenhang zwischen der Verwendung der anteiligen Grundfläche und der Kronenschirmfläche aufgrund des direkten funktionalen Zusammenhangs zwischen BHD und Kronenbreite zum Tragen (vgl. Döbbeler et al. 2011 S. 112).

bestand kommt dabei eine besondere funktionale Aufgabe zu. Der Anbau von Hainbuche in Eichenbeständen dient beispielsweise der Schaftpflege.

Schütz (1994 S. 390) bezeichnet die Zeitmischung als eine Sonderform, bei der die Wirkung der interspezifischen Konkurrenzsituation der Baumarten zeitlich begrenzt ist. Er beschränkt diese auf einzelne Bestandesentwicklungsphasen: den Vor- bzw. Unterbau. Eine zeitliche Begrenzung der interspezifischen Konkurrenzsituation trifft aber auch auf die Mischbestände mit Baumarten unterschiedlicher Produktionsdauer zu, wie bei Mischbeständen mit Buche und Fichte. Die Baumartenmischung und damit auch die Mischungsanteile der beteiligten Baumarten im Mischbestand weisen eine zeitliche Dimension auf, die über das gesamte Bestandesleben hinweg betrachtet kontinuierlichen Veränderungen unterliegen (vgl. Wiedemann 1943 S. 126). Bei Buche-Fichten-Mischbeständen zum Beispiel nimmt der Anteil der Fichte bis zum Alter 100 durch das frühzeitige Erreichen der Zielstärke ab und der Mischbestand kann in einen Buchenreinbestand übergehen, der erst bis zum Alter 140 sein Produktionsziel erreicht hat. Diese zeitliche Dimension der Mischung hat einen direkten Einfluss auf die Dynamik (vgl. Bravo-Oviedo et al. 2014 S. 525), den Vorrat und die Wertentwicklung von Mischbeständen. Entsprechend wird hier der enger gefasste Begriff der Zeitmischung von Schütz (1994 S. 390) auch für die Beschreibung von Mischungen von Baumarten mit unterschiedlicher Produktionsdauer erweitert.

3.1.2.2 *Mischungsform*

Neben der Mischungsart ist die Mischungsform, d. h. die Art und Weise, wie die einzelnen Baumarten in einem räumlichen Muster angeordnet sind, entscheidend für die waldbauliche Behandlung und die Volumen- und Wertleistung eines Mischbestandes.

3.1.3 **Bestandesweise Mischung**

Zu den großflächigen Mischungsformen zählt die bestandesweise Mischung (vgl. Knoke, Seifert 2008 S. 489), wie sie in den meisten Forstbetrieben weit verbreitet ist. Diese Mischungsform hat den Vorteil, dass sie vergleichsweise einfach umzusetzen ist, um eine Baumartenvielfalt auf Betriebsebene zu schaffen, insbesondere bei einem Anbau von Baumarten unterschiedlicher Produktionsdauer (wie im Beispiel Buche und Fichte). Interaktionseffekte zwischen verschiedenen Baumarten und damit verbundene konkurrenzbedingte Veränderungen in der Volumen- und Wertleistung der einzelnen Baumarten oder Einflüsse auf die Holzqualität und Risikoreduktionen auf Bestandesebene treten hierbei nicht auf. Der aus dieser Mischungsform resultierende Ertrag der Baumarten im Forstbetrieb setzt sich aus dem flächenproportional gewichteten Ertrag der jeweiligen Baumart zusammen (vgl. Knoke und Hahn 2007 S. 317).

3.1.4 Kleinflächige Mischung

Unter die kleinflächige Mischungsform dagegen fallen Mischungsformen wie gruppen- oder, truppweise Mischungen.¹³ Diese führen zu mehr oder weniger starken Interaktionen zwischen den einzelnen Baumarten in Abhängigkeit von der Größe der Grenzbereiche zwischen den einzelnen Baumartenkollektiven.

3.1.5 Einzelbaumweise Mischung

Eine intensive Mischung, wie zum Beispiel die einzelbaumweise Mischung, ist v.a. bei der Buche mit verminderten Holzqualitäten verbunden (vgl. Röhrig et al. 2006 S. 187). Erst eine Erhöhung der Flächengröße zu einer gruppenweisen Mischungsform führt bei der Buche zu Wuchsbedingungen im Inneren der Gruppe, die Ähnlichkeiten mit Reinbeständen aufweisen (vgl. Kennel 1965 S. 155) und damit eine Astreinigung innerhalb einer gleichaltrigen Gruppe ermöglichen – eine Voraussetzung für die Erzeugung qualitativ hochwertigen Buchenholzes (vgl. Mitscherlich 1954 S. 183).

3.1.6 Mischungsformen im Vergleich und Standraumbedarf der Baumarten

Durch die Wahl der Mischungsform variiert die gesamte Wuchsleistung des Bestandes. Je kleinflächiger die Mischungsform, wie im Extremfall bei der einzelbaumweisen Mischung, desto effizienter kann die Bestandesfläche durch das Ausfüllen von Nischen genutzt werden. Eine gesteigerte Wuchsleistung im Vergleich zu Reinbeständen der Baumarten erfolgt in der Summe insbesondere dann, wenn die zur Verfügung stehenden Ressourcen durch die Mischbaumarten komplementär genutzt werden (vgl. Knoke et al. 2008 S. 93).

Auch eine Beimischung von Fichten als Einzelbaum in einen Buchengrundbestand kann zu längeren Kronen und einer schlechteren Astreinigung führen (vgl. Burger 1941 S. 167). Burger (1941 S. 173) schlägt aufgrund dieser Beobachtung vor, die Fichte in Gruppen anzubauen, um innerhalb dieser Gruppen im Kronenraum der Fichten Bedingungen wie in einem Reinbestand zu schaffen, während die umstehenden Buchen zu einer Laubbedeckung des Bodens beitragen, der von den Fichtenwurzeln in den oberen Bodenschichten der Randbereiche durchwurzelt werden kann. Eine Einzelbaummischung würde zwar zu einer erhöhten Resistenz durch die intensive Mischung und damit zu einem geringeren Kalamitätsrisiko führen, die Risikokompensation wäre aber durch die Holzqualitätsminderung fast vollständig aufgehoben (vgl. Beinhofer et al. 2009 S. 104). Beim Übergang von der einzelbaumweisen Mischung hin zur gruppenweisen Mischung geht die Möglichkeit der engen Verzahnung der einzelnen Bäume im Mischbestand zurück und entsprechend sinkt die Volumenleistung des Gesamtbestandes wieder ab (vgl. Schütz 1994 S. 391 ff.), während die Holzqualität insbesondere der Buche wieder zunimmt.

¹³ Durchmesser der Mischungsformen: Trupp bis 10 m, Gruppe 10–20 m, Horst 20–40 m und Kleinfläche über 40 m (vgl. Lüpke und Spellmann 1997 S. 178).

Eine zu kleinflächige Mischungsform würde in buchendominierten Beständen darüber hinaus zu Schwierigkeiten bei der Verjüngung der Fichte führen, da eine natürliche Verjüngung der Fichte in Löchern erst ab einer Bestandesauflichtung mit einem Durchmesser in Gruppengröße oder bei einer schnellen stärkeren flächigen Auflichtung des Altbestandes ab einer Verringerung der Grundfläche unter 60% möglich ist. Unter diesen Bedingungen sollte sich dann die Fichte in den lichtereren Bestandesteilen zahlreich verjüngen und sich auch gegen die Buche durchsetzen können, die sich bereits bei einer geringen Auflichtung schnell ausbreitet (vgl. Lüpke und Spellmann 1997 S. 177 f.).

Die Kronengröße der einzelnen Baumarten bestimmt im Mischbestand den Standraumbedarf im Endbestand beim Erreichen der Zielstärke. Spellmann (1995 S. 39) gibt für die Buche einen Kronendurchmesser von 10–12 m bei einem Zieldurchmesser von 65 cm und für die Fichte einen Kronendurchmesser von 6–8 m für einen Zieldurchmesser von 45 cm an. Hieraus lassen sich Mindestflächen für die Mischbaumarten ableiten, die gleichzeitig zu einer Minimierung der Pflegeeingriffe bei der Mischwuchsregulierung führen (vgl. Lüpke und Spellmann 1997 S. 178). Eine Orientierung am Standraumbedarf im Endbestand verringert die Gefahr der Entmischung bei einer zu intensiven Mischung bei Baumarten unterschiedlicher Wuchsdynamik (vgl. Knoke und Seifert 2008 S. 489). Vor allem bei der Fichte wird die Gefahr verringert, dass diese durch die Buche in der Begründungsphase überwachsen wird. Darüber hinaus ermöglicht diese kleinflächige Mischung eine vorzeitige Nutzung der Fichte beim Erreichen der Zielstärke ohne eine zu große Öffnung des Buchengrundbestandes. Der beste Kompromiss dürfte damit in der gruppen- bis horstweisen Mischung liegen (vgl. Lüpke 2004 S. 47).

3.1.7 Mischungsform im Modell

Als Modellgrundlage für die Simulationen der waldbaulichen Daten wurde aufgrund der benötigten Kronengröße im hiebsreifen Alter und der natürlichen Verjüngungsmöglichkeit beider Baumarten eine gruppenweise Mischung mit einem Durchmesser von 20 m entsprechend Spellmann (1995 S. 39) und in Anlehnung an Mitscherlich (1954 S. 179 ff.), Kennel (1965 S. 153), Palmer (1985 S. 1217), Zimmermann (1988 S. 106), Schütz (1994 S. 393) und Lüpke und Spellmann (1997 S. 178) verwendet.

3.2 Mischungseffekte und Produktivität in Mischbeständen

Eine entscheidende Frage bei der Analyse von Mischbeständen ist die Leistungsfähigkeit der einzelnen Baumarten im Mischbestand und ihr Beitrag zur gesamten Produktivität des Bestandes (vgl. Assmann 1961 S. 348 f. und S. 351). Insbesondere bei der Mischung der ertragsschwächeren Baumart Buche mit der zuwachsstärkeren und höher vergüteten Baumart Fichte stellt sich die Frage, inwiefern öko-

nomische Einbußen durch höhere Laubholzanteile im Bestand durch eine erhöhte Produktivität des Mischbestandes kompensiert werden können.

Die Fragestellung nach der Produktivität von Mischbeständen reicht bis zu den Anfängen der geregelten Forstwirtschaft in Deutschland zurück, wie ein Vergleich der Untersuchungen von Hartig (1791 S. 37 ff.) und Cotta (1828 S. 214 ff.) zeigt. Während Hartig (1791 S. 37 ff.) die Reinbestandswirtschaft als zielführend erachtet, vertritt Cotta (1828 S. 115 f.) ebenso wie Gayer (1880 S. 214 ff.) die Mischbestandswirtschaft. Erst neuere, standortsspezifischere Untersuchungen der Leistungsfähigkeit von Mischbeständen kommen zu ersten Erkenntnissen über die Produktivität von Mischbeständen. Sie zeigen zum jetzigen Zeitpunkt zwar eindeutige Tendenzen auf, weisen jedoch noch keinen einheitlichen allgemeingültigen Charakter auf, obwohl sie auf der Ebene des einzelnen Baumes und seiner intra- und interspezifischen Konkurrenzsituation ansetzen. Die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Rein- und Mischbeständen und ihrer Produktivität bleibt trotz dieser Fortschritte bis zum heutigen Zeitpunkt in Teilen noch unbeantwortet (vgl. Pretzsch et al. 2010 S. 721).

3.2.1 Bestimmung der Produktivität in Mischbeständen

In der Betriebswirtschaft beschreibt die Produktivität den Ertrag von Produktionsprozessen und stellt hierfür den Faktorsertrag dem benötigten Faktoreinsatz gegenüber (vgl. Gutenberg 1990 S. 29). Die Produktivität ist dementsprechend die Leistungsstärke eines bestimmten Produktionsfaktors oder eines Bündels von Produktionsfaktoren. Sie kann somit als Maßstab für die effiziente Nutzung von Ressourcen, wie zum Beispiel Arbeitskraft, Kapital, Materialien, Energie und Boden, zur Erzeugung und Bereitstellung von Gütern oder Dienstleistungen eingesetzt werden. Darüber hinaus kann die Produktivität auch den Zusammenhang zwischen einem erreichten Ergebnis und der dafür benötigten Zeit beschreiben.

Insbesondere bei den langfristigen forstlichen Produktionsprozessen ist die Berücksichtigung dieser zeitlichen Komponente ein bedeutender Bestandteil der Produktivitätsbetrachtung. Denn je kürzer der Zeitraum zum Produzieren eines bestimmten Holzvolumens ausfällt, desto produktiver ist der zugrunde liegende Bestand. Die Bestimmung der Produktivität und die berücksichtigten Input- und Outputfaktoren sind auch situationsabhängig, doch das zugrunde liegende Konzept, der Zusammenhang zwischen der produzierten Menge und den eingesetzten Ressourcen, ist meist einheitlich (vgl. Prokopenko 1987 S. 3 ff.).

Zur Bestimmung der Produktivität von Ökosystemen dient meist die sogenannte Nettoprimärproduktion. Als Nettoprimärproduktion wird die Stoffmenge bezeichnet, die von den Pflanzen auf der definierten Flächeneinheit im Rahmen eines bestimmten Zeitraumes produziert wird (vgl. Bleischwitz 1998 S. 92). Die ökologische Forschung setzt damit ihren Fokus auf die produzierte oberirdische Trockenmasse (vgl. Pretzsch et al. 2010 S. 714 f.). Bleischwitz (1998 S. 92 f.) zeigt die grundlegenden Gemeinsamkeiten dieses ökologischen Produktivitätsverständnisses mit dem klassischen ökonomischen Produktivitätsbegriff anhand der mit

der ökologischen Produktion einhergehenden Produktionsfaktoren auf. An die Stelle der technischen Produktionsfaktoren rücken der Standort mit der jeweiligen Nährstoffversorgung und seinen individuellen Eigenschaften, die Sonne als Energiespender, die Länge der Vegetationsperiode, die Menge und die Intensität der Niederschläge usw. Dieses ökologische Produktivitätsverständnis ist aufgrund seiner Vielfalt an Produktionsfaktoren komplexer als das der klassischen ökonomischen Produktivitätsdefinition.

Diese Komplexität der natürlichen Produktionsfaktoren und die Wechselwirkungen, die mit diesen verbunden sind, sind analytisch jedoch meist nur schwer zu erfassen. Darüber hinaus existieren für diese natürlichen Produktionsfaktoren, besonders bei den langen forstlichen Produktionszeiträumen keine statischen Gleichgewichtszustände, sondern vielmehr eine Vielzahl an Fließzuständen, die ständigen Veränderungen unterliegen, wie zum Beispiel der Erhöhung der CO₂-Konzentration, dem Anstieg der Temperatur, der Verlängerung der Vegetationszeit und der Zunahme von Niederschlägen (vgl. Pretzsch 2005 S. 465). Diese Veränderungen werden meist aus Produktivitätsanalysen ausgeklammert (vgl. Bleischwitz 1998 S. 92 f.).

Werden die komplexen Inputfaktoren des ökologischen Produktivitätsverständnisses lediglich auf die für den forstlichen Produktionsprozess benötigten Rohstoffe und die benötigte Arbeitskraft durch Aggregation reduziert, so lässt sich für die praktische Anwendung ein vergleichsweise schlichter Ansatz ableiten. Unter der Annahme vergleichbarer Standortseigenschaften für den Produktivitätsvergleich der Baumarten Buche und Fichte wird in Anlehnung an Pretzsch et al. (2010 S. 714 f.) und Prokopenko (1987 S. 92 f.) der Umfang des naturalen Produktivitätsverständnisses auf den reinen Output der Bestände an produziertem Holzvolumen eingeschränkt, da im Mittelpunkt der forstbetrieblichen Betrachtung das produzierte und auf den Märkten absetzbare Holzvolumen sowie dessen je-weilige Dimension und Qualitäten steht.

Für sich gesehen ist die Aussagekraft der Produktivität jedoch begrenzt. Erst durch einen Vergleich zum Beispiel der naturalen Produktivität verschiedener Bestände wird die Leistung der einzelnen Baumart deutlich (in Anlehnung an Diederich 1976 S. 67 f.). Unterschiedliche Baumarten erfordern jedoch verschiedene waldbauliche Strategien, Entwicklungs- und Behandlungskonzepte. Diese führen für verschiedene Baumarten und Baumartenmischungen zu einem unterschiedlichen Input an Arbeitskraft und dieser Input hat letztendlich einen direkten Einfluss auf die Produktivität der Bestände.

Die Ermittlung der Produktivität eines Mischbestandes erfordert dementsprechend einen Vergleichswert, mit dem die tatsächliche, in diesem beobachtete Produktivität verglichen werden kann. Hierzu dient die sogenannte erwartete Produktivität, die sich aus der Produktivität der beiden Baumarten in vergleichbaren, meist benachbarten Reinbeständen ableiten lässt (vgl. Pretzsch 2013 S. 161). Für diese aus Reinbeständen abgeleitete Produktivität wird vorausgesetzt, dass bei Reinbeständen keine Mischungseffekte auftreten und lediglich ein anteiliger, den

Mischungsanteilen entsprechender Ersatz der Flächen erfolgt. Dieser Zusammenhang wird im Folgenden als „neutraler Ersatz“ bezeichnet.

Ein Vergleich der absoluten Produktivität anhand des durchschnittlichen jährlichen Gesamtzuwachses (vgl. Wiedemann 1943 S. 128) der beiden Baumarten Buche und Fichte in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Mischungsanteil der Baumarten umgeht – bezogen auf das gesamte Bestandesleben – das Problem der Wahl eines angemessenen Bezugszeitpunktes. Hierdurch lässt sich sowohl die Zeitmischung der Fichte wie auch die im Vergleich zur Fichte längere Produktionsdauer der Buche adäquat abbilden, sodass auf diese Weise ein Leistungsvergleich unterschiedlicher Mischungsanteile der einzelnen Baumarten möglich ist.¹⁴

3.2.2 Kreuzdiagramm zur Produktivitätsdarstellung im Mischbestand

Grafisch lässt sich die Produktivität zweier Baumarten sowohl im Mischbestand als auch für die Mischbestände einer Betriebsklasse in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Mischungsanteil mithilfe des sogenannten Kreuzdiagramms (vgl. Pretzsch et al. 2013 S. 269 und Kely 1992 S. 127) darstellen. Hierfür wird die Produktivität des Reinbestandes der einen Baumart, beispielsweise der Buche, auf der linken Ordinate und die Produktivität der anderen Baumart, in unserem Beispiel die der Fichte, auf der rechten Ordinate aufgetragen. Die x-Achsen geben den durchschnittlichen Mischungsanteil der beiden Baumarten wieder.

Durch eine Gerade (Summe neutraler Ersatz) lassen sich die beiden Punkte der Reinbestände verbinden, wie in Abbildung 3 dargestellt. Diese Gerade entspricht der erwarteten Produktivität beider Baumarten im Mischbestand bei einer flächig getrennten Mischung, die eine Interaktion der Baumarten und entsprechende Mischungseffekte ausschließt und einen identischen und somit neutralen Ersatz widerspiegelt.

Der neutrale Beitrag der einzelnen Baumart im Mischbestand wird mit den beiden unterbrochenen Geraden (neutraler Ersatz Buche und neutraler Ersatz Fichte) in Abhängigkeit vom Mischungsanteil dargestellt. Fällt die Produktivität der jeweiligen Baumart geringer als im anteiligen Vergleich des Reinbestandes aus, so liegt diese unter der jeweiligen Geraden der erwarteten Produktivität und führt zu einem Minderzuwachs (Minderzuwachs Buche und Minderzuwachs Fichte). Eine Produktivität der jeweiligen Baumart, die höher als der anteilige vergleichbare Reinbestand ausfällt und somit zu einem Mehrzuwachs im Mischbestand führt, kommt über der jeweiligen Geraden der erwarteten Produktivität der Baumarten zu liegen, hier dargestellt als durchgezogene Linie (Mehrzuwachs Buche und Mehrzuwachs Fichte). Aus der Summe der Einzelproduktivitäten der Baumarten ergibt sich die Gesamtproduktivität des Mischbestandes. Die durchgezogene Kur-

¹⁴ Für die Einbeziehung der bereits nach dem Ausscheiden der Fichte für eine erneute Produktion zur Verfügung stehenden Fläche, beispielsweise eines Nachfolgebestandes, wird hier als Bezugsgrundlage anstelle des einzelnen Mischbestandes das Modell der nachhaltigen Betriebsklasse (vgl. Kapitel 5) verwendet.

ve (Summe Mehrzuwachs) stellt den Mehrzuwachs dar, während die gestrichelte Kurve den Minderzuwachs (Summe Minderzuwachs) darstellt.

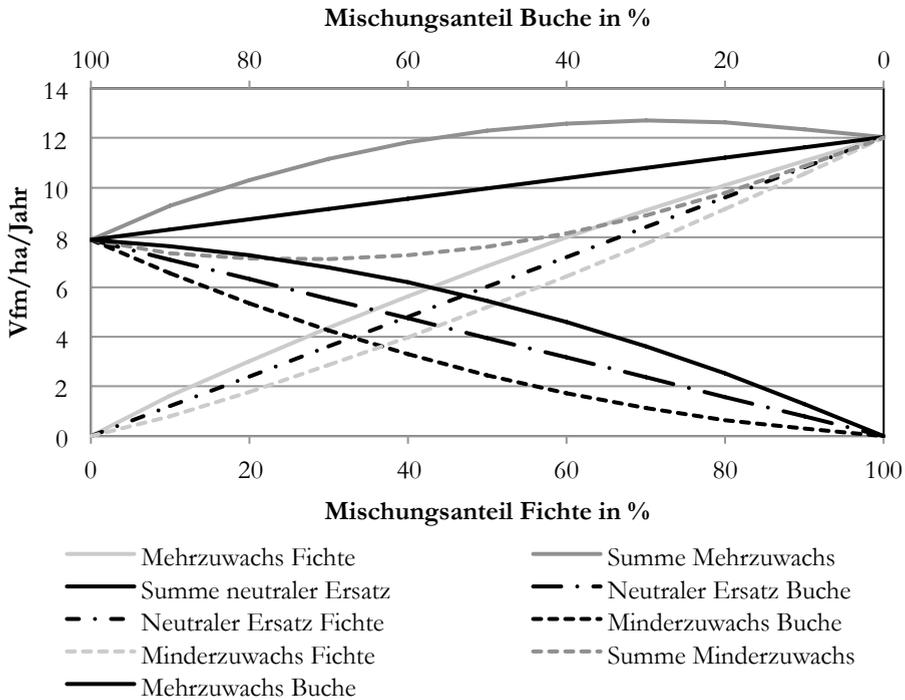


Abbildung 3: Exemplarische Darstellung der Produktivität der Baumarten Buche und Fichte im Mischbestand (erweiterte Darstellung in Anlehnung an Pretzsch 2009 S. 29 und Pretzsch et al. 2013 S. 269)

3.3 Naturale Grundlagen des Bestandeswuchsmodells

Als Grundlage für das ökonomische Bewertungsmodell wird ein naturales Produktionsmodell benötigt, das das Volumen des verbleibenden und des ausscheidenden Bestandes sowie die Entwicklung des Brusthöhendurchmessers (BHD) im Produktionsverlauf darstellt (vgl. Rüping 2012 S. 175). Die waldbaulichen Grundlagen werden dabei am Beispiel von Einzelbeständen erläutert, die die Basis für die betrieblichen Modelle bilden.

3.3.1 Waldentwicklungstypen und Grundlagen für das waldbauliche Modell

Der nachhaltigen, strategischen und langfristigen Planung von Waldbeständen in Forstbetrieben liegen betriebliche Zielsetzungen zugrunde. Zu diesen gehören die langfristigen waldbaulichen Ziele des Betriebes und die darin enthaltenen langfristigen strategischen Ziele, die sich auf der Ebene von Einzelbeständen mit Betriebszieltypen definieren lassen. Die Betriebszieltypen orientieren sich dabei an

standörtlichen, forstpolitischen und auch an betriebswirtschaftlichen Kriterien (vgl. Gadow 2005 S. 209).

Im Betriebszieltyp werden der Aufbau des Bestandes, seine Baumart oder Baumartenmischung sowie eventuelle Mischungsanteile bis hin zu Holzsorten und Zielsortimenten mit eventuellen Güte- und Stärkeangaben beschrieben (vgl. Speidel 1972 S. 97). Dem Waldentwicklungstyp (WET) liegen ähnliche Inhalte zugrunde. Er definiert in den jeweiligen Zielen Mischungsanteil, Produktionszeitraum und Zielsortimente. Darüber hinaus kann er auch Anweisungen zur Umsetzung enthalten, wie zum Beispiel Aussagen über die Hiebsart und die Art der Verjüngung (vgl. Gadow 2005 S. 209 f.).

Für Mischbestände mit Buchen- und Fichtenanteil wurden die folgenden Waldentwicklungstypen für die Simulation des Waldwachstums als Rahmen zugrunde gelegt.

3.3.1.1 *Waldentwicklungstyp Buche-Fichte*

In diesem Waldentwicklungstyp ist ein Buchenanteil von 50 bis 70% enthalten. Für die Mischbaumart Fichte ist dabei ein Mischungsanteil von 30 bis 50% vorgesehen. Die selben Mischungsanteile werden sowohl für das Verjüngungsziel als auch für das Bestandesziel beschrieben.¹⁵ Das Buchenstammholz soll dabei in einem Zeitraum von 100–140 Jahren mit einer Zielstärke von 65 cm produziert werden, während für das Fichtenstammholz eine Zielstärke von 45 cm mit einem Produktionszeitraum von 60 bis 100 Jahren unterstellt wird.

3.3.1.2 *Waldentwicklungstyp Fichte-Buche*

Der Fichten-Buchen-Waldentwicklungstyp wird von der Fichte mit einem Baumartenanteil an der Mischung von 50 bis 70% sowohl im Verjüngungs- wie auch beim Bestandesziel dominiert. Die Buche wird dem Fichtengrundbestand mit einem Mischungsanteil von 30 bis 50% gruppen- bis kleinflächeweise in einer femelartigen Struktur beigemischt. Die Buche nimmt dabei eine dienende bis mit-herrschende Position ein. Als Zieldurchmesser für Fichte wird ebenfalls 45 cm und eine Produktionsdauer von 60–100 Jahren angestrebt. Bei der Buche wird die Produktionsdauer von 100–140 Jahren und eine Zielstärke von 65 cm unterstellt.

Aus diesen beiden Waldentwicklungstypen und den darin enthaltenen Angaben zu Mischungsanteilen sowie zu Reinbeständen der Baumarten Buche und Fichte wurden 5 Varianten mit unterschiedlichen Mischungsanteilen gebildet. Beginnend mit dem Fichtenreinbestand (Variante M_0) wurde der Buchenanteil bei der Bestandesbegründung bzw. zum Startzeitpunkt der Simulation auf 30% (Variante M_1), 50% (Variante M_2), 70% (Variante M_3) und 100% (Variante M_4), den Buchenreinbestand, erhöht.

¹⁵ Für die allgemeine Schilderung von waldbaulichen Modellen mag die Gleichsetzung der Baumartenanteile in den Verjüngungs- und Bestandeszielen ausreichen. Für Zeitmischungen von Baumarten mit unterschiedlichen Produktionsdauern sind diese jedoch keinesfalls gleich. Sie werden in den folgenden Modellen daher auch explizit unterschieden.

Die Baumart mit dem geringeren Mischungsanteil wird dabei in den Grundbestand gruppenweise beigemischt. Der Buchen- und Fichtenreinbestand sowie die 50%-Variante dienen dabei als Vergleichsgrundlage, während der Waldentwicklungstyp Buche-Fichte durch die Variante mit einem Fichtenanteil von 30% und der Waldentwicklungstyp Fichte-Buche durch die Variante mit einem Fichtenanteil von 70% zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung dargestellt werden.

Diesen Varianten der Waldentwicklungstypen und der sich daraus ergebenden Festlegung der prinzipiellen waldbaulichen Behandlung sind die Grundlage für die Modellierung der periodischen Vorräte und Nutzungsmengen.

3.3.2 Waldbauliche Grundlagen

Grundlage für die Beschreibung der Zuwachsleistung und Ertragsverhältnisse von einzelnen Waldbeständen und ganzer Forstbetriebe ist das Verständnis der wesentlichen waldwachstumskundlichen Zusammenhänge. Diese lassen sich mit Modellen vereinfacht darstellen (vgl. Assmann 1961 S. 420 ff.).

Die waldwachstumskundliche Modellforschung für Bestände hat ihre Wurzeln in der Modellierung von gleichaltrigen einschichtigen Reinbeständen. Der Fokus lag dabei in der Erschließung grundlegender Zusammenhänge zum Zwecke der Erstellung von Ertragstafelwerken, wobei der einzelne Bestand in seiner Gesamtheit im Mittelpunkt der Forschung stand (vgl. Pretzsch 1992 S. 28 ff.). Doch diese häufig schon vor mehreren Jahrzehnten entwickelten Ertragstafelwerke für Reinbestände mit festen Behandlungskonzepten werden den heutigen waldbaulichen Zielsetzungen und den damit verbundenen strukturreichen und häufig auch ungleichaltrigen Beständen nur in Teilen gerecht (vgl. Nagel 2013 S. 122).

In Mischbeständen ist die individuelle Wuchsleistung der Einzelbäume darüber hinaus noch von der Mischungsform, dem Mischungsanteil, dem Alter der einzelnen Baumarten sowie der Höhenstrukturierung im Bestand abhängig. Reinbestandsertragstafeln oder ihre anteilige Verwendung entsprechend dem Mischungsanteil der jeweiligen Baumart im Mischbestand werden dem Wuchsverhalten der Baumarten und der unterschiedlichen Form ihrer Vergesellschaftung im Mischbestand nicht gerecht. Die bisherigen statischen und reinbestandsorientierten Modellansätze sind daher für die Entwicklung von Wuchsmodellen für Mischbestände eher ungeeignet.

Die Datengrundlage für einzelbaumorientierte Managementmodelle ist jedoch zum jetzigen Zeitpunkt sowohl für Reinbestände als auch für Mischbestände noch relativ gering (vgl. Pretzsch 1992 S. 2 f.). Für Mischbestände müssten diese Modelle unterschiedliche Mischungsanteile und Mischungsformen für unterschiedlichste Standorte, unterschiedliche Behandlungsprogramme sowie Behandlungsalternativen unter spezifischen Rahmenbedingungen sowohl für Einzelbäume als auch für komplette Bestände abbilden können.

Derartige Zusammenhänge lassen sich vereinfacht nur in Form von Modellen mit Wachstumssimulationen konzipieren – Modelle, denen die Wachstumsfunktionen der Einzelbäume zugrunde liegen, die in Abhängigkeit von Umgebungspa-

parametern gesteuert werden und in denen sich die Entwicklung des Gesamtbestandes aus der Wuchsdynamik der einzelnen Bäume ergibt (vgl. Pretzsch 1992 S. 5 ff.). Das Bestandesgefüge wird dabei zu einem dynamischen und räumlich-zeitlichen System, das ermöglicht, waldwachstumskundliche Grundzusammenhänge vereinfacht nachzubilden.

In einzelbaumorientierten Bestandeswuchsmodellen erfolgt die biometrische Nachbildung des Wachstums der einzelnen Bäume und ganzer Waldbestände. Die Basis dafür bildet immer der einzelne Baum und seine individuelle Stellung im Bestand. Durch die Möglichkeit der flexiblen Handhabung der einzelnen Bäume im Simulator kann ein flexibler Bestandaufbau mit verschiedenen waldbaulichen Szenarien, unterschiedlichen an der Mischung beteiligten Baumarten, mit verschiedenen Mischungsanteilen und Mischungsformen abgebildet werden. Das individuelle Wachstum des einzelnen Baumes ist dabei von der Struktur des umgebenden Bestandes, von den Nachbarbaumarten und dem Alter der einzelnen Individuen und den sich daraus ergebenden Wuchsverhältnissen abhängig. Durchforstungsmaßnahmen im Simulator berücksichtigen dabei die Vorgaben zur Bestandesbehandlung, die Konkurrenzsituation der einzelnen Bäume sowie deren Interaktionen (in Anlehnung an Gerold und Gerold 2013 S. 91 ff.).

3.3.3 Wuchsverhältnis der Baumarten und Standorte

Die Leistung der einzelnen Baumarten ist maßgeblich vom Standort abhängig. Häufig stocken reine Buchen- und Mischbestände auf besser nährstoffversorgten Standorten, während die Fichte in höheren Lagen und auf vergleichsweise schwächeren Standorten dominiert. Meist fehlen exakte Informationen über die Wuchsrelationen verschiedener Baumarten im Mischbestand auf demselben Standort (vgl. Möhring 2004a S. 524). Aus diesem Grund wurden für den Leistungsvergleich der Baumarten im Mischbestand auf Daten des Landeswaldes in Niedersachsen zurückgegriffen und 50% der flächenmäßig und forstwirtschaftlich bedeutendsten Standorte ausgewählt. Für diese Standorte des Berg- und Tieflandes wurden aus Daten der Bundeswaldinventur 2 die Höhen der Buche und Fichte an den mit beiden Baumarten bestockten Probepunkten ermittelt und diese für einen vereinfachten Vergleich auf das Alter 100 bezogen, um anschließend die mittleren Mittelhöhenbonitäten zu ermitteln. Die folgende Übersichtstabelle (vgl. Tabelle 2) zeigt die Standorte, die Ertragsklassen, die mittleren Oberhöhen und die daraus resultierenden mittleren Ertragsklassen.¹⁶

¹⁶ Die Daten wurden im Rahmen des Verbundprojektes „Sicherung der Nadelrohholzversorgung in Norddeutschland“ von Julia Rudolph zur Verfügung gestellt.

Tabelle 2: Übersicht der niedersächsischen Standorte, der Ertragsklassen und der Oberhöhen im Alter 100 (basierend auf Mittelwerten)

Wasserhaushaltszahl	Nährstoffzahl	Oberhöhe Fichte (m)	Ertragsklasse Fichte	Oberhöhe Buche (m)	Ertragsklasse Buche
19	4	37	0	33	I
19	5	36	0	31	I
34	3	36	0	30	I
41	3	37	0	30	I
41	4	37	0	34	0
42	3	35	I	30	I
43	2	36	0	30	I

Die mittleren Ergebnisse in der Tabelle zeigen, wie eng die durchschnittlichen Ertragsklassen von Fichte und Buche für die verschiedenen Standorte im Mittel beieinanderliegen, obwohl diese in einzelnen Beständen und auf den jeweiligen Standorten zum Teil deutlich stärker voneinander abweichen. Mit diesen mittleren Ergebnissen als Grundlage wird im Folgenden für die Baumart Buche eine I. Ertragsklasse und für die Fichte eine 0. Ertragsklasse für den Leistungsvergleich der beiden Baumarten auf demselben Standort verwendet und als Eingangsdaten für die Simulation herangezogen.¹⁷

3.4 Grundlagen der Simulation und Überführung in Funktionen

Die Datengrundlage für die ökonomische Bewertung der Mischbestände basiert auf waldwachstumskundlichen Daten, die aus zehn Simulationen je Mischungsvariante mit dem ForestSimulator BWINPro der NW-FVA stammen.¹⁸ Dieser baut auf dem Software-Paket TreeGROSS (Tree Growth Open Source Software) auf und wurde für die praktische Anwendung von statistischen Einzelbaumwuchsmodellen entwickelt (vgl. Nagel 2002 S. 1 ff.). Der Simulator wurde hierfür im Rahmen des Projektes „Sicherung der Nadelrohholzversorgung in Norddeutschland“ weiter für Mischbestände mit den Baumarten Buche und Fichte spezifiziert.

Aus den verschiedenen Simulationsdurchläufen wurden für jede Mischungsvariante Durchschnittswerte gebildet und diese Werte in stetige Funktionen überführt. Dabei wurden in Anlehnung an Pretzsch (2001 S. 20 ff.) für die Darstellung der Volumenentwicklung der einzelnen Baumarten Chapman-Richards-

¹⁷ Mit der Verwendung dieser Ertragsklassen geht gleichzeitig auch eine vergleichsweise hohe Produktivität im Modell einher. Dies führt zu einer 10. Leistungsklasse für die Buche und 13. Leistungsklasse für die Fichte.

¹⁸ Die Daten wurden im Rahmen des Verbundprojekts „Sicherung der Nadelrohholzversorgung in Norddeutschland“ von Prof. Dr. Jürgen Nagel simuliert und zur Verfügung gestellt.

Funktionen verwendet. Die von Richards (1959 S. 292 ff.) beschriebene Wachstumsfunktion ermöglicht durch ihre drei Parameter eine flexible Anpassung an die Ausgangsdaten und wird durch diese Vielseitigkeit häufig für die Darstellung von Wachstumsfunktionen (vgl. Pretsch 2001 S. 20 ff.) eingesetzt.

Mit der Verwendung der Chapman-Richards-Funktion auf Basis der Simulationsdaten ist darüber hinaus eine Extrapolation der Daten über den eigentlichen simulierten Zeitraum hinaus möglich, bevor aus technischen Gründen (Minstdurchmesser) mit der Simulation begonnen werden kann. Dies ermöglicht auch die Darstellung von Werten vor dem Bestandesalter von 30 Jahren, dem eigentlichen Startzeitpunkt der Simulation.

Noch flexiblere Funktionen lassen sich mithilfe von Polynomen erstellen (vgl. Pretsch 2001 S. 20), die im Folgenden zur Wiedergabe der Entwicklung des Durchmessers des Grundflächenmittelstammes (dg) in Abhängigkeit vom Bestandesalter verwendet werden. Durch die höhere Anzahl an Parametern ist dieser Funktionstyp flexibler in der Möglichkeit seiner statistischen Anpassung an die Ausgangsdaten der simulierten Durchmesserentwicklung.

Aufbauend auf den verschiedenen Mischungsvarianten und den Durchschnittsdaten der jeweiligen Simulationsdurchläufe werden Funktionen entwickelt, die die folgenden ertragskundlichen Kenngrößen beschreiben und als Grundlage für eine ökonomische Bewertung in periodischen Abständen von fünf Jahren dienen. Das Bezugsalter stellt dabei in Anlehnung an die Ertragstafelwerte jeweils das Ende der jeweiligen Periode dar.

3.4.1 Vorratsentwicklung

Charakteristisch für die Entwicklung von Waldbeständen ist, dass große Teile des Zuwachses während der langen forstlichen Produktionsphasen in Form von Vorräten in den Beständen akkumuliert werden, um dann gegen Ende des Produktionsprozesses beispielsweise im Rahmen der Zielstärkennutzung abgebaut zu werden. Für die Beschreibung der Vorratsentwicklung während des gesamten Bestandeslebens wurden die Simulationsergebnisse in Anlehnung an Gadow (2005 S. 143) in Chapman-Richards-Funktionen überführt. Die hieraus entstehende, vom Alter abhängige Entwicklung des Vorrates eines Bestandes wird in Abbildung 4 und Abbildung 5 für die Baumarten Fichte und Buche im jeweiligen Reinbestand (M_0 und M_4) und in den einzelnen Mischungsvarianten (M_1 - M_3) über dem Bestandesalter für einen Hektar Reinbestandsfläche bzw. für die gesamte Mischbestandsfläche der beiden Baumarten dargestellt. Als Vergleichsbasis wurde zusätzlich die Volumenentwicklung der entsprechenden Ertragstafeln mit in die Abbildungen eingefügt.¹⁹ Um eine Vergleichbarkeit der Volumenentwicklung des bestehenden Bestandes mit den Ertragstafelangaben zu ermöglichen, wurde in

¹⁹ Buche: 1. Ertragsklasse gemäß der Ertragstafel für eine mäßige Durchforstung von Schober (1967). Fichte: entspricht einer 0. Ertragsklasse extrapoliert in Anlehnung an die Ertragstafeln für mäßige Durchforstungen von Wiedemann (1936/42).

dieser Darstellung auf eine Einbeziehung der Endnutzung in Form der Zielstärkennennung verzichtet.

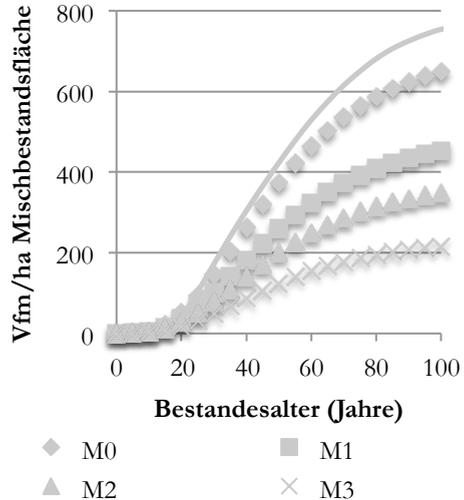
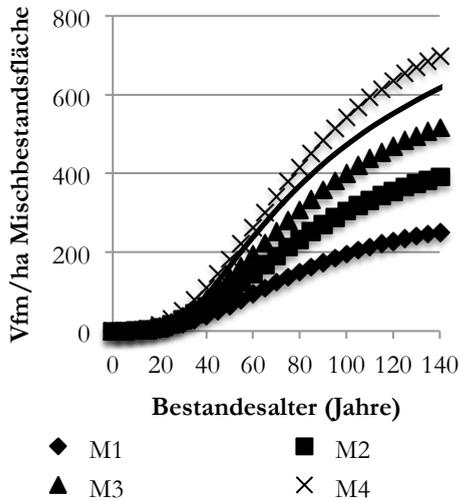


Abbildung 4: Volumen der Buche des verbleibenden Bestandes je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche in Abhängigkeit vom Bestandesalter für verschiedene Mischungsanteile sowie entsprechende Ertragstafelwerte (Schober 1995 I. Ertragsklasse)

Abbildung 5: Volumen der Fichte des verbleibenden Bestandes je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche in Abhängigkeit vom Bestandesalter für verschiedene Mischungsanteile sowie entsprechende Ertragstafelwerte (Wiedemann 1936/42 0. Ertragsklasse extrapoliert)

In den oben stehenden Abbildungen wird deutlich, dass in den Simulationsergebnissen bei der Baumart Buche für den Reinbestand etwa ab dem Alter 60 eine höhere Vorratshaltung erfolgt als in der vergleichbaren Ertragstafel, während bei der Baumart Fichte die Vorratshaltung des Reinbestandes ab dem Alter 30 unterhalb der Ertragstafelwerte liegt, was bedeutet, dass die simulierten Bestandesdaten der Fichte vorratsärmer sind.

3.4.2 Nutzungsvolumen und Zuwachs

Die planmäßigen Nutzungsvolumina einer Periode für die beiden Baumarten ergeben sich aus der Differenz zwischen dem laufenden jährlichen Zuwachs und der Veränderung des Vorrates des verbleibenden Bestandes. In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind diese laufenden jährlichen Zuwächse der Baumarten Buche und Fichte für die Reinbestände und die Mischbestandsvarianten je Hektar Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche sowie zum Vergleich die laufenden Zuwächse der Ertragstafeln dargestellt.

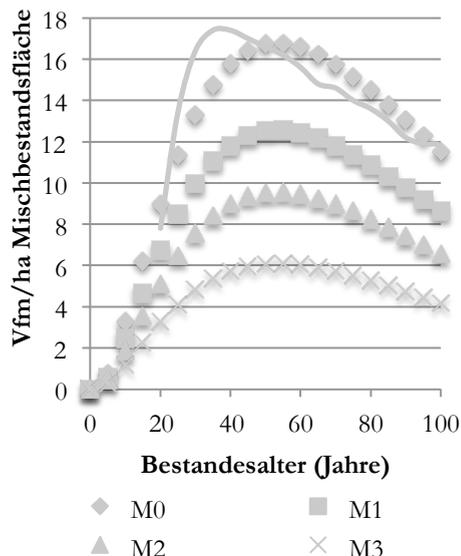
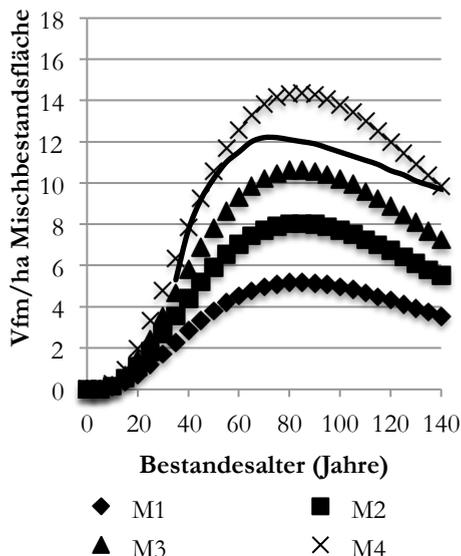


Abbildung 6: Zuwachs der Buche im Rein- und Mischbestand je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche in Abhängigkeit vom Bestandesalter für verschiedene Mischungsanteile sowie entsprechende Ertragstafelwerte (Schober 1995 I. Ertragsklasse)

Abbildung 7: Zuwachs der Fichte im Rein- und Mischbestand je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche in Abhängigkeit vom Bestandesalter für verschiedene Mischungsanteile sowie entsprechende Ertragstafelwerte (Wiedemann 1936/42 0. Ertragsklasse extrapoliert)

Bei der Buche zeigt der Vergleich zwischen dem Zuwachs der Simulationsergebnisse und den Ertragstafelwerten, dass etwa bis zum Alter 50 beide Kurven ähnlich verlaufen. Im weiteren Verlauf steigt der Zuwachs der Simulationsergebnisse für die Reinbestandsvariante M₄ jedoch um bis zu 2 Fm/ha/Jahr über die Angaben der Ertragstafel hinaus, um dann im Alter von 85 Jahren zu kulminieren, während die Kurve der Ertragstafel bereits im Alter von 75 Jahren kulminiert. Bei der Fichte steigt dagegen die Kurve des Zuwachses der Ertragstafel zu Beginn steiler an und kulminiert mit rund 17 Vfm/ha/Jahr im Alter 35 früher als die der Simulationsergebnisse M₀, die im Alter 50 bei 16,6 Vfm/ha/Jahr liegen. Die Höhe des laufenden Zuwachses bei der Fichte liegt jedoch im Vergleich zur Buche zum Zeitpunkt der jeweiligen Kulmination sehr nahe beieinander.

3.4.3 Gesamtwuchsleistung

Die Kennzahl der Gesamtwuchsleistung führt die beiden Größen Vorrat und Einschlag zusammen. Die Gesamtwuchsleistung zum jeweiligen Bestandesalter setzt sich entsprechend aus dem aktuellen Vorrat des verbleibenden Bestandes zu diesem Zeitpunkt und der Summe der bis zu diesem Zeitpunkt genutzten Volumina durch Durchforstungen bzw. bis zum Abtrieb des Bestandes zusammen. In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Gesamtwuchsleistungen über dem Bestandesalter für die Reinbestände der Baumarten Buche und Fichte aufgeführt. Als

Vergleichsbasis wurden hier ebenfalls die Werte der entsprechenden Ertragstafel mit dargestellt.

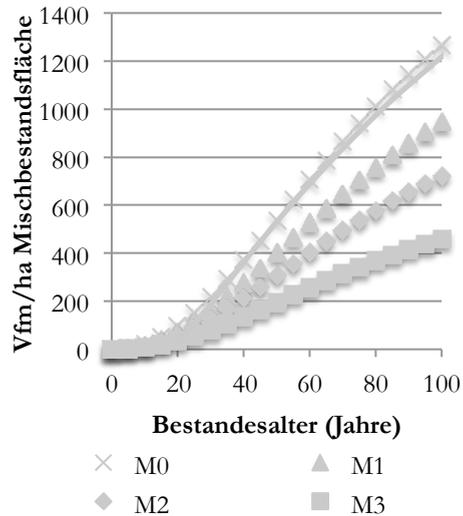
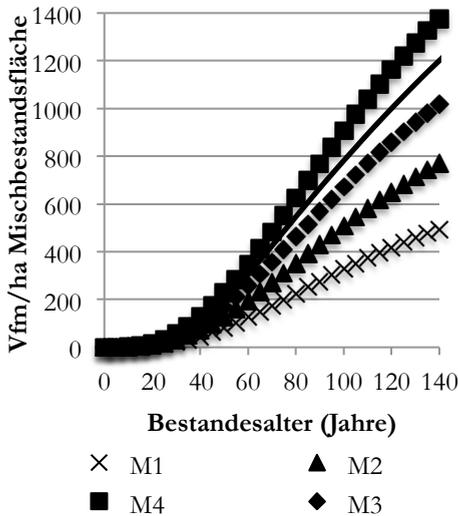


Abbildung 8: Gesamtumsatzleistung Buche im Rein- und Mischbestand je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche und Ertragstafelwerte (Schober 1995 I. Ertragsklasse)

Abbildung 9: Gesamtumsatzleistung Fichte im Rein- und Mischbestand je ha Mischbestands- bzw. Reinbestandsfläche und Ertragstafelwerte (Wiedemann 1936/42 0. Ertragsklasse extrapoliert)

Die Gesamtumsatzleistung des Buchenreinbestandes liegt, wie bereits bei der Entwicklung von Vorrat und Zuwachs dargestellt, über den Angaben der Ertragstafel, während bei einem Vergleich der mit der Simulation ermittelten Gesamtumsatzleistung der Baumart Fichte mit den Angaben der Ertragstafel deutlich wird, dass die Werte des Fichtenreinbestandes nah beieinanderliegen.

3.4.4 Durchmesser Grundflächenmittelstamm

Der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes, der dem quadratischen Mittelwert aller Durchmesser eines Bestandes entspricht, wird in vielen Ertragstafeln als Bezugsgröße verwendet (vgl. Kramer und Akça 2002 S. 126). Im Folgenden dient der baumartenspezifische, aus den Einzelbaumdaten der Simulation gewonnene Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (D_g) als Grundlage für die Zuordnung der Sortenverteilung und die korrespondierenden Erlöse und Kosten für die Holzernernte.

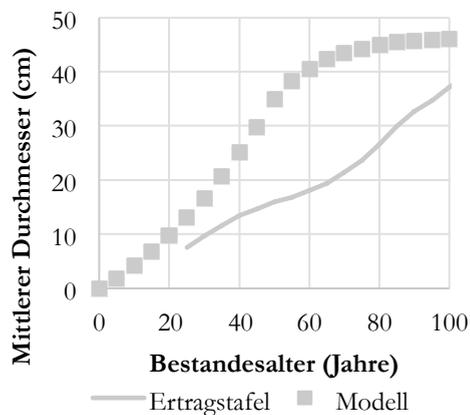
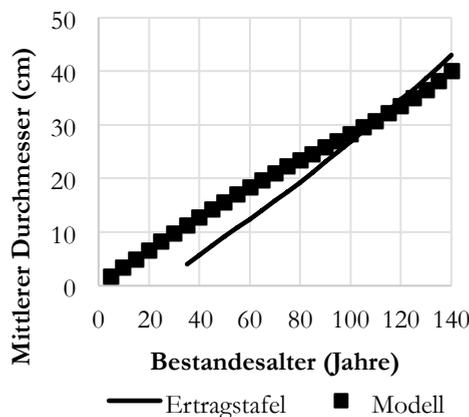


Abbildung 10: Mittlerer Durchmesser ausscheidender Bestand Buche und Ertragstafelwerte (Schober 1995 I. Ertragsklasse)

Abbildung 11: Mittlerer Durchmesser ausscheidender Bestand Fichte und Ertragstafelwerte (Wiedemann 1936/42 0. Ertragsklasse (extrapoliert))

In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind diese Mitteldurchmesser für den Bestand, der im Rahmen der planmäßigen Durchforstungen und Kalamitätsnutzungen ausscheidet, über dem Bestandesalter für die Baumarten Buche und Fichte im Vergleich zu den Ertragstafelangaben dargestellt. Die Mitteldurchmesser für die Buche liegen dabei für die Modelldaten bis zum Alter 100 über den Durchmessern der Ertragstafel für die mäßige Durchforstung. Ab dem Alter 100 sinken die Modelldurchmesser, wenn auch nur leicht, unter die Ertragstafelangaben ab. Im Vergleich hierzu liegen die Mitteldurchmesser der Fichte insbesondere im mittleren Bestandesalter deutlich über den Ertragstafelwerten für die mäßige Durchforstung. Um die jungen Bestandesalter miteinzubeziehen, die durch die Simulation nicht abgebildet werden konnten, wurden die Simulationsergebnisse hierfür in entsprechende Chapman-Richards-Funktionen überführt.

4 Modellierung der Flächendynamik

Buongiorno und Gilles (2003 S. 338) beschreiben Forstbetriebe und Betriebsmodelle als ein Flächenmosaik bestehend aus Beständen unterschiedlichen Alters. Die einzelnen Bestände sind einem ständigen strukturellen Wandel unterworfen. Durch planmäßige Nutzungen im Rahmen von Durchforstungen und der abschließenden Endnutzung scheiden Bestandesteile aus und ihre Fläche steht für eine erneute Verjüngung zur Verfügung. Doch auch Kalamitäten und die damit verbundenen Risiken tragen zur Veränderung des Flächenmosaiks der Bestände bei. Diese kalamitäts- und nutzungsbedingte Veränderung von Bestandesanteilen wird im Folgenden mithilfe von ausscheidenden Flächenanteilen und Markovschen Ketten dargestellt (vgl. Kouba 1973 S. 381 f.).

4.1 Die Markovsche Kette in der Anwendung für Mischbestände

Zustände eines zufallsbeeinflussten Systems an aufeinander folgenden Zeitpunkten, wie die Flächenentwicklung von Waldbeständen in fünfjährigen Perioden, lassen sich mithilfe von stochastischen Prozessen beschreiben. Der stochastische Prozess entspricht dabei der zeitlichen Abfolge von Zufallsvariablen, wie zum Beispiel X_0, X_1, X_2, \dots (vgl. Hübner 2009 S. 123). Eine Markovsche Kette stellt einen solchen stochastischen Prozess mit endlich vielen Zuständen und Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen diesen Zuständen dar (vgl. Ortlieb et al. 2009

S. 115). Dabei sind die einzelnen Zustände durch die Ketteneigenschaft immer nur unmittelbar von dem vorhergehenden Zustand abhängig (vgl. Fink 2003 S. 48). Dies bedeutet, dass die Entwicklung eines Waldbestandes vom Zeitpunkt t zum Zeitpunkt $t + 1$ lediglich vom Ausgangszustand t und seiner zukünftigen weiteren Entwicklung, der Übergangswahrscheinlichkeit nach $t + 1$, abhängig ist. Weiter zurückliegende Entwicklungen sind dabei nicht von Relevanz.

Mit dieser vergleichsweise einfachen Form wird, basierend auf den waldwachstumskundlichen Simulationen, die Flächenentwicklung der Waldbestände in der Zeit unter Einbeziehung der Nutzung für die einzelnen Baumarten im Rein- wie auch im Mischbestand dargestellt. Hieraus ergibt sich für die Darstellung der Flächenentwicklung der Waldbestände und die verwendete Markovsche Kette eine Übergangsmatrix zum Fortschreiben der Flächenzustände von einem Zeitpunkt zu einem anderen innerhalb einer Periode sowie ein Ausgangssatz von Zuständen zu einem Zeitpunkt, der sogenannte Flächenvektor (vgl. Buongiorno und Gilles 2003 S. 338 f.).

4.1.1 Flächenübergangswahrscheinlichkeit

Die Übergangswahrscheinlichkeit einer Fläche von einem Ausgangsalter in die nächst höhere Periode oder Altersklasse wird hier als Flächenübergangsverhältnis für den jeweiligen Anteil der Fläche, der nach dem Ausscheiden von Flächenanteilen durch Kalamitäten oder Nutzung in die nächste Periode übergeht, interpretiert. Würde die Übergangswahrscheinlichkeit der Fläche von einer Periode in die folgende 1 betragen, so rückerden in dieser Periode alle Flächenanteile in die nächst höhere Periode bzw. Altersstufe auf. Soll ein teilflächenhafter Ausfall vor dem eigentlichen Erreichen der geplanten Produktionsdauer abgebildet werden, so ist die tatsächliche altersstufenspezifische Übergangswahrscheinlichkeit, also die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bestand die nächst höhere Altersstufe erreicht, durch die Differenz zwischen der Fläche der aktuellen Altersstufe und der Fläche, die in die nächst höhere Altersstufe aufrückt, zu bestimmen. Diese Übergangswahrscheinlichkeiten können anschließend mit einer Flächenübergangsmatrix dargestellt werden. Durch die stochastische Eigenschaft dieser Flächenübergänge entsprechen sie einer Markovschen Kette (vgl. Suzuki et al. 1983 S. 11 f.).

4.1.2 Flächenübergangsmatrix

Die Markovsche Kette mit den n Zuständen $1, \dots, n$ wird mit einer Übergangsmatrix P mit den Übergangswahrscheinlichkeiten als Koeffizienten beschrieben:

Formel 4: Flächenübergangsmatrix

$$P = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,n} \end{pmatrix}$$

Die Indizierung der Matrix bedeutet, dass sich die Einträge jeder Zeile zu 1 aufaddieren lassen und dass alle Elemente der Matrix größer oder gleich 0 sind. Diese Eigenschaften finden sich auch in der Definition der Markovschen Kette wieder, deren Einträge in der Matrix durch nicht negative Zahlen und einer Zeilensumme von 1 bestimmt sind (vgl. Ortlieb et al. 2009 S. 95 ff.).

Der Übergang vom Zustand X zum Zeitpunkt t zum Zustand X_{t+1} lässt sich durch die Multiplikation der Zustandsinformation mit der Übergangsmatrix P wie folgt allgemeingültig darstellen:

Formel 5: Zustandsinformation und Übergangsmatrix

$$X_{(t+1)} = PX_t$$

Im Detail gilt für diesen Zusammenhang:

Formel 6: Zustandsinformation und Übergangsmatrix (Detailbetrachtung)

$$X_j(t+1) = \sum_{i=1}^n X_i(t)p_{ij} \quad (j = 1, \dots, n)$$

Der i -te Summand $X_i(t)p_{ij}$ stellt die Wahrscheinlichkeit dar, dass sich das System zum Zeitpunkt t im Zustand i befindet und von dort in den Zustand j übergeht. Die Summanden beschreiben somit die Möglichkeiten zum Zeitpunkt $t+1$ in den Zustand j zu gelangen (vgl. Ortlieb et al. 2009 S. 118).

4.1.3 Vektor zur Beschreibung des Flächenzustandes

Diese allgemein gehaltenen Zusammenhänge lassen sich auf die Flächenverteilung von Waldbeständen eines Forstbetriebes zu einem bestimmten Zeitpunkt übertragen. Mathematisch wird diese Zeitpunktbetrachtung der Flächenverteilung durch einen Vektor beschrieben. Der Vektor a enthält n verschiedene Flächen eines Betriebes. Übertragen auf die Altersklassenverteilung der Flächen (im Folgenden für 20-jährige Altersklassen dargestellt) wird die Zusammensetzung der Altersklassenflächen als Element des Altersklassenvektors a mit a_1 bis a_n dargestellt.

Formel 7: Altersklassenvektor

$$a = (a_1, a_{11}, \dots, a_n)$$

Wird durch den Altersklassenvektor die Flächenverteilung einer gesamten Betriebsklasse beschrieben, bleibt die Summe seiner Komponenten im zeitlichen Verlauf stets konstant (vgl. Suzuki et al. 1983 S. 12 f.). Daraus folgt:

Formel 8: Gesamtfläche der Betriebsklasse

$$a_i + a_{11} + a_{111} + \dots + a_n = a \quad (a \sim \text{Gesamtfläche der Betriebsklasse})$$

Eine Differenzierung der Betriebsklasse in mehrere Baumarten (Baumart 1 und Baumart 2) und ihre korrespondierenden Flächen in der jeweiligen Altersklasse erweitern diesen Zusammenhang, in dem für jede Altersklasse die Flächen der Baumarten ($a_{1,1}$; $a_{1,2}$) getrennt dargestellt werden. Für zwei Baumarten mit einer jeweiligen Umtriebszeit von beispielsweise 80 Jahren lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt darstellen:

Formel 9: Gesamtfläche der Betriebsklasse mit der Differenzierung nach Baumarten

$$a_{I,1} + a_{I,2} + a_{II,1} + a_{II,2} + a_{III,1} + a_{III,2} + a_{IV,1} + a_{IV,2} = a$$

($a \sim$ Gesamtfläche der Betriebsklasse)

Eine direkte Zuordnung der Baumarten Buche und Fichte und ihrer Flächen in den einzelnen Altersklassen führt zu folgender Darstellung:

Formel 10: Gesamtfläche der Betriebsklasse, unterteilt nach Buchen- und Fichtenflächen

$$a_{I,Bu} + a_{I,Fi} + a_{II,Bu} + a_{II,Fi} + a_{III,Bu} + a_{III,Fi} + a_{IV,Bu} + a_{IV,Fi} = a$$

Beispielhaft übertragen auf eine Buchen-Fichten-Betriebsklasse mit einer Gesamtfläche von 100 ha und einer Umtriebszeit für Buche von 140 Jahren und für Fichte von 100 Jahren ergibt sich wie folgt eine beispielhafte Flächenausstattung der einzelnen Baumarten in den Misch- bzw. Reinbeständen der jeweiligen Altersklassen zu einem Inventurzeitpunkt:²⁰

Tabelle 3: Flächenverteilung einer Beispielmischbestandsbetriebsklasse mit Buche und Fichte in Zeitmischung

Altersklassen		I	II	III	IV	V	VI	VII	Σ
Fläche Fichte	ha	16	10	7	4	1			38
Fläche Buche	ha	16	10	10	9	7	6	4	62
Gesamtfläche	ha	32	20	17	13	8	6	4	100

Für die Summe der Altersklassenfläche der beiden Baumarten ergibt sich der folgende zugehörige Altersklassenvektor der Betriebsklasse:

Formel 11: Flächenvektor einer Mischbestandsbetriebsklasse²¹

$$a = (16; 16; 10; 10; 10; 7; 9; 4; 7; 1; 8; 0; 6; 0)$$

Dies bedeutet, dass sich die 100 ha dieser Beispielbetriebsklasse mit 32 ha (16 ha Buche und 16 ha Fichte) auf die erste Altersklasse, mit 20 ha (jeweils 10 ha der beiden Baumarten) auf die zweite, 17 ha (10 ha Buche und 7 ha Fichte) auf die dritte, 13 ha (9 ha Buche und 4 ha Fichte) auf die vierte, 8 ha (7 ha Buche und 1 ha Fichte) auf die fünfte, 6 ha (reine Buche) auf die sechste und 4 ha (reine Buche) auf die siebte Altersklasse verteilen. Die Differenzierung der jeweiligen Fläche der Baumarten in den einzelnen Altersklassen zeigt in dieser Zeitpunkt Betrachtung des Beispiels die unterschiedliche Flächenausstattung der Baumarten Buche und Fichte in den mittleren Altersklassen (III, IV und V) und das durch die unterschiedlichen Umtriebszeiten bedingte Fehlen des Nadelholzes in den höheren Altersklassen (VI und VII). Da dieser beispielhafte Vektor die Flächenverteilung

²⁰ Aus Gründen der besseren Veranschaulichung liegt bei dieser Flächenausstattung noch kein stationärer Zustand vor.

²¹ Zur leichteren Lesbarkeit wurden Fichtenflächen in der VI. und VII. Altersklasse mit einer jeweiligen Flächengröße von 0 im Vektor mitaufgeführt. Durch die verwendete Umtriebszeit der Fichte von 100 Jahren könnte auf die Darstellung dieser Flächen in den Altersklassen VI und VII verzichtet werden.

der Baumarten zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreibt, verschiebt sich die Flächenzusammensetzung der Betriebsklasse mit der zeitlichen Entwicklung der Bestände bis zur Einstellung eines Gleichgewichtszustandes weiter. Diese Veränderung der Flächenzusammensetzung zwischen einzelnen Perioden bezeichnen Suzuki, Sloboda und Saborowski (1983 S. 11) als die Dynamik der Betriebsklasse.

4.1.4 Eigenvektor – stationärer Zustand

Durch die Dynamik der Betriebsklasse und die damit verbundene Flächenübergangswahrscheinlichkeit verändert sich die Flächenzusammensetzung der einzelnen Altersklasse mit der Zeit. Weist im dargestellten Beispiel (vgl. Tabelle 3) die I. Altersklasse eine Fläche von 32 ha auf, so führen die im Laufe der weiteren Entwicklung der einzelnen Bestände ausscheidenden Flächenanteile zu einer Verschiebung der Flächenanteile der beiden Baumarten in den jeweiligen Altersklassen.

Mit fortschreitender Zeit entwickelt sich langfristig, aufbauend auf den Überlebenswahrscheinlichkeiten²² und den hieraus resultierenden Flächenübergangswahrscheinlichkeiten von einer Altersklasse in die Folgealtersklasse, ein stationärer Gleichgewichtszustand der Flächen in den einzelnen Altersklassen der Betriebsklasse. Die Betriebsklasse weist hierdurch in allen Altersklassen Flächenanteile auf und bewahrt diesen Zustand in diesem Fixpunkt langfristig.

Zu jeder Betriebsklasse und ihrer entsprechenden Übergangsmatrix existiert dabei ein eindeutiger Gleichgewichtszustand, der von den einzelnen Übergangswahrscheinlichkeiten der Matrix abhängig ist. Dies bedeutet zwangsläufig, dass für verschiedene Baumarten, Mischungsvarianten und Modellparameter sich sehr langfristig unterschiedliche nachhaltige Zustände für die jeweilige Betriebsklasse entwickeln. Dabei ist die Wahl der ausgehenden Flächenverteilung der Betriebsklasse unerheblich, denn unabhängig von der eigentlichen Wahl eines Ausgangszustandes stellt sich abhängig von den Übergangswahrscheinlichkeiten für die Markovsche Kette nach langer Zeit ein (nahezu) stationärer Gleichgewichtszustand ein.

²² Die vom Bestandesalter abhängige Überlebenswahrscheinlichkeit wird hier in Anlehnung an Möhring et al. (2010b S. 26) als der Teil der begründeten Kulturfläche interpretiert, der im Mittel ein bestimmtes Alter des Bestandes erreicht.

4.2 Risikobedingte Überlebenswahrscheinlichkeit

Eine Vielzahl von biotischen und abiotischen Risiken beeinflussen Forstbetriebe (vgl. Dieter 1997 S. 5). Dabei haben insbesondere naturale Risiken einen großen Einfluss auf den forstlichen Produktionsprozess. Schadereignisse führen zu Abweichungen von der Planung und durch den unplanmäßigen Schadholzanfall neben Mindererlösen zu höheren Produktionskosten. Darüber hinaus können diese Risiken auch das eigentliche Produktionsziel in Frage stellen (vgl. Möhring et al. 2010b S. 26.).

Auf der Ebene des einzelnen Bestandes wird dies besonders deutlich. Risikobedingt scheiden während des Bestandeslebens einzelne Bäume oder ganze Bestandesteile aus, bevor sie das eigentliche Produktionsziel erreicht haben. Sekot (1990 S. 21) definiert dieses Risiko vereinfacht als den Anteil des Vorrates, der im Mittel jährlich als Schadholz ausfällt. Das naturale Risiko kann in Anlehnung daran in diesem Zusammenhang als Überlebenswahrscheinlichkeit von Einzelbäumen und Beständen beschrieben werden (in Anlehnung an Mai 1999 S. 616). Die Vielfalt forstbetrieblicher Risiken setzt notwendigerweise eine systematische und rationale Erfassung dieser betrieblichen Risiken und eine Auseinandersetzung mit diesen voraus – eine Aufgabe des betrieblichen Risikomanagements (vgl. Möhring et al. 2010a S. 88). Der dem Risikomanagement zugrunde liegende Prozess von Betrieben kann in Anlehnung an Gunkel (2010 S. 56 ff.) in die Teilbereiche Risikoidentifikation, Risikoanalyse und Risikobewertung, Risikobewältigung und Risikoüberwachung untergliedert werden. Für die hier vollzogene Modellbetrachtung wird der Schwerpunkt auf die erst genannten Bereiche Risikoidentifikation, Risikoanalyse und Risikobewertung gelegt.

4.2.1 Risikoidentifikation

Die Prozessphase der Risikoidentifikation nimmt eine Schlüsselrolle im Prozess des Risikomanagements ein und damit auch in der Modellbildung, da hier die verschiedenen Gefahrenquellen, Störpotentiale und Schadensursachen, die sich negativ auf das forstliche Produktionsziel auswirken, möglichst vollständig erfasst werden. Somit wird die Informationsgrundlage für Entscheidungsmöglichkeiten gesetzt (vgl. Romeike und Finke 2003 S. 165). Waldbestände sind aufgrund ihrer vergleichsweise sehr langen Produktionszeit einer Vielzahl von natürlichen Risiken ausgesetzt, wobei diese Risiken aufgrund der langen Zeiträume zum Teil nur selten oder nur in bestimmten Bestandesphasen auftreten können, wie zum Beispiel Risiken bei der Bestandesbegründung. Dabei kann grundsätzlich in biotische und abiotische Risiken differenziert werden (vgl. Dieter 1997 S. 5). In den letzten Jahrzehnten hat die Risikobelastung der Waldbestände in Form komplexer Waldschäden durch große Sturmkalamitäten und den bereits andauernden Klimawandel deutlich zugenommen (vgl. Bitter 2004 S. 1). Besonders Sturmereignisse haben häufig einschneidende Folgen für die Stabilität (vgl. Meilby et al. 2001 S. 15 f.) und damit auch für die Einnahmen aus diesen Beständen. Neben dem wichtigsten abiotischen Faktor, dem Sturmrisiko, kommen weiter Schnee, Eishang, Frost,

Trockenheit und Waldbrände hinzu. Aber auch biotische Schäden wie Insekten, Wild und Pilze (vgl. Kobua 2002 S. 212) können ein frühzeitiges Absterben einzelner Bäume oder ganzer Bestandesteile zur Folge haben.

4.2.2 Risikoanalyse und Bewertung

Die Risikoanalyse und Risikobewertung haben nach der Erfassung aller, den Forstbetrieb betreffenden Risiken im Rahmen der Risikoidentifizierung zum Ziel, die Bedeutung dieser Risiken für den Forstbetrieb zu analysieren und mithilfe von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß zu bewerten. Dabei werden neben der Erfassung der eigentlichen Risiken die Ursache-Wirkungs-Beziehungen sowie die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Faktoren, die den Risikoauswirkungen zugrunde liegen, betrachtet (vgl. Holthausen et al. 2004 S. 150). Voneinander unabhängige Risiken sind beispielsweise Sturmschäden, Schneebruch und Waldbrände. Diese einzelnen Risiken sind separat zu betrachten und erhöhen somit das Gesamtrisiko der Baumart und verringern entsprechend die Überlebenswahrscheinlichkeit der Bestände. Dabei ist es letztendlich zweitrangig, welcher Risikoart das Ausscheiden des Bestandesteils zugeordnet wird (vgl. Dieter 1997 S. 41). Einige Risiken in Forstbetrieben sind direkt voneinander abhängig oder stehen in einem engen Zusammenhang, wie zum Beispiel Folgeschäden nach Stürmen durch Borkenkäfer bei der Fichte in aufgelichteten und geschwächten Randbereichen der Bestände (Schmidtke und Scherrer 1997 S. 32 ff.) oder die Begünstigung der Buchenkomplexkrankheit infolge von Bestandesauflichtungen, Hitze oder Trockenheit (vgl. Bressen 2008 S. 94 ff.).

Der forstliche Produktionsprozess ist aufgrund seiner langen Produktionsdauer durch eine Vielfalt an Einflussfaktoren, Risiken und eine hohe Komplexität geprägt. Die Risiken können sich aufgrund dieser Langfristigkeit während der Zeit in einer Art und Weise verändern, die sich nicht vorhersagen lässt (vgl. Holthausen et al. 2004 S. 152). Eine Risikoanalyse ist aus diesem Grunde meist nur eingeschränkt möglich. Darüber hinaus ist es häufig schwierig, empirisch Wahrscheinlichkeiten für Folgerisiken zu ermitteln und diese baumarten- und standortspezifisch zuzuordnen. Insbesondere eine periodenscharfe Zuordnung zu den im Modell verwendeten fünfjährigen Perioden ist durch die Prädisposition der durch das erste Risikoereignis geschwächten Baumarten meist nur begrenzt möglich. Darüber hinaus werden vorgeschädigte Bestände meist bald durch Erntemaßnahmen entnommen (vgl. Dieter 1997 S. 43). In der Darstellung der Risiken wird aus diesem Grund im Folgenden auf eine weitere Differenzierung zwischen ursprünglichen Risiken und Folgerisiken, die zu einem kalamitätsbedingten Ausscheiden des Bestandesteils führen, verzichtet. Für die Darstellung der Risiken im Modell ist vielmehr die durch die Summe der Risiken bedingte Überlebenswahrscheinlichkeit von Interesse.

Holthausen, Hanewinkel und Holec (2004 S. 150 f.) schränken im Rahmen der Risikoanalyse die Bandbreite der forstbetrieblichen Risiken aufgrund der skizzierten Herausforderungen auf die Risiken ein, die direkt fühlbare Auswirkungen

auf den forstlichen Produktionsprozess haben. Im Folgenden wird dieser Bereich noch weiter auf Risiken mit direkten wirtschaftlichen Auswirkungen für den Forstbetrieb eingegrenzt. Quantitative Risikoanalysen für Waldbestände liegen aktuell nur für Sturmrisiken vor. Selbst Risiken, die in Form von Folgeschäden im Rahmen von Stürmen auftreten, oder andere Schadfaktoren sind nicht erfasst (vgl. Dieter 1997 S. 42). Die Herleitung von quantitativen Schadensparametern ist aufwendig und komplex. Selbst in den großen Landesbetrieben wurden die risikobedingten Nutzungen im Rahmen von Großkalamitäten meist nicht flächenscharf erfasst. Daher ist die Datengrundlage abgesehen von einigen regionalen, fall- oder standortsspezifischen Untersuchungen für eine fundierte Risikomodellierung mit dem Ziel der Prognose von Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten dürftig (vgl. Holthausen et al. 2004 S. 152 ff.).

Einen Ausweg ist der Einsatz von statistischen Modellen, die auf Daten historischer Ereignisse aufbauen. Im Rahmen der klassischen deterministischen Vorgehensweise werden aufbauend auf den Ansatz von Suzuki (1971 S. 69 ff.) Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den einzelnen fünfjährigen Perioden im Modell abgeleitet. Für die Herleitung dieser risikobedingten Übergangswahrscheinlichkeiten wurden verschiedene Modelle entwickelt. In Anlehnung an Möhring, Staupendahl und Leefken (2010b S. 26), Kouba (2002 S. 216), Holecyc und Hanewinkel (2006 S. 164), Staupendahl und Zucchini (2011 S. 133) sowie Griess, Acevedo, Härtl, Staupendahl und Knoke (2012 S. 288) werden im Folgenden zur Beschreibung von Risiken und zur Quantifizierung im Modell die zweiparametrische Weibull-Überlebensfunktion und die entsprechenden Überlebenswahrscheinlichkeiten als Grundlage verwendet.

Die Weibull-Verteilung wird durch zwei Parameter bestimmt: Der Skalenparameter β gibt die Lebensdauer an, bei der die Ausfallwahrscheinlichkeit 63,2% beträgt (vgl. Staupendahl 2011 S. 12). Staupendahl (2011 S. 13) verwendet anstelle des Skalenparameters β den Wert der Überlebensfunktion im Alter 100 (S_{100}), d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bestand mindestens das Alter 100 erreicht, als Index für die Ausfallstärke. Der zweite Parameter, der Formparameter α , stellt ein Maß für die Streuung und die Form der Ausfalldichte dar (vgl. Wilker 2010 S. 76 f.). Mit einem Formparameter > 0 und < 1 lassen sich Jugendrisiken, wie zum Beispiel Schneebruch, darstellen. Ein Formparameter von 1 stellt altersindifferente Risiken dar. Hohe Altersrisiken, wie zum Beispiel das mit dem Alter steigende Sturmrisiko, führt zu einem Formparameter > 1 . Die natürlichen Produktionsrisiken werden dabei durch einen flächenhaften Ausfall von Bestandesteilen vor dem eigentlichen Erreichen der geplanten Produktionsdauer zum Ausdruck gebracht (vgl. Staupendahl 2011 S. 11). Die Verwendung der Weibull-Funktion ermöglicht eine flexible Handhabung der risikobedingten Überlebenszeiten (vgl. Gries et al. 2012 S. 288). Die besondere Stärke dieser Funktion kommt durch die Möglichkeit der Darstellung der Risikoart mithilfe des Formparameters α zum Tragen (vgl. Staupendahl und Zucchini 2011 S. 134).

4.2.3 Sturmschadensrisiko von Buche und Fichte im Reinbestand

Zur Herleitung von sturmbedingten Überlebenswahrscheinlichkeiten gibt es in den letzten Jahren einige wenige Untersuchungen, die anhand von empirischen Daten aus Waldbeständen überwiegend Werte für Reinbestände entwickeln (vgl. beispielsweise König 1999 S. 143, Diettrich 1986 S. 42 ff., Staupendahl und Zucchini 2011 S. 139, Hanewinkel und Holeczy 2005 S. 269, Neuner et al. 2015 S. 939).

Als Rahmenwerte für den Buchen- bzw. Fichtenreinbestand werden die folgenden Parameter (Risikostärken und Formparameter) von Staupendahl und Zucchini (2011 S. 139) für die Darstellung der baumartenindividuellen Risiken mithilfe der zweiparametrischen Weibull-Funktion im Modell verwendet (vgl. Tabelle 4):

Tabelle 4: Parameter der zweiparametrischen Weibull-Funktion für Buche und Fichte

	Risikostärke S_{100}	Formparameter α
Buche	0,967	2,75
Fichte	0,726	2,78

Abbildung 12 zeigt die aus den in Tabelle 4 dargestellten Parametern resultierende risikobedingte Überlebenswahrscheinlichkeit für die Baumarten Buche und Fichte für Reinbestände. Je höher die Risikostärke im Alter 100 ausfällt, umso höher ist der Anteil der Bestandesfläche, der im Alter 100 risikobedingt ausgeschieden ist. Deutlich wird dabei das frühe Absinken der Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte im Vergleich zur Buche. Im Alter 100 sind von der einst mit einem Hektar begründeten Kulturfläche im Reinbestand von der Buche noch eine Fläche von 0,967 ha ($S_{100} = 0,967$) vorhanden, während von der Fichte risikobedingt lediglich eine Fläche von 0,726 ha ($S_{100} = 0,726$) bestockt ist.

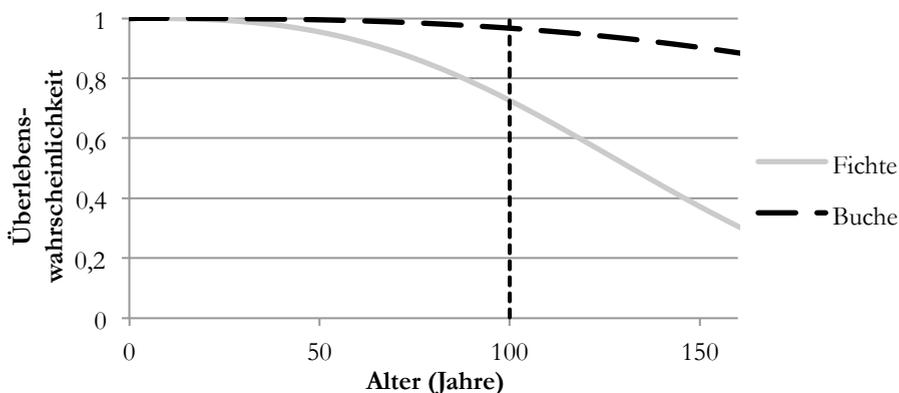


Abbildung 12: Risikobedingte Überlebenswahrscheinlichkeiten für Buche und Fichte

Für die beispielhafte Übertragung dieser Überlebenswahrscheinlichkeiten auf die risikobedingte Flächenentwicklung der Baumarten Buche und Fichte in Reinbe-

ständen ergeben sich für die Flächenentwicklung von einer Altersklasse in die daran anschließende die folgenden rein risikobedingten Übergangsgraphen.²³

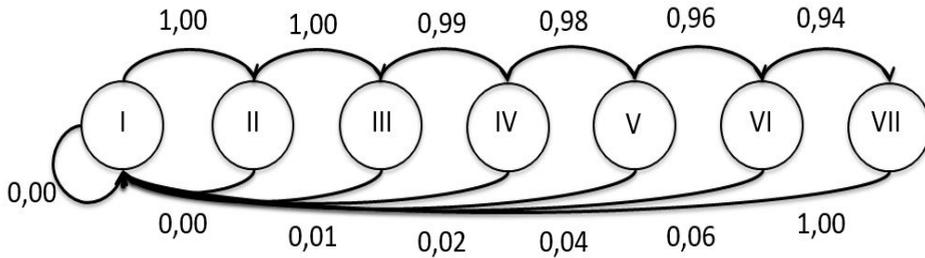


Abbildung 13: Übergangsgraph Buchenreinbestand (nur Risiko $S_{100} 0,967$)

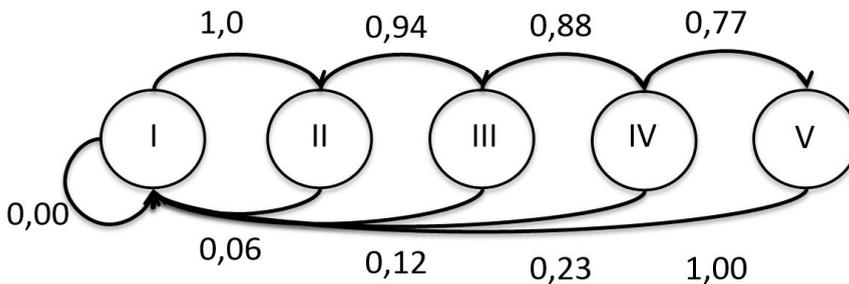


Abbildung 14: Übergangsgraph Fichtenreinbestand (nur Risiko $S_{100} 0,726$)

Der schrittweise Übergang der Flächen bzw. Flächenanteile von einer Altersklasse in die darauffolgende bzw. zurück in die I. Altersklasse lässt sich mit einem Übergangsgraphen darstellen (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14). Jeder Zustand der Flächen in den jeweiligen Altersklassen ist ein Knoten, hier dargestellt als Kreis, während die Übergänge in die anderen Zustände (Altersklassen) in Form von Pfeilen dargestellt werden (in Anlehnung an Pahl und Damrath 2000 S. 963). Die Summe der Wahrscheinlichkeiten bzw. der Pfeile, die von einem Knoten wegführen, muss dabei immer eins ergeben, da bei jedem Zustand nur zwei Möglichkeiten bestehen: Entweder rückt die Fläche oder Teile davon in die nächst höhere Altersklasse auf (mit den Pfeilen oberhalb der Knoten in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt) oder die Fläche bzw. Anteile von ihr gehen in die Verjüngung über und fallen damit in die erste Altersklasse zurück (mit den unterhalb der Knoten dargestellten Pfeilen). Der Übergangsgraph verdeutlicht, dass beispielsweise vom Zustand II, der II. Altersklasse, als nächstes nur die Zustände III und I bzw. die Altersklassen III und I angenommen werden können.

²³ Auf die Darstellung weiterer, die Flächenentwicklung beeinflussender Faktoren, wie zum Beispiel der Endnutzungswahrscheinlichkeit, wurde an dieser Stelle der Modellentwicklung verzichtet und ein Abtrieb des Bestandes per Kahlschlag am Ende des Produktionszeitraums unterstellt.

Der risikobedingte Übergangsgraph der Buche in Abbildung 13 zeigt, beginnend mit dem ersten Knoten der Altersklasse I, dass nach 20 Jahren die vollständige Fläche in die nächst höhere Altersklasse aufgerückt ist. Ebenfalls geht die Fläche vollständig von der II. in die III. Altersklasse über. Erst beim Übergang von der III. in die IV. Altersklasse scheiden 1% der Fläche risikobedingt aus und fällt in die I. Altersklasse zurück. Dort steht diese Fläche für die Begründung des Nachfolgebestandes zur Verfügung. Entsprechend rücken die restlichen 99% der ursprünglichen Bestandesfläche in die nächst höhere IV. Altersklasse auf. Mit dem weiteren Fortschreiten des Bestandesalters und dementsprechend mit den höheren Altersklassen sinken aufgrund der vom Bestandesalter abhängigen Risikogefährdung die Übergangswahrscheinlichkeiten bis zum Übergang von der VI. in die VII. Altersklasse weiter auf 94% ab. Von der VII. Altersklasse geht die restliche Fläche des ursprünglich begründeten Bestandes, die nicht bereits in den vorhergehenden Altersklassen risikobedingt ausgeschieden ist, komplett in die I. Altersklasse und somit in die Verjüngung des Nachfolgebestandes über. Hierfür wurde an dieser Stelle zur Vereinfachung der Modellentwicklung ein Kahlhieb unterstellt.²⁴

4.2.4 Sturmschadensrisiko von Buche und Fichte im Mischbestand

Eine Quantifizierung der Veränderung der Risikoanfälligkeit durch Mischung von Baumarten und eine Ableitung von altersabhängigen baumartenindividuellen Überlebenswahrscheinlichkeiten unterbleibt jedoch in den meisten Veröffentlichungen (vgl. Gries 2012 S. 19).²⁵

König (1995 S. 115 ff.) zieht anhand seiner Untersuchungen beispielsweise den Schluss, dass sich Fichten-Buchen- und Buchen-Fichten-Mischbestände beim Sturmschadensrisiko nicht signifikant von reinen Fichtenbeständen unterscheiden. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Lüpke und Spellmann (1997 S. 174), die darauf hinweisen, dass insbesondere die im Mischbestand vorwüchsige Fichte in der Regel durch diesen Wuchsvorsprung gegenüber der Mischbaumart Buche den Stürmen besonders ausgesetzt ist, da ihr aufgrund der Rauhigkeit des Kronendaches in der Mischung das stabilisierende Bestandesgefüge des Fichtenreinbestandes fehlt (vgl. Müller 2002 S. 23). Weiter steigt diese Sturmanfälligkeit der beigemischten Fichten mit deren zunehmender Höhenentwicklung und entsprechend mit dem Bestandesalter (vgl. Albrecht 2009 S. 77), was dazu führt, dass das Sturmrisiko der Nadelbäume bereits in relativ jungen Beständen stärker als das der Laubbäume ansteigt, die aufgrund ihres geringeren Höhenwachstums vergleichsweise sturmstabil bis in höhere Bestandesalter bleiben (vgl. Lüpke und Spellmann 1997 S. 172). Darüber hinaus beobachten Lüpke und Spellmann (1997 S. 174), dass die Fichte im Mischbestand mit Buche zu einer flacheren Wurzel Ausbildung

²⁴ Auf die Darstellung der Übergangswahrscheinlichkeit von 0 von der VII. in die nächst höhere VIII. Altersklasse wurde hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

²⁵ Dies ist trotz der Fortschritte in den letzten Jahren auf noch fehlende geeignete Untersuchungen zurückzuführen, welche die große Bandbreite an Mischungsmöglichkeiten, Interaktionen zwischen den einzelnen Arten und die zugehörige Standortvielfalt abbilden können.

im Oberboden tendiert, während die Buche im Unterboden dominiert. Diese Situation führt im Vergleich zum Fichtenreinbestand tendenziell sogar zu einer Erhöhung des Sturmwurftrisikos der Fichte im Mischbestand.

Diesen Beobachtungen steht eine Vielzahl von Publikationen gegenüber, die eine Verringerung der Risikoanfälligkeit von Mischbeständen gegenüber Windwurf und Insektenkalamitäten beschreiben. Beispielsweise beschreiben Kennel (1965 S. 149), Rau (1995 S. 147 ff.), Pretzsch und Schütze (2009 S. 190), Gries und Knoke (2011 S. 1146 ff.), Knoke et al. (2008 S. 99), Schmidt-Vogt (1989 S. 168), Neuner et al. (2015 S. 939) eine höhere Risikoanfälligkeit von Fichtenreinbeständen im Vergleich zu Mischbeständen mit beigemischter Buche.

Schmidt-Haas und Bachofen (1991 S. 485) vergleichen in ihren Untersuchungen den Einfluss verschiedener Bestandestypen auf Windwurfereignisse. Dabei stellen sie eine deutliche Erhöhung der Resistenz von Mischbeständen mit Laub- und Nadelholz fest. Schütz et al. (2006 S. 297) kommen zu ähnlichen Ergebnissen bei der Untersuchung von Fichten- und Buchenmischbeständen infolge des Sturmes „Lothar“ 1999. Dabei ist nach Ansicht der Autoren die Mischung ein wesentlicher Regulator zur Verringerung des Schadensausmaßes.

Eine Quantifizierung der Überlebenswahrscheinlichkeit für Mischbestände erfolgt erstmals bei Gries (2012 S. 2012 ff.). Anhand empirischer Daten aus der Waldzustandserhebung in Rheinland-Pfalz wurden Überlebenswahrscheinlichkeiten für Fichte in Rein- und Mischbeständen ermittelt.²⁶ Auch Folgeausfälle durch Insektenkalamitäten sind in den Daten enthalten und führen zwangsläufig zu einer Steigerung des Gesamtrisikos (Gries 2012 S. 66 und Hanewinkel et al. 2008 S. 2249 ff.) und damit zu einer Überschätzung der ausschließlich sturmbedingten Risikostärke.

In ihren Untersuchungen entwickelt Gries (2012 S. 48) die in Tabelle 5 dargestellten Risikostärken für verschiedene Fichtenanteile in Mischbeständen auf Standorten mit einer mittleren Nährstoffversorgung.

Tabelle 5: Risikostärken im Alter 100 (S_{100}) für Fichte im Mischbestand auf Standorten mit einer mittleren Nährstoffversorgung (nach Gries 2012 S. 48)

Fichtenanteil [%]	Risikostärke S_{100}
81–99 (Mittelwert 93)	0,88
≤ 80 (Mittelwert 49)	0,94

Deutlich wird in der oben dargestellten Tabelle die Streuung der Risikostärke der Fichte in Abhängigkeit vom Mischungsanteil auf Standorten mit einer mittleren Nährstoffversorgung. Die Daten zeigen den Einfluss der Mischung mit anderen Baumarten auf die Risikostärke der Fichte im Alter 100.

In der folgenden Abbildung 15 sind die Risikostärken aus den Untersuchungen von Gries (2012 S. 48) (vgl. Tabelle 5) für Mischbestände und die Risikostärke

²⁶ Eine klare Differenzierung zwischen dem eigentlichen Windwurfisiko und Folgerisiken kann hierbei nicht erfolgen. Entsprechend enthalten diese Überlebenswahrscheinlichkeiten nicht nur sturmbedingte Ausfälle.

für Reinbestände von Staupendahl und Zucchini (2011 S. 139) (vgl. Tabelle 4) kombiniert und über dem Mischungsanteil der Fichte aufgetragen.²⁷

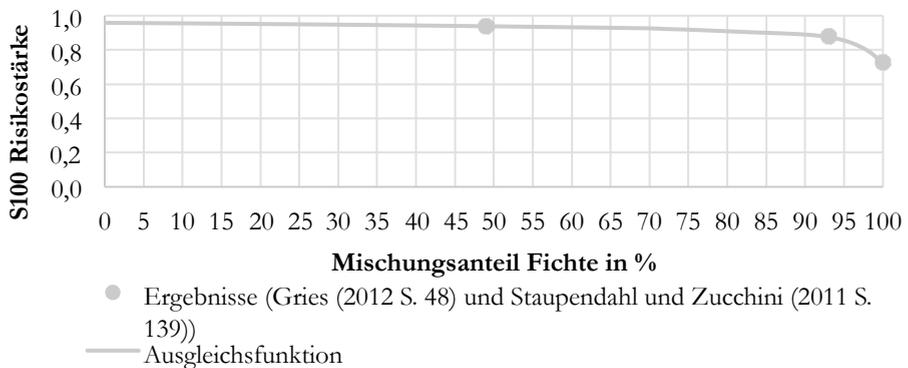


Abbildung 15: Vom Mischungsanteil der Fichte abhängige Risikostärken im Alter 100 (S_{100})

4.3 Endnutzungswahrscheinlichkeit

Das Überleben von Waldbeständen wird neben dem kalamitätsbedingten Risiko an erster Stelle durch das waldbauliche Behandlungskonzept beeinflusst. Die „Gentan-Wahrscheinlichkeit“ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der die Fläche einer Baumart des ursprünglich begründeten Bestandes zu einem bestimmten Erntealter abgetrieben wird (vgl. Suzuki et al. 1983 S. 9). Der Begriff „Gentan“ stammt aus dem Japanischen und beschreibt die Verringerung der Anbaufläche. Suzuki, Sloboda und Saborowski (1983 S. 9 ff.) verwenden die Gentan-Wahrscheinlichkeit als Möglichkeit, die Lebensdauerverteilung eines Waldbestandes durch ein Ausscheiden von Flächenanteilen zum Bestandesende beispielsweise durch die Nutzung darzustellen. Die Gentan-Wahrscheinlichkeit eignet sich somit als Beschreibungsmodell zur Darstellung der Endnutzung. Ihre Methodik baut auf der Lebensdauer von Waldbeständen auf. Als diese Lebensdauer $T_N \geq 0$ wird die Zeit bezeichnet, in der ein Waldbestand oder ein Teil davon noch am Leben ist und nicht durch Nutzung entnommen wurde oder bereits risikobedingt durch Kalamitäten ausgeschieden ist.²⁸ Zu der Lebensdauer T_N von Waldbeständen, die von der Nutzung des Bestandes abhängig ist, gehört eine entsprechende Lebens-

²⁷ Diese vom Mischungsanteil abhängigen Risikostärken sind näherungsweise durch den Graphen (Polynom II. Grades) beschrieben. Dabei ist der bekannte Bereich der Daten (Mischungsanteil 49% bis 100%) durch Interpolation und anschließender Ausgleichsrechnung beschrieben. Aufbauend auf diesen Ergebnissen ist die Funktion durch Extrapolation über den Definitionsbereich dieser Daten hinaus bis zu einem Fichtenanteil von 0% verlängert.

²⁸ Eine Berücksichtigung von risikobedingten Veränderungen des Bestandes wird an dieser Stelle aus der Betrachtung ausgeklammert.

dauerverteilung. Diese wird im Folgenden durch die Dichtefunktion, die Verteilungsfunktion und die Überlebenswahrscheinlichkeit beschrieben.

Bei der Simulation des Waldwachstums mit dem ForestSimulator BWINPro (vgl. Kapitel 3.4) wurde eine konsequente Zielstärkennutzung der Z-Bäume im Simulationsmodell hinterlegt. Für die Buche wurde eine Z-Baumzahl von 140 Bäumen und für die Fichte eine Z-Baumzahl von 250 Bäumen pro ha Baumartenfläche verwendet. Die Z-Baumzahlen für Mischbestände sind entsprechend der Flächenanteile der Baumarten im Bestand angepasst. Darüber hinaus ist eine Entnahme des Füllbestandes gegen Ende der Z-Baumentnahme ins Simulationsmodell eingebunden.

Sowohl die zielstärkenbedingte Entnahme der Z-Bäume als auch die damit einhergehende Verringerung des Füllbestandes führen gegen Ende der Produktionszeit zu einer kontinuierlichen Verkleinerung der überschirmten Fläche der jeweiligen Baumart. Die Kronenschirmfläche entspricht näherungsweise der von der Baumkrone des Einzelbaumes überschirmten Fläche (vgl. Guericke 2001 S. 84). Assmann (1961 S. 105 ff.) verwendet diese als Näherungsgröße für die Bestimmung des Standraumbedarfes des Einzelbaumes. Für die Modellbildung wird dieser Ansatz übernommen und die endnutzungsbedingt ausscheidenden Flächenanteile der jeweiligen Baumart werden durch die Veränderung der baumartenspezifischen Kronenschirmfläche erfasst.²⁹

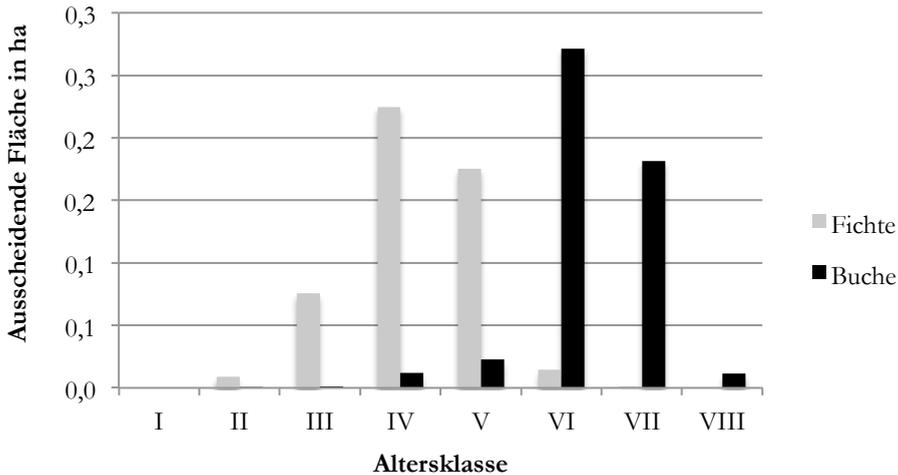


Abbildung 16: Histogramm der endnutzungsbedingt ausscheidenden Flächenanteile Variante M_2

Im Histogramm in Abbildung 16 ist beispielhaft der endnutzungsbedingte Flächenausfall eines 1 ha großen Mischbestandes mit einem Mischungsanteil von

²⁹ Hierfür ist die Kronenschirmfläche der endnutzungsbedingt ausscheidenden Bäume baumartenspezifisch den einzelnen fünfjährigen Perioden zugeordnet. Für die grafische Darstellung sind diese ausscheidenden Flächen in 20-jährige Altersklassen zusammengefasst.

jeweils 50% Buche und Fichte zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung über den Altersklassen dargestellt. Deutlich wird im Histogramm die unterschiedliche Verteilung der ausscheidenden Flächen im Mischbestand als Folge der unterschiedlichen Produktionszeiten, die zu der Zweigipfeligkeit des Histogramms führen.

Basierend auf den Simulationsdaten (vgl. Kapitel 3.4) wird die Dichtefunktion $f(t)$ erstellt. Diese Funktion beschreibt die erntebedingte Nutzung des Bestandes (Abbildung 17). Sie lässt sich durch die Verringerung der Klassenbreite und damit durch eine Erhöhung der Anzahl der Werte erreichen, indem das Histogramm in eine stetige Funktion übergeht. Wird der relative Anteil der durch Nutzung ausscheidenden Fläche von der Gesamtfläche der jeweiligen Baumart als Ordinatenwert verwendet und über dem Alter aufgetragen, so entspricht die Fläche unterhalb der Dichtefunktion 1. Dies bedeutet, dass die gesamte, ursprünglich zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung bestockte Fläche bis zum Ende des Bestandeslebens geerntet wird. Für die jeweilige Baumart lässt sich dieser Zusammenhang in Anlehnung an Wilker (2010 S. 6 ff.) wie folgt darstellen:

Formel 12: Dichtefunktion Endnutzung

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$$

Die Dichtefunktion stellt den nutzungsbedingten Ausfall der Fläche der jeweiligen Baumart als Funktion der Zeit dar. Dabei werden sowohl der Altersbereich mit dem höchsten nutzungsbedingten Flächenausfall als auch der Streubereich der endnutzungsbedingt ausscheidenden Flächenanteile deutlich. Am Beispiel des Mischbestandes (Variante M₂) zeigt sich in Abbildung 17, dass die Buchenanteile im Mittel rund 120 Jahre und die Fichtenanteile rund 80 Jahre alt werden und das Endnutzungsalter beider Baumarten mit einer Standardabweichung von rund 15 Jahren streut.³⁰ Das Histogramm bzw. die Dichtefunktion zeigt, welcher Anteil der Fläche zu einem bestimmten Zeitpunkt endnutzungsbedingt ausfällt.

³⁰ Vergleichbares gilt für die Varianten M₁ und M₃ und für Buche bzw. Fichte für die Varianten M₄ bzw. M₀.

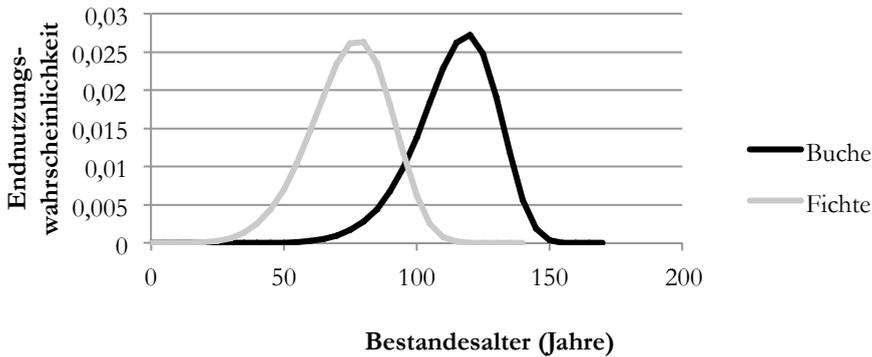


Abbildung 17: Endnutzungswahrscheinlichkeit der Baumarten Buche und Fichte

Mit der Verteilungsfunktion $F(t)$ wird die Summe der Flächenausfälle als Funktion bzw. als das Komplement des noch verbleibenden Bestandes dargestellt. Die Verteilungsfunktion der durch Ernte ausfallenden Fläche der jeweiligen Baumart hat ihren Startpunkt bei $F(t) = 0$ und wächst mit dem Bestandesalter aufgrund der addierten Ausfallhäufigkeiten monoton bis zur abschließenden Ernte der letzten Bäume auf den Wert $F(t) = 1$ an. Es ergibt sich die folgende Verteilungsfunktion als das Integral der Dichtefunktion:

Formel 13: Verteilungsfunktion nutzungsbedingt ausscheidende Fläche

$$F(t) = \int f(t) dt$$

Hieraus folgt die Dichtefunktion $f(t)$ als Ableitung der Verteilungsfunktion:

Formel 14: Dichtefunktion nutzungsbedingt ausscheidende Fläche

$$f(t) = \frac{DF(t)}{dt}$$

Anstelle der Verteilungsfunktion $F(t)$, die die Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit der die aufsummierten Ausfälle zu einem bestimmten Zeitpunkt auftreten, wird der Ausdruck der „nutzungsbedingten Ausfallwahrscheinlichkeit“ verwendet.

Da die Summe der nutzungsbedingt ausgefallenen und der noch vorhandenen Bestandesflächen zu einem Zeitpunkt t immer 100% ergibt, stellt die nutzungsbedingte Überlebenswahrscheinlichkeit das Komplement zur Nutzungswahrscheinlichkeit $F(t)$ dar:

Formel 15: Nutzungsbedingte Überlebenswahrscheinlichkeit

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Die nutzungsbedingte Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ beginnt mit $R(t) = 100\%$, da zum Begründungszeitpunkt des Bestandes zum Zeitpunkt $t = 0$ noch keine Bestandesteile erntebedingt ausgeschieden sind, und endet bei $R(t) = 0$, dem Zeitpunkt $t = t_n$, bei dem alle Bestandesteile durch die Nutzung entnommen wur-

den (Risikoaspekte werden an dieser Stelle ausgeblendet). Die nutzungsbedingte Nutzungswahrscheinlichkeit wird im Folgenden zur Beschreibung der Endnutzung verwendet.

Zur Bestimmung der Nutzungswahrscheinlichkeit für die Endnutzung verwenden Suzuki, Sloboda und Saborowski (1983 S. 18 ff.) eine Erlang-Verteilung und legen mit dieser die Grundlage für die endnutzungsbedingte Entwicklung der Bestandesfläche über der Zeit. Möhring (1986 S. 53 ff.) baut darauf auf und zeigt anhand empirischer Daten die geeignetere Verwendung der Normalverteilung für die Darstellung der nutzungsbedingten Übergangswahrscheinlichkeiten, während Kouba (2002 S. 216 ff.) hierfür die Weibull-Verteilung nutzt. Die durch die Zielstärkennutzung bedingte Veränderung der Kronenschirmfläche der hier verwendeten Simulationsdaten und die daraus abgeleitete Veränderung der Bestandesfläche kann, wie bereits in Abbildung 17 für die Baumarten Buche und Fichte dargestellt, durch eine Weibull-Verteilung zutreffend beschrieben werden. Hier wird in diesem Zusammenhang die S_{100} als Nutzungsstärke bezeichnet.

In Tabelle 6 sind die aus den Endnutzungswahrscheinlichkeiten (vgl. Abbildung 17) resultierenden Parameter der Weibull-Funktionen aufgeführt, die im Folgenden für die Modellierung der Endnutzung der Baumarten Buche und Fichte verwendet werden. Bedingt durch die hohen Endnutzungsanteile des Bestandes vor allem in den höheren Altersklassen führt der damit verbundene Flächenausfall zu hohen Formparametern deutlich größer als 1.

Tabelle 6: Parameter der zweiparametrischen Weibull-Funktion für die planmäßige Endnutzungsverteilung der Buche und Fichte (risikofrei)

	S_{100}	α
Buche	0,83	8,89
Fichte	0,03	5,73

Die Abbildung 18 zeigt die aus den in Tabelle 6 dargestellten Parametern resultierende nutzungsbedingte Überlebenswahrscheinlichkeit für die Baumarten Buche und Fichte.

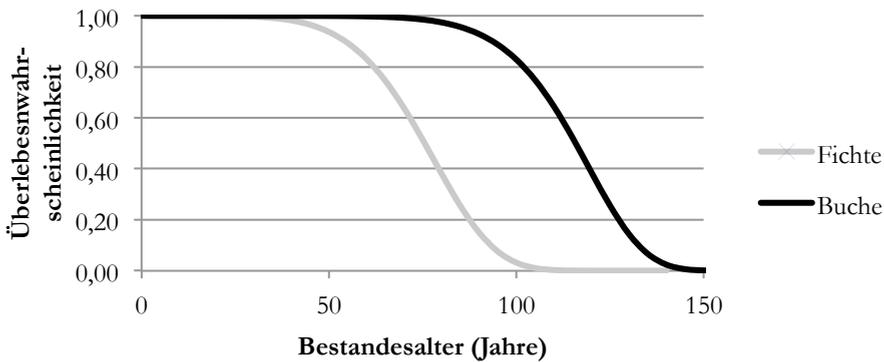


Abbildung 18: Nutzungsbedingte, vom Bestandesalter abhängige Überlebenswahrscheinlichkeit für Buche und Fichte

Je höher die Nutzungsstärke im Alter 100 ausfällt (0,83 für Buche und 0,03 für Fichte), umso höher ist der Anteil der Bestandesfläche, der im Alter 100 nutzungsbedingt bereits ausgeschieden ist. Im Alter 100 sind von dem einst mit einem Hektar begründeten Kulturfläche im Reinbestand von der Buche noch eine Fläche von 0,83 ha vorhanden, während von der Fichte lediglich noch eine Fläche von 0,03 ha bestockt ist. Dieser Zusammenhang ist im Wesentlichen durch den kürzeren Produktionszeitraum der Fichte und das damit deutlich frühere Absinken ihrer Überlebenswahrscheinlichkeit im Vergleich zur Buche bedingt.

4.4 Erweiterung Kronenschirmfläche Buche

Sowohl die Buche als auch die Fichte reagieren im Mischbestand variabel mit der Entwicklung ihrer horizontalen Kronengröße auf die umgebenden Bäume und die hierdurch entstehende intra- und interspezifische Konkurrenz. Die Buche entwickelt sich dabei weitaus plastischer als die Fichte (vgl. Dieler 2011 S. 57 ff.). Ihre Kronenexpansion hängt dabei wesentlich von der benachbarten Baumart ab. Im Buchenreinbestand bildet die Buche aufgrund der höheren innerartlichen Konkurrenz eine eher schmale Krone aus, während in der Nachbarschaft zu Fichten die Kronenexpansion deutlich zunimmt (vgl. Pretzsch 2014 S. 147 f.). Dies führt im Vergleich zum Reinbestand zu einer Zunahme der Kronenschirmfläche der Buche im Mischbestand, während die anteilige Kronenschirmfläche der Fichte im Vergleich zum Fichtenreinbestand geringer ausfällt (vgl. Dieler 2011 S. 57 ff.).

Durch die zahlreichen Mehrfachüberschirmungen im Kronenraum des Mischbestandes ist dieser im Vergleich zum Reinbestand dichter und Lücken, die durch Durchforstungen oder Kalamitäten entstanden sind, können schneller geschlossen werden (vgl. Pretzsch 2014 S. 147 f.). Insbesondere im Buchen-Fichten-Mischbestand können die Buchen in der Nachbarschaft zur Fichte die durch die frühzeitige Entnahme der Fichte entstehenden Lücken im Kronendach schnell wieder schließen (vgl. Biber 1996 S. 58). Meyer und Ackermann (2004 S. 10 ff.)

beschreiben in ihren Untersuchungen diesen schnellen Lückenschluss des Kronendaches durch die Buche als Folge ihrer hohen Reaktionsfähigkeit. Selbst größere Störungen des Kronenschlusses wurden nach ihren Untersuchungen vergleichsweise schnell geschlossen. Selbst im hohen Alter ist die Buche hinsichtlich ihrer Kronenexpansion bei entstehenden Lücken nicht gebremst. In Abhängigkeit ihrer individuellen Wuchskonstellation mit den Nachbarbäumen ist die Buche somit in der Lage, ihre Kronenperipherie über lange Zeiträume hinweg zu vergrößern (vgl. Guericke 2001 S. 84). Während Meyer und Ackermann (2004 S. 12) eine jährliche Kronenausdehnung von bis zu ca. 30 cm pro Jahr in ihren Untersuchungen feststellen konnten, wurden von Guericke (2001 S. 84) Kronenbreitenveränderungen von ca. 40 cm pro Jahr und mehr gemessen.

Das Defizit im Wissen zur Wuchsdynamik von Mischbeständen und der Mangel an langfristigen Beobachtungen zeigt sich zwangsläufig auch in der Modellierung der Kronendynamik (vgl. Biber 1996 S. 19). Untersuchungen zu dieser baumartenspezifischen, von intra- und interspezifischer Konkurrenz und damit von der Mischungsform abhängigen Dynamik der Kronen in Mischbeständen liegen bisher nur in einem relativ geringen Umfang vor (vgl. Guericke 2001 S. 84), obgleich insbesondere bei der Zeitmischung mit Nadelbaumarten der Kronenausdehnung und der Schließung von Bestandeslücken durch den verbleibenden Buchenbestand eine wichtige Rolle zukommt. Im Folgenden wird aus diesem Grund ein Modellansatz gewählt, der das Modell der Entwicklung der Bestandesfläche eines Mischbestandes durch Kronenausdehnung und Standraumerweiterung der Buche nach dem Ausscheiden von Fichten erweitert.

Hier wird dem Ansatz von Assmann (1961 S. 105 ff.) gefolgt und die Kronenschirmfläche stellvertretend für den benötigten Standraum der Baumart im Bestand verwendet und hieraus die Fläche der einzelnen Baumarten im Mischbestand abgeleitet. Dementsprechend geht mit der Vergrößerung der Kronenschirmfläche der Buche auch eine automatische Vergrößerung der Anteilsfläche der Buche einher. Für die Entwicklung der Fläche der Fichte von einer Periode in die Folgeperiode bestehen dabei modellbedingt drei Entwicklungsmöglichkeiten: Entweder bleibt die Fichtenanteilsfläche weiter bestehen und geht somit in die nächste Periode in Form des verbleibenden Fichtenbestandes über oder Flächenanteile scheiden risiko- oder nutzungsbedingt aus und stehen hierdurch für die Verjüngung des nachfolgenden Bestandes zur Verfügung oder sie gehen in die Buchenfläche durch die Ausdehnung der Kronenschirmfläche über.

Die durch die Erweiterung der Kronenschirmflächen bedingte Flächenveränderung kann analog wie die bereits vorgestellte risiko- und endnutzungsbedingte Flächenentwicklung durch die Verwendung einer Markovschen Kette dargestellt werden. Die hierfür benötigten Übergangswahrscheinlichkeiten basieren auf den mit BWINPro simulierten Bestandesdaten (vgl. Kapitel 3.4) Grundlage ist dabei die von Nagel und Spellmann (2008 S. 243) beschriebene Beziehung zwischen BHD und Kronenbreite, in der mit zunehmendem Durchmesser des Einzelbaums dessen Kronenbreite und demzufolge auch dessen Kronenschirmfläche proportional zunehmen. Dieser Zusammenhang ist vergleichbar mit dem von Guericke

(vgl. 2001 S. 87) entwickelten Modell zur Kronenausdehnung der Buche, das auf der Beziehung zwischen dem BHD und dem Kronendurchmesser aufbaut. Dementsprechend wird in Abhängigkeit vom Bestandesalter und der davon abhängigen Durchmesserentwicklung des Einzelbaumes die Entwicklung der Kronenschirmfläche nach dem Ausscheiden der Fichte wie folgt für die einzelnen Mischbestandsvarianten aus den Simulationsergebnissen abgeleitet:³¹

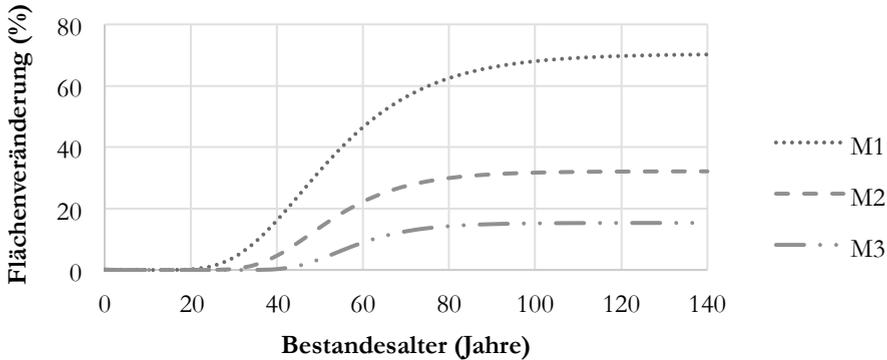


Abbildung 19: Durch Kronenschluss der Buche bedingte prozentuale Veränderung der ursprünglichen Buchenfläche für die Mischbestandsvarianten M_1 , M_2 und M_3

Abbildung 19 zeigt die prozentuale Veränderung der Buchenfläche im Modell, die durch die Ausdehnung der Kronenschirmfläche bedingt ist. Ausgangspunkt ist dabei jeweils die im Jahr 0 begründete Buchenfläche. Ab einem Bestandesalter von 30 Jahren nimmt die Buchenfläche zu, wie hier am Beispiel der Mischbestandsvariante M_2 beschrieben. Dies ist bedingt durch den frei werdenden Kronenraum der ausscheidenden Fichte im Rahmen von Durchforstungen, Kalamitätsnutzungen und im weiteren Verlauf durch die Endnutzung, der von der Buche in Teilen übernommen wird. Dabei verläuft die Ausdehnung der Buchenfläche aufgrund des natürlichen Wachstumsprozesses der Buchenkronen langsamer als die Geschwindigkeit, mit der die Fichtenfläche durch die Nutzung zur Verfügung steht. Die hierdurch entstehende Flächendifferenz geht im Modell in die Begründung des Nachfolgebestandes ein.³² Die Ausdehnung der Kronenschirmfläche der

³¹ Für die Modellierung der Entwicklung der Kronenschirmfläche ist die vom Bestandesalter abhängige Kronenschirmfläche der Mischbestandsvarianten der Entwicklung der Kronenschirmfläche des Reinbestandes gegenübergestellt. Darauf aufbauend und aus dem Anteil der Kronenschirmfläche der Baumarten vor dem Ausscheiden der Fichte als Zeitmischungsart und aus der Veränderung der Kronenschirmfläche nach dem Ausscheiden der Fichte wird die vom Mischungsanteil und vom Bestandesalter abhängige Flächenveränderung der Buche bestimmt. Die daraus resultierende altersabhängige Zunahme der Buchenfläche ist in der Abbildung durch Chapman-Richards-Funktionen dargestellt, die als Wachstumsfunktionen die Ausdehnung der Kronenschirmfläche und die daraus resultierende Entwicklung der Buchenfläche zutreffend für die zugrunde liegende Datengrundlage beschreiben.

³² Der Anteil der für die Kronenausdehnung zur Verfügung stehenden Fläche ist aus der Entwicklung der Kronenschirmfläche der Simulationsergebnisse entnommen.

Buche nimmt dabei weiter bis zum Einsetzen der Endnutzung der Buche zu, wobei die Geschwindigkeit mit dem Ausscheiden der letzten Fichten zurückgeht, da keine weiteren neuen Lücken hinzukommen. Mit der beginnenden Endnutzung und der hieraus nutzungsbedingten Verringerung der Buchenfläche sinkt die Anzahl der verbleibenden Einzelbäume und entsprechend die Möglichkeit der Erweiterung der Kronenschirmfläche. Der damit einhergehende nutzungsbedingte Rückgang der Buchenfläche ist an dieser Stelle der Modellentwicklung in Abbildung 19 ausgeblendet.

Durch die Abhängigkeit der Entwicklung der Kronenschirmfläche vom Mischungsanteil der Buche verschiebt sich, bedingt durch die gruppenweise Mischungsform, der anteilige Bereich der Kontaktzonen zwischen den Baumarten mit dem Mischungsanteil. Bei einem geringen Mischungsanteil der Buche ist der Flächenanteil, der in diesen Bereich der Interaktion zwischen den Baumarten aufgrund der geringeren Anzahl an Gruppen fällt, größer. Entsprechend stärker kann die Buche auf Lücken im Kronenraum durch Ausdehnung der Kronenschirmfläche reagieren.

Diese zeigt sich auch in den in Abbildung 19 dargestellten, vom Mischungsanteil abhängigen prozentualen Flächenentwicklungen. Mit einem steigenden Buchenanteil der jeweiligen Mischungsvariante sinkt der Flächenanteil in den Kontaktzonen mit den Mischbaumarten und damit der Anteil der Bäume, die mit einer Ausdehnung der Kronenschirmfläche auf Bestandeslücken reagieren können. Dementsprechend weisen die Varianten mit einem geringeren Mischungsanteil eine anteilig höhere Kronenausdehnung auf.

4.5 Kombination der Flächenübergangswahrscheinlichkeiten

Die altersabhängige Flächenentwicklung der einzelnen Baumart setzt sich aus der Kombination der zuvor beschriebenen risiko-, endnutzungs- und bei der Buche auch der kronenveränderungsbedingten Flächenübergangswahrscheinlichkeit zusammen. Die daraus resultierende Gesamtübergangswahrscheinlichkeit des Bestandes zu einem bestimmten Zeitpunkt errechnet sich aus der Multiplikation der risikobedingten Überlebenswahrscheinlichkeit mit der Endnutzungswahrscheinlichkeit und bei der Baumart Buche noch zusätzlich mit der Wahrscheinlichkeit der Kronenausdehnung. Diese Vorgehensweise baut auf dem von Sachs und Hedderich (2006 S. 117) beschriebenen Multiplikationsansatz auf, mit dem die Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Eintretens von mehreren Ereignissen berechnet wird, also die gemeinsame Wahrscheinlichkeit, dass ein Bestandesteil zu einem bestimmten Zeitpunkt alle sturmbedingten Kalamitäten überlebt und noch nicht endnutzungsbedingt ausgeschieden ist. Durch die Verknüpfung der Überlebenswahrscheinlichkeiten in der Form einer „und-Verknüpfung“ wird die Prämisse unterstellt, dass die Ereignisse voneinander unabhängig sind, obwohl dies in der forstlichen Realität nicht immer zutrifft (vgl. Dieter 1997 S. 43).

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft für die Mischbestandsbetriebsklasse M_2 die Kombination der Flächenübergangswahrscheinlichkeiten und die daraus resultierenden Auswirkungen für die risiko- und nutzungsbedingt ausscheidenden Flächen der beiden Baumarten Buche und Fichte in der jeweiligen Altersklasse.

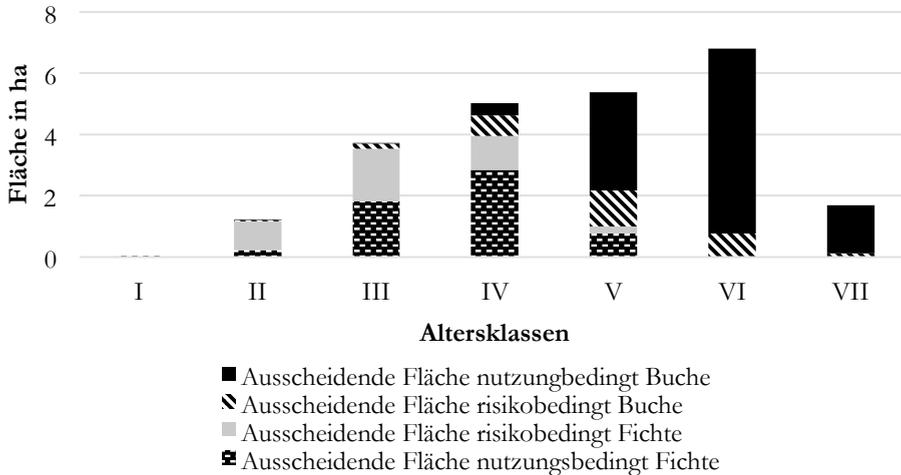


Abbildung 20: Kalamitäts- und endnutzungsbedingt ausscheidende Flächen in den einzelnen Altersklassen der Betriebsklasse Variante M_2 (stationärer Zustand)

Die Abbildung 20 zeigt, dass bereits in der II. Altersklasse risikobedingt erste Flächenanteile der Fichte ausfallen. In der III. Altersklasse nimmt die risikobedingt ausscheidende Fläche der Fichte absolut gesehen zu. Der prozentuale Anteil an der gesamten ausscheidenden Fläche der Fichte in den höheren Altersklassen geht jedoch aufgrund der vom Bestandesalter abhängigen Nutzung mit zunehmendem Bestandesalter zurück. Die Abbildung zeigt auch die deutlich geringere Risikostärke der Buche, die erst in den höheren Altersklassen III-VII zu risikobedingt ausfallenden Flächenanteilen führt. Im Vergleich zur Fichte hat sie deutlich geringere risikobedingt ausfallende Flächengrößen.

Diese risiko- und nutzungsbedingt ausscheidenden Flächenanteile der Fichte gehen, wie in der folgenden Abbildung 21 beispielhaft für die Mischbestandsbetriebsklasse M_2 dargestellt, entweder in den Buchenbestand durch die Kronenausdehnung der Buche oder durch die erneute Verjüngung in einen Nachfolgebestand über. Die Abbildung zeigt, dass insbesondere in den jungen Altersklassen der Fichte der Anteil der ausscheidenden Fläche überwiegt, der in die Buche übergeht. Mit zunehmendem Bestandesalter sinkt der Anteil, während der Flächenanteil zunimmt, der in die Verjüngung übergeht. Die ausscheidende Buchenfläche steht stets komplett für eine erneute Verjüngung von Nachfolgebeständen zur Verfügung.

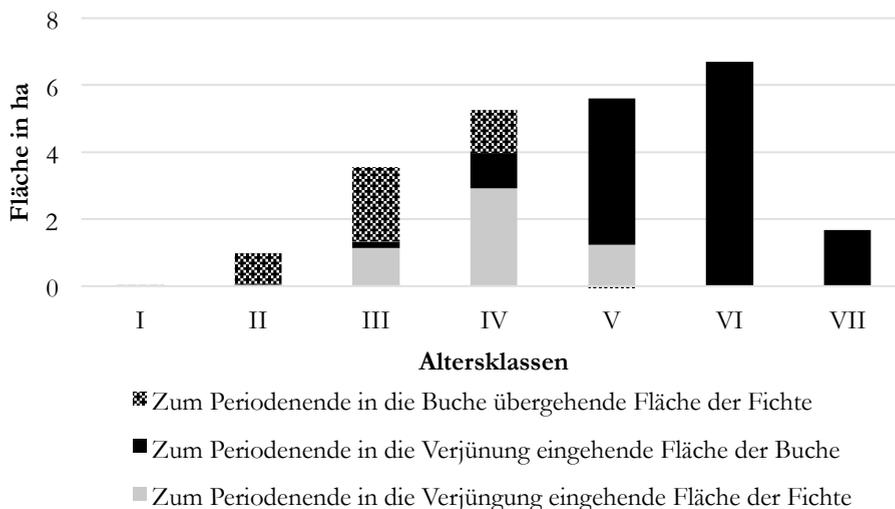


Abbildung 21: Zur Buche und in die Verjüngung übergehende Fläche der Fichte sowie die erneut in die Verjüngung eingehende Fläche der Buche nach Altersklassen für die Betriebsklasse der Variante M_2 (stationärer Zustand)

4.6 Nutzung und Flächenveränderungen im Modell

Die risikobedingten Flächenveränderungen und die daraus resultierenden Nutzungsmengen, die Ausdehnung der Kronenschirmfläche bei der Buche, die regulären Durchforstungen beider Baumarten und die abschließende Endnutzung setzen im Modell eine zeitliche Abfolge dieser Prozesse voraus. Die Nutzungen erfolgen dabei immer in festen fünfjährigen Intervallen zum Ende der jeweiligen Periode kurz vor dem Übergang in die Folgeperiode.

Zum Periodenende wird zuerst mit der regulären Durchforstung – basierend auf den Simulationsdaten des waldbaulichen Modells – begonnen. Anschließend erfolgt die risikobedingte Reduktion der Bestandesfläche für die Baumarten Buche und Fichte und die Zuordnung der aus dem Vorratsabbau stammenden Kalamitätsnutzungsmengen. Dieses Volumen ergibt sich aus dem Vorrat des verbleibenden Bestandes der jeweiligen Baumart zum aktuellen Zeitpunkt und dem des ausscheidenden Flächenanteils an der Gesamtfläche der Baumart. In höheren Bestandesaltern erfolgt die endnutzungsbedingte Reduktion der Bestandesfläche. Mit der Reduktion der Fläche geht gleichzeitig ein weiterer anteiliger Abbau des Vorrates des verbleibenden Bestandes einher.

Den Abschluss bildet die Berücksichtigung der Erweiterung der Buchenfläche durch die Kronenausdehnung. Diese Flächenveränderung stellt die Grundlage für die Entwicklung der Bezugsfläche der Folgeperiode dar, hat aber keine direkten Auswirkungen auf die Ergebnisse der aktuellen Periode.

Mit dieser Abfolge werden für die verschiedenen Nutzungsarten zum Ende jeder der fünfjährigen Perioden die Nutzungsvolumina in Vorratsfestmetern ermittelt und in Erntefestmeter umgerechnet. Die Zuordnung der ökonomischen Größen erfolgt dabei für jede Nutzungsart getrennt. Die Durchforstungs- und Endnutzungsvolumina werden mit der Erlösfunktion, die kalamitätsbedingt ausscheidenden Volumina mit reduzierten Kalamitätserlösen bewertet. Von diesen Holzerlösen werden abschließend die Erntekosten abgezogen und daraus die erntekostenfreien Holzerlöse ermittelt. Mit diesem Vorgehen lässt sich die Betriebsklasse des Mischbestandes mit ihren Zuwächsen, Vorräten und Nutzungen sowie den korrespondierenden ökonomischen Größen konsistent beschreiben (vgl. Möhring 1986 S. 106).

5 Nachhaltige forstliche Betriebsmodelle

Der „neutrale“ Begriff der Nachhaltigkeit (vgl. Richter 1963 S. 39) erlangt seine eigentliche Aussagekraft durch den Kontext, in den er gestellt wird. Für die forstbetriebliche Planung ist dabei zu spezifizieren, für welche Zustände bzw. Leistungen (zum Beispiel Fläche, Nutzungsmasse, Holzvorrat) die im Nachhaltigkeitsbegriff formulierte Kontinuität gefordert wird.

Der Grundgedanke der forstlichen Nachhaltigkeit ist aus der Holznot heraus geboren worden und sollte die Holzversorgung der Gesellschaft sicherstellen (vgl. Spellmann 2010 S. 100). Seit der Entwicklung dieses Nachhaltigkeitsgedankens von von Carlowitz (1713 S. 195 f.) wurden verschiedene Aspekte der Nachhaltigkeit aufgrund der sich verändernden gesellschaftlichen Anforderungen für die forstbetriebliche Planung weiterentwickelt. Dabei können vier wesentliche Formen der forstbetrieblichen Nachhaltigkeit unterschieden werden (vgl. Speidel 1967 S. 169):

- Nachhaltigkeit der Holzerträge
- Nachhaltigkeit der Holzerzeugung
- Nachhaltigkeit der Gelderträge
- Nachhaltigkeit der immateriellen Leistungen des Waldes

Die Nachhaltigkeit der Holzerträge stand im Mittelpunkt der klassischen Formulierung von Hartig (1795 S. 1 ff.) mit dem Ziel der Sicherung bestimmter Nutzungsmengen. Dies sollte durch eine standortgerechte Baumartenwahl, eine zuwachsfördernde Bestandesbehandlung und eine möglichst vollkommene räumliche Ordnung durch die alters- und stärkeklassenweise Gliederung eines optimalen

Vorrates erreicht werden. Die zukünftige Holznachfrage soll dabei ebenso befriedigt werden wie die gegenwärtige (vgl. Speidel 1967 S. 169).

Mit der nachhaltigen Holzerzeugung wird eine dauernde Bestockung der Fläche des Forstbetriebes mit einer stetigen Holzproduktion angestrebt. Dies soll durch die Wiederbestockung mit der leistungsstärksten Baumart erreicht werden. Dabei wird auf andauernde und gleichmäßig hohe Erträge verzichtet (vgl. Speidel 1967 S. 169). Vielmehr ist das Ziel, jeden Bestand zum Zeitpunkt der Kulmination des Bodenreinertrages, dem Zeitpunkt der ökonomisch optimalen Umtriebszeit, zu ernten (vgl. Enders 1923 S. 68).

Die Nachhaltigkeit der Gelderträge strebt einen gleichmäßig hohen Geldertrag bzw. Reinertrag an (vgl. Ostwald 1931 S. 132 ff.). Durch die jährlich schwankenden Holzeinschläge und die daraus resultierenden unregelmäßigen Holzerlöse sind die Gelderträge der einzelnen Jahre jedoch nicht einheitlich. Speidel (1972 S. 56) schlägt daher zum Ausgleich dieser Schwankungen die Bildung von finanziellen Reserven vor. Diese Reserven werden während außerplanmäßiger Nutzungen mit den daraus resultierenden Erträgen gefüllt, die bei verringerten Nutzungen entnommen werden können. Dabei wird eine grundsätzliche Austauschmöglichkeit des im stehenden Holzvorrat gebundenen Sachvermögens mit dem Geldvermögen der Reserve angenommen. Der Nachhaltigkeitsgedanke betont hierdurch die betriebliche Liquiditätsforderung des Forstbetriebes, während gleichmäßige Holzerträge und die Produktionssicherheit als nachrangig erachtet werden.

Speidel (1972 S. 54) entwickelt aufbauend auf den beschriebenen Aspekten den Nachhaltigkeitsbegriff weiter und definiert diesen für Forstbetriebe als die Fähigkeit, dauernd und optimal Holznutzungen oder Infrastrukturleistungen bzw. sonstige Güter zum Nutzen der gegenwärtigen und künftigen Generationen her vorzubringen. Dabei versteht Speidel (1972 S. 54) unter dem Ausdruck „dauernd“ die stetige, fortlaufende, regelmäßige, kontinuierliche Aufrechterhaltung einer Leistung (zum Beispiel Schutzzweck, Erholungsleistung) bzw. eines Zustandes. Hierdurch wird deutlich, dass diese Leistungen auch in der Zukunft auf Dauer ohne eine zeitliche Begrenzung aufrechterhalten werden und zu jedem beliebigen Zeitpunkt bestehen sollen. Im Zusammenhang mit der Holzproduktion verbindet Speidel (1972 S. 54) den Begriff „dauernd“ jedoch nicht zwingend mit der Nutzung gleicher, jährlich konstanter Holzmengen. Vielmehr stellt er die kontinuierliche und marktgerechte und damit auch die an die betrieblichen Gegebenheiten angepasste und durchaus in der jährlichen Menge schwankende Holzbereitstellung in den Mittelpunkt des Nachhaltigkeitsgedankens. Der Begriff „dauernd“ wird somit nicht mit konstanten Mengen (zum Beispiel Holzvolumina) gleichgesetzt. Damit rückt die langfristige betriebliche Stabilität in den Mittelpunkt des Nachhaltigkeitsgedankens. Dieser Zusammenhang kann also auch auf die Bereitstellung weiterer forstbetrieblicher Leistungen (wie zum Beispiel Schutz und Infrastruktur oder Erholungsleistungen) übertragen werden.

Der zweite Aspekt neben der „Dauer“ in der Nachhaltigkeitsdefinition Speidels (1972 S. 55) stellt die Optimalität dar. Dieser Optimalitätsgedanke bindet die betrieblichen Zielsetzungen in den Nachhaltigkeitsgedanken ein. Die Erreichung

der Zielsetzungen kann dabei in Form der bereitgestellten Menge bzw. in der Art oder Qualität der erbrachten Leistung im Vergleich zu den gesetzten betrieblichen Zielen beurteilt werden. Die beiden Nachhaltigkeitsaspekte Speidels finden sich in den Teilkriterien der betrieblichen finanzwirtschaftlichen Ziele wieder: der Liquidität und dem Erfolg.

Für die Umsetzung dieses Nachhaltigkeitsprinzips im Forstbetrieb ist zunächst eine Bestimmung der Zustände, Wirkungen und Leistungen notwendig, für die das Prinzip der Nachhaltigkeit bzw. Optimalität gelten soll. Zur Erreichung der damit einhergehenden Setzung von Zielen und zur Sicherung des nachhaltigen Erfolges des Betriebes ist eine Strategie zu entwickeln, die auf den waldbaulichen Grundsätzen, der Integration der Waldfunktionen, der Risikoverteilung sowie der Produktivitätssteigerung und den Rationalisierungen aufbaut (vgl. Spellmann 2010 S. 101). Die Wahl der Baumart bzw. Baumartenmischung stellt dabei eine der wichtigsten und langfristigen Entscheidungen im Forstbetrieb dar, denn durch sie werden die Länge des Produktionszeitraumes sowie die mit dem Produktionsprozess verbundenen Kosten und Erlöse und das naturale Risiko bestimmt. In Anbetracht der Risikoabgrenzung wird meist eine standortgerechte Baumartenwahl vorausgesetzt, wobei eine Baumart als standortgerecht angesehen werden kann, wenn ihre Anforderungen an Strahlung, Wärme, Wasser- und Nährstoffversorgung durch den Boden und das Klima erfüllt sind (vgl. Lüpke 1995). Von Grenzstandorten abgesehen bieten sich meist mehrere alternative Baumarten zum Anbau auf demselben Standort an.

Den eigentlichen Ausschlag für die Baumartenwahl gibt meist die Eigentümerzielsetzung. Doch die mit dem forstlichen Produktionsprozess verbundenen langfristigen Folgen dieser Entscheidung können bei der fehlenden Beachtung des Nachhaltigkeitsprinzips zu langfristigen und auch irreparablen ökonomischen Schäden für den Forstbetrieb führen (vgl. Speidel 1967 S. 172).

Eigentümer insbesondere privater Forstbetriebe sind aufgrund ihrer finanziellen Verpflichtungen, wie zum Beispiel durch Grundsteuern, Versicherungen oder persönliche Unterhaltungspflichten meist auf ein regelmäßiges Einkommen und eine gesicherte nachhaltige Liquidität ohne allzu große Schwankungen angewiesen (vgl. Speidel 1972 S. 59 und Guttenberg 2010 S. 324). Den Zahlungsverpflichtungen stets und damit auch nachhaltig nachkommen zu können, ist neben weiteren finanzwirtschaftlichen Zielsetzungen wie Erfolg die Grundlage für eine auf Dauer ausgerichtete Forstwirtschaft. Die Prüfung der Auswirkungen auf die finanzwirtschaftlichen Ziele stellt somit einen wesentlichen Bestandteil bei der Beurteilung von nachhaltigen Bewirtschaftungskonzepten und ökonomischen forstbetrieblichen Modellen dar.

Die forstliche Wirtschaft wird aufgrund ihrer Vielfältigkeit in verschiedenen Formen und Ausprägungen betrieben, die sich durch ihre Zielsetzungen, die Bewirtschaftungsintensität und die verwendete Technik unterscheiden. Für Mitteleuropa können daraus zwei theoretische Prinzipien für forstliche Betriebsmodelle abgeleitet werden: der aussetzende Betrieb und die nachhaltige Betriebsklasse (vgl. Speidel 1967 S. 30 ff.).

5.1 Aussetzender Betrieb

Mit dem Modell des aussetzenden Betriebes können Forstbetriebe mit einer kleinen, (meist) ungleichaltrigen Flächenausstattung beschrieben werden. Diese Flächenausstattung bedingt, dass auf jahre- oder jahrzehntelange Phasen ohne planmäßige Nutzung Zeiträume mit einer intensiven Nutzung durch Durchforstungen oder das Erreichen der Umtriebszeit bzw. der Zielstärke folgen. In diese intensive Phase des Bestandesendes fällt auch die anschließende Neubegründung des Folgebestandes.

Das Modell des aussetzenden Betriebes weist durch die Beschreibung der Bestandesentwicklung von der Kulturbegründung, meist auf einem holzleeren Boden, bis zur Endnutzung und den Phasen ohne planmäßige betriebliche Tätigkeiten enge Gemeinsamkeiten mit Plantagenbetrieben auf (vgl. Speidel 1967 S. 30 f. und Möhring 1986 S. 15). Dieses vereinfachte Modell wird meist für die Beschreibung der zeitlichen Entwicklung von Einzelbeständen verwendet und ist insbesondere für Aufforstungen von Relevanz (vgl. Möhring 1986 S. 15). Der Beschreibung nachhaltiger Betriebszustände von mitteleuropäischen Forstbetrieben wird dieser Modellansatz jedoch nicht gerecht.

5.2 Nachhaltige Betriebsklasse und Normalwaldmodell

Ausgehend von der Bewirtschaftung des einzelnen Bestandes wurde zur Entwicklung von Managementstrategien für ganze Forstbetriebe die Idee des Normalwaldes entwickelt (vgl. Reed 1986 S. 64 f.). Die ersten Ansätze zur Beschreibung einer nachhaltig dauerhaften forstlichen Bewirtschaftung gehen auf Hundeshagen (1826 S. 97 f.) zurück und wurden von Heyer (1841 S. 10 ff.) weiter ausgebaut. Heyer beschreibt mit diesem Modell einen Forstbetrieb, dessen Bestände in ihrer Gesamtheit in ihrem so genannten „Normalzustand“, einem strengen Nachhaltsbetrieb, dauerhaft jährlich gleich hohe Nutzungsmengen liefern. Gedanken zur nachhaltigen Produktion von Forstbetrieben sind unweigerlich mit diesem Normalwaldgedanken verbunden (vgl. Suzuki et al. 1983 S. 7). Suzuki, Sloboda und Saborowski (1983 S. 7 f.) verwenden dieses forstliche Nachhaltigkeitsprinzip und den Normalwaldgedanken nahezu als Synonyme.

Um diesen theoretischen „Normalzustand“ zu erfüllen, müssen folgende Modellbedingungen erfüllt sein (in Anlehnung an Speidel 1972 S. 109 f.):

- Der Betrieb besteht aus einer Baumart oder einer homogenen Baumartenmischung auf seiner gesamten Betriebsfläche.
- Alle Altersstufen vom Alter 1 bis zum Alter u , der Umtriebszeit, sind mit der gleichen Fläche vertreten.
- Blößen sind nicht enthalten.
- Voraussetzung für gleiche Ertragsklassen und Zuwachsprozente sind einheitliche Standortverhältnisse auf der Gesamtfläche.

- Der Bestockungsgrad der Bestände ist in allen Altersstufen „normal“ (Bestockungsgrad 1,0) oder mindestens gleich. Darüber hinaus ist die Holzqualität in allen Beständen gleich.
- Die räumliche Ordnung der Bestände ist vollständig. D. h., die Bestandeshöhen sind gegen die Hauptgefahrenrichtung so abgestuft, dass jeder Bestand im Alter der Umtriebszeit ohne Gefahr für die Nachbarbestände geerntet werden kann.

Mit diesen Bedingungen erfüllt der Aufbau des Normalwaldmodells auch die Kriterien der von Speidel (1972 S. 98 ff.) beschriebenen „normalen“ Betriebsklasse. Diese Betriebsklasse besteht aus einer rechnerischen Zusammenfassung von Beständen des Forstbetriebes zu einer Einheit, in der die nachhaltige Bewirtschaftung angestrebt und ein gemeinsamer Hiebssatz ermittelt und kontrolliert wird. Die „Normalität“ kommt dadurch zum Tragen, dass in diesem Modellansatz sowohl der jährliche Zuwachs als auch die Vorratsmenge, der jährliche Nutzungssatz, die Erträge und die korrespondierenden Aufwendungen in konstanter Höhe anfallen und somit ein stationärer Zustand eines dynamischen Systems vorliegt.

Im Mittelpunkt des Normalwaldmodells steht ein Erklärungsmodell, das die komplexen betrieblichen Zusammenhänge zwischen Zuwachs, Vorrat des auscheidenden und des verbleibenden Bestandes und die korrespondierenden ökonomischen Größen veranschaulicht (vgl. Speidel 1972 S. 108 f.). Dieses klassische Normalwaldmodell stellt trotz der damit verbundenen engen Restriktionen häufig die Grundlage für die Bestimmung der ökonomischen Leistungsfähigkeit verschiedener Baumarten und betrieblicher Strategien dar. Durch die Verwendung dieser Modellgrundlage lassen sich darüber hinaus optimale Betriebszustände ermitteln (vgl. Möhring 1986 S. 107). Als Basis für die Entwicklung des Modells dient in einem ersten Schritt die nachhaltige Flächenentwicklung basierend auf dem Normalwaldmodell.

Die normale Flächenausstattung der einzelnen Altersklassen ist eine Grundlage des Normalwaldmodells. Durch die Verteilung der Flächen wird die Nachhaltigkeit der Produktion sichergestellt. Die Fläche der einzelnen Periode ergibt sich dabei aus der Gesamtfläche der Betriebsklasse und der Produktionsdauer für die einzelne Baumart. Die Fläche der einzelnen Periode lässt sich mit der folgenden Gleichung berechnen (vgl. Speidel 1972 S. 101):

Formel 16: Flächengröße der Altersklasse

$$f_A = \frac{F}{U} * l$$

f_A =	Flächengröße der Altersklasse
F =	Gesamtfläche der Betriebsklasse
U =	Umtriebszeit
l =	Faktor für die Berücksichtigung der Periodenlänge, hier 20 Jahre je Altersklasse

Für eine beispielhafte Betriebsklasse mit 100 ha und einer Baumart bei einer Umtriebszeit von 100 Jahren ergibt sich eine Flächengröße für die einzelnen 20 Jahre

umfassende Altersklassen von jeweils 20 ha. Das Flächendurchschnittsalter in dieser Betriebsklasse beträgt 50 Jahre, da alle Altersstufen bis zum Ende der Produktionszeit von 100 Jahren gleich besetzt sind.

Für dieses Beispiel und die Flächenentwicklung von einer in die darauf folgende Altersklasse ergibt sich die folgende Tabelle der Übergangswahrscheinlichkeiten für die 20-jährigen Perioden:

Tabelle 7: Übergangswahrscheinlichkeiten der Altersklassen im Normalwaldmodell

Altersklasse	I	II	III	IV	V
Übergangswahrscheinlichkeit	1	1	1	1	0

Werden diese Übergangswahrscheinlichkeiten in die Flächenübergangsmatrix für 20-jährige Altersklassen eingesetzt, so ergibt sich die folgende Matrix für eine 100-jährige Produktionsdauer:

Formel 17: Flächenübergangsmatrix Normalwaldmodell

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Deutlich wird in dieser Flächenübergangsmatrix die im klassischen Normalwald unterstellte Gleichverteilung der Flächen in allen Altersklassen und der Verzicht auf die Einbeziehung von Risiken. Die Fläche jeder Altersklasse geht vollständig in die nächst höhere Altersklasse mit einer Übergangswahrscheinlichkeit von 100% über, in der Matrix dargestellt mit 1, bis der Bestand in der letzten Altersklasse vollständig genutzt wird. Entsprechend steigt die Nutzungswahrscheinlichkeit von 0 in den vorhergehenden Altersklassen auf 1, d. h. 100% an.

Durch die Nutzung fällt die Fläche komplett in die I. Altersklasse zurück und geht somit wieder in die Verjüngung ein. Diese Variante zeigt damit das mit dem Normalwaldmodell verbundene Maximalprinzip der risikolosen Flächenübergänge (vgl. Möhring 1986 S. 52 f.). Wird diese reine Betriebsklasse mit nur einer Baumart des Normalwaldmodells durch Reinbestände einer weiteren Baumart erweitert, sodass Mischungseffekte ausgeschlossen sind, ergibt sich beispielsweise für eine 140-jährige Umtriebszeit der Buche und 100-jährige Umtriebszeit der Fichte bei einem Mischungsanteil von 50% bei der Bestandesbegründung (entspricht einem durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte an der gesamten Betriebsklasse von 42%) die folgende Flächenübergangsgraphik:

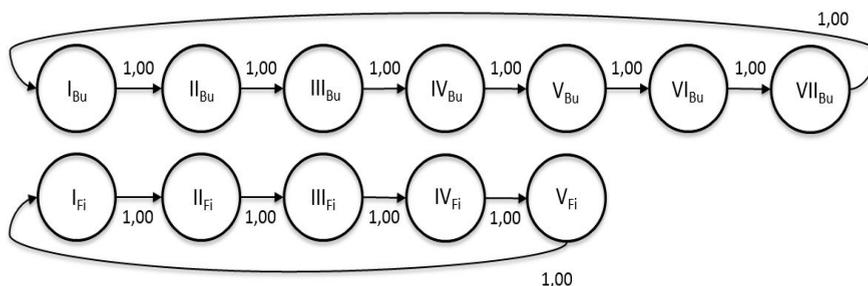


Abbildung 22: Übergangsgraph Buchen- und Fichtenreinbestände im erweiterten Normalwaldmodell

Der in Abbildung 22 dargestellte Übergangsgraph veranschaulicht den Zusammenhang des vollständigen Flächenübergangs von einer Altersklasse in die darauf folgende bis zur abschließenden Ernte der Fichte in der V. und der Buche in der VII. Altersklasse sowie die reinbestandsbedingte fehlende Flächenverschiebung und Interaktion zwischen den Baumarten.

Basierend auf den Übergangswahrscheinlichkeiten und einem gleich hohen Anteil der Baumarten bei der Begründung der Bestände (jeweils 50%) ergibt sich für dieses erweiterte Normalwaldmodell die folgende Flächenausstattung einer 100 ha großen Buchen-Fichten-Betriebsklasse mit Reinbeständen bei einer Umtriebszeit von 140 Jahren für die Buche bzw. 100 Jahren für die Fichte mit 20-jährigen Altersklassen:

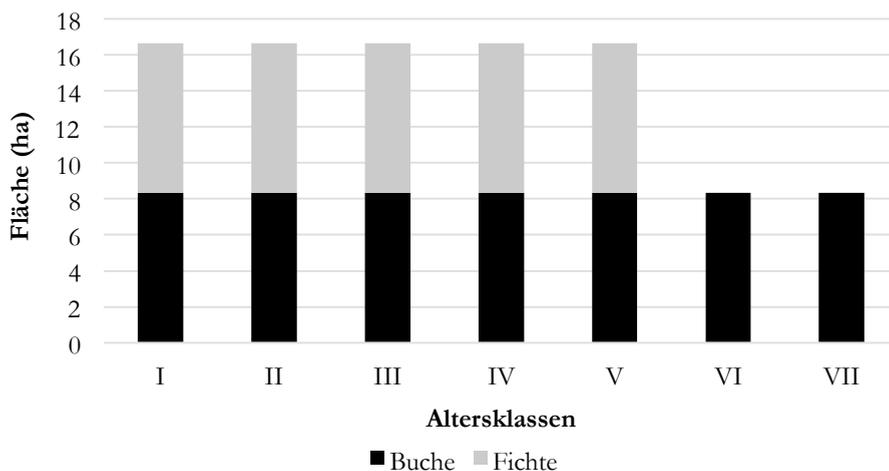


Abbildung 23: Flächenverteilung der Reinbestände von Buche und Fichte in den einzelnen Altersklassen im Normalwaldmodell mit einem Anteil der beiden Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung

Deutlich wird in Abbildung 23 die für das Normalwaldmodell charakteristische gleichmäßige Flächenverteilung der beiden Baumarten in den Altersklassen I-V und der Buche in den Altersklassen I-VII und die durch die Reinbestände bedingte fehlende Interaktion zwischen den beiden Baumarten.

Suzuki, Sloboda und Saborowski (1983 S. 7 ff.) schränken jedoch ein, dass der Normalwaldgedanke nicht unweigerlich mit dem klassischen Normalwaldmodell von Hundeshagen (1826 S. 97 f.) verbunden werden sollte. Der von Hundeshagen beschriebene Normalwald bleibt jedoch bis heute ein grundlegendes und einzigartiges Modell. Entsprechend der Theorie des Normalwaldmodells müsste in der letzten Altersklasse die gesamte Fläche genutzt werden, um das Konstrukt des Normalwaldes zu erhalten. Dies ist jedoch nur möglich, wenn tatsächlich alle Flächenanteile der ursprünglich begründeten Fläche auch die letzte Altersklasse erreichen würden und nicht vorher kalamitäts- oder nutzungsbedingt ausfallen (Kouba 1973 S. 381 f.). Im Gegensatz zur realen Betriebsklasse beschreiben das Normalwaldmodell und die normale Betriebsklasse vereinfachte Gegebenheiten, die in der Praxis so nicht anzutreffen sind und vielmehr einen Idealzustand beschreiben, weshalb die normale Betriebsklasse auch als ideale Betriebsklasse bezeichnet wird (vgl. Assmann 1961 S. 420).

Hauptkritikpunkte an der Praxisferne des Normalwaldmodells sind die fehlende Abbildung der unterschiedlichen Leistungskraft der Standorte, die einheitlich gleichbleibende Holzqualität und der einheitliche Bestockungsgrad über alle Altersklassen. Weiter sind die Übergangswahrscheinlichkeiten von 1 unrealistisch, da die Entwicklung der Bestände über so lange Zeiträume Überlebensrisiken ausgesetzt ist. Darüber hinaus erfolgt die Ernte der Bäume im Rahmen der Endnutzung i.d.R nicht im Kahlschlagsverfahren zu einem Zeitpunkt, sondern vielmehr über eine längere Periode verteilt, beispielsweise im Rahmen der Zielstärkennutzung. Weiter fehlt in diesem Modell eine adäquate Berücksichtigungsmöglichkeit von Mischungs- und Zeitmischungseffekten. Insbesondere die unterschiedliche Produktionsdauer von Buche und Fichte im Mischbestand lässt sich mit einem Modell, das eine homogene Baumartenmischung in allen Altersklassen voraussetzt, nicht abbilden.

5.3 Zielwaldmodell

Reale Waldbestände und entsprechend auch die Flächenzusammensetzung der Forstbetriebe entwickeln sich im Laufe ihres Bestandeslebens deutlich abweichend von der im Normalwaldmodell unterstellten Überlebenswahrscheinlichkeit. Insbesondere die risikofreie Produktion ist für die langfristigen mitteleuropäischen Produktionszeiten nicht gegeben. Risiken führen, wie bereits in Kapitel 4.2 ausgeführt, zu einem frühzeitigen Ausfall von Bestandesteilen, die, wie im Modell unterstellt, zu einem Ausfall von Flächenanteilen vor dem Erreichen des Bestandesendes führen.

Das Zielwaldmodell basiert auf den folgenden Modellprämissen (in Anlehnung an Oesten und Roeder 2002 164 ff.):

- Die forstliche Produktion ist mit Risiken verbunden, die stochastischen Gesetzmäßigkeiten folgen.

- Im Forstbetrieb sind Bestände aller Altersstufen vom Alter 1 bis zum Alter der Umtriebszeit vertreten. Risikobedingt sind die einzelnen Altersstufen mit ungleichen Flächenanteilen vertreten. Im Gleichgewichtszustand bildet sich eine linksschiefe Altersflächenstruktur aus.
- Alle Bestände weisen eine einheitliche Baumart oder Baumartenmischung auf.

In Abbildung 24 ist für ein Zielwaldmodell mit Risiko die Flächenausstattung einer reinen Buchen- und in Abbildung 25 die einer reinen Fichtenbetriebsklasse mit jeweils 100 ha zum Vergleich dargestellt:

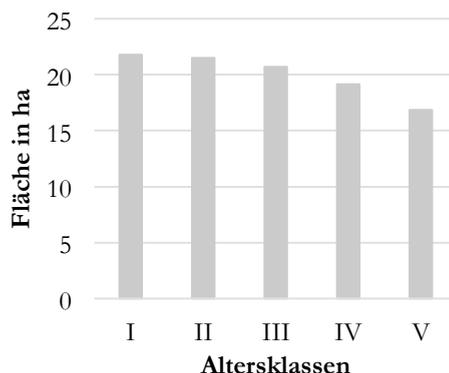
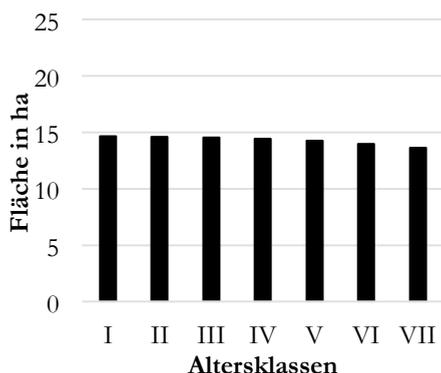


Abbildung 24: Zielwaldmodell Buchenbetriebsklasse mit einer S_{100} von 0,967

Abbildung 25: Zielwaldmodell Fichtenbetriebsklasse mit einer S_{100} von 0,726

Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen für beide Betriebsklassen, dass die Flächenanteile in den Altersklassen der beiden Betriebsklassen mit zunehmendem Bestandesalter zurückgehen, ehe diese durch die Endnutzung, an dieser Stelle der Modellentwicklung noch im Kahlschlagverfahren durchgeführt, vollständig genutzt werden. Deutlich wird dabei auf der einen Seite, dass die Fichtenbetriebsklasse mit ihrer maximalen Produktionszeit von 100 Jahren einen kürzeren Produktionszeitraum im Vergleich zur Buche und damit eine entsprechend höhere Flächenausstattung in der I. Altersklasse aufweist. Auf der anderen Seite wird dieser Effekt noch verstärkt durch die risikobedingte Reduktion der Flächenanteile in den höheren Altersklassen aufgrund des vergleichsweise deutlich höheren Risikos der Fichte.

Wird dieses Modell der risikobedingten Flächenentwicklung auf die erweiterte Normalwaldmodellbetriebsklasse mit den beiden Baumarten Buche und Fichte in Reinbeständen übertragen und somit durch die Einbeziehung von baumartenindividuellen Risiken zu einem erweiterten Zielwaldmodell unter Ausklammerung von Mischungseffekten entwickelt, so ergibt sich die in Abbildung 26 dargestellte Flä-

chenverteilung für eine Betriebsklasse von 100 ha mit einem Buchen- und Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung von jeweils 50%.³³

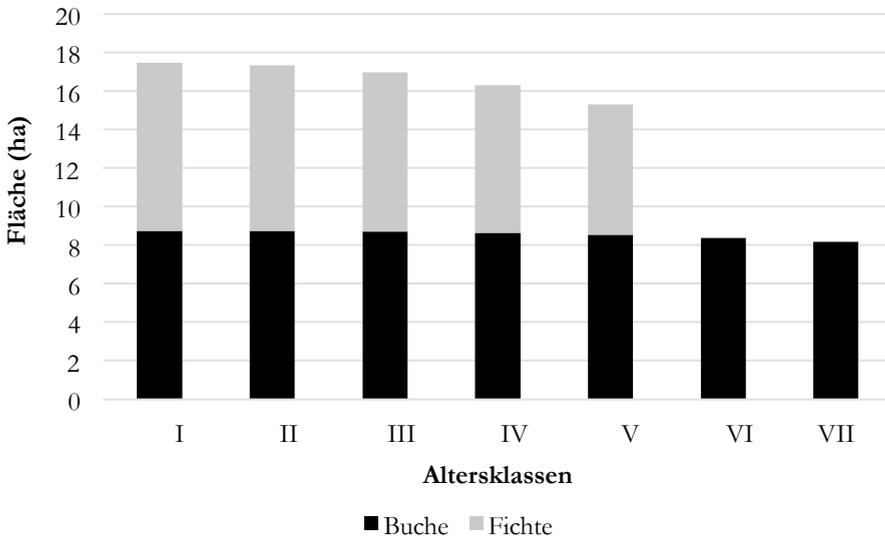


Abbildung 26: Flächenverteilung der Reinbestände (ohne Endnutzungsverteilung) des erweiterten Zielwaldmodells bei einer S_{100} für Buche von 0,967 und einer S_{100} für Fichte von 0,726 und einem Anteil beider Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Risikos als Modellbestandteil wurde in Abbildung 26 auf eine Darstellung der Endnutzungsverteilung verzichtet und ein Kahlschlag mit dem Erreichen der Umtriebszeit unterstellt.

Durch die unterschiedliche Stärke des Risikos von Buche und Fichte sowie die unterschiedlichen Produktionszeiträume der Baumarten erfolgt mit dem risikobedingten Ausscheiden von Flächenanteilen eine Verschiebung der Mischungsanteile. Hierdurch wird die Prämisse der einheitlichen Mischungsverhältnisse in allen Altersklassen aufgehoben. Obwohl mit einem gleich hohen Mischungsanteil von 50% für beide Baumarten gestartet wurde, nimmt die Fichte aufgrund ihres höheren Risikos und der kürzeren Produktionsdauer nur einen durchschnittlichen Mischungsanteil von 40% in der Betriebsklasse ein.

Wird in die oben abgebildete Darstellung der Flächenverteilung der Betriebsklasse des erweiterten Zielwaldmodells (Abbildung 26) die baumartenspezifische Endnutzungswahrscheinlichkeit für Reinbestände eingebunden, so ergibt sich der in Abbildung 27 dargestellte Übergangsgraph für die Flächenübergangswahrscheinlichkeiten.

³³ Dies entspricht einem Buchen- und Fichtenanteil von jeweils 50% in der I. Altersklasse, da hier sowohl nutzungs- wie auch risikobedingt noch keine Flächenanteile ausscheiden.

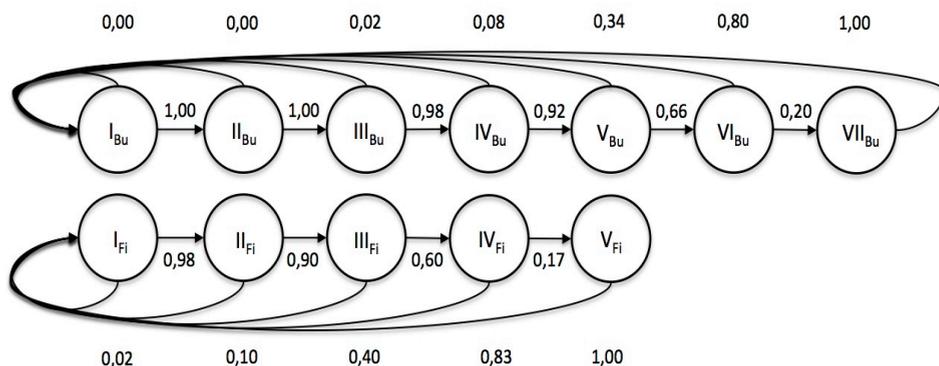


Abbildung 27: Übergangsgraph der Buchen- und Fichtenreinbestände im erweiterten Zielwaldmodell inklusive Endnutzungsverteilung

Wird die aus dem oben stehenden Übergangsgraph resultierende Flächenverteilung der Baumarten in den einzelnen Altersklassen in Abbildung 28 abgebildet, so zeigt sich im Vergleich zur Abbildung 26 die deutlich stärker abnehmende Fichten- und Buchenfläche in den jeweils höheren Altersklassen. Hierdurch verringert sich der durchschnittliche Fichtenanteil an der Betriebsklasse weiter auf 38% bei einem Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung von 50%.

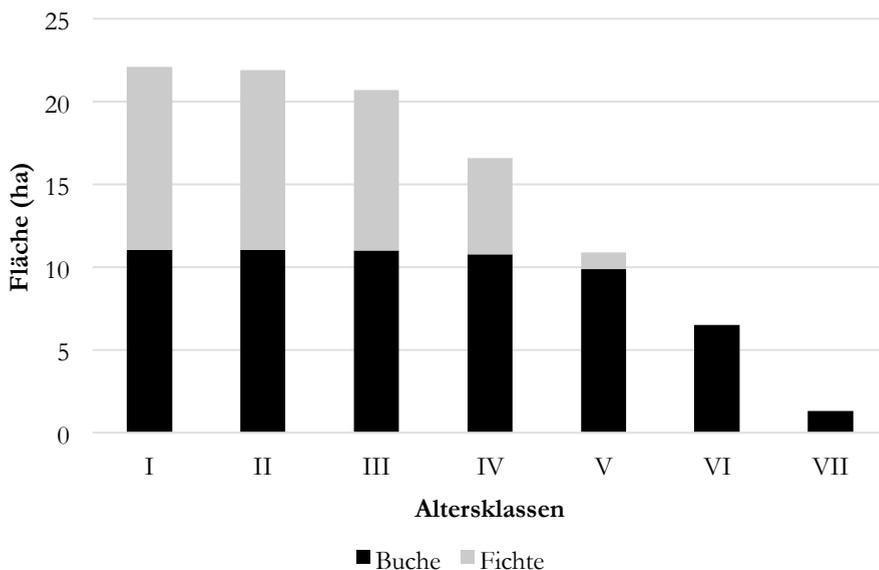


Abbildung 28: Flächenverteilung der Reinbestände im erweiterten Zielwaldmodell inklusive Endnutzungsverteilung bei einer S_{100} für Buche von 0,967 und einer S_{100} für Fichte von 0,726 und einem Anteil beider Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung

Das ursprüngliche Zielwaldmodell hebt nicht alle mit dem Normalwaldmodell verbundenen Einschränkungen auf. Gemeinsam sind dem Ziel- und Normal-

waldmodell die stets über alle Altersklassen hinweg gleichbleibende Baumartenzusammensetzung und die einheitlichen Standortverhältnisse. Das Zielwaldmodell stellt somit ebenso wie das Normalwaldmodell ein statisches Modell zur Beschreibung eines Gleichgewichtszustandes im dynamischen System eines Forstbetriebes dar. Es ermöglicht jedoch durch die explizite Berücksichtigung von Risiken und zeitlich gestrecktem Endnutzungszeitraum eine realitätsnähere Beschreibung der nachhaltigen ökonomischen Leistungsfähigkeit verschiedener Bewirtschaftungsmodelle auf der Basis von Reinbeständen.

5.4 Mischwaldmodell

Die Prämisse des Normal- und Zielwaldmodells mit gleichbleibendem Mischungsanteil in den Beständen während des gesamten Bestandeslebens schließt tatsächliche Zeitmischungen der Baumarten Buche und Fichte innerhalb der Bestände aus. Mit den bereits beschriebenen Modellen und ihren Erweiterungen erfolgte die Mischung in der Betriebsklasse dementsprechend stets in Form von Reinbeständen bzw. flächiger Mischung ohne Baumarteninteraktion. Für die Beschreibung von Mischbeständen mit Baumarten unterschiedlicher Produktionszeiten, wie es bei der Buche und Fichte der Fall ist, wird im Folgenden die Prämisse der einheitlichen Baumart oder Baumartenmischung weiter aufgehoben. Hierfür wird das sogenannte „Mischwaldmodell“ für die Beschreibung nachhaltiger Mischbestandsbetriebsklassen mit Baumarten unterschiedlicher Risikogefährdung und Produktionsdauer verwendet. Mit diesem Mischwaldmodell sind entsprechend der Erweiterung des Normal- (vgl. Oesten und Roeder 2002 S. 164 ff.) und des Zielwaldmodells (vgl. Speidel 1972 S. 109 f.) die folgenden Prämissen verbunden:

- Die forstliche Produktion ist mit Risiken verbunden, die stochastischen Gesetzmäßigkeiten folgen.
- Risiko- und zeitmischungsbedingt sind Flächen der Baumarten in den einzelnen Altersstufen mit ungleichen Flächenanteilen vertreten.
- In Abhängigkeit der Produktionsdauer und der baumartenindividuellen Risikogefährdung verschiebt sich der Mischungsanteil der Baumarten zwischen den einzelnen Altersstufen. Dabei können frei werdende Flächen auch von anderen Baumarten durch Verjüngung bzw. Überschirmung übernommen werden.
- Im Gleichgewichtszustand bildet sich eine linksschiefe Altersflächenstruktur aus.

Das Mischwaldmodell kombiniert die einzelnen bereits beschriebenen Bestandteile entsprechend der in Kapitel 4.5 dargestellten Rangfolge. Die Risikokomponente des Zielwaldmodells wird dabei durch eine vom Mischungsanteil abhängige Risikostärke ebenso berücksichtigt wie das Beschreibungsmodell der zeitlich gestreckten Endnutzung und Ausdehnung der Kronenschirmfläche der Buche. Insbesondere der zuletzt genannte Aspekt wird in der folgenden Übergangsgraphik bei-

spielhaft dargestellt für die Mischbestandsbetriebsklassenvariante M_2 deutlich, in dem Flächenanteile der Fichte nach der Ernte (inklusive Kalamitätsnutzungen) zur Buche übergehen:

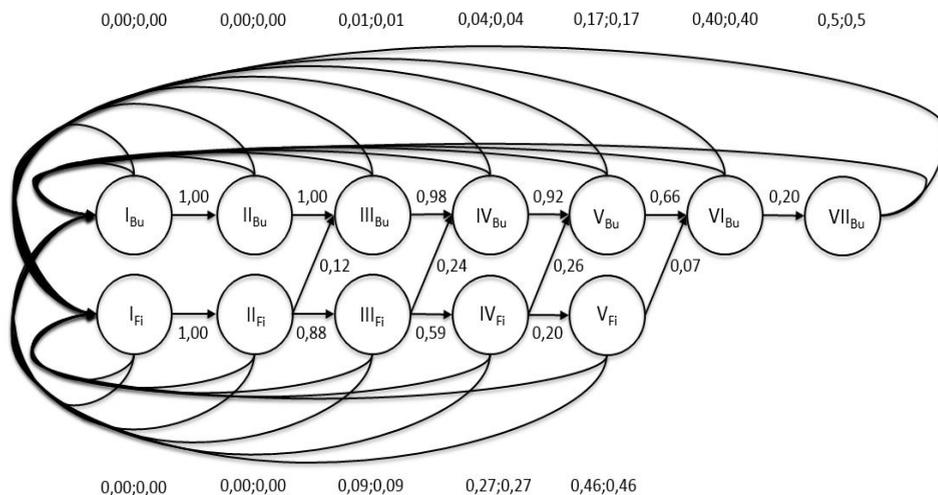


Abbildung 29: Übergangsgraph der Buchen-Fichten-Mischbestände im Mischwaldmodell mit einem Mischungsanteil beider Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung inklusive baumartenspezifischen Risiken (S_{100} der Buche von 0,967 und vom Mischungsanteil abhängigen S_{100} der Fichte von 0,904), Endnutzungsverteilung und Übernahme von Bestandesteilen durch die Kronenausdehnung der Buche bei ausscheidender Fichtenfläche (Variante M_2)

Während von der I. Altersklasse die Flächen der beiden Mischbaumarten Buche und Fichte vollständig in die II. Altersklasse übergehen (dargestellt in Abbildung 29 durch die Pfeile vom jeweiligen Knoten der I. Altersklasse zum jeweiligen Knoten der II. Altersklasse der Baumarten), gehen bereits von der II. Altersklasse der Fichte 12% der Fläche in die Buchenfläche über, dargestellt durch den Pfeil vom Knoten der II. Altersklasse der Fichte zum Knoten der III. Altersklasse der Buche. Die restliche Fläche der Fichte rückt in die III. Altersklasse der Fichte auf.

Beim Übergang von der III. in die IV. Altersklasse scheiden erste Flächenanteile sowohl von der Buche wie auch von der Fichte aus und gehen erneut in die Verjüngung eines Nachfolgebestandes über. Durch die im Modell unterstellte Bestandesbegründung mit einem Mischungsanteil beider Baumarten von 50% werden diese ausscheidenden und erneut in die Verjüngung einfließenden Flächenanteile zu gleichen Teilen beiden Baumarten zugeschlagen. Sie werden durch die mit einem Semikolon getrennten Werte über dem Knoten der III. Altersklasse der Buche bzw. unter dem Knoten der III. Altersklasse der Fichte dargestellt. Der erste Wert stellt dabei den Anteil der Fläche dar, der von der Altersklasse zur Buchenverjüngung übergeht, und der zweite Wert entspricht dem Anteil der Fläche, der in die Fichtenverjüngung einfließt. Von der III. Altersklasse der Buche gehen dabei jeweils 1% der Fläche in die erneute Verjüngung der Buche und Fichte über,

während von der Fichte jeweils 8,5% (rundungsbedingt hier als 9% dargestellt) der Fläche der III. Altersklasse in die Verjüngung der beiden Baumarten übergeht.

Mit zunehmendem Alter der Bestände steigen die Anteile der Fichtenfläche, die von der Buche übernommen werden, weiter an, während gleichzeitig die Flächenanteile, die erneut in die Verjüngung übergehen, bei beiden Baumarten zunehmen. Mit dem Erreichen der V. Altersklasse scheidet die Fichte als Zeitmischung aus dem Mischbestand aus und ihre zu diesem Zeitpunkt noch vorhandenen Flächenanteile gehen zu 7% zur Buche über, während die restlichen Flächenanteile erneut in die Verjüngung einfließen. Auch bei der Buche gehen im Wesentlichen nutzungsbedingt die jeweiligen Flächenübergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Altersklassen V bis VII weiter zurück. Nach der VII. Altersklasse gehen mit einer Übergangswahrscheinlichkeit von 100% die restlichen Flächenanteile erneut in die Verjüngung über.

Die folgende Abbildung 30 zeigt die daraus resultierende Flächenverteilung der Baumarten in einer 100 ha großen Betriebsklasse bei einem Mischungsanteil der beiden Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung (Variante M₂).

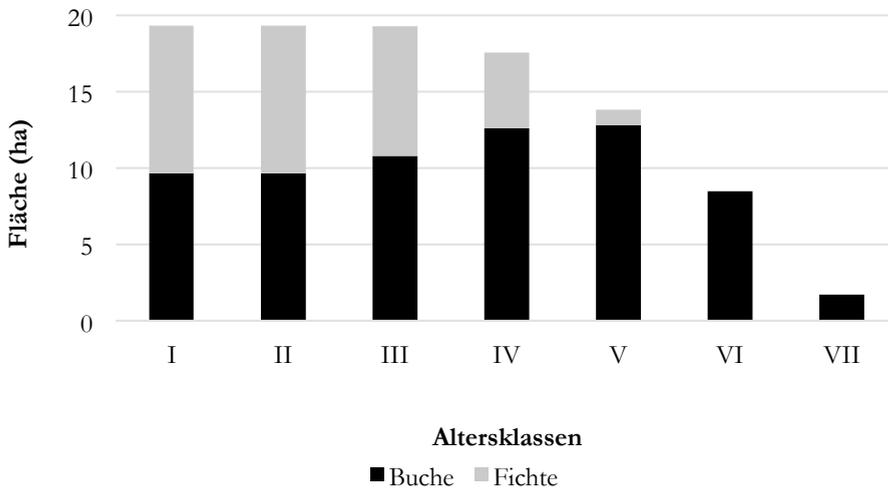


Abbildung 30: Flächenverteilung der Mischbestände inklusive Endnutzungsverteilung bei einer S_{100} für Buche von 0,967 und einer vom Mischungsanteil abhängigen S_{100} für Fichte von 0,904, einem Mischungsanteil beider Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung und der Ausdehnung der Kronenschirmfläche der Buche (Variante M₂)

Die oben stehende Darstellung veranschaulicht nochmals die grundlegenden Zusammenhänge zwischen den die Flächenentwicklung beeinflussenden Faktoren: dem baumartenindividuellen Risiko, der Nutzung und Produktionsdauer sowie der Übernahme von Fichtenflächenanteilen durch die Buche. Während die Fläche der Buche, die ursprünglich als Kultur begründet wurde, zu Beginn in den ersten Altersklassen im Vergleich zur Fichte durch das geringe Risiko der Buche nur minimal abnimmt, beginnt die Fläche der Fichte schon früh kalamitätsbedingt leicht zu sinken. Von der III. bis zur V. Altersklasse wird in der Abbildung 30 der

Übergang der Fichten- zur Buchenfläche besonders deutlich, wenngleich auch von der V. Altersklasse der Fichte Flächenanteile in die VI. Altersklasse der Buche übergehen.

Mit der beginnenden Endnutzung der Fichte sinkt ihre Fläche bis zum kompletten Ausscheiden im Alter 100 stärker, während gleichzeitig die Buchenfläche durch die Kronenausdehnung bis zum Erreichen des Höhepunktes im Alter 85 (IV. Altersklasse, vgl. Abbildung 29) ansteigt. In der V. Altersklasse der Buche wird dieser Flächenübergangseffekt von der Fichte zur Buche durch die einsetzende Endnutzung der Buche überdeckt, die ebenfalls zu einem Flächenrückgang der Buche in den Altersklassen V bis VII führt. Obwohl auch in diesem Modell ein Mischungsanteil beider Baumarten bei der Bestandesbegründung von 50% vorliegt, geht der durchschnittliche Mischungsanteil der Fichte an dieser Modellbetriebsklasse bedingt durch die Übernahme von Flächenanteilen durch die Buche weiter auf 35% zurück.

Für diese beispielhaft beschriebene Mischbestandsbetriebsklasse (Mischungsvariante M_2) mit einem Mischungsanteil von 50% beider Baumarten bei der ursprünglichen Bestandesbegründung ergibt sich der nachfolgende Flächenvektor:³⁴

Formel 18: Eigenvektor Mischbestandsbetriebsklasse Variante M_2

$$a = (9,67; 9,67; 9,68; 9,65; 10,81; 8,48; 12,61; 4,96; 12,81; 1,01; 8,5; 0; 1,70; 0)$$

Der in Formel 18 dargestellte Vektor wird in diesem stationären Zustand auch als Eigenvektor bezeichnet (vgl. Strang 2003 S. 291) und stellt die in Abbildung 30 dargestellte nachhaltige stationäre Flächenverteilung in den einzelnen Altersklassen dieser Mischbestandsbetriebsklasse dar.

5.5 Mischungsanteil der Baumarten im Modell

Insbesondere die Ausführungen zum Mischwaldmodell am Beispiel der Mischbestandsbetriebsklasse mit einem Mischungsanteil beider Baumarten von 50% zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung (Variante M_2) zeigen deutlich die anhaltende Verschiebung des Mischungsanteils der Baumarten von der Bestandesbegründung bis hin zum Ausscheiden der Fichte als Zeitmischung (vgl. Abbildung 30).

Wiedemann (1943 S. 126) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, wie bedeutend die Angabe eines Bezugszeitpunktes für die Bezeichnung des Mischungsanteils aufgrund dieses ständigen Wandels während des Bestandeslebens ist. Der Mischungsanteil ist dementsprechend auf einen bestimmten Bezugszeitpunkt zu beziehen oder als Durchschnittswert für einen Zeitraum anzugeben. Besonders deutlich wird diese Notwendigkeit des Bezugszeitpunktes, wenn die einzelnen in diesem Kapitel beschriebenen forstwirtschaftlichen Betriebsmodelle mit ihrer jeweiligen Flächenausstattung einander gegenübergestellt werden.

³⁴ Die korrespondierende Übergangsmatrix findet sich im Anhang unter 12.2.

Die verschiedenen Modellbetriebsklassen mit einer jeweiligen Gesamtfläche von 100 ha weisen dabei jeweils einen Mischungsanteil von 50% von Buche und Fichte bei der Bestandesbegründung bzw. in der I. Altersklasse auf.³⁵

I: Normalwaldmodell

II: Erweitertes Zielwaldmodell

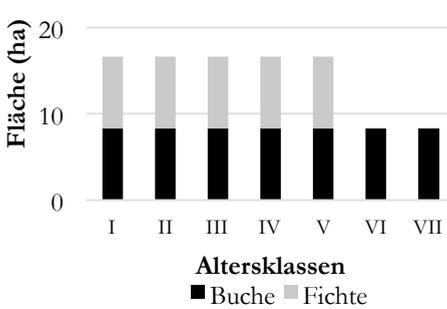


Abbildung 31: Flächenverteilung der Reinbestände von Buche und Fichte in den einzelnen Altersklassen im erweiterten Normalwaldmodell

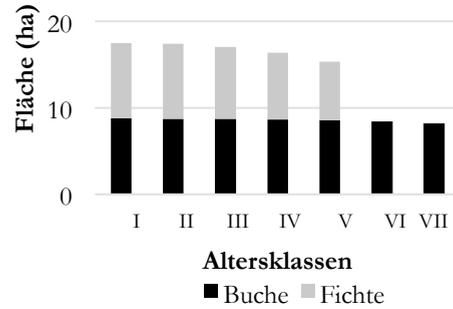


Abbildung 32: Flächenverteilung der Reinbestände im erweiterten Zielwaldmodell (ohne Endnutzungsverteilung) bei einer S_{100} für Buche von 0,967 und einer S_{100} für Fichte von 0,726

III: Erweitertes Zielwaldmodell mit Endnutzungsverteilung

IV: Mischwaldmodell

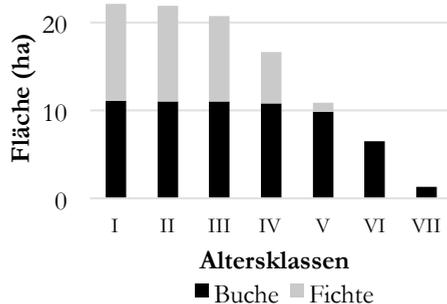


Abbildung 33: Flächenverteilung der Reinbestände im erweiterten Zielwaldmodell bei einer S_{100} (Risikostärke) für Buche von 0,967 und einer S_{100} für Fichte von 0,726 inklusive Endnutzungsverteilung

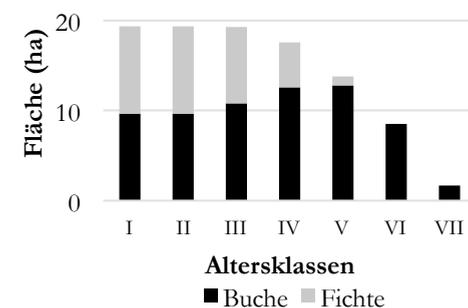


Abbildung 34: Flächenverteilung der Mischbestände im Mischwaldmodell bei einer S_{100} (Risikostärke) für Buche von 0,967 und einer vom Mischungsanteil abhängigen S_{100} für Fichte von 0,904 inklusive Endnutzungsverteilung

Die folgende Tabelle 8 stellt die durchschnittlichen Mischungsanteile der Baumarten, die sich aus der jeweiligen Modellbetriebsklasse (Mischungsanteil bei der Bestandesbegründung jeweils 50%) ergeben noch einmal einander gegenüber.

³⁵ In der I. Altersklasse scheiden nutzungs- und risikobedingt noch keine Flächenanteile aus.

Tabelle 8: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Betriebsklassen im Vergleich bei einem Mischungsanteil beider Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung bzw. in der I. Altersklasse

Betriebsklassenmodell	Buchenanteil	Fichtenanteil
	%	%
Normalwaldmodell	58	42
Zielwaldmodell	60	40
Zielwaldmodell mit Endnutzungsvertei-	62	38
Mischwaldmodell	65	35

Die in Abbildung 31 und Tabelle 8 dargestellte Flächenverteilung der Betriebsklasse auf Reinbestandsbasis zeigt die vom erweiterten Normalwaldmodell ausgehende Entwicklung der Modellbetriebsklasse mit einem durchschnittlichen Fichtenanteil von 42%. Durch die Einbeziehung des baumartenindividuellen Risikos sinkt dieser durchschnittliche Mischungsanteil der Fichte weiter auf 40% (vgl. Abbildung 32). Verstärkt wird dieser Effekt noch durch die Berücksichtigung der Endnutzungsverteilung, die aus der Zielstärkennutzung der Baumarten abgeleitet wurde und zu einem durchschnittlichen Mischungsanteil von 38% führt (vgl. Abbildung 33). Mit der in Abbildung 34 dargestellten Mischbestandsbetriebsklasse werden die in den vorhergehenden Abbildungen dargestellten Reinbestände bis zum Ausscheiden der Zeitmischung Fichte durch Mischbestände ersetzt. Deutlich wird dabei die Auswirkung der gruppenweisen Beimischung von Fichte, deren Fläche nach dem Ausscheiden in Teilen von der Buche übernommen wird. Hierdurch sinkt der durchschnittliche Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse weiter auf 35%. Ein Nadelholzanteil von 50% in der Verjüngung führt bei Verwendung des Mischwaldmodells und den hier hinterlegten Parametern letztlich zu einem durchschnittlichen betrieblichen Fichtenanteil von lediglich 35%.

5.6 Mischungsanteil der Betriebsklassenvarianten

Der durchschnittliche Mischungsanteil der Baumarten an der Betriebsklasse wird im Mischwaldmodell durch die Produktionsdauer der Baumarten, die baumartenindividuellen Risikostärken und dem Anteil der Baumarten bei der Bestandesbegründung bestimmt. In der folgenden Abbildung 35 sind für das Mischwaldmodell mit Risiko und Endnutzungsverteilung die durchschnittlichen Fichtenanteile an der Betriebsklasse über dem jeweiligen Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung für die Varianten M_0 (100% Fichtenanteil bei der Begründung), M_1 (70% Fichtenanteil bei der Begründung), M_2 (50% Fichtenanteil bei der Begründung), M_3 (30% Fichtenanteil bei der Begründung) und M_4 (100% Buche bei der Begründung) aufgetragen und die sich daraus ergebenden einzelnen Punkte durch eine Liniendarstellung ergänzt.

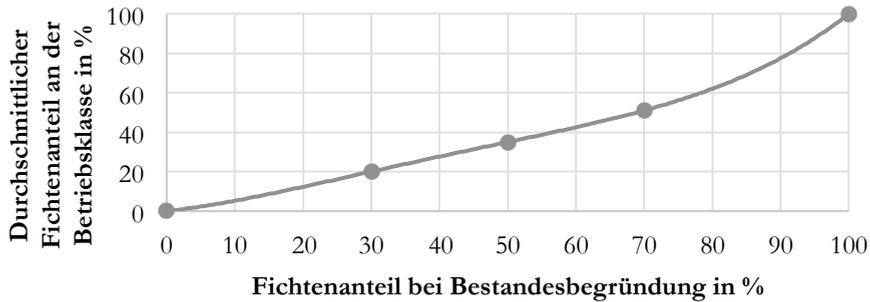


Abbildung 35: Vom Fichtenanteil bei der Begründung abhängiger durchschnittlicher Fichtenanteil an der Betriebsklasse des Mischwaldmodells (mittlere Produktionsdauer der Fichte 80 Jahre und der Buche 120 Jahre)

Mit dieser Liniendarstellung lassen sich für die Modellbedingungen (mittlere Produktionsdauer der Fichte von 80 Jahren und der Buche von 120 Jahren) ausgehend vom Mischungsanteil der Fichte bei der Begründung für andere Startmischungsanteile die durchschnittlichen Mischungsanteile der Fichte an der Betriebsklasse des Mischwaldmodells aus der oben stehenden Abbildung näherungsweise ablesen.^{36, 37} Im Umkehrschluss lassen sich aus der Abbildung auch die Baumartenanteile bei der Begründung ablesen, die für einen durchschnittlichen angestrebten Zielmischungsanteil notwendig sind.³⁸

³⁶ Eine mathematisch exakte Herleitung zur Berechnung des durchschnittlichen Fichtenanteils ist im Anhang in Kapitel 12.3 für die unterschiedlichen beschriebenen Betriebsklassenmodelle dargestellt.

³⁷ Werden Risiko- und Mischungseffekte ausgeblendet, kann mit der im Anhang in Kapitel 12.3.1 dargestellten Formel 28 näherungsweise der durchschnittliche Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse ermittelt bzw. der benötigte Begründungsanteil für einen gewünschten durchschnittlichen Mischungsanteil mit Formel 29 bestimmt werden.

³⁸ Für einen durchschnittlichen betrieblichen Fichtenanteil von 50% ist beispielsweise ein Fichtenanteil in der Verjüngung von 69% notwendig.

6 Naturale Waldentwicklung aus ökonomischer Sicht

Die ökonomische Bewertung der naturalen Daten setzt eine Zuordnung der ökonomischen Größen voraus. Die eigentliche Höhe der dabei zu verwendenden Kosten und Erlöse ist von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig, wie zum Beispiel den Kosten für Roh- und Betriebsstoffe oder der Löhne (vgl. Speidel 1967 S. 56). Darüber hinaus gestalten die innerbetriebliche sachliche Ordnung und personelle Organisation den effizienten Einsatz der betrieblichen Ressourcen (vgl. Seidel und Strebel 1993 S. 14). Hierdurch kann die Höhe und Struktur der Kosten, insbesondere die der variablen Kosten durch Maßnahmen der Betriebsleitung maßgeblich beeinflusst werden. Die variablen Kosten eines Forstbetriebes sind im Wesentlichen durch den forstlichen Produktionsprozess und die damit verbundenen Unternehmer- bzw. Lohnkosten bei Bestandesbegründung, -pflege und Holz-ernte bedingt (vgl. Speidel 1967 S. 58).

Die eigentliche Zuordnung der Kosten und Erlöse zu den Holzvolumina und den zugehörigen waldbaulichen Maßnahmen der einzelnen Perioden erfolgt baumartenspezifisch anhand des mittleren BHD des ausscheidenden bzw. des verbleibenden Bestandes verursachungsgerecht in Anlehnung an die Kostenträgerrechnung (Kröger 2012 S. 98). Grundlage hierfür sind durchmesserabhängige Kosten- und Erlösfunktionen. Es wird in Anlehnung an die klassische Waldbewertung eine Konstanz der Erlöse und Kosten in der Zeit unterstellt (vgl. Rüping 2009 S. 103).

6.1 Bestandesbegründungskosten

Als Kulturkosten für die Bestandesbegründung werden in Anlehnung an die niedersächsische Waldbewertungsrichtlinie (WBR NLF 2014 Tabelle 1.13) für Fichte 2.500 €/ha Baumartenfläche und für Buche 5.000 €/ha Baumartenfläche im Modell hinterlegt. Für den Buchenreinbestand werden für die Buche in Anlehnung an Burschel und Huss (2003 S. 264) eine Pflanzenzahl von 7.000 Pflanzen pro Hektar und für den Fichtenreinbestand eine Pflanzenzahl von 2.500 Pflanzen pro Hektar angenommen. In den Bestandesbegründungskosten sind die Kosten für Flächenvorbereitung, Pflanzung, Nachbesserung sowie ein erstes Freischneiden enthalten. Dabei wurde ein mittlerer Schwierigkeitsgrad zugrunde gelegt.

Für Mischbestände mit geringen Buchenanteilen wird vorausgesetzt, dass die gruppenweise beigemischte Buche konsequent gepflegt wird, um diese zu erhalten. Dabei wird auch ihre natürliche Verjüngung gewährleistet und schwächere Fichten zugunsten von Buchen-Z-Bäumen entnommen. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit der ökonomischen Leistungsfähigkeit der beiden Baumarten Buche und Fichte wird für beide Baumarten in den hier verwendeten Modellen eine Pflanzung angenommen. In einigen Betrachtungen werden diese Pflanzkosten aufgrund der in der Praxis, insbesondere bei der Baumart Buche meist üblichen natürlichen Verjüngung ausgeblendet. Diese Modellbetrachtungen sind im Folgenden entsprechend gekennzeichnet.

6.2 Pflegekosten

Dengler (1972 S. 177) rechnet der Bestandespflege all diejenigen waldbaulichen Maßnahmen zu, die zeitlich zwischen der gesicherten Bestandesbegründung und der Einleitung der auf den Bestand folgenden Verjüngung liegen. Im Folgenden wird der Begriff der Bestandespflege auf den Bereich der Jungbestandespflege eingeschränkt. Die waldbaulichen Maßnahmen, bei denen vermarktungsfähige Holzsortimente anfallen, werden aus dem Bereich der Jungbestandespflege ausgeklammert und der Holzernte zugeordnet. Zweck der Jungbestandespflege ist es, die Zusammensetzung der Baumarten und deren Qualität zu fördern (vgl. Dengler 1972 S. 177). In die Kosten der Jungbestandespflege fließen somit die Kosten für die Jungwuchspflege und die Läuterung (Stammzahl- und Mischwuchsregulierung) mit ein. Diese Maßnahmen werden meist in ein bis zwei Eingriffen bis zum Alter 20 durchgeführt. Rüping (2012 S. 177) gibt die Kosten unabhängig von der jeweiligen Baumart mit 250 €/ha pro Eingriff an. Aus Vereinfachungsgründen werden für beide Baumarten diese Kosten im Modell zu einer einmaligen Zahlung im Alter 10 von 500 €/ha zusammengefasst.

6.3 Holzerntekosten

Die Holzerntekosten für Fällen, Aufarbeiten und Rücken an die Waldstraße wurden baumartenspezifisch der Waldbewertungsrichtlinie Nordrhein-Westfalen (WBR NRW 2014) entnommen. Die Zuordnung der Holzerntekosten erfolgt dabei auf Basis des mittleren BHD des ausscheidenden Bestandes. Für die Modellierung der Daten wurden hier durchschnittliche Verhältnisse und eine Wertziffer von 2 unterstellt (WBR-NRW 2014 S. 5 und Anlage 6). In Abbildung 36 sind diese Daten und die hieraus abgeleiteten Holzerntekosten für die Baumarten Buche und Fichte in Abhängigkeit vom BHD aufgeführt, die hierzu in Funktionen überführt wurden. In Anlehnung an Engel (2010 S. 113 ff.) wurden aufgrund der flexibleren Anpassungsmöglichkeit des später folgenden Variantenstudiums hierfür ein Polynom 4. bzw. 5. Grades verwendet.³⁹ Dies führt zu einem Bestimmtheitsmaß von 0,98 für die Holzerntekosten der Buche und 0,95 für die Holzerntekosten der Fichte.

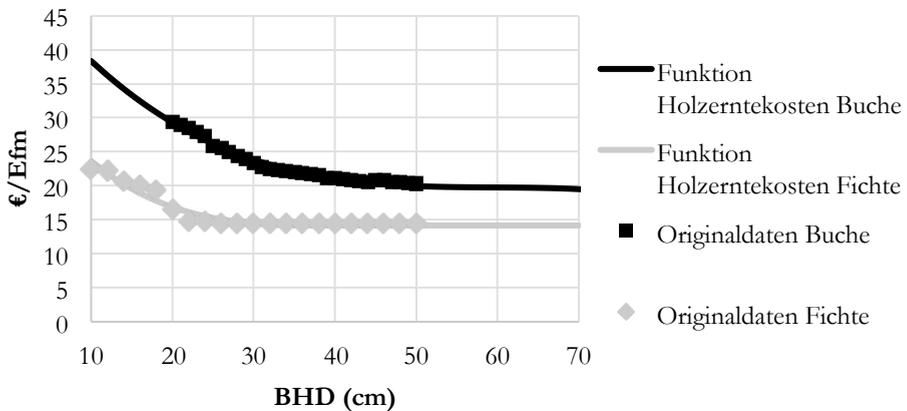


Abbildung 36: BHD-abhängige Holzerntekosten Buche und Fichte (Funktionen und Daten der Waldbewertungsrichtlinie Nordrhein-Westfalen 2014)

6.4 Holzerlöse

Als Grundlage für die Bewertung der gerückten Holzsortimente dienen die Holzerlöse der Landwirtschaftskammer Niedersachsens (2014) für den Privatwald (LWK Niedersachsen 2014). Nicht enthaltene Wertangaben einzelner Sortimente wurden dabei auf der Basis von Wertrelationen und Leitsortimenten, ausgehend

³⁹ Polynom Buche: Holzerntekosten Buche in €/Fm = $-0,0001502874 \cdot \text{BHD}^3 + 0,0268333413 \cdot \text{BHD}^2 - 1,6044085 \cdot \text{BHD} + 51,8744625103$
 Polynom Fichte: Holzerntekosten Fichte in €/Fm = $-7,475200766781\text{E-}08 \cdot \text{BHD}^5 + 0,0000077842349170687 \cdot \text{BHD}^4 + 0,0000849546014967117 \cdot \text{BHD}^3 - 0,0241512875558385 \cdot \text{BHD}^2 + 0,134033701890985 \cdot \text{BHD} + 36,5$

von der Stärkeklasse 3b bei der Güte B aus der Stammholzpreismatrix der Niedersächsischen Waldbewertungsrichtlinie (WBR Niedersachsen 2014 Tabelle 1.10) abgeleitet. In Tabelle 9 sind die für die Bewertung des Holzvolumens der Buche und in Tabelle 10 die für die Bewertung der Fichte verwendeten Holzerlöse dargestellt.

Tabelle 9: Holzerlöse Buche in €/Efm (LWK Niedersachsen, Privatwald)

Güteklasse	Preis L2a	Preis L2b	Preis L3a	Preis L3b	Preis L4	Preis L5	Preis L6
A				94	140	166	166
B	53	61	65	71	95	110	110
C	52	55	56	58	63	67	67
CGW	51	53	56	55	55	55	55
D	51	53	56	55	55	55	55

Tabelle 10: Holzerlöse Fichte in €/Efm (LWK Niedersachsen, Privatwald)

Güteklasse	Preis L1b2	Preis L2a	Preis L2b	Preis L3a	Preis L3b	Preis L4	Preis L5	Preis L6
A								
B	80	92	100	101	103	103	103	103
C	75	83	90	92	94	95	95	95
CGW	69	73	72	72	71	71	71	71
D	69	73	72	72	71	71	71	71

6.5 Bestandessortentafel

Die Bewertung der simulierten naturalen Daten der einzelnen Baumarten mit den baumartenspezifischen Holzerlösen setzt eine Aufgliederung sowohl der ausscheidenden wie auch der stehend im Bestand verbleibenden Holzvolumina in Sorten-, Stärke- und Güteklassen voraus. Die Umrechnung der in Vorratsfestmeter ausgegebenen Simulationsergebnisse in nutzbare Erntefestmeter erfolgt einheitlich für beide Baumarten mit dem pauschalen Faktor von 0,8, wodurch der Ernteverlust und der Rindenanteil berücksichtigt werden (vgl. Möhring et al. 2010a S. 87). Die Sortentafeln zeigen den Anteil der verschiedenen Holzsortimente eines Bestandes

in Abhängigkeit vom mittleren BHD (vgl. Assmann 1961 S. 69). Aus Vereinfachungsgründen wird dabei dieselbe Sortentafel sowohl für den ausscheidenden als auch für den verbleibenden Bestand verwendet. In Abhängigkeit vom mittleren BHD werden den Volumenanteilen des ausscheidenden und des verbleibenden Bestandes die Stamm- und Industrieholzanteile sowie die einzelnen Güteklassen zugeordnet.

Da für Mischbestände Informationen zur Sortimentsverteilung weitgehend fehlen, die unterschiedliche Mischungsformen und Anteile der am Mischbestand beteiligten Baumarten und die korrespondierenden Sortimente abbilden, wird in Anlehnung an Ripken (1989 S. 52) für die Zuordnung zu einer mittleren Güteverteilung auf Bestandessortentafeln der 2. Wertklasse von Offer und Staupendahl (2008 S. 153) zurückgegriffen. Diese Bestandessortentafeln wurden auf der Grundlage der Einschlagsstatistik von HESSEN-Forst entwickelt. In Abbildung 37 ist die vom mittleren BHD abhängige Holzsortierung für die Baumart Buche und in Abbildung 38 die für die Fichte dargestellt:

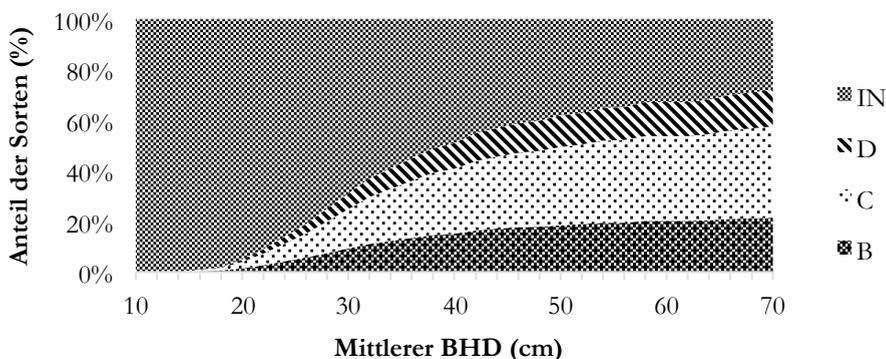


Abbildung 37: Sortimentsverteilung Buche in Abhängigkeit vom BHD

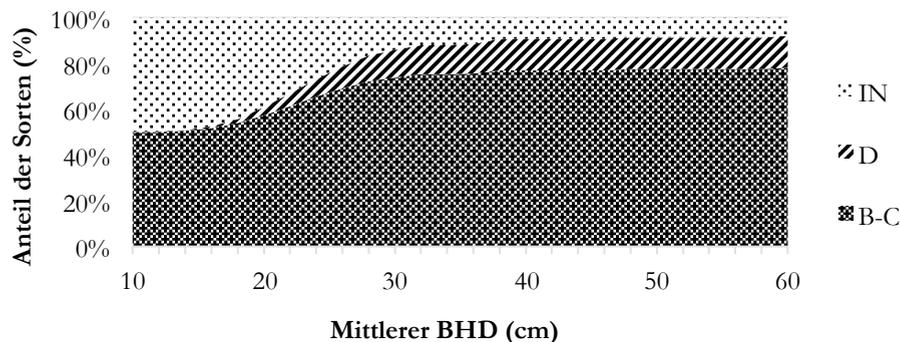


Abbildung 38: Sortimentsverteilung Fichte in Abhängigkeit vom BHD

Aufbauend auf diesen Sortentafeln werden den einzelnen Sortimenten beider Baumarten die jeweiligen stärkeklassenabhängigen Erlöse zugeordnet und hieraus jeweils eine BHD-abhängige Erlösfunktion für beide Baumarten entwickelt. Mit diesen in Abbildung 39 dargestellten Funktionen werden sowohl die Volumina des verbleibenden als auch die des ausscheidenden Bestandes in der jeweiligen Periode bewertet.

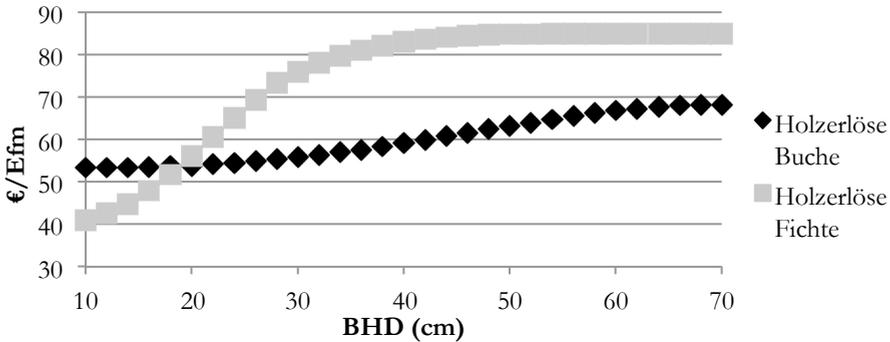


Abbildung 39: Durchschnittliche vom BHD abhängige Holzerlöse für Buche und Fichte

6.6 Bewertung von Kalamitätsnutzungen

Kalamitäten führen zu erhöhten Kosten in der Holzernte und meist auch zu reduzierten Holzerlösen. Diese Verluste zum Beispiel durch verstreuten Hiebsanfall und Schädigung des Holzes werden in Anlehnung an Dieter (1997 S. 97), Knoke und Wurm (2006 S. 306) sowie Gries (2012 S. 34) hier mit einem um 50% reduzierten erntekostenfreien Holzerlös im Vergleich zu der planmäßigen Nutzung berücksichtigt. In die folgende Formel 19 geht dieser Reduktionsfaktor variabel durch den Faktor X (Reduktion in %) ein.

Für die Bewertung wird aus Vereinfachungsgründen unterstellt, dass die Verringerung der Holzerlöse und die Erhöhung der Holzerntekosten zu gleichen Anteilen erfolgt. Dies erfolgt für die Holzerlöse (E) durch die Division mit dem Faktor (F_K) und die Erntekosten (K) durch die Multiplikation mit demselben. Durch die Abhängigkeit sowohl der Holzerlöse als auch der Holzerntekosten vom mittleren Durchmesser des aufgearbeiteten Holzes in der Modellrechnung, wird für jede der fünfjährigen Perioden ein individueller Faktor (F_K) mit der folgenden Formel⁴⁰ ermittelt und die Holzerlöse und Holzerntekosten für die Kalamitätsnutzungen entsprechend angepasst.

Formel 19: Faktor zur Reduktion der Holzerlöse und Erhöhung der Erntekosten für Kalamitätsmengen

$$F_K = -\frac{E - K}{E + K} * (X - 1)$$

⁴⁰ Die Herleitung dieser Formel findet sich im Anhang in Kapitel 12.4.

6.7 Kapitalkosten und Kalkulationszins

Eine Bewertung der Rein- und Mischbestandsvarianten mit den Methoden der Investitionsrechnung setzt die Verwendung eines geeigneten Zinsfußes voraus, der die in den einzelnen Perioden des lang andauernden forstlichen Produktionsprozesses entstehenden Zahlungen auf den Bewertungsstichtag bezieht (vgl. Kroth 1975 S. 59).

Sowohl in der forstlichen Praxis als auch in der Theorie der forstlichen Betriebswirtschaftslehre gibt es kaum eine Kostenart, die eine so unterschiedliche Betrachtungsweise wie die Frage nach der Höhe der Kapitalkosten verursacht hat (vgl. Speidel 1967 S. 50.). Bei der Ermittlung des zukünftigen Erfolges von Forstbetrieben ist jedoch der Zinsfuß der Kalkulation ebenso von Bedeutung wie der eigentliche Erfolg des Betriebes (vgl. Kroth 1975 S. 59). Denn er beeinflusst in hohem Maße die Ergebnisse, die mit den Methoden der dynamischen Investitionsrechnung ermittelt werden (vgl. Helliwell 1947 S. 147).

Eine zinsfreie Betrachtung mit einem Kalkulationszins von null würde das Prinzip der Knappheit von Kapital im Forstbetrieb ausblenden und eine unbeschränkte Kapitalverfügbarkeit unterstellen (vgl. Möhring 1994 S. 76). Für Forstbetriebe besteht jedoch eine Kapitalknappheit und für das Kapital stehen stets alternative Verwendungsmöglichkeiten zur Verfügung. Modelltheoretisch besteht bei der Investitionsentscheidung die Entscheidungssituation darin, dass die Betriebsleitung über die jeweilige einzelne Investition oder über mehrere Investitionsalternativen entscheiden muss, wobei der Betrieb anstelle der betrachteten innerbetrieblichen Investitionen oder des Geldes am Kapitalmarkt auch Alternativenanlagen im Betrieb bewerten muss.

Hierbei wird die Modellprämisse des vollkommenen Kapitalmarkts unterstellt, die die Eigenschaft hat, dass das Geld zu demselben Zinssatz aufgenommen und angelegt werden kann. Der Sollzinssatz entspricht dem Habenzinssatz. Zu diesem einheitlichen Zinssatz sind sowohl die Geldaufnahme wie auch die Geldanlage unbegrenzt möglich. Der Kalkulationszinssatz entspricht somit dem der alternativen Anlage (vgl. Mensch 2002 S. 113). Die klassischen Verfahren der Waldbewertung, die auf den Methoden der dynamischen Investitionsrechnung aufbauen, enthalten diese Prämisse des vollkommenen Kapitalmarktes und dementsprechend einen einheitlichen Soll- und Habenzins. In der betrieblichen Realität besteht dieser vollkommene Kapitalmarkt jedoch nicht.

Der unvollkommene Kapitalmarkt baut aufgrund der Kapitalknappheit nicht auf einem einheitlichen Marktzins auf, zu dem in beliebiger Höhe Kapital aufgenommen bzw. angelegt werden kann. Soll- und Habenzins stimmen dementsprechend nicht mehr überein. Betriebe erhalten in der Regel für Geldanlagen eine geringere Verzinsung, als sie für Kredite zahlen müssen (vgl. Hering 2015 S. 139 f.).⁴¹

⁴¹ Eine detaillierte Beschreibung der über die hier verwendeten Prämissen des unvollkommenen Kapitalmarkts hinausgehenden Voraussetzungen findet sich bei Hering (2015 S. 139 ff.).

Die auf dem vollkommenen Kapitalmarkt aufbauenden Methoden können jedoch in den Fällen, in denen die Differenz zwischen Soll- und Habenzins sehr gering ist, eingesetzt werden. Während für den Staat und speziell für öffentliche Unternehmen oft nur Sollzinsen zugrunde gelegt werden (vgl. Hering 2015 S. 34), kann daher bei eigenkapitalfinanzierten Forstbetrieben (vgl. Brabänder 1968 S. 186 f.) ebenfalls aus Vereinfachungsgründen auf eine Differenzierung zwischen Soll- und Habenzinsen verzichtet werden.

Neben einem fehlenden einheitlichen, im Voraus festgelegten Kalkulationszins bestehen im unvollkommenen Kapitalmarkt Interdependenzen zwischen den einzelnen zu bewertenden Investitions- und Anlageobjekten. Somit kann bei Kapitalknappheit die Vorteilhaftigkeit eines Zahlungsstroms von der Realisierung anderer Investitionen und von korrespondierenden Zahlungsströmen abhängen. Erst aus der Lösung des Totalmodells, welches die Interdependenzen zwischen den einzelnen Investitions- und Anlageobjekten simultan erfasst, lässt sich der „richtige“ Kalkulationszins ableiten. Dieser stellt somit nicht mehr eine Eingangsgröße, sondern vielmehr ein modellendogenes Ergebnis der Investitionsrechnung dar (vgl. Hering 2015 S. 142).

Dieser Zusammenhang wird in der betriebswirtschaftlichen Literatur als das Dilemma der Lenkpreistheorie bezeichnet (vgl. Toll 2011 S. 37). Hering (2015 S. 149 ff.) zeigt jedoch, dass sowohl Partialmodelle, wie zum Beispiel die Kapitalwertmethode, und das Totalmodell bei der Verwendung des richtigen Zinses äquivalent sind. Grundvoraussetzung hierfür ist, dass für die Bewertung der Zahlungen ein sogenannter Steuerzins verwendet wird (vgl. Gerst 2015 S. 102). Dieser leitet sich aus den Zahlungsreihen von Grenzobjekten ab. Für diese Grenzobjekte (Grenzverwendung) kommt eine Vielzahl verschiedener Möglichkeiten in Frage. Bei der optimalen Lösung des Totalmodells wird die Zahlungsreihe einer Investition mit dem Grenzzinssatz gerade noch durchgeführt (vgl. Hering 2015 S. 144). Gerst (2015 S. 93) analysiert auf dieser Grundlage aufbauend anhand der Daten der Bundeswaldinventur I und II das Nutzungsverhalten verschiedener Waldbesitzer und leitet daraus mithilfe diskreter Entscheidungsmodelle entscheidungsorientierte Grenzzinssätze für verschiedene Waldbesitzarten ab.⁴²

Aufgrund der fast ausschließlichen Eigenkapitalfinanzierung von privaten Forstbetrieben und der Annahme, dass Forstbetriebe durch ihre betriebliche Steuerung entstehende Liquiditätseingänge zum Beispiel durch eine kurzzeitige Erhöhung des Holzeinschlages oder durch das Aufschieben von Investitionen ausgleichen können, wird im Folgenden aufgrund der dargestellten Zusammenhänge und der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Partialmodelle auf eine Differenzierung zwischen Soll- und Habenzinsen verzichtet. Ebenso wird an der in der forstlichen Fachliteratur meist üblichen Verwendung eines über den gesamten Produktionszeitraum konstanten Zinsfußes festgehalten.⁴³ Zeitliche Schwankungen werden

⁴² Gerst (2015 S. 99) berechnet Grenzzinssätze von 2,5% für den Privatwald und 1,6% für den Staatswald.

⁴³ Aufgrund des langen Produktionszeitraums dürfte dieser in der betrieblichen Realität jedoch schwanken (vgl. Alvarez und Koskela 2006 S. 172).

dabei ebenso wie eventuelle Kosten- und Preisveränderungen durch Inflationseffekte ausgeblendet.

Zur Einordnung der Höhe des Zinsfußes wird auf die beschriebenen Literaturangaben zurückgegriffen. Die Auswirkung der Zinshöhe wird auf die Vorteilhaftigkeit verschiedener Mischungsanteile der Baumarten im Rahmen eines Variantenstudiums analysiert mit der Gewissheit, dass es keinen einheitlichen, für alle Forstbetriebe gleichen Zinsfuß geben kann. Als Basis wird für die folgenden Analysen ein Zinsfuß von 1,5% zugrunde gelegt, der z. B. im Rahmen von Variantenstudien in der Ergebnisdarstellung von 0–10% für die Annuität der einzelnen Mischungsvarianten variiert wird (vgl. Abbildung 47).

6.8 Flächengemeinkosten

Baumartenspezifische Gemeinkosten oder Gemeinkosten für Bestände mit unterschiedlichen Mischungsanteilen werden in der Regel in den Forstbetrieben nicht separat erfasst (in Anlehnung an Möhring 1986 S. 87). Diese betrieblichen Kosten, die durch die Bewirtschaftung der Bestände im Zusammenhang mit der Holzproduktion anfallen und die sich nicht eindeutig den einzelnen Baumarten zuordnen lassen, werden daher unabhängig von der Baumartenzusammensetzung des Bestandes als flächenbezogene Fixkosten in die hier verwendeten Modelle eingebunden. Zu diesen Kosten zählen in Anlehnung an die Gliederung der forstlichen Deckungsbeitragsrechnung die Kosten für die Erschließung, die Verwaltungs- und die Forstschutzkosten. Weitere sonstige Kosten und Erlöse, wie zum Beispiel durch Nebennutzungen, werden nicht berücksichtigt.

Als Verwaltungskosten wurden im Modell in Anlehnung an Möhring und Wilhelm (2013b S. 25) 100 €/ha und Jahr angenommen. Dieser Wert wurde aus den Angaben einer Sonderbefragung der Betriebe des Privatwaldbetriebsvergleiches Westfalen-Lippe abgeleitet. Die geringen Kosten des Forstschutzes wurden aus Vereinfachungsgründen direkt den Verwaltungskosten zugeschlagen und sind bereits in diesen berücksichtigt. Als Wegebau- und Wegeunterhaltungskosten wurden 20 €/ha und Jahr unterstellt.⁴⁴

⁴⁴ Im Vergleich zu den in Kapitel 2.2 mit der multiplen Regressionsanalyse ermittelten baumartengruppenspezifischen Fixkosten werden im Folgenden baumartenspezifische Verwaltungs- und Erschließungskosten verwendet. Hierdurch werden die Unterschiede in der biologischen Produktion bewertet und die Unterschiede z. B. aufgrund der geographischen Lage (Gebirge, Mittelgebirge oder Ebene) sowie in der Organisation des Betriebes ausgeblendet.

7 Methoden der Investitionsrechnung zur Beurteilung der Nadelholzanreicherung

Den naturalen, aus der waldbaulichen Produktion resultierenden Daten steht im Forstbetrieb gleichsam spiegelbildlich ein Finanzprozess gegenüber. Auf der einen Seite sind mit waldbaulichen Tätigkeiten Zahlungen für die eingesetzten Produktionsfaktoren notwendig. Auf der anderen Seite fließen dem Forstbetrieb durch den Absatz seiner Produkte auch Zahlungsmittel zu (in Anlehnung an Schierenbeck und Wöhle 2012 S. 367). Produktionsentscheidungen im Forstbetrieb sind dementsprechend gleichzeitig auch Investitionsentscheidungen. Von einer Investition wird im Zusammenhang mit dem betrieblichen Leistungsprozess gesprochen, wenn es sich um eine Maßnahme handelt, die die Produktions- oder Absatzkapazität des Forstbetriebes quantitativ und/oder qualitativ verändert bzw. sichert (in Anlehnung an Schierenbeck und Wöhle 2012 S. 375).

Aus Sicht der betrieblichen Finanzwirtschaft liegen den Investitionen betriebliche Entscheidungen zugrunde, wie zum Beispiel die Anreicherung eines Laubholzbestandes durch die Pflanzung von Nadelholz, die einen Kapitalbedarf verursachen und eine entsprechende Kapitalbindung zur Folge haben. Hierdurch wird freies Kapital im Forstbetrieb in gebundenes Kapital umgewandelt. Investitionen in die Begründung von Waldbeständen sind aufgrund des im Vergleich zu industriellen Prozessen sehr langen forstlichen Produktionszeitraums mit einer langen Amortisationsdauer und mit einem vergleichsweise langen Zeitraum der Kapitalbindung verbunden.

Traditionell stellt die Vermarktung des Rohholzes die Haupt- und nicht selten sogar die einzige Finanzierungsquelle von Forstbetrieben dar (vgl. Köpf 1992 S. 67). Folglich hat das nachhaltig produzierte Holzvolumen und die damit erzielten erntekostenfreien Holzerlöse einen direkten Einfluss auf die finanzielle Situation des Betriebes. Die betriebliche Baumartenzusammensetzung trägt also aufgrund der unterschiedlichen nachhaltigen naturalen Leistungskraft der verschiedenen Baumarten entscheidend zum wirtschaftlichen Erfolg des Betriebes bei (vgl. Möhring und Wilhelm 2015 S. 21).

Da forstbetriebliche Entscheidungen auf zwei Ebenen im Betrieb getroffen werden, nämlich auf der Ebene des einzelnen Bestandes mit seiner individuellen Baumartenzusammensetzung und auf der Ebene des gesamten Betriebes (vgl. Reed 1986 S. 63 f.), wird im Folgenden zuerst am Beispiel des Einzelbestandes die Bewertungsmethode zur Beurteilung der Folgen einer Nadelholzanreicherung von Laubholzbeständen anhand der finanzwirtschaftlichen Teilziele Liquidität und Rentabilität analysiert. Auf diesen Grundlagen aufbauend wird die Rentabilitätsberechnung anhand der dargestellten forstbetrieblichen Modelle weiter auf der Ebene des Betriebes durchgeführt und durch langfristige Analysen am Beispiel des Nadelholzanreicherungsprozesses ergänzt.

7.1 Finanzierung von Forstbetrieben

Forstbetriebe sind zum einen in ihrer Finanzierung aufgrund der Höhe und der Dauer der Kapitalbindung und der daraus resultierenden sehr langen Kapitalumschlagdauer meist mit mehreren Jahrzehnten überwiegend eigenfinanziert (vgl. Urigshardt 2010 S. 86). Die Anteile an Fremdkapital machen daher meist nur wenige Prozente am Gesamtkapital aus. Hierzu trägt auch die geringe Kapitalrentabilität von Forstbetrieben bei, welche mit einem gleichzeitig hohen Vermögenseinsatz verbunden ist. Eine Finanzierung mit höher verzinstem Fremdkapital schließt sich demzufolge aus.

Ein Vergleich der Vermögens- und Kapitalstruktur von Forstbetrieben macht dies nochmals deutlich: Brabänder (1968 S. 187) zeigt auf, dass der fixe Kapitalbedarf, das Anlagevermögen von Forstbetrieben und der betriebsnotwendige Anteil des Umlaufvermögens durch Eigenkapital gedeckt sein sollten, denn die Vermögensstruktur von Forstbetrieben besteht meist aus einem sehr hohen Anteil an Anlagevermögen (90–95% des Betriebsvermögens). Davon nehmen die Waldbestände (Boden und aufstockendes Holz) mit dem darin gebundenen Kapital mit ca. 90% einen sehr hohen Anteil ein. Das Umlaufvermögen auf der anderen Seite weist häufig mit rund 1% nur einen geringen Anteil am Betriebsvermögen auf.

Durch einen zeitweiligen Nutzungsverzicht oder einem unter dem nachhaltigen Zuwachs liegenden betrieblichen Holzeinschlag, zum Beispiel in Zeiten nicht befriedigender Holzerlöse, werden gesparte Mittel im Holzvorratsvermögen investiert (vgl. Brabänder 1968 S. 185). In Zeiten knapper betrieblicher finanzieller Mittel ist eine kurzfristige Umwandlung dieser Holzvorräte durch die Ernte in

liquide Mittel möglich. Diese Bildung von Produktionsreserven durch Volumenaufbau stellt eine Sparkassenfunktion des Waldes dar (vgl. Sander 2012 S. 12).

7.2 Liquidität als betriebliche Notwendigkeit

Die Steuerung der aus der Holzproduktion resultierenden betrieblichen Zahlungsmittel und der damit verbundenen Liquidität ist ein wesentlicher Teil des Risikomanagements von Forstbetrieben. Das Liquiditätsmanagement stellt in Betrieben ein aktives Steuerungsinstrument dar, um auf zukünftige Chancen und Risiken reagieren zu können (vgl. Heesen 2011 S. 16). Der Erhalt der betrieblichen Zahlungsfähigkeit ist daher zentraler Bestandteil der betrieblichen Zielsetzung. Das Ziel, ein Liquiditätsgleichgewicht zu erhalten, ist gleichzeitig aber auch die Abwägung zwischen den beiden Zielen der betrieblichen Finanzwirtschaft, der Rentabilität des gebundenen Kapitals und der Liquidität. Denn eine zu hohe betriebliche Liquidität zum Beispiel durch einen überhöhten Kassenbestand, der deutlich über den durchschnittlich zu leistenden Zahlungen liegt, kann zu Lasten der Rentabilität gehen (vgl. Busse 2003 S. 22 f.).

Forstbetriebe können zwar ohne Gewinne und Rentabilität für einen bestimmten Zeitraum überdauern (liquide bleiben), wie es zum Beispiel nach den Preisrückgängen für Sägerundholz aufgrund der schwachen Baukonjunktur in den 1980er Jahren der Fall war (vgl. Köpf 1992 S. 65). Doch die Liquidität als Möglichkeit, alltäglichen Zahlungsverpflichtungen nachzukommen, muss für einen Betrieb jederzeit sichergestellt sein.

Sind die betrieblichen Finanzierungsquellen ausgeschöpft, so sind im Betrieb Maßnahmen zu ergreifen, die in der Regel zu Abweichungen von den erfolgswirtschaftlichen Plänen führen und zum Beispiel einen überplanmäßigen Abbau von Holzvorräten in Beständen zur Folge haben. Um Störungen dieser Art zu vermeiden, bedarf es einer entsprechenden Planung, die den kurz-, mittel- und langfristigen Finanzbedarf enthält und dabei die erfolgswirtschaftlichen Pläne wie auch die finanzwirtschaftlichen Möglichkeiten berücksichtigt. Diese Planung hat sicherzustellen, dass der Betrieb jederzeit und nachhaltig mit einer ausreichenden Liquidität ausgestattet ist (vgl. Brabänder 1968 S. 185).

Das Liquiditätsrisiko kann dabei in zwei Hauptbereiche unterschieden werden. Auf der einen Seite stehen Risiken, die durch Marktstörungen hervorgerufen werden, wenn beispielsweise aufgrund eines Überangebotes an Holz nach großen Sturmereignissen der Holzerlös einbricht und dies zu einem Engpass in der betrieblichen Liquidität führt. Auf der anderen Seite wird mit dem Liquiditätsrisiko auch das allgemeine betriebliche Finanzrisiko bezeichnet. Dies bedeutet, dass der Forstbetrieb aus anderweitigen Gründen nicht mehr in der Lage ist, anstehende Zahlungsverpflichtungen planmäßig und termingerecht zu erfüllen und nur durch das außerplanmäßige Liquidieren von Holzvorräten die Situation der Zahlungsunfähigkeit abgewendet werden kann. Dieser Zustand kann in Anlehnung an Heesen

(2011 S. 17) vielfach auf eine unzureichende längerfristige Liquiditätsplanung zurückgeführt werden.

7.3 Zahlungsstrom des forstlichen Produktionsprozesses

Investitionen aus Sicht des zahlungsorientierten Investitionsbegriffes sind durch die mit der Investition entstehende Zahlungsreihe charakterisiert (vgl. Mensch 2002 S. 3). Für Waldbestände beginnt sie mit einer Auszahlung zum Beispiel für die Bestandesbegründung und den sich in der Regel anschließenden späteren Auszahlungen für die Bestandespflegemaßnahmen. Den Auszahlungen stehen Einzahlungsüberschüsse zum Beispiel aus den Erlösen vermarkteter Holzsortimente aus Durchforstungen zu späteren Zeitpunkten oder der Zielstärkennutzung am Ende des Produktionsprozesses gegenüber.

In Abbildung 40 sind beispielhaft der Zahlungsstrom eines Buchen-Fichten-Mischbestandes mit einem Mischungsanteil beider Baumarten zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung von 50% (Mischungsvariante M₂) und der Zahlungsstrom eines reinen Buchenbestandes (Variante M₄) zum Vergleich für die Bestandesfläche von einem Hektar für eine Umtriebszeit inklusive Kalamitäts- und Endnutzung dargestellt. Aus Gründen einer verbesserten Übersicht bleiben an dieser Stelle Zahlungen unberücksichtigt, die aus neu begründeten Flächenanteilen der ausscheidenden Flächen vor dem Erreichen der Umtriebszeit resultieren. Diese werden an dieser Stelle dem Nachfolgebestand zugeordnet.

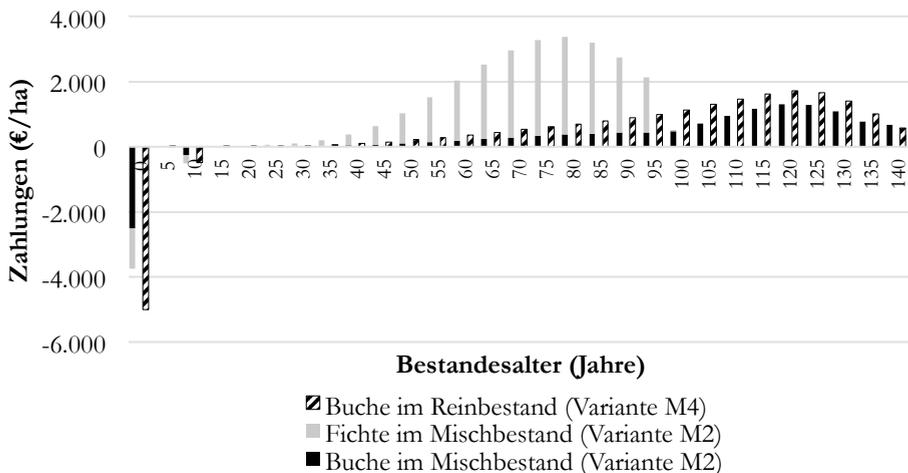


Abbildung 40: Zahlungsstrom eines Buchen-Fichten-Mischbestandes (50% Flächenanteil beider Baumarten bei Begründung (Variante M₂)) im Vergleich mit dem Zahlungsstrom eines reinen Buchenbestandes (Variante M₄) inklusive Kalamitäts- und Zielstärkennutzung

Die Zahlungsströme der 1 ha großen Mischbestände in Abbildung 40 beginnen mit der Auszahlung für die Bestandesbegründung. Im Modell wird an dieser Stelle jeweils ein durch Pflanzung neu zu begründender Bestand unterstellt. Dies führt

für den Mischbestand zu einer Auszahlung in Summe für beide Baumarten von 3.750 € und den Buchenreinbestand von 5.000 €. Im Alter 10 schließt sich in beiden Beständen eine Auszahlung für die Pflege von 500 €/ha an. Mit fortschreitendem Bestandesalter steigen die Einzahlungen durch die Durchforstungen und die Zielstärkennutzung gegen Ende der Produktionszeiträume. Deutlich werden bei dem Zahlungsstrom des Mischbestandes die deutlich höheren und früheren Einzahlungen der Fichte im Vergleich zum reinen Buchenbestand. Die Einzahlungen der Buche erfolgen sowohl im Misch- wie auch im Reinbestand bedingt durch die geringere Zuwachsleistung und aufgrund der später einsetzenden Zielstärkennutzung im Vergleich zur Fichte deutlich später. Die unterschiedlichen Produktionszeiträume der beiden Baumarten führen somit im Mischbestand zu einer stark ausgeprägten Zweigipfeligkeit des Zahlungsstroms, wobei der zweite Gipfel der Buche im Wesentlichen aufgrund der niedrigeren Holzerlöse in seiner Höhe hinter dem der Fichte zurückbleibt. Im Vergleich zum Buchenreinbestand fällt der zweite Gipfel des Mischbestandes in seiner Höhe aufgrund des geringeren Buchenanteils des Mischbestandes geringer aus.

Mit den unterschiedlichen Zahlungsströmen der Bestände sind untrennbar auch Aspekte der betrieblichen Liquidität verbunden. Die Auszahlungen für die Bestandesbegründung und Pflege sind zu finanzieren. Das Kapital hierfür muss in den hier angenommenen, ausschließlich eigenkapitalfinanzierten Forstbetrieben vorhanden und verfügbar sein. Das Volumen der Kapitalbindung hängt dabei maßgeblich von den Baumarten bzw. ihren Anteilen bei der Begründung ab (vgl. Abbildung 40).

Als weiterer entscheidender Aspekt kommt die zeitliche Komponente hinzu, bis diese Auszahlungen durch später erfolgende Einzahlungen wieder gedeckt sind. Beim Vergleich der Beispielbestände wird dies besonders deutlich. Durch die früher und in ihrer Höhe stärker ausfallenden Einzahlungen der Fichte aus den Durchforstungen und späteren Endnutzung ist der Zeitraum im Mischbestand deutlich kürzer als im Buchenreinbestand.⁴⁵ Mit dem Vorratsaufbau der Bestände geht auch die Möglichkeit einher, aufgebaute Vorräte zur Liquiditätsentlastung vorzeitig vor dem Erreichen der planmäßigen Produktionsdauer zu ernten. Durch den Fichtenanteil ist dies für den Mischbestand im Vergleich zum reinen Buchenbestand einerseits früher möglich und andererseits sind im Vergleich zur Buche höhere durchschnittliche Holzerlöse für die Fichte auch für noch nicht zielstarke Sortimente zu erzielen, als dies für die Buche möglich wäre.

Für die Liquidität von Betrieben ist darüber hinaus der aus dem Zahlungsstrom resultierende Überschuss entscheidend. Auch hierzu tragen die Baumarten Buche und Fichte in unterschiedlicher Höhe bei, wie dies die beiden Zahlungsströme in Abbildung 40 beispielhaft darstellen.⁴⁶ Der Vorteil des Fichtenanteils wird hier besonders deutlich.

⁴⁵ Für die Methodik zur Bestimmung des exakten Zeitraums und die Ergebnisse vgl. Kapitel 7.4 und Kapitel 8.2.

⁴⁶ Eine detaillierte Analyse findet sich in Kapitel 8.3.

Der Zahlungsstrom des forstlichen Produktionsprozesses, die Höhe der Ein- und Auszahlungen sowie deren vom Bestandesalter und der waldbaulichen Behandlung abhängiger Verlauf hängen somit unmittelbar von den Baumarten und ihren Anteilen ab.

7.4 Investitionsrechnung zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit von Baumarten und Baumartenmischungen

Die Methoden der Investitionsrechnung können bei der Entscheidungsfindung als Unterstützung dienen, um mit deren Hilfe quantitative, an Liquiditäts- und Erfolgskriterien orientierte Maßstäbe für die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit von alternativen Investitionsmöglichkeiten zu finden (vgl. Schierenbeck und Wöhle 2012 S. 386). Sie können somit auch zur Beurteilung einer Anreicherung von Laubholzbeständen mit Nadelbaumarten dienen.

Insbesondere die Verdichtung der Vielfalt der mit dem forstlichen Produktionsprozess verbundenen Einzeldaten zu einer finanzwirtschaftlichen Beurteilungsgröße ermöglicht eine direkte ökonomische Beurteilung. Die Methoden der Investitionsrechnung bauen dabei auf Modellen auf, die ein vereinfachtes Abbild des realen Entscheidungsprozesses darstellen. Dabei steht das Ziel im Vordergrund, die für die Fragestellung relevanten Komponenten abzubilden, ohne so ein möglichst perfektes Abbild der Realität zu erzeugen und durch Vereinfachungen weniger relevante Bestandteile auszublenden (vgl. Mensch 2002 S. 37 ff.).

Für die Investitionsrechnung können grundsätzlich zwei Teilbereiche unterschieden werden:

Totalmodelle versuchen alle mit der Investition verbundenen Finanzierungs- und Investitionsbestandteile vollständig in das Modell aufzunehmen. In den Partialmodellen dagegen erfolgt die Bestimmung des ökonomischen Vorteils einer Investitionsalternative lediglich anhand von partiellen Entscheidungskriterien (Summe der Verwendung von Prämissen (vgl. Schierenbeck und Liester 2002

In der betrieblichen praktischen Entscheidungsfindung bei Investitionsalternativen haben sich die Partialmodelle aufgrund ihrer vergleichsweise einfachen Anwendung als Vergleichsverfahren von Investitionsalternativen durchgesetzt (vgl. Schierenbeck und Wöhle 2012 S. 390). Dies gilt auch für forstliche Entscheidungsprobleme und Anwendungen in der Waldbewertung.

Amortisationsrechnung

Für private Forstbetriebe ist es eine der zentralen Fragen bei der Bestandesbeurteilung und der damit verbundenen Baumartenwahl, wann mit den ersten Rückflüssen in der Form von positiven erntekostenfreien Holzerlösen gerechnet werden kann. Ebenfalls von besonderem Interesse ist dabei die Frage nach der Länge des Zeitraums, bis die Auszahlungen durch die Kulturbegründung und die

Pflegemaßnahmen durch die Einzahlungsüberschüsse gedeckt sind und somit der Kapitaleinsatz amortisiert ist. Der hierfür benötigte Zeitraum wird als Amortisationszeit (bzw. Kapitalrückfluss- oder Kapitalwiedergewinnungszeit, Pay-off-, Pay-back- oder Pay-out-Periode) bezeichnet (vgl. Bieg und Kußmaul 2009 S. 62). Bieg und Kußmaul (2009 S. 237) zeigen mit einer Befragung von mittelständischen Betrieben aus unterschiedlichen produzierenden Branchen auf, dass die Amortisationsrechnung als einfaches Vergleichsverfahren bei rund 50% der befragten Betrieben im Rahmen der Entscheidungsfindung für die Beurteilung von Investitionen eingesetzt wird.

Die Amortisationszeit kann als ein vereinfachter Maßstab für die Ermittlung des mit der Investition verbundenen Liquidationsrisikos verwendet werden. Dabei wird unterstellt, dass Entscheidungsalternativen mit einem umso höheren Liquiditätsrisiko verbunden sind, je länger es dauert, bis das investierte Kapital durch Zahlungsüberschüsse zurückgeflossen ist (vgl. Götze 2008 S. 63 f.). Je früher die eingesetzten Mittel zurückfließen, desto schneller stellen diese die Liquidität des Betriebes sicher. Hierdurch werden mit der kürzeren Amortisationsdauer geringere Finanzierungskosten und ein geringeres Liquiditätsrisiko unterstellt (vgl. Taschner 2013 S. 96 f.).

In der statischen Amortisationsrechnung werden dabei zwei grundlegende Methoden unterschieden: die Durchschnitts- und eine Kumulations- bzw. Totalrechnung (vgl. Götze 2008 S. 63).

Für die Analyse der aus der Anreicherung von Buchenbeständen mit Fichte entstehenden Mischungen sowie für den Vergleich der Reinbestände der Baumarten Buche und Fichte eignet sich in Anlehnung an Taschner (2013 S. 96 f.) die Kumulationsrechnung. Hierbei werden in jeder der Perioden die Einnahmenüberschüsse ermittelt und diese so lange kumuliert, bis die Summe dieser Einnahmenüberschüsse der Summe des eingesetzten Kapitals entsprechen. Diese Vorgehensweise eignet sich insbesondere, wenn die Einnahmenüberschüsse der einzelnen Perioden voneinander abweichen (vgl. Schierenbeck und Wöhle 2012 S. 407), wie es bei Waldbeständen meist der Fall ist.

Das Verfahren der Amortisationsrechnung ist trotz seiner Beliebtheit in der Praxis nicht ohne Kritik, da es nur eine sehr vereinfachte Grundlage für die Abschätzung des mit der Bestandesbegründung verbundenen Investitionsrisikos darstellt, welches in der Unsicherheit über die Rückgewinnung des mit der Bestandesbegründung verbundenen Kapitaleinsatzes seinen Ausdruck findet. Denn, je länger die Amortisationsdauer ausfällt, umso höher wird das mit der Investition verbundene Risiko eingeschätzt (vgl. Schierenbeck und Wöhle 2012 S. 408). Eine kürzere Amortisationsdauer einer Investition wird aus Sicht der Amortisationsrechnung aufgrund des als geringer erachteten Liquiditätsrisikos als vorteilhafter angesehen (vgl. Schroeter 2002 S. 175).

7.5 Dynamischen Investitionsrechnung zur Beurteilung von Baumartenmischungen und Baumarten

Den statischen Verfahren der Investitionsrechnung stehen die dynamischen Investitionsrechenverfahren gegenüber, die die gesamte Laufzeit einer Investition und den zeitlichen Unterschied der zu den einzelnen Zeitpunkten anfallenden Ein- und Auszahlungen miteinbeziehen. Hierdurch werden zukünftige Zahlungen, die zum Beispiel im Rahmen der Zielstärkennutzung eines Bestandes entstehen, anders als gegenwärtige Zahlungen für die Begründung des Bestandes zum Beginn der Investition bewertet. Der Effekt des Zinses bewirkt dabei, dass Einzahlungen in späteren Perioden gegen Ende des Bestandeslebens ein geringerer Wert als den Ein- und Auszahlungen früherer Perioden beigemessen wird (vgl. Obermeier und Gasper 2008 S. 41). Die dynamischen Verfahren der Investitionsrechnung beseitigen hierdurch den charakteristischen Mangel der statischen Verfahren.

Voraussetzung für die Anwendung der dynamischen Verfahren⁴⁷ ist ebenfalls die konkrete Ermittlung des Zahlungsstroms des Investitionsvorhabens, der aus dem beschriebenen forstlichen Produktionsprozess resultiert. Dabei werden in Anlehnung an Moroff und Focke (2016 S. 148 ff.) die folgenden ergänzten Grundannahmen unterstellt, die auch für waldbauliche Investitionen gelten:

- Der mit der waldbaulichen Investition verbundene Zahlungsstrom mit seinen Ein- und Auszahlungen und der verwendete Zinssatz gelten als bekannt und die Ein- und Auszahlungen treten sicher zeitpunkts- und betragsgenau ein.
- Die mit der Investition verbundenen Ein- und Auszahlungen fallen immer am Ende der jeweiligen Periode, d. h. nachschüssig an. Dies hat zur Folge, dass durch die im Modell verwendeten fünfjährigen Perioden Zahlungen während der Periode ausgeblendet werden und somit die unterperiodige Liquiditätssicherung unbeachtet bleibt.
- Darüber hinaus gelten die Prämissen des vollkommenen Kapitalmarktes mit der Identität von Soll- und Habenzins und der transaktionskostenfreien jederzeitigen Kapitalaufnahme- und -anlagemöglichkeit. Hierdurch wird auf eine Differenzierung in Fremd- und Eigenkapital verzichtet.
- Weiter unterstellen die Prämissen der dynamischen Investitionsrechnung eine vollkommene Markttransparenz. Dies bedeutet, dass für alle Marktteilnehmer keine Informationsasymmetrien vorliegen.
- Auf die Einbeziehung von nicht monetären und kalkulatorischen Größen wird ebenso verzichtet wie auf eine detaillierte Aufschlüsselung der betrieblichen Fixkosten, die unabhängig von der Baumartenwahl für die forstliche Bewirtschaftung anfallen und in den hier angestellten Modellrechnungen über die Erschließungs- und Verwaltungskosten hinausgehen.

⁴⁷ Die Beschreibung der Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung sowie eine Erläuterung zum Flächenbezug sind im Anhang in Kapitel 12.4 und folgende dargestellt.

- In der betrieblichen Praxis kann es sich sehr aufwendig gestalten, einzelne Zahlungen verursachungsgerecht einem einzelnen Bestand und den darin enthaltenen Baumarten zuzuordnen. Häufig werden Maßnahmen in organisatorischen Einheiten geplant, die über den Einzelbestand hinausgehen. Im Rahmen der durchgeführten Investitionsrechnung wird angenommen, dass einzelne Zahlungen unabhängig von weiteren betrieblichen Investitionsobjekten oder Gegebenheiten entstehen und keine Verbund- bzw. Synergieeffekte entstehen.

Bewertung der Teilflächen

Der den Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung zugrunde liegende Zahlungsstrom ist untrennbar mit der risiko- und nutzungsbedingten sowie von der Ausdehnung der Buchenkronenschirmfläche abhängigen Flächenentwicklung des Bestandes verbunden. Diese unterschiedlich alten Flächenanteile sind darauf zurückzuführen, dass nicht alle der einst im Jahr 0 begründeten Flächenanteile das planmäßige Umtriebszeitalter der beiden Mischbaumarten erreichen. Während einzelne Bestandteile der Fichte durch die Ausdehnung der Buchenkrone direkt zur Buchenfläche übergehen, scheiden weitere Fichtenanteile aus und gehen erneut in die Begründung des Nachfolgebestandes über.⁴⁸

Dabei gibt es, wie Abbildung 41 und Abbildung 42 für die altersbedingten Flächenanteile der Mischbestandsvariante M_2 verdeutlichen⁴⁹, keine einheitliche Produktionszeit für alle Flächenteile, sondern vielmehr eine Häufigkeitsverteilung von unterschiedlichen wahrscheinlichen Produktionsdauern und demzufolge beispielsweise für die Berechnung der Annuität auch von unterschiedlichen korrespondierenden Annuitäten.

Die hieraus resultierenden Erntezeitpunkte und korrespondierenden Flächenanteile sind in der Abbildung 41 für die Buchenfläche und in Abbildung 42 für die Fichtenfläche für die im Modell verwendeten fünfjährigen Perioden dargestellt. Die aufgetragenen Teilflächen entsprechen den Produkten aus Erntealter und zugehöriger risiko- und endnutzungsbedingter Ausfall- bzw. bei der Buche auch Ausdehnungswahrscheinlichkeit der Krone.

⁴⁸ Eine detaillierte Beschreibung dieser Zusammenhänge findet sich in Kapitel 0.

⁴⁹ Hier für die beiden Baumarten zur besseren Übersicht nach Baumartenflächen getrennt dargestellt.

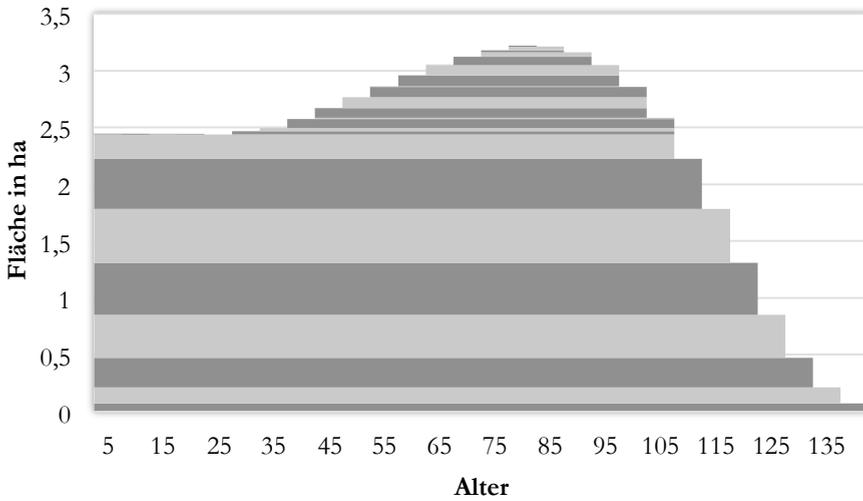


Abbildung 41: Verteilung der Flächen und Produktionsdauern der Buche in der Betriebsklasse der Variante M_2 des Mischwaldmodells

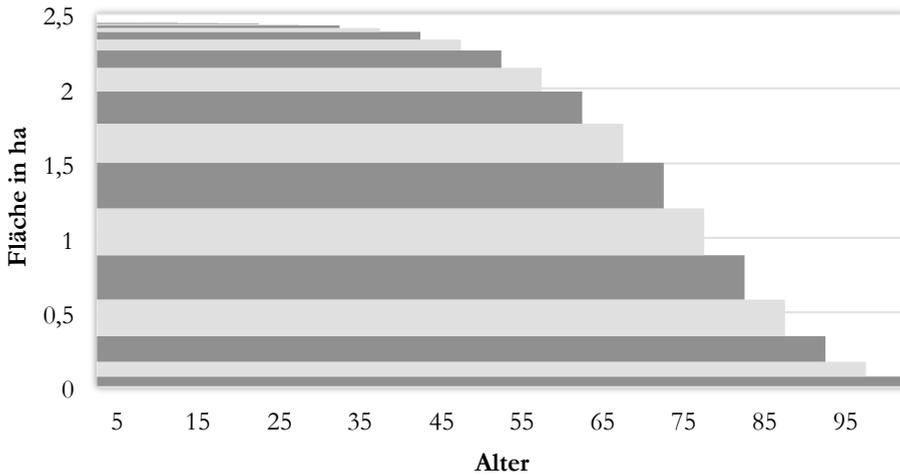


Abbildung 42: Verteilung der Flächen und Produktionsdauern der Fichte in der Betriebsklasse der Variante M_2 des Mischwaldmodells

Für jede der einzelnen Teilflächen und ihre korrespondierende Produktionsdauer wird der jeweilige Zahlungsstrom berechnet. Dabei gehen jeweils die Ausgaben für die Bestandesbegründung, -pflege sowie die erntekostenfreien Einnahmen aus den Durchforstungen und der Endnutzung mit ein.

8 Ergebnisse der Modellanalyse

8.1 Fichtenanteil und Produktivität der Mischbestände

Eine der entscheidenden Fragen bei der Analyse von Mischbeständen ist die naturale Leistung der an der Mischung beteiligten Baumarten. Im Mittelpunkt einer Vielzahl neuer waldwachstumskundlicher Arbeiten, die sich mit Mischungseffekten von Mischbeständen beschäftigen, steht diese Fragestellung, indem ein Vergleich zwischen der Produktivität von Mischbeständen mit zwei oder mehr Baumarten mit der von benachbarten Reinbeständen anhand des Zuwachses gezogen wird (vgl. Pretzsch et al. 2016 S. 122).

Dieser Vergleich lässt sich auf die mit BWINPro generierten Simulationsergebnisse für den Buchen- und Fichtenreinbestand sowie die einzelnen Mischungsvarianten der beiden Baumarten und die daraus weiterentwickelten Betriebsklassen übertragen. Werden hierfür in Abbildung 43 die durchschnittlichen Gesamtwüchse in Vfm/ha/Jahr, der beiden Baumarten Buche und Fichte in der jeweiligen Betriebsklasse über dem durchschnittlichen Mischungsanteil an der Betriebsklasse im bereits in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Kreuzdiagramm aufgetragen, so lässt sich dieser Vergleich zwischen der Produktion der Rein- und Mischbestände veranschaulichen.

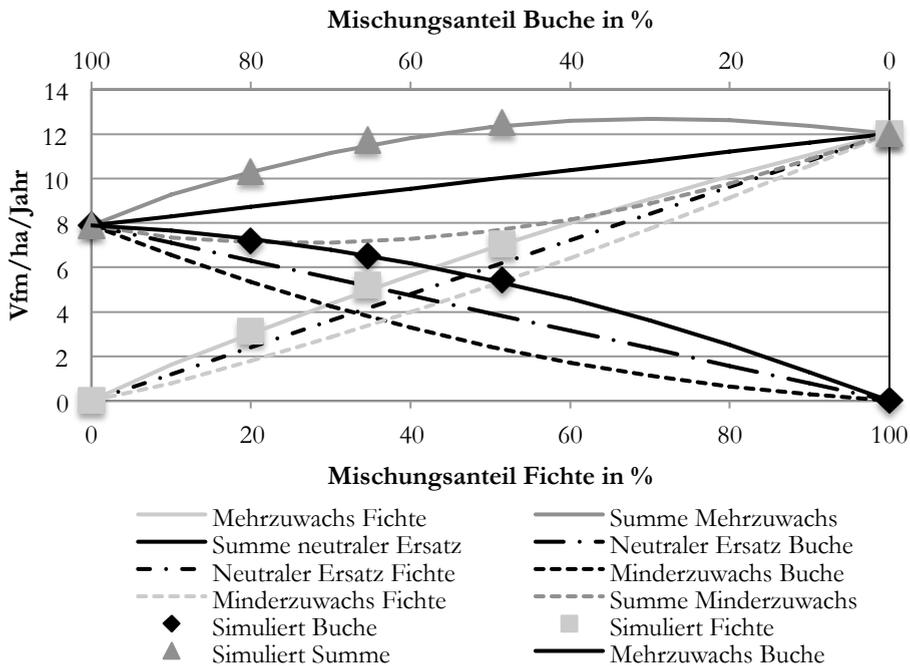


Abbildung 43: Durchschnittlicher Gesamtzuwachs der Simulationsergebnisse in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Mischungsanteil der Baumarten an den Betriebsklassen

Deutlich wird bei der Einzelbetrachtung der beiden Baumarten, dass sowohl die Produktivität der Buche als auch die der Fichte für alle Mischungsvarianten über der unterbrochenen schwarzen Linie des neutralen identischen Ersatzes liegen und dass somit beide Baumarten von der Mischung im Rahmen der Simulation profitieren – eine gegenseitige Begünstigung, die als Mutualismus beschrieben werden kann (vgl. Pretzsch et al. 2013 S. 269). Unverkennbar ist aber auch, dass die Baumart Buche, insbesondere in den mittleren Mischungsanteilen, stärker von der Mischung mit Fichte profitiert als die Fichte. In Summe der beiden Baumarten wird der höchste Mehrzuwachs im Vergleich zu den anteiligen Reinbeständen bei einem durchschnittlichen Mischungsanteil der beiden Baumarten von rund 50% mit 2,34 Vfm/ha/Jahr erreicht.

Die Simulationsergebnisse zeigen somit den von Pretzsch (2009 S. 29 ff.) beschriebenen Mehrzuwachs beider Baumarten im Mischbestand. Ebenso wie bei den Untersuchungen von Pretzsch (2009 S. 30) leistet in der Mischung die Buche im Vergleich zum Reinbestand einen höheren Beitrag als die Baumart Fichte. In der Summe kommt es für die Mischung beider Baumarten wie oben dargestellt zu Volumenmehrzuwächsen von bis zu 24% pro Hektar und Jahr bei einem durchschnittlichen Fichtenanteil von 50%. Kennel (1965 S. 177) kommt zu ähnlichen Ergebnissen und beschreibt eine Volumenmehrleistung von bis zu 15% im Ver-

gleich zum Reinbestand, während Pretzsch, Schütze und Biber (2016 S. 122) Mehrzuwächse von bis zu 30% für komplementäre Mischungen ermitteln.

Dieser Vergleich der Ergebnisse mit der Fachliteratur ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da beispielsweise die den Ergebnissen von Pretzsch (2009 S. 27 ff.) zugrunde liegenden Bestände unterschiedliche Mischungsarten und Bonitäten aufweisen und diese modellhaften Simulationsergebnissen gegenübergestellt wurden, die die Realität nur begrenzt abbilden können. Die Bandbreite der unterschiedlichen Ergebnisse in der Literatur zeigt auch, dass die Leistung der Baumarten im Mischbestand von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist, die in hohem Maße insbesondere von den Standortsgegebenheiten (vgl. Pretzsch 1992 S. 197), der Mischungsform und den Mischungsanteilen abhängen. Anhand der simulierten Daten kann jedoch gezeigt werden, dass Mischbestände aufgrund ihrer höheren Produktivität nicht durch eine reine Addition der anteiligen Flächenwerte von Reinbeständen, wie zum Beispiel durch die Verwendung von Ertragstafelwerten, dargestellt werden können.

Obwohl für Mischbestände, wie sie in den meisten Waldbauprogrammen enthalten sind, klassische Ertragstafeln für Reinbestände eher ungeeignet sind, werden diese trotz fehlender Mischbestandsinformationen insbesondere im Kommunal- und Privatwald immer noch verwendet (vgl. Pretzsch 2016 S. 47). Wird unterstellt, wie die oben dargestellten Ergebnisse in Abbildung 43 nahelegen, dass die Mischung von Buche und Fichte im Mischbestand im Vergleich zu Reinbeständen der beiden Baumarten einen Zuwachserhöhenden Effekt hat, so können die Zuwachswerte der Reinbestände mit einem vom Mischungsanteil der Baumarten abhängigen Faktor multipliziert werden, um näherungsweise von diesen Reinbeständen ausgehend auf den Zuwachs der Baumarten im Mischbestand zu schließen. Die folgende Tabelle zeigt hierfür die aus dem in Abbildung 43 dargestellten Kreuzdiagramm entwickelten baumartenindividuellen, vom Mischungsanteil von Buche und Fichte abhängigen Zuwachsfaktoren für die den Simulationsdaten zugrunde liegenden Standorts-, Wuchseigenschaften und Mischungsform (vgl. Kapitel 3.3.3 und Kapitel 3.1.2.2).

Tabelle 11: Vom Mischungsanteil abhängige Zuwachsfaktoren für Buchen-Fichten-Mischbestände

Mischungsanteil (%): Baumart:	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Buche	1,63	1,59	1,53	1,45	1,38	1,30	1,23	1,15	1,08	1,00
Fichte	1,35	1,26	1,21	1,17	1,14	1,11	1,08	1,05	1,02	1,00

8.2 Fichtenanteil und Liquidität – Amortisationszeiten der Baumarten und Baumartenmischungen

Vor dem Hintergrund einer kostengünstigen Buchennaturverjüngung stellt sich bei der künstlichen Einbringung der Fichte die Frage, wann die mit dieser Investition verbundenen Ausgaben durch Einnahmen aus Holzerlösen wieder gedeckt sind. Einen ersten Blick auf die mit der Anreicherung des Buchenbestandes mit Nadelholz verbundenen Liquiditätsauswirkungen ermöglicht die Amortisationsrechnung.

Die kumulierten erntekostenfreien Holzerlöse abzüglich der Auszahlungen für die Kulturbegründung und Pflege werden in Abbildung 44 für die Reinbestände der Baumarten Buche und Fichte, die einzelnen Mischbestandsvarianten und den Buchenreinbestand als Naturverjüngungsvariante ohne Pflanzkosten dargestellt. Hieraus lassen sich für die jeweilige Misch- bzw. Reinbestandsvariante Amortisationszeiten ablesen.

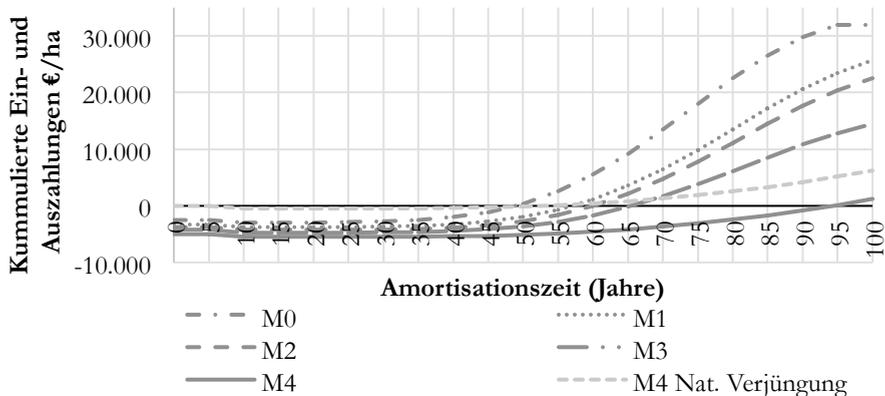


Abbildung 44: Amortisationszeit der Bestandesbegründungs- und Pflegekosten für den Buchenreinbestand (M_4), die Buchenreinbestandsvariante mit Naturverjüngung (M_4 Nat. Verjüngung), den Fichtenreinbestand (M_0) und die Mischbestände mit einem Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung von 30% (M_3), 50% (M_2) und 70% (M_1)

Abbildung 44 macht insbesondere die unterschiedlich hohen Auszahlungen zum Investitionsbeginn deutlich, die sich stark in Abhängigkeit vom Baumartenanteil auf den Amortisationszeitraum auswirken. Für die Naturverjüngungsvariante (M_4 Nat. Verjüngung) fallen hierbei lediglich die Pflegekosten in Höhe von 500 € im Jahr 10 an. Je höher der Buchenanteil bei den Varianten inklusive Begründungskosten ist, umso höher werden die korrespondierenden Auszahlungen für die Kulturbegründung aufgrund höherer Pflanzzahlen und Pflanzkosten und umso niedriger und später fallen die Einnahmen aus den Durchforstungen bzw. der Endnutzung im Vergleich zu den fichtenreicheren Varianten an.

Hierdurch führt eine Erhöhung des Buchenanteils im Mischbestand auch zu einer Verlängerung der Amortisationszeit im Vergleich zu fichtenreicheren Mischungsvarianten. Selbst die Variante des Buchenreinbestandes ohne Kosten für

die Kulturbegründung (Variante M_4 Nat. Verjüngung) hat aufgrund der im Vergleich zur Fichte späteren und niedrigeren Erträge mit 55 Jahren eine längere Amortisationszeit als die Fichtenreinbestandsvariante mit Pflanzkosten (Variante M_0) mit einer Amortisationszeit von 50 Jahren. Für den Mischbestand mit einem Mischungsanteil beider Baumarten zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung von 50% (Variante M_2) errechnet sich eine Amortisationszeit von 65 Jahren, bis die getätigten investiven Ausgaben durch die erntekostenfreien Holzerlöse wieder gedeckt sind. Im Vergleich hierzu liegt die Amortisationszeit des Buchenreinbestandes inklusive Begründungskosten (Variante M_4) bei 95 Jahren.

Mit fortschreitendem Bestandesalter geht ein Volumen- und Wertzuwachs des verbleibenden Bestandes einher, der jedoch in der dargestellten Amortisationsrechnung der „normalen“ planmäßigen Nutzung nicht berücksichtigt wird. Insbesondere für private Waldbesitzer ist mit der Baumartenwahl auch die Frage verbunden, ab wann durch die Baumarten- oder Baumartenmischungswahl in den Bestand investiertes Kapital bei einem vorzeitigen außerplanmäßigen Abtrieb des Bestandes amortisiert ist. Zur Ermittlung dieses Amortisationszeitraums werden die durch eine mögliche vollständige Ernte des Bestandes entstehenden Liquidationserlöse in Form des Abtriebswertes bei den in Abbildung 45 dargestellten kumulierten Werten für die Mischungsvarianten, die Reinbestände und die Buchenreinbestandsvariante mit Naturverjüngung mitberücksichtigt.

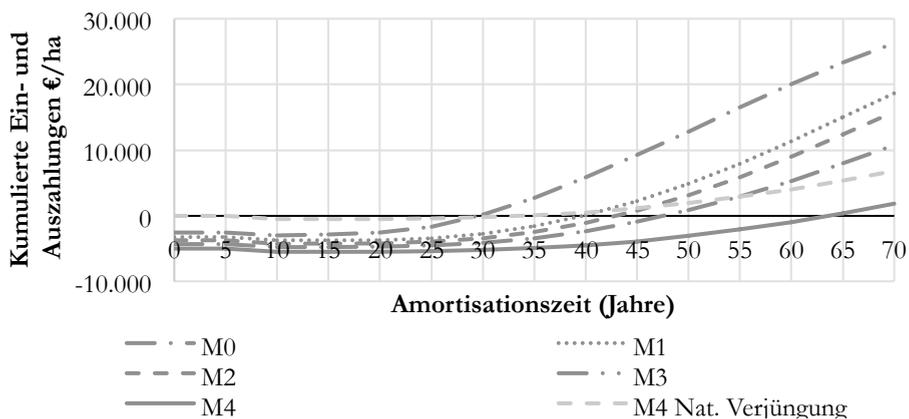


Abbildung 45: Amortisationszeit der Bestandesbegründungs- und Pflegekosten für Rein- und Mischbestände unter Berücksichtigung des Abtriebswertes für den Buchenreinbestand (M_4), die Buchenreinbestandsvariante mit Naturverjüngung (M_4 Nat. Verjüngung), den Fichtenreinbestand (M_0) und die Mischbestände mit einem Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung von 30% (M_3), 50% (M_2) und 70% (M_1)

Auch bei der Berücksichtigung des Abtriebswertes zur Berechnung des Amortisationszeitraums ist der unterschiedliche Einfluss der Baumarten Buche und Fichte auf dessen Länge unverkennbar. Nach dem mit der Amortisationsrechnung verbundenen Risikoverständnis gilt für die betriebliche Liquidität, je höher der Buchenanteil der Mischbestandsvarianten und des Reinbestandes inklusive Kultur-

kosten ausfällt, desto länger gestaltet sich der Amortisationszeitraum und es steigt die Höhe des Liquiditätsrisikos.

Beide Varianten der Amortisationsrechnung führen zu derselben relativen Vorteilhaftigkeit der einzelnen Misch- bzw. Reinbestandsvarianten. Deutlich wird aber auch, dass sich mit dieser zweiten Amortisationsbetrachtung durch die Berücksichtigung der im verbleibenden Bestand gebundenen Werte der Amortisationszeitraum für das Beispiel des Mischbestandes mit einem Anteil beider Baumarten von 50% zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung von 65 Jahren auf 45 Jahre verkürzt. Im Vergleich hierzu ergibt sich für den Buchenreinbestand mit Kulturkosten eine Amortisationszeit von rund 65 Jahren bzw. für die Variante ohne Kulturkosten eine Amortisationszeit von 35 Jahren.

8.3 Fichtenanteil und Rentabilität

Auch wenn die Amortisationsrechnung Aussagen über den Zeitpunkt des Mittelrückflusses der einzelnen Misch- und Reinbestandsvarianten ermöglicht, so lassen sich mit dieser Methode die eigentliche Rentabilität und damit die Auswirkung auf den betrieblichen Erfolg des durch Fichte angereicherten Buchengrundbestandes im Vergleich zum Buchen- bzw. Fichtenreinbestand nur sehr begrenzt beurteilen. Diese Erfolgsbeurteilung der einzelnen Mischbestandsvarianten im Vergleich zum Buchen- und Fichtenreinbestand erfolgt daher im Folgenden anhand der mit den Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung berechneten Ergebnisse.

Annuität

In Abbildung 46 sind die Annuitäten als durchschnittliche jährliche Erfolgsgröße der Einzelbestände in €/ha/Jahr über dem Fichtenanteil des Bestandes zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung mit einem Zinssatz von 1,5% als Linie aufgetragen.



Abbildung 46: Annuitäten in Abhängigkeit vom Fichtenanteil an der Baumartenmischung (Zeitpunkt der Bestandesbegründung) bei einem Zinssatz von 1,5% (ohne Bodenkosten) und Gerade für den neutralen Ersatz ohne Baumarteninteraktion

Die Annuität steigt dabei, ähnlich wie bei den Kapitalwerten, mit der Erhöhung des Anteils der ertragsstärkeren Fichten im Bestand an, wie in Abbildung 46 ersichtlich ist. Dabei werden zwei wesentliche Gesichtspunkte deutlich: Einerseits führen bereits geringe Beimischungsanteile der Fichte in den Buchengrundbestand zu einer deutlichen Erhöhung der Annuität, bringen diese aus dem negativen Bereich von -127,63 €/ha/Jahr für den Buchenreinbestand inklusive Begründungskosten (Variante M₄) heraus und stärken entsprechend den betrieblichen Erfolg. Für die Mischbestandsvariante M₃ mit einem Fichtenanteil von 30% bei der Bestandesbegründung ergibt sich beispielsweise eine Annuität von -25,14 €/ha/Jahr, während die Annuität der fichtenreicheren Mischbestandsvarianten M₂ mit einem Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung von 50% bei 32,84 €/ha/Jahr liegt. Der Fichtenreinbestand (Variante M₀) weist im Vergleich hierzu eine Annuität von 115,64 €/ha/Jahr auf.

Die dargestellten Annuitäten der Rein- und Mischbestandsvarianten verdeutlichen, dass die Annuität des Buchenreinbestandes bereits durch die Beimischung geringer Fichtenanteile bei einem Zins von 1,5% in den positiven Bereich angehoben wird. Darüber hinaus lassen sie aber auch erkennen, dass geringe Beimischungsanteile der Buche in den Fichtengrundbestand nur zu einem vergleichsweise geringen Rückgang der Annuität führen und geringer ausfallen als der anteilige Ersatz mit Buchen- bzw. Fichtenreinbestandsanteilen, wie sie mit der gepunkteten Gerade dargestellt werden.

Die Wahl des Zinssatzes hat eine direkte (erhebliche) Auswirkung auf die Höhe der Annuität. Seine Veränderung (in 0,05%-Schritten) führt, wenn alle anderen Berechnungsgrößen unverändert beibehalten werden, zu den in Abbildung 47 über dem Zinssatz aufgetragenen und als Linien dargestellten Annuitäten (ohne Bodenkosten). Dabei sinken die Annuitäten mit der Erhöhung des Zinssatzes, ausgehend von einem Zinssatz von 0, der dem zinsfreien Reinertrag entspricht.

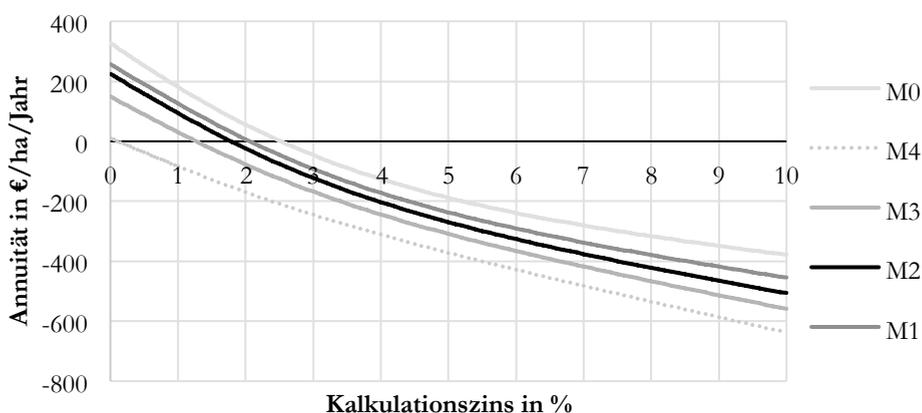


Abbildung 47: Annuitäten der Rein- und Mischbestände (inklusive Mischungseffekten und der vom Mischungsanteil der Fichte abhängigen Risikostärke) in Abhängigkeit vom Kalkulationszins (ohne Erschließungs- und Verwaltungskosten)

An der relativen Vorteilhaftigkeit einer Investitionsalternative (hier Mischungsvariante) im Vergleich zu einer anderen Investitionsalternative (bzw. Mischungsvariante) ändert die Verwendung eines Zinsfußes und seine Höhe, wie in Abbildung 47 für Zinsfüße von 0 bis 10% am Beispiel der Annuität ersichtlich ist, grundsätzlich nichts.

Dementsprechend wird im Folgenden die zinsfreie Annuität, die dem Reinertrag entspricht, weiter in Form des Reinertrages als Vergleichsgröße zur Darstellung der relativen Vorteilhaftigkeit einzelner Mischungsvarianten verwendet, auch wenn hierdurch der zeitliche Anfall der Ein- und Auszahlungen nur unzureichend berücksichtigt ist. Für eine spezifische einzelbetriebliche Verwendung kann dies durch die Einbeziehung betriebsindividueller Zinsfüße angepasst werden. Die hieraus resultierenden betriebspezifischen Annuitäten lassen sich unter Vorgabe eines Kalkulationszinsfußes für die jeweilige Mischungsvariante aus den in Abbildung 47 dargestellten Annuitäten ablesen.

8.4 Reinerträge von Rein- und Mischbestandsbetriebsklassen im Vergleich

Aufbauend auf den Naturaldaten der einzelnen Bestände wurden fünf nachhaltige Betriebsklassen für die Beschreibung der naturalen und ökonomischen Auswirkungen der unterschiedlichen Mischungsanteile gebildet. Dabei wurden für das Wuchsverhältnis der Baumarten, wie in Tabelle 2 bereits dargestellt, für die Buche eine 1. und für die Fichte eine 0. Ertragsklasse verwendet. Die erste Variante stellt mit der reinen Buchenbetriebsklasse das Ausgangsszenario dar, hier bezeichnet mit M4. Ausgehend von dieser Betriebsklasse wird in den weiteren Betriebsklassen der Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung in die jeweiligen Bestände der Betriebsklasse mit einem Mischungsanteil von 30%, 50% bzw. 70% beigemischt. Als weitere Vergleichsgröße wird die reine Fichtenbetriebsklasse ebenfalls dargestellt. Die wichtigsten Kennziffern dieser Betriebsklassen sind in der Tabelle 12, Tabelle 13, Tabelle 14, Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 zusammengefasst:

Tabelle 12: Vergleich der Betriebsklassen – Variante M4, reine Buchenbetriebsklasse

Durchschnittlicher Mischungsanteil Fichte	%	0
Fläche Buche	ha	100
Fläche Fichte	ha	0
Holzvorrat insgesamt Buche	Vfm/ha	269
Holzvorrat insgesamt Fichte	Vfm/ha	0
Summe Holzvorrat insgesamt	Vfm/ha	269
Holzzuwachs Buche	Vfm/ha/Jahr	7,90
Holzzuwachs Fichte	Vfm/ha/Jahr	0,00
Summe Holzzuwachs	Vfm/ha/Jahr	7,90
Holzeinschlag Buche, planmäßige Nutzung	Efm/ha	5,97
Holzeinschlag Fichte, planmäßige Nutzung	Efm/ha	0,00
Summe Einschlag planmäßige Nutzung	Efm/ha	5,97
Kalamitätsnutzung Buche	Efm/ha	0,35
Kalamitätsnutzung Fichte	Efm/ha	0,00
Summe Kalamitätsnutzung	Efm/ha	0,35
Anteil außerplanmäßige Nutzung Buche	%	5,55
Anteil außerplanmäßige Nutzung Fichte	%	0,00
Summe Nutzung Buche	Efm/ha	6,32
Summe Nutzung Fichte	Efm/ha	0,00
Summe Nutzung	Efm/ha	6,32
Holzerlöse Buche, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	330
Holzerlöse Fichte, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	0
Summe Holzerlöse, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	330
Holzerlöse Buche, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	16
Holzerlöse Fichte, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	0
Summe Holzerlöse, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	16
Summe Holzerlöse, Buche	€/ha/Jahr	346
Summe Holzerlöse, Fichte	€/ha/Jahr	0
Summe Holzerlöse	€/ha/Jahr	346
Erntekostenfreier Holzerlös Buche, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	175
Erntekostenfreier Holzerlös Fichte, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	0
Summe erntekostenfreier Holzerlös, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	175
Erntekostenfreier Holzerlös Buche, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	5
Erntekostenfreier Holzerlös Fichte, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	0
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	5
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Buche	€/ha/Jahr	180
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Fichte	€/ha/Jahr	0
Summe erntekostenfreier Holzerlös	€/ha/Jahr	180
Bestandesbegründungskosten Buche	€/ha/Jahr	45
Bestandesbegründungskosten Fichte	€/ha/Jahr	0
Summe Bestandesbegründungskosten	€/ha/Jahr	45
Bestandespflegekosten Buche	€/ha/Jahr	4,54
Bestandespflegekosten Fichte	€/ha/Jahr	0,00
Summe Bestandespflegekosten	€/ha/Jahr	4,54

Tabelle 13: Vergleich der Betriebsklassen – Variante M3 mit durchschnittlichem Fichtenanteil von 20%

Mischungsanteil der Fichte bei Bestandesbegründung	%	30
Fläche Buche	ha	80
Fläche Fichte	ha	20
Maximales Erntealter Buche	Jahre	140
Maximales Erntealter Fichte	Jahre	100
Holzvorrat insgesamt Buche	Vfm/ha	246
Holzvorrat insgesamt Fichte	Vfm/ha	58
Summe Holzvorrat insgesamt	Vfm/ha	304
Holzzuwachs Buche	Vfm/ha/Jahr	7,57
Holzzuwachs Fichte	Vfm/ha/Jahr	3,12
Summe Holzzuwachs	Vfm/ha/Jahr	10,68
Holzeinschlag Buche, planmäßige Nutzung	Efm/ha	5,72
Holzeinschlag Fichte, planmäßige Nutzung	Efm/ha	2,38
Summe Einschlag planmäßige Nutzung	Efm/ha	8,10
Kalamitätsnutzung Buche	Efm/ha	0,34
Kalamitätsnutzung Fichte	Efm/ha	0,11
Summe Kalamitätsnutzung	Efm/ha	0,45
Anteil außerplanmäßige Nutzung Buche	%	5,55
Anteil außerplanmäßige Nutzung Fichte	%	4,43
Summe Nutzung Buche	Efm/ha	6,05
Summe Nutzung Fichte	Efm/ha	2,49
Summe Nutzung	Efm/ha	8,55
Holzerlöse Buche, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	317
Holzerlöse Fichte, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	187
Summe Holzerlöse, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	504
Holzerlöse Buche, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	15
Holzerlöse Fichte, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	7
Summe Holzerlöse, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	22
Summe Holzerlöse, Buche	€/ha/Jahr	332
Summe Holzerlöse, Fichte	€/ha/Jahr	194
Summe Holzerlöse	€/ha/Jahr	526
Erntekostenfreier Holzerlös Buche, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	172
Erntekostenfreier Holzerlös Fichte, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	133
Summe erntekostenfreier Holzerlös, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	305
Erntekostenfreier Holzerlös Buche, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	5
Erntekostenfreier Holzerlös Fichte, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	3
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	9
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Buche	€/ha/Jahr	177
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Fichte	€/ha/Jahr	137
Summe erntekostenfreier Holzerlös	€/ha/Jahr	314
Bestandesbegründungskosten Buche	€/ha/Jahr	33
Bestandesbegründungskosten Fichte	€/ha/Jahr	7
Summe Bestandesbegründungskosten	€/ha/Jahr	40
Bestandespflegekosten Buche	€/ha/Jahr	3,26
Bestandespflegekosten Fichte	€/ha/Jahr	1,40
Summe Bestandespflegekosten	€/ha/Jahr	4,66

Tabelle 14: Vergleich der Betriebsklassen – Variante M2 mit durchschnittlichem Fichtenanteil von 35%

Mischungsanteil der Fichte bei Bestandesbegründung	%	50
Fläche Buche	ha	65
Fläche Fichte	ha	35
Maximales Erntealter Buche	Jahre	140
Maximales Erntealter Fichte	Jahre	100
Holzvorrat insgesamt Buche	Vfm/ha	221
Holzvorrat insgesamt Fichte	Vfm/ha	97
Summe Holzvorrat insgesamt	Vfm/ha	318
Holzzuwachs Buche	Vfm/ha/Jahr	6,85
Holzzuwachs Fichte	Vfm/ha/Jahr	5,21
Summe Holzzuwachs	Vfm/ha/Jahr	12,06
Holzeinschlag Buche, planmäßige Nutzung	Efm/ha	5,17
Holzeinschlag Fichte, planmäßige Nutzung	Efm/ha	3,99
Summe Einschlag planmäßige Nutzung	Efm/ha	9,16
Kalamitätsnutzung Buche	Efm/ha	0,31
Kalamitätsnutzung Fichte	Efm/ha	0,18
Summe Kalamitätsnutzung	Efm/ha	0,49
Anteil außerplanmäßige Nutzung Buche	%	5,58
Anteil außerplanmäßige Nutzung Fichte	%	4,41
Summe Nutzung Buche	Efm/ha	5,48
Summe Nutzung Fichte	Efm/ha	4,17
Summe Nutzung	Efm/ha	9,65
Holzerlöse Buche, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	287
Holzerlöse Fichte, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	311
Summe Holzerlöse, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	598
Holzerlöse Buche, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	14
Holzerlöse Fichte, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	11
Summe Holzerlöse, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	25
Summe Holzerlöse, Buche	€/ha/Jahr	301
Summe Holzerlöse, Fichte	€/ha/Jahr	322
Summe Holzerlöse	€/ha/Jahr	623
Erntekostenfreier Holzerlös Buche, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	156
Erntekostenfreier Holzerlös Fichte, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	220
Summe erntekostenfreier Holzerlös, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	376
Erntekostenfreier Holzerlös Buche, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	5
Erntekostenfreier Holzerlös Fichte, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	6
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	10
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Buche	€/ha/Jahr	160
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Fichte	€/ha/Jahr	226
Summe erntekostenfreier Holzerlös	€/ha/Jahr	386
Bestandesbegründungskosten Buche	€/ha/Jahr	24
Bestandesbegründungskosten Fichte	€/ha/Jahr	12
Summe Bestandesbegründungskosten	€/ha/Jahr	37
Bestandespflegekosten Buche	€/ha/Jahr	2,44
Bestandespflegekosten Fichte	€/ha/Jahr	2,44
Summe Bestandespflegekosten	€/ha/Jahr	4,88

Tabelle 15: Vergleich der Betriebsklassen – Variante M1 mit durchschnittlichem Fichtenanteil von 51%

Mischungsanteil der Fichte bei Bestandesbegründung	%	70
Fläche Buche	ha	49
Fläche Fichte	ha	51
Maximales Erntealter Buche	Jahre	140
Maximales Erntealter Fichte	Jahre	100
Holzvorrat insgesamt Buche	Vfm/ha	191
Holzvorrat insgesamt Fichte	Vfm/ha	133
Summe Holzvorrat insgesamt	Vfm/ha	324
Holzzuwachs Buche	Vfm/ha/Jahr	5,89
Holzzuwachs Fichte	Vfm/ha/Jahr	6,62
Summe Holzzuwachs	Vfm/ha/Jahr	12,51
Holzeinschlag Buche, planmäßige Nutzung	Efm/ha	4,44
Holzeinschlag Fichte, planmäßige Nutzung	Efm/ha	5,00
Summe Einschlag planmäßige Nutzung	Efm/ha	9,44
Kalamitätsnutzung Buche	Efm/ha	0,27
Kalamitätsnutzung Fichte	Efm/ha	0,29
Summe Kalamitätsnutzung	Efm/ha	0,56
Anteil außerplanmäßige Nutzung Buche	%	5,82
Anteil außerplanmäßige Nutzung Fichte	%	5,46
Summe Nutzung Buche	Efm/ha	4,72
Summe Nutzung Fichte	Efm/ha	5,29
Summe Nutzung	Efm/ha	10,01
Holzerlöse Buche, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	246
Holzerlöse Fichte, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	386
Summe Holzerlöse, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	632
Holzerlöse Buche, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	12
Holzerlöse Fichte, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	17
Summe Holzerlöse, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	30
Summe Holzerlöse, Buche	€/ha/Jahr	258
Summe Holzerlöse, Fichte	€/ha/Jahr	403
Summe Holzerlöse	€/ha/Jahr	662
Erntekostenfreier Holzerlös Buche, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	133
Erntekostenfreier Holzerlös Fichte, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	270
Summe erntekostenfreier Holzerlös, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	403
Erntekostenfreier Holzerlös Buche, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	4
Erntekostenfreier Holzerlös Fichte, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	9
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	13
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Buche	€/ha/Jahr	137
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Fichte	€/ha/Jahr	279
Summe erntekostenfreier Holzerlös	€/ha/Jahr	416
Bestandesbegründungskosten Buche	€/ha/Jahr	16
Bestandesbegründungskosten Fichte	€/ha/Jahr	18
Summe Bestandesbegründungskosten	€/ha/Jahr	34
Bestandespflegekosten Buche	€/ha/Jahr	1,57
Bestandespflegekosten Fichte	€/ha/Jahr	3,66
Summe Bestandespflegekosten	€/ha/Jahr	5,23

Tabelle 16: Vergleich der Betriebsklassen – Variante M0 reine Fichtenbetriebsklasse

Durchschnittlicher Mischungsanteil Fichte	%	100
Fläche Buche	ha	100
Fläche Fichte	ha	0
Maximales Erntealter Buche	Jahre	140
Maximales Erntealter Fichte	Jahre	100
Holzvorrat insgesamt Buche	Vfm/ha	0
Holzvorrat insgesamt Fichte	Vfm/ha	255
Summe Holzvorrat insgesamt	Vfm/ha	255
Holzzuwachs Buche	Vfm/ha/Jahr	0
Holzzuwachs Fichte	Vfm/ha/Jahr	12,02
Summe Holzzuwachs	Vfm/ha/Jahr	12,02
Holzeinschlag Buche, planmäßige Nutzung	Efm/ha	0,00
Holzeinschlag Fichte, planmäßige Nutzung	Efm/ha	8,85
Summe Einschlag planmäßige Nutzung	Efm/ha	8,85
Kalamitätsnutzung Buche	Efm/ha	0,00
Kalamitätsnutzung Fichte	Efm/ha	0,76
Summe Kalamitätsnutzung	Efm/ha	0,76
Anteil außerplanmäßige Nutzung Buche	%	0,00
Anteil außerplanmäßige Nutzung Fichte	%	7,95
Summe Nutzung Buche	Efm/ha	0,00
Summe Nutzung Fichte	Efm/ha	9,62
Summe Nutzung	Efm/ha	9,62
Holzerlöse Buche, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	0
Holzerlöse Fichte, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	689
Summe Holzerlöse, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	689
Holzerlöse Buche, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	0
Holzerlöse Fichte, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	45
Summe Holzerlöse, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	45
Summe Holzerlöse, Buche	€/ha/Jahr	0
Summe Holzerlöse, Fichte	€/ha/Jahr	734
Summe Holzerlöse	€/ha/Jahr	734
Erntekostenfreier Holzerlös Buche, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	0
Erntekostenfreier Holzerlös Fichte, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	486
Summe erntekostenfreier Holzerlös, planmäßige Nutzung	€/ha/Jahr	486
Erntekostenfreier Holzerlös Buche, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	0
Erntekostenfreier Holzerlös Fichte, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	23
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Kalamitätsnutzung	€/ha/Jahr	23
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Buche	€/ha/Jahr	0
Summe erntekostenfreier Holzerlös, Fichte	€/ha/Jahr	508
Summe erntekostenfreier Holzerlös	€/ha/Jahr	508
Bestandesbegründungskosten Buche	€/ha/Jahr	0
Bestandesbegründungskosten Fichte	€/ha/Jahr	36
Summe Bestandesbegründungskosten	€/ha/Jahr	36
Bestandespflegekosten Buche	€/ha/Jahr	0,00
Bestandespflegekosten Fichte	€/ha/Jahr	7,26
Summe Bestandespflegekosten	€/ha/Jahr	7,26

Tabelle 17: Deckungsbeiträge der Rein- und Mischbestandsbetriebsklassen im Vergleich

Variante		M ₄	M ₃	M ₂	M ₁	M ₀
Mischungsanteil der Fichte bei Bestandesbegründung	%	0	30	50	70	100
Deckungsbeitrag I	€/ha/Jahr	180	314	386	416	508
Bestandesbegründung	€/ha/Jahr	45	40	37	34	36
Bestandespflege	€/ha/Jahr	5	5	5	5	7
Deckungsbeitrag II	€/ha/Jahr	130	269	345	377	465
Walderschließung	€/ha/Jahr	20	20	20	20	20
Deckungsbeitrag III	€/ha/Jahr	110	249	325	357	445
Verwaltungskosten	€/ha/Jahr	100	100	100	100	100
Reinertrag	€/ha/Jahr	10	149	225	257	345

Grundlage der in den oben stehenden Tabellen dargestellten Ergebnisse für die jeweilige Betriebsklasse ist der Anteil der beiden Baumarten in diesen. Aus den Mischungsverhältnissen der Baumarten zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung in den einzelnen Beständen der Betriebsklasse ergeben sich, wie zu Beginn der oben stehenden Tabelle dargestellt, aufgrund der Zeitmischung der Fichte durchschnittliche Mischungsanteile dieser Baumart in der Betriebsklasse, die mit 20%, 35% und 51% deutlich unter den ursprünglichen Flächenanteilen der Fichte zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung von 30%, 50% bzw. 70% liegen.

Ein Vergleich des durchschnittlichen Vorrates pro Hektar der einzelnen Betriebsklassen zeigt, ausgehend von der reinen Buchenbetriebsklasse, dass sich mit der Beimischung der Fichte in den Buchenreinbestand mit einem durchschnittlichen Fichtenmischungsanteil von 20% an der Betriebsklasse (Variante M₃), der einem Fichtenmischungsanteil von 30% zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung entspricht, sich der durchschnittliche Vorrat von 269 Vfm/ha auf 304 Vfm/ha erhöht. Mit der weiteren Erhöhung des durchschnittlichen Fichtenanteils auf 35% bzw. 51% steigt der Vorrat auf 318 Vfm/ha bzw. 324 Vfm/ha an. Mit einem weiteren Anstieg des Fichtenanteils und dem Übergang zur reinen Fichtenbetriebsklasse sinkt der durchschnittliche Vorrat jedoch wieder auf 255 Vfm/ha ab. Die reine Fichtenbetriebsklasse weist damit im Vergleich mit den Misch- und der reinen Buchenbetriebsklasse den geringsten durchschnittlichen Vorrat, gefolgt von der reinen Buchenbetriebsklasse auf.

Deutlich wird bei dieser Analyse, dass bereits vergleichsweise geringe Buchenanteile (30% bei der Bestandesbegründung) durch das verwendete waldwachstumskundliche Mischbestandsmodell einen starken Sprung im Vorrat der Betriebsklasse bewirken. Parallel geht damit eine Verlängerung der Produktionsdauer aufgrund der längeren Produktionszeit der Buche im Vergleich zur Fichte einher. Der höhere Vorrat und die längere Produktionsdauer erhöht die Kapitalbindung deutlich. Auch im Zuwachs zeigt sich diese Mehrleistung der Mischbestandsbetriebsklasse, wenn auch nur leicht.

So erhöht sich der Zuwachs aus Buche und Fichte in der Mischbestandsbetriebsklasse (M_3) im Vergleich zur reinen Buchenbetriebsklasse (M_4) von 7,90 Vfm/ha/Jahr auf 10,68 Vfm/ha/Jahr. Dagegen weist die Betriebsklasse mit einem durchschnittlichen Buchenanteil von 65% (M_2) mit 12,06 VFM/ha/Jahr nahezu den gleichen Zuwachs wie die reine Fichtenbetriebsklasse (M_0) mit 12,02 Vfm/ha/Jahr auf. Den höchsten Zuwachs weist die Betriebsklasse (M_1) mit 12,51 Vfm/ha/Jahr und einem Fichtenanteil von 70% bei der Bestandesbegründung auf. Diese Variante ist damit die zuwachsstärkste und vorratsreichste. Für das hier verwendete Modell zeigen diese beobachteten Zuwächse beim Vergleich der Varianten M_4 und M_3 auch, dass sich die naturale Produktivität der reinen Buchenbetriebsklasse durch die Beimischung eines Mischungsanteils von 30% Fichte bei der Bestandesbegründung deutlich steigern lässt und dass im Vergleich zur reinen Fichtenbetriebsklasse ein Mischungsanteil von 50% beider Baumarten zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung zu keiner Verringerung der naturalen Produktivität führt.

Die unterschiedliche naturale Produktivität der einzelnen Betriebsklassenvarianten zeigt sich zwangsläufig auch in den korrespondierenden Nutzungsvolumina und dem Anteil der vom Mischungsanteil der Fichte abhängigen sturmschadensbedingten Kalamitätsnutzungen.⁵⁰ Dementsprechend fallen die erntekostenfreien Holzerlöse aus. Der geringste erntekostenfreie Holzerlös lässt sich mit der reinen Buchenbetriebsklasse in Höhe von 180 €/ha/Jahr erzielen. Mit zunehmenden Fichtenanteil an der Betriebsklasse steigt der erntekostenfreie Holzerlös auf 314 €/ha/Jahr bei einem Fichtenanteil von 30% bei der Bestandesbegründung, auf 386 €/ha/Jahr bei einem Fichtenanteil von 50%, auf 416 €/ha/Jahr bei 70% und auf 508 €/ha/Jahr für die reine Fichtenbetriebsklasse an.

Werden von den erntekostenfreien Holzerlösen noch die Bestandesbegründungskosten⁵¹ und die Kosten für die Bestandespflege abgezogen, so errechnet sich der Deckungsbeitrag II. Dieser Deckungsbeitrag II liegt für die reine Buchenbetriebsklasse M_4 bei 130 €/ha/Jahr, für die Mischbestandsbetriebsklasse M_3 bei 269 €/ha/Jahr, für die Variante M_2 bei 345 €/ha/Jahr, für die Variante M_1 bei 377 €/ha/Jahr und für die reine Fichtenbetriebsklasse M_0 bei 465 €/ha/Jahr.

Bei der Analyse dieser Deckungsbeiträge II werden zwei wesentliche Gesichtspunkte deutlich: Auf der einen Seite führen die unterschiedlichen Produktionszeiten und das voneinander deutlich abweichende Risikoverhalten der beiden Baumarten Buche und Fichte zu unterschiedlichen, in jeder Periode neu zu be-

⁵⁰ Vgl. für die Quantifizierung des vom Mischungsanteil der Fichte abhängigen Sturmschadensrisikos Kapitel 4.2.4 und für die von der Risikostärke abhängigen Nutzungsmengen der Fichte Kapitel 8.7.3. In Kapitel 4.5 sind beispielhaft für die Betriebsklassenvariante M_2 die korrespondierenden kalamitätsnutzungsbedingt ausscheidenden Flächenanteile nach Altersklassen dargestellt. Die Differenz in der Höhe der Kalamitätsnutzungen von Buche und Fichte und deren Abhängigkeit von der Produktionsdauer der Baumarten werden in Kapitel 9.3 diskutiert.

⁵¹ Für diesen direkten Vergleich der beiden Baumarten im Mischbestand wurden sowohl für die Baumart Buche als auch für die Baumart Fichte Pflanzkosten unterstellt.

gründenden Flächenanteilen.⁵² Insbesondere bei der reinen Buchenbetriebsklasse und den Mischbestandsbetriebsklassen mit hohen Buchenanteilen sind kleinere Flächenanteile als in den fichtendominierten Varianten neu zu begründen. Dies zeigt sich sowohl in den Kosten für die Bestandesbegründung wie auch in den Pflegekosten. Auf der anderen Seite spiegeln diese Ergebnisse aber auch die deutlich höheren Bestandesbegründungskosten der Buche wider, die mit steigendem Fichtenanteil zu einer deutlichen Zunahme des Deckungsbeitrags führen. In der reinen Buchenbetriebsklasse machen sie mit 45 €/ha/Jahr rund ein Viertel des Deckungsbeitrages I aus, während die Bestandesbegründungskosten der reinen Fichtenbetriebsklasse lediglich rund 7% des Deckungsbeitrages I betragen. Somit haben die in dieser Modellbetrachtung verwendeten Bestandesbegründungskosten der Buche einen starken Einfluss auf den Deckungsbeitrag II und die weiter zu betrachtenden Kenngrößen dieser Analyse.

Die Kosten für die Walderschließung und die Verwaltung werden in dieser Betrachtung als vom Mischungsanteil unabhängige Fixkosten betrachtet und fallen daher unabhängig vom jeweiligen Anteil der beiden Baumarten in der Betriebsklasse in gleicher Höhe an. Für die Walderschließung wurden 20 €/ha/Jahr und für die Verwaltungskosten 100 €/ha/Jahr im Modell hinterlegt.

Die hieraus resultierenden, vom Mischungsanteil der Baumarten abhängigen Reinerträge sind in der folgenden Abbildung 48 ausgehend von der reinen Buchenbetriebsklasse in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse dargestellt:⁵³

⁵² Eine Analyse der ökonomischen Auswirkung der Risikostärke der Fichte im Rahmen eines Variantenstudiums findet sich in Kapitel 8.7.2.

⁵³ Die vom durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte abhängigen Reinerträge sind für diese näherungsweise Darstellung durch den abschnittsweise definierten Graphen beschrieben. Der Bereich bis zu einem Mischungsanteil von 0 bis 54% ist durch ein Polynom dritten Grades beschrieben, das mit der weiteren Erhöhung des Fichtenanteils in eine Gerade übergeht. Grundlage hierfür ist eine Interpolation, die durch Ausgleichsrechnungen angepasst wurde. Der abschnittsweise geltende Definitionsbereich führt zu genaueren Ergebnissen als die, die sich mit einem reinen, nach oben und unten ausschlagenden Polynom erreichen lassen. Die gepunktete Gerade in der Abbildung entspricht dem neutralen Ersatz (erwarteter Reinertrag bei einer flächig getrennten Mischung).

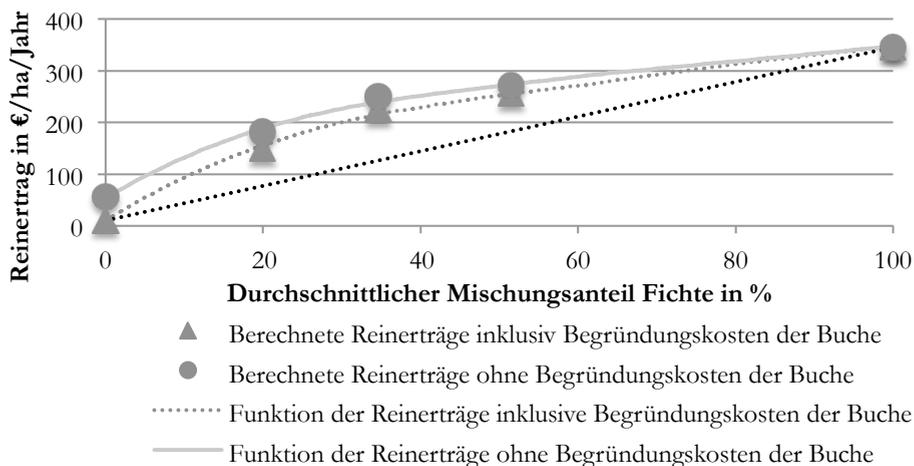


Abbildung 48: Reinerträge in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse

In der oben stehenden Abbildung 48 wird für die Reinerträge der einzelnen Mischungsvarianten, wie bereits auch schon bei den einzelnen Deckungsbeiträgen aufgezeigt, noch einmal deutlich, welchen Beitrag die einzelnen Baumarten und deren Mischungsanteile zum Reinertrag der Betriebsklasse leisten. Auch hier tritt der Beitrag der Fichte wieder deutlich hervor. Liegt der Reinertrag für die reine Buchenbetriebsklasse inklusive Kosten für die Bestandesbegründung (Variante M_4) bei geringen 10 €/ha/Jahr, so erhöht sich dieser bei einem durchschnittlichen Fichtenanteil von 30% an der Betriebsklasse (Variante M_3) auf 149 €/ha/Jahr, bei einem durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte von 34% (entspricht einem Anteil von 50% bei der Bestandesbegründung) auf 225 €/ha/Jahr (Variante M_2), bei einem durchschnittlichen Fichtenanteil von 51% (Variante M_1) auf 257 €/ha/Jahr und für die reine Fichtenbetriebsklasse auf 345 €/ha/Jahr (Variante M_0).

Im Vergleich hierzu liegen die Mischungsvarianten mit einer unterstellten Buchennaturverjüngung bei hohen Buchenmischungsanteilen deutlich über den Varianten inklusive der Kulturbegründungskosten für die Buche. Beispielsweise beträgt die Differenz bei den Buchenreinbeständen zwischen der Naturverjüngungsvariante und der Variante mit Pflanzung rund 45 €/ha/Jahr. Mit zunehmendem Fichtenanteil sinkt diese Differenz. Für die Variante M_3 (mit einem durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte von 30%) liegt sie bei 33 €/ha/Jahr, während die Differenz zwischen der Einbeziehung der Begründungskosten und der Verwendung der Naturverjüngung für die Variante M_2 (durchschnittlicher Fichtenmischungsanteil von 34%) bei 24 €/ha/Jahr bzw. für die Variante M_1 (durchschnittlicher Fichtenmischungsanteil von 51%) bei 16 €/ha/Jahr liegt.

Für eine detailliertere Analyse der Auswirkungen der Anreicherung der Buchenbestände der Buchenreinbestandsbetriebsklasse mit Fichte auf die Höhe des

Reinertrages wird im Folgenden die Reinertragsanalyse um eine Grenzbetrachtung erweitert.

8.5 Die Erhöhung des Fichtenanteils – eine Grenzbetrachtung

Mit der Wahl des Mischungsanteils steht nicht nur die sich daraus ergebende gesamte Kosten- und Erlössituation des Forstbetriebes im Mittelpunkt der Betrachtung, sondern in erster Linie auch die mit dem (Bei-)Mischungsanteil der Fichte verbundene Erhöhung des Reinertrages. Für die Analyse dieser vom Mischungsanteil der Baumarten abhängigen Veränderung des Reinertrages eignet sich die Differenz- bzw. Differential-(Grenz-)betrachtung. Durch diese wird das Hauptaugenmerk auf die eigentliche ökonomische Auswirkung der Veränderung gerichtet (vgl. Swoboda 1964 S. 75 f.), die mit einer Erhöhung des Mischungsanteils der Fichte an der Betriebsklasse einhergeht. Für diese Veränderung des Reinertrages wird hier in Anlehnung an Speidel (1972 S. 132 f.) der Begriff des Grenzreinertrages verwendet.

Wie in Abbildung 49 dargestellt, werden für die Grenzbetrachtung die jährlichen Reinerträge der Betriebsklassen weiter auf die Differenzen zwischen den einzelnen, vom Mischungsanteil der Baumarten abhängigen Reinerträgen reduziert. Zur Bestimmung des Grenzreinertrages werden ausgehend von einer Buchenreinbestandsbetriebsklasse der Fichtenanteil der Baumartenmischung in 1%-Schritten erhöht und die sich hieraus ergebenden Differenzen im Reinertrag der Betriebsklassen über dem durchschnittlichen Fichtenanteil der jeweiligen Betriebsklasse aufgetragen. Der Grenzreinertrag stellt somit den Zuwachs des Reinertrages dar, der aus der Erhöhung des Fichtenanteils an der Mischung um ein weiteres Prozent resultiert.⁵⁴

⁵⁴ Der Abbildung liegen die ersten. Ableitungen der in Abbildung 48 dargestellten abschnittsweise definierten Graphen zugrunde.

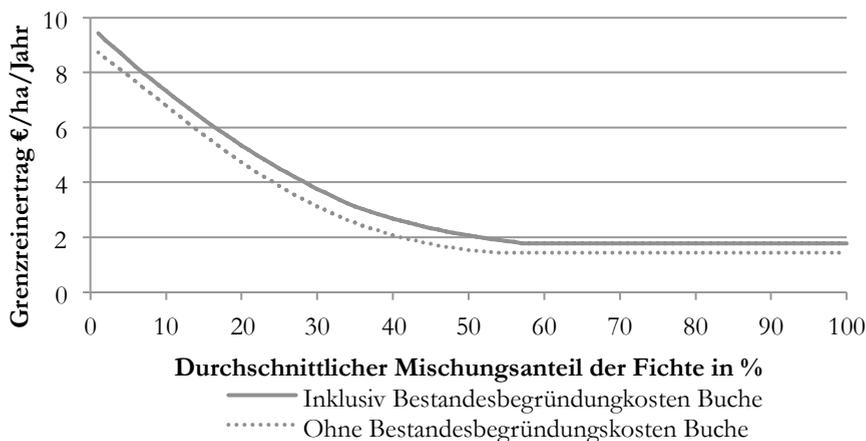


Abbildung 49: Grenzzreinertrag in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Fichtenanteil an der Betriebsklasse

Deutlich wird auch hier der nicht durchgehend lineare Zusammenhang zwischen der Erhöhung des Fichtenanteils an der Betriebsklasse und des Reinertrages. Auch wenn eine Erhöhung des Fichtenanteils stets zu einem höheren Reinertrag führt, so zeigt Abbildung 49 dennoch anschaulich, dass sich insbesondere bei geringen Beimischungsanteilen der Fichte in den Buchengrundbestand vergleichsweise höhere Steigerungen des Reinertrages erreichen lassen. Wird beispielsweise der durchschnittliche Fichtenanteil an der Betriebsklasse von 5 auf 6% erhöht, geht damit eine Steigerung des Reinertrages von 8,46 €/ha/Jahr für die Variante inklusive der Begründungskosten der Buche einher. Mit der weiteren Erhöhung des Fichtenanteils an der Betriebsklasse geht ein Absinken des Grenzzreinertrages einher – ein Zusammenhang, der dem „Gesetz des abnehmenden Grenzertrages“ entspricht (in Anlehnung an Rogall 2006 S. 145) –, bis dieser ab einem Mischungsanteil von ca. 55% in eine Gerade übergeht. Mit jedem weiteren Fichtenprozent steigt der Reinertrag ab diesem Prozentsatz dementsprechend mit 1,78 €/ha/Jahr für die Varianten inklusive der Begründungskosten der Buche.

Für die Anreicherung von Buchengrundbeständen mit der ertragsstärkeren Fichte macht dies nochmals deutlich, dass bereits eine geringe Anreicherung von Buchenbeständen mit beispielsweise gruppenweiser beigemischter Fichte, wie sie in diesen Modellansätzen verwendet wurde, bereits zu einer deutlichen Anhebung des Reinertrages führt, während auf der anderen Seite eine Beimischung der Buche in den Fichtengrundbestand bei geringen Anteilen nur zu verhältnismäßig geringeren Rückgängen im Reinertrag führt. Dies gilt dabei sowohl für die Varianten, die Bestandesbegründungskosten bei der Buche unterstellen, als auch für die Naturverjüngungsvarianten.

8.6 Dynamischer Übergang von der Rein- zur Mischbestandsbetriebsklasse – Anreicherung von Buchenbeständen mit Fichte

Mit dem „klassischen“ Modell der Betriebsklasse und seiner komparativ-statischen Betrachtung lassen sich nur Gleichgewichtszustände beschreiben. Die Nadelholzeinbringung beispielsweise in reine Laubholzbestände einer Betriebsklasse und die lange Übergangsphase der Nadelholzanreicherung lässt sich mit diesem statischen Modellansatz der Betriebsklasse nur unzureichend abbilden und monetär bewerten. Für diese Übergangsphase wird demzufolge ein dynamisches Übergangsmodell für die Flächenentwicklung der einzelnen Baumarten benötigt, welches die mit dem Übergang von der Reinbestands- zur Mischbestandsbetriebsklasse verbundenen ökonomischen Folgen und deren Auswirkungen auf die betriebliche Liquidität erfasst. Die dynamische Betriebsklasse kann diese Flächenveränderung der Baumarten während des Übergangsprozesses als Grundlage für die eigentliche ökonomische Bewertung abbilden. Den Ausgangspunkt des Nadelholzanreicherungsprozesses stellt dabei die reine Buchenbetriebsklasse dar, deren Ausgangsdaten in Tabelle 18 dargestellt sind.

Tabelle 18: Kenngrößen der reinen Buchenbetriebsklasse (Variante M₄ ohne Pflanzkosten, natürliche Verjüngung)

Fläche Buche	ha	100
Holzvorrat	Vfm/ha	269
Holzzuwachs	Vfm/ha/Jahr	7,9
Einschlag	Efm/ha	6,32
Kalamitätsnutzungen	%	5,55
Holzerlöse	€/ha/Jahr	345
Holzerntekosten	€/ha/Jahr	165
Deckungsbeitrag I	€/ha/Jahr	180
Deckungsbeitrag II	€/ha/Jahr	176
Deckungsbeitrag III	€/ha/Jahr	156
Reinertrag	€/ha/Jahr	56

Ausgehend von der in Tabelle 18 dargestellten reinen Buchenbetriebsklasse wird mit jeder Periode bei der Bestandesbegründung ein Fichtenanteil von 50% auf der nutzungs- und risikobedingt frei werdenden Fläche des neu zu begründenden Bestandes eingebracht. Dieser Fichtenanteil führt aufgrund der Zeitmischung der Fichte im Buchengrundbestand langfristig mit dem Erreichen des neuen Gleichgewichtszustandes der Mischbestandsbetriebsklasse zu einem durchschnittlichen Fichtenmischungsanteil an der Betriebsklasse von 34%. Für die Buche wurde dabei eine natürliche Verjüngung unterstellt, durch die keine Kosten für die Bestandesbegründung entstehen, während für die Baumart Fichte Bestandesbegrün-

dungskosten von 2.500 € pro Hektar Baumartenfläche im Modell hinterlegt wurden.

Für die Analyse des Übergangsprozesses wurden wie bereits in den vorhergehenden Modellen der einzelbestandesweisen Betrachtung und in den Betriebsklassen des Zielwaldmodells fünfjährige Perioden verwendet. Die wichtigsten Kennziffern des Übergangsprozesses und der dafür verwendeten dynamischen Betriebsklasse sind im Anhang unter 12.6 dargestellt.

Die Ergebnisse des Übergangsprozesses der reinen Buchen- in die Mischbestandsbetriebsklasse lassen sich grundsätzlich in sechs Phasen untergliedern. Besonders deutlich werden diese Phasen bei der Betrachtung der Entwicklung des in Abbildung 50 dargestellten Deckungsbeitrages II.

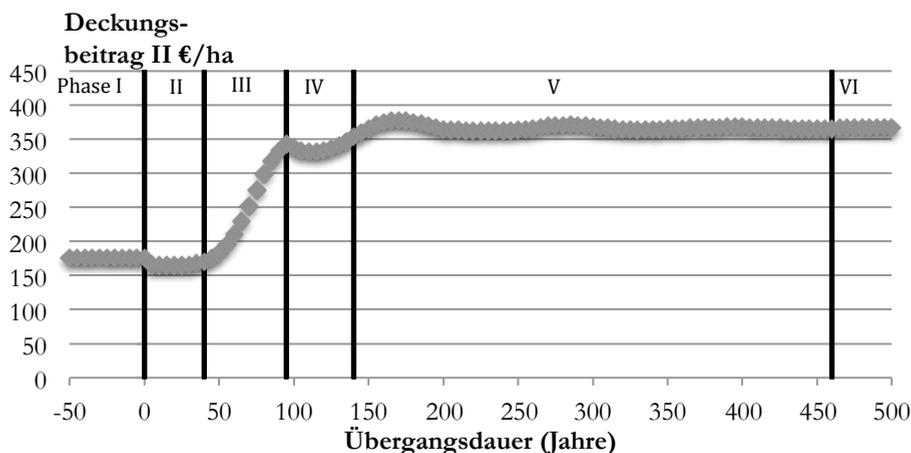


Abbildung 50: Entwicklungsphasen des Deckungsbeitrages II des Übergangsprozesses von einer reinen Buchenbetriebsklasse mit Naturverjüngung zu einer nachhaltigen Fichten-Buchen-Mischbestandsbetriebsklasse durch Pflanzung der Fichte

Die I. Phase stellt den Ausgangszustand der reinen Buchenbetriebsklasse dar, den Zeitraum bis zum Beginn des Übergangsprozesses. Der nachhaltige Einschlag der Buchenbetriebsklasse liegt bei rund 8 Erntefestmetern pro Hektar und Jahr, einem korrespondierenden Deckungsbeitrag II von rund 176 €/ha/Jahr und einem durchschnittlichen Holzvorrat von rund 269 Vfm/ha.⁵⁵

Die Phase II beginnt durch die Beimischung der Fichte bei der Bestandesbegründung und den hierdurch gestarteten Prozess der Fichtenanreicherung. Bedingt durch die zusätzlichen Ausgaben für die Bestandesbegründung der Fichte – durch das Pflanzen von Fichtengruppen – sinkt zunächst der betriebliche De-

⁵⁵ In dieser Darstellung sind die nicht entscheidungsrelevanten und baumartenunabhängigen Fixkosten für die Erschließung und Verwaltung von 20 €/ha/Jahr bzw. 100 €/ha/Jahr nicht berücksichtigt. Ein weiterer Unterschied zum Reinertrag der Mischungsvariante M₄ ergibt sich durch die in Variante M₄ enthaltenen Bestandesbegründungskosten für die Buche, die durch die Annahme einer natürlichen Verjüngung der Buche in dieser Darstellung des Anreicherungsprozesses mit Fichte nicht enthalten sind.

ckungsbeitrags II der beiden Baumarten Buche und Fichte unter den Deckungsbeitrag II der reinen Buchenbetriebsklasse ab, da zu diesem Zeitpunkt die höheren Ausgaben für die Fichte durch die Deckungsbeiträge der Buche getragen werden müssen und durch die Fichte in dieser Phase noch keine Einnahmen erwirtschaftet werden. Der Mischungsanteil von 50% bei der Begründung hat zwangsläufig zur Folge, dass die Fichtenfläche kontinuierlich zunimmt, während die Buchenfläche zurückgeht. Die Phase II des Übergangsprozesses endet nach ca. 40 Jahren, nachdem die Erlöse aus den Durchforstungen der Fichte die weiter anfallenden Begründungskosten der Fichtenpflanzung tragen können.

Der Beginn der III. Phase des Übergangsprozesses ist dadurch charakterisiert, dass die finanzielle „Durststrecke“, die mit der Begründung der Fichte verbunden war, überwunden ist und die Summe der Deckungsbeiträge II der beiden Baumarten, bedingt durch steigende Erlöse aus der Fichte, weiter ansteigen. In dieser Phase fallen risiko- und altersbedingt erste Fichtenanteile bereits wieder aus. Die verbleibenden Fichten nehmen jedoch weiter an Dimension zu und gehen in die Zielstärkennutzung über. Die hiermit verbundenen Nutzungsmengen führen zu einem weiteren Anstieg der Deckungsbeiträge. Nach 95 Jahren erreicht der Deckungsbeitrag II, wie in Abbildung 50 dargestellt, ein erstes Maximum mit rund 343 €/ha/Jahr. Zu diesem Zeitpunkt nimmt die Fichte bereits einen Anteil von rund 33% an der Mischbestandsbetriebsklasse ein. Flächenmäßig ist mit dieser Phase die Zielsetzung des Fichtenanreicherungsprozesses bereits abgeschlossen.

Zu Beginn der IV. Phase sinkt die Summe der Deckungsbeiträge II der beiden Baumarten zunächst leicht ab. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass die Fichte ihre Zielstärke erreicht hat und als beigemischte Baumart im Rahmen der Zeitmischung mit dem Erreichen des Endes des Produktionszeitraums von 100 Jahren aus dem Mischbestand ausscheidet. Hierdurch wachsen die Deckungsbeiträge II der Fichte nicht mehr so stark an wie in den vorangegangenen Phasen des Übergangsprozesses.

Andererseits kommt hinzu, dass im Vergleich zur reinen Buchenbetriebsklasse mischungsbedingt in diesem Bestandesalter nicht mehr so viele ältere Buchen in das Alter der Zielstärkennutzung einwachsen und hierdurch der Deckungsbeitrag II der Buche im Vergleich zur reinen Buchenbetriebsklasse zunächst zurückgeht. Gebremst wird dieser Rückgang des Deckungsbeitrages II der Buche gegen Ende der Phase erst durch die letzten noch abzubauenen Buchenreinbestände, die in dieser IV. Phase noch nicht in Mischbestände umgebaut wurden. Diese Phase des Übergangsprozesses endet mit der planmäßigen Ernte der letzten Buchenreinbestände und dem Erreichen ihrer Produktionsdauer von 140 Jahren. Mit dieser Ernte steigt die Summe des Deckungsbeitrages II der beiden Baumarten auch wieder weiter auf 353 €/ha im 140. Jahr des Übergangsprozesses an. Durch die in dieser Modellbetrachtung getroffene Prämisse, die neu zu begründende Fläche mit einer Baumartenmischung von 50% beider Baumarten zu begründen, steigt dabei gegen Ende dieser IV. Übergangsphase der Mischungsanteil der Fichte, leicht über den Zielmischungsanteil hinaus, auf 35% an.

Mit der V. Phase des Übergangsprozesses wird der Zeitraum beschrieben, in dem alle Bestandesteile der Betriebsklasse zu Mischbeständen umgewandelt sind, wobei sich zielsetzungsentsprechend nach dem Ausscheiden der Fichten-Zeitmischung in jedem Bestand eine Phase mit Buchenreinbeständen anschließt. Erst mit Beendigung dieser V. Phase stellt sich der stationäre Gleichgewichtszustand der Mischbestandsbetriebsklasse ein, dem sich diese Betriebsklasse in den vorhergehenden Phasen angenähert hat. Zu Beginn der Phase steigt der Deckungsbeitrag II zunächst weiter auf bis zu 377 €/ha/Jahr nach einer Übergangsdauer von 180 Jahren an. Dieser maximale Deckungsbeitrag II wird in dieser Höhe nicht mehr erreicht, da bis zum Erreichen des stationären Zustandes der Mischbestandsbetriebsklasse der Fichtenanteil von ca. 35% auf 33% wieder leicht zurückgeht. Der Deckungsbeitrag II ist im weiteren Verlauf dieser Phase Schwankungen ausgesetzt, die sich mit fortschreitender Zeit und der Annäherung an den stationären Zustand der Mischbestandsbetriebsklasse verringern, wobei der Deckungsbeitrag II bis zum Ende dieser Übergangsphase auf 366 €/ha/Jahr absinkt. Ab einer Übergangsdauer von rund 350 Jahren liegt die Schwankungsbreite nur noch bei rund einem Euro.

Nach rund 460 Jahren dynamischer Simulation ist die Schwankungsbreite so gering, dass sich wieder ein nahezu stationärer und entsprechend nachhaltiger Gleichgewichtszustand eingestellt hat und mit diesem das Ende des Übergangsprozesses von der reinen Buchenbetriebsklasse in die Mischbestandsbetriebsklasse und somit der Übergang in die VI. Phase erreicht ist. Die entsprechenden Kennzahlen sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Kenngrößen der nachhaltigen Mischbestandsbetriebsklasse am Ende des Übergangszeitraums (Variante M₂ mit natürlicher Verjüngung und ohne Pflanzkosten)⁵⁶

Fläche Buche	ha	65
Fläche Fichte	ha	35
Holzvorrat Buche	Vfm/ha	221
Holzvorrat Fichte	Vfm/ha	97
Holzvorrat gesamt	Vfm/ha	318
Holzzuwachs Buche	Vfm/ha/Jahr	6,85
Holzzuwachs Fichte	Vfm/ha/Jahr	5,21
Holzzuwachs gesamt	Vfm/ha/Jahr	12,06
Einschlag Buche	Efm/ha	5,48
Einschlag Fichte	Efm/ha	4,17
Einschlag gesamt	Efm/ha	9,65
Kalamitätsnutzungen Buche	%	5,58
Kalamitätsnutzungen Fichte	%	4,41
Holzerlöse Buche	€/ha/Jahr	301
Holzerlöse Fichte	€/ha/Jahr	322
Holzerlöse gesamt	€/ha/Jahr	623
Holzerntekosten Buche	€/ha/Jahr	140
Holzerntekosten Fichte	€/ha/Jahr	96
Holzerntekosten gesamt	€/ha/Jahr	237
Deckungsbeitrag I	€/ha/Jahr	386
Deckungsbeitrag II	€/ha/Jahr	369
Deckungsbeitrag III	€/ha/Jahr	349
Reinertrag	€/ha/Jahr	249

Ein Vergleich der oben stehenden Ergebnisse mit dem in Tabelle 18 dargestellten Ausgangszustand der dynamischen Betriebsklasse zeigt, dass durch die Fichtenanreicherung der durchschnittliche Holzvorrat von 269 Vfm/ha auf 318 Vfm/ha zugenommen hat, während der Deckungsbeitrag II als Summe beider Baumarten von 176 €/ha/Jahr auf 369 €/ha/Jahr angestiegen ist und sich damit trotz der mit dem Fichtenanteil verbundenen Pflanzkosten mehr als verdoppelt hat.

Dieser Zusammenhang wird auch durch die Bestimmung der Grenzrendite des mit der Pflanzung der Fichte verbundenen zusätzlichen Kapitaleinsatzes deutlich. Im Sinne der Marginalanalyse berechnet sich eine Grenzrendite von 4,57% (vgl. Möhring 2001 S. 63). Obwohl durch die Buchennaturverjüngung in der Ur-

⁵⁶ Der Deckungsbeitrag I entspricht in diesem stationären Stadium dem der Variante M₂ (vgl. Tabelle 17). Die Differenz zu den Deckungsbeiträgen II und III und dem Reinertrag beruht auf der natürlichen Verjüngung der Buche in diesem dynamischen Übergangsmodell. Die Differenz von 24 €/ha/Jahr entspricht dementsprechend den Begründungskosten der Buche in Tabelle 14.

sprungsbetriebsklasse im Vergleich zur Fichte in der Mischbestandsbetriebsklasse keine Pflanzkosten benötigt werden, zeigt diese Grenzrendite dennoch deutlich die ökonomische Vorteilhaftigkeit der Anreicherung der Buchengrundbestände durch gruppenweise beigemischte Fichte.

Der Anreicherungsprozess hat direkte Folgen für die finanzwirtschaftlichen Teilziele Liquidität und Rentabilität, die sich in Abhängigkeit von einzelnen Übergangsphasen verschieben. Für den Beginn des Übergangsprozesses von der reinen Buchenbetriebsklasse (Phase I) in die Mischbestandsbetriebsklasse sinkt in der Phase II der Überschuss auf rund 44 €/ha/Jahr (unter Berücksichtigung der Erschließungs- und Verwaltungskosten (DB II 164 €/ha/Jahr)) durch die mit der Fichtenanreicherung verbundenen Pflanzkosten. Entsprechend verringert sich (geringfügig) die betriebliche Liquidität. Bereits nach ca. 40 Jahren steigen die Überschüsse im Übergangsprozess jedoch über den Reinertrag der Ausgangsbetriebsklasse (55 €/ha/Jahr) an und führen neben einer erhöhten Liquidität aufgrund der in der Folge deutlich höheren Überschüsse auch zu einer gesteigerten Rentabilität. Diese Steigerung der finanzwirtschaftlichen Ziele setzt sich bis zur vollständigen Umwandlung der Buchenrein- in Mischbestände und letzten Endes bis zum Erreichen des stationären Zustandes in der VI. Phase fort (249 €/ha/Jahr).⁵⁷

Eine Einordnung der naturalen Daten, die dem Modell dieser Betriebsklasse zugrunde liegen, durch den Vergleich mit realen betrieblichen Werten zeigt, dass der nachhaltige Einschlag von rund 6 Efm/ha/Jahr für die Buchenfläche in nahezu gleicher Höhe liegt, wie zum Beispiel der der Laubholzbetriebe im Betriebsvergleich Westfalen-Lippe mit 6 Efm/ha Baumartenfläche/Jahr im Jahr 2014 (vgl. Dög et al. 2015 S. 33). Der deutschlandweite Zuwachs der Buche der Bundeswaldinventur 3 liegt mit 10 m³/ha/Jahr (entspricht ca. 8 Efm/ha/Jahr) darüber.

Dagegen liegt der für den Fichtenanteil im Modell verwendete Nutzungssatz von rund 15 Efm/ha Fichtenfläche/Jahr über dem der Fichtenbetriebe im Betriebsvergleich Westfalen-Lippe mit 11 Efm/ha Fichtenfläche. Ebenfalls liegt der Modellansatz über dem durchschnittlichen deutschlandweiten Zuwachs der Bundeswaldinventur 3 von 15,3 m³/ha/Jahr (entspricht ca. 12,3 Efm/ha/Jahr) (vgl. Polley et al. 2014b S. 34).

8.7 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse stellt eine Methode dar, die Robustheit von Modellergebnissen in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen der Modellrechnung zu analysieren. Sie ermöglicht die Untersuchung der Wirkungsweise der mit Unsicherheit behafteten ökonomischen Eingangsparameter und deren Auswirkung auf die zu erwartenden Zahlungsströme der Baumarten Buche und Fichte und des Reiner-

⁵⁷ Zuzüglich Begründungskosten von 24 €/ha/Jahr für eine Buchenpflanzung ergibt sich der Reinertrag der Variante M₂ von 225 €/ha/Jahr.

trages der Rein- und Mischbestände (vgl. Heidingsfelder und Knoke 2004 S. 34). Dabei können die beiden folgenden Varianten unterschieden werden:

- Die Analyse der Reagibilität der Eingangsgrößen ermöglicht die Untersuchung, wie sich die Ergebnisse durch eine prozentuale Veränderung der Eingangsgrößen verändern.
- Die Methode der kritischen Werte zeigt, ab welcher Höhe der Eingangsgrößen das Ergebnis einen kritischen Wert erreicht bzw. negativ wird.

Für die Reagibilitätsanalyse werden im Rahmen eines Variantenstudiums ökonomische Eingangsgrößen der Mischbestandsbetriebsklasse (Variante M₂) mit einem Mischungsanteil von Buche und Fichte von 50% bei der Bestandesbegründung schrittweise verändert und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Reinertrag analysiert. Anhand der forstlichen Deckungsbeitragsrechnung werden dazu die einzelnen ökonomischen Eingangsgrößen bewertet. Hierzu werden diese Eingangsgrößen in 1%-Schritten ausgehend von der jeweiligen Ausgangssituation erhöht bzw. verringert.

In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der Modellrechnungen im Mittelpunkt des Koordinatensystems dargestellt. Auf der Abszisse ist die jeweilige prozentuale Abweichung der unabhängigen Variablen aufgetragen, während auf der Ordinate die prozentuale Veränderung des Reinertrages aufgetragen ist.

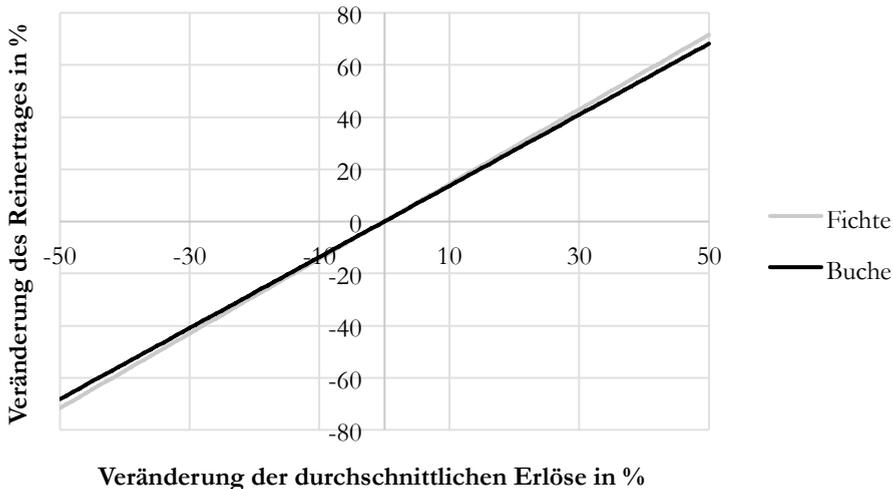


Abbildung 51: Auswirkung der Veränderung der Holzerlöse auf den Reinertrag

Wie in Abbildung 51 dargestellt, wirkt sich die jeweilige Veränderung der Holzerlöse für die Baumart Buche und Fichte direkt auf den Reinertrag der Mischbestandsbetriebsklasse aus. Deutlich wird dabei der lineare Zusammenhang zwischen der unabhängigen Variablen, der Eingangsgröße in die Deckungsbeitragsrechnung, hier die Holzerlöse, und der abhängigen Variablen, dem Reinertrag. Bereits eine Steigerung der durchschnittlichen Buchenholzerlöse um beispielsweise 10% führt zu einer Erhöhung des Reinertrages um 14%, während eine Verrin-

gerung der durchschnittlichen Buchenerlöse um 10% zu einer Verringerung des Reinertrages um 14% führt. Eine Steigerung der durchschnittlichen Fichtenerlöse um 10% führt zu einer Erhöhung des Reinertrages der Betriebsklasse auf 14%, während eine Verringerung der Fichtenerlöse entsprechend eine Verringerung des Reinertrages um 14% zur Folge hat. Die Erlöse für die Fichte haben somit einen stärkeren Einfluss auf den Reinertrag als die der Buche, obgleich die Fichte lediglich einen durchschnittlichen Mischungsanteil von 33% an der Betriebsklasse einnimmt. Die Holzerlöse der beiden Baumarten stellen dabei im Vergleich zu den anderen Eingangsgrößen der Deckungsbeitragsrechnung die größte ökonomische Stellschraube in Hinblick auf den Reinertrag dieser Modellbetriebsklassen dar.

Die Veränderung der durchschnittlichen Holzerntekosten zeigt, wie in Abbildung 52 dargestellt, ein vergleichbares, jedoch umgekehrtes Bild wie das Variantenstudium der Holzerlöse. Eine Erhöhung der durchschnittlichen Holzerntekosten der Buche um 10% führt zu einer Verringerung des Reinertrages um 7%, während eine Verringerung der Holzerntekosten der Buche um 10% den Reinertrag um 7% ansteigen lässt. Die Verringerung der durchschnittlichen Holzerntekosten der Fichte um 10% bewirkt eine Erhöhung des Reinertrages um 4,5%, während eine Erhöhung der durchschnittlichen Holzerntekosten der Fichte um 10% entsprechend zu einer Verringerung des Reinertrages um 4,5% führt. Durch den höheren Buchenanteil an der Mischbestandsbetriebsklasse und die höheren Holzerntekosten haben Veränderungen bei den Holzerntekosten der Buche stärkere Auswirkungen auf den Reinertrag als Veränderungen bei den Holzerntekosten der Fichte. Nach den Holzerlösen haben die Holzerntekosten den zweitgrößten Einfluss auf die Modellergebnisse.

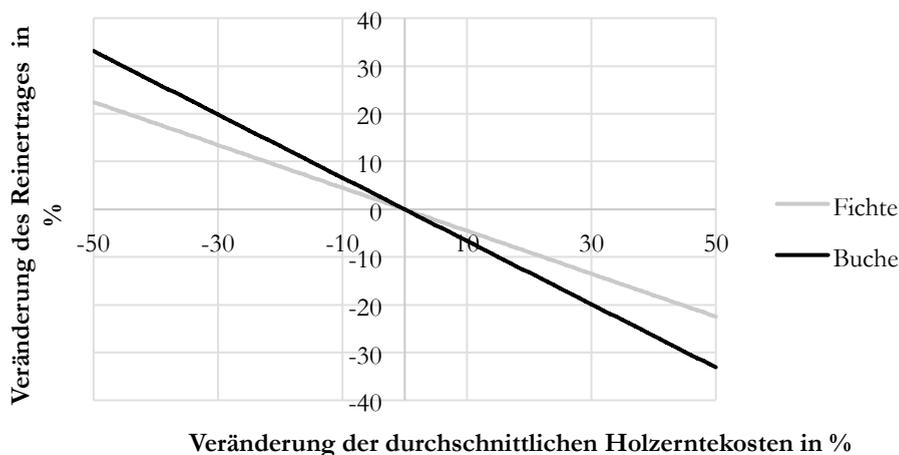


Abbildung 52: Auswirkung der Veränderung der Holzerntekosten auf den Reinertrag

Die Bestandesbegründungskosten, hier für gepflanzte Fichten und Buchen, weisen im Vergleich zu den vorhergehend beschriebenen Eingangsgrößen der Deckungsbeitragsrechnung einen vergleichsweise geringeren Einfluss auf die Verän-

derung des Reinertrages auf. Dabei ist der Einfluss der Veränderung der Bestandesbegründungskosten der Buche durch die höheren Begründungskosten auf den Reinertrag deutlich höher als die Veränderung der Begründungskosten bei der Fichte. Eine Veränderung der Begründungskosten der Buche von 10% führen zu einer Steigerung bzw. Verringerung von 1,2% des Reinertrages, während eine Veränderung der Begründungskosten der Fichte von 10% lediglich zu einer Veränderung des Reinertrages von 0,6% führen.

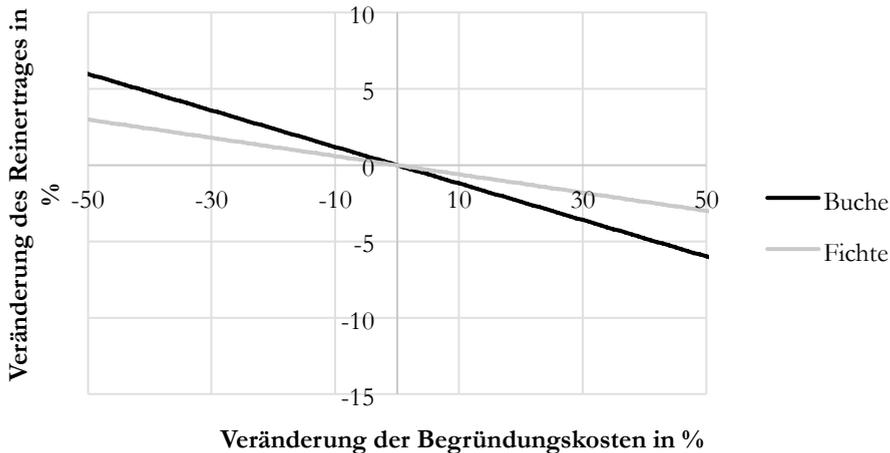


Abbildung 53: Auswirkung der Veränderung der Begründungskosten auf den Reinertrag (Buche und Fichte gepflanzt)

Im Vergleich zu den anderen Eingangsgrößen in der Deckungsbeitragsrechnung weisen Veränderungen der Bestandespflegekosten, wie in Abbildung 54 dargestellt, einen noch geringeren Einfluss auf die Veränderung des Reinertrages als die Bestandesbegründungskosten auf. Durch die Verwendung baumartenspezifischer Pflegekosten für beide Baumarten in gleicher Höhe erfolgt hier die Sensitivitätsanalyse der Pflegekosten baumartenunabhängig. Eine Erhöhung der Bestandespflegekosten um 10% führt zu einer Verringerung des Reinertrages um 0,1% bzw. eine Verringerung der Pflegekosten um 10% zu einer Erhöhung des Reinertrages um 0,1%.

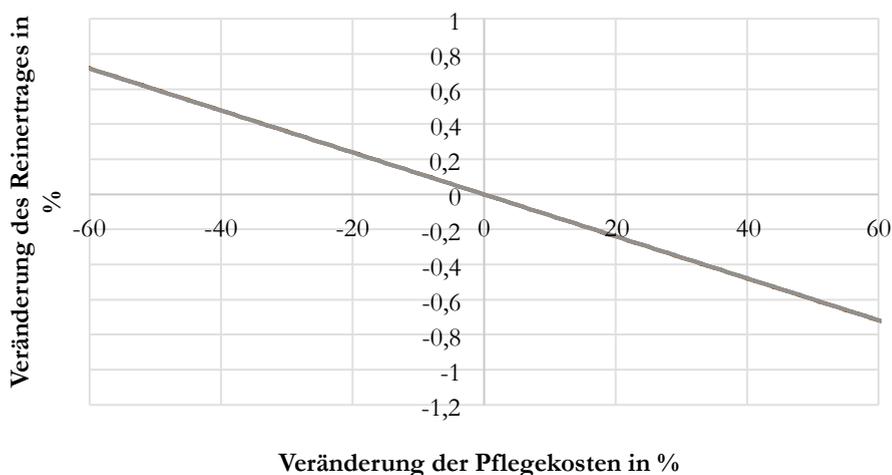


Abbildung 54: Auswirkung der Veränderung der Pflegekosten auf den Reinertrag

Das Variantenstudium der im Modell als baumartenunspezifisch angenommenen Erschließungskosten zeigt bei einer Erhöhung dieser Kosten um 10% eine Verringerung des Reinertrages um 1% bzw. bei einer Verringerung der Kosten um 10% eine Steigerung des Reinertrages der Mischbestandsbetriebsklasse um 1%. Die Erschließungskosten weisen dementsprechend im Vergleich zu den anderen Inputgrößen des Modells ebenfalls nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Höhe des Reinertrages auf, wenngleich ihr Einfluss größer ist als der der Bestandespflegekosten.

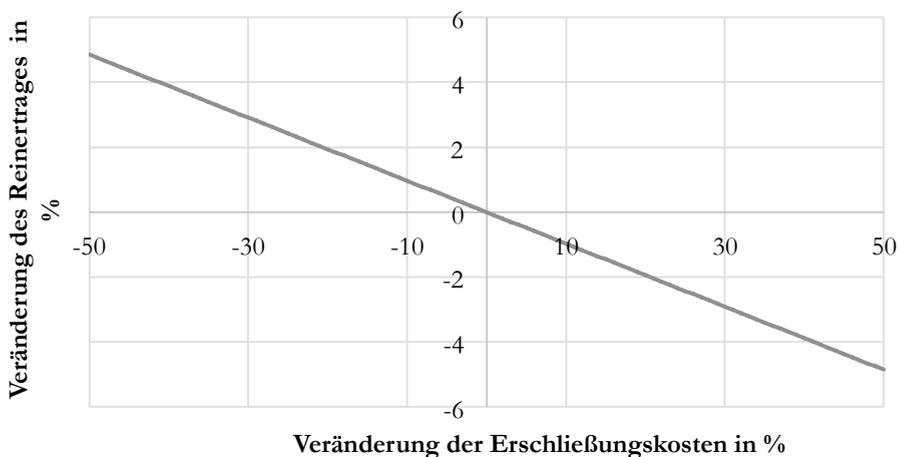


Abbildung 55: Auswirkung der Veränderung der Erschließungskosten auf den Reinertrag

Nach den Holzerlösen und den Holzerntekosten stellen die Verwaltungskosten, die hier ebenfalls als baumartenunspezifisch angenommen wurden, den größten

Einflussfaktor auf die Höhe des Reinertrages dar. Eine Variation der Verwaltungskosten um 10% führt zu einer Erhöhung bzw. Verringerung des Reinertrages um 5%, wie in Abbildung 56 dargestellt.

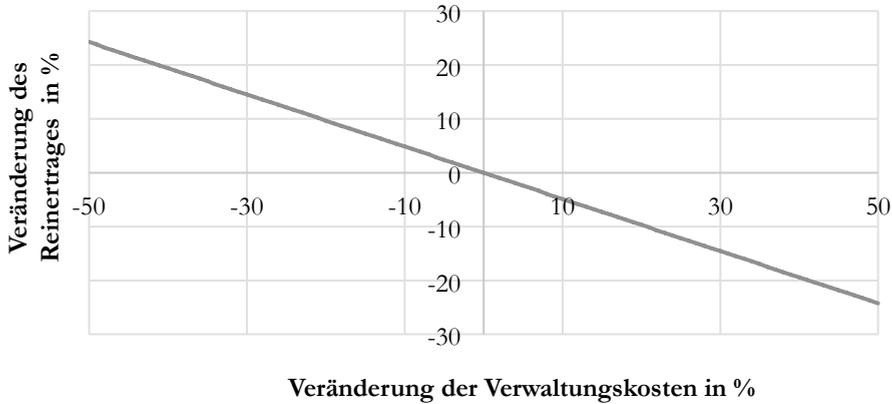


Abbildung 56: Auswirkung der Veränderung der Verwaltungskosten auf den Reinertrag

Vor dem Hintergrund des Variantenstudiums der ökonomischen Modellinputgrößen wird noch einmal die wesentliche Bedeutung von Holzerlösen für das wirtschaftliche Ergebnis der Forstbetriebe – hier analysiert am Beispiel des Reinertrages – deutlich.

8.7.1 Produktionsdauer der Zeitmischungsbaumart Fichte

Das naturale Modell bestimmt neben den ökonomischen Inputdaten das Ergebnis des Reinertrages. Die Länge des ökonomisch optimalen Produktionszeitraums stellt dabei eine Frage dar, die bis hin zu den Anfängen der geregelten Forstwirtschaft zurückreicht. Die Obergrenze des forstwirtschaftlichen Produktionszeitraumes wird durch biologische und technische Eigenschaften der jeweiligen Baumart bestimmt, die sich in der vom Alter abhängigen Mortalität und Holzwertung widerspiegeln (vgl. Möhring 2009 S. 109). Unterhalb dieser biologisch-technischen Obergrenze wird die planmäßige Umtriebszeit durch weitere natürliche Kriterien beeinflusst, wie zum Beispiel durch Kalamitätsrisiken (vgl. Borchers et al. 2008 S. 1229) und damit verbundene geringere Holzerlöse und erhöhte Kosten. Dies gilt ebenso für die Gefahr der Verkernung oder bestimmte Stammdimensionen, die eine spezielle Verarbeitung ausschließen. Daneben sind baumartenindividuelle Gesichtspunkte wie z. B. die Kulmination des durchschnittlichen Gesamtzuwachses zu beachten (in Anlehnung an Speidel 1967 S. 176 ff.). Forstbetriebe sind zudem durch die Knappheit der forstlichen Produktionsfläche und des dem Betrieb zur Verfügung stehenden Kapitals gekennzeichnet.

Diese beiden zuletzt genannten Kriterien bestimmen im Wesentlichen die ökonomisch optimale planmäßige Produktionsdauer, die durch die Maximierung des Bodenertragswertes ermittelt werden kann. Die im Folgenden verwendete

Annuität als jährliche Erfolgsgröße führt zum selben Ergebnis (vgl. Möhring 2009 S. 114). Insbesondere bei der Zeitmischungsbaumart Fichte, die für viele Forstbetriebe die wirtschaftlich bedeutendste Baumart darstellt, stellt sich die Frage nach der ökonomisch optimalen Produktionsdauer. Im Folgenden wird im Rahmen eines Variantenstudiums anhand der reinen Fichtenbetriebsklasse die im Modell verwendete Produktionsdauer der Fichte in Abhängigkeit vom Zinssatz analysiert.

Durch die Verwendung der Zielstärkennutzung im Rahmen der Simulation erfolgt die Nutzung über einen Zeitraum, der, wie bereits in Kapitel 4.3 beschrieben, annähernd Weibull-verteilt ist. Das mittlere risiko-, qualitäts- und dimensionsbedingte Nutzungsalter von Bäumen, das Speidel (1972 S. 113) als die Umtriebszeit eines Bestandes bezeichnet, liegt dementsprechend in dieser Untersuchung rund 20 Jahren vor dem Zeitpunkt der Ernte der letzten Bäume eines Bestandes. Zu diesem Zeitpunkt, also zum Ende der Zeitmischung mit Fichte bzw. zum Ende des Fichtenreinbestandes, werden die bis zu diesem Zeitpunkt noch in die Zielstärke eingewachsenen und zuvor nicht entnommenen Bäume sowie der simulationsbedingt verbliebene Füllbestand entnommen.

In Abbildung 57 ist die aus der maximalen Annuität abgeleitete ökonomisch optimale Produktionszeit in Abhängigkeit vom Kalkulationszins dargestellt.

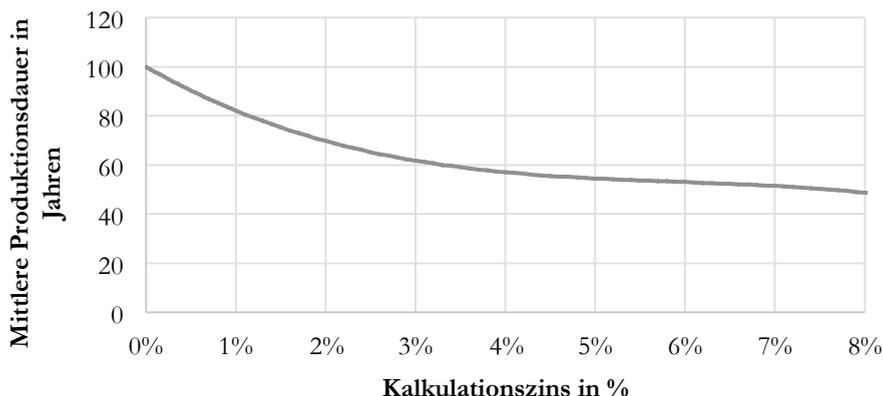


Abbildung 57: Ökonomisch optimale mittlere Produktionsdauer der Fichte in Abhängigkeit vom Kalkulationszins

Für einen Zinssatz von 1,5%, wie ihn beispielsweise Möhring (2014 S. 75) ermittelt hat, ergibt sich entsprechend der oben dargestellten Abbildung 57 eine mittlere Produktionsdauer von 75 Jahren. Sie kommt der im Modell verwendeten mittleren Produktionsdauer von rund 80 Jahren, die sich aus dem in der waldwachstumskundlichen Simulation mit BWINPro hinterlegten Zieldurchmesser der Fichte von 45 cm ergibt, recht nahe. Bei einem höheren Kalkulationszins müsste entsprechend die mittlere Produktionszeit durch eine Verringerung des Zieldurchmessers in der Simulation angepasst werden.

8.7.2 Variantenstudium Risikostärke Fichte – Break-Even-Analyse

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 ausgeführt, ist auch die Anreicherung von Buchenreinbeständen mit Fichte mit baumartenindividuellen Risiken verbunden. Insbesondere die mit der Fichte verbundenen (hohen) Risiken, die als einer der Hauptgründe des großflächig durchgeführten Umbaus von Fichten- in Buchenbestände angeführt werden (vgl. Kapitel 1.1), sind auch bei der Anreicherung von Buchenbeständen mit Fichten zu berücksichtigen.

Meist unterbleibt jedoch eine ökonomische Quantifizierung dieser mit der Fichtenwirtschaft verbundenen Risiken. Mit einer Methode der kritischen Werte, der Break-Even-Analyse, wird daher im Folgenden untersucht, wie hoch das Risiko der Fichte ausfallen müsste, um zu einem mit der Buche äquivalenten Reinertrag zu gelangen.

In den aufgestellten Modellen, die bereits die baumartenindividuellen Risiken berücksichtigen, ergibt sich für die reine Buchenbetriebsklasse mit Kulturkosten ein Reinertrag von rund 10 €/ha/Jahr (vgl. Kapitel 8.4), während dieser für die Fichte trotz der deutlich höheren Risiken 345 €/ha/Jahr beträgt (vgl. Kapitel 8.4). Werden bei der Buchenbetriebsklasse die im Modell verwendeten Pflanzkosten nicht berücksichtigt, was der betrieblichen Realität der meisten Laubholzbetriebe entsprechen dürfte, so erhöht sich der Reinertrag der Buchenbetriebsklasse auf 55,62 €/ha/Jahr. Dieser Reinertrag dient im Folgenden als Referenzwert für das Variantenstudium.

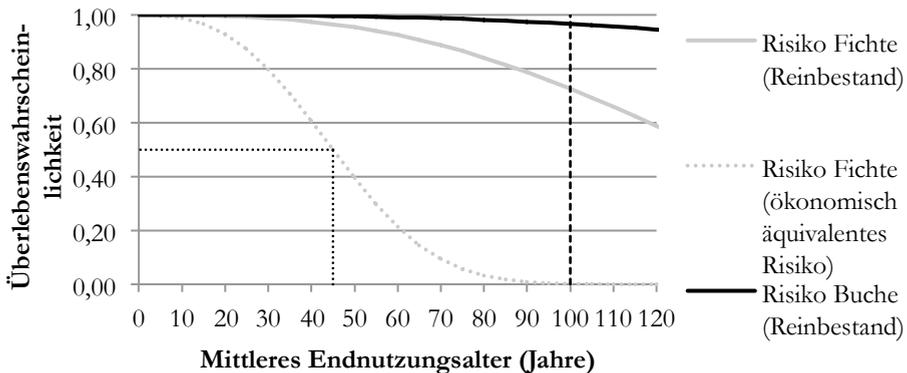


Abbildung 58: Überlebensrisiken von Buche und Fichte und das Risiko der Fichte, das einem ökonomisch äquivalenten Reinertrag der Buche entspricht

Durch die Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeit wird der Reinertrag der Fichtenbetriebsklasse iterativ so weit abgesenkt, bis dieser in seiner Höhe dem der Buchenbetriebsklasse entspricht. Das Risiko wird hierbei als Ausfallwahrscheinlichkeit von Flächenanteilen dargestellt. Unter den zugrunde liegenden, im Modell verwendeten ökonomischen und waldwachstumskundlichen Daten müsste das Ausfallrisiko der Fichte im Alter 100 um ca. das 12,6-fache ansteigen (in Abbildung 58 mit der gepunkteten Linie dargestellt), damit der daraus resultierende

Reinertrag dem der Buche entspricht. Dies würde dazu führen, dass bereits im Alter von 45 Jahren 50% der ursprünglich begründeten Fläche des Fichtenbestandes wieder ausgefallen wären und sich die planmäßige Produktionsdauer von 100 Jahren auf rund 90 Jahre verschiebt. Erst bei einer Risikostärke der Fichte, die über diesem Wert liegt, wäre eine Bewirtschaftung mit Buche aus ökonomischer Sicht wirtschaftlicher.

Der zur Buche äquivalente Reinertrag der Fichte führt also zu einer Risikostärke (S_{100}), die in der Literatur deutlich über den für die Fichte im Reinbestand beschriebenen Risikostärken liegt (vgl. Kapitel 4.2.2). Das mit der Fichte verbundene Risiko kann insofern unter den zum jetzigen Zeitpunkt vorliegenden Rahmenbedingungen und Erkenntnissen aus ökonomischer Sicht nicht als ausschlaggebendes Kriterium für den Waldumbau hin zur Buche bzw. als Hinderungsgrund der Beimischung der Fichte als Zeitmischung in Buchengrundbeständen herangezogen werden.

8.7.3 Kalamitätsnutzungsanteil in Abhängigkeit der Risikostärke

Die Kalamitätsnutzungsmenge der Fichte im verwendeten Modell hängt im Wesentlichen von der gewählten Produktionsdauer und der Risikostärke ab. Durch die bereits im Variantenstudium zur Produktionsdauer miteinbezogene Veränderung der vom Produktionsalter abhängigen Kalamitätsnutzungsmenge wird im Folgenden der Schwerpunkt auf die Analyse der Risikostärke, ihre Auswirkung auf die außerplanmäßigen Nutzungsmengen und den korrespondierenden Reinertrag gelegt. Die Analyse erfolgt hierbei ebenfalls auf Basis von Fichtenbetriebsklassen.

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Risikostärke auf den Anteil der Kalamitätsnutzung am Gesamteinschlag der Betriebsklasse wird in der unten stehenden Abbildung 59 der Anteil der Kalamitätsnutzung an der gesamten Nutzungsmenge einer reinen Fichtenbetriebsklasse über der Risikostärke im Alter 100 (S_{100}) aufgetragen. Hierzu wurde die Risikostärke ausgehend von einer risikofreien Betrachtung im Alter 100 ($S_{100} = 1,0$) bis zu einem risikobedingten Flächenausfall von 100% im Alter 100 ($S_{100} = 0$) in 1%-Schritten erhöht und die 101 Varianten als Linie dargestellt.

Aufgrund der vergleichsweise kurz gewählten mittleren Produktionszeit der Fichte von rund 80 Jahren im Modell, was einer maximalen Produktionszeit von 100 Jahren entspricht, und des frühen Einsetzens der in Form eines teilflächenhaften Ausfalls dargestellten Zielstärkenutzung nimmt der Kalamitätsnutzungsanteil bei einer Risikostärke (S_{100}) von 0,726 mit 8,63% am Gesamteinschlag der Fichtenbetriebsklasse nur einen vergleichsweise kleinen Anteil ein.

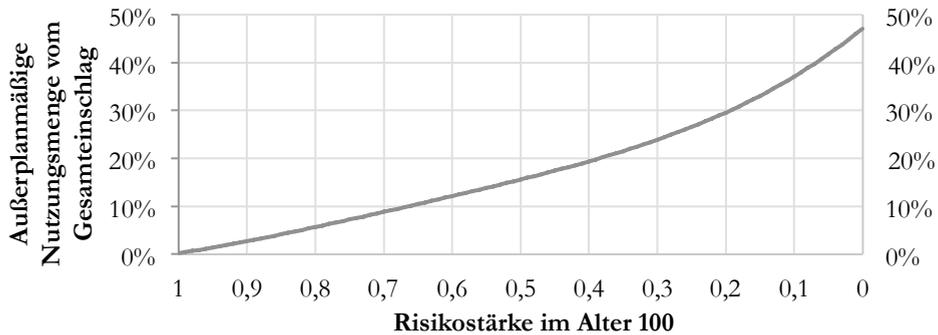


Abbildung 59: Außerplanmäßige Nutzungsmenge der Fichte in Abhängigkeit von der Risikostärke im Alter 100. Der Betrag der Abszisse stellt dabei den Wert der Risikostärke (S_{100}) in der Überlebensfunktion dar.

Die entsprechende Auswirkung auf den Reinertrag ist in Abbildung 60 dargestellt. Hierzu sind die Reinerträge des Variantenstudiums über der Risikostärke (S_{100}) von 1,0 bis 0 in 1%-Schritten aufgetragen und die 101 Varianten als Linie dargestellt.

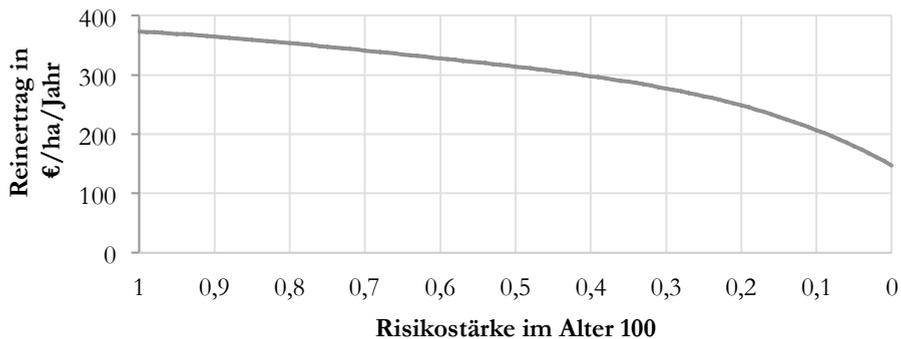


Abbildung 60: Reinertrag der Fichtenbetriebsklasse in Abhängigkeit der Risikostärke. Der Betrag der Abszisse stellt dabei den Wert der Risikostärke (S_{100}) in der Überlebensfunktion dar.

Mit der im Modell verwendeten Risikostärke (S_{100}) von 0,726 berechnet sich ein Reinertrag von 345 €/ha/Jahr für die Fichtenbetriebsklasse. Eine Erhöhung der Risikostärke um 10% auf eine S_{100} von 0,66 hat die Verringerung des Reinertrages auf 337 €/ha/Jahr zur Folge, während eine Verringerung der Risikostärke um 10% ($S_{100} = 0,7986$) eine Erhöhung des Reinertrages auf 352 €/ha/Jahr bewirkt. Die Differenzen zum Reinertrag der risikofreien Variante (373 €/ha/Jahr) können dabei als die durchschnittlichen Risikokosten je ha interpretiert werden.⁵⁸

⁵⁸ Ein direkter Vergleich mit der Darstellung in Kapitel 8.7.2 ist nicht möglich, da sich in der dortigen Darstellung auf Grund des hohen Ausfallrisikos auch die Produktionsdauer verkürzt hat.

9 Diskussion

Die vorliegende Arbeit erweitert die bereits von Möhring (1986), Dieter (1997), Staupendahl (2011), Gries (2012) und weiteren Autoren entwickelten Modellbestandteile von nachhaltigen Bestandes- bzw. Betriebsmodellen unter der Berücksichtigung von Mischbeständen und Risiken. Neben den baumartenindividuellen Risiken werden explizit auch Mischungseffekte der Baumarten Buche und Fichte sowie deren unterschiedlichen Produktionszeiten im Mischbestand in die Modellentwicklung eingebunden.

Die aus diesen Modellrechnungen resultierenden ökonomischen Ergebnisse für eine Anreicherung von Buchenbeständen mit Fichte können darüber hinaus als Grundlage für die forstbetriebliche waldbauliche Entscheidungsfindung und zur modellhaften Abschätzung der damit verbundenen ökonomischen Konsequenzen dienen. Dies gilt unter Berücksichtigung der in den Modellrechnungen verwendeten naturalen und standörtlichen Voraussetzungen sowie der verwendeten Datengrundlage und der zum Erstellungszeitpunkt dieser Arbeit geltenden Holzmarktbedingungen.

9.1 Vergleich mit der betrieblichen Realität

Die empirischen Daten der Betriebe des Testbetriebsnetzes Forst, die mit der multiplen Regressionsanalyse der Flächen der Baumartengruppen zugeordnet wurden, zeigen ebenso wie die Modellberechnungen für die Reinbestände den deutlichen Unterschied in den Reinerträgen zwischen der Baumartengruppe des Laubholzes, die überwiegend aus Buche besteht, und der Baumartengruppe Fichte. Mit einem Reinertrag von -55,46 €/ha/Jahr je Hektar Baumartenfläche für die Baumartengruppe Laubholz liegt auch hier der durchschnittliche Reinertrag der Betriebe des Testbetriebsnetzes deutlich hinter dem der Baumartengruppe Fichte mit 119,74 €/ha Baumartenfläche/Jahr zurück.

Ein Vergleich der Modellrechnungen mit ihren zeitpunktbezogenen und regionalen Inputdaten und diesen durchschnittlichen deutschlandweiten Ergebnissen der Betriebe für den Zeitraum 2003–2011 führt aufgrund der sich ändernden Rahmenbedingungen während des Zeitraums zwangsläufig zu Abweichungen zwischen den Ergebnissen des Testbetriebsnetzes und den Modellrechnungen. Trotz dieser eingeschränkten Vergleichbarkeit der Modelldaten und der Testbetriebsnetzerggebnisse werden diese im Folgenden zur Einschätzung der Validität der Modellergebnisse verwendet. Aufgrund fehlender Mischbestandsinformationen wird hier der Vergleich auf Basis der Reinbestandsmodelle durchgeführt und die Ergebnisse durch die Verwendung gleicher ökonomischer Eingangsdaten auf Mischbestände übertragen.

9.1.1 Validierung der Buchenbetriebsklasse

Der Reinertrag der Modellberechnungen liegt für die reine Buchenbetriebsklasse (Variante M₄) mit 10 €/ha/Jahr über dem Reinertrag der Baumartengruppe für das Laubholz des Testbetriebsnetzes mit durchschnittlichen -55,46 €/ha/Jahr (vgl. Tabelle 1). Bereits beim Einschlag liegen die Betriebe des Testbetriebsnetzes mit 4,33 Efm/ha/Jahr deutlich hinter den Modellannahmen mit 6,32 Efm/ha/Jahr zurück. Wird der deutschlandweite durchschnittliche Zuwachs der Baumarten (vgl. Tabelle 20) als Vergleichskriterium zugrunde gelegt, so zeigen die Ergebnisse der BWI 3 für alle Besitzarten einen durchschnittlichen Zuwachs aller Laubbäume von 8,7 m³/ha/Jahr, ein Wert, der umgerechnet in Erntefestmeter mit 6,96 Efm/ha/Jahr knapp über den im Modell verwendeten Parametern liegt. Bei einer separaten Betrachtung der Buche zeigen die Ergebnisse der Bundeswaldinventur einen Zuwachs von 10,3 m³/ha/Jahr (vgl. Polley et al. 2014b S. 34), was einer nachhaltigen Nutzungsmenge von 8,24 Efm/ha/Jahr entspricht, auch wenn beim Laubholz das Altersklassenverhältnis mit einem Flächenschwerpunkt in der II. und III. Altersklasse nicht ganz ausgeglichen ist (vgl. Polley et al. 2014b S. 16.).

Tabelle 20: Zuwachs bzw. Einschlagsresultate der Bundeswaldinventur 3 (vgl. Polley et al. 2014b S. 34) und des Testbetriebsnetzes (Privatwaldbetriebe) im Durchschnitt der Jahre 2003–2011 im Vergleich⁵⁹ (vgl. Kapitel 2.2)

Bundeswaldinventur 3	Laubholz	Zuwachs	8,7 m ³
		Entspricht	6,96 Efm/ha/Jahr
	Buche	Zuwachs	10,3 m ³
		Entspricht	8,24 Efm/ha/Jahr
	Fichte	Zuwachs	15,3 m ³
		Entspricht	12,24 Efm/ha/Jahr
Testbetriebsnetz	Laubholz	Einschlag	4,33 Efm/ha/Jahr
	Fichte	Einschlag	11,16 Efm/ha/Jahr

Mit durchschnittlichen Holzerlösen der Buche von 44,12 €/Fm und Holzerntekosten von 20,33 €/Fm liegen die Werte der Betriebe des Testbetriebsnetzes im Bezugszeitraum unter den durchschnittlichen im Modell verwendeten Werten der Landwirtschaftskammer Niedersachsens des Jahres 2014 mit durchschnittlichen Holzerlösen von 51,90 €/Fm und den aus der Waldbewertungsrichtlinie NRW abgeleiteten durchschnittlichen Holzerntekosten von 26,11 €/Fm. Die durchschnittlichen Holzerlöse des Modells liegen damit um 7,78 €/Fm über den Erlösen des deutschlandweiten Testbetriebsnetzes. Dies kann in Teilen auf die hohen, im Modell verwendeten Brennholzerlöse zurückgeführt werden, die stark zwischen den Regionen Deutschlands schwanken und in Niedersachsen die Erlöse der Buche vom unteren Ende her stabilisieren (vgl. Möhring und Wilhelm 2013c S. 21).

Die Begründungskosten des Modells liegen, bedingt durch die getroffenen Annahmen der künstlichen Begründung der Buche zum Zwecke des Baumartenvergleichs mit 45 €/ha/Jahr deutlich über den Begründungskosten im Testbetriebsnetz, die durch den hohen Anteil der natürlichen Verjüngung der Laubholzbetriebe bei 7,8 €/ha/Jahr liegen. Die Pflegekosten dagegen liegen mit 4,65 €/ha/Jahr im Testbetriebsnetz und 5 €/ha/Jahr im Modell sehr eng beieinander.

Die größten Abweichungen zwischen den Modellergebnissen und den Daten der Betriebe des Testbetriebsnetzes sind durch den nachhaltigen Einschlag der Buche in der Betriebsklasse bedingt. Die Modelle lassen die momentan angespannte Situation des Marktes für Buchenstammholzsortimente unberücksichtigt, die bei vielen Betrieben zu einem anhaltenden Vorratsaufbau und dementsprechend zu einem Einschlag unter dem möglichen nachhaltigen Nutzungssatz in der Buche führen (vgl. Möhring und Wilhelm 2013a S. 21).

Ein weiterer Vergleich der Modellberechnungen mit dem durchschnittlichen deutschlandweiten Zuwachs der Buche von 10,3 m³/ha/Jahr (Polley et al. 2014b S. 34), was in etwa einer nachhaltigen Nutzungsmenge von 8,24 Efm/ha/Jahr

⁵⁹ Als Umrechnungsfaktor von Vorrats- in Erntefestmeter wurde hier in Anlehnung an Möhring et al. (2010a S. 87) ein Faktor von 0,8 verwendet.

entspricht, zeigt aber auch, dass die Modelldaten hinter diesen Zuwachsgrößen mit einem nachhaltigen Nutzungssatz von 6,32 Efm/ha/Jahr zurückbleiben und somit das Wachstum der Buche und ihre tatsächliche Nutzungsmöglichkeit auf den im Modell unterstellten, vergleichsweise gut ausgestatteten Standorten eher unterschätzen. Auch hinter dem durchschnittlichen Zuwachs der Buche in Niedersachsen mit 10,6 Vfm/ha/Jahr bleibt der Nutzungssatz der Buche im Modell zurück.

9.1.2 Validierung der Fichtenbetriebsklasse

Der Reinertrag der Modellrechnung liegt mit 345 €/ha/Jahr bei der reinen Fichtenbetriebsklasse (Variante M₀) deutlich über den durchschnittlichen Ergebnissen des Testbetriebsnetzes von 119,74 €/ha/Jahr für den Zeitraum 2003–2011. Sowohl der nachhaltige Einschlag der Modellbetrachtung wie auch der Einschlag im Testbetriebsnetz mit 15,3 Vfm/ha/Jahr, was umgerechnet ca. 12,24 Efm/ha/Jahr entspricht, liegen unter dem durchschnittlichen nachhaltigen Zuwachs für die Fichte sowohl für Deutschland als auch für Niedersachsen mit 15,1 Vfm/ha/Jahr bzw. 12,08 Efm/ha/Jahr. Die durchschnittlichen Holzerlöse der Fichte für den Zeitraum 2003–2011 lagen im Testbetriebsnetz bei 46,72 €/Fm. Dagegen fallen die Holzerlöse basierend auf der Sammlung der Landwirtschaftskammer Niedersachsens für das Jahr 2014 mit 76,3 €/Fm deutlich höher aus. Diese Differenz der Holzerlöse ist in Teilen auf die gestiegenen Holzerlöse für die Fichte in den letzten Jahren zurückzuführen. Abbildung 61 zeigt beispielhaft den Anstieg der Holzerlöse für die Baumart Fichte für das Sortiment Stammholz B-C von 52,70 €/Fm im Jahr 2003 auf 92,70 € im Jahr 2012 für den Landeswald in Niedersachsen (Bitter et al. 2008 und Schade 2013).

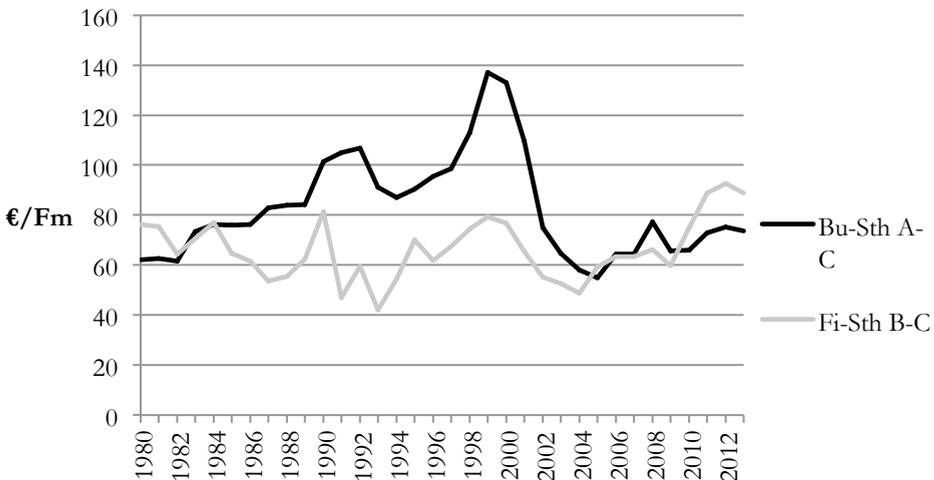


Abbildung 61: Stammholzerlöse des Staatswaldes in Niedersachsen (Bitter et al. 2008 und Schade 2013)

Insbesondere die geringeren durchschnittlichen Holzerlöse des Testbetriebsnetzes wirken sich direkt auf die Höhe des Deckungsbeitrages I der Fichtenbetriebsklasse aus, der mit 313,30 €/ha/Jahr deutlich hinter dem der Modellberechnungen mit 508 €/ha/Jahr zurückbleibt. Die darin enthaltenen durchschnittlichen Holzerntekosten der Fichte liegen dagegen mit 18,64 €/Fm für das Testbetriebsnetz und mit 23,49 €/Fm für die Modellberechnungen vergleichsweise nahe beieinander. Als durchschnittliche jährliche Begründungskosten wurden basierend auf den Daten des Testbetriebsnetzes 21,73 €/ha für die Fichte ermittelt, während hierbei für die Modellrechnung 36 €/ha zugrunde gelegt wurden. Die Differenz dürfte auch hier in Teilen auf die natürliche Verjüngung der Fichte zurückgeführt werden. Bei den Pflegekosten dagegen liegen die Analysen des Testbetriebsnetzes mit 18,34 €/ha deutlich über den Modellannahmen mit 6,71 €/ha.

9.1.3 Analyse der baumartenunabhängigen Kosten

Im Modell werden einheitliche Erschließungskosten für beide Baumarten verwendet. Die unterschiedliche Lage der Testbetriebsnetzbetriebe mit Laubholz- bzw. Fichtenschwerpunkten führt bei diesen zwangsläufig zu Unterschieden in den Erschließungskosten. Während die Buche schwerpunktmäßig in den Mittelgebirgen von der Schwäbisch-Fränkischen Alb über den Pfälzerwald, die Eifel, den Odenwald und den Spessart bis zum Solling vorkommt, liegen die Anbauschwerpunkte der Fichte im Alpenvorland bis hin zu den Hochlagen Süd- und Südwestdeutschlands und den Mittelgebirgen Nordostbayerns bis in den Thüringer Wald, das Erzgebirge, den Hunsrück, die Eifel, den Taunus, den Westerwald, das Rothaargebirge und den Harz. Für Laubholz weisen die ermittelten baumartengruppenspezifischen Daten des Testbetriebsnetzes durchschnittliche Erschließungskosten von 6,17 €/ha auf, während die Baumartengruppe Fichte aufgrund ihres Schwerpunktes in den Voralpen- und den Mittelgebirgslagen und den damit verbundenen aufwendigeren Erschließungskonzepten durchschnittliche Erschließungskosten von 26,47 €/ha aufweist. Mit 20 €/ha liegen die im Modell angenommenen Erschließungskosten über den durchschnittlichen Erschließungskosten der Testbetriebsnetzbetriebe von 16,32 €/ha.

Die Verwaltungskosten, die ebenfalls einheitlich für beide Baumarten im Modell mit 100 €/ha hinterlegt wurden, weichen von den Testbetriebsnetzbetrieben für beide Baumartengruppen mit 139,92 €/ha für die Laubholzgruppe und 127,03 €/ha für die Fichtengruppe ab. Dies kann im Wesentlichen darauf zurückgeführt werden, dass in den Verwaltungskosten der Testbetriebsnetzbetriebe auch Verwaltungskosten der Produktbereiche 2–4 enthalten sind (vgl. Möhring und Wilhelm 2013b S. 25 f.). Dementsprechend handelt es sich um aggregierte Daten, die von den Betrieben nicht produktbereichsspezifisch im Rahmen der Betriebsvergleichserhebung erfasst werden.

Zusammenfassend kann trotz der Einschränkungen, die mit diesem Vergleich der Modellberechnungen mit den Testbetriebsnetzergebnissen verbundenen sind, wie zum Beispiel die unterschiedlichen Analysezeiträume und die mit dem Modell

verbundenen Prämissen, eine Vergleichbarkeit der Modellergebnisse festgehalten werden, wenngleich in den Vergleichen auch deutlich wird, dass die Größenordnung der Ergebnisse stark von einzelnen, im Modell verwendeten ökonomischen Inputgrößen abhängig ist.

9.2 Einordnung in bisherige forstökonomische Ergebnisse

Der Vergleich der Modellergebnisse der vorliegenden Arbeit mit anderen Veröffentlichungen ist ebenfalls eingeschränkt auf der Basis des Vergleichskriteriums des Reinertrages der Reinbestände von Buche und Fichte aufgrund fehlender Mischbestandsergebnisse möglich. Eine Vergleichbarkeit mit älteren Untersuchungen wird darüber hinaus dadurch erschwert, dass bei diesen baumartenindividuelle Risiken nicht mit in die Berechnungen des Reinertrages einbezogen wurden. Obwohl Risiken und Unsicherheiten bei forstlichen Entscheidungssituationen schon lange beschrieben werden, haben sie bei forstlichen Investitionsentscheidungen in Form von Modellen erst in den letzten 30 Jahren Eingang gefunden (in Anlehnung an Dieter 1997 S. 83). In der forstbetrieblichen Praxis werden diese heute dennoch bei der Baumartenwahl bzw. bei Investitionsentscheidungen nicht immer angemessen berücksichtigt.

Trotz dieser eingeschränkten unmittelbaren Vergleichbarkeit wird in Abbildung 62 am Beispiel des direkten Paarvergleichs der Reinerträge für Buche und Fichte auf der Basis von Veröffentlichungen für Reinbestände nochmals die ökonomische Leistungskraft der beiden Baumarten deutlich. Für die Darstellung wurde die von Möhring, Leefken und Gutsche (2008 S. 330) entwickelte Übersicht der Reinerträge für mittlere Wachstumsverhältnisse und Umtriebszeiten der Buche von 120–140 Jahren und der Fichte von 80–100 Jahren für den Zeitraum von 1925 bis 2007 mit den Ergebnissen der Modellrechnungen für die Reinbestände (dargestellt für das Jahr 2015) und um die mithilfe der multiplen Regressionsanalyse ermittelten Ergebnisse des Testbetriebsnetzes erweitert.

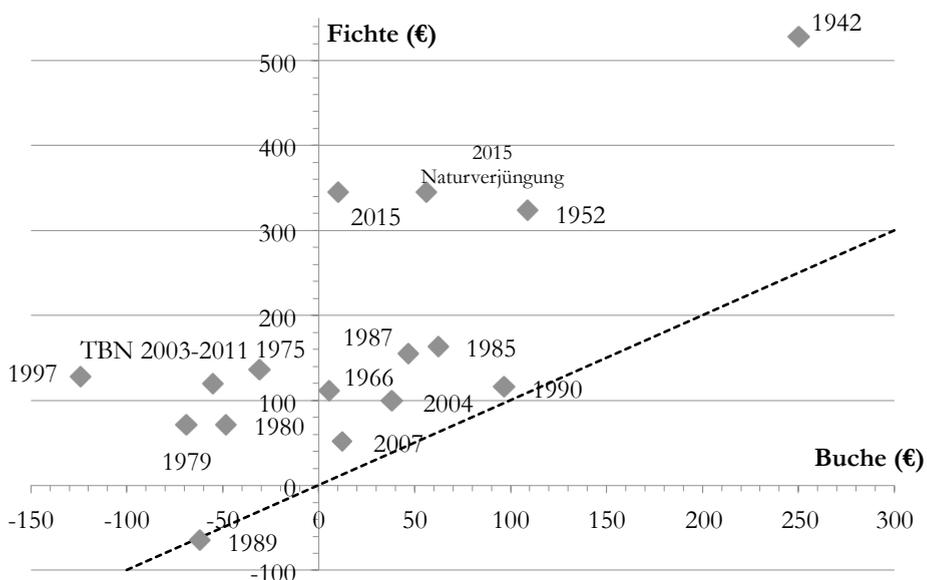


Abbildung 62: Reinerträge der Analyse (2015 und 2015 Naturverjüngung) und aus Literaturquellen verschiedener Autoren für Buche und Fichte im Zeitvergleich (1925–2015) (Möhring et al. 2008 S. 330 erweitert) und Winkelhalbierende

Im Vergleich der einzelnen Reinertragskalkulationen wird der hohe Reinertrag 2015 für die Fichte deutlich, der lediglich vom Reinertrag 1942 (umgerechnet in €) übertroffen wird. In der Regel unterstellen die Reinertragskalkulationen eine Pflanzung der Baumarten. Der Reinertrag der Buche für 2015 inklusive Pflanzung liegt mit 10 €/ha/Jahr nahezu auf der selben Höhe wie der aus den Berechnungen von 2007 mit rund 12 €/ha/Jahr. Dies kann auf die Holzerlöse der Buche zurückgeführt werden, die für die beiden Betrachtungszeitpunkte nahezu auf der gleichen Höhe liegen. Der Reinertrag der Fichte dagegen hat sich von rund 52 €/ha/Jahr im Jahr 2007 auf 345 €/ha/Jahr im Jahr 2015 stark erhöht. Dies kann im Wesentlichen auf die deutlich veränderten Holzerlöse zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 61). Die Annahme einer natürlichen Verjüngung der Buche verschiebt deren Reinertrag auf rund 56 €/ha/Jahr (bezeichnet in Abbildung 62 als 2015 Naturverjüngung). Er liegt somit immer noch deutlich hinter dem der Fichte zurück. Die zeitraumbezogenen Ergebnisse des Testbetriebsnetzes liegen insbesondere bei der Buche mit -55,46 €/ha/Jahr deutlich unter den Modellergebnissen, wengleich sie immer noch über den Veröffentlichungen der Jahre 1997 und 1989 mit -124,14 €/ha/Jahr bzw. -62,07 €/ha/Jahr liegen. Für die Fichte dagegen liegen die Ergebnisse des Testbetriebsnetzes im Mittelfeld, auch wenn diese im Vergleich zum Jahr 2007 (rund 52 €/ha/Jahr) mit 119,74 €/ha/Jahr doppelt so hoch sind, aber dennoch deutlich unter den Ergebnissen der Modellrechnungen mit 345 €/ha/Jahr liegen.

Trotz der großen Streuung der Ergebnisse der letzten 90 Jahre lässt sich für die einzelnen Kalkulationen der nachhaltigen Reinerträge von Buche und Fichte eine mittlere Reinertragsdifferenz von rund 136 €/ha zugunsten der Fichte feststellen. Dabei lagen die Reinerträge der Buche bei allen Untersuchungen für den gesamten Zeitraum unter denen der Fichte. Auch wenn es sich bei diesen Reinertragskalkulationen um Betrachtungen zu den jeweiligen Zeitpunkten handelt, die im Wesentlichen von den jeweils aktuellen Holzerlösen und Produktionskosten bestimmt sind, so lassen sich zwei wesentliche Gesichtspunkte erkennen:

Auf der einen Seite zeigt der Vergleich der Reinerträge für die Buche von 2007 und 2015, dass die Ergebnisse bei unabhängigen Berechnungen und nahezu gleich hohen Holzerlösen zu Ergebnissen in der gleichen Größenordnung führen und somit die hier angewendete Methodik für den Buchenreinbestand bestätigen.

Auf der anderen Seite lassen sich aus der Abbildung 62 auch unmittelbar die unterschiedliche ökonomische Leistungskraft der beiden Baumarten erkennen und ihre wirtschaftliche Bedeutung für Forstbetriebe ablesen – Unterschiede, so zeigt der lange Betrachtungszeitraum, die nicht erst durch die Holzpreisentwicklung der letzten Jahre zu Tage treten. Diese hat den Effekt der unterschiedlichen ökonomischen Leistungsfähigkeit der beiden Baumarten lediglich verstärkt.

9.3 Diskussion der Methodik

Die modellhafte ökonomische Analyse erfolgt „traditionell“ für einzelne Baumarten und deren Vergleich auf der Basis von einzelnen Beständen und Betriebsklassen. Durch die Struktur der hierfür verwendeten Modelle wird meist eine statische zinsfreie Betrachtung unter der Verwendung gegenwärtiger Preise und Kosten durchgeführt (vgl. Ripken 1990 S. 237). Dies führt zwangsläufig zu einer gleichbleibenden Vorstellung von zukünftigen Entwicklungen der Eingangsgrößen, während die tatsächliche Entwicklung dabei meist außer Acht gelassen wird.

Der Faktor Zeit und die Berücksichtigung des zeitlichen Anfalls der Ein- und Auszahlungen wird bei Verwendung nachhaltiger (stationärer) Betriebsklassenmodelle ebenso ausgeschlossen wie die Frage der Finanzierung. Hierdurch wird jedoch implizit angenommen, dass finanzielle Mittel für den Forstbetrieb unbegrenzt zur Verfügung stehen, eine Annahme, die sich jedoch nicht auf die forstbetriebliche Realität übertragen lässt. Im Rahmen der ökonomischen Bewertungen der vorliegenden Arbeit wurde daher neben dem zinsfreien Reinertrag als jährliche gesamtbetriebliche Erfolgsgröße auf der Ebene des einzelnen Bestandes die Annuität für die Analyse der Auswirkungen der Nadelholzanreicherung auf die betrieblichen finanzwirtschaftlichen Zielsetzungen (Liquidität und Rentabilität) verwendet. Diese ermöglicht eine explizite Berücksichtigung der Finanzmittelknappheit und den zeitlichen Anfall der einzelnen Ein- und Auszahlungen.

Die Verfahren der Investitionsrechnung sind damit eine wesentliche Grundlage für die wirtschaftlich orientierte Investitionsentscheidung, wenngleich nicht quantifizierbare Entscheidungsfaktoren unberücksichtigt bleiben. Insbesondere

bei Forstbetrieben in Mitteleuropa stehen traditionell eher natural-technische Gesichtspunkte anstelle ökonomischer Methoden bei der forstlichen Betriebsplanung im Vordergrund der Baumartenwahl (vgl. Möhring 1994 S. 77).

Trotz dieser Einschränkungen bleiben die Verfahren der Investitionsrechnung aus betriebswirtschaftlicher Sicht ein unersetzlicher Bestandteil bei waldbaulichen Investitionsentscheidungen. Auch wenn nicht monetäre Ziele bei Investitionsentscheidungen im Vordergrund stehen, so können Methoden der Investitionsrechnung wenigstens die mit der Baumartenwahl verbundenen ökonomischen Konsequenzen und damit die relative ökonomische Vorteilhaftigkeit einer bestimmten Baumarten- oder Baumartenmischungswahl aufzeigen.

Die gesamtbetriebliche Auswirkung des Prozesses der Nadelholzanreicherung mit Fichte wird jedoch erst am Beispiel der Anreicherung der reinen Buchenbetriebsklasse und des damit verbundenen dynamischen Übergangs zur Mischbestandsbetriebsklasse deutlich. Dabei verlässt die Betriebsklasse befristet für den Zeitraum des Übergangs von der Rein- zur Mischbestandsbetriebsklasse ihren stationären Gleichgewichtszustand. Hierbei werden im Modell sowohl die Veränderungen der betrieblichen Produktions- und Nutzungsverhältnisse als auch die Verschiebung der Mischungsanteile in der Zeit konsistent abgebildet.

Wie bereits mit der Amortisationsrechnung für den Einzelbestand dargestellt, werden im Vergleich zur Naturverjüngungsvariante des reinen Buchenbestandes die deutlich höheren Begründungskosten für die Fichte und der damit verbundene Amortisationszeitraum beim Übergang der Rein- zur Mischbestandsbetriebsklasse durch das Absinken des Reinertrages zu Beginn des Prozesses besonders deutlich. Die Investition in die Mischbaumart Fichte zu Beginn des Übergangsprozesses hat zunächst einen geringeren Überschuss und eine entsprechend eingeschränkte Liquidität zur Folge. In der gesamtbetrieblichen Darstellung zeigt sich neben dem deutlichen Anstieg der jährlichen Überschüsse der Mischbestandsbetriebsklasse nach diesem Übergangszeitraum die letztendlich dauerhafte Erhöhung des Reinertrages durch die Beimischung der Fichte bei einer Grenzrendite von 4,75% (vgl. Kapitel 8.6).

Die Zeitmischung von Fichte in Buche hat bei der Einzelbestandsbetrachtung mit einer maximalen Produktionsdauer von 140 Jahren für den Buchengrundbestand eine im Vergleich zu Investitionen in anderen Branchen sehr lange Betrachtungszeit zur Folge. Die Bewertung solch langer Zeiträume ist aufgrund der damit verbundenen Unsicherheiten der einzelnen Eingangsgrößen, die in die Berechnung Eingang finden, nicht unproblematisch. Eine Methode zur Berücksichtigung dieser Unsicherheiten bei Investitionsentscheidungen stellt die Sensitivitätsanalyse dar, der hier gerade wegen des langen Bewertungszeitraumes eine besondere Bedeutung zukommt. Die Auswirkungen auf den Reinertrag bzw. auf die Annuität durch Veränderungen der zukünftigen Ein- und Auszahlungen wurden am Beispiel der Sensitivitätsanalyse der Mischungsvariante M_2 dargestellt. Diese Analyse ermöglicht es, die Auswirkungen von Veränderungen der Eingangsgrößen in den Prozess der Entscheidungsfindung zu integrieren und die mit Unsicherheiten

verbundenen möglichen Auswirkungen transparenter zu machen.⁶⁰ An der grundsätzlichen relativen Vorteilhaftigkeit der einzelnen Mischungsvarianten ändern die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse innerhalb des hier betrachteten Rahmens nichts, dafür sind die Unterschiede der Volumenproduktion und der Holzerlöse der Baumarten Buche und Fichte zu groß.

Die Einbeziehung baumartenindividueller Risiken ist ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit. Insbesondere die Arbeiten von Dieter (1997), Staupendahl (2011), Knoke (2008) und Gries (2012) haben hierzu durch die Einbeziehung von Überlebensrisiken in die forstökonomische Bewertung den Weg geebnet. Der Einbeziehung baumartenindividueller biotischer und abiotischer Risiken kommt insbesondere beim Vergleich der Baumarten Buche und Fichte eine besondere Bedeutung zu. Auf die Vorteilhaftigkeit der einzelnen Mischungsvarianten hat die Einbeziehung dieser naturalen Risiken unter der Verwendung empirisch belegter Risikostärken jedoch keine wesentlichen Auswirkungen. Im Rahmen dieser Arbeit wird allerdings lediglich das Windwurfisiko der Baumarten betrachtet. Für die in der forstbetrieblichen Realität darüber hinaus vorkommenden Risiken, wie zum Beispiel durch Schnee, Frost, Insekten oder Pilze, fehlen zum momentanen Zeitpunkt noch baumartenindividuelle vom Bestandesalter abhängige Ausfallwahrscheinlichkeiten. Auch wenn zu erwarten ist, dass viele Betriebe die von diesen Risikoarten betroffenen Bäume im Rahmen der Durchforstung bzw. bei der Ernte in Nachbarbeständen im Rahmen einer Blockbildung ohne wesentlich größere Mehrkosten oder Erlösminderungen miternten und vermarkten können, so führt die ledigliche Einschränkung des Risikos auf sturmschadensbedingte Ausfallwahrscheinlichkeiten, insbesondere bei der Fichte, zu einer Unterschätzung des mit der Produktion verbundenen Gesamtrisikos. Verstärkt wird dieser Effekt in den durchgeführten Modellanalysen durch die im Vergleich zur Buche deutlich kürzeren Produktionsdauer der Fichte sowie der vom Mischungsanteil der Fichte abhängigen sturmschadensbedingten Ausfallwahrscheinlichkeit. Je nach Mischungsanteil der Fichte scheiden im Vergleich zur Buche nur geringe kalamitätsbedingte Mengen aus.

Der Einfluss weiterer Risiken, die sich aus dem forstlichen Produktionsprozess ergeben, wie zum Beispiel Finanzrisiken, die zu den speziellen Betriebsrisiken gehören, haben im Rahmen der Veränderung der Holzerlöse und Produktionskosten in die Sensitivitätsanalyse Eingang gefunden. Diese Risikobetrachtung verdeutlicht ebenfalls, dass die Ergebnisse dieser Untersuchung weniger als ein absoluter Maßstab für die eigentliche waldbauliche Entscheidung angesehen werden sollten, sondern dass diese vielmehr durch die Unterschiede der Ergebnisse bei den einzelnen Mischungsvarianten und deren Größenordnungen bei der Entscheidungsfindung unterstützen können.

⁶⁰ Alternative Konzepte zum Umgang mit den mit Unsicherheiten behafteten Eingangsdaten beschreiben beispielsweise Beinhofer (2007), Beinhofer und Knoke (2010), Dieter (2001), Gries und Knoke (2013) sowie Knoke (2008) mit der Verwendung der Monte-Carlo-Simulation.

Der Einfluss der Mischung und Mischungsform auf die Holzqualität stellt ein in der Literatur lang und kontrovers diskutiertes Thema dar (vgl. Mitscherlich 1954 S. 184, Lüpke und Spellmann 1997 S. 171, Lüpke 2004 S. 47, Knoke et al. 2008 S. 94, Knoke und Seifert 2008 S. 488 und Gries und Knoke 2013 S. 513 f.). Auch wenn zum aktuellen Zeitpunkt hier noch wissenschaftlich fundierte Analysen fehlen, zeigen Befragungen von unterschiedlichen Forstbetrieben mit langjährigen Mischbestandserfahrungen,⁶¹ dass durch konsequente Pflege und Mischwuchsregulierungen in den Randbereichen der Mischungsformen sowie bei einer ausreichend großen Mischungsform, wie zum Beispiel der hier in den Modellen verwendeten gruppenweisen Mischung, zwar Beeinträchtigungen in der Holzqualität der Fichte in den Randbereichen der Mischungsform mit einem unruhigeren Wuchsbild vorkommen können. Sie führen aber zu keinen Abschlügen bei den Holzerlösen. Mögliche Auswirkungen auf die Holzqualität der Buche sind in der hier verwendeten Wertklasse 2 mit ihren hohen C- und Industrieholzanteilen (vgl. Kapitel 6.5) bereits abgebildet, wobei auch in den untersuchten Betrieben keine wesentliche Verschiebung in Richtung geringer wertigerer Sortimente im Vergleich zu gleichaltrigen Buchenreinbeständen festgestellt werden konnte. Dementsprechend wurde in der vorliegenden Arbeit auf eine mischungsbedingte Veränderung der Holzqualität verzichtet.

9.4 Schlussfolgerung und Empfehlung

9.4.1 Modellierung und ihre Aussagekraft für waldbaulich-ökonomisch orientierte Entscheidungen

Obwohl mit der im Rahmen dieser Arbeit erfolgten Modellbildung Prämissen und Einschränkungen verbunden sind, können die Modelle, wie bereits im Rahmen der Überprüfung der Realitätsnähe der Modelle dargestellt wurde, die naturale und ökonomische Situation von Buchen-, Buchenmischbeständen mit Fichte und Fichtenreinbeständen abbilden. Mit der Sensitivitätsanalyse wurde aufgezeigt, wie stark die einzelnen Eingangsgrößen des Modells das Ergebnis beeinflussen. Die mit den Holzvolumina und -sortimenten verbundenen Holzerlöse bestimmen im Wesentlichen die Höhe des Reinertrages, wie dies an den großen Schwankungen von Reinerträgen für die letzten 90 Jahre in Abbildung 62 deutlich wird. Die entscheidende Einfluss- und Steuerungsgröße für die Höhe des Reinertrages ist jedoch der Mischungsanteil der Fichte. Aus dem Mischungsanteil bei der Bestandesbegründung und der jeweiligen Produktionsdauer der Mischbaumarten resultiert dabei der tatsächliche durchschnittliche Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse.

⁶¹ Sich in der Bearbeitung befindendes Verbundprojekt von UNIQUE forestry and land use und der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA): Steigerung von Flächenproduktivität und Wertschöpfung in Buchenwäldern. Gefördert vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.

Für die strategisch ausgerichtete forstbetriebliche Planung bieten die mit der multiplen Regressionsanalyse berechneten baumartengruppenspezifischen Deckungsbeiträge und die Modellkalkulationen mit den verschiedenen Mischungsanteilen von Buche und Fichte eine ökonomische Entscheidungsgrundlage, mit der – ausgehend von den momentanen betrieblichen Rahmenbedingungen – waldbauliche Entscheidungen durch ökonomische Daten unterstützt werden. Die beschriebenen Ergebnisse lassen sich zwar nicht direkt auf einen konkreten Betrieb übertragen, die Analysen bieten jedoch eine ausreichend fundierte Datengrundlage für Betriebe, die vor grundlegenden Entscheidungen bezüglich der Anreicherung von Buchenbeständen mit Fichte stehen oder Fichtenbestände zur Buche oder zu Buchen-Fichten-Mischbeständen umbauen wollen.

9.4.2 Ökonomische Bedeutung von Fichte und Fichtenbeimischungen

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen durch den direkten Vergleich der Baumarten Buche und Fichte nachdrücklich, wie bedeutend die Fichte bzw. andere ähnlich ertragsstarke Nadelbaumarten für den wirtschaftlichen Erfolg von Forstbetrieben sind.

Der Fichtenanreicherungsprozess der dynamischen Betriebsklasse verdeutlicht diesbezüglich anschaulich die im Vergleich zur reinen Buchenwirtschaft deutlich früher anfallenden ersten positiven erntekostenfreien Erlöse. Darüber hinaus liegen die Erlöse der Fichte aufgrund ihrer im Vergleich zur Buche höheren Holzpreise im Laufe des Bestandeslebens deutlich über denen der Buche. Zusätzlich wird dieser Effekt verstärkt durch den höheren Volumenzuwachs dieser Baumart im Vergleich zur Buche. Die Ergebnisse der Bundeswaldinventur 3 verdeutlichen den höheren Volumenzuwachs der Fichte und die damit verbundene höhere Nutzungsmöglichkeit und folglich ihre Bedeutung sowohl für die Forstbetriebe als auch für die holzbe- und verarbeitende Industrie. Auf rund 25% der Gesamtwaldfläche in Deutschland, die mit Fichte bestockt ist, erfolgen 38% des Zuwachses und 51% der gesamten Volumennutzung (vgl. Polley 2015 S. 294). Vor diesem Hintergrund veranschaulicht der dynamische Anreicherungsprozess darüber hinaus auch, dass es rund drei Jahrzehnte nach der Beimischung der Fichte durch Pflanzung dauert, bis erste nennenswerte Holzmenen durch die Mischbaumart Fichte für den Holzmarkt bereitgestellt und entsprechende Erlöse erzielt werden.

Auch wenn diese Fichtenwirtschaft mit erhöhten abiotischen und biotischen Risiken verbunden ist, so liegen dennoch die Erträge, die während eines gesamten Bestandeslebens anfallen, deutlich über denen der Buche, wie auch die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit unterstreichen. Der Waldumbau zur Buche bedeutet somit einen erheblichen finanziellen Verzicht auf der betrieblichen Ebene und hat zudem eine sinkende Rohholzversorgung der inländischen Absatzmärkte zur Folge.

Aufgrund der Langfristigkeit waldbaulicher Entscheidungen ist es in besonderer Weise notwendig, unter Abwägung von Vor- und Nachteilen und in Kenntnis der zu diesen Abwägungen erforderlichen ökologischen, waldbaulichen und öko-

nomischen Fakten und Zusammenhänge Managemententscheidungen treffen zu können.

9.4.3 Risiko und waldbauliche Entscheidungen

Eine alternative Möglichkeit zur betrieblichen Risikominimierung durch Waldumbau stellt die Modifizierung des mit der Fichten-Reinbestandswirtschaft verbundenen waldbaulichen Modells dar:

Die starke Abhängigkeit des Windwurfrisikos von der Baumhöhe (vgl. Albrecht 2009 S. 77) und die damit verbundenen Folgerisiken, wie zum Beispiel der Insektenbefall, sollte eine betriebliche Zielsetzung und waldbauliche Vorgehensweise nach sich ziehen, die zu einem möglichst frühzeitigen Erreichen der Zielstärke führen und mit stabileren und ausreichend bekronten Fichten die kritische Höhenphase des Produktionsprozesses ausklammern bzw. minimieren.⁶²

Den waldbaumkundlichen Simulationen dieser Arbeit liegt ein solches waldbauliches Modell zugrunde, das eine konsequente Freistellung der Z-Bäume beinhaltet und eine Zielstärkennutzung bei einem BHD von 45 cm ermöglicht. Ältere Bestände mit stärkeren Zieldurchmessern (Mitteldurchmesser deutlich über 45 cm) weisen ein zunehmendes Produktionsrisiko einerseits durch die wachsende Sturmgefährdung, andererseits aber auch durch einen zunehmenden Stammfäuleanteil (vgl. Redmann und Wippel 2014 S. 23) auf. Fichten-Wertholzanteile sind dagegen in alten Fichtenbeständen äußerst gering (rund 0,1% vgl. Seintsch 2011 S. 10), während sehr starke Dimensionen bisweilen sogar mit Abschlägen bewertet werden.

Die durchgeführten Analysen unterstützen die Empfehlung, Buchenbestände mit Fichte als Zeitmischung mit kurzer Produktionsdauer anzureichern, mit dem Ziel risikoärmere und wirtschaftlichere Mischbestände zu bilden, anstatt den weiteren Vorratsaufbau in Fichtenaltbeständen zu fördern (vgl. hierzu Polley 2015 S. 294).

In einem Forstbetrieb ist für einen langfristigen nachhaltigen Erhalt eines angestrebten Nadelholzanteils sowohl bei der Produktion mit Reinbeständen als auch insbesondere bei der Produktion mit Nadelholzzeitmischungen, wie am Beispiel der Buchen-Fichten-Mischbestände dargestellt, wichtig, mit einem ausreichenden Nadelholzanteil in der Verjüngung zu starten.

9.4.4 Mischungsanteil bei Bestandesbegründung und betrieblicher Baumartenanteil

Die Mischbestandsbetriebsklasse M₂ zeigt, dass ein Fichtenanteil von 50% in der Verjüngung bei einer Zeitmischung mit Buche nur zu einem durchschnittlichen betrieblichen Nadelholzanteil von rund 34% führt. Der Zusammenhang zwischen dem Mischungsanteil bei der Bestandesbegründung und einem durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte über das gesamte Bestandesleben hat vor dem Hinter-

⁶² Für die praktische Umsetzung im Betrieb vgl. Borchers et al. (2008 S. 1229 ff.).

grund der Anreicherung von Buchenbeständen mit Nadelbaumarten auch im Rahmen der FSC-Zertifizierung (vgl. FSC Arbeitsgruppe Deutschland 2012 S. 20) eine besondere Bedeutung. Die Fichte – auf vielen Standorten als nicht standortheimisch angesehen (vgl. Forest Stewardship Council 2013 S. 19) – hat durch die Obergrenze eines maximalen Mischungsanteiles von 20% bei der Bestandesbegründung und die maximale Mischungsformgröße der Gruppe tatsächlich jedoch einen deutlich niedrigeren durchschnittlichen Anteil. Ein Mischungsanteil der Fichte von 20% am Buchengrundbestand in Form von Gruppen bei der Begründung führt auf Grundlage dieser Modellbetrachtungen als Zeitmischung lediglich zu einem durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte von rund 13%. Für die nachhaltige Erhaltung der Liquidität und Rentabilität hat dieser Zusammenhang durchaus spürbare Auswirkungen.

9.4.5 Auf Buche ausgerichtete Bewirtschaftung

Auch wenn die Baumart Buche in großen Teilen Deutschlands und Mitteleuropas neben weiteren Laubbaumarten die Schlüsselbaumart der potentiellen natürlichen Vegetation darstellt (vgl. Küster 1998 S. 90), so ermöglicht eine im Wesentlichen auf die Buche bzw. sonstige Laubhölzer als Wirtschaftsbaumarten eines Forstbetriebes ausgerichtete Forstwirtschaft, wie von Naturschutzverbänden gefordert (vgl. Weiger 2015 S. 32), in Deutschland unter den momentan gegebenen Rahmenbedingungen nur schwerlich eine betriebswirtschaftlich nachhaltige und erfolgreiche Bewirtschaftung. Vor dem Hintergrund, dass Steigerungsmöglichkeiten von Holzerlösen aufgrund des internationalen Wettbewerbs der holzbe- und -verarbeitenden Industrie weitgehend ausgeschöpft sind (vgl. Schmidt 2015 S. 33), kommt der Erhaltung eines angemessenen Nadelholzanteils der laubholzdominierten Betriebe eine zentrale strategische betriebs- und volkswirtschaftliche Bedeutung zu.

9.4.6 Erfüllung gesellschaftlicher Anforderungen

Forstbetriebe stehen heute einer stetig steigenden Anzahl unterschiedlichster gesellschaftlicher Anforderungen gegenüber. Die ursprünglich im Rahmen der forstlichen Bewirtschaftung erbrachten Leistungen im Sinne der Kielwassertheorie lassen sich mit den Zielen des Naturschutzes vielfach nicht mehr in Einklang bringen (vgl. Spindler 1998 S. 227). Darüber hinaus haben sich aus dem Bereich der Freizeitaktivitäten gesellschaftliche Forderungen an Forstbetriebe und Nutzungsansprüche an die Waldfläche entwickelt, die Einschränkungen in der traditionellen Wirtschaftsweise mit sich bringen. Bisher ist es vielen Betrieben jedoch nur in Ansätzen gelungen, diese Forderungen in am Markt absatzfähige Güter zu transformieren und hieraus Erträge zu erwirtschaften, die zumindest zu einer Kostendeckung führen (vgl. Möhring und Wilhelm 2013b). Die Mehrkosten sind daher für die Betriebe aus der Holzproduktion zu decken. Mit dem betrieblichen Reinertrag der Buche allein sind die betrieblichen Leistungen einer multifunktionalen Forstwirtschaft jedoch nicht zu finanzieren. Die ökonomische Vorteilhaft-

tigkeit der Fichte im Vergleich zur Buche sollte jedoch im Rahmen dieser Arbeit so verstanden werden, dass bei betrieblich-ökonomischer Notwendigkeit Buchenbestände mit Fichte als Zeitmischung angereichert werden können, ohne den Laubholzanteil grundsätzlich in Frage zu stellen.

9.4.7 Ausblick

Mit dieser Arbeit wurde der Versuch unternommen, mithilfe eines flexiblen, konsistenten und praxisnahen Modells die Auswirkungen des Prozesses einer Nadelholzanreicherung von Buchenbeständen am Beispiel der Baumart Fichte auf die finanzwirtschaftlichen Teilziele Liquidität und Rentabilität von Forstbetrieben zu analysieren. Die Modellentwicklung setzt dabei dort an, wo die in forstlichen Betriebsvergleichen verdichteten einzelbetrieblichen Informationen nur begrenzte Aussagen auf die Frage nach der Ökonomie von Mischbeständen mit den Hauptbaumarten Buche und Fichte liefern. Dabei steht stets die relative Vorteilhaftigkeit der Baumarten im Mischbestand im Mittelpunkt der Modellentwicklung, die in dem Spannungsfeld zwischen Einfachheit, Komplexität, Unsicherheit und offenen waldwachstumskundlichen Forschungsfragen einen Kompromiss finden musste.

Das Modell erweitert dabei bestehende Bestandes- und Forstbetriebsmodelle durch die explizite Berücksichtigung der Übernahme von Flächenanteilen beim Ausscheiden der Zeitmischungsbaumart und stellt den Nadelholzanreicherungsprozess in einem dynamischen Übergang vom stationären Zustand einer Reinbestandsbetriebsklasse in einen erneuten stationären Zustand einer Mischbestandsbetriebsklasse dar. Die Modelle, die sowohl auf der Ebene des einzelnen Bestandes wie auch für die Ebene des Gesamtbetriebes dargestellt wurden, bieten ein flexibles Instrument zur Unterstützung einer waldbaulichen Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die finanzwirtschaftlichen Zielsetzungen des Forstbetriebes.

10 Zusammenfassung

Ergebnisse der 3. Bundeswaldinventur zeigen den weiter anhaltenden starken Rückgang des Nadelbaumanteils, insbesondere dem der Fichte. Die Holzbe- und verarbeitende Industrie ist jedoch schwerpunktmäßig auf die Verarbeitung von Nadelholz ausgerichtet und auf die Versorgung durch Forstbetriebe angewiesen. Bedingt durch höhere Massenleistung, vergleichsweise kürzere Produktionszeiten und im Durchschnitt im Vergleich zum Laubholz auch höheren Erlösen ist die Produktion von Nadelholz für viele Forstbetriebe betriebswirtschaftlich essentiell. Für diese ist es dementsprechend von wirtschaftlicher Bedeutung, langfristig einen Nadelholzanteil im Betrieb zu erhalten. Ziel dieser Arbeit ist es, die Anreicherung von Laubbaumbeständen mit Nadelholz am Beispiel von Buchenbeständen mit Fichtenzeitmischungen zu analysieren und die Folgen auf die Liquidität und Rentabilität von Forstbetrieben aufzuzeigen.

Empirische baumartenspezifische ökonomische Kennzahlen, die auf einer breiten forstbetrieblichen Basis aufbauen und die gesamte Deckungsbeitragsrechnung umfassend abbilden und somit Aussagen über die Rentabilität bestimmter Baumarten ermöglichen, fehlen bisher weitgehend. Mit der Methode der multiplen Regressionsanalyse werden die Daten privater Forstbetriebe des Testbetriebsnetzes Forst dort ergänzt, wo betriebliche Informationen nicht baumarten(gruppen)spezifisch erfasst werden (zum Beispiel für Holzernte-, Begründungs-, Pflege-, Erschließungs- und Verwaltungskosten). Damit werden durchschnittliche Reinerträge für den Zeitraum 2003–2011 errechnet, die für Laubholz

(Buche inklusive Eiche) -55,46 €/ha/Jahr, für Fichte 119,74 €/ha/Jahr und für Kiefer -54,93 €/ha/Jahr betragen.

Rückschlüsse auf die Wirtschaftlichkeit von Mischbeständen sind mit diesen baumarten(gruppen)spezifischen Deckungsbeiträgen nur bedingt möglich. Daher werden, um Mischbestände zu analysieren, Simulationen waldwachstumskundlicher Größen und Modellrechnungen verwendet. Die oben genannten empirischen baumarten(gruppen)spezifischen Reinerträge dienen dabei auch als Vergleichsbasis zu den Modellergebnissen.

Für die Entwicklung der Modelle wird auf der Grundlage von Literaturanalysen der Misch- vom Reinbestand abgegrenzt, der Mischungsanteil bestimmt sowie Mischungsart und Mischungsform klassifiziert. Der Wachstumssimulation der Modellbestände mit BWINPro liegen die Wuchsverhältnisse der Baumarten, Ertragsklassen und Waldentwicklungstypen von Niedersachsen zugrunde. Mischungseffekte, welche die Produktivität der Baumarten im Mischbestand beeinflussen, werden anhand eines Kreuzdiagramms analysiert.

Zentrales Element der Modellentwicklung ist die Flächendynamik der Baumarten im Mischbestand und in der Betriebsklasse: Für ihre Beschreibung wird die Markovsche Kette für den Mischbestand der Baumarten Buche und Fichte verwendet. Die korrespondierenden baumartenspezifischen Flächenübergangswahrscheinlichkeiten setzen sich aus sturmschadensbedingten Überlebenswahrscheinlichkeiten, den Endnutzungswahrscheinlichkeiten und der Übergangswahrscheinlichkeit von Flächenanteilen der Fichte, nach deren erntebedingtem Ausscheiden, durch Kronenausdehnung der verbleibenden Buche zusammen. Sowohl die risikobedingte Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte als auch die Übergangswahrscheinlichkeit von Flächenanteilen von der Fichte zur Buchenfläche sind basierend auf Literaturangaben in Abhängigkeit vom Mischungsanteil ins Modell eingebunden.

Für die Darstellung des nachhaltigen Zustandes der Flächendynamik der Betriebsklasse werden das Normal- und Zielwaldmodell als klassische nachhaltige Betriebsmodelle durch die Einbindung der Flächendynamik der Mischbaumarten und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Produktionszeiten zum sog. Mischwaldmodell weiterentwickelt. Der Anteil der Baumarten bei der Bestandesbegründung, die Produktionsdauer der Baumarten und das vom Mischungsanteil der Baumarten abhängige Sturmschadensrisiko bestimmen dabei den durchschnittlichen Mischungsanteil der Baumarten an der Betriebsklasse. Neben den Modellergebnissen erfolgt die Herleitung zur Berechnung des mathematisch exakten Mischungsanteils mittels an die Modellentwicklung angelehnter Formeln. Für die praktische Anwendung wird eine vereinfachende Näherungslösung dargestellt.

Verknüpft mit waldwachstumskundlichen und ökonomischen Eingangsgrößen werden aufbauend auf der Flächenentwicklung der Betriebsklasse und des Einzelbestandes für einzelne Mischungsvarianten Zahlungsströme gebildet. Diese dienen einerseits für den Einzelbestand zur Ermittlung des Zeitraumes, nach dem sich die Investition der gruppenweisen Anreicherung der Fichte durch Pflanzung in den Buchengrundbestand amortisiert hat. Zeitgleich wird hiermit auch die Aus-

wirkung der Fichtenpflanzung auf die betriebliche Liquidität analysiert. Andererseits sind die vom Mischungsanteil der Baumarten abhängigen Zahlungsströme die Grundlage für die Ermittlung der Rentabilität. Die Beurteilung erfolgt dabei anhand von Reinerträgen einzelner Betriebsklassenvarianten.

Der Reinertrag der Buchen-Fichten-Mischbestandsbetriebsklasse beträgt für einen Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung von 30% 149 €/ha/Jahr, von 50% 225 €/ha/Jahr und von 70% 257 €/ha/Jahr. Durch die Zeitmischung und im Vergleich zur Buche höhere Risikoanfälligkeit der Fichte entsprechen diese Mischungsanteile einem tatsächlichen durchschnittlichen Fichtenanteil von 20% bzw. 35% und 51%. Mit einer Marginalanalyse wird der Fichtenanteil schrittweise – ausgehend vom reinen Buchenbestand – erhöht und der resultierende Grenzreinertrag aufgezeigt. Mit der Annuität als jährliche Erfolgsgröße für verschiedene Mischungsvarianten wird die Kapitalknappheit von Forstbetrieben in der Analyse verdeutlicht.

Der eigentliche Fichtenanreicherungsprozess in einer reinen Buchenbetriebsklasse (Reinertrag 56 €/ha/Jahr) mit gruppenweiser beigemischter Fichte (Mischungsanteil bei der Begründung 30%) wird mit einer dynamischen Betriebsklasse beschrieben. Dabei werden Buchenreinbestände im Rahmen der Verjüngung sukzessive mit Fichte als Zeitmischung ergänzt. Die Buchenbetriebsklasse geht hierdurch schrittweise in eine Mischbestandsbetriebsklasse über. Damit werden sowohl die kurzfristigen Auswirkungen der Pflanzung der Fichte durch die sinkende Liquidität deutlich, die nach vier Jahrzehnten durch die Einnahmen aus der Fichte wieder gedeckt wird, als auch der danach ansteigende Zahlungsstrom, der zu einem deutlich höheren Reinertrag von 249 €/ha/Jahr für die Buchen-Fichten-Betriebsklasse führt. Erkennbar wird die benötigte Vorlaufzeit und die Tatsache, dass es rund drei Jahrzehnte dauert, bis heutige waldbauliche Entscheidung zur Anreicherung mit Fichte zu betrieblichen Einnahmen und zur Bereitstellung von Fichtensortimenten am Holzmarkt führen. Der nachhaltig stationäre Zustand der Betriebsklasse des Mischwaldmodells wird nach rund 460 Jahren erreicht.

Der Mischungsanteil der Baumarten und die mit den Holzvolumina und Sortimenten verbundenen Erlöse bestimmen im Wesentlichen die Rentabilität der Bestände. Die Ergebnisse zeigen durch den direkten Vergleich der Baumarten Buche und Fichte, wie bedeutend die Fichte bzw. andere ähnlich ertragsstarke Nadelbaumarten für den wirtschaftlichen Erfolg von Forstbetrieben sind. Auch wenn diese Fichtenwirtschaft mit erhöhten abiotischen und biotischen Risiken verbunden ist, so liegen die Erträge, die während eines gesamten Bestandeslebens anfallen, dennoch deutlich über denen der Buche.

Die Analysen unterstützen die Empfehlung, Buchenbestände mit Fichte als Zeitmischung mit kurzer Produktionsdauer anzureichern, mit dem Ziel, wirtschaftlichere und verglichen mit Fichtenreinbeständen risikoärmere Mischbestände zu bilden. Die entwickelten Modelle bieten ein flexibles Instrument zur Unterstützung der waldbaulichen Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die finanzwirtschaftlichen Zielsetzungen Liquidität und Rentabilität des Forstbetriebes.

11 Literaturverzeichnis

- ALBRECHT, A. (2009): Sturmschadensanalysen langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächendaten in Baden-Württemberg. Schriftenreihe Freiburger forstliche Forschung, Bd. 42. Freiburg: Eigenverlag.
- ALBRECHT, A.; FORTIN, M.; KOHNLE, U.; NINGRE, F. (2015): Coupling a tree growth model with storm damage modeling – Conceptual approach and results of scenario simulations. In: *Environmental Modelling & Software* 69, S. 63–76.
- ALBRECHT, A.; SCHINDLER, D.; GREBHAN, K.; KOHNLE, U.; MAYER, H. (2009): Sturmaktivität über der nordatlantisch-europäischen Region vor dem Hintergrund des Klimawandels – eine Literaturübersicht. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 180 (5/6), S. 109–118.
- ALBRECHT, A.; HANEWINKEL, M.; BAUHUS, J.; KOHNLE, U. (2012): How does silviculture affect storm damage in forest of south-western Germany? Results from empirical modelling based on long-term observations. In: *European Journal of Forest Research* 131 (1), S. 229–247.
- ALVAREZ, L. H. R.; KOSKELA, E. (2006): Does risk aversion accelerate optimal forest rotation under uncertainty? In: *Journal of Forest Economics* 12 (3), S. 171–184.
- ASSMANN, E. (1954): Die Standortfrage und die Methodik von Mischbestandsuntersuchungen. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 125 (5), S. 149–153.

- ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde. München, Bonn, Wien: BLV Verlagsgesellschaft.
- BACKHAUS, K.; ERICHSON, B.; PLINKE, W.; WEIBER, R. (2010): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag.
- BAUMGARTEN, M.; TEUFFEL, K. v. (2005): Nachhaltige Waldwirtschaft in Deutschland. In: Teuffel, K. v.; Baumgarten, M.; Hanewinkel, M.; Konold, W.; Sauter, U. H.; Spiecker, H. Wilpert, K. v. (Hg.): Waldumbau. Für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft. Ergebnisse aus dem Südschwarzwald. Berlin: Springer, S. 1–10.
- BECKER, H. P. (2009): Investition und Finanzierung. Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft. Wiesbaden: Gabler.
- BEINHOFER, B. (2007): Zum Einfluss von Risiko auf den optimalen Zieldurchmesser der Fichte. In: Forstarchiv 78 (4), S. 117–124.
- BEINHOFER, B.; HAASE, S.; KNOKE, T. (2009): Anwendung der Portfoliotheorie in der Forstwirtschaft. In: Forstarchiv (4), S. 99–108.
- BEINHOFER, B.; KNOKE, T. (2010): Finanziell vorteilhafte Douglasienanteile im Baumartenportfolio. In: Forstarchiv (6), S. 255–265.
- BIBER, P. (1996): Konstruktion eines einzelbaumorientierten Wachstumssimulators für Fichten-Buchen-Mischbestände im Solling. Freising: Selbstverlag des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen (= Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/A, 142).
- BIEG, H.; KUBMAUL, H. (2009): Investition. München: Vahlen.
- BITTER, A. W. (2004): Strategische Planung als Instrument der forstlichen Betriebsgestaltung. In: LÖWENSTEIN, W.; OLSCHESKI, R.; BRABÄNDER, H.D.; MÖHRING, B. (HG.): Perspektiven forstökonomischer Forschung, (= Schriften zur Forstökonomie, 25) Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's, S. 1–13.
- BITTER, W.-G.; DÜMMER, R.; SCHADE, V. (2008 und vorangegangene Jahrgänge ab 1980): ZMP-Marktbilanz Forst und Holz Deutschland. ZMP Zentrale Markt-Preisrichtstelle GmbH Bonn.
- BITTERLICH, W. (1952): Die Winkelzählprobe. Ein optisches Meßverfahren zur raschen Aufnahme besonders gearteter Probestellen für die Bestimmung der Kreisflächen pro Hektar an stehenden Waldbeständen. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 71 (7/8), S. 215–225.
- BLEISCHWITZ, R. (1998): Ressourcenproduktivität. Innovationen für Umwelt und Beschäftigung. Berlin: Springer.
- BORCHERS, J.; ELBS, A.; SCHINDELE, G. (2008): Fichte im Erwerbsforstbetrieb – Baumart mit Zukunft? In: Holz-Zentralblatt 44, S. 1229–1231.
- BOSCH, C. A. (1971): Redwoods: A Population Model. In: Science 172, S. 345–349.
- BÖSCH, M. (2013): Finanzwirtschaft. Investition, Finanzierung, Finanzmärkte und Steuerung. München: Vahlen.

- BOSSEL, H. (2004): Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Norderstedt: Books on Demand.
- BRABÄNDER, H. D. (1967): Zur Erarbeitung forstbetrieblicher Kennziffern und Aufstellung einer Betriebstypologie. In: Der Forst- und Holzwirt 20, S. 427–430.
- BRABÄNDER, H. D. (1968): Die Finanzierung und Liquiditätssicherung im Forstbetrieb. In: SPEIDEL, G.; STEINLIN, H. (Hg.): Möglichkeiten optimaler Betriebsgestaltung. München u.a.: Bayer. Landwirtschaftsverlag, S. 185–196.
- BRAVO-OVIEDO, A.; PRETZSCH, H.; AMMER, C.; ANDENMATTEN, E.; BARBATI, A.; BARREIRO, S.; BRANG, P.; BRAVO, F.; COLL, L.; CORONA, P.; DEN OUDEN, J.; DUCEY, M. J.; FORRESTER, D. I.; GIERGICZNY, M.; JACOBSEN, J. B.; LESINSKI, J.; LÖF, M.; MASON, W. L.; MATOVIC, B.; METSLAID, M.; MORNEAU, F.; MOTIEJUNAITE, J.; O'REILLY, C.; PACH, M.; PONETTE, Q.; DEL RIO, M.; SHORT, I.; SKOVSGAARD, J. P.; SOLIÑO, M.; SPATHELF, P.; STERBA, H.; STOJANOVIC, D.; STRELCOVA, K.; SVOBODA, M.; VERHEYEN, K.; LÜPKE, N. V.; ZLATANOV, T. (2014): European Mixed Forests: definition and research perspectives. In: Forest Systems 23 (3), S. 518–533.
- BRESSEM, U. (2008): Komplexe Erkrankungen an Buche. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche, Bd. 3. Göttingen: Universitätsverlag, S. 87–107.
- BUONGIORNO, J.; GILLES, K. (2003): Decision Methods for Forest Resource Management. San Diego, California: Academic Press.
- BURGER, H. (1941): Beitrag zur Frage der reinen oder gemischten Bestände. In: Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen, S. 164–203.
- BURGER, H. (1949): Holz, Blattmenge und Zuwachs. Die Buche. In: Mitteilung der Schweizer Zentralanstalten für das Forstliche Versuchswesen 26, S. 419–468.
- BURSCHEL, P.; HUSS, J. (2003): Grundriss des Waldbaus. Ein Leitfaden für Studium und Praxis: 207 Tabellen. Stuttgart: Ulmer.
- BUSSE, F.-J. (2003): Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft. München: Oldenbourg.
- CARLOWITZ, H. C. V. (1713): Sylvicultura oeconomica, oder haußwirthliche Nachricht und naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum Zucht. Leipzig: J. Fr. Braun.
- COTTA, H. (1828): Anweisung zum Waldbau. Dresden, Leipzig: Arnold
- CUBBAGE, F.; DONAGH, P. M.; SAWINSKI JUNIOR, J.; RUBILAR, R.; DONOSO, P.; FERREIRA, A.; HOEFLICH, V.; OLMOS, V. M.; FERREIRA, G.; BALMELLI, G.; SIRY, J.; BAEZ, M. N.; ALVAREZ, J. (2007): Timber investment returns for selected plantations and native forests in South America and the Southern United States. In: New Forests 33 (3), S. 237–255.

- DENGLER, A. (1972): Waldbau, Baumartenwahl, Bestandesbegründung und Bestandespflege. Bd. 2. Hamburg, Berlin: Paul Parey.
- DIEDERICH, H. (1976): Grundtatbestände der Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Gabler.
- DIELER, J. (2011): Effekte von Mischung und Konkurrenz auf die Kronenmorphologie von Fichte und Buche. In: DVFFA – Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2011, S. 57–68.
- DIETER, M. (1997): Berücksichtigung von Risiko bei forstbetrieblichen Entscheidungen dargestellt am Beispiel des Voranbaus in Fichtenreinbeständen. (= Schriften zur Forstökonomie, 16) Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's.
- DIETER, M. (2001): Land expectation values for spruce and beech calculated with Monte Carlo modelling techniques. In: Forest Policy and Economics 2 (2), S. 157–166.
- DIRNBERGER, G. F.; STERBA, H. (2014): A comparison of different methods to estimate species proportions by area in mixed stands. In: Forest Systems 23 (3), S. 534–546.
- DITTRICH, K. (1986): Realistische Zielstrukturen forstlicher Betriebsklassen auf der Grundlage langfristiger Waldentwicklung. Dissertation. Tharandt: Eigenverlag.
- DÖBBELER, H.; ALBERT, M.; SCHMIDT, M.; NAGEL, J.; SCHRÖDER, J. (2011): BWINPro – Programm zur Bestandesanalyse und Prognose – Handbuch zur Gemeinsamen Version von BWINPro und BWINPro-S. Version 6.3.
- DÖG, M.; MÖHRING, B.; WILHELM, S. (2015): Der Privatwald-Betriebsvergleich Westfalen-Lippe im FWJ 2014. In: AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge 23, S. 33–35.
- ENDRES, M. (1923): Lehrbuch der Waldwertrechnung und Forststatistik. Berlin: Springer.
- ENGEL, J. (2010): Anwendungsorientierte Mathematik: Von Daten zur Funktion. Eine Einführung in die mathematische Modellbildung für Lehramtsstudierende. Berlin, Heidelberg: Springer.
- ERMISCH, N.; SEINTSCH, B.; ENGLERT, H.; DIETER, M. (2016): Regionalisierte Auswertungen – TBN-Forschungsfeld mit Potenzial. In: AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge 17, S. 30–34.
- FAO (2000): Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand. Main Report. Geneva Timber and Forest Study Papers, No 17, UN, New York and Geneva.
- FINK, G. A. (2003): Mustererkennung mit Markov-Modellen. Theorie – Praxis – Anwendungsgebiete. Stuttgart: Teubner.
- FSC ARBEITSGRUPPE DEUTSCHLAND e.V. (2013): FSC im Wald – ein Leitfaden für Praktiker. FSC Deutschland Freiburg: Eigenverlag.

- FORRESTER, D. I. (2014): The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: from pattern to process. In: *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT* 312, S. 282–292.
- FRANKE, G.; HAX, H. (2004): *Finanzwirtschaft des Unternehmens und Kapitalmarkt*. Berlin: Springer.
- FRIEDL, G.; HOFMANN, C.; PEDELL, B. (2010): *Kostenrechnung: Eine entscheidungsorientierte Einführung*. München: Vahlen.
- FRITZ, P.; WEBER, D.; JENSSEN, M. (2006): *Ökologischer Waldumbau in Deutschland. Fragen, Antworten, Perspektiven*. München: Ökom.
- FSC ARBEITSGRUPPE DEUTSCHLAND e.V. (2012): *Deutscher FSC-Standard. Deutsche übersetzte Fassung, Version 2.3 vom 01.07.2012*. FSC Deutschland, Freiburg: Eigenverlag.
- GADOW, K. v. (2000): Evaluating Risk in Forest Planning Models. In: *Silva Fennica* 34 (2), S. 181–191.
- GADOW, K. v. (2005): *Forsteinrichtung. Analyse und Entwurf der Waldentwicklung*. Göttingen: Universitäts-Verlag
- GAYER, K. (1880): *Der Waldbau*. Berlin: Wiegandt, Hempel & Parey.
- GAYER, K. (1886): *Der gemischte Wald: seine Begründung und Pflege; insbesondere durch Horst- und Gruppenwirtschaft*. Berlin: Parey.
- GEROLD, D.; GEROLD, D. (2013): Ertragstabellen und/oder Wachstumsmodelle. Chancen und Risiken für den Forstsachverständigen. In: *Wertermittlungsforum* 31 (3), S. 90–101.
- GERST, J. (2015): *Der Grenzzins als Entscheidungskriterium in der Forstwirtschaft. Methodisches Konzept und empirische Evidenz. (= Schriften zur Forstökonomie, 41)* Bad Orb: J. D. Sauerländer's.
- GÖTZE, U. (2008): *Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Berlin: Springer.
- GONSCHORREK, U.; HOFFMEISTER, W. (2007): *Ganzheitliches Management, Leistungserstellungs- und Finanzierungsprozesse. Bd. 4*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag.
- GRAINGER, M. B. (1968): Problems affecting the use of Faustmann's formula as a valuation tool. In: *New Zealand Journal of Forestry* 13, S. 168–183.
- GRIES, V. (2012): *Zur Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte in Mischbeständen: Ansätze zur Verbesserung der bioökonomischen Modellierung von Waldbeständen*. Dissertation, Technische Universität München, Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung. URL: <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1097320/1097320.pdf> [Zugriff: 01.11.2014].
- GRIESS, V. C.; ACEVEDO, R.; HÄRTL, F.; STAUPENDAHL, K.; KNOKE, T. (2012): Does mixing tree species enhance stand resistance against natural hazards? A case study for spruce. In: *Forest Ecology and Management*, S. 284–296.

- GRIESS, V. C.; KNOKE, T. (2011): Growth performance, wind-throw, and insects: meta-analyses of parameters influencing performance of mixed-species stands in boreal and northern temperate biomes. In: *Canadian Journal of Forest Research* 41, S. 1141–1159.
- GRIESS, V. C.; KNOKE, T. (2013): Bioeconomic modeling of mixed Norway spruce – European beech stands: economic consequences of considering ecological effects. In: *European Journal of Forest Research* 132 (3), S. 511–522.
- GUERICKE, M. (2001): Untersuchungen zur Wuchsdynamik von Mischbeständen aus Buche und Europ. Lärche (*Larix decidua*, Mill.) als Grundlage für ein abstandsabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell. Dissertation Universität Göttingen, Selbstverlag.
- GUNKEL, M. A. (2010): Effiziente Gestaltung des Risikomanagements in deutschen Nicht-Finanzunternehmen. Eine empirische Untersuchung. Norderstedt: Books on Demand.
- GUTENBERG, E. (1990): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Gabler.
- GUTTENBERG, F. ZU (2010): Privater Großwald – Tradition und Fortschritt im Waldbesitz. In: Depenheuer, O. und Möhring, B. (Hg.): *Waldeigentum. Dimensionen und Perspektiven*. Heidelberg: Springer, S. 323–334.
- HAGENLOCH, T. (2009): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Theoretische Grundlagen und Managementlehre. Norderstedt: Books on Demand.
- HANEWINKEL, M.; BREIDENBACH, J.; NEEFF, T.; KUBLIN, E. (2008): Seventy-seven years of natural disturbances in a mountain forest area – the influence of storm, snow, and insect damage analysed with a long-term time series. In: *Canadian Journal of Forest Research* 38 (8), S. 2249–2261.
- HANEWINKEL, M.; HOLECY, J. (2005): Quantifizierung von Risiko durch altersstufenweise Ermittlung von Übergangswahrscheinlichkeiten mit Hilfe von digitalisierten Forstkarten. In: Teuffel, K. v.; Baumgarten, M.; Hanewinkel, M.; Konold, W.; Sauter, U.H; Spiecker H. und Wilpert, K. v. (Hg.): *Waldumbau. Für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft. Ergebnisse aus dem Südschwarzwald*. Berlin: Springer, S. 269–277.
- KRAUHAUSEN, J.: Holzindustrie reagiert auf sinkendes Fichtenangebot. Zweiter Rohstoffgipfel der Arbeitsgemeinschaft der Rohholzverbraucher (AGR). *Holz-Zentralblatt* 13, S. 294.
- HARTIG, G. L. (1791): *Anweisung zur Holzzucht für Förster*. Marburg: Neue akademische Buchhandlung.
- HARTIG, G. L. (1795): *Anweisung zur Taxation der Forste oder zur Bestimmung des Holzertrags der Wälder: ein Beytrag zur höheren Forstwissenschaft; nebst mehreren Tabellen*. Gießen: Heyer.
- HASENAUER, H. (1997): Dimensional relationship of open-growth trees in Austria. In: *Forest Ecology and Management* 96, S. 197–206.

- HÄUSLER, O. (2012): Business-Impact-Management von Informationstechnologie im Unternehmen. Geschäftsprozessorientierte Planung, Steuerung und Kontrolle der IT. Univ. Diss. Gießen, 2011. Wiesbaden: Gabler.
- HEESEN, B. (2011): Cash- und Liquiditätsmanagement. Wiesbaden: Gabler.
- HEIDINGSFELDER, A.; KNOKE, T. (2004): Douglasie versus Fichte. Ein betriebswirtschaftlicher Leistungsvergleich auf der Grundlage des Provenienzversuches Kaiserslautern. (= Schriften zur Forstökonomie, 26) Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's.
- HELLIWELL, D. R. (1947): Discount rates in land-planning. In: *Forestry* 47 (2), S. 147–152.
- HERING, T. (2015): Investitionstheorie. München: Oldenbourg.
- HEYD, R.; MEFFLE, G. (2008): Das Rechnungswesen der Unternehmung als Entscheidungsinstrument. Bd. 1: Sachdarstellung und Fallbeispiele. Berlin: de Gruyter Oldenbourg.
- HEYER, C. (1841): Die Waldertrags-Regelung. Gießen: Ferber.
- HOLECY, J.; HANEWINKEL, M. (2006): A forest management risk insurance model and its application to coniferous stands in southwest Germany. *Forest Policy and Economics* 8 (2), 161–174.
- HOLTHAUSEN, N.; HANEWINKEL, M.; HOLECY, J. (2004): Risikomanagement in der Forstwirtschaft am Beispiel des Sturmrisikos. In: *Forstarchiv* 75, S. 149–157.
- HORNGREN, C. T.; FOSTER, G.; DATAR, S. M.; KLEBER, M. I. (2001): Kostenrechnung. Entscheidungsorientierte Perspektive. München: de Gruyter Oldenbourg.
- HÜBNER, G. (2009): Stochastik. Eine anwendungsorientierte Einführung für Informatiker, Ingenieure und Mathematiker. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- HUNDESHAGEN, J. C. (1826): Die Forstabschätzung auf neuen, wissenschaftlichen Grundlagen: nebst einer Charakteristik und Vergleichung aller bisher bestandenen Forsttaxations-Methoden; in zwei Abtheilungen. Tübingen: Laupp.
- HUSS, J. (1987): Mischwald zwischen Wunsch und Wirklichkeit. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 106, S. 114–132.
- KASERER, C. (2007): Investition und Finanzierung, case by case. Frankfurt am Main: UTB.
- KELTY, M. J. (1992): Comparative productivity of monocultures and mixed stands. In: Kelty, M.; Larson, B. C. und Oliver, C. D. (Hg.): *The Ecology and Silviculture of Mixed-Species Forests. A Festschrift for David M. Smith*. Dordrecht: Springer Netherlands (= *Forestry sciences*, 40), S. 125–141.
- KENNEL, R. (1965): Untersuchungen über die Leistung von Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 7 (136), S. 149–161.

- KLOCEK, A.; OESTEN, G. (1991): Zur Bestimmung der optimalen Umtriebszeit im Zielwaldmodell. In: Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 162, S. 92–99.
- KNOKE, T. (2008): Mixed forests and finance – Methodological approaches. In: Ecological economics, S. 590–601.
- KNOKE, T.; AMMER, C.; STIMM, B.; MOSANDL, R. (2008): Admixing broadleaved to coniferous tree species: a review on yield, ecological stability and economics. In: European Journal of Forest Research 127, S. 89–101.
- KNOKE, T.; HAHN, A. (2007): Baumartenvielfalt und Produktionsrisiken: Ein Forschungseinblick und -ausblick. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 158 (10), S. 312–322.
- KNOKE, T.; SEIFERT, T. (2008): Integrating selected ecological effects of mixed European Beech-Norway spruce stands in bioeconomic modelling. In: Ecological Modelling 210, S. 487–498.
- KNOKE, T.; WURM, J. (2006): Mixed forests and a flexible harvest policy. A problem for conventional risk analysis? In: European Journal of Forest Research 125 (3), S. 303–315.
- KÖNIG, A. (1995): Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald. Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's,
- KÖNIG, A. (1999): Risikoorientierter Waldbau. Ein methodischer Ansatz zum Umgang mit Naturgefahren im Waldbau. In: Fischer, A. (Hg.): Forschung in Sturmwurf-Ökosystemen Mitteleuropas. Seminar des Fachgebiets Geobotanik und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Forstliche Forschungsberichte München 176, S. 136–144.
- KÖPF, E.-U. (1992): Die Finanzierung der Forstwirtschaft als ökonomisches und forstpolitische Problem. In: Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 164 (4), S. 64–69.
- KOUBA, J. (1973): Die Markov'schen Ketten und die Definition des Normalwaldes. Internationales Forsteinrichtungssymposium, TU Dresden, Vorträge, Bd. 2, S. 381-390
- KOUBA, J. (2002): Das Leben des Waldes und seine Lebensunsicherheit. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 121, S. 211–228.
- KRAMER, H.; AKÇA, A. (2002): Leitfaden zur Waldmesslehre. Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's,
- KRÖGER, J. (2012): Kosten- und Leistungsrechnung. Eine Einführung für Fachkaufleute für die Verwaltung im Gesundheitswesen, für Fachwirte im Sozial- und Gesundheitswesen und für Kaufleute im Gesundheitswesen. Norderstedt: Books on Demand.
- KROTH, W. (1975): The rate of interest in forest valuation. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 94 (2/3), S. 54–66.
- KRUSCHWITZ, L.; DECKER, R. O. A.; RÖHRS, M. (2007): Übungsbuch zur betrieblichen Finanzwirtschaft. München und Wien: Oldenbourg.

- KÜSTER, H. (1998): Geschichte des Waldes. Von der Urzeit bis zur Gegenwart. München: Beck.
- LAROCQUE, G. R.; LUCKAI, N.; ADHIKARY, S. N.; GROOT, A.; BELL, F. W.; SHARMA, M. (2013): Competition theory – science and application in mixed forest stands. Review of experimental and modelling methods and suggestions for future research. In: *Environmental Reviews* 21 (2), S. 71–84.
- LEARY, R. A. (1985): Interaction theory in forest ecology and management. Dordrecht: Nijhoff/Junk.
- LEMMEL, H. (1958): Net income, profitability and economic efficiency in forestry. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 129 (2/3), S. 37–45.
- LEUCHNER M.; HERTEL C.; RÖTZER T.; SEIFERT T.; WEIGT R.; WERNER H.; MENZEL, A. (2012): Solar radiation as a driver for growth and competition in forest stands. In: Matyssek, R.; Schnyder, H.; Oßwald, W.; Ernst, D.; Munch, J. C.; Pretzsch, H. (Hg.): *Growth and Defence in Plants: Resource Allocation at Multiple Scales (= Ecological Studies 220)*. Heidelberg: Springer, S. 175–191.
- LOHNER, P.; APPEL, V.; DIETER, M.; SEINTSCH, B. (2016): Das TBN-Forst: Ein Datenschatz für die deutsche Forstwirtschaft. In: *AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge* 17, S. 10–11.
- LÜPKE, B. V. (1995): Waldbau unter ökonomischen Zwängen? Vortrag anlässlich des Forstökonomischen Kolloquiums „Forstwirtschaft im Umbruch“ am 12.05.1995 in Göttingen.
- LÜPKE, B. V. (2004): Risikominderung durch Mischwälder und naturnaher Waldbau: ein Spannungsfeld. In: *Forstarchiv* 75, S. 43–50.
- LÜPKE, B. V.; SPELLMANN, H. (1997): Aspekte der Stabilität und des Wachstums von Mischbeständen aus Fichte und Buche als Grundlage für waldbauliche Entscheidungen. In: *Forstarchiv* 68, S. 167–179.
- LWK NIEDERSACHSEN (2014): Aktuelle Holzpreise im Privatwald Niedersachsen. URL: <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/4/nav/0/article/15277.html> [Zugriff: März 2014].
- MAI, W. (1999): Risikomanagement im Wald. Analyse von Betriebsstatistiken für die betriebliche Planung. In: *AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge* 12, S. 616.
- MANKIW, N. G. (1993): Makroökonomik. Wiesbaden: Gabler.
- MANTAU, U. (2015): Die überragende Bedeutung des Nadelholzes – der Laubholz-Irrweg. In: *AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge* 17, S. 24–26.
- MEILBY, H.; STRANGE, N.; THORSEN, B. J. (2001): Optimal spatial harvest planning under risk of windthrow. In: *Forest Ecology and Management* 149 (3), S. 15–31.
- MENSCH, G. (2002): Investition. Investitionsrechnung in der Planung und Beurteilung von Investitionen. München: Oldenbourg.

- METTIN, C. (1986): Inwieweit ist Laubstreu eine ökologische und ökonomische Hilfe in Nadelholzbeständen? In: AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge, S. 918–922
- MEYER, P.; ACKERMANN, J. (2004): Lückendynamik in Buchen-Naturwäldern Nordwestdeutschlands. In: LWF Wissen 46, S. 10–14.
- MITSCHERLICH, G. (1954): Einzelstamm oder Bestandeswirtschaft. In: Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 125, S. 179–185.
- MÖHRING, B. (1986): Dynamische Betriebsklassensimulation – Ein Hilfsmittel für die Waldschadensbewertung und Entscheidungsfindung im Forstbetrieb. Dissertation, Universität Göttingen: Eigenverlag.
- MÖHRING, B. (1994): Über ökonomische Kalküle für forstliche Nutzungsentscheidungen. Ein Beitrag zur Förderung des entscheidungsorientierten Ansatzes der forstlichen Betriebswirtschaftslehre (= Schriften zur Forstökonomie 7). Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's.
- MÖHRING, B. (2001): Nachhaltige Forstwirtschaft und Rentabilitätsrechnung – ein Widerspruch? In: Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 172 (4), S. 61–66.
- MÖHRING, B. (2004a): Betriebswirtschaftliche Analyse des Waldumbaus. In: Forst und Holz 59, S. 523–530.
- MÖHRING, B. (2004b): Ein vereinfachender Ansatz zur Ermittlung von Ertragsverlusten bei Einschränkungen der Waldbewirtschaftung. In: LÖWENSTEIN, W. OLSCHESKI, R. BRABÄNDER, H.-D. UND MÖHRING, B. (HG.): Perspektiven forstökonomischer Forschung (= Schriften zur Forstökonomie, 25). Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's, S. 103–118.
- MÖHRING, B. (2009): Wie gelingt der Brückenschlag zwischen Theorie und Praxis bei den ökonomischen Hiebsreife Kriterien? In: Forstarchiv 80 (4), S. 109–118.
- MÖHRING, B. (2014): Gibt es einen „richtigen“ Zinssatz in der forstlichen Wertermittlung? In: Wertermittlungsforum 32 (2), S. 72–78.
- MÖHRING, B.; LEEFKEN, G.; GUTSCHE, C. (2008): Betriebswirtschaftliche Bewertung von Buchenwäldern. In: NW-FVA (Hrsg.). Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der NW-FVA, Band 3, S. 327–343.
- MÖHRING, B.; RÜPING, U. (2006): Bewertungskonzept für forstliche Nutzungsbeschränkungen (= Schriften zur Forstökonomie, 32). Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's.
- MÖHRING, B.; LEEFKEN, G.; FINCKENSTEIN, B. GRAF V. (2010a): Die wirtschaftliche Situation der Forstwirtschaft. In: Depenheuer, O. und Möhring, B. (Hg.): Waldeigentum. Dimensionen und Perspektiven. Heidelberg: Springer, S. 73–98.
- MÖHRING, B.; STAUPENDAHL, K.; LEEFKEN, G. (2010b): Modellierung und Bewertung natürlicher forstlicher Risiken mit Hilfe von Überlebensfunktionen. In: Forst und Holz 65 (4), S. 26–30.

- MÖHRING, B.; WILHELM, S. (2012): Betriebsvergleich Westfalen-Lippe: Die Entwicklung wichtiger Kennziffern. In: AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge 23, S. 11–13.
- MÖHRING, B.; WILHELM, S. (2013a): Ergebnisse des Wirtschaftsjahres 2012. Aus dem Privatwald-Betriebsvergleich Westfalen-Lippe. In: AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge 23, S. 21–22.
- MÖHRING, B.; WILHELM, S. (2013b): Verursachungsgerechte Aufteilung der Verwaltungskosten. Aus dem Privatwaldbetriebsvergleich Westfalen-Lippe. In: AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge 23, S. 23–24.
- MÖHRING, B.; WILHELM, S. (2013c): Forstlicher Betriebsvergleich Westfalen-Lippe 2012. In: Die Waldbauern in NRW 5, S. 20–21.
- MÖHRING, B.; WILHELM, S. (2015): Nadelholz – ökonomische Basis für Forstbetriebe. In: AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge 17, S. 20–23.
- MOROFF, G.; FOCKE, K. (2016): Repetitorium zur Investitionsrechnung. Systematisch üben, Lernziele erreichen. Wiesbaden: Gabler.
- MÜLLER, F. (2002): Modellierung von Sturm-, Schnee- und Rotfäuleisrisiko in Fichtenbeständen auf Einzelbaumebene. Dissertation, Technische Universität München, Eigenverlag.
- NADVORNIK, W.; BRAUNEIS, A.; GRECHENIG, S.; HERBST, A.; SCHUSCHNIG, T. (2009): Praxishandbuch des modernen Finanzmanagements. Wien: Linde.
- NAGEL, J. (2002): Das Open Source Entwicklungsmodell – eine Chance für Waldwachstumssimulatoren. Jahrestagung des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, 13.–15. Mai 2002, Schwarzbürg, S. 1–6.
- NAGEL, J. (2013): Waldwachstumssimulatoren und Forstliche Nachhaltigkeit. In: Kohnle, U.; Klädtke, J. (Hrsg.): Tagungsbericht der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 13.-15.05.2013 in Rychnov nad Kneznou (Tschechien). Freiburg, S. 122–126.
- NAGEL, J.; SPELLMANN, H. (2008): Wachstum, Behandlung und Ertrag von Reinbeständen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in Nordwestdeutschland. In: NW-FVA (Hrsg.). Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der NW-FVA, Band 3, S. 221-265
- NEFF, P. (1939): Valuation of national forest lands. In: Journal of Forestry 37, S. 598–600.
- NENNINGER, M. (2001): Die Römer und der Wald. Untersuchungen zum Umgang mit einem Naturraum am Beispiel der römischen Nordwestprovinzen. Stuttgart: Steiner.
- NEUNER, S.; ALBRECHT, A.; CULLMANN, D.; ENGELS, F.; GRIESS, V. C.; HAHN, W. A.; HANEWINKEL, M.; HÄRTL, F.; KÖLLING, C.; STAUPENDAHL, K.; KNOKE, T. (2015): Survival of Norway spruce remains higher in mixed stands

- under a dryer and warmer climate. In: *Global Change Biology* 21 (2), S. 935–946.
- NLF (2011): 20 Jahre langfristige ökologische Waldentwicklung. Das LÖWE-Programm. Broschüre der Niedersächsischen Landesforsten. Braunschweig.
- OBERMEIER, T.; GASPER, R. (2008): Investitionsrechnung und Unternehmensbewertung. München: Oldenbourg.
- OESTEN, G.; ROEDER, A. (2002): Management von Forstbetrieben. Bd. 1: Grundlagen, Betriebspolitik. Institut für Forstökonomie der Universität Freiburg.
- OESTEN, G.; ROEDER, A. (2012): Management von Forstbetrieben. Bd. 2: Management- und Informationssystem. Institut für Forstökonomie der Universität Freiburg.
- OFFER, A.; STAUPENDAHL, K. (2008): Neue Bestandssortentafeln für die Waldbewertung und ihr Einsatz in der Bewertungspraxis. In: *Wertermittlungsforum* 4, S. 146–154.
- ORTLIEB, C. P.; DRESKY, C. V.; GASSER, I.; GÜNZEL, S. (2009): Mathematische Modellierung. Eine Einführung in zwölf Fallstudien. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- OSTWALD, E. H. (1931): Grundlinien einer Waldrententheorie: d. h. einer im Anhalt an das relative Waldrenten-Maximum entwickelten forstlichen Reinertragstheorie. Riga: Häcker.
- PAHL, P. J.; DAMRATH, R. (2000): Mathematische Grundlagen der Ingenieurinformatik. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio: Springer
- PALMER, S. (1985): Der Buchen-Voranbau – seine Bedeutung, Planung und Technik. In: *AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge* 45, S. 1217–1220.
- PETERS, S.; BRÜHL, R.; STELLING, J. N. (2005): Betriebswirtschaftslehre. Einführung. München: Oldenbourg.
- POGGENSEE, K. (2015): Investitionsrechnung. Grundlagen – Aufgaben – Lösungen. Wiesbaden: Gabler.
- POLLEY, H. (2015): Bundeswaldinventur verdeutlicht den Waldumbau. In: KRAUHAUSEN, J. (Hg.): *Holzindustrie reagiert auf sinkendes Fichtenangebot. Zweiter Rohstoffgipfel der Arbeitsgemeinschaft der Rohholzverbraucher (AGR). Holz-Zentralblatt* 13, S. 294.
- POLLEY, H.; HENNIG, P.; SCHWITZGEBEL, F.; KRIEBITZSCH, W.-U. (2014a): Bundeswaldinventur II. Erstellt vom Thünen Institut für das Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz. URL: <http://www.bundeswaldinventur.de>.
- POLLEY, H.; HENNIG, P.; KROIHER, F.; MARKS, A.; RIEDEL, T.; SCHMIDT, U.; SCHWITZGEBEL, F.; STAUBER, T. (2014b): *Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur.* Hg. vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin.

- POPPER, K. R. (2000): Lesebuch. Ausgewählte Texte zur Erkenntnistheorie, Philosophie der Naturwissenschaften, Metaphysik, Sozialphilosophie. Stuttgart: UTB.
- POSLUSCHNY, P. (2010): Basiswissen Mittelstandscontrolling. München: Oldenbourg.
- PREIBLER, P. R. (2008): Betriebswirtschaftliche Kennzahlen: Formeln, Aussagekraft, Sollwerte, Ermittlungsintervalle. Berlin: de Gruyter Oldenbourg.
- PRETSCH, H. (1992): Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände. Forstliche Forschungsberichte München, Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayer. Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt.
- PRETZSCH, H. (2001): Modellierung des Waldwachstums. Berlin, Wien: Blackwell Wissenschafts-Verlag.
- PRETZSCH, H. (2002): Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Berlin: Parey.
- PRETZSCH, H. (2005): Wachstum von Rein- und Mischbeständen bei veränderten Umweltbedingungen. In: AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge 9, S. 465–468.
- PRETZSCH, H. (2009): Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model. Berlin, London: Springer.
- PRETZSCH, H. (2013): Facilitation and Competition in Mixed-Species Forest Analyzed along an Ecological Gradient. In: Nova Acta Leopoldina NF, S. 159–174.
- PRETZSCH, H. (2014): Struktur des Kronenraumes und Morphologie der Kronen in Mischung im Vergleich zum Reinbestand. In: DVFFA – Tagungsband der Sektion Ertragskunde. Lenzen, S. 140–149.
- PRETZSCH, H.; BIELAK, K.; BLOCK, J.; BRUCHWALD, A.; DIELER, J.; EHRHART, H.-P.; KOHNLE, U.; NAGEL, J.; SPELLMANN, H.; ZASADA, M.; ZINGG, A. (2013): Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus petraea* (MATT.) LIEBL. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. In: European Journal of Forest Research 132 (2), S. 263–280.
- PRETZSCH, H.; BLOCK, J.; DIELER, J.; DONG, P. H.; KOHNLE, U.; NAGEL, J.; SPELLMANN, H.; ZINGG, A. (2010): Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. In: Annals of Forest Science 67 (7), S. 712–712.
- PRETZSCH, H.; DIELER, J.; SEIFERT, T.; RÖTZER, T. (2012): Climate effects on productivity and resource-use efficiency of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.] in stands with different spatial mixing patterns. In: Trees 26 (4), S. 1343–1360.
- PRETZSCH, H.; SCHÜTZE, G. (2009): Transgressive overyielding in mixed compared with pure stands of Norway spruce and European beech in Central Eu-

- rope: evidence on stand level and explanation on individual tree level. In: *European Journal of Forest Research* 128, S. 183–204.
- PRETZSCH, H.; SCHÜTZE, G.; BIBER, P. (2016): Zum Einfluss der Baumartenmischung auf die Ertragskomponente von Waldbeständen. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 128 (7/8), S. 122–133.
- PROKOPENKO, J. (1987): *Productivity management. A practical handbook*. Geneva: International Labour Office.
- QI, Y.; GILLES, J. K. (1999): Modelling Ecosystem Processes and Pattern for Multiple-Use Management. In: HELLES, F. HOLTEN-ANDERSEN, P und WICHMANN, L. (Hg.): *Multiple Use of Forests and Other Natural Resources. Aspects of Theory and Application*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, S. 14–22.
- RAU, H. (1995) Die Sturmschäden im Virngrund (Norwestwürttemberg) von 1870 bis 1990. Eine waldbuchgeschichtliche und standortkundliche Untersuchung. In: *Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg* 188, Freiburg.
- REDMANN, M.; WIPPEL, B. (2014): Junges Nadelholz macht sich ganz schön rar. In: *Badische Bauern Zeitung* 46, S. 21–23.
- REED, W. J. (1986): Optimal Harvesting Models in Forest Management – A Survey. In: *Natural Resource Modeling* 1, S. 55–79.
- RICHARDS, F. J. (1959): A Flexible Growth Function for Empirical Use. In: *Journal of Experimental Botany* 10 (29), S. 290–300.
- RICHTER, A. (1963): *Einführung in die Forsteinrichtung*. Radebeul: Neumann.
- RICHTER, J. (1986): Zwingt die Entwicklung der Starkholzpreise bei der Fichte zur Senkung der Umtriebszeit? In: *AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge* 41, S. 1016.
- RIPKEN, H. (1989): Ertrag und Aufwand im Forstbetrieb – Stand und Tendenzen. In: *Forst und Holz* 44 (3), S. 51–57.
- RIPKEN, H. (1990): Entscheidungshilfen zur Wirtschaftsintensität auf ertragschwachen Standorten der niedersächsischen Landesforsten. In: *Forst und Holz* 9, S. 236–241.
- RIPKEN, H. (2002): Ökonomische Nachhaltigkeitskriterien im Forstbetrieb. In: *Forst und Holz* 57 (4), S. 100–104.
- RÖHRIG, E.; BARTSCH, N.; LÜPKE, B. v. (2006): *Waldbau auf ökologischer Grundlage*. Stuttgart: Ulmer.
- ROGALL, H. (2006): *Volkswirtschaftslehre für Sozialwissenschaftler: Eine Einführung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- ROMEIKE, F.; FINKE, R. B. (2003): *Erfolgsfaktor Risiko-Management. Chance für Industrie und Handel. Methoden, Beispiele, Checklisten*. Wiesbaden: Gabler.
- ROW, C.; KAISER, H. F.; SESSIONS, J. (1981): Discount Rate for Long-Term Forest Service Investments. In: *Journal of Forestry* 79 (6), S. 367–369.

- RÜPING, U. (2009): Wasserschutz im Wald. Betriebswirtschaftliches Bewertungskonzept und institutionelle Umsetzungsinstrumente (= Schriften zur Forst- und Umweltökonomie, 34). Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's.
- RÜPING, U. (2012): Ökonomisches Bewertungskonzept für forstliche Gewässerschutzmaßnahmen. In: SILVAQUA – Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Zustand von Gewässern in bewaldeten Einzugsgebieten am Beispiel der Oker im Nordharz. Göttingen: Univ.-Verl., S. 169–188.
- SACHS, L.; HEDDRICH, J. (¹²2006): Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R. Berlin: Springer.
- SANDER, J. (2012): Wettbewerb am Rundholzmarkt. Identifikation von Submärkten und Marktmechanismen. Masterthesis. Hamburg: Bachelor + Master-Publishing.
- SCHADE, V. (2013): HMI Marktbilanz, Forst und Holz 2013 Deutschland. HMI – Holzmarktinfo Bonn.
- SCHIERENBECK, H.; LISTER, M. (²2002): Value Controlling. Grundlagen wertorientierter Unternehmensführung. München: Oldenbourg.
- SCHIERENBECK, H.; WÖHLE, C. B. (¹⁸2012): Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre. München: Oldenbourg.
- SCHMID-HAAS, P.; BACHOFEN, H. (1991): Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 142 (6), S. 477–504.
- SCHMIDT, L. (2015): Nadelrohholz-Versorgung aus Sicht der Holzwirtschaft. In: AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge 17, S. 33–35.
- SCHMIDTKE, H.; SCHERRER, H. U. (1997): Sturmschäden im Wald. Projektabschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“, NFP 31. Zürich: Vdf, Hochschulverlag an der ETH.
- SCHMIDT-VOGT, H. (1989): Die Fichte. Ein Handbuch in 2 Bänden. Bd. 2. Hamburg: Parey.
- SCHOBER, R. (1967): Rotbuche mäßige Durchforstung I. Ertragsklasse. In: SCHOBER, R. (1995): Ertragstafeln wichtiger Baumarten. 4. Aufl. Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's, S. 30–31.
- SCHROETER, B. (2002): Operatives Controlling. Aufgaben, Objekte, Instrumente. Wiesbaden: Gabler.
- SCHURZ, G. (⁴2013): Das Problem der Induktion. In: KEUTH, H. (Hg.): Karl Popper, Logik der Forschung. Berlin: Akad.-Verl., S. 24–40.
- SCHÜTZ, J.-P. (1994): Waldbauliche Behandlungsgrundsätze in Mischbeständen. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 145 (5), S. 389–399.
- SCHÜTZ, J.P.; GÖTZ, M.; SCHMID, W.; MANDALLAZ, D. (2006): Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and

- consequences for silviculture. In: *European Journal of Forest Research* 125, S. 261–302.
- SEIDEL, E.; STREBEL, H. (Hg.) (1993): *Betriebliche Umweltökonomie. Reader zur ökologieorientierten Betriebswirtschaftslehre (1988–1991)*. Wiesbaden: Gabler.
- SEINTSCH, B. (2011): *Stellung der Holzrohstoffe in der Kostenstruktur des Holz- und Papiergewerbes in Deutschland, Arbeitsbericht 03/2011*. Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg.
- SEKOT, W. (1990): *Produktionsrisiko bei Fichte*. In: *Österreichische Forstzeitung* 3, S. 21–23.
- SPEIDEL, G. (1967): *Forstliche Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung*. Hamburg, Berlin: Parey.
- SPEIDEL, G. (1970): *Die Entscheidungstheorie als Grundlage der Rationalisierung im Forstbetrieb*. In: *Forstarchiv* 41, S. 25–30
- SPEIDEL, G. (1972): *Planung im Forstbetrieb, Grundlagen und Methoden der Forsteinrichtung*. Hamburg, Berlin: Parey.
- SPELLMANN, H. (1995): *Vom strukturarmen zum strukturreichen Wald. Waldbauliche Planungs- und Handlungsaspekte für die Nds. Landesforstverwaltung*. In: *Forst und Holz* 50 (2), S. 35–44.
- SPELLMANN, H. (1997): *Ertragsentwicklung im Löwe-Wald der Niedersächsischen Landesforstverwaltung*. In: *Forst und Holz* 52 (24), S. 711–718.
- SPELLMANN, H. (2010): *Nachhaltige Waldwirtschaft auf ökologischer Grundlage*. In: DEPENHEUER, O. und MÖHRING, B. (Hg.): *Waldeigentum. Dimensionen und Perspektiven*. Heidelberg: Springer, S. 99–116.
- SPINDLER, E. A. (1998): *Agrar-Öko-Audit. Praxis und Perspektiven einer umweltorientierten Land- und Forstwirtschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- STAUPENDAHL, K. (2011): *Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeit von Waldbeständen mithilfe der neu parametrisierten Weibull-Funktion*. In: *Forstarchiv* 82 (1), S. 10–19.
- STAUPENDAHL, K.; ZUCCHINI, W. (2011): *Schätzung der Überlebensfunktion der Hauptbaumarten auf der Basis von Zeitreihendaten der Rheinland-Pfälzischen Waldzustandserhebung*. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 128 (7/8), S. 129–145.
- STEVEN, M. (2012): *BWL für Ingenieure*. München: Oldenbourg.
- STRANG, G. (2003): *Lineare Algebra*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- SUZUKI, T., (1971): *Forest transition as a stochastic process*. *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt*. 91, S. 69–86.
- SUZUKI, T.; SLOBODA, B.; SAVOROWSKI, J. (1983): *Beiträge zur biometrischen Modellbildung in der Forstwirtschaft*. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Bd. 76. Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's.

- SWOBODA, P. (1964): Die betriebliche Anpassung als Problem des betrieblichen Rechnungswesens. Wiesbaden: Gabler.
- TASCHNER, A. (2013): Business cases. Ein anwendungsorientierter Leitfaden. Wiesbaden: Springer.
- TI (2015a): Thünen-Institut, Dritte Bundeswaldinventur – Ergebnisdatenbank. URL: <https://bwi.info> [Zugriff: 18.01.2016], Auftragskürzel: 77V1PI_L637mf_0212_bi, Archivierungsdatum: 2014-8-5 14:24:44.730. Überschrift: Veränderung der Waldfläche (gemäß Standflächenanteil) [ha] nach Land und Baumartengruppe, Filter: Eigentumsart, Periode=2002–2012.
- TI (2015b): Thünen-Institut, Dritte Bundeswaldinventur – Ergebnisdatenbank. URL: <https://bwi.info> [Zugriff: 18.01.2016], Auftragskürzel: 77Z1JI_L235of_2012_bi, Archivierungsdatum: 2014-6-10 16:7:59.927, Überschrift: Waldfläche (gemäß Standflächenanteil) [ha] nach Baumartengruppe und Land, Filter: Eigentumsart, Jahr=2012.
- TOLL, C. (2011): Investitionstheoretische Unternehmensbewertung bei Vorliegen verhandelbarer Zahlungsmodalitäten. Wiesbaden: Gabler.
- TOSCANI, P. (2016): Methodische Aspekte und Informationspotentiale forstlicher Testbetriebsnetze in Österreich. Dissertation am Institut für Agrar- und Forstökonomie, 138, Universität für Bodenkultur Wien.
- URIGSHARDT, T. (2010): Forstliches Controlling. Gründe für ein branchenspezifisches Controlling, typenbezogene Anforderungen und Lösungsansätze für ausgewählte Problemfelder. Köln: Kölner Wissenschaftsverlag.
- VANDERMEER, J. H. (1989): The ecology of intercropping. Cambridge: Cambridge University Press.
- WBR NIEDERSACHSEN (2014): Waldbewertungsrichtlinien 2014, Erlass des Niedersächsischen Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz vom 18.12.2013.
- WBR NRW (2014): Richtlinien zur Waldbewertung in Nordrhein-Westfalen. Hrsg. vom Landesbetrieb Wald und Holz des Landes Nordrhein-Westfalen; Stand: 2014.
- WEBER, N. (2010): Forstpolitische Betrachtungen zum Waldeigentum. In: DEPENHEUER, O. und MÖHRING, B. (Hg.): Waldeigentum. Dimensionen und Perspektiven. Heidelberg: Springer, S. 295–319.
- WEBER, W.; KABST, R. (2006): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Gabler.
- WEIGER, H. (2015): Nadelholz im deutschen Wald aus Sicht des Naturschutzes. In: AFZ/Der Wald, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge 17, S. 31–32.
- WIEDEMANN (1936/42): Fichte Mäßige Durchforstung I. Ertragsklasse. In: SCHOBBER, R. (1995): Ertragstabellen wichtiger Baumarten. 4. Auflage Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's, S. 62–63.
- WIEDEMANN, E. (1943): Der Vergleich der Massenleistung des Mischbestandes

- mit dem Reinbestand. In: Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 119, S. 123–132.
- WILHELM, S. (2014): The contribution of different tree species to the economic success of mixed forest enterprises in a continuously changing environment. Vortrag IUFRO Symposium Adaptation in Forest Management under Changing Framework Conditions, 19.05.2014, Sopron, Ungarn.
- WILKER, H. (2010): Weibull-Statistik in der Praxis. Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Komponenten. Bd. 3. Norderstedt: Books on Demand.
- ZIMMERMANN, H. (1988): Zur Mischung von Buche und Fichte auf Mittelgebirgsstandorten in Hessen. In: Forst und Holz 5, S. 103–106.
- ZÜGER, R.-M. (2008): Betriebswirtschaft – Management-Basiskompetenz, Theoretische Grundlagen und Methoden mit Beispielen, Repetitionsfragen und Antworten. Zürich: Compendio.

12 Anhang

12.1 Statistische Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse der Privatwaldbetriebe des Testbetriebsnetzes Forst nach Baumartengruppen (Bezugszeitraum 2003 – 2011)

Holzerntekosten

Call:

```
lm(formula = erntekosten ~ 0 + laub + fichte + kiefer, data = holzernte)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-396254	-7477	690	11221	482131

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
laub	20.3324	0.7558	26.90	<2e-16 ***
fichte	18.6402	0.2461	75.74	<2e-16 ***
kiefer	20.4182	1.0692	19.10	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 46940 on 870 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9364, Adjusted R-squared: 0.9362

F-statistic: 4273 on 3 and 870 DF, p-value: < 2.2e-16

Begründungskosten

Call:

lm(formula = erneuerungskosten ~ 0 + laub + fichte + kiefer, data = begruendung)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-186792	-9873	-2670	6502	231720

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
laub	7.795	2.306	3.38	0.000751 ***
fichte	21.725	1.964	11.06	< 2e-16 ***
kiefer	39.869	2.069	19.27	< 2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 35120 on 1047 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.5691, Adjusted R-squared: 0.5679

F-statistic: 460.9 on 3 and 1047 DF, p-value: < 2.2e-16

Pflegekosten

Call:

lm(formula = pflegekosten ~ 0 + laub + fichte + kiefer, data = pflege)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-87543	-5435	-1605	2441	121917

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
laub	4.6536	1.0080	4.617	4.38e-06 ***
fichte	18.3446	0.8586	21.366	< 2e-16 ***
kiefer	6.7111	0.9044	7.420	2.40e-13 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 15350 on 1055 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.5912, Adjusted R-squared: 0.59

F-statistic: 508.6 on 3 and 1055 DF, p-value: < 2.2e-16

Erschließungskosten

Call:

```
lm(formula = erschliessungskosten ~ 0 + laub + fichte + kiefer,
    data = erschliessung)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-122572	-7780	-3326	2766	256306

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
laub	6.171	1.727	3.572	0.00037 ***
fichte	26.466	1.471	17.986	< 2e-16 ***
kiefer	8.790	1.550	5.671	1.84e-08 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 26310 on 1047 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.4955, Adjusted R-squared: 0.4941

F-statistic: 342.8 on 3 and 1047 DF, p-value: < 2.2e-16

Verwaltungskosten

Call:

```
lm(formula = verwaltungskosten ~ 0 + laub + fichte + kiefer,
    data = verwaltung)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-442190	-35134	-14346	9405	687899

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
laub	139.922	5.911	23.67	<2e-16 ***
fichte	127.031	5.058	25.11	<2e-16 ***
kiefer	77.424	5.300	14.61	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 89920 on 1039 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.8311, Adjusted R-squared: 0.8306

F-statistic: 1704 on 3 and 1039 DF, p-value: < 2.2e-16

12.2 Übergangsmatrix Mischbestand Variante M₂

$$P = \begin{pmatrix} 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,02 & 0,98 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,12 & 0,88 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,12 & 0,12 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,17 & 0,59 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,03 & 0,03 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,95 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,36 & 0,36 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,07 & 0,20 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,19 & 0,19 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,63 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,38 & 0,38 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,24 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,40 & 0,40 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,21 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,50 & 0,50 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{pmatrix}$$

12.3 Bestimmung des Mischungsanteils

12.3.1 Fichtenanteil im erweiterten Normalwaldmodell

Ausgehend vom Mischungsanteil der Baumarten bei der Begründung und den unterschiedlichen Produktionszeiten der Baumarten wird im Folgenden für die einzelnen Stufen der Modellentwicklung (erweitertes Normalwaldmodell, erweitertes Zielwaldmodell und Mischwaldmodell) hergeleitet, wie der durchschnittliche Mischungsanteil der Fichte an der jeweiligen Betriebsklasse bestimmt werden kann.

Der durchschnittliche Mischungsanteil der einzelnen Baumarten an der Betriebsklasse des erweiterten Normalwaldmodells ist direkt abhängig von der Fläche der Baumarten bei der Bestandesbegründung (hier als Startfläche $ST_{Fl Bu}$ und $ST_{Fl Fi}$ bezeichnet) und der jeweiligen Produktionsdauer (U_{Bu} und U_{Fi}). Die Gesamtfläche der Betriebsklasse (F_{BKL}) errechnet sich unter Ausklammerung von Risiken und bei einem unterstellten Kahlschlag zum Ende des Produktionszeitraums (vgl. Kapitel 5.2) für das erweiterte Normalwaldmodell, wie in Formel 20 dargestellt. Für einen Mischungsanteil beider Baumarten von 50% bei der Bestandesbegründung führt dies unter den in dieser Arbeit verwendeten Parametern zu der in Abbildung 63 abgebildeten Flächenverteilung der Baumarten.

Formel 20: Fläche der Betriebsklasse im erweiterten Normalwaldmodell

$$F_{BKL} = F_{Bu} + F_{Fi}$$

$$F_{Bu} = ST_{FlBu} * U_{Bu}$$

$$F_{Fi} = ST_{FlFi} * U_{Fi}$$

$$F_{BKL} = ST_{FlBu} * U_{Bu} + ST_{FlFi} * U_{Fi}$$

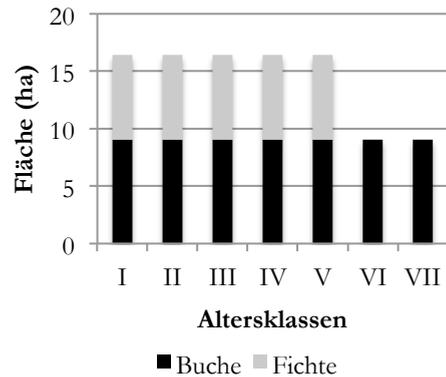


Abbildung 63: Flächenzusammensetzung der Betriebsklasse (Variante M₂) des erweiterten Normalwaldmodells

Diesem oben dargestellten Zusammenhang entsprechend lässt sich der durchschnittliche Mischungsanteil der Fichte in Abhängigkeit von der Gesamtfläche, bestehend aus der Summe der Buchen- und Fichtenfläche der Betriebsklasse, wie folgt beschreiben:

Formel 21: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse in Abhängigkeit von der Gesamtfläche von Buche und Fichte

$$\varnothing Mi_{Fi} = \frac{F_{Fi}}{F_{Bu} + F_{Fi}}$$

Wird die jeweilige Gesamtfläche von Buche und Fichte durch ihre Fläche bei der Bestandesbegründung und die jeweilige Produktionsdauer der Baumarten ersetzt, so lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt ausdrücken:

Formel 22: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse des erweiterten Normalwaldmodells in Abhängigkeit von der Fläche der Baumarten bei der Bestandesbegründung und der Umtriebszeit

$$\varnothing Mi_{Fi} = \frac{ST_{FlFi} * U_{Fi}}{ST_{FlBu} * U_{Bu} + ST_{FlFi} * U_{Fi}}$$

Die hierfür benötigten Startflächen der beiden Baumarten lassen sich aus dem Verhältnis der Flächen bei der Bestandesbegründung und dem daraus resultierenden Mischungsanteil der Fichte zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung (Mi_{STFi}) ermitteln. Für den Mischungsanteil der Fichte bei der Bestandesbegründung gilt:

Formel 23: Mischungsanteil der Fichte bei der Bestandesbegründung

$$\frac{100\%}{ST_{FlBu} + ST_{FlFi}} = \frac{Mi_{STFi}}{ST_{FlFi}}$$

$$Mi_{STFi} = \frac{ST_{FlFi}}{ST_{FlBu} + ST_{FlFi}}$$

Unter Einbeziehung der Gesamtfläche der Betriebsklasse (F_{BKL}) und der jeweiligen Produktionsdauer der beiden Baumarten ergibt sich durch Umstellung der Formel 20 die Formel für die Startfläche der Buche bei der Bestandesbegründung:

Formel 24: Startfläche der Buche bei der Bestandesbegründung im erweiterten Normalwaldmodell

$$ST_{FL Bu} = \frac{F_{BKL} - ST_{FL Fi} * U_{Fi}}{U_{Bu}}$$

Wird die Formel 24 in Formel 23 (Mischungsanteil der Fichte bei der Bestandesbegründung) eingesetzt, so ergibt sich der folgende Zusammenhang für den Mischungsanteil der Fichte bei der Bestandesbegründung unter Einbeziehung der Gesamtfläche der Betriebsklasse und Produktionsdauer der beiden Baumarten:

Formel 25: Mischungsanteil der Fichte bei der Bestandesbegründung unter Berücksichtigung der Gesamtfläche der Betriebsklasse und der individuellen Produktionsdauer der Baumarten im erweiterten Normalwaldmodell

$$Mi_{ST Fi} = \frac{ST_{FL Fi}}{\left(\frac{F_{BKL} - ST_{FL Fi} * U_{Fi}}{U_{Bu}}\right) + ST_{FL Fi}}$$

Wird diese Formel 25 nach der Startfläche der Fichte bei der Bestandesbegründung $ST_{FL Fi}$ aufgelöst, errechnet sich der folgende Zusammenhang für die Startfläche der Fichte:

Formel 26: Startfläche der Fichte bei der Bestandesbegründung im erweiterten Normalwaldmodell

$$ST_{FL Fi} = \frac{F_{BKL} * Mi_{ST Fi}}{Mi_{ST Fi} * U_{Fi} - Mi_{ST Fi} * U_{Bu} + U_{Bu}}$$

Werden Formel 24 und Formel 26 für die Bestimmung der Startfläche von Buche und Fichte in Formel 21 für den durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse eingesetzt, so ergibt sich der folgende Zusammenhang für die Bestimmung des durchschnittlichen Mischungsanteils der Fichte:

Formel 27: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte im erweiterten Normalwaldmodell

$$\emptyset Mi_{Fi} = \frac{\left[\frac{F_{BKL} * Mi_{ST Fi}}{Mi_{ST Fi} * U_{Fi} - Mi_{ST Fi} * U_{Bu} + U_{Bu}}\right] * U_{Fi}}{\frac{F_{BKL} - \left[\frac{F_{BKL} * Mi_{ST Fi}}{Mi_{ST Fi} * U_{Fi} - Mi_{ST Fi} * U_{Bu} + U_{Bu}}\right] * U_{Fi}}{U_{Bu}} * U_{Bu} + \left[\frac{F_{BKL} * Mi_{ST Fi}}{Mi_{ST Fi} * U_{Fi} - Mi_{ST Fi} * U_{Bu} + U_{Bu}}\right] * U_{Fi}}$$

Zusammengefasst und gekürzt errechnet sich für die Bestimmung des durchschnittlichen Mischungsanteils der Fichte in der Betriebsklasse des Normalwaldmodells unter Einbeziehung der Gesamtfläche der Betriebsklasse und baumartenindividueller Produktionszeiten Formel 28:

Formel 28: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte im erweiterten Normalwaldmodell

$$\emptyset Mi_{Fi} = \left[\frac{Mi_{ST Fi}}{Mi_{ST Fi} * U_{Fi} - Mi_{ST Fi} * U_{Bu} + U_{Bu}}\right] * U_{Fi}$$

Der für einen gewünschten durchschnittlichen Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse benötigte Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung kann durch die Umstellung der Formel 28 wie folgt ermittelt werden:

Formel 29: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte im erweiterten Normalwaldmodell

$$Mi_{ST Fi} = \left[\frac{\emptyset M_{Fi}^i * U_{Bu}}{U_{Bu} * \emptyset M_{Fi}^i - U_{Fi} * \emptyset M_{Fi}^i + U_{Fi}} \right]$$

Die Formel 28 und Formel 29 blenden zwar Mischungseffekte und Risiken der Baumarten aus, können jedoch zur näherungsweise Bestimmung der Mischungsanteile für die forstbetriebliche Praxis herangezogen werden. Die folgende Abbildung stellt die mittels Formel 28 berechneten durchschnittlichen Fichtenanteile an der Betriebsklasse den durchschnittlichen Fichtenanteilen der Modellanalyse für verschiedene Mischungsanteile und Produktionsdauern der Baumarten für einen Vergleich gegenüber.

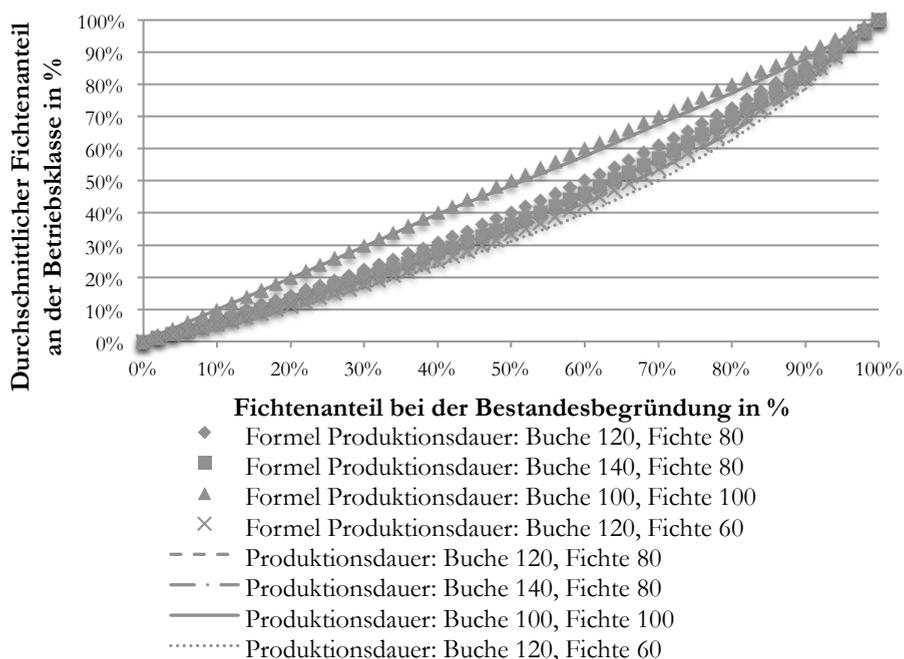


Abbildung 64: Durchschnittlicher Fichtenanteil an der Betriebsklasse in Abhängigkeit vom Fichtenanteil bei der Bestandesbegründung und Produktionsdauer der Baumarten. Vergleich der Ergebnisse der Analyse und Berechnungen mit der Näherungsformel

Der Vergleich der mit der Formel berechneten durchschnittlichen Fichtenanteile an der Betriebsklasse und der Ergebnisse der Modellanalyse in Abbildung 64 zeigt, dass die Differenzen zwischen den jeweiligen Ergebnissen umso höher ausfallen, je länger der Unterschied zwischen den Produktionszeiten der beiden Baumarten ausfällt. Weiter erhöht sich der Unterschied, je länger dabei der Produktionszeitraum der Baumarten ist. Dies ist einerseits auf den mit höherem Bestandesalter zunehmenden Kalamitätsnutzungsanteil der Fichte zurückzuführen, der in der Berechnung mit der Formel 28 ausgeblendet ist. Andererseits benötigt die Buche Zeit, um durch Kronenausdehnung Fichtenanteile zu übernehmen. Dies kann umso stärker erfolgen, je länger die Differenz zwischen den Produktionszeiten der beiden Baumarten ausfällt.

12.3.2 Fichtenanteil im erweiterten Zielwaldmodell

Beim erweiterten Zielwaldmodell wird das Normalwaldmodell durch eine vom Bestandesalter (t) abhängige risiko- und endnutzungsbedingte Flächenentwicklung erweitert (vgl. Kapitel 5.3). Diese vom Bestandesalter abhängige baumartenindividuelle Flächenentwicklung ist in der folgenden Abbildung 65 für die Mischbestandsbetriebsklasse Variante M_2 beispielhaft für das erweiterte Zielwaldmodell dargestellt.

Formel 30: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte an der Betriebsklasse in Abhängigkeit von der Gesamtfläche der Buche und Fichte

$$\emptyset Mi_{Fi} = \frac{F_{Fi}}{F_{Bu} + F_{Fi}}$$

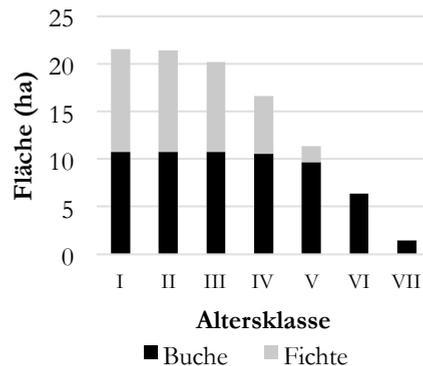


Abbildung 65: Flächenzusammensetzung der Betriebsklasse (Variante M_2) des erweiterten Zielwaldmodells

Die Fläche der Buche an der Betriebsklasse kann dabei berechnet werden, indem das Integral der Buchenfläche von der Bestandesbegründung (im Alter 0) bis zum Erreichen der maximalen Produktionsdauer ($U_{Bu\ max}$), deren altersabhängige Entwicklung mit Weibull-Funktionen beschrieben wird, mit der Startfläche der Buche multipliziert wird.

Formel 31: Buchenfläche der Betriebsklasse unter Berücksichtigung von Risiko und Endnutzungsverteilung im erweiterten Zielwaldmodell

$$F_{Bu} = ST_{F1 Bu} * \int_0^{U_{Bu max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RBu}}\right)^{\alpha_{RBu}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NBu}}\right)^{\alpha_{NBu}}} \right) dt$$

Dabei beschreibt die erste der beiden Weibull-Funktionen ($e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RBu}}\right)^{\alpha_{RBu}}}$) in der oben stehenden Formel die risikobedingte Flächenentwicklung mit den Parametern ($\beta_{RBu}, \alpha_{RBu}$) und die zweite Weibull-Funktion ($e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NBu}}\right)^{\alpha_{NBu}}}$) die nutzungsbedingte Flächenentwicklung mit den Parametern ($\beta_{NBu}, \alpha_{NBu}$). Zwischen dem Parameter β der Weibull-Funktion, welcher die nutzungsbedingte Flächenentwicklung beschreibt, und der mittleren Produktionsdauer der Baumart besteht ein unmittelbarer Zusammenhang. Dementsprechend kann β_{NBu} durch die mittlere Produktionsdauer der Buche U_{Bu} ersetzt werden. Auch für den Parameter α_{NBu} der nutzungsbedingten Flächenentwicklung kann der Bezug zur mittleren Produktionsdauer der Buche wie folgt beschrieben werden:

$$\alpha_{NBu} = 0,08 * U_{Bu} - 0,58$$

Die Fläche der Fichte an der Betriebsklasse lässt sich in gleicher Weise wie für die Buche beschreiben:

Formel 32: Fichtenfläche an der Betriebsklasse unter Berücksichtigung von Risiko und Endnutzungsverteilung im erweiterten Zielwaldmodell

$$F_{Fi} = ST_{F1 Fi} * \int_0^{U_{Fi max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RFi}}\right)^{\alpha_{RFi}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NFi}}\right)^{\alpha_{NFi}}} \right) dt$$

Auch hier entspricht der Parameter β_{NFi} für die nutzungsbedingte Flächenentwicklung der mittleren Produktionsdauer der Fichte U_{Fi} . Der Parameter α_{NFi} für die Beschreibung der nutzungsbedingten Flächenentwicklung kann ebenfalls in Abhängigkeit von der mittleren Produktionsdauer der Fichte wie folgt ausgedrückt werden:

$$\alpha_{NFi} = 0,07 * U_{Fi} - 0,64$$

Die maximale Produktionsdauer liegt bei den hier dargestellten Untersuchungen rund 20 Jahre über der mittleren Produktionsdauer. Dementsprechend gilt für die Buche

$$U_{Bu max} = U_{Bu} + 20$$

bzw. für die Fichte

$$U_{Fi max} = U_{Fi} + 20$$

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden diese Ergänzungen der Parameter der Weibull-Funktionen in den folgenden Darstellungen ausgeblendet.

Die für die Berechnung der Gesamtfläche von Buche und Fichte benötigten Startflächen lassen sich ebenfalls, wie bereits für das erweiterte Normalwaldmodell dargestellt (Formel 25), aus dem Verhältnis der Flächen der beiden Baumarten zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung sowie dem daraus resultierenden Mi-

schungsanteil der Fichte zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung ($Mi_{ST Fi}$) unter Einbeziehung der Gesamtfläche der Betriebsklasse und der risiko- und nutzungsbedingten altersabhängigen Flächenentwicklung berechnen.

Für die Fläche der Buche zum Zeitpunkt der Bestandesbegründung gilt unter Einbeziehung der risikobedingten Überlebenswahrscheinlichkeit und Endnutzungsverteilung aufbauend auf Formel 24 der folgende Zusammenhang:

Formel 33: Buchenstartfläche bei der Bestandesbegründung unter Berücksichtigung von Risiko und Endnutzungsverteilung im erweiterten Zielwaldmodell

$$ST_{Fi Bu} = \frac{F_{BKL} - ST_{Fi Fi} * \int_0^{U_{Fi max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RFi}}\right)^{\alpha_{RFi}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NFi}}\right)^{\alpha_{NFi}}} \right) dt}{\int_0^{U_{Bu max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RBu}}\right)^{\alpha_{RBu}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NBu}}\right)^{\alpha_{NBu}}} \right) dt}$$

Aufbauend auf Formel 26 wird unter Einbeziehung der risikobedingten Überlebenswahrscheinlichkeit und der Endnutzungsverteilung für die Startfläche der Fichte die folgende Formel entwickelt:

Formel 34: Fichtenstartfläche bei der Bestandesbegründung unter Berücksichtigung von Risiko und Endnutzungsverteilung im erweiterten Zielwaldmodell

$$ST_{Fi Fi} = \frac{F_{BKL} * Mi_{Fi St}}{Mi_{Fi St} * \int_0^{U_{Fi max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RFi}}\right)^{\alpha_{RFi}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NFi}}\right)^{\alpha_{NFi}}} \right) dt - Mi_{Fi St} * \int_0^{U_{Bu max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RBu}}\right)^{\alpha_{RBu}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NBu}}\right)^{\alpha_{NBu}}} \right) dt + \int_0^{U_{Bu max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RBu}}\right)^{\alpha_{RBu}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NBu}}\right)^{\alpha_{NBu}}} \right) dt}$$

Werden Formel 33 und Formel 34 für die Bestimmung der Startflächen von Buche und Fichte in die durch Formel 31 und Formel 32 ergänzte Formel 30 eingesetzt, so ergibt sich der in Formel 35 dargestellte Zusammenhang für die Bestimmung des durchschnittlichen Mischungsanteils der Fichte an der Betriebsklasse.

Formel 35: Durchschnittlicher Mischungsanteil der Fichte im erweiterten Zielwaldmodell

$$\varnothing Mi_{Fi} = \frac{Mi_{Fi St}}{Mi_{Fi St} * \int_0^{U_{Fi max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RFi}}\right)^{\alpha_{RFi}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NFi}}\right)^{\alpha_{NFi}}} \right) dt - Mi_{Fi St} * \int_0^{U_{Bu max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RBu}}\right)^{\alpha_{RBu}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NBu}}\right)^{\alpha_{NBu}}} \right) dt + \int_0^{U_{Bu max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RBu}}\right)^{\alpha_{RBu}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NBu}}\right)^{\alpha_{NBu}}} \right) dt + \int_0^{U_{Fi max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RFi}}\right)^{\alpha_{RFi}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NFi}}\right)^{\alpha_{NFi}}} \right) dt}$$

12.3.3 Fichtenanteil im Mischwaldmodell

Für das Mischwaldmodell wird das erweiterte Zielwaldmodell um die vom Mischungsanteil der Buche bei der Bestandesbegründung ($Mi_{St Bu}$) und von der Produktionsdauer der Fichte abhängige Kronenausdehnung der Buche erweitert (vgl. Kapitel 5.4). Die daraus resultierende, vom Bestandesalter abhängige baumartenindividuelle Flächenentwicklung in der Betriebsklasse ist in Abbildung 66 beispielhaft für die Mischbestandsvariante M_2 dargestellt.

Formel 36: Vom Mischungsanteil der Buche und der Produktionsdauer der Fichte abhängige Kronenausdehnung der Buche

$$1 + M_{St\ Bu} z (1 - e^{-(M_{St\ Bu} q t)})^{U_{Fi} r}$$

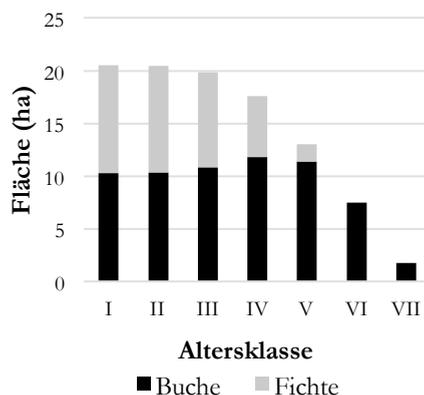


Abbildung 66: Flächenzusammensetzung der Betriebsklasse (Variante M_2) des Mischwaldmodells

Die Zunahme der in Abbildung 66 dargestellten Entwicklung der Buchenfläche in der Betriebsklasse, die mit der Abnahme der Fichtenfläche einhergeht, ist in diesem Modell auf die Ausdehnung der Kronenschirmfläche der Buche zurückzuführen.

Diese Flächenzunahme kann mit einer erweiterten Wachstumsfunktion (vgl. Richards 1959 S. 292 ff.) beschrieben werden (vgl. Formel 36). Die Gesamtfläche der Buche an der Betriebsklasse in Abhängigkeit von der im Modell unterstellten Produktionsdauer und unter Berücksichtigung von risiko- und nutzungsbedingten Flächenveränderungen in den einzelnen Altersklassen wurde bereits in Formel 31 beschrieben. Für das Mischwaldmodell wird diese Formel durch den in Formel 36 dargestellten Zusatz zur Ausdehnung der Buchenkronenschirmfläche ergänzt. Durch diese Kombination der einzelnen Bestandteile wird die Gesamtfläche der Buche in der Betriebsklasse des Mischwaldmodells von der Bestandesbegründung bis hin zur abgeschlossenen Ernte beschrieben. Dabei sind sowohl Risiko- und Nutzungsaspekte des erweiterten Zielwaldmodells als auch die Auswirkung der Fichtenzeitmischung enthalten. Die vollständige Formel zur Beschreibung der Buchenfläche des Mischwaldmodells findet sich in Formel 37. Die Erweiterung wurde im Anschluss an die beiden Weibull-Funktionen dem Integral beigelegt.

Formel 37: Buchenfläche der Betriebsklasse des Mischwaldmodells unter Berücksichtigung von Risiko und Endnutzungsverteilung, der mittleren Produktionsdauer der Fichte und der vom Mischungsanteil der Baumarten abhängigen Ausdehnung der Buchenkronenschirmfläche⁶³

$$F_{Bu} = ST_{FL Bu} * \int_0^{U_{Bu max}} \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta_{RBu}}\right)^{\alpha_{RBu}}} * e^{-\left(\frac{t}{\beta_{NBu}}\right)^{\alpha_{NBu}}} * \left(1 + Mi_{St Bu} z (1 - e^{-(Mi_{St Bu} q t)})^{U_{Fi r}}\right) \right) dt$$

Für die exakte mathematische Berechnung des durchschnittlichen Mischungsanteils der Fichte an der Betriebsklasse des Mischwaldmodells wird dieser Formelbestandteil, wie für Formel 36 beschrieben, anstelle des Formelbestandteils 31 (Buchenfläche der Betriebsklasse im erweiterten Zielwaldmodell) eingefügt.

⁶³ Die vom Buchenanteil bei der Bestandesbegründung abhängigen Variablen z und q nehmen für die Mischbestandsvariante M₂ mit einem Mischungsanteil beider Baumarten bei der Bestandesbegründung von 50% eine Größe von 0,335243324 bzw. 0,136848 ein. Die sowohl von der mittleren Produktionsdauer der Fichte (bei der Variante M₂ von 80 Jahren) wie auch vom Mischungsanteil der Baumarten bei der Bestandesbegründung abhängigen Variable r hat für die Mischbestandsvariante M₂ eine Größe von 241.

12.4 Berechnung des Reduktions- und Erhöhungsfaktors zur Anpassung des Deckungsbeitrags I von Kalamitätsnutzungen – Entwicklung der Formel

Ausgangspunkt für die Berechnung der kalamitätsschadensbedingten reduzierten Erlöse stellt der Deckungsbeitrag I dar, der sich aus den Erlösen (E) und den Erntekosten (K) wie folgt berechnet:

Formel 38: Deckungsbeitrag I

$$E - K = DBI$$

Unter der Annahme (vgl. Kapitel 6.6), dass sich der Deckungsbeitrag I der Kalamitätsnutzungsmengen im Vergleich zum regulären Deckungsbeitrag I reduziert, gilt folgender Zusammenhang, wobei X für den Prozentsatz steht, um den der Deckungsbeitrag I reduziert wird:

Formel 39: Deckungsbeitrag I Kalamitätsnutzungen

$$(E - K) * X = DBI_{\text{Kalamitätsnutzungen}}$$

$$(E - K) * X = (E - F_K * E) - (K + F_K * K)$$

$$X * E - X * K = E - F_K * E - F_K * E + K$$

$$X * E - X * K - E + K = -F_K * (E + K)$$

$$F_K = -\frac{X * E - X * K - E + K}{E + K}$$

$$F_K = -\frac{X * E - X * K - E + K}{E + K}$$

$$F_K = -\frac{(E - K) * (X - 1)}{E + K}$$

Entsprechend der Annahme, dass sich sowohl die Erntekosten zu gleichen Anteilen erhöhen, wie sich die Erlöse verringern, wird für die Reduktion bzw. Erhöhung der Faktor F_K wie folgt verwendet:

Formel 40: Reduktions- bzw. Erhöhungsfaktor zur Bewertung von Kalamitätsnutzungen

$$F_K = -\frac{E - K}{E + K} * (X - 1)$$

12.5 Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung

12.5.1 Kapitalwertmethode

Die zentrale Methode der dynamischen Investitionsrechnung ist die Kapitalwertmethode.

Der Kapitalwert wird berechnet, indem zunächst die zukünftigen Ein- bzw. Auszahlungsüberschüsse, die sich aus einzelnen Perioden des Produktionsprozesses, zum Beispiel durch die Bestandespflege, Durchforstungen oder die Endnutzung ergeben, geschätzt und auf den Startzeitpunkt der Investition, den Zeitpunkt der Bestandesbegründung, mit dem Kalkulationszinsfuß diskontiert werden. Die hierdurch berechneten Barwerte werden summiert und die Auszahlung zum Startzeitpunkt für die Kulturbegründung subtrahiert (in Anlehnung an Schierenbeck und Wöhle 2012 S. 410).

Die allgemeine Formel zur Berechnung des Kapitalwertes aus dem forstlichen Holzproduktionsprozess mit einer Produktionsdauer von n Jahren lautet wie folgt:

Formel 41: Kapitalwert des forstlichen Produktionsprozesses (ohne Verwaltungs-, Erschließungs- und Bodenkosten)

$$KW = -c - \frac{p_t}{(1+i)^t} + \sum_{t=0}^T \frac{D_t}{(1+i)^t} + \frac{A_n}{(1+i)^n} + (v+w) * \frac{(1+i)^n - 1}{i * (1+i)^n}$$

KW	= Kapitalwert
c	= Kulturkosten
p	= Pflegekosten
D	= erntekostenfreie Durchforstungserlöse (hier inklusive der erntekostenfreien Erlöse im Rahmen der Zielstärkennutzung vor dem Erreichen des Bestandesendes)
A	= erntekostenfreier Abtriebswert zum Bestandesende
v	= jährliche Verwaltungskosten
w	= jährliche Wegebaukosten
i	= Kalkulationszins
t	= Zeitindex
n	= Produktionsdauer

Der Kapitalwert eines Bestandes kann interpretiert werden als der Barwert des Endvermögens bzw. des gesamten Zuwachses an betrieblichem Vermögen für die gesamte Produktionsdauer des Bestandes, berechnet auf den Zeitpunkt 0, den Zeitpunkt unmittelbar vor dem Beginn der Investition. Der Kapitalwert stellt somit eine totale Überschussgröße dar (vgl. Becker 2009 S. 60).

Schierenbeck und Wöhle (2012 S. 412) beschreiben die folgenden Vorteilhaftigkeitskriterien zur Beurteilung der Kapitalwertmethode:

- Auf der Ebene der einzelnen Investition ist jede Investition, die zu einem Kapitalwert von > 0 führt, als vorteilhaft einzustufen. Der positive Kapitalwert drückt aus, dass über die geforderte Mindestverzinsung und die Amortisation des eingesetzten Kapitals hinaus ein Überschuss erwirt-

schaftet wird. Ein negativer Kapitalwert zeigt, dass die erwarteten Rückflüsse zur Wiedergewinnung des Kapitaleinsatzes und/oder zur geforderter Mindestverzinsung nicht ausreichen.

- Beim Vergleich mehrerer sich ausschließender Investitionsalternativen ist die Investition mit dem höchsten positiven Kapitalwert am vorteilhaftesten.

12.5.2 Annuitätenmethode

Erst die Verwendung der Annuität ermöglicht die Vergleichbarkeit von Investitionen unterschiedlicher Laufzeit. Grundsätzlich stellt die Annuität eine Variante der Kapitalwertmethode dar. Während jedoch mit der Kapitalwertmethode ein einmaliger Betrag ermittelt wird und dieser auf den Beginn der Investition, den Zeitpunkt der Bestandesbegründung, bezogen wird, wird mit der Annuität diese Größe in gleich große jährliche Zahlungen mithilfe von Zins- und Zinseszinsseffekten auf die einzelnen Perioden des Investitions- bzw. Produktionszeitraumes umgerechnet (vgl. Schierenbeck, Wöhle 2012 S. 415). Die Annuität stellt somit den möglichen jährlichen konstanten Überschuss bzw. Entnahmebetrag dar, der laufend aus der waldbaulichen Produktion entnommen werden kann. Die Annuität ist hierdurch eine ideale Größe für den Vergleich unterschiedlicher waldbaulicher Produktionskonzepte mit voneinander abweichenden Laufzeiten und Produktionszeiträumen (vgl. Möhring 2004b S. 107 ff.) und damit ein Vergleichsmaßstab für die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Baumarten und Baumartenmischungen. Berechnet wird die Annuität für den Produktionszeitraum n , indem der Kapitalwert mit dem sogenannten Wiedergewinnungsfaktor multipliziert wird, dem Reziprokwert des Rentenbarwertfaktors (vgl. folgende Formel).

Formel 42: Formel zur Berechnung der Annuität auf Grundlage des Kapitalwerts

$$a = KW * \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}$$

a = Annuität
 KW = Kapitalwert
 i = Kalkulationszins

Die Annuität entspricht der Bodenbruttorente der Waldbewertungspraxis (vgl. Möhring 2009 S. 114) und ermöglicht die Beurteilung der effizienten Nutzung der im Forstbetrieb stets knappen Ressource Boden. Die eigentliche Beurteilung der mit der Annuitätenmethode berechneten Ergebnisse kann entweder mit der absoluten oder der relativen Vorteilhaftigkeit erfolgen. Aus rein ökonomischer Sicht ist dabei jede positive Annuität als vorteilhaft einzustufen. Der Betrieb kann dabei innerhalb jeder Periode über den Betrag in Höhe der Annuität verfügen, da die Amortisation des investierten Kapitals und die Verzinsung bereits abgedeckt sind (vgl. Nadvomik et al. 2009 S. 92). Stehen mehrere sich gegenseitig ausschließende Investitionsalternativen zur Auswahl, wie zum Beispiel die Wahl unterschiedlicher Baumartenanteile eines Mischbestandes bei dessen Begründung, so ist die Mi-

schung ökonomisch am vorteilhaftesten, die zu einer höheren Annuität als die alternativ möglichen Mischungsvarianten führt (in Anlehnung an Becker 2009 S. 65).

Unter Einbeziehung der Erschließungs- und Verwaltungskosten entspricht die zinsfreie Annuität dem jährlichen Bruttowaldreinertrag (Möhring et al. 2006 S. 34), also dem Reinertrag, der auf Dauer nachhaltig der forstlichen Produktion eines Betriebes entnommen werden kann. Der Reinertrag entspricht somit dem laufenden, mit der naturalen Produktion erwirtschafteten Überschuss des Betriebes, einer vom Kalkulationszins unabhängigen Beurteilungsgröße.

12.6 Kennziffern der dynamischen Betriebsklasse

Übergangsdauer	Jahre	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Fläche	ha	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Fläche Buche	ha	100	98	95	93	91	89	86	84	82	80	78	76	74
Fläche Fichte	ha	0	2	5	7	9	11	14	16	18	20	22	24	26
Holzvorrat Buche	Vfm	265	265	265	265	264	264	263	261	259	257	254	250	247
Holzvorrat Fichte	Vfm	0	0	0	1	2	4	8	12	19	26	34	43	51
Summe Holzvorrat	Vfm	265	265	265	266	266	268	270	274	278	283	288	293	298
Einschlag Buche	Efm	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Einschlag Fichte	Efm	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2
Summe Einschlag	Efm	8	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9
Erntekosten Buche	€	165	165	165	165	165	165	165	164	163	162	161	159	157
Erntekosten Fichte	€	0	1	2	5	7	10	12	16	19	24	29	34	41
Summe Erntekosten	€	165	166	168	170	173	175	177	180	182	186	189	193	198
Holzerlöse Buche	€	346	346	346	345	345	345	345	344	343	341	339	336	333
Holzerlöse Fichte	€	0	1	2	5	8	11	14	19	26	35	49	68	91
Summe Holzerlöse	€	346	346	348	350	353	356	359	363	368	376	388	404	424
DB I Buche	€	180	180	180	180	180	180	180	180	179	179	178	177	176
DB I Fichte	€	0	0	0	0	0	1	2	3	6	12	20	33	50
Summe DB I	€	180	180	180	180	180	181	182	183	186	190	198	210	226
Begründungskosten Buche	€	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Begründungskosten Fichte	€	0	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Summe Begründungskosten	€	0	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Pflegekosten Buche	€	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Pflegekosten Fichte	€	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Summe Pflegekosten	€	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4
DB II Buche	€	176	176	178	178	178	178	178	177	177	177	176	175	174
DB II Fichte	€	0	-11	-14	-14	-13	-13	-12	-10	-7	-2	7	20	37
Summe DB II	€	176	164	164	164	164	165	166	167	170	175	183	195	210

Übergangsdauer	Jahre	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
Fläche	ha	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Fläche Buche	ha	73	71	70	69	68	67	67	67	67	67	66	66	66
Fläche Fichte	ha	27	29	30	31	32	33	33	33	33	33	34	34	34
Holzvorrat Buche	Vfm	243	239	234	230	226	222	219	228	227	226	223	221	219
Holzvorrat Fichte	Vfm	59	67	73	77	80	82	84	87	87	87	87	87	88
Summe Holzvorrat	Vfm	302	305	307	308	307	305	302	315	314	312	310	308	307
Einschlag Buche	Efm	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Einschlag Fichte	Efm	2	3	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5
Summe Einschlag	Efm	10	10	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
Erntekosten Buche	€	156	154	151	149	147	144	140	144	145	147	148	148	147
Erntekosten Fichte	€	48	56	65	73	80	87	91	97	96	95	94	94	94
Summe Erntekosten	€	204	210	216	222	227	230	231	241	241	241	242	242	242
Holzerlöse Buche	€	330	326	323	318	313	307	298	309	312	316	318	319	318
Holzerlöse Fichte	€	119	151	186	220	251	276	294	320	314	308	305	304	304
Summe Holzerlöse	€	449	478	508	538	564	582	593	629	626	624	623	623	622
DB I Buche	€	174	173	171	169	166	163	159	165	167	169	170	171	171
DB I Fichte	€	71	95	121	147	170	189	203	223	218	213	211	210	210
Summe DB I	€	246	268	292	316	337	352	362	387	385	382	381	381	381
Begründungskosten Buche	€	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Begründungskosten Fichte	€	12	12	12	13	13	14	14	13	13	13	13	13	13
Summe Begründungskosten	€	12	12	12	13	13	14	14	13	13	13	13	13	13
Pflegekosten Buche	€	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Pflegekosten Fichte	€	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Summe Pflegekosten	€	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
DB II Buche	€	172	171	169	166	164	160	156	162	164	166	168	169	168
DB II Fichte	€	57	81	106	131	154	173	186	207	203	198	195	194	194
Summe DB II	€	230	251	275	298	318	333	343	370	367	364	363	363	363

Übergangsdauer	Jahre	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190
Fläche	ha	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Fläche Buche	ha	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	67
Fläche Fichte	ha	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	33
Holzvorrat Buche	Vfm	216	215	213	213	213	214	215	216	218	219	221	228	228
Holzvorrat Fichte	Vfm	89	90	91	91	92	92	93	93	93	93	92	88	87
Summe Holzvorrat	Vfm	305	304	304	304	305	306	308	309	311	312	313	317	315
Einschlag Buche	Efm	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Einschlag Fichte	Efm	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Summe Einschlag	Efm	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Erntekosten Buche	€	147	145	143	141	140	138	138	137	138	138	139	143	144
Erntekosten Fichte	€	95	96	96	97	98	98	99	99	99	99	99	99	97
Summe Erntekosten	€	242	241	240	239	238	237	236	237	237	238	239	241	241
Holzerlöse Buche	€	316	313	309	304	300	296	294	293	294	295	297	305	309
Holzerlöse Fichte	€	305	308	311	314	317	320	322	324	326	327	327	326	320
Summe Holzerlöse	€	622	621	619	618	617	615	616	617	619	622	624	631	629
DB I Buche	€	170	168	165	162	160	157	156	156	156	157	158	162	165
DB I Fichte	€	211	212	214	217	219	221	223	225	226	227	228	227	223
Summe DB I	€	380	380	380	379	379	379	379	381	382	384	385	390	387
Begründungskosten Buche	€	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Begründungskosten Fichte	€	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13
Summe Begründungskosten	€	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13
Pflegekosten Buche	€	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
Pflegekosten Fichte	€	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
Summe Pflegekosten	€	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
DB II Buche	€	167	165	163	160	158	155	154	153	153	154	155	160	162
DB II Fichte	€	195	197	199	202	205	207	209	211	212	213	213	212	207
Summe DB II	€	363	362	362	362	362	362	363	364	365	367	368	372	370

Übergangsdauer	Jahre	195	200	220	240	260	280	300	340	380	400	440	480	500
Fläche	ha	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Fläche Buche	ha	67	67	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
Fläche Fichte	ha	33	33	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Holzvorrat Buche	Vfm	227	226	216	213	218	223	223	217	220	221	219	219	220
Holzvorrat Fichte	Vfm	87	87	89	92	93	91	89	91	91	90	90	91	91
Summe Holzvorrat	Vfm	314	312	305	305	311	314	312	308	311	311	309	310	311
Einschlag Buche	Efm	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Einschlag Fichte	Efm	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Summe Einschlag	Efm	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Erntekosten Buche	€	145	147	147	140	138	141	144	142	141	142	142	141	142
Erntekosten Fichte	€	96	95	95	98	99	99	97	97	98	98	97	98	98
Summe Erntekosten	€	241	241	242	238	237	240	241	239	239	240	239	239	240
Holzerlöse Buche	€	312	316	316	300	294	301	308	305	301	305	305	302	303
Holzerlöse Fichte	€	314	308	305	317	326	326	319	315	322	320	316	320	320
Summe Holzerlöse	€	626	624	622	617	619	627	626	620	623	625	622	623	623
DB I Buche	€	167	169	170	160	156	160	164	163	160	162	163	161	162
DB I Fichte	€	218	213	211	219	226	227	221	218	224	222	219	222	222
Summe DB I	€	385	382	380	379	382	387	386	381	384	385	382	383	384
Begründungskosten Buche	€	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Begründungskosten Fichte	€	13	13	13	12	12	12	13	12	12	12	12	12	12
Summe Begründungskosten	€	13	13	13	12	12	12	13	12	12	12	12	12	12
Pflegekosten Buche	€	3	3	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2
Pflegekosten Fichte	€	3	3	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2
Summe Pflegekosten	€	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
DB II Buche	€	164	166	167	158	153	158	162	161	158	160	160	159	159
DB II Fichte	€	203	198	195	205	212	212	206	203	209	207	204	208	207
Summe DB II	€	367	364	363	362	365	370	368	364	367	367	365	366	366

Ergebnisse der 3. Bundeswaldinventur zeigen einen anhaltenden Rückgang der Fichte. Bedingt durch höhere Massenleistung, vergleichsweise kürzere Produktionszeiten und im Durchschnitt im Vergleich zum Laubholz höheren Erlösen ist die Produktion von Nadelholz für viele Forstbetriebe betriebswirtschaftlich essentiell. Es ist dementsprechend von wirtschaftlicher Bedeutung, langfristig einen Nadelholzanteil im Betrieb zu erhalten. Ziel der Arbeit ist es, die Anreicherung von Laubbaumbeständen mit Nadelbaumarten am Beispiel von Buchenbeständen mit Fichtenzeitmischungen zu analysieren und die Folgen auf Liquidität und Rentabilität von Forstbetrieben darzustellen. Hierfür werden baumartenspezifische Kennzahlen aus empirischen Daten mit multivariaten statistischen Analyseverfahren ermittelt, nachhaltige ökonomische Betriebsmodelle mit Mischbeständen entwickelt und die betriebswirtschaftlichen Folgen der Anreicherung reiner Laubbaumbestände mit Nadelbaumarten auf Betriebsebene analysiert.