Schlussbericht

zum Vorhaben

SURVIVAL-KW

Veränderte Überlebenszeit von Waldbeständen: Ökonomische Folgen des Klimawandels für die Forstwirtschaft. Managementoptionen zur Optimierung des Risiko-Ertragsverhältnisses unter geändertem Klima

---

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität München, Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei

Förderkennzeichen:

22WC4088

Laufzeit:

01.01.2016 – 31.12.2019

Monat der Erstellung:

06/2020

Datum der Veröffentlichung:

20.11.2020

Waldklimafonds

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger für den Waldklimafonds unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Antragsteller und Projektleitung	*Technische Universität München, Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung* Prof. Dr. Thomas Knoke
Leitung Modul 1 (Überlebenszeitmodellierung)	*Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* Wolfgang Falk (Leitung) Susanne Brandl (Projektbearbeitung)
Leitung Modul 2 (Evaluierung der Überlebenszeitmodellierung an Versuchsflächen)	*Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg* Dr. Axel Albrecht (Leitung) Dr. Janet Maringer (Projektbearbeitung)
Leitung Modul 3 (Anwendung der Modelle auf das BWI Netz)	*Thünen-Institut für Waldökosysteme* Prof. Dr. Andreas Bolte (Leitung) Susann Bender (Projektbearbeitung) Jens Wiesehahn (Projektbearbeitung) Kinga Jánosi (Projektbearbeitung)
Leitung Modul 4 (Optimierungsstrategien für Modellbetriebe)	*Technische Universität München, Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung* Prof. Dr. Thomas Knoke (Leitung) Dr. Carola Paul (Projektbearbeitung) Dr. Fabian Härtl (Projektbearbeitung) Katharina Messerer (Projektbearbeitung)
Leitung Modul 5 (Ertrags- und Risikosituation realer Forstbetriebe)	*Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg* Dr. Christoph Hartebrodt (Leitung) Katrin Dännart (Projektbearbeitung)
Leitung Modul 6 (Projektkoordination)	*Technische Universität München, Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung* Prof. Dr. Thomas Knoke (Leitung) Dr. Carola Paul (Projektbearbeitung)
Unterstützender Praxispartner	*Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz* Friedrich Engels

Technische Universität München
Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2
85354 Freising

Inhalt

I) Kurze Darstellung des Projektes 1
1 Aufgabenstellung 1
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 3
3 Planung und Ablauf des Vorhabens 3
4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 5
5 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde 5
II) Entwickelte Methoden und erzielte Ergebnisse 7
1 Überlebenszeitmodellierung der Hauptbaumarten (Modul 1) 7
1.1 Datengrundlagen und Methoden 7
1.2 Ergebnisse 8
1.3 Schlussfolgerung 11
2 Evaluierung der Überlebenszeitmodellierung an Hand von Versuchsflächen (Modul 2) 11
2.1 Datengrundlage und Methoden 12
2.2 Ergebnisse 13
2.3 Schlussfolgerung 17
3 Projektion der Überlebenswahrscheinlichkeit auf die Traktecken der BWI³ (Modul 3) 18
3.1 Datengrundlage und Methoden 18
3.2 Ergebnisse 20
3.3 Schlussfolgerung 23
4 Optimierungsstrategien für Modellbetriebe (Modul 4) 24
4.1 Optimierte Nutzungsplanung im Klimawandel mit dem YAFO Modell 24
4.1.1 Datengrundlage und Methoden 24
4.1.2 Ergebnisse 28
4.1.3 Schlussfolgerung 33
4.2 Optimierte Produktionsplanung (Baumartenwahl) im Klimawandel 33
4.2.1 Datengrundlage und Methoden 33
4.2.2 Ergebnisse 35
4.2.3 Schlussfolgerung 36
5 Ertrags- und Risikosituation realer Forstbetriebe (Modul 5) 37
5.1 Empirische Erkenntnisse zur Ertrags- und Risikosituation realer Forstbetriebe 37
5.1.1 Datengrundlage und Methodik 37
5.1.2 Ergebnisse 39
5.1.3 Schlussfolgerung 45
5.2 Optimierte Einschlagsplanung für Realbetriebe 46
5.2.1 Datengrundlage und Methoden 46
5.2.2 Ergebnisse 47
5.2.3 Schlussfolgerung 52
III) Gesamtheitliche Schlussfolgerung und Ausblick 53
IV) Liste der Veröffentlichungen 56
1 Publikationen 56
2 Vorträge 57
V) Literatur 58

Zusammenfassung

Zusammenfassung in deutscher Sprache

Projektbeschreibung

Vor dem Hintergrund steigender klimawandelbedingter Risiken für die Forstwirtschaft war es Ziel dieses Vorhabens Mortalitätsrisiken heimischer Waldbestände sowie die sie bestimmenden Einflussgrößen modellhaft zu beschreiben, um damit klimawandelbedingte Auswirkungen auf die finanzielle Ertrags- und Risiko-Situation von Forstbetrieben abschätzen zu können. Daraus sollten Managementoptionen zur Abmilderung negativer ökonomischer Konsequenzen abgeleitet werden. Zu diesem Zweck wurden zunächst die Mortalitätsrisiken durch statistische Überlebenszeitmodellierung an einem kombinierten deutschen und europäischen Datensatz zur Waldzustandserhebung (Wald- bzw. Kronenzustandserhebung und ICP Forests Level I sowie Level II) abgeschätzt (Modul 1 unter Leitung der Bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft) und an Versuchsflächen validiert (Modul 2, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)). Die erarbeiteten Überlebenszeitfunktionen wurden dann auf die Traktecken der Bundeswaldinventur angewandt, und mit dem Wachstumsmodell WEHAM gekoppelt (Modul 3, Thünen-Institut für Waldökosysteme). Die neue Abschätzung der Mortalitätsrisiken in Abhängigkeit von Klimaparametern erlaubt die ökonomische Bewertung und Optimierung möglicher Anpassungsstrategien (Modul 4 und 5). Modul 4 (unter Leitung der Professur für Waldinventur und nachhaltiger Nutzung der Technischen Universität München (TUM)) entwickelte hierfür Methoden für die beiden Anpassungsstrategien a) Baumartenwahl und Mischungsform und b) Anpassung des Zeitpunktes und der Frequenz von Einschlagsmaßnahmen. Die Methoden wurden zunächst auf idealisierte Betriebe (Modul 4) angewandt. In Modul 5 wurden unter Leitung der FVA zur Plausibilisierung der betrieblichen Annahmen empirische Zusammenhänge zwischen Kalamitäten und Betriebsergebnissen anhand des Testbetriebsnetzes in Baden-Württemberg untersucht und die in Modul 4 entwickelten Methoden auf reale Forstbetriebe angewandt.

Projektergebnisse

Das Projekt liefert erstmals eine generalisierbare Quantifizierung und monetäre Bewertung der sich durch den Klimawandel ändernden Mortalitätsrisiken in deutschen Wäldern. Die neuen Überlebenszeitmodelle ermöglichen eine summarische Abschätzung der Überlebenswahrscheinlichkeiten der Hauptbaumarten (Fichte, Buche, Kiefer, Tanne, Douglasie, Traubeneiche und Stieleiche) in Abhängigkeit von Alter, Klima und ggf. Mischungsanteil. Zur Optimierung der Baumartenwahl und der betrieblichen Einschlagsplanung mit und ohne den Einfluss des Klimawandels wurden neue, robuste Optimierungsalgorithmen mit der Portfoliotheorie gekoppelt. Risiken können so in die forstplanerische Betrachtung einbezogen und finanziell bewertet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass waldbauliche Strategien, wie der Anbau von Mischbeständen und die Verkürzung

der Umtriebszeit durch frühzeitigen Waldumbau mit zeitlich gestreutem Einschlag, finanzielle Verluste klimabedingter Mortalitätsrisiken abmildern können. Sie können diese jedoch nicht völlig kompensieren. Diese Verluste zeigten sich in den Simulationen der Beispielbetriebe durch die Reduzierung der betrieblichen, risikosensitiven Zielfunktion von bis zu 15%. Diese Verluste gelten, selbst bei theoretisch optimaler Einschlagsplanung unter dem entsprechenden Klimawandelszenario.

Die neuen risikosensitiven Modelle können einen geeigneten Beitrag zur Anpassung der Forstwirtschaft an den Klimawandel leisten. Die Ergebnisse unterstreichen zudem die Bedeutung langfristiger und europaweiter Erhebungen von Mortalitätsdaten und die Einbeziehung von Risiken in moderne Werkzeuge der Forstplanung. Zukünftige Forschung sollte die Kausalbeziehungen zwischen Mortalitätsursache und Umweltbedingungen schärfen, und die Optimierungsmodelle um weitere nicht-ökonomische Zielsetzungen erweitern. So könnten die Auswirkungen veränderter Mortalitätsrisiken auf verschiedene Ökosystemleistungen und entsprechende Managementkonzepte abgeleitet werden.

Short project description

Project objective

Against the background of increasing risks for forestry caused by climate change, the aim of this project was to model mortality risks of native forest stands and the factors influencing mortality risk to estimate the effects of climate change on the financial yield and risk level of forest enterprises, and derive management options for mitigating negative economic consequences. To this end, the mortality risks were first estimated using statistical survival time modelling using a combined German and European data set for forest condition surveys (Forest or Crown Condition Survey and ICP Forests Level I and Level II) (Module 1 under the direction of the Bavarian State Institute of Forestry) and validated on trial plots (Module 2, Forest Experimental and Research Institute Baden-Württemberg (FVA)). The resulting survival time functions were then applied to the tracts of the Federal Forest Inventory and coupled with the growth model WEHAM (Module 3, Thünen Institute of Forest Ecosystems). The new estimation of mortality risks as a function of climate parameters allows the economic evaluation and optimization of possible adaptation strategies (Modules 4 and 5). Module 4 (under the direction of the Institute of Forest Management (TUM)) therefore developed methods for the two adaptation strategies a) tree species selection and mixture form and b) adjustment of the timing and frequency of harvesting operations. The methods were initially applied to idealized forest enterprises (Module 4). In Module 5, under the direction of the FVA, empirical correlations between calamities and operating results were examined using the Forest Enterprise Accounting Network in Baden-Württemberg to check the plausibility of the operational assumptions, and the methods developed in Module 4 were applied to real forest enterprises.

Project results

The project provides for the first time a generalizable quantification and monetary valuation of the changing mortality risks in German forests due to climate change. The new survival time models allow for a summary estimation of the survival probabilities of the main tree species (spruce, beech, pine, fir, Douglas fir, sessile oak and English oak) depending on age, climate and, if applicable, mixture ratio. To optimize tree species selection and planning of operational felling with and without the influence of climate change, new robust optimization algorithms were coupled with the portfolio theory. Risk can thus be included in forest planning considerations and be financially evaluated. The results show that silvicultural strategies such as the cultivation of mixed stands and the reduction of rotation time through early forest restructuring with varied harvesting schedules over time can mitigate financial losses of climate-related mortality risks. However, they cannot fully compensate for these risks. These losses were shown in the simulations of the sample enterprises by lowering the operational, risk-sensitive target function by up to 15%. These losses apply even under theoretically optimal impact planning under the corresponding climate change

scenario.

The new risk-sensitive models contribute to the adaptation of forestry to climate change. The results underline the importance of long-term and Europe-wide surveys of mortality data and the integration of risks into modern forest planning tools. Future research should sharpen the causal relationships between mortality and environmental conditions and extend the optimization models to include further non-economic objectives. In this way, the effects of changing mortality risks on various ecosystem services and corresponding management concepts could be derived.

I) Kurze Darstellung des Projektes

1 Aufgabenstellung

Die Anpassung unserer Wälder an den Klimawandel ist erklärtes Ziel der Bundesregierung und Förderschwerpunkt des Waldklimafonds (WKF). Diese Aufgabe ist für die Forstwissenschaft und betroffene Forstbetriebe gleichermaßen eine große Herausforderung. Die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf veränderte Produktionsbedingungen ist mit großen methodischen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden. Forstwirtschaft ist durch seine langen Produktionszeiträume von jeher mit großen Unsicherheiten konfrontiert. Ein sich veränderndes Klima wird mit großer Wahrscheinlichkeit Produktionsrisiken und Unsicherheiten noch erhöhen, insbesondere durch zunehmende Trockenheit, Stürme und Schädlingskalamitäten (Ummenhofer und Meehl 2017) und den damit verbundenen Schwankungen an den Holzmärkten. Diese klimawandelbedingte Veränderung von Produktionsrisiken, hier im Wesentlichen der Bestandesausfall, wurde bisher jedoch kaum quantifiziert (Montagné-Huck und Brunette 2018). Eine solche Abschätzung ist notwendig, um ökonomische Konsequenzen für Forstbetriebe ableiten zu können. Für Forstbetriebe verändern sich nicht nur der mittlere erwartete finanzielle Ertrag, sondern auch seine Schwankung, u.a. durch unsichere naturale Erträge und Holzmärkte (Knoke 2017; Neuner und Knoke 2017). Um schließlich auch Handlungsoptionen aufzeigen zu können, ist ein besseres Verständnis der Auswirkungen waldbaulicher Strategien auf finanzielle Erträge und ihre Schwankungen notwendig. Aktuell diskutierte Strategien sind insbesondere der Anbau von Mischbeständen, angepasste Umtriebszeiten sowie ein ungleichaltriger Bestandesaufbau (Jactel et al. 2017).

Aus diesen Forschungslücken leiteten sich die folgenden Ziele dieses Forschungsprojektes ab:

1. Identifikation und modellhafte Darstellung der Einflussgrößen auf die sich verändernden Überlebenszeiten der Hauptbaumarten in Rein- und Mischbeständen auf der Grundlage eines europäischen Datensatzes.
2. Validierung der Modelle an Versuchsflächen und Anwendung auf reale und idealisierte Forstbetriebe.
3. Quantifizierung der Auswirkungen veränderter Mortalitätsrisiken auf die finanzielle Ertrags- und Risiko-Situation von idealisierten und realen Forstbetrieben und Ableitung möglicher Managementoptionen zur Abmilderung negativer ökonomischer Konsequenzen.

Das Projekt gliedert sich in fünf Teilmodule, die in enger Zusammenarbeit jeweils unter Federführung eines Partners bearbeitet wurden (Abbildung 1). Koordiniert wurde das Gesamtprojekt durch die Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung der Technischen Universität München (TUM).

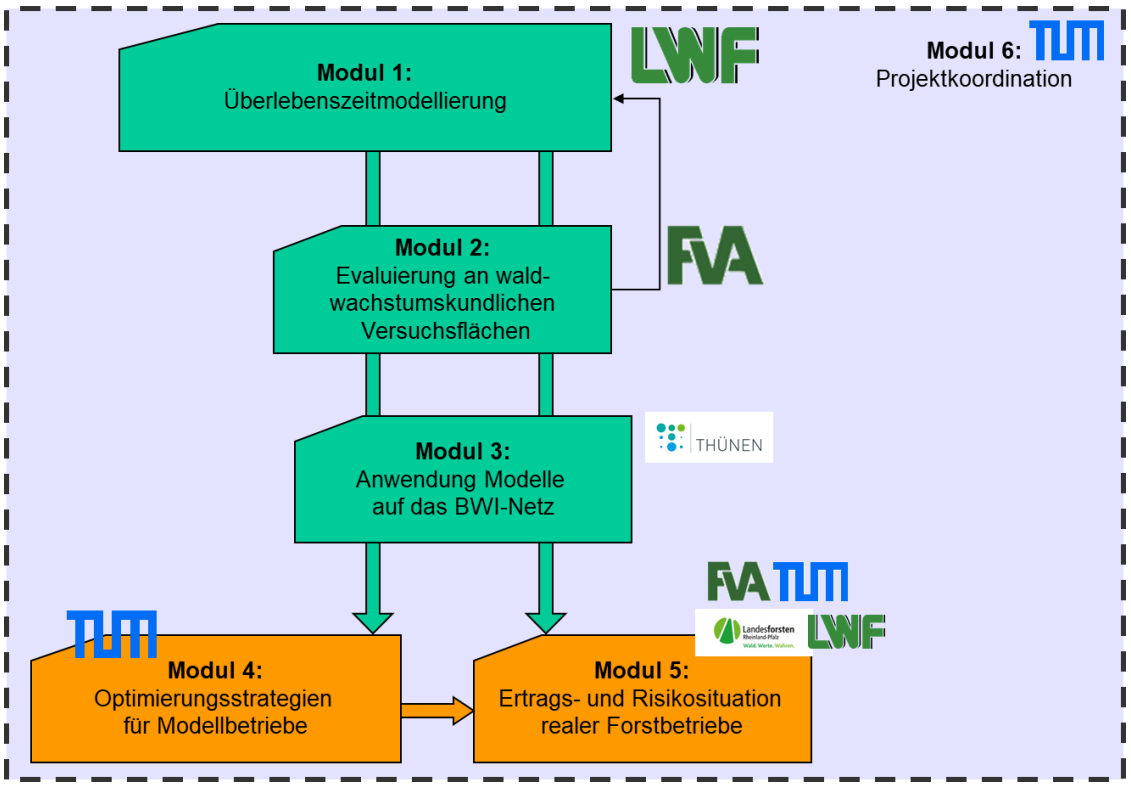


Abbildung 1: Arbeitsplan des SURVIVAL-KW Projektes

Modul 1 (unter Leitung der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)) erarbeitete die Überlebenszeitmodellierung an einem kombinierten deutschen und europäischen Datensatz zur Waldzustandserhebung (Wald- bzw. Kronenzustandserhebung und ICP Forests Level I sowie Level II), welche in Modul 2 (unter Leitung der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)) durch Daten aus Versuchsflächen in Baden-Württemberg evaluiert wurden. Die erarbeiteten Überlebenszeitfunktionen wurden dann auf die Traktecken der Bundeswaldinventur angewandt, um mit der Fortschreibung des Wachstums durch das Modell WEHAM (Bösch 2016) gekoppelt zu werden (Modul 3, unter Leitung des Thünen-Institut für Waldökosysteme). Die neue Abschätzung der Mortalitätsrisiken in Abhängigkeit von Klimaparametern erlaubt die ökonomische Bewertung und Optimierung möglicher Anpassungsstrategien (Modul 4 und 5). Modul 4 (Unter Leitung der TUM) entwickelte hierfür Methoden für die beiden Anpassungsstrategien a) Baumartenwahl und Mischungsform und b) Anpassung des Zeitpunktes und der Frequenz von Einschlagsmaßnahmen. Die Methoden wurden zunächst auf idealisierte Betriebe angewandt. In Modul 5 wurden unter Leitung der FVA zur Plausibilisierung der betrieblichen Annahmen empirische Zusammenhänge zwischen Kalamitäten und Betriebsergebnissen anhand des Testbetriebsnetzes in Baden-Württemberg untersucht und die in Modul 4 entwickelten Methoden auf reale Forstbetriebe angewandt.

Das Projekt liefert damit insbesondere Beiträge zu den WKF-Förderzielen „Anpassung der Wälder an den Klimawandel“ und der „Sicherung der Kohlenstoffspeicherung durch ökonomische Absicherung waldbaulicher Entscheidungen“ unter der Prämisse eines sich ändernden Klimas.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Alle Projektpartner sind öffentliche Forschungseinrichtungen, die langjährige Erfahrung in der Durchführung wissenschaftlicher Verbundprojekte haben. Alle Projektleiter wurden durch Eigenmittel finanziert. Die Durchführung der umfangreichen Modellierungsarbeiten war nur durch die zusätzliche Schaffung von insgesamt 5 Projektstellen, inklusive der Koordination, möglich. Weitere Unterstützung erhielt das Projekt durch studentische Hilfskräfte. Durch die Mittel des WKF konnten zudem die Ausgaben für Reisen der Projektbearbeiter zu den Projekttreffen und zur Präsentation der Ergebnisse auf Konferenzen gedeckt werden.

Die notwendige wissenschaftliche Infrastruktur wurde von den beteiligten Einrichtungen gestellt. Synergieeffekte innerhalb des Verbundprojektes ergaben sich zudem durch die gemeinsame Datennutzung umfangreicher – und bisher noch nicht verknüpfter – Datensätze. Hierzu gehörte die Waldzustandserhebung, die Daten des International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on forests (ICP Forests) Daten Level I und II, die Daten der Bundeswaldinventur und des WEHAM Modelles (bereitgestellt durch das Thünen Institut), Klimadaten des Worldclim Datensatzes (angepasst auf die BWI Daten) und zeitlich hoch aufgelöste Daten zur Baummortalität der baden-württembergischen Versuchsflächen. Die enge Zusammenarbeit der Partner und ihrer engen Kontakte in die forstliche Praxis ermöglichte zudem das Akquirieren der Daten für die Anwendung der Modelle auf Realbetriebe.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde zum 14.12.2015 durch den WKF genehmigt und startete auf Grund der verzögerten Personaleinstellung zum 01.04.2016 und endete durch die entsprechende kostenneutrale Verlängerung zum 31.12.2019.

Tabelle 1: Zeitplan des Projektes und Meilensteine (rote Linien, s. Tabelle 2, Q=Quartal)

			2016				2017				2018				2019		
Modul	**Name**	**Federführung**	**Q1**	**Q2**	**Q3**	**Q4**	**Q1**	**Q2**	**Q3**	**Q4**	**Q1**	**Q2**	**Q3**	**Q4**	**Q1**	**Q2**	**Q3**
1	Überlebenszeit-modellierung	LWF-BY															
2	Modellevaluierung an Versuchsflächen	FVA-BW															
3	Modellanwendung BWI	TI-WO															
4	Optimierungsstrategien für Modellbetriebe	TUM															
5	Ertrags- und Risikosituation realer Forstbetriebe	FVA-BW															
6	Projektkoordination	TUM															

Tabelle 2: Meilensteinplanung (Q= Quartal)

Modul	Name	Federführend	2016	2017	2018	2019
1	Überlebenszeitmodellierung	LWF-BY	Q2: Datenakquise und Datenaufbereitung Level I Q3: Datenakquise und Datenaufbereitung Level II Q4: Datenakquise und Datenaufbereitung weiterer Datenquellen wie Waldzustandserhebungen	Q3: Entwicklung Überlebenszeitmodelle	Q1: Evaluierung in Zusammenarbeit mit Modul 2, Dokumentation, Bereitstellung Überlebenszeitmodelle	
2	Modell-evaluierung an Versuchs-flächen	FVA-BW		Q1: Datenaufbereitung der waldwachstumskundlichen Versuchsflächen Q3: Harmonisierung der geoklimatischen Daten zwischen den Level I/II-Flächen und den waldwachstumskundlichen Versuchsflächen	Q2: Abschluss der Evaluierung auf waldwachstumskundlichen Flächen Q3: Dokumentation Modul 2, Praktikerhandreichung	
3	Modell-anwendung BWI	TI-WO		Q2: Definition von Prädiktoren der Überlebenszeitmodelle in Zusammenarbeit mit LWF-BY, Modul 1 Q3: Datenaufbereitung und Generierung von Forstbetrieben aus der BWI	Q2: Ertragskundliche Bewertung der Forstbetriebe bei unterschiedlichen Modell-Szenarien Q2: Bewertung der Forstbetriebe hinsichtlich Risiko und Ertrag bei unterschiedlichen Managementoptionen Q3: Dokumentation Modul 3	
4	Richtig entscheiden – Optimierungsstrategien für Modellbetriebe	TUM		Q3: BWI-Datenzugang und -aufbereitung für Modellanwendung und Vorbereiten der Modelle auf die Integration von klimabedingt veränderten Risiken basierend auf der bereits vorhandenen Studie von Neuner et al. (2015)	Q1: Anpassung der Bestandes- und Betriebsmodelle mit Hilfe der neu gewonnenen Modelle zur Prognose der Überlebenszeit	Q1: Risiko- und Ertragsbewertung von Modell- und Realbetrieben mit Hilfe von Funktionen aus Modul 1 Q2: Dokumentation
5	Ertrags- und Risikosituation realer Forstbetriebe	FVA-BW		Q4: Datenakquise realer Betriebe, Datenaufbereitung Klima (Gegenwart/Zukunft)	Q4: Anwendung Modelle aus Modul 1 und Optimierungsstrategien Modul 4, Analyse Ertrags- und Risikosituation	Q1: Dokumentation
6	Projektkoor-dination	TUM	Q2: Kickoff, Auftakttreffen Projekt mit allen beteiligten Institutionen	Q2: Jahrestreffen Q2: Zwischenbericht	Q2: Jahrestreffen Q2: Zwischenbericht	Q1: Abschlusstreffen Q3: Abschlussbericht

4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde in enger Abstimmung mit dem WKF-Projekt WP-KS-KW durchgeführt. So konnte früh auf die neu entwickelten deutschlandweiten Datensätze in diesem Projekt zurückgegriffen werden. Weiterhin bestand enger Austausch mit dem WKF Projekt DSS-Riskman zur synergistischen Entwicklung der Moralitätsmodelle und ökonomischen Analysen. Hierzu wurden die entsprechenden Modelle und Ergebnisse kontinuierlich ausgetauscht. Mit beiden Projekten erfolgte ein jährlicher Austausch im Rahmen des durch die TUM organisierten „Risikoworkshops“ in Lohr am Main. Die Ergebnisse dieses Projektes flossen zudem bereits in die Beratungstätigkeit des WKF Projektes KoNeKKTiW ein.

An dieser Stelle möchten wir uns zudem beim International Co-operative Programme on Assessment (ICP Forests) für die Bereitstellung und Aufbereitung der verwendeten Datensätze bedanken.

Zudem ist eine große Zahl an Waldbesitzern dem Aufruf der FVA und der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz zur Bereitstellung von Daten für das Projekt gefolgt. Leider konnten aus Kapazitätsgründen hier nur eine Auswahl von Realbetrieben bearbeitet werden (s. Modul 5). Wir hoffen jedoch dem großen Interesse in folgenden Forschungs- und Transferprojekten nachkommen zu können.

5 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Ob eine Baumart für einen bestimmten Standort geeignet ist, hängt aus naturaler Sicht unter anderem von ihrer Produktivität und ihrem Mortalitätsrisiko ab. Beide Aspekte werden sowohl durch eine Veränderung der mittleren klimatischen Verhältnisse als auch durch ein verstärktes Auftreten von Extremereignissen im Zuge des Klimawandels beeinflusst (für Produktivität: z.B. Spiecker 1999, Pretzsch et al. 2014; für Mortalität: z.B. van Mantgem et al. 2009, Allen et al. 2010, Seidl et al. 2011, Seidl et al. 2017). Bei sessilen und langlebigen Organismen wie Bäumen müssen diese zukünftigen Auswirkungen bereits heute in Waldbewirtschaftungsplänen berücksichtigt werden. Die Modellierung und Vorhersage des Mortalitätsrisikos rückt daher in der Diskussion um die Anpassung der Wälder an den Klimawandel immer mehr in den Fokus.

Eine häufig verwendete statistische Methoden zur Modellierung der Mortalität ist die Überlebenszeitanalyse (Staupendahl 2011; Staupendahl und Zucchini 2011; Neuner et al. 2015; Neumann et al. 2017). Die Überlebenszeitanalyse kann angewendet werden, wenn die interessierende Variable die Zeit bis zu einem definierten Ereignis ist (z. B. Tod des Baums). Überlebenszeitanalysen können sowohl mit Fällen umgehen, die aus unbekannter Ursache aus dem Datenkollektiv ausscheiden oder am Ende der Beobachtung noch leben („rechts-zensiert“) als auch mit Fällen, die erst ab einem bestimmten Alter in die Beobachtung aufgenommen werden („links-trunkiert“).

Es gibt zwei Gruppen von Überlebenszeitmodellen, die semi-parametrischen – dazu gehört bspw. das Cox-Modell (Cox 1972) -und die parametrischen Modelle. Erstgenannte haben über die Zeit ein konstantes Basisrisiko, während bei zweitgenannten der Überlebenszeit eine Verteilung zugrunde gelegt wird (Mills 2011). Innerhalb der parametrischen Modelle gibt es Proportional Hazard- (PH-Modelle) und Accelerated Failure Time Modelle (AFT-Modelle). Der Vorteil von AFT-Modellen gegenüber PH-Modellen ist, dass der Effekt der Prädiktoren in absoluten Zahlen (bspw. ein Jahr) geschätzt wird und nicht relativ (Mills 2011). Die Validierung von Überlebenszeitmodellen ist im Gegensatz zu logistischen Regressionen schwieriger, da zensierte Daten den Prozess erschweren (Campbell et al. 2010; Royston und Altman 2013). Eine weitere Hürde stellen dabei links-trunkierte und/ oder intervall-zensierte Daten dar.

Die Überlebenszeitanalyse wurde bereits erfolgreich in der forstlichen Forschung angewendet (z.B. (Nothdurft 2013; Neuner et al. 2015; Neumann et al. 2017; Staupendahl und Möhring 2011; Staupendahl und Zucchini 2011; Staupendahl 2011). Allerdings war bisher entweder die Datengrundlage geographisch eingeschränkt (z.B. Nothdurft 2013; Neuner et al. 2015) oder Modelle wurden nicht artspezifisch angepasst (Neumann et al. 2017). Weite Klimagradienten im Lerndatensatz der Modelle sind jedoch unabdingbar um diese auf zukünftige Klimaszenarien anwenden zu können. Da Baumarten sich in ihrer Ökologie und damit auch im Mortalitätsrisiko unterscheiden, ist es überdies sinnvoll, Modelle artspezifisch anzupassen.

Klimawandelbedingte Änderungen der Mortalitätsrisiken beeinflussen nicht nur die Waldstruktur und das Potenzial der Kohlenstoffspeicherung. Für Forstbetriebe können diese Veränderungen schwerwiegende ökonomische Folgen haben. Frühzeitige Zwangsernte, niedrigere Holzqualität und damit verringerte Holzpreise führen zu Mindererträgen, während insbesondere im Fall von Kalamitäten auch Mehrkosten durch komplexere Ernteverfahren und unfallträchtigere Holzerntebedingungen zu erwarten sind (Möllmann und Möhring 2017; Holthausen et al. 2004). Die offene Frage ist, wie diese finanziellen Konsequenzen möglichst reduziert und vermieden werden können. Im Wesentlichen werden hierzu drei Strategien diskutiert (Bolte et al. 2009): Erstens der Anbau von Mischbeständen (Griess et al. 2012; Knoke 2008), zweitens die Verkürzung der Umtriebszeit (Möllmann und Möhring 2017), bzw. Anpassung des Einschlagszeitpunktes und drittens ein ungleichaltriger Bestandes- und/oder Betriebsaufbau zur Diversifikation der finanziellen Erträge in Raum und Zeit (Messerer et al. 2017; Roessiger et al. 2011). Bisher gibt es jedoch wenige Studien, die klimabedingte Änderungen in den Überlebenswahrscheinlichkeiten, waldbauliche Managementstrategien und eine volatile Marktsituation methodisch so verknüpfen, dass Rückschlüsse auf die Auswirkungen hinsichtlich der Ertrags- als auch Risikosituation von Forstbetrieben möglich werden.

Für die Definition des Begriffs des ökonomischen „Risikos“ wird im Rahmen dieses Projektes auf die Definition aus der Finanzwissenschaft zurückgegriffen. Das Risiko ist hierbei die Standardabweichung um den erwarteten Mittelwert der ökonomischen Kennzahl (Markowitz und Blay 2014)

(wie z.B. dem Deckungsbeitrag oder der Annuität). Diese Standardabweichung kann aus einer großen Zahl zufälliger, simulierter Szenarien ermittelt werden. Diese Szenarien können dann z.B. stochastische Ausfallwahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Baumarten integrieren (Knoke und Seifert 2008; Griess und Knoke 2013; Hanewinkel et al. 2011). Werden auch die Korrelationen der finanziellen Erträge zwischen den Baumarten(z.B. durch Holzpreisschwankungen) oder Beständen auf Betriebsebene berücksichtigt, kann analog zu anderen Anlagen die Portfoliotheorie (Markowitz 1952; Markowitz und Blay 2014) angewendet werden, um die optimale Mischung aus Baumarten oder Bestandestypen zu ermitteln, welche den Ertrag für ein bestimmtes Risikoniveau optimiert (Knoke und Seifert 2008). Auf Basis dieser Methodik zeigten u.a. Knoke und Seifert (2008) und Neuner und Knoke (2017) die ökonomische Vorteilhaftigkeit von Mischbeständen. Auf Betriebsebene konnten z.B. Härtl et al. (2016) zeigen, dass eine Streuung des Einschlags über mehrere Planungsperioden finanzielle Auswirkungen des Klimawandels reduzieren konnte.

Diese Studien konnten jedoch bisher nicht auf großräumigere Quantifizierungen der Überlebenswahrscheinlichkeiten für die Hauptbaumarten unter Berücksichtigung von Mischungs- und Klimaeffekten zurückgreifen. Dieses Projekt schließt diese Lücke und erarbeitete neue Methoden zur Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels auf Risiko und Ertrag von Forstbetrieben. Diese Methoden sind Grundlage für die evidenz-basierte Erarbeitung effizienter Anpassungsstrategien an den Klimawandel.

II) Entwickelte Methoden und erzielte Ergebnisse

1 Überlebenszeitmodellierung der Hauptbaumarten (Modul 1)

Aufgabe von Modul 1 war es, basierend auf einem europaweiten Datensatz Überlebenszeitmodelle für die häufigsten Baumarten in Mitteleuropa zu entwickeln: Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Tanne (*Abies alba* Mill.), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco), Buche (*Fagus sylvatica* L.), Traubeneiche (*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.) und Stieleiche (*Quercus robur* L.). Die Modelle sollten eine Vorhersage des Mortalitätsrisikos in Abhängigkeit von Alter, Klima und Baumartenmischung ermöglichen. Damit kann in betriebswirtschaftlichen Szenariorechnungen der Einfluss von Klimabedingungen, Umtriebszeit und Mischung auf das ökonomische Risiko untersucht werden.

1.1 Datengrundlagen und Methoden

Daten

Für die Kalibrierung der Modelle wurden die Daten der Waldzustandserhebung (WZE) in Deutschland (bereitgestellt vom Thünen-Institut für Waldökosysteme) mit den europaweiten Daten des Level I (systematisches 16 × 16 km-Raster) und Level II (Intensiv-Beobachtungsflächen) Netzwerks (bereitgestellt von ICP Forests) kombiniert. In allen drei Inventuren werden Einzelbäume regelmäßig, meist jährlich, aufgenommen. U.a. werden dabei die für die Überlebenszeitanalyse

wichtigen Angaben, wie Alter bzw. Altersklasse, Ausfallursache und soziale Stellung erhoben. In Modul 1 wurden die Ausfallursachen in acht Kategorien zusammengefasst: "reguläre Nutzung", "Windwurf", "tot stehend", "tot liegend", "biotisch", "abiotisch", "Bruch" und "unbekannte Ursache". Abgesehen von den Ausfallursachen „reguläre Nutzung“ und „unbekannte Ursache“ wurden alle genannten Ursachen als Mortalitätsereignisse gewertet. Da die Ausfallursache im Level-I-Datensatz erst seit 2011 dokumentiert wird, ging für diesen Datensatz nur der Beobachtungszeitraum von 2010 bis 2017 in die Analyse ein. WZE-Daten wurden ab 1994 verwendet. Stieleiche und Traubeneiche wurden für die Modellierung zusammengefasst.

Es wurden die Klimadaten von WordClim (Version 2.0) verwendet, die das Untersuchungsgebiet mit einer Auflösung von 30 Bogensekunden (ca. 1 km) abdecken (Fick und Hijmans 2017). Das gegenwärtige Klima wurde mit 30-jährigen Mittelwerten der Periode 1970-2000 beschrieben. Als zusätzliche erklärende Variable wurde der Stammzahlanteil der jeweiligen Baumart auf dem Inventurpunkt berechnet.

Methoden

Es wurden parametrische Accelerated Failure Time-Modelle (AFT) angepasst. Bei AFT-Modellen wird für die Überlebenszeiten eine bestimmte Verteilung, z.B. Weibull- oder Log-Normalverteilung, angenommen. Kovariablen wirken sich multiplikativ auf die Überlebenszeiten aus. Die Links-Trunkierung der Daten (Bäume werden nicht ab dem Alter 0 beobachtet) wurde bei der Analyse berücksichtigt. Es wurde ein Startalter von 20 Jahren festgelegt, da sehr junge Bäume in den Daten unterrepräsentiert sind, was zu unrealistischen Überlebenswahrscheinlichkeiten in diesem Alter führen könnte (Moore 2016). Die Variablenselektion erfolgte über die Vorhersagegüte anhand des brier score (Gerds und Schumacher 2006).

Bei der statistischen Modellierung und Wahl der Methoden wurden die Zuwendungsempfänger vom Statistischen Beratungslabor der Ludwig-Maximilians-Universität München beraten und sowohl bei der Programmierung als auch bei der Interpretation der Ergebnisse unterstützt. Die Plausibilisierung der Ergebnisse erfolgte in Zusammenarbeit mit Modul 2, die Anwendung in den Modulen 3, 4 und 5.

1.2 Ergebnisse

Mit Ausnahme der Kiefer wurde für alle Arten ein AFT-Modell mit einer Weibull-Verteilung der Überlebenszeiten angepasst. Für die Kiefer ergab die Log-Normalverteilung eine deutlich bessere Anpassung. Alle Kovariablen gingen als lineare Effekte in die Modelle ein. Aus Tabelle 1 lässt sich für jede Art entnehmen, welche Kovariablen ausgewählt wurden und welchen Effekt sie auf die Überlebenswahrscheinlichkeit haben. Ein positiver Koeffizient bedeutet, dass sich die Überlebenswahrscheinlichkeit verringert, wenn sich die Kovariable erhöht. Ein negativer Koeffizient bedeutet, dass sich die Überlebenswahrscheinlichkeit bei Zunahme der Kovariable erhöht. Daneben

sind Form- und Skalenparameter der Weibull- bzw. Log-Normalverteilung angegeben. Weiterhin ist die Überlebenswahrscheinlichkeit im Alter 100 (S_{100}) angegeben, wenn alle Kovariablen auf ihre Mittelwerte gesetzt sind.

Tabelle 3: Detaillierte Modellergebnisse für jede Art. Ein Koeffizient > 0 führt zu einer Verkürzung der Überlebenszeit und wirkt sich somit negativ auf die Überlebenswahrscheinlichkeit aus. Ein Koeffizient <0 führt zu einer Verlängerung der Überlebenszeit und erhöht somit die Überlebenswahrscheinlichkeit. α ist der Formparameter und β der Skalenparameter der Weibull-Verteilung. ln.shape ist der Formparameter und ln.scale ist der Skalenparameter der Log-Normalverteilung. S_{100} entspricht der durchschnittlichen Überlebenswahrscheinlichkeit im Alter 100. T_wq = mittlere Temperatur im wärmsten Quartal, Tmax_wm = Maximum-Temperatur des wärmsten Monats, Tmin_cm = Minimum-Temperatur des kältesten Monats, P_yr = Jahresniederschlag, P_wq = Niederschlagssumme im wärmsten Quartal.

Kovariable	**Koeffizient**	**S_{100}**
Fichte		0.57
Tmax_wm	0.058	
P_wq	-0.0002	
Fichtenanteil	0.653	
ln(α)	0.257	
ln(β)	6.409	
Kiefer		0.73
Tmax_wm	0.077	
P_wq	-0.002	
ln.shape	-0.582	
ln.scale	6.525	
Tanne		0.82
T_yr	0.059	
ln(α)	0.240	
ln(β)	6.084	
Douglasie		0.71
T_yr	0.188	
P_yr	-0.001	
Douglasienanteil	0.671	
ln(α)	0.055	
ln(β)	6.738	
Buche		0.80
Tmax_wm	0.102	
Tmin_cm	-0.053	
Buchenanteil	0.678	
ln(α)	0.103	
ln(β)	8.580	
Eiche		0.77
Tmax_wm	0.095	
ln(α)	0.057	
ln(β)	7.686	

Bei allen Arten nimmt die Überlebenswahrscheinlichkeit mit steigender Temperatur ab (Fichte (Abbildung 1), Kiefer, Buche und Eiche: Maximum-Temperatur des wärmsten Monats; Douglasie und Tanne: Jahresmitteltemperatur). Die Vulnerabilität steigt mit zunehmenden Temperaturen, da diese sowohl den Wasserstress als auch die Atmungskosten für den Baum erhöhen (Allen et al.

2015). Weiterhin erhöhen wärmere Temperaturen das Mortalitätsrisiko indirekt durch Auswirkungen auf Schädlinge und Krankheitserreger (z.B. Weed et al. 2013; Bigler et al. 2006; Raffa et al. 2008).

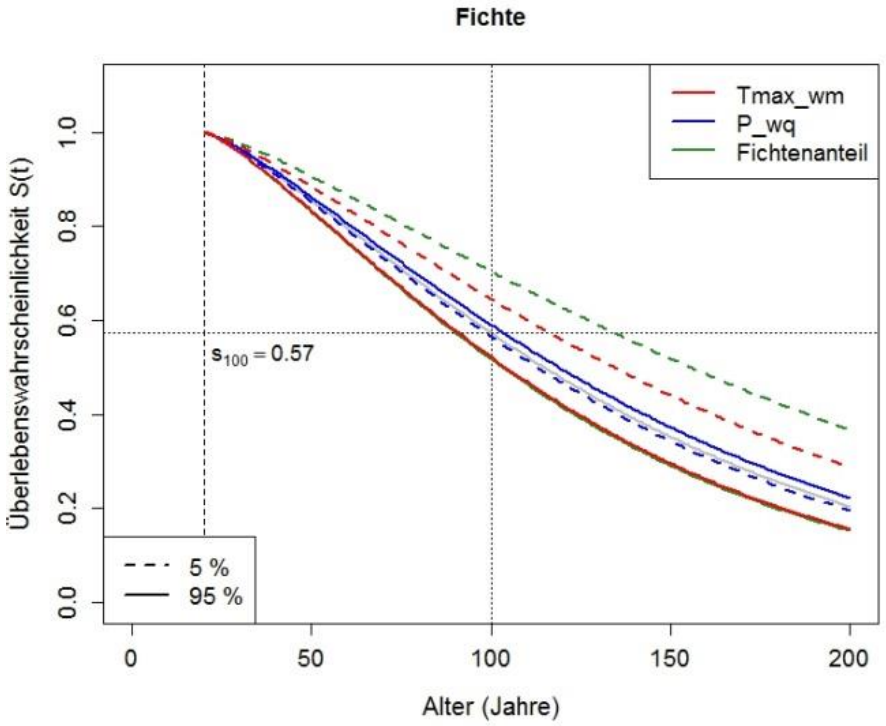


Abbildung 2: Beispielhaft sind hier die Ergebnisse des AFT-Modells für die Fichte dargestellt: Für jede ausgewählte Kovariable werden die Überlebenswahrscheinlichkeiten dargestellt, indem die entsprechende Kovariable auf das 5% - bzw. 95% - ihres Wertebereichs gesetzt wird, während die verbleibenden Kovariablen auf ihre Mittelwerte fixiert werden; Tmax_wm = Maximum-Temperatur des wärmsten Monats, P_wq = Niederschlagssumme im wärmsten Quartal. Z.B. beim 95%-Quantil von Tmax_wm sinkt die Überlebenswahrscheinlichkeit (durchgezogene rote Kurve).

Neben warmen Sommertemperaturen wirken sich kalte Wintertemperaturen (Minimum-Temperatur des kältesten Monats) negativ auf das Überleben der Buche aus. Eine mögliche Interpretation könnte sein, dass starker Frost Schäden verursacht (Hofmann et al. 2015). Die Auswirkung der Sommertemperatur auf die Überlebenszeit ist jedoch ungefähr doppelt so hoch wie die Auswirkung der Wintertemperatur und wirkt sich damit stärker auf Vorhersagen für zukünftige Klimaszenarien aus.

Für Fichte, Kiefer und Douglasie wirken sich abnehmende Niederschläge negativ auf die Überlebenswahrscheinlichkeit aus. Niedrige Niederschläge in Kombination mit wärmeren Temperaturen können die Kohlenstoffbilanz und den Wasserverbrauch der Bäume negativ beeinflussen (Allen et al. 2015) und somit die Anfälligkeit erhöhen.

Somit wirken warme und teilweise auch trockene mittlere Klimabedingungen als schwächende Faktoren (Manion 1981), indem sie die Vitalität und das Verteidigungspotential des Baumes verringern und ihn so anfälliger für auslösende und beitragende Faktoren machen. Zudem korrelieren wärmere mittlere Temperaturen mit der Häufigkeit und Intensität von Dürreereignissen (Allen et

al. 2015). Daher umfasst der modellierte Effekt der Temperatur möglicherweise auch Effekte von Dürre und Hitzestress.

Mischung hat einen stark positiven Einfluss auf das Überleben von Fichte und Douglasie. Auch für die Buche wurde der Buchenanteil als erklärende Variable mit aufgenommen. Ein positiver Effekt von Baumartenmischung auf das Überleben wurde auch von Neuner et al. (2015) und Griess et al. (2012) gefunden.

Das durchschnittliche Risiko steigt für Fichte (α = 1,29) und Tanne (α = 1,27) mit dem Alter an, während es für Buche nur geringfügig zunimmt (α = 1,11) und für Douglasie und Eiche mehr oder weniger altersunabhängig ist (α = 1,06). Für Kiefer steigt das Risiko zunächst mit zunehmendem Alter und sinkt dann wieder.

Einzelbaum-Überlebenswahrscheinlichkeiten sind für die Fichte am niedrigsten und für Tanne und Buche am höchsten, wenn alle Prädiktoren auf ihre Mittelwerte gesetzt werden. Die Überlebenswahrscheinlichkeiten sind im Vergleich zur Studie von Neuner et al. (2015) niedrig, stimmen jedoch mit den Ergebnissen von Schoneberg (2017) überein. Die Unterschiede in der Höhe der Überlebenswahrscheinlichkeiten ergeben sich aus der Berücksichtigung der Links-Trunkierung in unserer Studie. Bei der Interpretation muss berücksichtigt werden, dass Einzelbaum-Überlebenswahrscheinlichkeiten modelliert wurden, die nicht eins zu eins auf den Bestand übertragen werden können. In vielen Fällen kann der Verlust eines einzelnen Baumes durch ein verstärktes Wachstum der umgebenden Bäume ausgeglichen werden, die bald die Lücke füllen (Schoneberg 2017).

Es ist wichtig anzumerken, dass für alle Arten die Konfidenzintervalle der geschätzten Koeffizienten weit sind, d. h. Vorhersagen beinhalten eine hohe Unsicherheit. Dies liegt zum einen an Unsicherheiten in den zugrundeliegenden Daten als auch an der Komplexität und der stochastischen Natur der Baummortalität. Die Ergebnisse der Überlebenszeitmodellierung sind in Brandl et al. (2020) umfassend dargestellt

1.3 Schlussfolgerung

Die vorliegende Studie ist die erste, die mithilfe eines transnationalen Datensatzes parametrische artspezifische Überlebenszeitmodelle erstellt. Basierend auf europaweiten Daten wurden Modelle für die häufigsten Baumarten in Mitteleuropa entwickelt: Fichte, Kiefer, Tanne, Douglasie, Buche und Eiche. Die Modelle ermöglichen es den Einfluss von Klima, Mischung und Umtriebszeit auf das Mortalitätsrisiko abzuschätzen. Die geschätzten Überlebenskurven können leicht in ökonomische Berechnungen integriert werden.

2 Evaluierung der Überlebenszeitmodellierung an Hand von Versuchsflächen (Modul 2)

Im Projekt SURVIVAL-KW hatte das Modul II die Aufgabe, die in Modul 1 entwickelten AFT-Modelle mittels externer Daten zu evaluieren. Konkret wurde der Frage nachgegangen, in wie weit

die Modellstruktur plausibel ist und ob die entwickelten Modelle die angestrebten Effekte abbilden. Dabei wird für die Modellevaluierung auf den räumlich und zeitlich sehr umfangreichen waldwachstumskundlichen Versuchsflächendatensatz der Forstlichen Versuchsanstalt Baden-Württemberg zurückgegriffen.

2.1 Datengrundlage und Methoden

Der Evaluierungsdatensatz

Die Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg (FVA) installierte ab dem Jahre 1872 zur Beantwortung waldwachstumskundlicher Fragestellungen Dauerbeobachtungsflächen, von denen ein Teil bis heute betreut und erweitert wird. Innerhalb der Versuchsflächen liegen systematisch angeordnete Versuchsfelder auf denen das Waldwachstum in Abhängigkeit unterschiedlicher waldbaulicher Maßnahmen beobachtet wird. Dazu werden in einem Rhythmus von ca. 5 Jahren Einzelbaumaufnahmen durchgeführt, bei denen neben baumspezifischen Kenngrößen auch der Ausscheidegrund notiert wird. Entsprechend des Datensatzes für die Modellentwicklung (Entwicklungsdatensatz der LWF) wurden die Ausscheidegründe zufällige Nutzung, Sturm, Insektenkalamitäten, Pilzbefall, Schnee- oder Eisbruch und Dürrständer im Evaluierungsdatensatz als Mortalitätsereignis gewertet. Planmäßige Entnahmen und Pflegeunfälle hingegen wurden als zensiert gewertet. Der Evaluierungsdatensatz wurde zeitlich auf den Entwicklungsdatensatz angepasst und umfasst die Periode von 1994 bis 2014. Damit umfasst der Evaluierungsdatensatz 147.741 Bäume mit einer Ausfallrate von 8,7%.

Zur Ermittlung möglicher Einflüsse auf die veränderte Lebenszeitwahrscheinlichkeit von Baumarten in Rein- und Mischbeständen wurden insbesondere Klima-, Standort- und waldbauliche Behandlungsparameter zusammengestellt. Klimaparameter basieren auf WorldClim-Daten (1950–2010, Fick und Hijmans 2017), sprich auf den 30-jährigen Mittelwerten mit einer räumlichen Auflösung von 30 Sekunden. Entsprechend der Modellentwicklung wurden für die Modellevaluierung Jahresniederschlagssummen, Jahresdurchschnittstemperaturen, durchschnittliche Jahresminimum- und Maximumtemperaturen, durchschnittliche Temperaturen des kältesten Quartals, durchschnittliche Niederschlagssummen des wärmsten Quartals zusammengestellt. Um zu erörtern, ob andere, nicht im Modell implementierte Prädiktoren einen Einfluss auf die Überlebenszeitwahrscheinlichkeit haben, wurden zusätzlich Standort- (Topographie, Bodenkennwerte) und waldbauliche Behandlungsparameter (relative entnommene Grundfläche, Mittelwert der Durchmesser von entnommenen Bäumen / Mittelwert der Durchmesser aller Bäume vor der Durchforstung) für die waldwachstumskundlichen Versuchsflächen berechnet.

2.2 Ergebnisse

Vergleich der Datenstruktur

Ein Vergleich der Datengrundlage zwischen Entwicklungs- und Evaluierungsdatensatzes ist unablässig (Rahman et al. 2017). Es zeigt sich, dass die Ausfallraten für Buche und Kiefer in beiden Datensätzen annähern gleich sind. Höhere Ausfallraten auf den waldwachstumskundlichen Versuchsflächen (Versfl. BW) wurden für die Fichte (1/3 höher), Tanne (2-fach höher) und Douglasie (3-fach höher) beobachtet. Die Eiche zeigte höhere Ausfallraten auf den Level I&II Flächen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Datenstruktur des Entwicklungsdatensatzes basierend auf Level I&II –Flächen und des Evaluierungsdatensatzes (Datengrundlage sind die Versuchsflächen Baden-Württembergs).

	Evaluierungsdatensatz				Entwicklungsdatensatz			
Baumarten	N	N_{tot}	$Anteil_{tot}$ [%]	Ø Alter [±SE]	N	N_{tot}	$Anteil_{tot}$ [%]	Ø Alter [±SE]
Buche	13.536	406	3	95,05[0,33]	31564	837	3	80[0,21]
Fichte	59.891	6075	10,1	62,35[0,13]	77.739	4710	6	67[0,12]
Kiefer	10.994	396	3,6	53,32[0,27]	74.610	2008	2,6	84[0,1]
Tanne	12.784	788	6,1	93,49[0,33]	5759	158	2.5	109[0,5]
Douglasie	44.564	5496	12,3	40,41[0,07]	2166	95	4,4	49[0,5]
Eiche	5972	71	1,18	44,41[0,63]	21.489	706	3,2	94[0,15]

Vergleich der Ausscheidegründe

Abbildung 3 zeigt die Ausscheidegründe je Baumart für die Level I&II Daten und den Versfl.-Daten BW im Vergleich. Ersichtlich ist, dass der Anteil durch Schneebruch geschädigter Bäume auf den Versfl. BW deutlich höher ist als auf Level I&II Flächen. Entgegengesetzt verhält es sich bei Dürrständern und biotischen Stressoren, die auf Level I&II Flächen überwiegen.

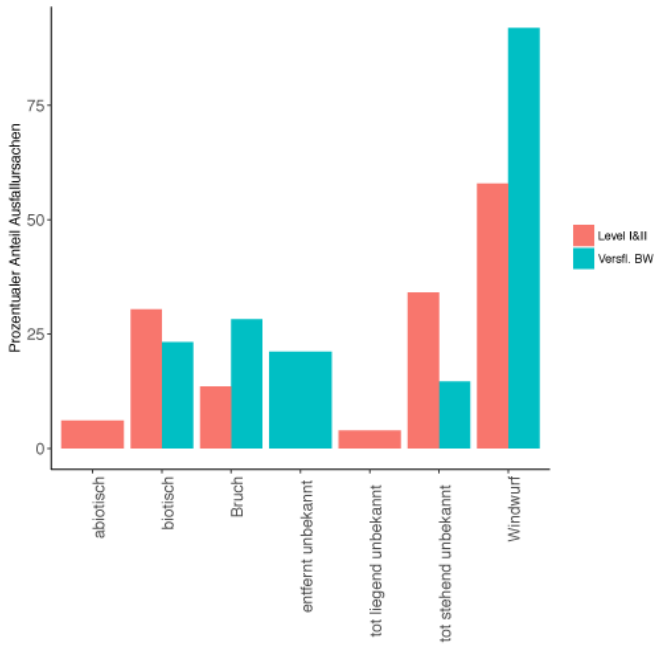


Abbildung 3: Prozentualer Anteil der unterschiedlichen Ausscheidegründe für Level I&II sowie Versuchsflächen Baden-Württemberg.

Vergleich beobachteter Überlebenszeitwahrscheinlichkeiten

Wie Abbildung 4 zeigt, unterscheiden sich die beobachteten Überlebenszeitwahrscheinlichkeiten (ÜZW) basierend auf dem Kaplan-Meier-Schätzer je nach Baumart beider Datensätze. Während die Unterschiede der ÜZW für die Fichte, Buche und Tanne gering sind, so differieren sie für die Douglasie, Kiefer und Eiche sehr stark, bei Kiefer und Eiche hauptsächlich in den frühen Lebensjahren. Bei der Douglasie ergibt sich kaum eine Übereinstimmung, wobei im Datensatz der Level I&II Flächen Douglasien nur bis zum Alter 69 Jahre erfasst sind. Für das Referenzalter 100 Jahre ergeben sich folgende Differenzen in der ÜZW:

- Fichte: 0,03
- Buche: 0,04
- Tanne: 0,08
- Kiefer: 0,12
- Eiche: 0,26
- Douglasie (im Alter 69 Jahre): 0,33

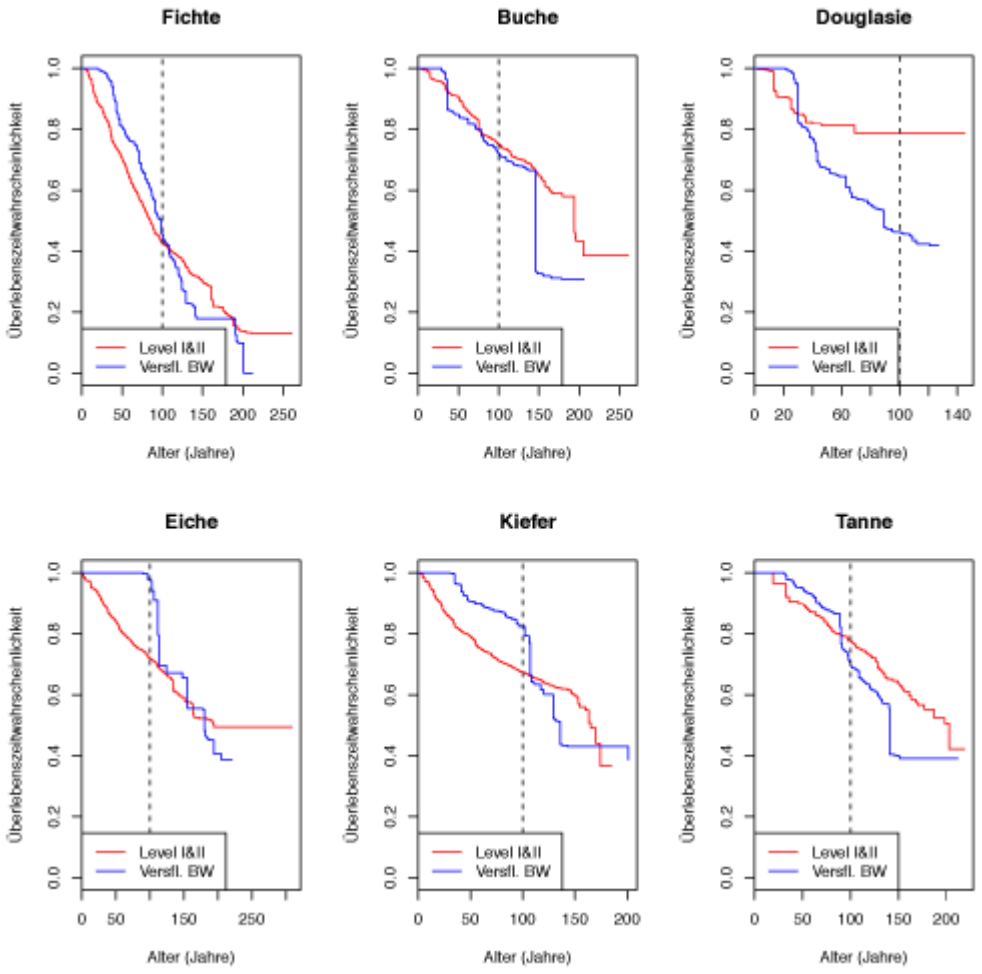


Abbildung 4: Überlebenszeitwahrscheinlichkeiten nach Kaplan-Meier für die zu evaluierenden Baumarten dargestellt für die jeweilige Baumart auf Level I&II sowie den Forstlichen Versuchsflächen Baden-Württembergs.

Überprüfung der Modellgüte

Die nachfolgenden Evaluierungspunkte werden exemplarisch für das Fichtenmodell (Stand der Modelle Dezember 2017) dargestellt. In einem ersten Schritt wurden die ÜZW für die Fichte auf den Versflächen BW mit dem in Modul I entwickelten Modell vorhergesagt. Wie Abbildung 5 zeigt, liegen die vorhergesagten ÜZW sehr nah an den beobachteten. Dies wird quantitativ durch einen niedrigen Root Mean Square Error (RMSE) von 0,13 bestätigt. Der RMSE ist ein Maß zur Beurteilung der Modellgüte und gibt an wie stark die Vorhersage im Durchschnitt von den tatsächlichen Beobachtungen abweicht. Berechnet wird der RMSE aus der Quadratwurzel des durchschnittlichen Prognosefehlers.

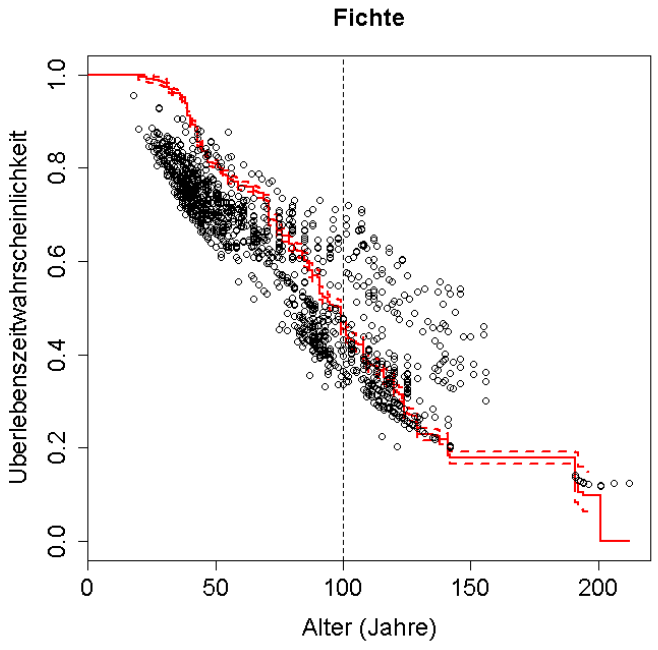


Abbildung 5: Beobachtete Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte auf BW-Versuchsflächen (rote Kaplan-Meier-Kurve) und die Vorhersagen basierend auf dem in Modul I entwickelten Modell (schwarze Punkte).

Überprüfen der Modellstruktur

Zeitliche Trends in den verwendeten Prädiktoren als Hinweis für die Implementierung zeitveränderlicher Variablen im Modell, wurden mittels Kaplan-Meier-Kurven überprüft. Da numerische Variablen nicht mit Kaplan-Meier-Kurven dargestellt werden können, wurden die Variablen am Median in zwei Bereiche getrennt. Wie Abbildung 6 zeigt, liegen keine zeitlichen Trends vor, mit Ausnahme der Niederschlagssumme des wärmsten Quartals in den Level I&II Daten und der Temperaturen des wärmsten Quartals im Evaluierungsdatensatz.

Der Fichtenanteil im Bestand hat keinen Einfluss auf die Überlebenszeitwahrscheinlichkeit in den Versflächen-BW (linke obere Teilgrafik), allerdings nimmt die ÜZW in den Level I & II Daten ab je höher der Fichtenanteil wird. Eine Veränderung des Einflusses über der Zeit ist nicht erkennbar (linke untere Teilgrafik).

Einen zeitlich veränderlichen Einfluss scheint hingegen die Niederschlagssumme des wärmsten Quartals auf Fichten in Level I & II Flächen zu haben (Abbildung 6, mittlere Teilgrafiken). Bis zum Alter 125 ist die Überlebenszeitwahrscheinlichkeit bei niedrigen Niederschlagsmengen geringer. Der umgekehrte Effekt ist ersichtlich im Altersspektrum zwischen 125 bis 200 Jahre.

In Abbildung 6 ist der Einfluss der Temperatur im wärmsten Quartal aufgetragen. Dieser Prädiktor hat auf die Überlebenszeitwahrscheinlichkeit der Fichten in den Level I & II Flächen keinen zeitlich veränderlichen Einfluss. Auf den Versflächen-BW scheinen jüngere Fichten (Alter < 75 Jahre) höhere Temperaturen im wärmsten Quartal besser zu ertragen als ältere Bestände.

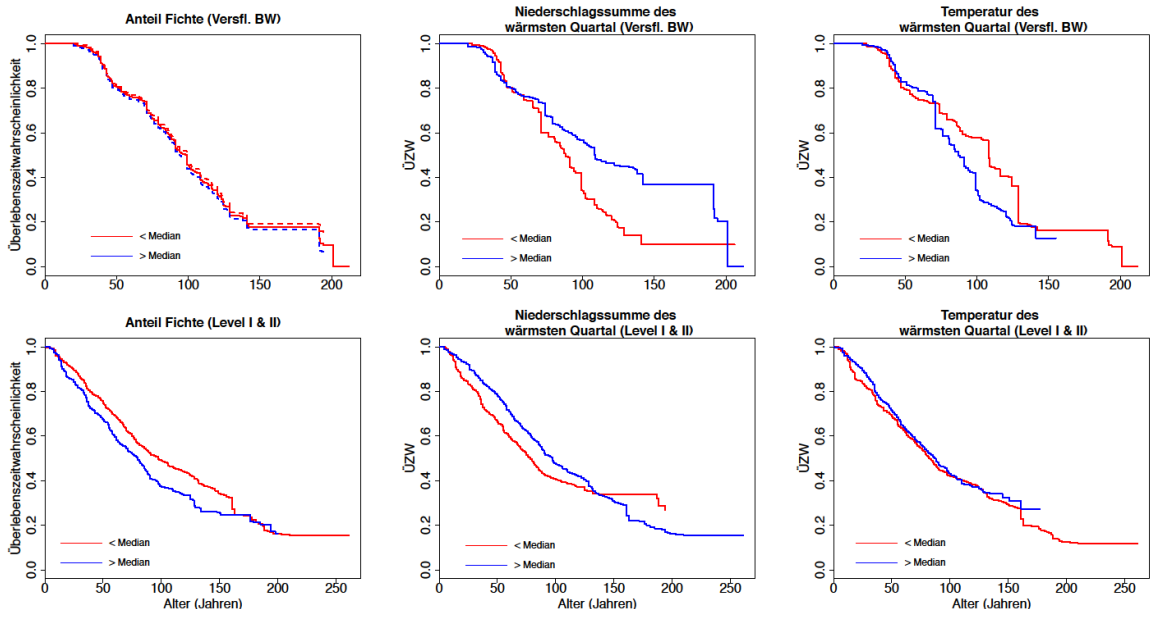


Abbildung 6: Vergleich der Überlebenszeitwahrscheinlichkeiten (ÜZW) dargestellt als Kaplan-Meier Schätzer für die zu evaluierenden Variablen (Anteil der Fichte, Niederschlagssumme und Temperatur des wärmsten Quartals) zwischen den Versuchsflächen Baden-Württembergs und den Level I&II Daten.

Vorhersagegenauigkeit

Zur Überprüfung der Vorhersagegenauigkeit (Richtung und Einflussgröße der Prädiktoren) wurden zwei Modelle mit standardisierten Variablen unter Verwendung des Evaluierungs- und Entwicklungsdatensatzes berechnet. Die Ergebnisse dargestellt in Tabelle 5 zeigen die gleiche Einflussrichtung für die Variablen (i) Fichtenanteil im Bestand (Pabie.ant) und (ii) Niederschlagssumme des wärmsten Quartals (Psum.wq). In Bezug auf die durchschnittliche Temperatur des wärmsten Quartals (Tmn.wq) ist ein konträrer Effekt erkennbar. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Variable als zeitveränderliche Größe im Modell verwendet werden sollte.

Tabelle 5: Vergleich der Einflussstärke und Richtung der Prädiktoren basierend auf AFT-Modellen mit standardisierten Werten. Die Koeffizienten wurden exponenziert; Werte > 1 zeigen eine Verkürzung der Überlebenszeitwahrscheinlichkeit an, Werte < 1 das Gegenteilige. Abkürzungen: Pabies.ant = Fichtenanteil im Bestand, Psum.wq: Niederschlagssummen im wärmsten Quartal, Tmn.wq: durchschnittliche Temperaturen im wärmsten Quartal (Daten basieren auf WorldClim; [12]).

	Modell Level I&II	Modell Versfl. BW
Variable	Exp(Coef)	Exp(Coef)
Pabie.ant	0,84	0,98
Psum.wq	1,037	1,165
Tmn.wq	0,898	1,172

2.3 Schlussfolgerung

Mittels einfacher Methoden wurde gezeigt, wie eine Modellevaluierung von AFT-Modellen mittels externer Daten erfolgen kann. Das Feld der Evaluierung von AFT-Modellen ist aufgrund fehlender statistischer Methoden jedoch noch nicht ausreichend erschlossen. In der Risikomodellierung mit

binären Antwortvariablen gibt es ausreichend etablierte Konzepte für die Modellevaluierung (Bennett et al. 2015). Sie basiert auf der Analyse der generellen Performance (Distanz zwischen beobachteten und modellierten Werten), der Diskriminanz (Fähigkeit Objekte mit hohem/ niedrigem Risiko zu unterscheiden) und der Kalibrierung (Übereinstimmung modellierter und beobachteter Ereignisse) (Steyerberg 2019). Die Evaluierung von Überlebenszeitmodellen ist hingegen schwieriger, da zensierte Daten den Prozess erschweren (Hülsmann et al. 2016; Royston und Altman 2013). Eine weitere Hürde stellen dabei links-trunkierte und/ oder intervalls-zensierte Daten dar (Broström 2015). Da Überlebenszeitmodelle durch ihre zensierte Datenstruktur einen Ansatz mit hoher Flexibilität in der Risikomodellierung von Baumarten bilden, ist es unabdingbar statistische Methoden zur Modellevaluierung weiter zu entwickeln.

Das exemplarisch evaluierte Modell für die Fichte lieferte bei Anwendung auf einen externen Datensatz generell gute Modellperformanz und realistische Größenordnungen bei der Vorhersage von Mortalitätsereignissen. Mithilfe der zahlreichen Evaluierungsschritte wurden jedoch auch Defizite ersichtlich. So sollten verlässliche Mortalitätsmodelle in Zukunft beispielsweise zeitveränderliche Kovariablen wie z. B. sich ändernde Witterungs- und Klimabedingungen berücksichtigen (Maringer und Albrecht 2019).

3 Projektion der Überlebenswahrscheinlichkeit auf die Traktecken der BWI³ (Modul 3)

Zentrale Forschungsfragen des Moduls waren: Wie verändert sich die Mortalität wichtiger Waldbaumarten im Klimawandel? Wie unterscheiden sich dabei die Baumarten? Gibt es regionale Unterschiede? Welche Auswirkungen hat dies auf die Entwicklung zukünftiger Holzvorräte? Um diese Fragen auf Bundesebene zu ergründen wurden Überlebensmodelle deutschlandweit auf Stichprobenpunkte angewandt. Für die bundesweite Auswertung der Überlebenswahrscheinlichkeiten in diesem und den nachfolgenden Modulen, wurden aus den Stichprobenpunkten der BWI³ Modell-Bestände und –Betriebe generiert. Mit den Survival-Modellen aus Modul 1 wurde die Überlebensrate für die Gegenwart (2000) und die Zukunft (2050, 2070) an diesen Beständen projiziert.

3.1 Datengrundlage und Methoden

Generieren von Modell-Beständen und -Betrieben:

Zu jedem Stichprobenpunkt (Traktecke) der Bundeswaldinventur (im Folgenden Bestand bezeichnet) wurden die Bäume der Hauptbestandesschicht (inkl. Plenterwald) in sechs Baumartengruppen (Fichte, Buche, Kiefer, Eiche, Douglasie, Tanne) entsprechend der Modelle aus Modul 1 zusammengefasst und das Alter (Median) sowie der Mischungsanteil (Baumartenanteil nach Bestockungsgrad) pro Baumartengruppe abgeleitet. Die resultierenden Bestände wurden nach Wuchsgebiet und Eigentumsklasse in 316 Modell-Betriebe (Domains) eingruppiert. Unterschieden wurde zwischen 79 forstlichen Wuchsgebieten und 4 Eigentumsklassen (Staatswald/Körperschaftswald, Kommunalwald, Kleinprivatwald, Großprivatwald).

Berechnung der Überlebensraten:

Für jeden Bestand wurden bioklimatische Parameter anhand ihrer geographischen Lage aus einem globalen Klimadatensatz (WorldClim) abgeleitet (WorldClim 2018). Wie auch in Modul 1 zur Parametrisierung der Überlebensmodelle wurde der WorldClim Datensatz in Version 2.0 der Jahre 1970 bis 2000 für die Berechnungen aktueller Überlebensraten herangezogen. Da zukünftige Klimaprojektionen bis jetzt nur in der Version 1.4 vorliegen, wurden diese für die Jahre 2050 und 2070 aus den aktuellen Werten der Version 2.0 und den Veränderungen aus Version 1.4 (globales Klimamodell MPI-ESM-LR RCP8.5 für Zukunftsszenarien) abgeleitet.

Pro Baumartengruppe wurde für jeden Bestand mit dem entsprechenden Überlebensmodell aus Modul 1 und den relevanten Modellvariablen aus Bestandesalter, Baumartenanteil und Klimavariablen die Parameter der Weibullfunktion (Scale und Shape) sowie die Überlebensrate für die Gegenwart und Zukunft modelliert. Für die weitere Auswertung wurde eine Tabelle mit den Daten der Hauptbaumart pro Bestand generiert. Hauptbaumart ist jeweils die Baumart mit dem größten Bestockungsanteil. Bei gleichem Anteil, wurde als konservative Annahme die Baumart mit der geringeren Überlebenswahrscheinlichkeit im Alter 100 gewählt.

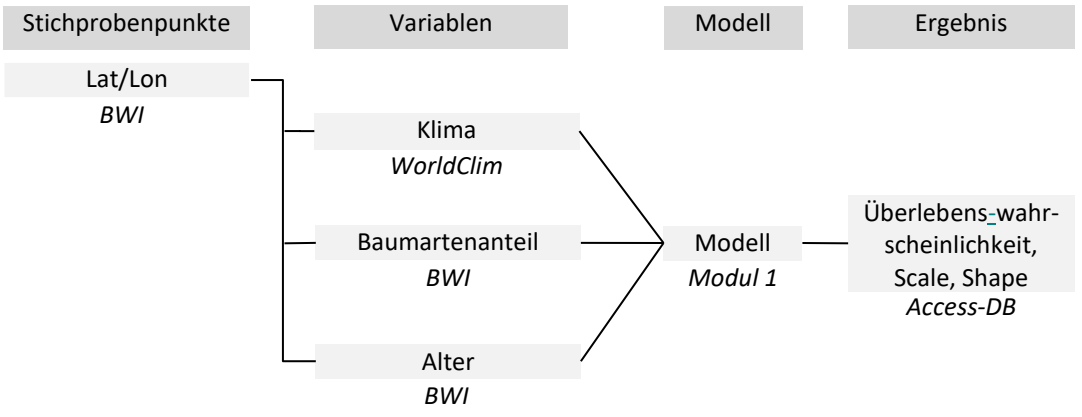


Abbildung 7: Survival-Modellierung der BWI-Daten

Wachstumssimulation für Modellbetriebe mit WEHAM

Die Fortschreibung der BWI-Daten über 40 Jahre wurde mit der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung (WEHAM) (Bösch 2016), einem empirischen abstandsunabhängigen Einzelbaumwuchsmodell umgesetzt. Das Modell basiert auf Daten der BWI und zeigt Zukunftsoptionen in Form von Projektionen auf. Dabei werden keine Risiken oder Umweltveränderungen berücksichtigt, außer jenen, welche indirekt bereits in den Daten der BWI enthalten sind. Für das Survival-Projekt wurden die Wachstumsdaten mit einem speziell angepassten Survival-Szenario fortgeschrieben. Dazu wurde im Zuwachsmodul von WEHAM eine 40-jährige Wachstumssimula-

tion pro Bestand umgesetzt. Das Management im Waldbehandlungsmodul wurde für alle Bestände gleich eingestellt, ohne eine weitere Unterscheidung nach Bundesländern oder Eigentumsarten. Neben der beginnenden Jungbestandspflege, fand für alle Baumarten eine Auslesedurchforstung mit Eingriffen und Datenausgabe in 5-Jahresperioden statt. Einzige Differenzierung war hierbei das baumartenabhängige Mindestalter (siehe Tabelle 6) für den Beginn der Auslesedurchforstung, angelehnt an Härtl (2015).

Tabelle 6: Baumartenabhängiges Mindestalter für den Beginn der Auslesedurchforstung aus Härtl (2015)

Baumart	Beginn der Auslesedurchforstung
Tanne	30
Fichte, Douglasie, Kiefer, Lärche	25
Buche, Eiche	30
Esche/Ahorn, Erle/Weide/Pappel	20

Entgegen der üblichen Funktionsweise von WEHAM fand keine Endnutzung statt, da die Entscheidung der Endnutzung im Betriebsoptimierer YAFO ("Yet Another Forest Optimizer") getroffen werden sollte (s. Modul 4 und 5). Nach der Simulation des Wachstums und der Auslesedurchforstungen erfolgte die Sortierung als über alle Betriebe hinweg gleiche einfache Mittenstärkensortierung. Eine weitere Adaption des bisher bekannten WEHAMs war es, die Sortierung nicht nur für entnommene Bäume durchzuführen, sondern auch auf den verbleibenden Bestand anzuwenden um eine Entscheidungsoptimierung im YAFO zu ermöglichen.

Aufbereitung der WEHAM-Daten für Modul 4

Mit WEHAM wurden Daten für 4 Eigentumsklassen (Staatswald, Kommunalwald, Privatwald >20 ha, Privatwald <= 20 ha) und 79 Wuchsgebiete erzeugt. Das ergibt 316 Modellbetriebe. Von den 82 Wuchsgebieten wurden folgende kleinere (fehlende Eigentumsklassen oder Holzbodenfläche unter 10 000 ha) zusammengefasst:

- 27 (Zittauer Gebirge) zu 28 (Oberlausitzer Bergland)
- 71 (Westricher Moorniederung) zu 70 (Saar-Nahe Bergland)
- 29 (Westlausitzer Platte und Elbtalzone) zu 30 (Elbsandsteingebirge)

Um die Menge an Daten verarbeiten zu können wurde eine Datenbank auf der Basis von Microsoft SQL Server eingerichtet, auf die YAFO zugreifen kann.

3.2 Ergebnisse

Auf Grundlage von BWI-Daten, Klimadaten und den Überlebensmodellen konnten bundesweit für 53.514 Bestände die Überlebenswahrscheinlichkeit sowie zugehörige Funktionsparameter (Scale und Shape Parameter) berechnet werden. Die Daten wurden zur weiteren Auswertung in eine Access-Datenbank integriert. Die berechnete mittlere Überlebensrate der Bestände für das Jahr

2000 reicht von 0,75 für die Baumartengruppe Fichte bis 0,9 bei der Douglasie (Tabelle 7). Die Überlebensrate liegt im Wertebereich von 0 bis 1 und bezeichnet die mittlere Überlebenswahrscheinlichkeit der Hauptbaumart eines Bestandes. Die Modelle sagen für alle Baumartengruppen in Zukunft eine Abnahme der Überlebensrate voraus. Bei gleichbleibenden (aktuellen) Bestandeseigenschaften und verändertem Klima reduziert sich die Überlebensrate zwischen den Jahren 2000 und 2050 im Mittel um 0,03 (Buche, Tanne) bis 0,05 (Fichte) und bis 2070 um weitere 0,01 (Buche, Tanne) bis 0,03 (Douglasie).

Tabelle 7 Aus den Daten der dritten Bundeswaldinventur generierte Bestände nach Baumartengruppe und deren mittleres Alter, Baumartenanteil, sowie modellierte Überlebensraten bei veränderten Klimabedingungen.

Baumartengruppe	Bestände	mittleres Alter	mittlerer Baumartenanteil	Überlebensrate 2000	2050	2070
Fichte	15225	68	0,80	0,75	0,70	0,68
Buche	13229	84	0,72	0,85	0,82	0,81
Kiefer	13115	74	0,82	0,8	0,76	0,73
Eiche	9274	84	0,69	0,83	0,79	0,76
Douglasie	1357	47	0,72	0,9	0,86	0,83
Tanne	1314	94	0,63	0,83	0,80	0,79

Unabhängig von den Bestandeseigenschaften variiert die Überlebensrate nicht nur zwischen den Baumarten, sondern auch regional zwischen den Wuchsgebieten (Abbildung 8). Im Süden Deutschlands ist die Abnahme der Überlebenswahrscheinlichkeit im Mittel stärker als im Norden, wobei die Unterschiede innerhalb der Wuchsgebiete auch besonders im Süden stark variieren. Die Fichte zeigt die stärkste Abnahme der Überlebensrate in ihren Hauptverbreitungsgebieten in Süddeutschland, während die Buche in Norddeutschland die geringsten Veränderungen aufweist.

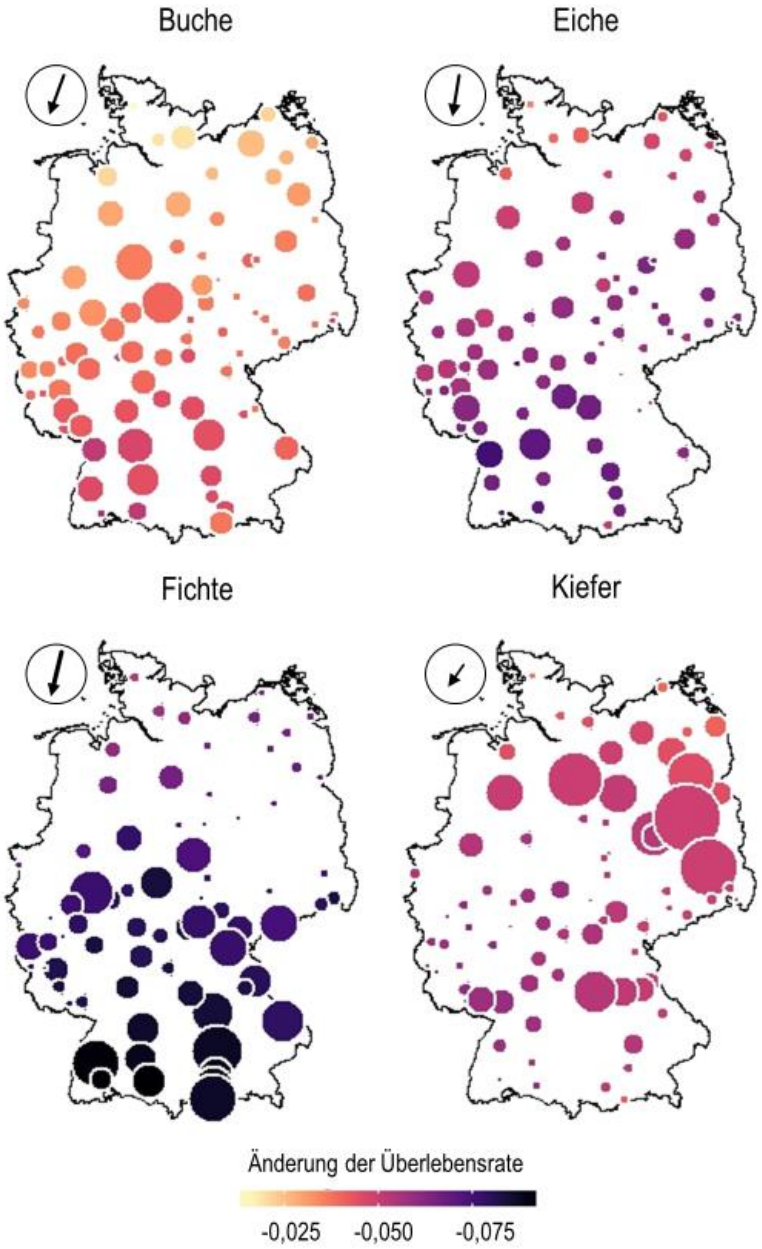


Abbildung 8: Änderung der Überlebensrate 100-jähriger Reinbestände von Buche, Eiche, Fichte und Kiefer zwischen den Jahren 2000 und 2050, gruppiert nach Wuchsgebieten und skaliert nach Bestandesvorkommen. Pfeile symbolisieren geographische Richtung und Intensität der Veränderung. (aus Bender et al. (2019)).

Survivalszenario

Durch die Auslagerung der Endnutzung in den Entscheidungsoptimierer YAFO sind die projizierten Werte des WEHAM Survivalszenarios nur bedingt vergleichbar. So steigt der Gesamtvorrat im Survivalszenario (Abbildung 9) von anfangs rund 3,66 Mrd. m³ in 2012 auf knapp über 5,07 Mrd. m³ in 2052. Dies ist verglichen mit dem Basisszenario (Abbildung 9) in dem der Gesamtvorrat

2052 3,87 Mrd. m³ beträgt, eine Erhöhung um 1,2 Mrd. m³ und spiegelt neben der vereinfachten Waldbehandlung mit gleichmäßigen Auslesedurchforstungen vor allem die in diesem Szenario ausgeschaltete Endnutzung wider. Zu beobachten ist eine Differenz der Nutzung zwischen Basis- und Survivalszenario vor allem bei den Hauptbaumarten Fichte, Kiefer und Buche. So sinkt die Nutzung, also der projizierte Vorrat des Rohholzpotenzials, am Beispiel der Fichte im Basis-Szenario von ursprünglich 40 Mio. m³ pro Jahr um nur eine Mio. m³ pro Jahr im modellierten Zeitraum, während die Nutzung im Survival-Szenario von anfangs bereits geringeren 33 Mio. m³ pro Jahr um 7 Mio. m³ pro Jahr abnimmt.

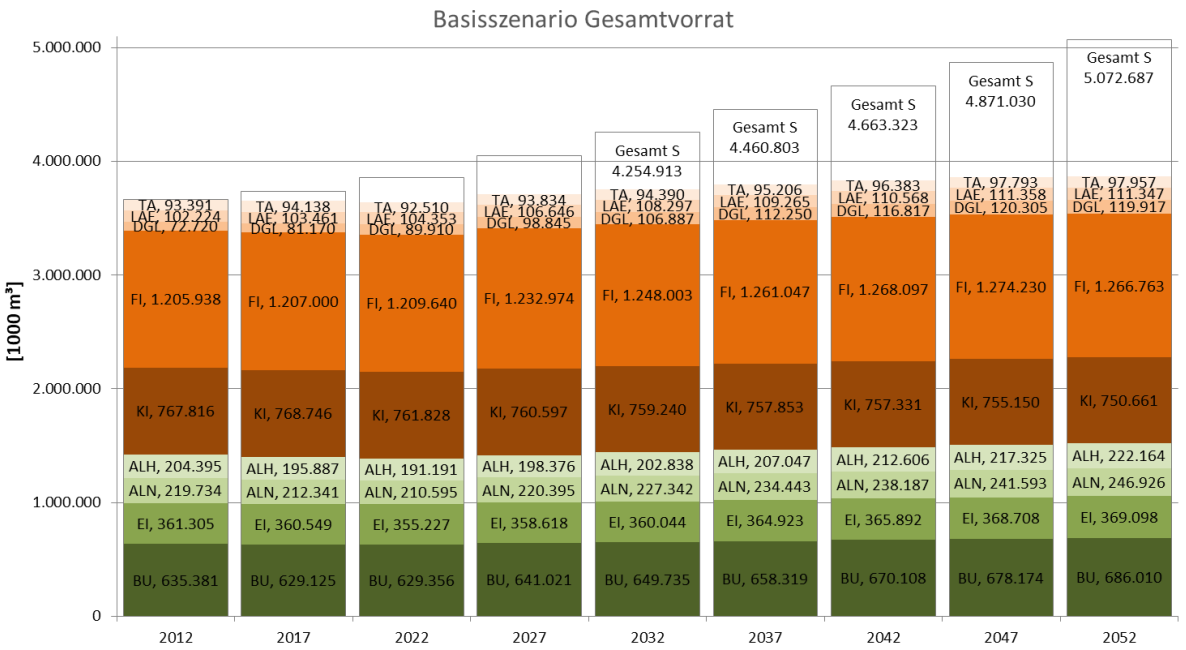


Abbildung 9 Gesamtvorrat in [1000 m³] des Basisszenarios (Thünen-Institut (2017), Dritte Bundeswaldinventur - Ergebnisdatenbank, https://bwi.info, Aufruf am: 10.10.2015, 43Z1PI_P552of_1252_L40r / 2016-2-18 18:33:5.090, *projizierter Vorrat [1000 m³] nach Baumartengruppe und Projektionsjahr) im Vergleich zur Gesamtvorratssumme über alle Baumarten des Survivalszenarios*

3.3 Schlussfolgerung

Die Überlebensmodelle aus Modul 1 konnten erfolgreich auf die Bestände der Bundeswaldinventur angewandt werden. Die Ergebnisse der Überlebensmodellierung zeigen, dass die mittlere Überlebensrate von Beständen aller untersuchten Baumartengruppen in Zukunft sinkt. Auch wird deutlich, dass sich sowohl die Überlebensrate, als auch ihre Änderung zwischen Baumarten, Regionen und Beständen unterscheidet.

Auch konnten die Daten der Bundeswaldinventur durch eine angepasste Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung gemäß den Anforderungen der Folgemodule fortgeschrieben werden. Das Wachstum und die Nutzung und somit die Gesamtvorräte, Hektarvorräte und das Rohholzpotenzial im Survivalszenario verhalten sich im Vergleich zum Basisszenario über den Simulationszeitraum entsprechend der Anpassungen, die im Programmcode der einzelnen Module vorgenommen wurden. Die vereinfachte Waldbehandlung unterliegt der starken Auswirkung der

Nichtberücksichtigung der Endnutzung. Eine Änderung der Umweltbedingungen wird in WEHAM weiterhin nur im Rahmen der Daten der letzten beiden BWIs von 2002 und 2012 enthaltenen Veränderungen berücksichtigt.

4 Optimierungsstrategien für Modellbetriebe (Modul 4)

Die Module 1-3 lieferten wichtige Eingangsparameter für die Entwicklung forstbetrieblicher Strategien zur Abmilderung ökonomischer Konsequenzen veränderter Überlebenszeiten. Hierbei wird zwischen zwei wesentlichen mittel- bis langfristigen betrieblichen Entscheidungen unterschieden – der Ertrags- und Produktionsplanung. Die Ertrags- bzw. Nutzungsplanung spielgelt die periodische Planung der Einschlagsmenge und –Frequenz wider – im Sinne der klassischen Hiebssatzplanung. Unter der Produktionsplanung wird hier insbesondere die Baumartenwahl verstanden.

4.1 Optimierte Nutzungsplanung im Klimawandel mit dem YAFO Modell

Zentrale Forschungsfrage im Bereich der Nutzungsplanung war in diesem Modul, wie sich die veränderten Überlebenszeiten auf den ökonomisch optimierten Einschlagszeitpunkt und die –Frequenz auswirkt. Aus diesen Entscheidungsvariablen lassen sich Rückschlüsse auf einen ökonomisch vorteilhaften Betriebsaufbau ziehen. Zu diesem Zweck wurde der von Fabian Härtl entwickelte Betriebsoptimierer „YAFO“ (Härtl et al. 2013) angewandt und für diese Fragestellung entsprecht erweitert. Die Ableitung eines optimalen Bewirtschaftungsplans ohne und mit Klimawandel kann zeigen, ob und wie der betriebliche Entscheider auf die sich ändernde Situation reagieren könnte und welche eventuellen ökonomischen Konsequenzen damit einhergehen.

4.1.1 Datengrundlage und Methoden

Der Betriebsoptimierer YAFO (Härtl et al. 2013; Härtl et al. 2016; Härtl 2015) optimiert die Einschlagsplanung für mehrere Planungsperioden - hier über 40 bis 60 Jahre in 5 Jahresperioden. In jeder Periode kann entweder eine Durchforstung oder die Endnutzung der Fläche oder einer Teilfläche durchgeführt werden. Falls die Endnutzung nur auf Teilflächen durchgeführt wird, also kleinere, sowie räumlich und zeitlich gestreute Hiebe durchgeführt werden, verändert sich dadurch auch die Strukturierung des Waldbildes und der Betriebsaufbau. Die Integration von Risiken in diese Entscheidung erfolgt über die Wahl der ökonomischen Zielgröße. So könnte ein risikoneutraler Entscheider z.B. den Barwert (also die Summe der diskontierten Deckungsbeiträge) über den Betrachtungszeitraum maximieren. Sollen jedoch Risiken, wie z.B. Ausfallrisiken oder Holzpreisschwankungen in die Entscheidung einbezogen werden, kann eine alternative Zielgröße verwendet werden, welche eine sogenannte „robuste Lösung“ liefert.

Die Methode der robusten Optimierung sucht nach einer den Kapitalwert maximierenden Lösung, die nicht nur für den angenommenen Erwartungswert der potentiellen Netto-Erlöse jeder waldbaulichen Aktivität optimal ist, sondern über den ganzen unterstellten Unsicherheitsbereich der Parameter. Die Streuung der möglichen Netto-Erlöse (im Folgenden auch Parameter) wird über

eine 1000x wiederholte Monte-Carlo-Simulation simuliert, die Ausfälle in Abhängigkeit der unterstellten Überlebenswahrscheinlichkeiten sowie Holzpreisschwankungen berücksichtigt. Der berücksichtigt unsichere Bereich jedes Parameters erstreckt sich über die dreifache Standardabweichung, ausgehend vom Erwartungswert in positiver und negativer Richtung. Der sich daraus über alle Streuungen ergebende Unsicherheitsraum wird im Anschluss als Ellipse approximiert, um die unwahrscheinlicheren Rand- bzw. Eckpunkte auszuschließen, um allzu pessimistische Lösungen zu vermeiden.

Ausgangszielfunktion ist der „Value at Risk"-Ansatz (VaR), der allerdings in eine robuste Form gebracht wird. Der VaR ist für ökonomische Optimierungsprobleme wie z.B. Portfoliomanagement eine typische Methode um Unsicherheiten in das Entscheidungsmodell zu integrieren (Jorion 2009). Der VaR ist ein Schwellwert, der von der Zielfunktion mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit überschritten werden soll. Ein derartiges Optimierungsproblem kann beispielsweise als ein „ambiguous chance constrained"-Problem formuliert werden:

$$max_x \, Z$$

$$mit \quad P(a: a^T x \geq Z) \geq 1 - p \quad \forall \, P \in \wp$$

$$x \in \Omega$$

Z ist die Zielfunktion des Optimierungsproblems, die in Abhängigkeit der Entscheidungsvariablen x maximiert werden soll. Eine derartige Zielfunktion kann z.B. der Kapitalwert (NPV, net present value) eines Forstbetriebs sein. x ist dabei als ein Vektor aufzufassen. a stellt einen durch Unsicherheiten beeinflussten Vektor der möglichen ökonomischen Zielgröße dar, z.B. die summierten potentiellen Barwerte von Maßnahmen in einzelnen Waldbeständen im jeweiligen Betrieb. Hat der Betrieb i Bestände, besitzen die Vektoren a und x eine Länge von i. P beschreibt die Verteilungsfunktion der unsicheren Daten und p ist die Wahrscheinlichkeit, mit der der VaR nicht erreicht wird. Oftmals ist die reale Verteilungsfunktion nicht bekannt, so dass P nur eine Schätzung aus allen möglichen Verteilungen $\wp$ darstellt (Ben-Tal et al. 2009). Im Falle eines Forstbetriebs setzen sich die Parameter a aus den möglichen forstlichen Aktivitäten in jedem Bestand i zusammen, typischerweise also Durchforstungserlöse und Erlöse aus dem Abtrieb hiebsreifer Bestände. Weiter Nebenbedingungen des Optimierungsproblems sind durch die Menge Ω symbolisiert. Im einfachsten Fall ist das eine Nichtnegativitätsbedingung für die Flächen sowie eine obere Grenze C der Betriebsfläche, so dass Ω mindestens folgendermaßen definiert ist (e ist dabei ein 1-Vektor der Länge i):

$$\Omega = \{x \in \mathbb{R}^i | e^T x = C, x \geq 0\}$$

Falls man keine Annahmen über die zugrundeliegende Verteilungsfunktion P treffen kann, wird die Problemformulierung durch eine Näherung ersetzt:

$$max_x Z$$

$$mit \quad a^T x \geq Z \;\; \forall\, a \in A$$

$$x \in \Omega$$

Die ursprüngliche verteilungsbasierte Nebenbedingung ist hier auf die Information reduziert, dass die unsicheren Parameter a Teil eines Bereichs A mit allen theoretisch möglichen Werten sind. Falls es T Stichproben von jeweiligen Realisationen μ_m des unsicheren Parameters a gibt, kann die Unsicherheitsregion A darüber definiert werden (Erdogan 2006):

$$A = \{a \mid \|a - \mu_m\| \leq \beta, m = 1, \dots, T\}$$

Falls zusätzlich gilt, dass $\beta \geq \sqrt{2\ln(\frac{1}{1-p})}$ wahr ist, kann diese stichprobenbasierte Charakterisierung des Unsicherheitsraums dazu genutzt werden, das robuste Modell wie folgt zu formulieren (Ben-Tal et al. 2009):

$$max_x Z$$

$$mit \quad a^T x \geq Z \;\; \forall\, a \;\; s.t. \|a - \mu_m\| \leq \beta, m = 1, \dots, T$$

$$x \in \Omega$$

Um für diese Art der Problemformulierung nun eine Lösung zu bestimmen, muss die generelle Nebenbedingung $\|\cdot\| \leq \beta$ näher spezifiziert werden. Drei Gruppen können hier unterschieden werden (Ben-Tal et al. 2009):

1. $\|a - \mu_m\|_2 \leq \beta$: Die in der Nebenbedingung enthaltene allgemeine Abstandsnorm wird durch die Euklidische Norm $\|x\|_2 := \sqrt{\sum_m |x_m|^2}$ konkretisiert. Damit erhält der Unsicherheitsraum eine elliptische Form. Dies stellt den effektivsten Weg dar einen Unsicherheitsraum zu bestimmen, da die ballförmige Abrundung des Unsicherheitsraums eine Betonung der eher wahrscheinlicheren Werte innerhalb des Zentrums des Raumes impliziert und die unwahrscheinlicheren „Eckwerte“, wie sie für den Box-Ansatz (s. Punkt 2) typisch sind, ausschließt. In diesem Fall wird das Optimierungsproblem zu einem konisch-quadratischen Problem (SOCP = Second Order Cone Programming).
2. $\|a - \mu_m\|_\infty \leq 1$: Die allgemeine Nebenbedingung wird durch die Maximum-Norm $\|x\|_\infty := \max x_m$ konkretisiert. Dadurch ergibt sich ein rechtwinkliger, schachtelförmiger Unsicherheitsraum, der im Vergleich zum elliptischen Ansatz eine wesentlich konservativere Herangehensweise darstellt, da hier auch die Eckbereiche des Unsicherheitsraums eingeschlossen werden. In diesem Fall wird das Optimierungsproblem zu einem linearen Problem.
3. $\|a - \mu_m\|_1 \leq \gamma$: Die allgemeine Nebenbedingung wird durch die Summen-Norm $\|x\|_\infty := \sum_m |x_m|$ ersetzt. In diesem Fall wird die Begrenzung des Unsicherheitsraums durch $\gamma = T\beta$ ersetzt. Diese Herangehensweise ist ebenfalls konservativer als der elliptische Ansatz und wie Fall 2 ein lineares Problem.

Das robuste Modell ist in das bereits bestehende Optimierungsprogramm YAFO eingebaut (Version 4.5). Der Erwartungswert der Zielfunktion Z wird wie folgt berechnet:

$$\mu^T x = \sum_{i,t,s} \mu_{its}^T x_{its}$$

$$mit \quad \mu_{its} := \left(\mu_0 \mu_1 \mu_k \mu_0^y \mu_1^y \mu_k^y\right)_{its}$$

$$x_{its} := \left(x_0 x_1 x_k x_0^y x_1^y x_k^y\right)_{its}$$

μ sind Vektoren, welche für jeden Bestand i zu jedem Zeitpunkt t und für jedes Managementszenario s sechs flächenbezogene Parameter beinhalten: der Kapitalwert (NPV) der potentiellen Endnutzung, der NPV der Durchforstungen, der NPV bei Kalamitäten (ZE-Ereignisse) und drei weitere Parameter, die diese Daten auch für den Einwuchs, d.h. die nächste Bestandesgeneration, vorhalten (sofern der Einwuchs auch in die Bewertung eingehen soll; im Projekt nicht verwendet). x ist ein Vektor der gleichen Struktur, der die zu den Parametern gehörenden Entscheidungsvariablen aufnimmt (Flächenwerte). Die folgenden Nebenbedingungen werden verwendet:

$$\sum_s x_1 + \sum_{t=0}^{t'} \sum_s (x_0 + x_k) = v_i \quad \forall i, t'$$

$$\sum_s x_k = x_k \quad \forall i, t'$$

$$x_{its} \geq 0 \quad \forall i, t, s$$

$$\sum_s x_0^y + x_1^y = \sum_{t=0}^{t'} \sum_s \left(x_0 + x_k - x_0^y - x_k^y\right) \quad \forall i, t'$$

Die erste Nebenbedingung stellt sicher, dass zu jedem Zeitpunkt t‘ die Summe der bis dahin abgetriebenen Bestandesfläche (Endnutzung plus ZE) und der aktuellen Durchforstungsfläche gleich der Bestandesgesamtfläche ist. Die zweite Nebenbedingung schließt aus, dass die anteilig ausfallende ZE-Fläche nur dem ZE-Parameter zugeordnet und nicht anderweitig genutzt werden kann. Nebenbedingung drei schließt negative Flächenlösungen aus und die letzte Bedingung zwingt das Modell, auf jeder abgetriebenen Bestandesfläche Einwuchs zu simulieren (nur als naturale Größe).

Das robuste Modell wird mit Hilfe der internen Funktionen von AIMMS für robuste Optimierung gelöst (Roelofs und Bisschop 2011), welche auf den oben beschriebenen Techniken beruhen.

Diese Methodik wurde zunächst für Modellbetriebe basierend auf den BWI Daten (s. Modul 3) angewandt, als auch auf ausgewählte Realbetriebe (Modul 5).

Hierfür wurde das betriebliche Optimierungsmodell YAFO wurde für das Projekt um folgende Funktionen ergänzt:

- Option zum Einlesen von bestandesweisen Überlebenswahrscheinlichkeiten aus dem WEHAM-Datensatz
- Nach Betrieben getrennter automatisierter Import und Optimierung und Export der WEHAM-Daten aus der bzw. in die SQL-Datenbank.
- Einbau der erweiterten klimasensitiven Überlebenskurven für jeden Realbetrieb

4.1.2 Ergebnisse

Die hier präsentierten Ergebnisse sollen beispielhaft die Anwendung der erarbeiteten Methode demonstrieren. Die detaillierte Analyse der Optimierungen über alle Modellbetriebe in Deutschland erfordert eine weitere Aufarbeitung der umfangreichen Datensets, die im Rahmen dieses Projektes nur in Ansätzen geleistet werden konnte. Jedoch ist eine Abschätzung der Folgen des Klimawandels für die hier verwendeten Modellbetriebe auf Basis des BWI Datensatzes möglich (s. Abbildung 10). Die Modellbetriebe liefern Beispieldaten und sollten in der aktuellen Form nicht räumlich explizit, als verallgemeinerbarer Aussagen für die Wuchsgebiete interpretiert werden. Da die 316 Modellbetriebe sich jedoch aus den Traktecken der Wuchsgebiete und Eigentumsarten zusammensetzen bietet sich die übersichtliche Darstellung in Kartenform hier dennoch an.

Abbildung 10 zeigt die relative Veränderung der robusten Zielfunktion der Modellbetriebe unter der Annahme der Klimadaten des RCP Szenarios 8.5 im Jahr 2070 und der Annahme einer moderaten Risikoaversion des Entscheiders (Unsicherheitsfaktor von 2). Es wird deutlich, dass für alle Modellbetriebe, unabhängig von der Lage und Eigentumsart, negative ökonomische Folgen zu erwarten sind. Dieses Ergebnis gilt, obwohl die flexible Modellierung Anpassungsmaßnahmen in den simulierten Betrieben erlaubt. Das heißt dass die Simulation auch Verkürzungen der Umtriebszeit sowie eine Änderung der Abfolge der Hiebsmaßnahmen vorsehen kann. Die Einschlagsmenge und –abfolge wird somit an die erwarteten Risiken angepasst, und es wird eine rein ökonomische Zielfunktion verwendet. Die Spanne der relativen Abnahme der Zielfunktion unter heutigem Klima und zukünftigem Klima lag zwischen 2% und 18%. Der Großteil der simulierten Modellbetriebe wies relative Veränderungen zwischen -2% und -10% auf. Diese Tendenz zeigte sich unabhängig von der Eigentumsart (Abbildung 11). Unter der Annahme des RCP 8.5 Szenarios und den simulierten Klimadaten für das Jahr 2050 (also 20 Jahre früher als im Szenario zuvor) ergaben sich konsistent niedrigere Werte der relativen Differenzen der Zielfunktion von -1% bis -11%. Neutrale oder positive Effekte des veränderten Klimas ergaben sich jedoch auch unter dieser Annahme nicht.

Besonders betroffen zeigten sich vorratsreiche Modellbetriebe mit hohen Fichtenanteilen, wie z.B. in den Mittelgebirgen und in den süddeutschen Wuchsgebieten (Abbildung 10), als auch solche Modellbetriebe, deren Klimadaten auf Regionen Nordostdeutschlands basierten. Hier wird im

RCP 8.5 Szenario eine besondere Verschärfung der Trockenheit prognositiziert welche sich besonders negativ auf die Überlebenswahrscheinlichkeit der Laubbaumarten auswirkte. Die besonders starke Abnahme der Zielfunktion für die Modellbetriebe basierend auf Daten des Wuchsgebietes Moseltal (Großprivatwald) und des Wuchsgebietes Oberpfälzer Becken- und Hügelland (Kommunalwald) ist auch auf die geringere Anzahl an Traktecken, die in diese Kategorie fielen zurückzuführen. Die damit angenommene geringere Anzahl an Beständen in den Modellbetrieben reduziert die Möglichkeit der Diversifikation im Rahmen von Hiebsmaßnahmen zwischen den Beständen und macht diese (kleineren) Betriebe anfälliger für Kalamitätsrisiken und Holzpreisschwankungen. Dieses Ergebnis ist damit nicht direkt auf die Region übertragbar, aber zeigt dennoch die erhöhte Betroffenheit von Betrieben in Regionen mit kleinparzellierten Strukturen und homogenen Bestandesstrukturen.

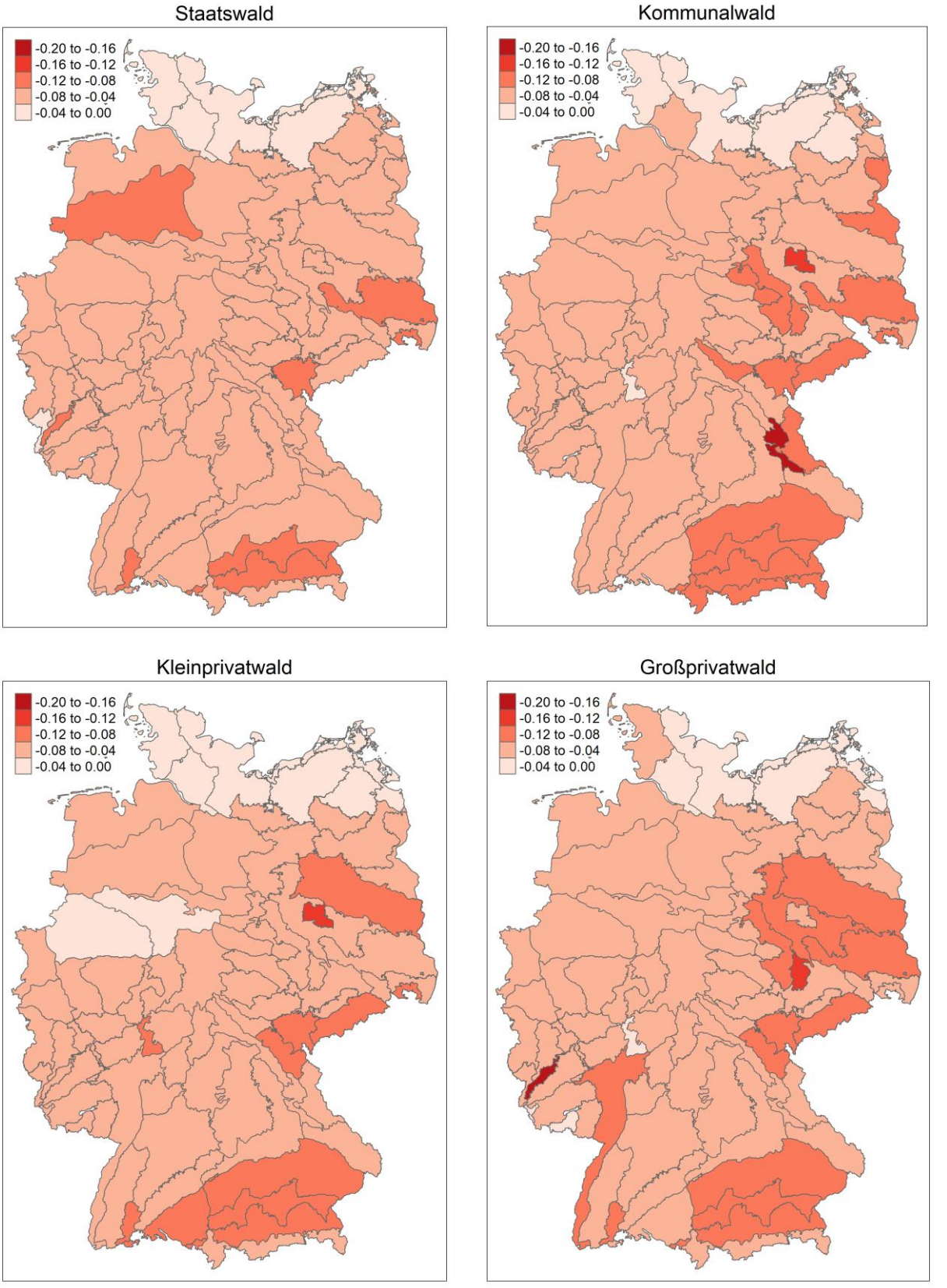


Abbildung 10: Relative Veränderung (als Dezimale) in der Zielfunktion der Modellbetriebe zwischen heutigem und zukünftigem Klima. Die Modellbetriebe basieren auf Naturaldaten aus der BWI und setzen sich aus den Wuchsgebieten (siehe Polygone) und den vier Eigentumsarten zusammen. Mit Hilfe des Programmes WEHAM wurde das Wachstum der entsprechend zugeordneten BWI Punkte fortgeschrieben. Das Modell beinhaltet zusätzlich die neuen Überlebenskurven. Dargestellt ist die relative Veränderung der unterstellten ökonomischen Zielfunktion unter Berücksichtigung der veränderten, klimawandelbedingten Überlebenswahrscheinlichkeiten. Das Modell verändert enstprechend die Einschlagsmenge und –Höhe über den simulierten Zeitraum von 40 Jahren. Die Zielfunktion wird als annualisierter, robuster Kapitalwert über den Zeitraum von 40 Jahren ausgegeben.

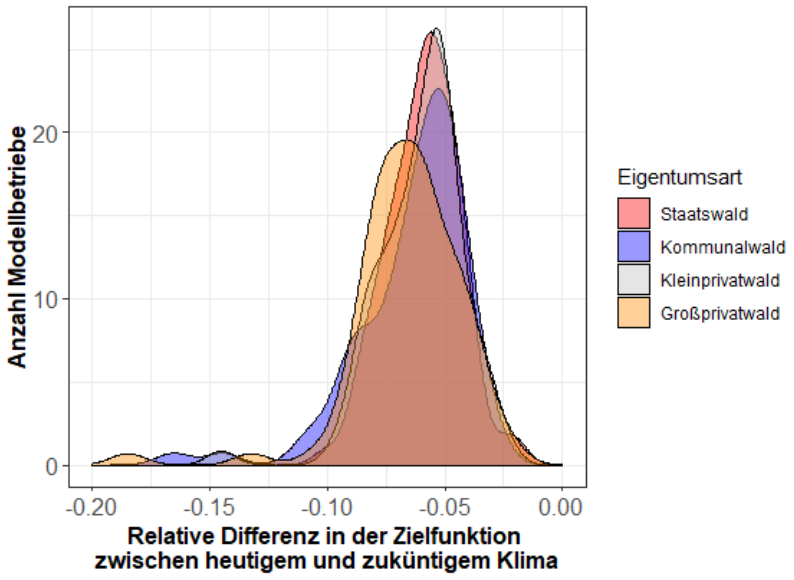


Abbildung 11: Verteilung der relativen Differenzen in der Zielfunktionen der 316 Modellbetriebe zwischen heutigem und zukünftigem Klima (RCP 8.5 Jahr 2070) unter moderater Risikoaversion, unterteilt nach Eigentumsart

Trotz der hohen relativen Differenzen, lagen jedoch in einigen stark betroffenen Modellbetrieben, insbesondere in den Nadelholz-dominierten Betrieben die absoluten Werte der Zielfunktion auch im Klimawandelszenario noch deutlich über denen mit geringeren relativen Veränderungen, die oft vom Laubholz dominiert waren. Die absolute Zielfunktion steht für den annualisierten Kapitalwert des Forstbetriebes über den simulierten Zeitraum von 40 Jahren. Dieser Wert berücksichtigt jedoch, als „robuster Wert“ die unterstellten Risiken (s. Kapitel 4.1.1). Unberücksichtigt blieben hier Anpassungen in der Baumartenwahl, da über den simulierten Zeitraum von 40 Jahren nur die Ertragsplanung, also die Menge und Abfolge des Einschlages optimiert wurde.

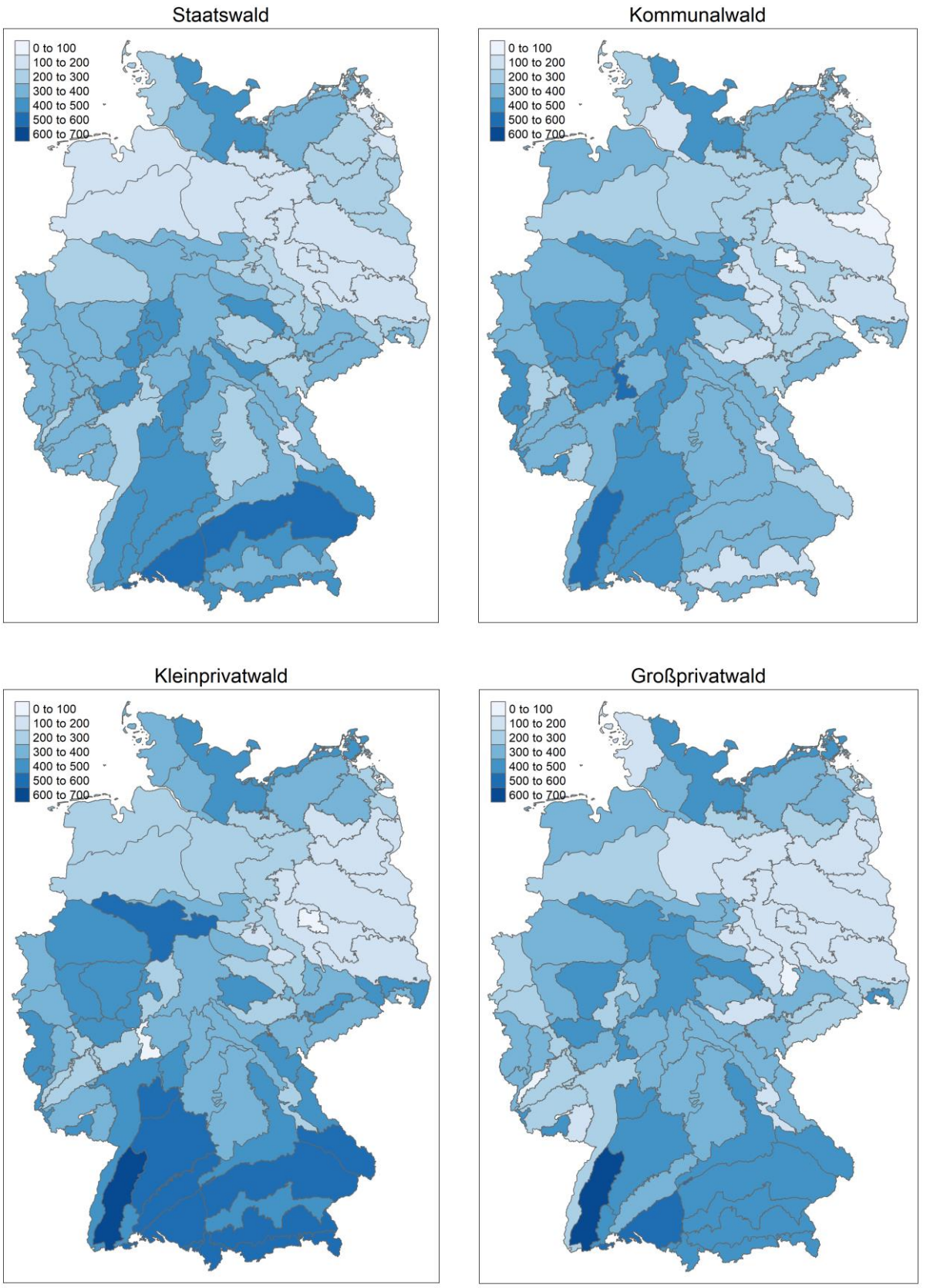


Abbildung 12: Absolute Höhe der Zielfunktion der optimierten Modellbetriebe unter Annahme des Klimas im RCP 8.5 Seznario für das Jahr 2070 nach Eigentumsart. Die Werte stehen für den robusten, annualisierten Kapitalwert in €/ha/Jahr über den simulierten Zeitraum von 40 Jahren. Die absolute Höhe basiert auf Annahmen zu Holzpreisen und Erntekosten, welche für alle Modellbetriebe konstant gehalten wurden, um den reinen Klimaeffekt zu identifizieren. Die absoluten Höhen sind damit nicht an lokale Preisgegebenheiten angepasst und sollten nur in der Relation interpretiert werden.

4.1.3 Schlussfolgerung

Ergebnis des Projektes ist insbesondere die Erweiterung des Forstbetriebsoptimierers zur simulierten Analyse einer großen Zahl an Beispielbetrieben und Szenarien. Besonderheit der Methode ist, dass durch die Optimierung eine ideale Anpassung betrieblicher Entscheidungen an das als bekannt unterstellte neue Klima simuliert wird. Somit kann das Potenzial möglicher Anpassungsstrategien, mit Bezug auf die Einschlagsplanung untersucht werden. Beispielhaft wurde die Methode hier auf Modellbetriebe angewandt, welche auf Basis der BWI Daten und der Kombination aus Wuchsgebiet und Eigentumsart definiert wurden und mit WEHAM über den Zeitraum von 40 Jahre im Wachstum simuliert wurden. Diese Modellbetriebe sollen nicht der Ableitung regionaler absoluter Kosten des Klimawandels dienen. Durch die hohe Anzahl an analysierten Modellbetrieben, welche sich hinsichtlich ihrer Größe, Baumartenzusammensetzung, Altersstruktur und Wachstum, sowie dem heutigen und prognostizierten Klima unterscheiden, lässt sich vielmehr die Spannweite des möglichen Einflusses der veränderten Überlebenszeiten darstellen. Auf Basis dieser Ergebnisse erscheint ein negativer ökonomischer Effekt, unter einer Vielzahl an betrieblichen Voraussetzungen, und trotz Anpassung der Einschlagsplanung als sehr wahrscheinlich.

Eine detailliertere Analyse der möglichen Anpassungsstrategien wird im Rahmen der Ergebnisse der Realbetriebe (s. Modul 5) näher dargestellt.

4.2 Optimierte Produktionsplanung (Baumartenwahl) im Klimawandel

Neben der Frage der angepassten Einschlagsfrequenz und –menge zählt die Baumartenwahl zu den zentralen forstbetrieblichen Entscheidungen. Im Rahmen des Projektes wurde der Einfluss sich verändernder Überlebenszeiten auf die ökonomisch optimierte Baumartenwahl untersucht. Durch die neuen Überlebenszeitmodelle (Modul 1 und 2), welche auch den Einfluss der Mischungs- und Temperaturvariablen einbeziehen, war es möglich nicht nur die Baumartenwahl, sondern auch den ökonomisch optimalen Mischungstyp unter Berücksichtigung von Ausfall- und Marktrisiken zu beleuchten. Die Studie ist in Paul et al. (2019) detailliert dargestellt.

4.2.1 Datengrundlage und Methoden

Das Modul 4 entwickelte hierfür einen bestehenden Portfolio-basierten Simulations- und Optimierungsansatz (Knoke und Seifert 2008; Griess und Knoke 2013; Clasen et al. 2011a) weiter. Der Ansatz geht davon aus, dass ein risiko-averser Entscheider den Forstbetrieb steuert. Im Gegensatz zum reinen Gewinn-Maximierer wägt dieser Entscheidungsträger zwischen Ertrag und Risiko ab. Zur Abbildung seiner subjektiven Einstellung zum Risiko wird der Value at Risk (VaR) verwendet. Dieses Maß stammt aus der Finanzwirtschaft und basiert auf der erwarteten Verteilung der finanziellen Erträge (Jorion 2009), in unserem Fall der Annuitäten, d.h. die in €/(ha*Jahr) ausgedrückten Bodenrenten der verschiedenen Baumartenzusammensetzungen. Die bio-ökonomische Simulation geht von unbestocktem Waldboden aus. Ein risiko-averser Entscheider wird danach streben, den finanziellen Ertrag zu maximieren, der mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit

mindestens erreicht wird. In unserer Studie wurde die Annuität maximiert, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% nicht unterschritten wird. Das Vorgehen folgt damit der Logik der unter 4.1.1 erläuterten Ertragsplanung. Jedoch wurde hier noch auf einen klassischen nichtlinearen Lösungsalgorithmus (im Gegensatz zum von Fabian Härtl auf forstwirtschaftliche Probleme übertragenen modifizierten chance-constraint Ansatz (Härtl und Knoke 2019)) zurückgegriffen.

Die dafür notwendige Verteilung der erwarteten Annuitäten aus der Etablierung verschiedener Baumarten oder –mischungen wurde durch eine Monte-Carlo-Simulationen, unter Berücksichtigung von heutigen oder möglichen zukünftigen Risiken generiert. In dieser Studie gingen als stochastische Elemente historische Holzpreisschwankungen und die aus Modul 1 abgeleiteten empirischen Überlebenswahrscheinlichkeiten (konvertiert in Ausfallwahrscheinlichkeiten (Staupendahl 2011)) für Fichte und Buche im Reinbestand und in verschiedenen Mischungsanteilen in die Simulation ein. So können (unter anderem) die ökonomischen Konsequenzen einer eintretenden Kalamität und die daraus folgende ungeplante Verkürzung der Umtriebszeit (und verfrühte Neubegründung), die verringerten Erträge aus der Holznutzung und die Kosten für die Re-etablierung einbezogen werden. In unserer Studie wurden damit Verteilungen für jede Baumart und jede Mischung von Reinbeständen oder Mischbeständen ermittelt. Das Ergebnis des bioökonomischen Simulations- und Optimierungsansatzes kann als „langfristiges Bestockungsziel“ oder „Waldentwicklungsziel“ aus ökonomischer Sicht interpretiert werden.

Beispielanwendung für die Region Innerer Bayerischer Wald

Aus aktuellem Anlass wurde das Modell beispielhaft für einen Modellbetrieb im Wuchsbezirk „Innerer Bayerischer Wald“ angewandt. Die Region war von Sturm „Kolle“ stark betroffen, durch den am 18. August 2017 ca. 2 Mio m³ Schadholz in Südostbayern anfielen. Aus dieser Situation ergab sich die Frage, wie solche Schadflächen unter Berücksichtigung zukünftiger Überlebenswahrscheinlichkeiten wiederbestockt werden sollten. Die Wahl der Baumart wurde zunächst auf die beiden Hauptbaumarten Fichte und Buche beschränkt. Hierbei ist zu betonen, dass die Fichte in dieser Region standortheimisch ist. Zusätzlich wurden zwei verschiedene Mischungsformen aus den beiden Baumarten Buche und Fichte berücksichtigt (Abbildung 13). Einerseits die Mischung von Reinbeständen auf Betriebsebene, durch welche der Effekt der Produktdiversifizierung genutzt werden kann. Hierbei entstehen jedoch keine biopyhsikalischen Interaktionen zwischen den Baumarten. Andererseits wurden „Mischbestände“ als gruppenweise Mischung simuliert. Hier wurde der stabilisierende Effekt der Mischung auf die Überlebenswahrscheinlichkeit aus Modul 1 simuliert. Weitere Annahmen zum Baumwachstum und Qualität wurden aus Knoke und Seifert (2008) übernommen.

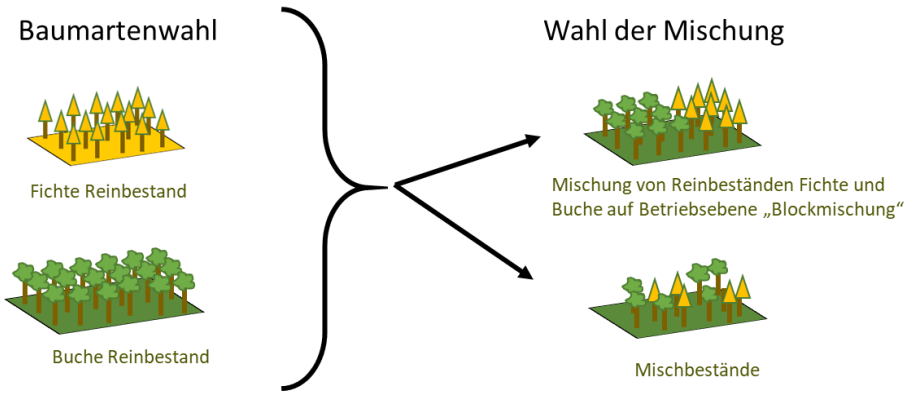


Abbildung 13: Handlungsoptionen im bio-ökonomischen Simulations-Optimierungsansatz.

Für die Simulation der Volumenentwicklung wurde auf den Waldwachstumssimulator SILVA 2.0 zurückgegriffen (s. Datensatz Clasen et al. 2011b; Clasen 2015). Die Annahmen zu Kosten und Erlösen wurden aus Clasen (2015) für den Standort übernommen und durch aktualisierte Holzpreise und Holzpreisschwankungen ergänzt (Messerer et al. 2017). Die Simulation unterstellt, dass der Eintritt einer Kalamität (abgeleitet aus der Überlebenszeitanalyse aus Modul 1) zum ungeplanten Abtrieb des Bestandes, der Halbierung der Deckungsbeiträge (Dieter et al. 2001) und zur schadensbedingten Wiederaufforstung im gleichen Jahr (zu Begründungskosten von 2000 €/(ha*Jahr) für Fichte und 3000 €/(ha*Jahr) für Buche) führt. Es wurde ein Kalkulationszins von 1,5% verwendet. Entsprechend der Ergebnisse aus Modul 1 hängt die Eintrittswahrscheinlichkeit der Kalamität von der Baumart, Mischungsanteil und Klimavariablen ab. Hier wurden die prognostizierten Klimavariablen für Konzentrationspfade RCP 2.6, 4.5 und 8.5 des Max Planck Institutes (MPI-ESM-LR) (Hijmans et al. 2005) verwendet.

4.2.2 Ergebnisse

Für den hier gewählten Modellbetrieb führten die veränderten Überlebenswahrscheinlichkeiten der Fichte für die drei Klimaszenarien nur zu einer vergleichsweisen moderaten Abnahme des Fichtenanteils gegenüber der Buche (Abbildung 14A). Der ökonomisch ideale Fichtenanteil reduzierte sich in der Blockmischung von 100% (unter heutigem Klima) auf 80% (für das pessimistischste Klimawandelszenario RCP 8.5). Im Mischbestand läge der ökonomisch ideale Fichtenanteil mit 70% auch unter heutigem Klima bereits niedriger und würde unter dem extremsten Szenario um 10 Prozentpunkte absinken. Dieser vergleichsweise niedrige Anteil der Fichte erklärt sich durch den unterstellten stabilisierenden Effekt in der gruppenweisen Mischung. So betrug die geschätzte Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte im Alter von 100 Jahren für den Beispielstandort unter heutigem Klima 50% im Reinbestand, 62% im Fichten-Buchen-Mischbestand mit 60% Fichte und bis zu 74% im Buchen-Fichten-Mischbestand mit 10% Fichte. Im extremsten Klimaszenario (RCP 8.5) lag die Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte bei 37% im Reinbestand, aber immer noch bei 50% im Mischbestand mit 60% Fichte und 65% mit 90% Buche.

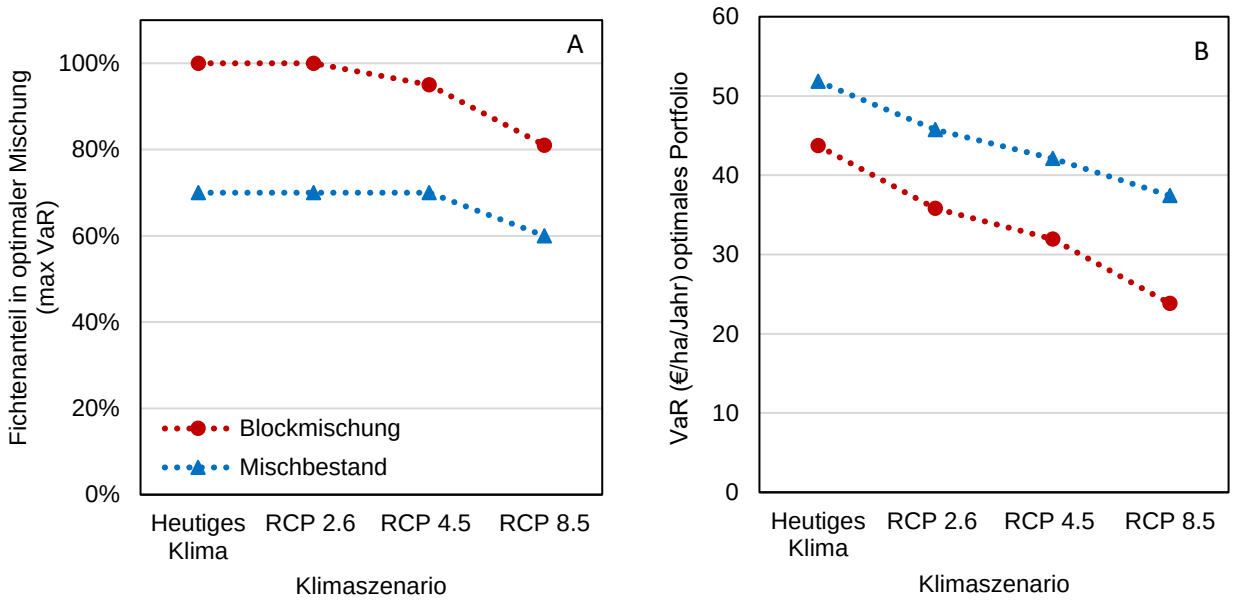


Abbildung 14: Ergebnisse der optimierten Baumartenwahl unter Berücksichtigung der veränderten Überlebenszeiten (Modul 1) für einen Modellbetrieb im Bayerischen Wald. Linke Abbildung: Fichtenanteil in der nach dem Value at Risk (VaR) optimierten Zusammensetzung von Buche und Fichte. Rechts: Wert der Zielgröße (VaR, bezogen auf das 95% Quantil der Annuität) für die optimierten Baumartenzusammensetzungen für die verschiedenen Klimawandelszenarien und Mischungstypen (verändert nach (Paul et al. 2019))

Die gruppenweise Mischung war für alle Klimaszenarien der Blockmischung ökonomisch überlegen. Die Zielgröße des VaR war im optimierten Mischbestand um bis zu 57% höher als in der idealen Blockmischung (Abbildung 14B). Diese Vorteilhaftigkeit stieg mit zunehmender Intensität des unterstellten Klimawandels. Ist das strategische Produktionsziel eine Beibehaltung hoher Fichtenanteile, erscheint nach unseren Modellergebnissen die Etablierung von Mischbeständen vorteilhaft.

Abbildung 14B zeigt jedoch auch, dass für unsere Beispielanwendung selbst unter der Annahme, einer ökonomisch angepassten Baumartenwahl, mit klimawandelbedingten Verlusten gerechnet werden muss. Die Zielgröße des VaR, also die Annuität, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% mindestens erreicht wird reduzierte sich unter Klimawandel um bis zu 28%. Dies zeigt, dass die Anpassung des Baumartenportfolios die ökonomischen Konsequenzen des Klimawandels zwar abmildern, aber nicht komplett auffangen kann. Dies wäre nur dann der Fall, wenn alternative Baumarten einbezogen würden, welche bei gleichbleibenden oder höheren finanziellen Erträgen auch niedrigere Risiken aufwiesen. Für die hier untersuchten Baumarten führte der Klimawandel jedoch durchgehend zu erhöhten finanziellen Risiken.

4.2.3 Schlussfolgerung

Die bio-ökonomische Modellrechnung zeigt, dass klimabedingte Änderungen der Überlebenswahrscheinlichkeiten bei der Neubegründung von Beständen berücksichtigt werden sollten. Mischbestände können durch die stabilisierende Wirkung finanzielle Risiken bis zu einem gewissen Grade abzupuffern. Doch selbst bei einer theoretisch idealen Bestandeszusammensetzung

und der unterstellten Kenntnis zum zukünftigen Klima sind ökonomische Verluste wahrscheinlich. Die Studie zeigt auch, dass trotz der hohen unterstellten Produktionsrisiken für Fichte, diese am Beispielstandort durch die hohe Produktivität, kürzere Umtriebszeit und geringere Etablierungskosten im Vergleich zur Buche immer noch in der ökonomisch optimierten Baumartenzusammensetzung vertreten war. Eine moderate Fichten-Buchen Mischung könnte daher eine robuste Kompromisslösung zur Abwägung von Risiko und Ertrag darstellen. Die Ergebnisse wurden durch die Studie von Friedrich et al. (2019) bereits methodisch und auf weitere Standorte erweitert. Zukünftige Analysen sollten die Betrachtung auf weitere Baumarten und vielfältigere Zielsetzungen erweitern.

5 Ertrags- und Risikosituation realer Forstbetriebe (Modul 5)

Ziel des Moduls 5 war es die in Modul 4 entwickelte Methodik zur Bestimmung der Effekte veränderter Überlebenszeiten auf die optimierte Einschlagsplanung auf reale Forstbetriebe anzuwenden. Für den Schritt von Modellbetrieben hin zu Realbetrieben war es jedoch zunächst auch nötig empirische Kenntnisse zur aktuellen Ertrags- und Risikosituation realer Forstbetriebe zu erarbeiten, um einerseits entsprechende Erkenntnisse in die Modellierung einfließen zu lassen und andererseits auch die Modellergebnisse kritisch auf Plausibilität zu prüfen.

5.1 Empirische Erkenntnisse zur Ertrags- und Risikosituation realer Forstbetriebe

Die empirische Analyse wurde durch die Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg (FVA) durchgeführt. Sie sollte Reaktions- oder Verhaltensmustern des jährlichen Holzeinschlags auf Klimaeffekte darstellen, aber auch die Entwicklung der zufälligen Nutzung (ZN – Einschläge, die nicht beeinflussbar sind, da sie z.B. durch Ereignisse wie Sturm oder Schneebruch verursacht werden und somit nicht einkalkuliert werden können) betrachten. Auch sollen nicht mehr kompensierbare Schadschwellen für die betrachteten Betriebe oder auch Langfristeffekte von Großschadereignissen aufgezeigt werden.

5.1.1 Datengrundlage und Methodik

Zu diesem Zweck wurden Daten des Testbetriebsnetzes 5-200 ha (TBN 5-200 ha) zugrunde gelegt. Seit 1982 werden im Rahmen des TBN die verschiedensten forstbetrieblichen Daten aufgenommen, welche eine solide Grundlage zur Beantwortung der Fragen innerhalb des Moduls bilden. Ein neuer Ansatz der hier gewählt wurde, ist die Verschneidung mit zugehörigen Klimadaten, um die TBN-Daten nach einem „Klimasignal“ auszuwerten. Auch die Daten des zweiten an der FVA geführten Testbetriebsnetzes (TBN-BMEL) fanden Eingang in die Arbeit des Moduls 4.

Als Material für die Analysen standen die Testbetriebsnetzdaten des TBN-BMEL und TBN 5-200 ha des Landes Baden-Württemberg zur Verfügung. Die Daten des TBN-BMEL bildeten die Grundlage für die weiteren Analysen im Modul 4, da sie die Grundvoraussetzungen für das Optimierungstool YAFO erfüllten (unterschiedliche Betriebsgrößen und Eigentumsarten sowie Baumartenzusammensetzungen). Daher wurden etwa 100 Betriebe dieses TBN mittels eines Briefes

für die Teilnahme am Projekt angefragt. Die Resonanz übertraf die Erwartungen bei Weitem. 18 Betriebe waren bereit, ihre Daten für die Analyse und ihre Zeit für Vorgespräche und Nachbereitung zur Verfügung zu stellen. Aus diesen Daten wurden zwei Betriebe in Zusammenarbeit mit der Datenverarbeitungsstelle von ForstBW (ZS-ForstBW) ausgewählt und für die weitere Verarbeitung vorbereitet.

Zur Betrachtung der Ertrags- und Risikosituation wurden die Daten des TBN 5-200 ha (Kleinprivatwald) gewählt, da diese sensibel und gut sichtbar auf z.B. Holzpreisschwankungen oder Kalamitäten reagieren, was sich vor allem in der Sortimentsgruppe Fichte/Tanne/Douglasie zeigt. So spielt der Kleinprivatwald eine wichtige Rolle bei der Betrachtung und Untersuchung von Wäldern und eignet sich gut für betriebswirtschaftliche Analysen (Brandl et al. 1999).

Tabelle 8: Relevante Datenreihen des TBN 5-200 ha für die weitere Analyse und Modelselektion

Betriebs-ID
Wuchsgebiet
Einschlag (Fm/ha)
Roheinkommen (€/Fm)
Zufällige Nutzung (Fm/ha)
Nadelholzanteil am Einschlag (%)
Laubholzanteil am Einschlag (%)
Betriebsgröße (ha)
Temperatur des wärmsten Monats (°C)
Temperatur des kältesten Monats (°C)
Temperatur des wärmsten Quartals (°C)
Temperatur des kältesten Quartals (°C)
Niederschlag des niederschlagsreichsten Monats (mm)
Niederschlag des niederschlagsärmsten Monats (mm)
Niederschlag des niederschlagsreichsten Quartals (mm)
Niederschlag des niederschlagsärmsten Quartals (mm)

Um die Daten in einem ersten Schritt auszuwerten, war es erforderlich, diese zu stratifizieren. Erste Hinweise zu einer sinnvollen Clusterung von Daten liefern (Oesten und Roeder 2002): *„Betriebswirtschaftlich sinnvoll verglichen werden können allerdings nur in ihren betrieblichen Voraussetzungen ähnliche Betriebe – „ähnlich“ meint dabei, dass Betriebe gleiche erfolgsrelevante und von der Betriebsführung kurzfristig nicht beeinflussbare Merkmale aufweisen.“* Als kurzfristig nicht beeinflussbare, erfolgsrelevante Betriebsmerkmale nennt Speidel die Rechtsform, die Betriebsgröße, den natürlichen Standort, das Baumartenverhältnis sowie den Altersklassenaufbau (Oesten und Roeder 2002: 168-169). Des Weiteren werden bei Selter (2006) 7 Möglichkeiten einer Clusterung von Forstbetrieben beschrieben. Unter anderem lassen diese sich nach ihrer Betriebsgröße, den Einschlagsklassen, Einkommensklassen oder auch nach ihrer Region gliedern (Selter 2006: 84).

Da durch frühere Analysen und auch durch die Dissertation von Selter (2006) bekannt war, dass die Region eine wichtige Rolle spielt (ähnliche standörtliche Gegebenheiten und Baumartenzusammensetzung sowie Betroffenheit von Kalamitäten), wurden die Forstbetriebe für einen Teil der

Untersuchungen nach forstlichen Wuchsgebieten zusammengefasst. Im Gegensatz zu Selter, welcher 4 Untergruppen verwendet, wurden aufgrund der Anzahl vorhandener Betriebe (83) die acht baden-württembergischen Wuchsgebiete als standörtliche Clusterungseinheit gewählt.

Des Weiteren wurden Analysen durchgeführt, bei denen es darum ging, Betriebsdaten mit zugehörigen Klimadaten zu verschneiden, um zu untersuchen, ob es im betrachteten 30-jährigen Zeitraum ein „Klimasignal“ gegeben hat. Hierfür wurden „gemischte Modelle“ gewählt. Die vorhandenen Daten bergen durch ihren Zeitreihencharakter und durch die Beobachtung der immer gleichen Betriebe Abhängigkeiten in sich, mit welchen die „gemischten Modelle“ umgehen können. Es wurde je ein Modell für den Einschlag (Fm/ha) und das Roheinkommen (€/Fm) mit allen relevanten und erklärenden Variablen entwickelt. Ursprünglich sollte zur Abbildung der Risikosituation die ZN herangezogen werden. Da die ZN im Privatwald seit 1990 nicht konstant und immer getrennt aufgenommen wurde, sondern im Wert des Einschlags integriert ist, wurde die Größe Einschlag analysiert und so versucht, über die Änderung im Einschlag Rückschlüsse der Auswirkungen des Klimas auf die ZN ziehen zu können.

Erfahrungswerte und vorhergehende Analysen der TBN-Daten haben gezeigt, dass für den Einschlag sowohl der Nadelholzanteil als auch die Temperatur des wärmsten Quartals eine wichtige Rolle spielen, weshalb diese Variablen in das Ausgangsmodell aufgenommen wurden. Für das Roheinkommen wurde die Variable Einschlag (Fm/ha) vorausgesetzt. Um für die Modelle weitere erklärende Variablen ausfindig zu machen wurde explorativ vorgegangen, sprich dem Modell wurden nach und nach Variablen zugefügt und wieder entzogen („Stepwise forward selection“). Zur Auswahl standen u.a. die Variablen aus Tabelle 8. Die Betrachtung und Vergleiche des AIC- und des p-Wertes[1] zeigten, ob die zugefügten Variablen das Modell signifikant verbesserten oder nicht. Um die Anforderung der Normalverteilung zur weiteren Analyse innerhalb der Daten zu erfüllen wurden die Modelle logarithmiert und die Wurzel gezogen. Des Weiteren wurden die Modelle auf fixed effects (erklärende Variablen korrelieren mit individueller Heterogenität) und random effects (Zufälligkeit der Variablen wird angenommen) untersucht.

5.1.2 Ergebnisse

Ergebnisse der Zeitreihenanalyse

Die Einschläge und der Nutzungssatz wurden über alle Betriebe des TBN 5-200 ha gemittelt und miteinander verglichen. Auffällig war hier, dass der Nutzungssatz über den Beobachtungszeitraum seit 1982 kontinuierlich angestiegen ist sowie, dass tendenziell mehr Holz eingeschlagen

[1] AIC = ein Informationskriterium in der Statistik zur Auswahl von Modellen. Ein Modell sollte nicht unnötig komplex sein, die Anpassungsgüte des Modells sollte mit der Anzahl der gemessenen Parameter ausbalanciert sein. Der AIC ist das Informationskriterium nach Akaike. Bevorzugt werden die Modelle mit kleiner werdendem AIC-Wert.
p-Wert: ein p-Wert zwischen 0 und 0,5 zeigt an, ob eine Variable ein Modell signifikant beeinflusst.

wird, als der Nutzungssatz vorgibt. Hierfür sind maßgeblich die oft vorsichtig angesetzten Nutzungssätze verantwortlich. Der Trend aus den Analysen „20 Jahre Testbetriebsnetz Kleinprivatwald – Betriebswirtschaftliche Ergebnisse 1979-1998“ setzt sich auch in dieser Untersuchung fort. Auch hier hieß es schon „trotz steigender Hiebssätze liegt der Holzeinschlag, mit Ausnahme der Nachsturmjahre 1991 bis 1993, z.T. deutlich über den Hiebssätzen, ohne die Nachhaltigkeit des Waldvermögens angetastet zu haben.“ (Brandl et al. 1999: 31). Im Gegensatz zu den Folgejahren nach den Sturmereignissen Vivien und Wiebke (1991-1993), in denen der Einschlag unter den Nutzungssatz fiel, konnte dies nach Sturm Lothar nicht beobachtet werden. Als wesentliche Ursache kann hier das Dürrejahr 2003 angesehen werden, das dazu führte, dass das Niveau der zufälligen Nutzung durch Borkenkäferschäden deutlich angehoben wurde und vielfach eine aktive Kompensation durch Einschlagszurückhaltung verhinderte.

Ein Vergleich zwischen Roheinkommen (€/ha) und dem Einschlag (Fm/ha) zeigt auf, wie viel Geld in Bezug zum Einschlag auf den Hektar gerechnet erwirtschaftet werden konnte. Es konnte allerdings keine eindeutige Beziehung dieser beiden Größen zueinander nachgewiesen werden. Grund hierfür ist, dass die Erträge wesentlich vom Holzerlös bestimmt werden, der weit stärker schwankt als die Einschlagshöhe. So wirkt sich beispielsweise die Wirtschaftskrise in den Jahren 2008 und 2009 in ähnlicher Weise aus wie die großen Sturmereignisse. Die Roheinkommen der letzten Jahre sind zudem durch einen zunehmenden Anteil an Fremdleistung geprägt, was das Roheinkommen mindert. In der Summe muss jedoch konstatiert werden, dass die bisherigen Großschadereignisse nicht zu einer generellen Minderung des Ertragspotenzials, sondern durch den Holzpreisverfall nur zu kurzfristigen Einkommensverlusten geführt haben.

Um einen differenzierten Blick auf das Einschlagsverhalten zu bekommen, wurden die Betriebe wie beschrieben nach Wuchsgebieten geclustert und der Einschlag (Fm/ha) miteinander verglichen (Abbildung 15). Hier sollte sich herausstellen, ob es spezifische Reaktionsmuster oder Verhaltensweisen gibt, die sich zum Beispiel nach Kalamitäten ablesen lassen. Abbildung 1 zeigt den Einschlag aller Wuchsgebiete (WG) im Vergleich über den gesamten Beobachtungszeitraum. Im WG 74 (Baar-Wutach) ist nur ein Betrieb, weshalb diese Datenreihe nicht aussagekräftig ist. In dieser Abbildung lässt sich gut erkennen, wann und welche Wuchsgebiete von einem Kalamitätsereignis betroffen waren. In störungsarmen Zeiten sind sich die Betriebe innerhalb eines Wuchsgebietes in ihrem Einschlagsverhalten sehr ähnlich, erkennbar an der geringen Streuung und den wenigen Ausreißern. Tritt eine Störung auf sieht man, dass die Streuung zunimmt und es so eine unterschiedliche Schwere der Betroffenheit auch innerhalb eines Wuchsgebietes gibt. Exemplarisch kann das WG 65 – Oberrheinisches Tiefland und Rhein-Main-Ebene betrachtet werden: Sowohl die Stürme Vivien und Wiebke als auch Lothar sind in den Einschlagsdaten sichtbar. Im Gegensatz zu den meisten anderen Wuchsgebieten wird im WG 65 ab dem Jahr 2004 vermehrt eingeschlagen. Eine Auswirkung des Dürrejahres 2003 mit einer deutlichen Trockenheit v.a. in der Rheinebene ist hier als Ursache naheliegend. Diese Datenreihen lassen aber auch erkennen,

dass es ein gewisses Einschlagsniveau zu geben scheint, welches in allen Wuchsgebieten nach einem Ereignis mit erhöhtem Einschlag schnell wieder erreicht wird. Auch eine wuchsgebietsbezogene Betrachtung lässt bisher keinen Trend zu einer Verminderung der Nutzungsmöglichkeiten erkennen.

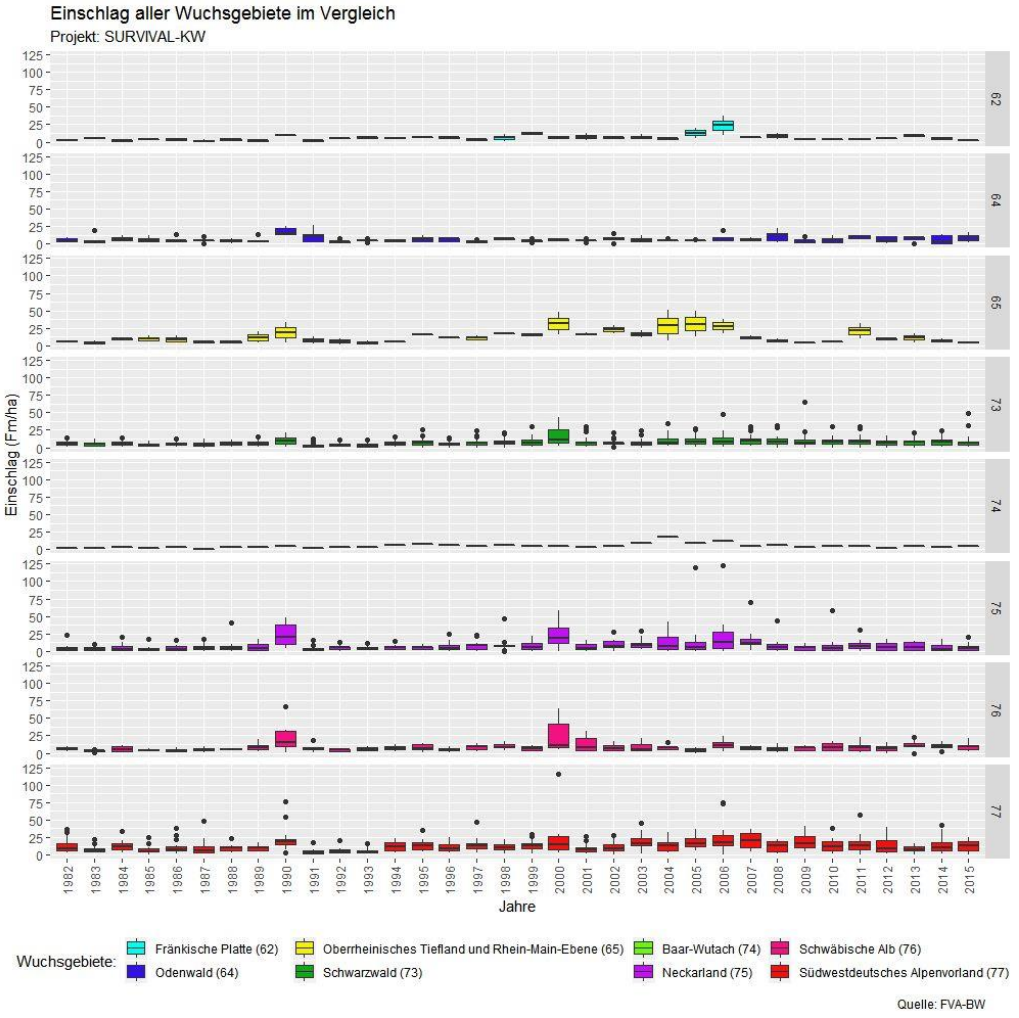


Abbildung 15: Vergleich des Einschlags aller Betriebe der Testbetriebsdaten, eingeteilt in Wuchsgebiete (aus Dännart und Hartebrodt 2019)

Ein Vergleich der Einschläge der Wuchsgebiete Odenwald und Schwarzwald, die unterschiedlich stark von den Stürmen 1990 und 1999 betroffen waren, ist in Abbildung 16 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Mehrheit der Betriebe in den Jahren einer Großkalamität auf einem Einschlagsniveau liegt. Im Odenwald wird allerdings weniger eingeschlagen als im Schwarzwald. Im Schwarzwald gibt es zudem mehr Ausreißer nach oben. Deutlich wird auch, dass trotz unterschiedlicher Betroffenheit, die Einschläge schon in den folgenden Jahren wieder langsam beginnen sich auf ein recht ähnliches Niveau zurück zu pendeln. Das geschieht sowohl nach den Sturmereignissen Vivien und Wiebke (1990), von welchen der Odenwald sehr viel stärker betroffen war, als auch nach dem Jahrhundertsturm Lothar, welcher primär durch den Schwarzwald zog. Selbst Großschadereignisse wie Vivien/Wiebke und Lothar zeigten jeweils eine deutliche räumliche Konzentration, so dass durchschnittliche Mortalitätsraten bei einem Betrachtungszeitraum

von 30 Jahren die tatsächliche Risikosituation von Einzelbetrieben und Regionen noch nicht abbilden. Bei längeren Betrachtungszeiträumen ist dies jedoch grundsätzlich zu erwarten.

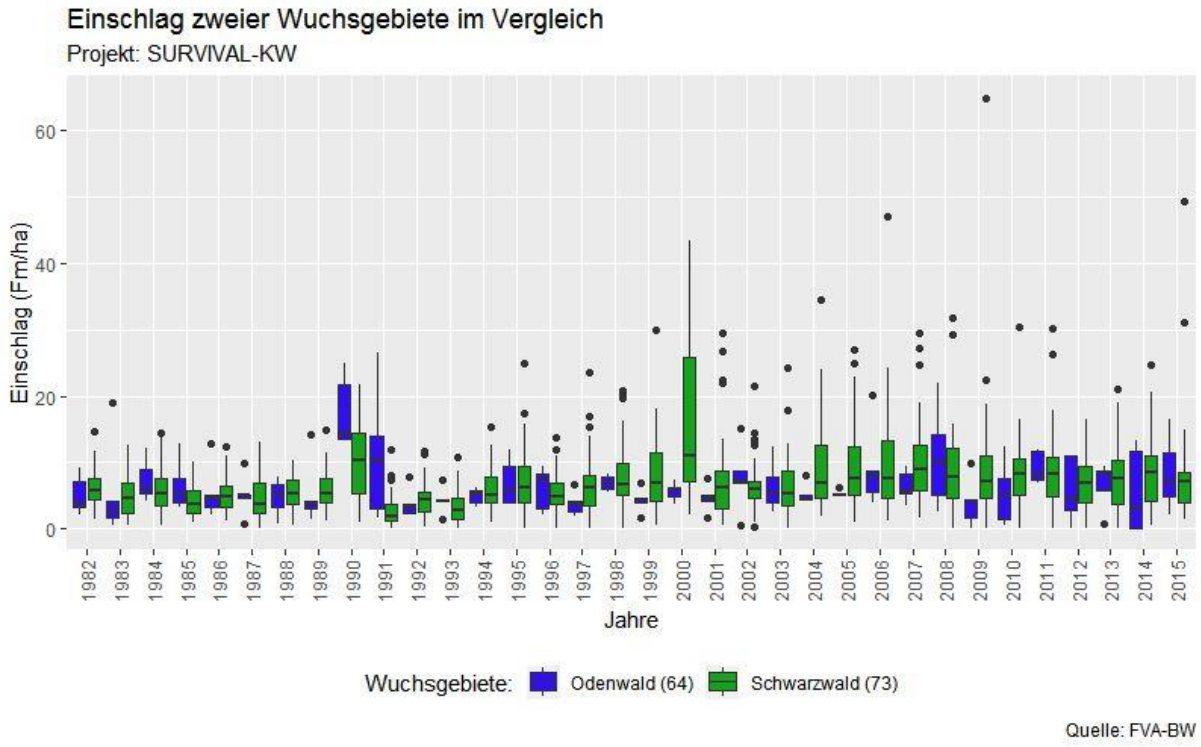


Abbildung 16: Vergleich des Einschlags in Fm/ha zweier Wuchsgebiete über den gesamten Beobachtungszeitraum (aus Dännart und Hartebrodt 2019)

Ein Vergleich der Anteile von zufälliger Nutzung (ZN) in zwei regionalklimatisch unterschiedlichen Wuchsgebieten zeigt, dass das WG Neckarland im Schnitt mehr ZN aufweist als der Schwarzwald (Abbildung 17). Das erscheint zunächst überraschend, da der Schwarzwald mit seinem hohen Fichtenanteil mehr ZN vermuten ließe. Eine Überprüfung der Baumartenanteile am Einschlag zeigt, dass im Neckarland diese ZN auf eine deutliche Erhöhung der zufälligen Nutzung bei Fichte zurückzuführen ist, obwohl diese dort eher geringere Anteile aufweist. Insofern sind hier erste Hinweise auf eine Art „Klimasignal“ auf die ZN-Anteile gegeben, da die klimasensitive Baumart Fichte hier stärker reagiert.

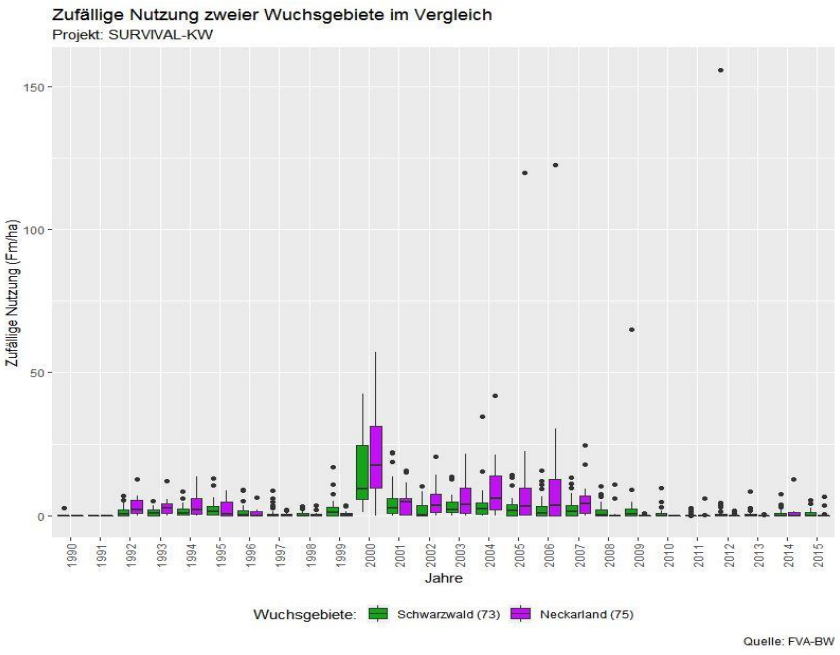


Abbildung 17: Vergleich der zufälligen Nutzung in Fm/ha zweier Wuchsgebiete über den gesamten Beobachtungszeitraum (aus Dännart und Hartebrodt 2019)

Ergebnisse der gemischten Modelle

Aus der beschriebenen Vorgehensweise der „stepwise forward selection“ ergaben die nachfolgenden Variablen-Kombinationen einen signifikanten Aussagewert bezüglich der betrachteten Größen Einschlag und Roheinkommen.

Einschlag (Fm/ha) (log-transfomiert): Temperatur des wärmsten Quartals (°C), Nadelholzanteil am Einschlag (%), Zufällige Nutzung (Fm/ha), Wuchsgebiet, Temperatur des kältesten Monats (°C), Betriebsgröße (ha)

Roheinkommen (€/Fm) (nicht transformiert): Einschlag (Fm/ha), Zufällige Nutzung (Fm/ha), Niederschlag des niederschlagsreichsten Quartals (mm), Temperatur des wärmsten Quartals (°C), Temperatur des kältesten Monats (°C), Betriebsgröße (ha)

Einschlag:

- Die Daten zeigen einen Zusammenhang zwischen Temperatur und Einschlagshöhe: in das Modell flossen sowohl die Temperatur des wärmsten Quartals als auch die Temperatur des kältesten Monats ein, wobei eine höhere Temperatur den Einschlag ansteigen lässt und der kalte Monat negativ mit dem Einschlag korreliert ist.
- Die Größe des Betriebes beeinflusst den Einschlag pro ha negativ.
- In der Zeitreihenanalyse wurde schon deutlich, dass das Wuchsgebiet ein wichtiger Faktor ist. Dies bestätigt sich auch im Einschlagsmodell, die standörtlichen Gegebenheiten sorgen für ein ähnliches Verhalten der Daten.
- Auch die Hinzunahme der zufälligen Nutzung verbesserte das Modell. Dies erscheint logisch, da ein höherer Anteil ZN einen höheren Einschlag nach sich zieht.

Roheinkommen:

- Der Einfluss des Einschlages wurde vorausgesetzt, da davon auszugehen ist, dass ein höherer Einschlag ein höheres Einkommen bedingt.
- Die Integration der zufälligen Nutzung in die Analyse verbesserte auch hier das Modell. Allerdings ist eine starke negative Korrelation zu beobachten. Je mehr zufällige Nutzung desto geringer fällt erwartungsgemäß das Einkommen aus.
- Der Niederschlag des niederschlagsreichsten Quartals beeinflusst das Roheinkommen positiv. Es zeigt sich, dass der Niederschlag für mehr Einschlag und somit für ein höheres Einkommen sorgt.
- Sowohl die Temperatur des wärmsten Quartals als auch die des kältesten Monats sind negativ mit dem Roheinkommen korreliert. Hier wird der Einfluss von „Extremen“ sichtbar.
- Je größer ein Betrieb ist desto höher fällt das Einkommen aus.

Tabelle 9: Werte des Einschlagsmodells

Variable	Schätzer	Konfindenzintervall [95%]	p-Wert
Temp. wärmstes Quartal	12,55	8,54; 16,70	<0,00001
Nadelholzanteil	0,59	0,47; 0,71	<0,00001
Zufällige Nutzung	5,78	4,48; 7,10	<0,00001
Wuchsgebiet	1,64	0,77; 2,51	0,0001
Temp. kältester Monat	-4,83	-8,18; -1,35	0,0150
Betriebsgröße	0,13	0,0099; 0,26	0,0369

Die abhängige Variable wurde log-transformiert, weshalb die Werte zur Interpretation zunächst rücktransformiert werden mussten. Es zeigt sich, dass zum Beispiel die Temperatur des wärmsten Quartals einen großen Einfluss hat. Steigt diese um 1 °C an, erhöht sich der Einschlag um 12,55 % des zugrundeliegenden Einschlages in Fm/ha (Tabelle 9). Das Konfidenzintervall gibt die Grenzen an, die den Wahren aber unbekannten Koeffizienten mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% einschließen. an, dass 95 von 100 Fällen der Untersuchung um die Werte 8,54 und 16,7 schwanken.

Tabelle 10: Werte des Roheinkommensmodells

Variable	Schätzer	Konfidenzintervall [95%]	p-Wert
Einschlag	51,38	50,24; 52,49	0,0000
Zufällige Nutzung	-11,45	-16,44; -6,46	0,0000
Niederschlag nassestes Quartal	0,31	0,075; 0,54	0,0092
Temp. wärmstes Quartal	-10,06	-19,60; -0,51	0,0352
Betriebsgröße	0,51	0,18; 0,84	0,0026
Temp. kältester Monat	-9,22	-16,60; -1,84	0,0152

Zur Interpretation der Werte des Roheinkommens war eine Rücktransformation nicht notwendig, da die Werte, wie bereits beschrieben, nicht transformiert wurden. Als Beispiel soll hier die ZN dienen. Steigt diese um 1 Fm/ha an, verringert sich das Roheinkommen um 11,45 €/Fm, wobei es auch hier das Konfidenzintervall mit einer Spanne von -16,44 bis 6,46 zu beachten gilt, in welcher sich 95 von Fällen der Untersuchung bewegen (Tabelle 10).

5.1.3 Schlussfolgerung

Dieser Teil der Analysen des Moduls 5 stellten den Bezug zur Praxis her, da hier komplett auf Daten realer Forstbetriebe zurückgegriffen werden konnte. Allgemein lässt sich aus den Analysen und somit auch aus den verschiedenen Grafiken die Tendenz ablesen, dass die im Datensatz einbezogenen ZN-Ereignisse (vor 2018!) den „durchschnittlichen“ Privatwaldbetrieb bisher nicht dauerhaft in seiner Ertragskraft zu schädigen schienen. Die Zeitreihenvergleiche der am Testbetriebsnetz teilnehmenden Betriebe zeigen, dass die Schäden, die durch zwei große Sturmereignisse mit nachfolgender Borkenkäferkalamität sowie den Dürresommer 2003 repräsentiert sind, sich bisher langfristig kompensieren ließen. Selbst nach Vivien/Wiebke und Lothar wurde in keinem der betrachteten Betriebe eine existenzbedrohende Schadschwelle erreicht. Trotz des hohen Fichtenanteils im Privatwald sind die bisherigen Ereignisse nicht ausreichend, um eine nicht mehr kompensierbare Mortalität zu verursachen. Effekte, die sich langfristig auf das Wirtschaften auswirken, konnten in einem Beobachtungszeitraum von 25-30 Jahren somit nicht ausfindig gemacht werden. Auch lassen sich aus den Zeitreihen keine Reaktions- oder Verhaltensmuster herauslesen, zum Beispiel, den Einschlag nach einer Großkalamität erst einmal ruhen zu lassen. Es wird nach solchen Ereignissen in der Mehrheit der Betriebe nach kurzer Zeit so eingeschlagen wie vor dem Ereignis. Die durchaus relevante Zahl von Ausreißern zeigt jedoch auch, dass Einzelbetriebe durchaus so stark von Schäden betroffen wurden, dass eine mittel- bis langfristige Beeinträchtigung der Ertragsfähigkeit zu erkennen ist. Insofern ist für den Einzelbetrieb eine aktive Risikominderung weiterhin das Gebot der Stunde. Im Rahmen des Projektes konnten so z.B. die schwerwiegenden Folgen der Sturm- und Borkenkäferkalamitäten der Jahre 2018/2019 noch nicht einbezogen werden.

Die Analyse der Daten mittels der gemischten Modelle hat gezeigt, dass die untersuchten Größen Einschlag und Roheinkommen durch das Klima beeinflusst werden. Die Modellentwicklung konnte zeigen, dass die Einbeziehung von klimatischen Größen die Modelle jeweils signifikant verbesserten. Dieser Einfluss ist allerdings, wie bereits beschrieben, noch kompensierbar. Diese Untersuchung hat für die Vergangenheit und Gegenwart stattgefunden. Da hier aber gezeigt werden konnte, dass sich höhere Quartals- und Monatstemperaturen sowie geringere Niederschläge auf den Einschlag und somit auch auf das Einkommen auswirken, ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend in der Zukunft fortsetzen wird, was ein Handeln und Umdenken bezüglich der Bewirtschaftung von Wäldern und Baumartenwahl notwendig machen wird.

5.2 Optimierte Einschlagsplanung für Realbetriebe

Im zweiten Teil des Moduls 5 wurde die in Modul 4 für Modellbetriebe erarbeitete Methodik zur Optimierung der Einschlagsplanung unter veränderter Überlebenszeit der Baumarten (Modul 1 und 2) auf Realbetriebe in Baden-Württemberg und Bayern angewandt. Zentrale Fragestellung war hier, wie die vom Betriebsoptimierer YAFO vorgeschlagene Einschlagsfrequenz und -Menge durch klimawandelbedingte Veränderungen der Baummortalität beeinflusst wird. Außerdem sollten die ökonomischen Konsequenzen des Klimawandels unter der Annahme entsprechender Anpassungsmaßnahmen ermittelt werden.

5.2.1 Datengrundlage und Methoden

Vier Realbetriebe wurden für die Analysen ausgewählt: Der Universitätswald der Ludwig-Maximilians-Universität („Uniwald“), ein Privatwald im Südosten Niederbayerns (PW_BY_2) und zwei Kommunalwaldbetriebe im Südosten Baden-Württembergs (KW_BW_1 und KW_BW_2) (Tabelle 11).

Tabelle 11: Charakteristika der untersuchten Realbetriebe. Aus Gründen des Datenschutzes wird der Name der Privatwaldbetriebe mit Ausnahme des Uniwaldes hier nicht genannt.

Name	Bundesland/ Bezirk	Eigentumsart	Wuchsbezirk	Holzboden-fläche
Uniwald	Bayern/ Niederbayern	Privatwald	78.06 Niederbayerisches Tertiärhügelland	428 ha
PW_BY_2	Bayern/ Niederbayern	Privatwald	78.06 Nieder-bayerisches Tertiärhügelland	208 ha
KW_BW_1	Baden-Württem-berg/ Oberschwaben	Kommunalwald	77.09 Würmmoräne von Altshausen-Waldsee	619 ha
KW_BW_2	Baden-Württem-berg/ Oberschwaben	Kommunalwald	77.05 Westliches Boden-seegebiet	528 ha

Für alle Betriebe standen Inventurdaten zur Verfügung, die für die Fortschreibung des Waldwachstums mittels des Waldwachstumssimulators SILVA (Pretzsch et al. 2002) aufbereitet wurden. Während für die zwei Betriebe in Niederbayern bereits für YAFO geeignete Datensätze mit

Daten aus Waldwachstumssimulationen mit dem Wuchsmodell SILVA vorlagen, mussten die Daten für die Betriebe aus Baden-Württemberg für SILVA vorbereitet werden. Hierzu wurden die in Baden-Württemberg üblichen Waldentwicklungstypen (WET) in flächenrepräsentative Bestände gefasst und aus den Standortoperaten händisch passende Standorteigenschaften den Beständen zugeordnet. Dies wurde mittels Access umgesetzt, so dass nun aus typischen Basisdaten baden-württembergischer Betriebe die für SILVA nötigen Tabellen erzeugt werden können (nach Anpassung der Zuordnung von Standortseinheiten zu den Beständen). Bei der Verwendung der Repräsentationszahlen je Baum aus der Stichprobe muss dabei immer die im Betrieb aktuell verwendete Stichprobendichte überprüft werden und die Umrechnung auf ha-Werte angepasst werden. Die Access-Datenbank dient ebenso als Datenquelle für YAFO. Alle Betriebe wurden mit der unter Modul 4 beschriebenen Methodik und unter der Annahme eines Kalkulations-Zinssatzes von 1% gerechnet. Der Einfluss des Klimawandels bezieht sich auch hier ausschließlich auf die Veränderung der Überlebenszeit der Hauptbaumarten.

5.2.2 Ergebnisse

Die Analyse der Ergebnisse aus den Optimierungen der Realbetriebe zeigt in allen vier untersuchten Beispielbetrieben ähnliche Tendenzen. Die erreichbaren Annuitäten (Deckungsbeitragäquivalente) sinken im RCP8.5-Klimawandelszenario zwischen 28 und 71 €/(ha*Jahr) bei risikoberücksichtigenden Ausgangswerten von 419 bis 540 €/(ha*Jahr). Die Berücksichtigung der finanziellen und ökologischen Risiken durch die robuste Zielfunktion im Vergleich zur risikoneutralen Optimierung führt in allen Betrieben und Szenarien zu einem Gewinnverzicht zwischen 55 und 279 EUR/(ha*Jahr). Die Höhe der Zielfunktion wird im Klimawandelszenario noch einmal zusätzlich um die Verluste durch Klimawandel belastet.

*Tabelle 12: Finanzielle Kennzahlen [EUR/(ha*Jahr)] der je Klimaszenario separat optimierten Bewirtschaftung. Die Spalte „NPV“ zeigt die Annuitäten ohne Berücksichtigung des Risikos, „RO“ die mit Risiko. „Risikoabpufferung“ zeigt den mittleren Verlust durch die Risikoabpufferung (Diff. NPV – RO), „Verlust durch Klimawandel“ den Verlust durch den Klimawandel (unter Risikobetrachtung) als Differenz RO (AK) – RO (RCP8.5). „AK“: aktuelles Klimaszenario, „RCP8.5“ Klimaextremszenario*

Betrieb	Klima	NPV	RO	Risikoab-pufferung	Verlust durch Klima-wandel
Uniwald	AK	595	540	55	-
	RCP8.5	564	506	58	34
PW_BY_2	AK	542	419	123	-
	RCP8.5	516	391	125	28
KW_BW_1	AK	532	449	83	-
	RCP8.5	480	400	80	49
KW_BW_2	AK	760	481	279	-
	RCP8.5	534	410	124	71

Die langfristige Planung durch den Optimierungsalgorithmus sieht in allen Betrieben und Klimaszenarien einen Vorratsabbau im Vergleich zum heutigen Vorrat vor. Die Unterschiede zwischen den Klimaszenarien sind jedoch marginal (Tabelle 13). Während in den bayerischen Betrieben eine Stabilisierung bzw. Erhöhung zum Ende des Planungshorizonts vorgesehen wird, werden die baden-württembergischen Betriebe kontinuierlich im Vorrat abgebaut. Dies könnte ein Hinweis auf höhere Risiken sein, je weiter westlich der Betrieb sich befindet. Nebeneffekt dieser Vorratsreduktionen ist eine Reduktion der ZE-Anfälle (zwangsbedingter Einschlag = Kalamitätsnutzungen) wie Tabelle 14 zeigt.

Tabelle 13: Vorratsentwicklung der untersuchten Realbetriebe gemäß der jeweils optimalen Lösung. Werte der robusten Lösung in [Vfm/ha].

Betrieb	Klima	aktuell	In 30 Jahren	In 60 Jahren
Uniwald	AK	451	355	345
	RCP8.5		322	354
PW_BY_2	AK	451	374	364
	RCP8.5		355	375
KW_BW_1	AK	400	427	360
	RCP8.5		371	354
KW_BW_2	AK	431	388	371
	RCP8.5		334	398

Tabelle 14: Entwicklung der ZE-Anteile in den untersuchten Realbetrieben gemäß der jeweils optimalen Lösung. Werte der robusten Lösung in [%] des Gesamteinschlags der jeweiligen 5-Jahre-Periode.

Betrieb	Klima	aktuell	In 30 Jahren	In 60 Jahren
Uniwald	AK	25	33	12
	RCP8.5	28	44	16
PW_BY_2	AK	32	31	13
	RCP8.5	37	39	16
KW_BW_1	AK	30	33	11
	RCP8.5	38	41	15
KW_BW_2	AK	49	38	19
	RCP8.5	51	57	29

Die folgenden Abbildungen zeigen die prozentuale Aufteilung des aufstockenden Vorrats auf die neun Baumartengruppen im Anhalt an die Systematik der BWI. Der Ist-Zustand ergibt sich aus den aktuellen Inventurdaten. Die Entwicklung in den Szenarien ist Ergebnis der von YAFO geplanten Abfolge von Endnutzungen. Der Einwuchs ist jeweils als eigenständige Kategorie ausge-

schieden, da dieser modellbedingt nicht nach Baumarten unterschieden ist. Die Frage der Baumartenwahl wird von YAFO nicht beantwortet (s. Modul 4). Die restlichen „Tortenstücke“ zeigen daher die Verteilung der Reste des aktuell aufstockenden Vorrats in 60 Jahren.

Der oben dargestellte Rückgang im Vorrat geht mit einem Absenken des Durchschnittsalters der Bestände durch einen moderaten (im aktuellen Klima) bis forcierten (im Klimawandelszenario) Generationenwechsel auf Folgebestockungen einher. Dies zeigt sich positiv auch in der Entwicklung des zwangsbedingten Einschlags (Tabelle 14, s. hierzu auch differenzierte Ergebnisse für den Uniwald veröffentlicht in Härtl et al. (2019)).

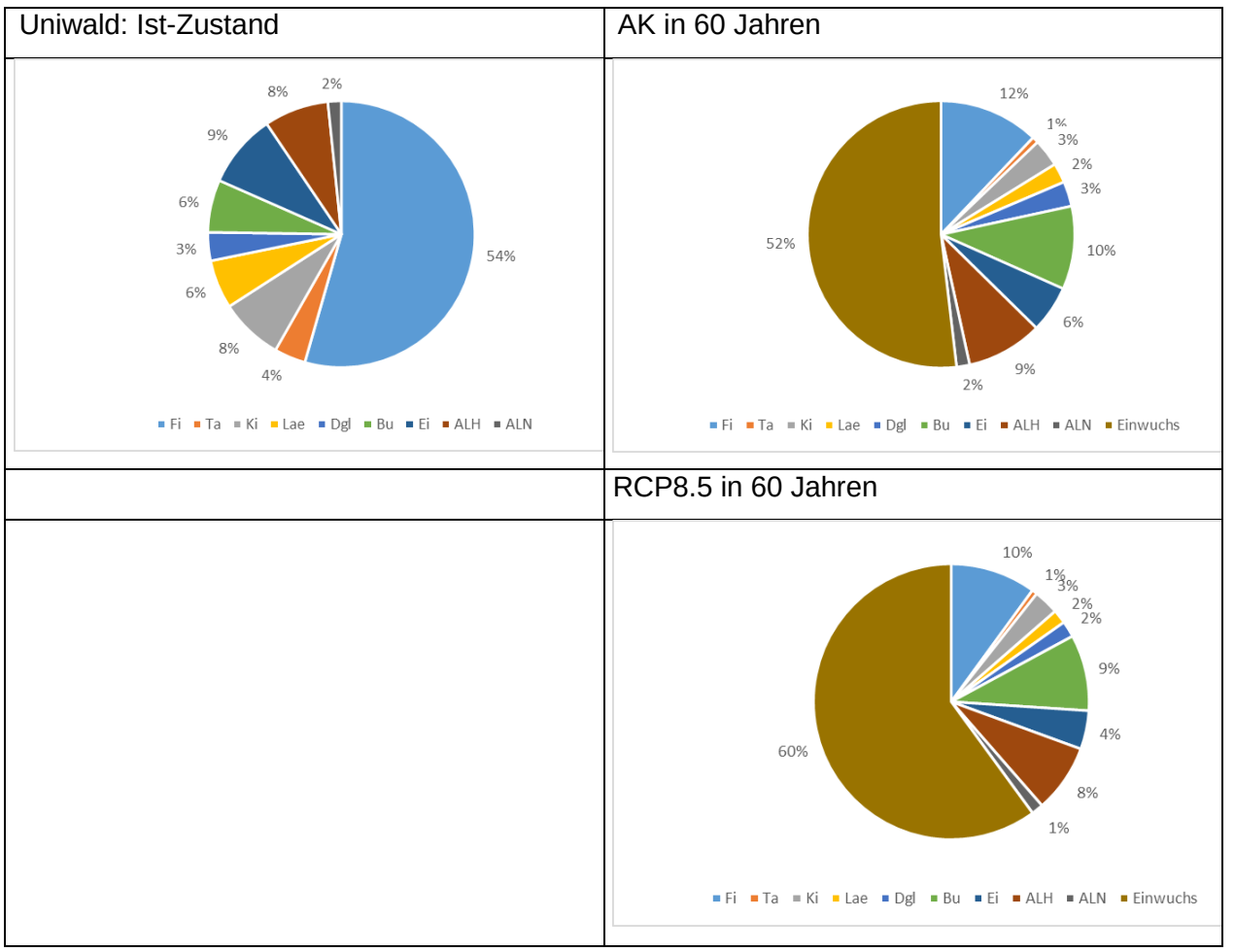


Abbildung 18: Baumartenverteilung zu Beginn und Ende des Betrachtungszeitraums von 60 Jahren für den Betrieb „Uniwald“ unter aktuellem Klima (AK) und dem Klimawandelszenario RCP8.5. Gegeben sind prozentuale Anteile am Gesamtvolumen. Der nach den Endnutzungen simulierte Einwuchs ist als eigenständige Kategorie ausgeschieden, da modellbedingt nicht nach Baumarten aufteilbar.

Der Ist-Zustand aller Betriebe zeigt eine klare Dominanz der Fichte, selbst im schon länger naturnah bewirtschafteten Betrieb PW_BY_2 hat diese Baumart den größten relativen Anteil. Die prognostizierten Verteilungen zeigen, dass vom jetzigen Vorrat nur noch ein Drittel bis zwei Drittel stehen wird. Der Fichtenanteil sinkt überproportional, während insbesondere die Buche im relativen Anteil steigt. Während der Buchenanteil im Uniwald absolut steigt (im Schnitt jüngere Bestände), sinkt er absolut in den anderen Betrieben (aufgrund von Endnutzungen in Altbeständen). Der Vergleich der zwei Klimaszenarien zeigt eine deutliche Erhöhung des in 60 Jahren erreichten

Einwuchsvolumens. Dies ist eine Folge der verkürzten Umtriebszeiten. Eine zeitig frühere Endnutzung hilft, die sich über die Lebensdauer auf höhere Werte akkumulierenden Risiken zu reduzieren, indem gar nicht gewartet wird, bis sie eintreten könnten (höhere Risiken mit steigendem Alter, insbesondere in der Fichte).

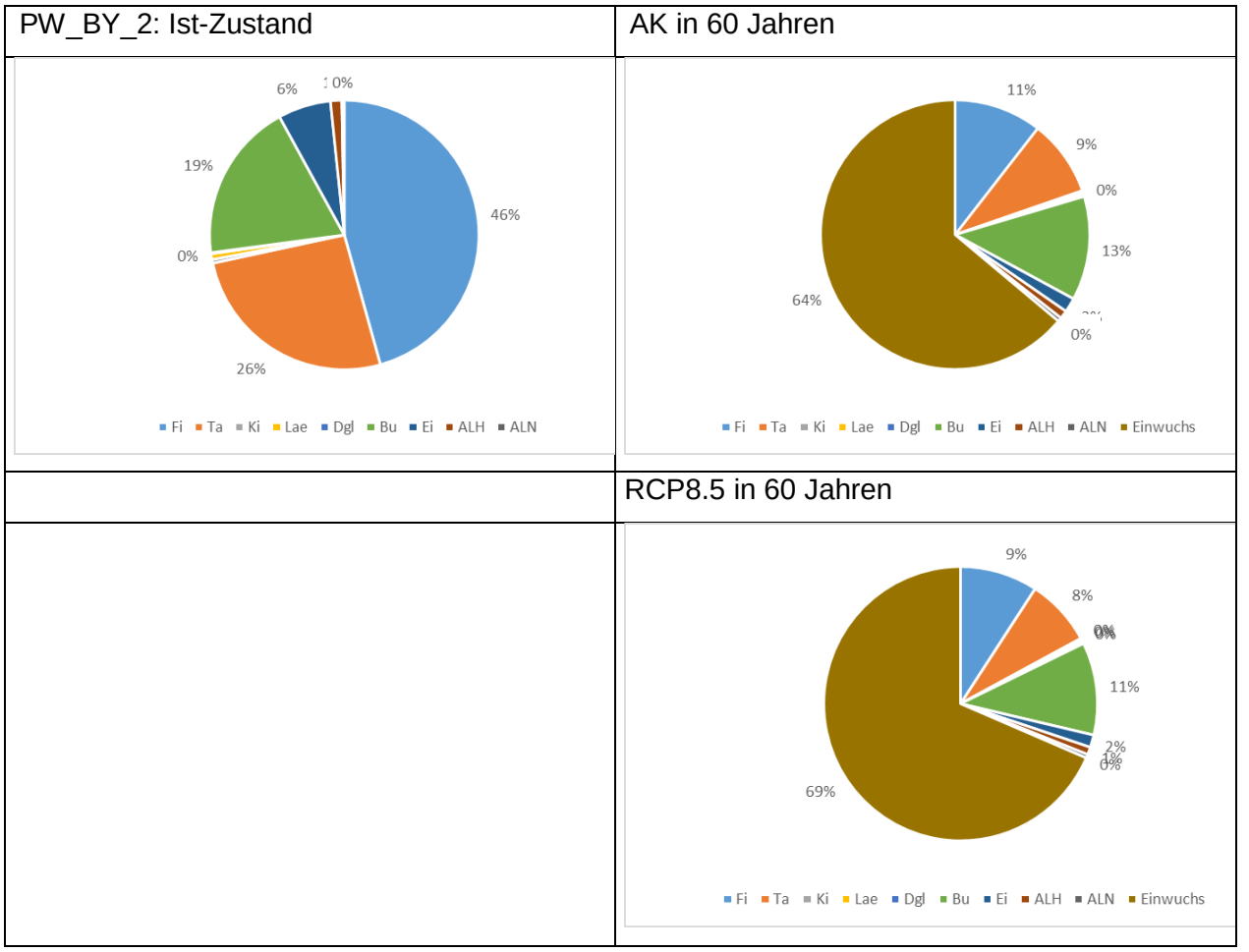


Abbildung 19: Baumartenverteilung zu Beginn und Ende des Betrachtungszeitraums von 60 Jahren für den Betrieb „PW_BY_2“ unter aktuellem Klima (AK) und dem Klimawandelszenario RCP8.5. Gegeben sind prozentuale Anteile am Gesamtvolumen. Der nach den Endnutzungen simulierte Einwuchs ist als eigenständige Kategorie ausgeschieden, da modellbedingt nicht nach Baumarten aufteilbar.

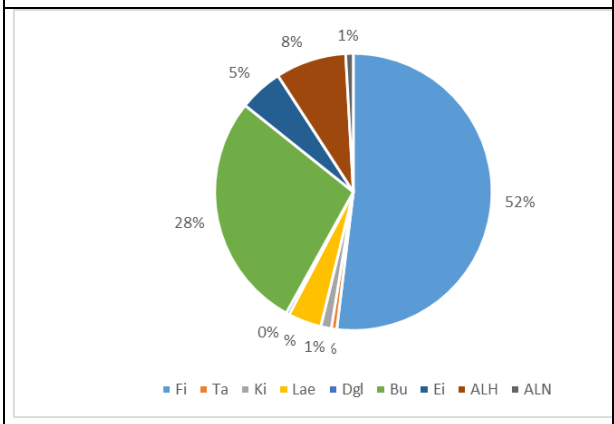
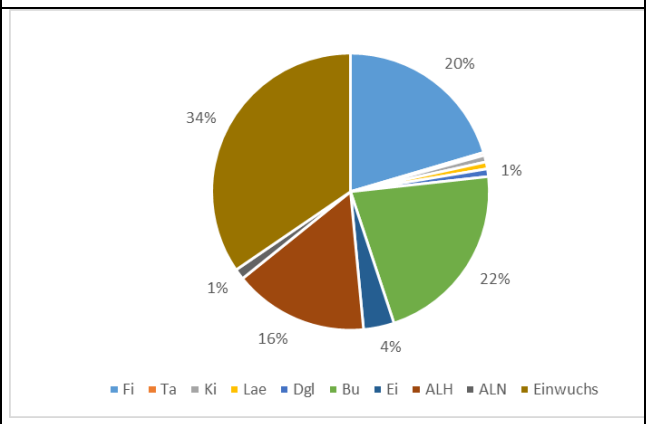
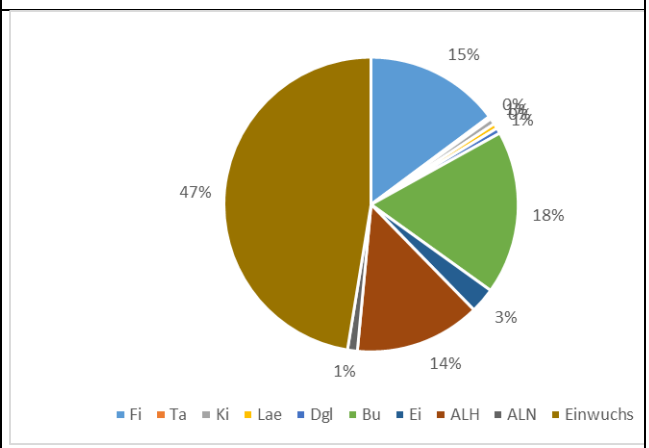
KW_BW_1: Ist-Zustand	AK in 60 Jahren
	
	RCP8.5 in 60 Jahren
	

Abbildung 20: Baumartenverteilung zu Beginn und Ende des Betrachtungszeitraums von 60 Jahren für den Betrieb „KW_BW_1“ unter aktuellem Klima (AK) und dem Klimawandelszenario RCP8.5. Gegeben sind prozentuale Anteile am Gesamtvolumen. Der nach den Endnutzungen simulierte Einwuchs ist als eigenständige Kategorie ausgeschieden, da modellbedingt nicht nach Baumarten aufteilbar.

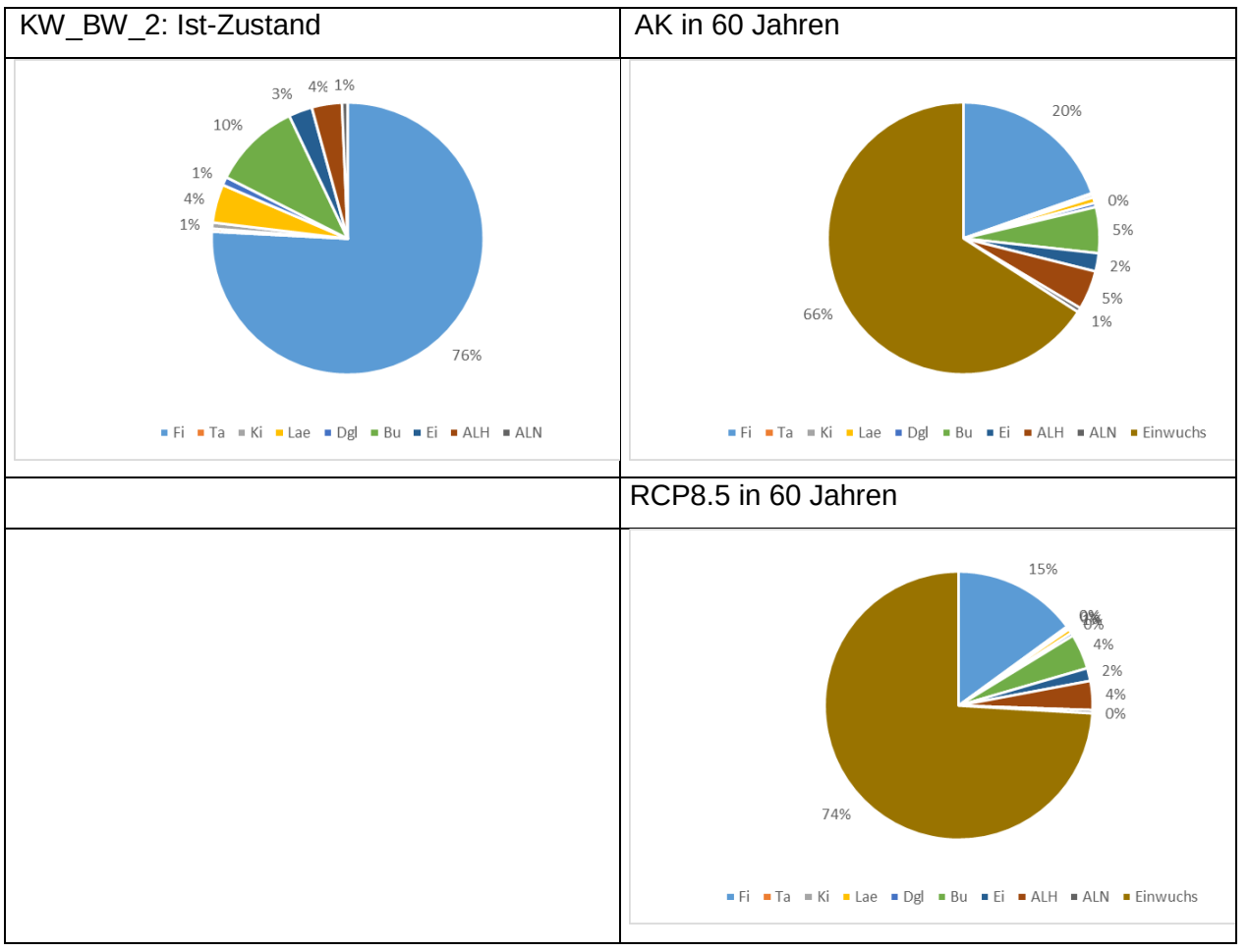


Abbildung 21: Baumartenverteilung zu Beginn und Ende des Betrachtungszeitraums von 60 Jahren für den Betrieb „KW_BW_2“ unter aktuellem Klima (AK) und dem Klimawandelszenario RCP8.5. Gegeben sind prozentuale Anteile am Gesamtvolumen. Der nach den Endnutzungen simulierte Einwuchs ist als eigenständige Kategorie ausgeschieden, da modellbedingt nicht nach Baumarten aufteilbar.

5.2.3 Schlussfolgerung

Für die ausgewählten Forstbetriebe führte das Klimawandelszenario in unseren Modellrechnungen zu ökonomischen Verlusten von 6 bis 15%. Diese Zahlen quantifizieren die ökonomischen Konsequenzen veränderter Überlebenszeiten der Hauptbaumarten, selbst wenn diese bekannt sind und in der Einschlagsplanung berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch deutlich, dass Anpassungsstrategien die ökonomischen Konsequenzen abpuffern können. So kann auf klimabedingte Änderungen der Überlebenswahrscheinlichkeiten zum Teil durch eine Verkürzung der Umtriebszeit reagiert werden. In allen Betrieben kam es in der Modellrechnung zur Absenkung des Nadelholzanteiles im Altbestand. Zur Erhaltung von Nadelholzanteilen könnte hier durch Naturverjüngung oder aktive Einbringung (z.B. von Tanne und Douglasie) gegengesteuert werden. Unterschiedliche Einwuchsszenarien wurden jedoch bisher nicht berücksichtigt und könnten Gegenstand zukünftiger Forschung sein.

III) Gesamtheitliche Schlussfolgerung und Ausblick

Bezugnehmend auf die Aufgabenstellung dieses Projektes konnten folgende Ziele erreicht werden:

1. Es stehen nun Modelle zur **Quantifizierung der Einflussgrößen auf die sich verändernden Überlebenszeiten** der Baumarten Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Tanne (*Abies alba* Mill.), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco), Buche (*Fagus sylvatica* L.), Traubeneiche (*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.) und Stieleiche (*Quercus robur* L.) in Rein- und Mischbeständen vor. Die Kalibrierung der Modelle an einem deutsch-europäischen Datensatz erlaubte die großflächige **Anwendung auf das Netz der BWI**, ohne den Extrapolationsbereich zu überschreiten. Bei der Anwendung von Klimaszenarien muss jedoch stets geprüft werden, inwieweit die Modelle für diese Klimavariablen extrapoliert werden können. Ebenso sollten bei der weiteren Anwendung und Interpretation die entsprechenden Unsicherheiten statistischer Schätzungen (s. Kapitel II.1.2) berücksichtigt werden. Die entsprechenden Modelle und ihre Koeffizienten wurden in der Publikation Brandl et al. (2020) veröffentlicht.
2. Die **Validierung der Modelle an langfristigen Versuchsflächen in Baden-Württemberg** zeigte, dass die Modelle in der Lage sind realistische Größenordnungen vorherzusagen. Dieser Schritt war bedeutend, um methodische Erkenntnisse für die zukünftige Weiterentwicklung zu identifizieren. Hierzu gehört insbesondere die Einbeziehung zeitveränderlicher Kovariablen, welche auch die Dynamisierung forstbetrieblicher Modelle unterstützen könnte (Maringer und Albrecht 2019).
3. Basierend auf den neuen und validierten Überlebenszeitmodellen wurden die **Auswirkungen des Klimawandels auf die finanzielle Ertrags- und Risiko-Situation** von idealisierten und realen Forstbetrieben abgeschätzt. Für die untersuchten Modell- und Realbetriebe zeigte sich durchgehend ein negativer Einfluss des Klimawandels durch ein sich verschlechterndes Risiko-Ertrags-Verhältnis. Hinsichtlich möglicher Anpassungsstrategien konnten folgende Erkenntnisse erzielt werden:
   a) Baumartenwahl: Die statistischen Modelle aus Modul 1 zeigen für Fichte und Douglasie einen signifikant positiven Einfluss der Beimischung anderer Baumarten auf die Überlebenszeit dieser Baumarten (Brandl et al. 2020). Der verwendete ICP Datensatz zeigte jedoch auch für die anderen Baumarten in der Tendenz einen positiven Einfluss. Der Anbau ökonomisch wichtiger, aber risikobehafteter Nadelholzarten wie Fichte und Douglasie in Mischbeständen könnte damit eine wichtige Kompromisslösung für ein vorteilhaftes Ertrags-Risiko-Verhältnis darstellen. Dies wurde durch die beispielhafte Anwendung auf Fichten-Buchen Bestände deutlich. Die Studien zeigten aber auch, dass die Vorteilhaftigkeit der Mischbestände von einer nur moderaten Erhöhung der Pflanz- und Pflegekosten abhängt – bei erheblich steigenden Pflanzkosten können so Mischungen ökonomisch

unvorteilhaft werden. Zudem muss die Reduktion der Holzqualität vermieden werden. Sonst können auch die ökonomisch bedeutsamen Stabilisierungseffekte diese Nachteile nicht kompensieren (Paul et al. 2019).

b) Werden Risiken in eine risiko-sensitive Einschlagsplanung einbezogen, so lässt sich eine deutlich stärkere Verteilung der Einschläge über die Zeit beobachten. Dieses Modellergebnis legt eine zeitliche Diversifikation der Holzeinschläge nahe. Verkürzungen der Umtriebszeit sollten damit nicht von heute auf morgen, sondern zeitlich gestaffelt umgesetzt werden. Entscheidend für einen erfolgreichen Übergang von Reinbeständen zu gemischten und ungleichaltrigen Beständen ist somit ein frühzeitiger Beginn der Verjüngungstätigkeiten.

c) Unter Berücksichtigung veränderter Risiken im Klimawandel, wurden für die hier untersuchten Forstbetriebe eine Verkürzung der Umtriebszeit, insbesondere für Nadelhölzer beobachtet. Dies führte auch zu einer deutlichen Abnahme des Nadelholzanteiles in den höheren Altersklassen. Durch die optimierte Einschlagsplanung zeigten sich oft zunächst abnehmende, dann aber wieder ansteigende Holzvorräte (Härtl et al. 2019). Immerwährend konstante Holzeinschläge erweisen sich demnach als nicht optimal.

Ausblick

Dieses Projekt hat die Bedeutung der Quantifizierung der Überlebenswahrscheinlichkeiten für forstbetriebliche Entscheidungen und Entscheidungsmodelle aufgezeigt. Damit unterstreicht dieses Projekt die Bedeutung langfristiger und europaweiter Inventurdaten, wie der Waldzustandserhebung und dem ICP Forests Netzwerks.Forest Netzwerks. Die erarbeiteten Überlebenswahrscheinlichkeiten sind bedeutsam für zukünftig verbesserte klimasensitive Modellierung mit der auf Bundeswaldinventurdaten basierenden WaldEntwicklungs- und HolzAufkommenmodellierung (WEHAM). In WEHAM waren bisher bis auf die indirekt in den Inventurdaten enthaltenen Auswirkungen, keine weiteren klimawandelbedingten Effekte wie eben Mortalitätsereignisse abbildbar. Eine verbesserte Schätzung der Risiken auf großräumiger Datenbasis unterstützt die angepasste Planung unter Klimawandel. Die ökonomischen Folgen solcher Risiken können jedoch nur mit Modellrechnungen abgebildet werden, die diese Risiken auch ökonomisch in die Entscheidung integrieren. Hier konnte das Projekt wesentliche methodische Erweiterungen und erste Anwendungen und Erkenntnisse liefern. Diese bilden eine Reihe von Anknüpfungspunkten für weitere Forschung. So hat sich dieses Projekt mit Bezug auf Anpassungsstrategien der Wälder an den Klimawandel auf eine im Wesentlichen ökonomische Zielsetzung fokussiert. Diese könnte in zukünftigen Forschungsvorhaben um weitere Zielsetzungen, wie die Bereitstellung von Wasser, Erholungsleistungen oder Kohlestoffspeicherung erweitert werden (Knoke et al. 2017). Zudem sollten gezielt Nadelholz-Alternativen zu Fichte und Kiefer auf mögliche Beiträge zum ökonomischen Erfolg und zur Multifunktionalität untersucht werden, was vermutlich auch die Erschließung neuer

Datenquellen aus Ländern zur Folge hat, die diese Baumarten bereits jetzt intensiv anbauen. Auch scheint es eine lohnende Herausforderung, die robuste (und multifunktionale) Optimierung der Waldwirtschaft weiter voranzutreiben. Langfristig sollte die Optimierung der Ertragsplanung mit der Optimierung der Produktionsplanung zusammengeführt werden. Eine simultane Betrachtung beider Planungsperspektiven stellt allerdings eine große Herausforderung dar. Lediglich auf der Bestandesebene ist es bisher gelungen, Einschlagsplanung und Zusammensetzung (auch der Folgebestockung) simultan zu optimieren (Rossiger et al. 2011, Messerer et al. 2017). Allerdings wurden in solchen Optimierungen bislang allein ökonomische Zielsetzungen berücksichtigt. Auf der Betriebsebene fehlen solche Ansätze bisher gänzlich, auch solche die allein auf ökonomische Indikatoren fokussieren. Die Extremereignisse in Teilen Deutschlands der Jahre 2018 und 2019, die sich sehr deutlich in den Waldzustandsdaten 2019 wiederspiegeln, zeigen auch, dass es lohnenswert ist, Auswertungen zu Überlebenszeiten nicht nur mit zeitveränderlichen Variablen, Bestandesparametern, weiteren Baumarten sondern auch mit längeren Datenreihen und Verknüpfungen mit anderen Modellen weiter zu entwickeln. So sollten Datenreihen möglichst Effekte von „heißen Dürren“ enthalten, die für den Klimawandel typisch erscheinen. Außerdem sind Verknüpfungen mit Wasserhaushalts-, Sturmrisiko- oder Borkenkäfervorhersagemodellen im Falle der Fichte denkbar.

IV) Liste der Veröffentlichungen

1 Publikationen

Artikel in begutachteten internationalen Fachzeitschriften

Brandl, S., Paul, C., Knoke, T., Falk, W. (2020): The influence of climate and management on survival probability for Germany's most important tree species. Forest Ecology and Management 458, 117652. 10.1016/j.foreco.2019.117652.

Friedrich, S.; Paul, C.; Brandl, S.; Biber, P.; Messerer, K.; Knoke, T. (2019): Economic impact of growth effects in mixed stands of Norway spruce and European beech – A simulation based study. Forest Policy and Economics (104): 65-80. doi: 10.1016/j.forpol.2019.04.003.

Knoke, T., Messerer, K., Paul, C. (2017): The Role of Economic Diversification in Forest Ecosystem Management. Curr. Forestry Rep. 3 (2), 93–106. 10.1007/s40725-017-0054-3.

Paul, C.; Brandl, S.; Friedrich, S.; Falk, W.; Härtl, F.; Knoke, T. (2019): Climate change and mixed forests: how do altered survival probabilities impact economically desirable species proportions of Norway spruce and European beech? Annals of Forest Science 76 (1). doi: 10.1007/s13595-018-0793-8.

Artikel in deutschsprachigen Fachzeitschriften

Bender, S.; Wiesehahn, J.; Jánosi, K.; Bolte, A. (2019): Bundesweite Projektion der Überlebensraten wichtiger Baumarten. AFZ-Der Wald (02): 18-20.

Brandl, S.; Falk,W. (2019): Mortalität von Fichte und Buche – Einfluss von Klima und Mischung. AFZ-Der Wald (02): 10-13.

Dännart, K.; Hartebrodt, C. (2019): Ertrags- und Risikosituation der TBN-Betriebe Baden-Württembergs. AFZ-Der Wald (02): 24-27.

Härtl, F.; Paul, C.; Knoke, T. (2019): Entwicklung des Universitätswaldes der LMU im Klimawandel. AFZ-Der Wald (02): 28-31.

Maringer, J.; Albrecht, A. (2019): Prüfung klimadynamischer Mortalitätsmodelle mit externen Daten. AFZ-Der Wald (02): 14-17.

Paul, C.; Brandl, S.; Friedrich, S.; Härtl, F.; Falk, W.; Knoke, T. (2019): Der Einfluss des Klimawandels auf die Baumartenwahl. AFZ-Der Wald (02): 21-23.

Paul, C.; Härtl, F.; Knoke, T. (2019): Das Waldklimafonds-Verbundprojekt SURVIVAL-KW. AFZ-Der Wald (02): 9.

Paul, C.; Benfer, N. (2019): Risiko und Risikomanagement in Theorie und Praxis. AFZ-Der Wald (22): 31-34.

Eingereichte Publikationen

Chreptun, C.; Paul, C., Knoke, T. (akzeptiert): Forstplanung: Wie lässt sich angesichts von zunehmenden Extremereignissen die Waldbewirtschaftung noch planen? Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen

Maringer, J.; Stelzer, A.-S.; Paul, C., Albrecht A. (eingereicht): Ninety-five years of observed disturbance-based tree mortality modeled with climate sensitive accelerated failure time models, überarbeiteter Artikel eingereicht bei European Journal of Forestry

2 Vorträge

Bender, S. Risiko-Workshop, Lohr am Main, 14.07.20216: BWI & Modellierungen - EFDM, WEHAM & WEHAM-Szenarien

Bender, S.; Jánosi, K.; Wiesehahn J., Risiko-Workshop, Lohr am Main, 27.06.2018: Vorstellung des WEHAM Survivalszenarios & Anwendung veränderter Überlebenskurven auf die BWI

Brandl S, Falk W, Paul C, Bender A (2018) Der Einfluss von Klima und Mischung auf die Mortalität von Fichte und Buche. Forstwissenschaftliche Tagung, Göttingen, 25.09.2018

Brandl S, Falk W (2019) Modellierung von Überlebenswahrscheinlichkeiten. Seminar „Aspekte der Waldökosystemforschung“, TU München, 05.02.2019

Brandl S, Falk W, Paul C (2018) Der Einfluss von Klima und Mischung auf die Überlebenszeiten von Fichte und Buche, Arbeitstreffen der AG Krone der Waldzustandserhebung, Arnsberg, 12.06.2018

Brandl S, Burggraef L, Falk W (2018) Effects of climate and management on productivity and mortality of European beech and Norway spruce in Europe. 7th ICP Forests Scientific Conference - European forests in a changing environment: Air pollution, climate change and forest management, Riga, 22.05.2018

Brandl S, Falk W, Paul C (2018) Überlebenszeitmodellierung für Fichte, Buche und Kiefer. Seminar „Aspekte der Waldökosystemforschung“, TU München, 30.01.2018

Brandl S, Falk W, Paul C (2017) Survival-KW - Veränderte Überlebenszeit von Waldbeständen: Ökonomische Folgen des Klimawandels für die Forstwirtschaft. Managementoptionen zur Optimierung des Risiko-Ertrags-Verhältnisses unter geändertem Klima - Modul 1. Risikoworkshop, Lohr a. M., 28.06.2017

Brandl S (2017) Tree species suitability under climate change - Analyzing distribution, productivity and mortality based on large-scale inventories. IRSTEA, Nogent-sur-Vernisson, 12.05.2017

Brandl S, Falk W, Mette T (2019): The Influence of Average Climate Conditions and Extreme Climatic Events on Survival of Spruce, Pine and Beech in Europe. Poster auf der 49. Jahrestagung der Gesellschaft für Ökologie. In: GfÖ 2019: Science meets practice; 49th Annual Meeting of the Ecological Society of Germany, Austria and Switzerland; University of Münster, 9 - 13 September 2019; book of abstracts. Berlin 2019. Gesellschaft für Ökologie.

Friedrich, S.; Paul, C.; Brandl, S.; Knoke, T. (2018): Economic evaluation of growth effects in mixed forest stands: A simulation study for Norway spruce and European beech in Southern Germany. 2018 Biennial Seminar, Scandinavian Society of Forest Economists (SSFE), 22.-25. Mai 2018, Helsingoer, Dänemark.

Maringer J, Brandl S (2018) Grenzen der Survivalmodellierung in der Ökologie? Risikoworkshop, Lohr a. M., 28.06.2018

Messerer, K.; Paul, C. (2019): Auswirkungen des Klimawandels auf Risiko und Ertrag deutscher Forstbetriebe – ein Modellansatz auf Basis der BWI. Risikoworkshop 2019. Lohr a.M..

Paul C, Brandl S (2016) SURVIVAL-KW „Überlebenszeit-Wald-Klimawandel“. Risikoworkshop, Lohr a. M., 14.07.2016

Paul, C. (2017): Identifying suitable species compositions to mitigate economic risks under climate change - A mechanistic modelling approach under uncertainty. IUFRO - 125th Anniversary Congress, Freiburg.

Paul, C., Brandl, S., Friedrich, S., Falk, W., Knoke, T., (2018): The effects of altered survival probabilities on economically optimal species compositions - an example from Germany using a pan-European dataset. Scandinavian Forest Economics - Proceedings of the Biennial Meeting of the Scandinavian Society of Forest Economics (48), 50–51.

Paul, C. (2019): Risiko und Risikomanagement – Theoretische Konzepte und ihre Relevanz im forstlichen Alltag. Tagung „Risikomanagement im Cluster Forst & Holz“ - Tagung des Kompetenznetzes für Nachhaltige e.V. – 3 N Kompetenzzentrum Niedersachsen e.V. 27.06.2019, Göttingen

Paul, C. (2020): Der Einfluss des Klimawandels auf die Baumartenwahl – eine forstökonomische Perspektive. Tagung „Fit für die Zukunft – Oberbergischer Wald im Jahr 2050“. 29.02.2020 Schloss Homburg

V) Literatur

Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears DD, Hogg EH, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim J-H, Allard G, Running SW, Semerci A, Cobb N (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. For. Ecol. Manag. 259:660–684. doi:10.1016/j.foreco.2009.09.001

Allen CD, Breshears DD, McDowell NG (2015) On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. Ecosphere 6:art129. doi:10.1890/ES15-00203.1

Bender S, Wiesehahn J, Jánosi K, Bolte A (2019) Bundesweite Projektion der Überlebensraten wichtiger Baumarten. AFZ-Der Wald:18–20

Bennett EM, Cramer W, Begossi A et al (2015) Linking biodiversity, ecosystem services, and human well-being; Three challenges for designing research for sustainability. Curr. Opin. Environ. Sustain 14:76–85. doi:10.1016/j.cosust.2015.03.007

Ben-Tal A, El Ghaoui L, Nemirovski A (2009) Robust optimization. Princeton University Press, Princeton

Bigler C, Bräker OU, Bugmann H, Dobbertin M, Rigling A (2006) Drought as an Inciting Mortality Factor in Scots Pine Stands of the Valais, Switzerland. Ecosystems 9:330–343. doi:10.1007/s10021-005-0126-2

Bolte A, Ammer C, Löf M, Madsen P, Nabuurs G-J, Schall P, Spathelf P, Rock J (2009) Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. Scan. J. For. Res. 24:473–482

Bösch B (2016) WEHAM 2012 Version 2.1 Modelle und Algorithmen. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Brandl H, Hercher W, Löbell E, Nain W, Olischläger T, Wicht-Lückge G (1999) 20 Jahre Testbetriebsnetz Kleinprivatwald in Baden-Württemberg – Betriebswirtschaftliche Ergebnisse 1979-1998. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Brandl S, Paul C, Knoke T, Falk W (2020) The influence of climate and management on survival probability for Germany’s most important tree species. For. Ecol. Manag. 458:117652. doi:10.1016/j.foreco.2019.117652

Broström G (2015) Event history analysis with R. CRC Press, Boca Raton, FL

Campbell HE, Gray AM, Harris AL, Briggs AH, Taylor MA (2010) Estimation and external validation of a new prognostic model for predicting recurrence-free survival for early breast cancer patients in the UK. Br J Cancer 103:776–786. doi:10.1038/sj.bjc.6605863

Clasen C (2015) Der Verlust von Baumarten in Mischbeständen durch Schalenwildverbiss; [Losing admixed tree species by ungulate browsing: A new approach to value financial consequences under different site conditions]. Dissertation, München

Clasen C, Griess VC, Knoke T (2011a) Financial consequences of losing admixed tree species: A new approach to value increased financial risks by ungulate browsing. For. Pol. Econ. 13:503–511. doi:10.1016/j.forpol.2011.05.005

Clasen C, Griess VC, Knoke T (2011b) Financial consequences of losing admixed tree species: A new approach to value increased financial risks by ungulate browsing. For. Pol. Econ. 13:503–511. doi:10.1016/j.forpol.2011.05.005

Cox DR (1972) Regression Models and Life-Tables. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological) 34:187–202. doi:10.1111/j.2517-6161.1972.tb00899.x

Dännart K, Hartebrodt C (2019) Ertrags- und Risikosituation der TBN-Betriebe Baden-Württembergs. AFZ-Der Wald:24–27

Dieter M, Moog M, Borchert H (2001) Considering Serious Hazards in Forest Management Decision-Making. In: Gadow K von (Hrsg) Risk Analysis in Forest Management. Springer Netherlands, Dordrecht, S 201–232

Erdogan E (2006) Ambiguous Chance Constrained Programs: Algorithms and Applications. PhD thesis, New York

Fick SE, Hijmans RJ (2017) WorldClim 2; New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. Int. J. Climatol. 37:4302–4315. doi:10.1002/joc.5086

Friedrich S, Paul C, Brandl S, Biber P, Messerer K, Knoke T (2019) Economic impact of growth effects in mixed stands of Norway spruce and European beech – A simulation based study. For. Pol. Econ. 104:65–80. doi:10.1016/j.forpol.2019.04.003

Gerds TA, Schumacher M (2006) Consistent Estimation of the Expected Brier Score in General Survival Models with Right-Censored Event Times. Biom. J. 48:1029–1040. doi:10.1002/bimj.200610301

Griess V, Knoke T (2013) Bioeconomic modeling of mixed Norway spruce—European beech stands: economic consequences of considering ecological effects. Eur J Forest Res 132:511–522. doi:10.1007/s10342-013-0692-3

Griess VC, Acevedo R, Härtl F, Staupendahl K, Knoke T (2012) Does mixing tree species enhance stand resistance against natural hazards? A case study for spruce. For. Ecol. Manag. 267:284–296. doi:10.1016/j.foreco.2011.11.035

Hanewinkel M, Hummel S, Albrecht A (2011) Assessing natural hazards in forestry for risk management; A review. Eur J Forest Res 130:329–351. doi:10.1007/s10342-010-0392-1

Härtl F, Knoke T (2019) Coarse Woody Debris Management with Ambiguous Chance Constrained Robust Optimization. Forests 10:504. doi:10.3390/f10060504

Härtl F, Hahn A, Knoke T (2013) Risk-sensitive planning support for forest enterprises: The YAFO model. Comp. Elec. Agr. 94:58–70. doi:10.1016/j.compag.2013.03.004

Härtl F, Paul C, Knoke T (2019) Entwicklung des Universitätswaldes der LMU im Klimawandel. AFZ-Der Wald:28–31

Härtl FH (2015) Der Einfluss des Holzpreises auf die Konkurrenz zwischen stofflicher und thermischer Holzverwertung: Ein forstbetrieblicher Planungsansatz unter Berücksichtigung von Risikoaspekten. Shaker Aachen

Härtl FH, Barka I, Hahn WA, Hlásny T, Irauschek F, Knoke T, Lexer MJ, Griess VC (2016) Multifunctionality in European mountain forests — an optimization under changing climatic conditions. Can. J. For. Res. 46:163–171. doi:10.1139/cjfr-2015-0264

Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Int. J. Climatol. 25:1965–1978. doi:10.1002/joc.1276

Hofmann M, Durka W, Liesebach M, Bruelheide H (2015) Intraspecific variability in frost hardiness of Fagus sylvatica L. Eur J Forest Res 134:433–441. doi:10.1007/s10342-015-0862-6

Holthausen N, Hanewinkel M, Holecy J (2004) Risikomanagement in der Forstwirtschaft am Beispiel des Sturmrisikos. Forstarchiv 75:149–157

Hülsmann L, Bugmann HKM, Commarmot B, Meyer P, Zimmermann S, Brang P (2016) Does one model fit all?; Patterns of beech mortality in natural forests of three European regions. Ecol. Appl. 26:2465–2479. doi:10.1002/eap.1388

Jactel H, Bauhus J, Boberg J, Bonal D, Castagneyrol B, Gardiner B, Gonzalez-Olabarria JR, Koricheva J, Meurisse N, Brockerhoff EG (2017) Tree Diversity Drives Forest Stand Resistance to Natural Disturbances. Current Forestry Reports 3:223–243. doi:10.1007/s40725-017-0064-1

Jorion P (2009) Value at risk; The new benchmark for managing financial risk. McGraw-Hill, New York, NY

Knoke T (2008) Mixed forests and finance—Methodological approaches. Ecol. Econ. 65:590–601

Knoke T (2017) Betriebswirtschaftliche Chancen und Risiken der Fichtenwirtschaft im Klimawandel. LWF Wissen:139–144

Knoke T, Seifert T (2008) Integrating selected ecological effects of mixed European beech–Norway spruce stands in bioeconomic modelling. Ecol. Modell. 210:487–498. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.08.011

Knoke T, Messerer K, Paul C (2017) The Role of Economic Diversification in Forest Ecosystem Management. Curr. Forestry Rep. 3:93–106. doi:10.1007/s40725-017-0054-3

Manion PD (1981) Tree disease concepts. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Maringer J, Albrecht A (2019) Prüfung klimadynamischer Mortalitätsmodelle mit externen Daten. AFZ-Der Wald:14–17

Markowitz H (1952) Portfolio Selection. The Journal of Finance 7:77–91. doi:10.1111/j.1540-6261.1952.tb01525.x

Markowitz H, Blay K (2014) Risk-return analysis; The theory and practice of rational investing. McGraw-Hill Education, [New York]

Messerer K, Pretzsch H, Knoke T (2017) A non-stochastic portfolio model for optimizing the transformation of an even-aged forest stand to continuous cover forestry when information about return fluctuation is incomplete. Ann. For. Sci. 74:45. doi:10.1007/s13595-017-0643-0

Mills M (2011) Introducing survival and event history analysis. Sage, Los Angeles

Möllmann TB, Möhring B (2017) A practical way to integrate risk in forest management decisions. Ann. For. Sci. 74:75. doi:10.1007/s13595-017-0670-x

Montagné-Huck C, Brunette M (2018) Economic analysis of natural forest disturbances; A century of research. Journal of Forest Economics 32:42–71. doi:10.1016/j.jfe.2018.03.002

Moore DF (2016) Applied survival analysis using R. Springer, Switzerland

Neumann M, Mues V, Moreno A, Hasenauer H, Seidl R (2017) Climate variability drives recent tree mortality in Europe. Glob. Change Biol. 23:4788–4797. doi:10.1111/gcb.13724

Neuner S, Knoke T (2017) Economic consequences of altered survival of mixed or pure Norway spruce under a dryer and warmer climate. Climatic Change 140:519–531. doi:10.1007/s10584-016-1891-y

Neuner S, Albrecht A, Cullmann D, Engels F, Griess VC, Hahn WA, 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. Glob. Change Biol. 21:935–946. doi:10.1111/gcb.12751

Nothdurft A (2013) Spatio-temporal prediction of tree mortality based on long-term sample plots, climate change scenarios and parametric frailty modeling. For. Ecol. Manag. 291:43–54. doi:10.1016/j.foreco.2012.11.028

Oesten G, Roeder A (2002) Management von Forstbetrieben. Kessel, Remagen

Paul C, Brandl S, Friedrich S, Falk W, Härtl F, Knoke T (2019) Climate change and mixed forests; How do altered survival probabilities impact economically desirable species proportions of Norway spruce and European beech? Ann. For. Sci. 76:363. doi:10.1007/s13595-018-0793-8

Pretzsch H, Biber P, Ďurský J (2002) The single tree-based stand simulator SILVA; Construction, application and evaluation. For. Ecol. Manag. 162:3–21. doi:10.1016/S0378-1127(02)00047-6

Pretzsch H, Biber P, Schütze G, Uhl E, Rötzer T (2014) Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. Nat. Commun. 5:1065. doi:10.1038/ncomms5967

Raffa KF, Aukema BH, Bentz BJ, Carroll AL, Hicke JA, Turner MG, Romme WH (2008) Cross-scale Drivers of Natural Disturbances Prone to Anthropogenic Amplification; The Dynamics of Bark Beetle Eruptions. BioScience 58:501–517. doi:10.1641/B580607

Rahman MS, Ambler G, Choodari-Oskooei B, Omar RZ (2017) Review and evaluation of performance measures for survival prediction models in external validation settings. BMC Med Res Methodol 17:2232. doi:10.1186/s12874-017-0336-2

Roelofs M, Bisschop J (2011) AIMMS The Language Reference: AIMMS 3.12, Haarlem

Roessiger J, Griess VC, Knoke T (2011) May risk aversion lead to near-natural forestry? A simulation study. Forestry 84:527–537

Royston P, Altman DG (2013) External validation of a Cox prognostic model; Principles and methods. BMC Med Res Methodol 13:453. doi:10.1186/1471-2288-13-33

Schoneberg S (2017) Ein klimasensitives, autoregressives Modell zur Beschreibung der Einzelbaum-Mortalität; Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen

Seidl R, Fernandes PM, Fonseca TF, Gillet F, Jönsson AM, Merganičová K, Netherer S, Arpaci A, Bontemps J-D, Bugmann H, González-Olabarria JR, Lasch P, Meredieu C, Moreira F, Schelhaas M-J, Mohren F (2011) Modelling natural disturbances in forest ecosystems; A review. Ecol. Modell. 222:903–924. doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.09.040

Seidl R, Thom D, Kautz M, Martin-Benito D, Peltoniemi M, Vacchiano G, Wild J, Ascoli D, Petr M, Honkaniemi J, Lexer MJ, Trotsiuk V, Mairota P, Svoboda M, Fabrika M, Nagel TA,

Reyer CPO (2017) Forest disturbances under climate change. Nat. Clim. Chang. 7:395–402. doi:10.1038/nclimate3303

Selter A (2006) Der Einsatz multivariater statistischer Methoden zur Erarbeitung einer Betriebstypologie für den bäuerlichen Privatwald; Dissertation. Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg

Spiecker H (1999) Overview of Recent Growth Trends in European Forests. In: Sheppard LJ, Cape JN (Hrsg) Forest Growth Responses to the Pollution Climate of the 21st Century. Springer Netherlands, Dordrecht, s.l.

Staupendahl K, Möhring B (2011) Integrating natural risks into silvicultural decision models: a survival function approach. For. Pol. Econ. 13:496–502

Staupendahl K (2011) Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeit von Waldbeständen mithilfe der neu parametrisierten Weibull-Funktion; [Modelling the survival probability of forest stands using the parameterised Weibull function]. Forstarchiv 82:10–19

Staupendahl K, Zucchini W (2011) Schätzung von Überlebensfunktionen der Hauptbaumarten auf der Basis von Zeitreihendaten der Rheinland-Pfälzischen Waldzustandserhebung. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 182:129–145

Steyerberg EW (2019) Clinical prediction models. Springer

Ummenhofer CC, Meehl GA (2017) Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 372. doi:10.1098/rstb.2016.0135

van Mantgem PJ, Stephenson NL, Byrne JC, Daniels LD, Franklin JF, Fule PZ, Harmon ME, Larson AJ, Smith JM, Taylor AH, Veblen TT (2009) Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States. Science 323:521–524. doi:10.1126/science.1165000

Weed AS, Ayres MP, Hicke JA (2013) Consequences of climate change for biotic disturbances in North American forests. Ecological Monographs 83:441–470. doi:10.1890/13-0160.1

WorldClim (2018) WorldClim - Global Climate Data - Free climate data for ecological modeling and GIS; MPI-ESM-LR model representing the period 2061-2080. http://www.worldclim.org/cmip5_30s. Zugegriffen: 20. Februar 2018