

Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen

Kumulative Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
Fachbereich Biologie der Universität Hamburg

vorgelegt von
Klaus Martin Zimmermann
geboren in Ludwigsburg

Freiburg im Breisgau
2024

1. Gutachter: Professor Dr. Matthias Dieter

2. Gutachter: Professor Dr. Bodo Saake

Disputation vom 09.05.2025

Vorsitz der Prüfungskommission: Professorin Dr. Linnea Hesse

Mitglied der Prüfungskommission: Professor Dr. Matthias Dieter

Mitglied der Prüfungskommission: Professor Dr. Bodo Saake

Danksagung

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. Mathias Dieter, der als Leiter der Dissertation den Entwicklungsprozess stets mit wohlwollender fachlicher Unterstützung und konstruktiver Kritik begleitet hat.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Professor Dr. Tobias Schütz und Herrn Dr. Holger Weimar für viele Fachgespräche, konstruktive Ratschläge zur Anfertigung der drei Fachartikel und der Rahmenschrift.

Auch möchte ich mich herzlich bei Herrn Dr. Christoph Hartebrodt für die fachliche Unterstützung sowie die zeitliche Ermöglichung des Abschlusses meiner Dissertation bedanken.

Meine Dissertation wurde maßgeblich durch viele Gespräche mit Wissenschaftlern, Freunden und forstlichen Praktikern geprägt. Daher danke ich meinen Kollegen an der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg und meinen ehemaligen Kollegen am Thünen-Institut für Waldwirtschaft, wobei dort der Kollegin Anna Frerck und den Kollegen Emanuel Meyer sowie Dr. Dominik Jochem mein besonderer Dank gilt.

Mein spezieller Dank gilt meinen Eltern Gudrun und Herbert, meinem Bruder Jörg und meinen Kindern Leni und Maximilian, ohne deren Unterstützung meine Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abkürzungen	6
Liste der aus der Dissertation hervorgegangenen Veröffentlichungen	7
1 Einführung	8
2 Stand des Wissens	10
2.1 Natürliche Störungsereignisse.....	10
2.2 Rohholzmarkt und Rohholzaufkommen.....	12
2.3 Forstbetriebliche Perspektive auf natürliche Störungsereignisse	12
2.4 Bedeutung der Schadholzlagerbestandsabschätzung.....	15
3 Zielsetzung	18
4 Zusammenfassung der Artikel im thematischen Kontext	20
4.1 Artikel 1: Zimmermann et al. (2018) „Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany“	21
4.2 Artikel 2: Zimmermann et al. (2021) „Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events“	26
4.3 Artikel 3: Zimmermann und Jochem (2024) „Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung“	31
5 Diskussion der Artikel im thematischen Kontext	34
5.1 Artikel 1: Zimmermann et al. (2018) „Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany“	34
5.2 Artikel 2: Zimmermann et al. (2021) „Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events“	37
5.3 Artikel 3: „Zimmermann und Jochem (2024) Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung“	41

6	Gesamtdiskussion der Teilergebnisse.....	47
7	Schlusswort und Ausblick	49
8	Literaturverzeichnis	i
9	Abbildungsverzeichnis.....	vi
	Anhang I: Der kumulativen Dissertation zugrundeliegende Artikel.....	vii
	Zimmermann K, Schuetz T, Weimar H (2018) Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany. Eur J For Res 137:463–475	viii
	Zimmermann, K, Schuetz, T, Weimar, H, Dieter M (2021) Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events. Eur J For Res 140:37–50	xxii
	Zimmermann K, Jochem D (2024) Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 37 p, Thünen Working Paper 244, DOI:10.3220/WP1722506779000	xxxvii
	Anhang II: Summary.....	lxxv
	Erklärungen zum Eigenanteil	lxxix
	Eidesstattliche Versicherung	lxxxiii

Zusammenfassung

Natürliche Störungsereignisse in verschiedenen Formen, Häufigkeiten und Intensitäten treten weltweit seit vielen Jahrtausenden auf. Allerdings führt der anthropogen erzeugte Klimawandel zu steigender Anzahl und Intensität (McCarthy et al. 2001). Natürliche Störungsereignisse sind daher zu einem gesellschaftlichen Thema mit hoher ökonomischer Relevanz avanciert (Berlemann 2016).

Auch Wälder und Forstbetriebe in Deutschland sind von den Auswirkungen natürlicher Störungsereignisse wie Stürmen, Insektenkalamitäten, Feuer und Trockenheit betroffen. Forstbetriebe sind insbesondere durch Mehrkosten und Mindererlöse des aufzuarbeitenden Schadholzes, Abschreibungen des aufgearbeiteten Schadholzes, Hiebsunreife der Schadholzbestände und Wiederaufforstungen direkt belastet. Sie können aber auch indirekt durch Zuwachsverluste und Destabilisierung der verbleibenden Bestände, Marktpreisverfall für Rundholz aus Normaleinschlag oder Einschlagsverzicht, Aufschub regulärer Maßnahmen und Reduktion des nachhaltigen Hiebssatzes von natürlichen Störungsereignissen ökonomisch belastet sein (Möhring et al. 2021).

Gerade Mindererlöse für das anfallende Schadholz durch Reaktionen der Holzmärkte nach schweren natürlichen Störungsereignissen verursachen hohe ökonomische Schäden für betroffene Betriebe (Möhring et al. 2021). Um den mit diesen Mindererlösen gekoppelten ökonomischen Schaden so gering wie möglich zu halten, entkoppeln Forstbetriebe teilweise den Schadholzabsatz zeitlich von den natürlichen Störungsereignissen. Sie lagern hierzu anfallende Schadholzmengen teils über mehrjährige Zeiträume ein.

Der Bedarf an Erkenntnissen über die forstbetriebliche Schadholzlagerhaltung nach natürlichen Störungsereignissen ergibt sich neben dem Erkenntnisgewinn an sich insbesondere auch aus dem Ziel, einen Beitrag zur Bestimmung der tatsächlichen Höhe der Holznutzung in Deutschland zu leisten. Da die amtliche Statistik erhebliche Defizite hinsichtlich der tatsächlichen Höhe des Holzeinschlags aufweist (vgl. Mantau et al. 2007 und Weimar 2011), trägt die Thünen-Einschlagsrückrechnung nach Jochem et al. (2015) wesentlich zur Qualität der Bestimmung der Holznutzung bei. Ein zentrales Problem der Thünen-Einschlagsrückrechnung besteht jedoch darin, dass

forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen von der Methode bisher nicht direkt berücksichtigt werden können.

Die besondere Bedeutung der Bestimmung der Höhe der Holznutzung ergibt sich wiederum aus den Kohlenstoffspeicher- und den Kohlenstoffsubstitutionseffekten im Sinne der damit verbundenen positiven Umweltwirkungen (Sathre und O'Connor 2010). Die Höhe der Holznutzung auf nationaler Ebene stellt eine wichtige Monitoring- bzw. Steuerungsgröße hinsichtlich zentraler gesellschaftlicher Maßgaben wie der Nachhaltigkeit der Holznutzung (Dieter und Englert 2005) beziehungsweise ungenutzter Rohholzpotentiale dar. Für politische Entscheidungsträger, Verbände, Nichtregierungsorganisationen und Betriebe ist die Kenntnis der Höhe der Holznutzung daher essentiell hinsichtlich ihres operativen und strategischen Handelns.

Zwar hat die Forschung zu den wirtschaftlichen Auswirkungen von Naturkatastrophen in der jüngeren Vergangenheit erheblich zugenommen (Berlemann 2016), im Forschungsfeld forstökonomischer Auswirkungen und gerade im Gebiet der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung nach natürlichen Störungsereignissen besteht allerdings ein Mangel an wissenschaftlichen Erkenntnissen (Zimmermann et al. 2018). Über mögliche Einflussfaktoren hinsichtlich der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung wurde zwar bereits vereinzelt publiziert (z.B. Odenthal 2004). Empirische Studien hinsichtlich der bestimmenden Parameter zur forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung existieren aber bislang nicht. Der Forschungsbedarf hinsichtlich der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung wurde beispielsweise auch durch Jochem et al (2015) benannt. Die substantielle Höhe von in der Literatur dokumentierten forstbetrieblichen Schadholzlagerbeständen nach natürlichen Störungsereignissen (z.B. Odenthal 2004) und die erzielten Erkenntnisse im Rahmen der vorliegenden Dissertation verdeutlichen die Relevanz der Schadholzlagerhaltung wie beispielsweise hinsichtlich der Einbeziehung in die Thünen-Einschlagsrückrechnung (Zimmermann et al. 2018, Zimmermann et al. 2021, Zimmermann und Jochem 2024).

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation untersuchen Zimmermann et al. (2018) auf empirischer Basis die Determinanten für den Aufbau von Schadholzlagerbeständen nach schweren Sturmereignissen (Artikel 1) und Zimmermann et al. (2021) die Verweilzeit von Schadholz im Lager in Deutschland (Artikel 2). Im Wesentlichen auf Grundlage der explorativen betrieblichen Erkenntnisse der Studien von Zimmermann

et al. (2018; 2021) wird im Rahmen der Untersuchung von Zimmermann und Jochem (2024) ein Verfahren zur Schadholzlagerbestandsschätzung nach natürlichen Störungsereignissen auf nationaler Ebene entwickelt (Artikel 3). Das Verfahren zur Schadholzlagerbestandsschätzung nach natürlichen Störungsereignissen bezieht sich, wie auch die Studien von Zimmermann et al. (2018; 2021), auf schwere natürliche Störungsereignisse, da Schadholz im Wald zwar regelmäßig auftritt, national bedeutsame Schadholzlagerbestandsänderungen jedoch nur nach schweren natürlichen Störungsereignissen in Erscheinung treten (Zimmermann et al. 2018).

Durch Artikel 1 von Zimmermann et al. (2018) werden die bestimmenden Faktoren forstbetrieblicher Zuflüsse ins Schadholzlager nach schweren natürlichen Störungsereignissen untersucht. Die Studie beruht im Wesentlichen auf Daten des forstlichen Testbetriebsnetzes des Bundes (TBN-Forst), in welchem die beiden schweren Sturmereignisse Lothar im Jahr 1999 und Kyrill im Jahr 2007 repräsentiert sind. Im Rahmen der Untersuchung werden die Erklärungsbeiträge von Variablen, die wirtschaftliche, institutionelle und baumartenbezogene Faktoren widerspiegeln, anhand einer multiplen linearen gewichteten Regressionsanalyse getestet. Darüber hinaus werden Holzpreisänderungen als Moderatorvariable in einer hierarchischen Regressionsanalyse hinsichtlich der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung untersucht. Die Ergebnisse ermöglichen weitere verbindende Analysen hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen forstbetrieblichen Zuflüssen ins Schadholzlager (Artikel 1) und Abflüssen aus dem Schadholzlager (Artikel 2).

Mit der Arbeit von Zimmermann et al. (2021) (Artikel 2) werden auf Grundlage der Daten des TBN-Forst bestimmende Faktoren für die Verweilzeiten von Nadelrundholz im Schadholzlager über einen mehrjährigen Zeitraum nach den beiden schweren Sturmereignissen Lothar und Kyrill untersucht. Hierzu werden die Verteilungen der Abflüsse aus den forstbetrieblichen Schadholzlagern über einen mehrjährigen Zeitraum anhand der mittleren Verweilzeiten und deren Abweichungen charakterisiert. Mittels multipler linearer gewichteter Regressionsanalysen werden bestimmende Faktoren hinsichtlich der mittleren Verweilzeiten und ihre Abweichungen untersucht. Hierbei wird die Erklärungskraft von Variablen, die wirtschaftliche, institutionelle und technische Aspekte repräsentieren, getestet. Zur Untersuchung der Auswirkung dieser Variablen auf die Verweilzeitverteilungen der forstbetrieblichen Schadholzlagerung werden die TBN-Daten im Hinblick auf die identifizierten Steuergrößen gruppiert und deren mittlere Verweilzeitverteilungen nach den Sturmereignissen ermittelt. Somit

können die Abweichungen zwischen empirischen Verweilzeitverteilungen und simulierten Verweilzeitverteilungen zur Untersuchung der Modellgüte untersucht werden.

Die Analysen der Zuflüsse ins Schadh Holzlager in Form des Artikels von Zimmermann et al. (2018) (Artikel 1) werden mit den Untersuchungen zu den Verweilzeiten des Schadh Holzes im Lager von Zimmermann et al. (2021) (Artikel 2) in der Arbeit von Zimmermann und Jochem (2024) (Artikel 3) zusammengeführt. Die Erkenntnisse der Arbeiten im Zusammenhang mit den natürlichen Störungsereignissen Lothar (1999) und Kyrill (2007) werden hierbei zu einem überbetrieblichen Schadh Holzlagerbestandsmodell überführt. Um Schadh Holzlagerbestände nach schweren natürlichen Störungsereignissen für die nationale Ebene abzuschätzen, wird zunächst ein überbetriebliches Schadh Holzlagerbestandsmodell auf Grundlage der empirischen Daten des TBN-Forst parametrisiert. Auf Grundlage der nationalen Einschlagszeitreihe des Statistischen Bundesamts wird das Modell mit nationalen störungsbedingten Mehreinschlägen aufgrund der natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill sowie des Schadh Komplexes Dürre/Borkenkäfer, der seit 2018 eine erhebliche Rolle im forstlichen Schadh geschehen in Deutschland spielt, skaliert.

Mit Hilfe von Artikel 1 (Zimmermann et al. 2018) und Artikel 2 (Zimmermann et al. 2021) werden die Einflussfaktoren auf die forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadh Holzlager und auf die Abflüsse aus dem Schadh Holzlager erstmals auf empirischer Basis mit wissenschaftlichen Methoden quantifiziert. Durch Artikel 3 (Zimmermann und Jochem 2024) wird erstmalig ein überbetriebliches Schadh Holzlagerbestandsmodell erstellt und ein Verfahren zur nationalen Skalierung vorgestellt. Das bis dato im Wesentlichen auf Expertenschätzungen beruhende Verfahren zur Schätzung von Schadh Holzlagerbeständen in der deutschen Forstwirtschaft nach natürlichen Störungsereignissen (Jochem 2015) wird mit Hilfe der drei im Rahmen dieser kumulativen Dissertation erstellten und veröffentlichten Artikel sowie durch die übergreifende Betrachtung der auf empirischer Grundlage generierten Ergebnisse wesentlich erweitert. Insbesondere in Verbindung mit der Thünen-Einschlagsrückrechnung (Jochem et al. 2015, Thünen-Institut für Waldwirtschaft 2024a) kann das Verfahren zur Verbesserung der nationalen und internationalen forst- und holzbezogenen Berichterstattung, wie beispielsweise dem System zur Meldung von Treibhausgasemissionen für den Nationalen Inventarbericht (NIR),

Wirtschaftskonten für die Forstwirtschaft (EAF), dem Gemeinsamen Fragebogen für die Forstwirtschaft (JFSQ) oder zur Europäische Forstbuchhaltung (EFA) beitragen.

Abkürzungen

ASC	Betriebliche Größenklasse: ASC1 ($0 \text{ ha} < x < 200 \text{ ha}$), ASC2 ($200 \text{ ha} \leq x < 500 \text{ ha}$), ASC3 ($x \geq 500 \text{ ha}$)
comp	Subskript für „einzelbetrieblich“
DAM	Störungsbedingter Mehreinschlag
DAM _{exp}	Störungsbedingter Rohholzexport
Efm	Erntefestmeter
ESRR	Thünen-Einschlagsrückrechnung
m ³	Festmeteräquivalent
nat	Subskript für „national“
τ	TSO basierter Verteilungsparameter, der die mittlere Verweilzeit von Schadholz im Lager beschreibt
σ^2	TSO basierter Verteilungsparameter, der die Varianz um τ beschreibt
OT	Eigentumsart: OT Staatsforstbetrieb, OT Kommunalen Forstbetrieb, OT Privatforstbetrieb
SE	Sturmereignis (Lothar: SE1; Kyrill: SE2)
SG	Baumartengruppe: SG <i>Fichte</i> (<i>Fichte</i> , <i>Tanne</i> , <i>Douglasie</i>), SG <i>Kiefer</i> (<i>Kiefer</i> , <i>Lärche</i> und andere Koniferen), SG <i>Buche</i> (<i>Buche</i> und andere Laubholzarten), SG <i>Eiche</i> (<i>Eiche</i>)
TBN-Forst	Forstliches Testbetriebsnetz
TPA	Holzpreisänderung in Verbindung mit natürlichem Störungsereignis
TSA	Zufluss in das Schadholzlager
TSO	Abfluss aus dem Schadholzlager

Liste der aus der Dissertation hervorgegangenen Veröffentlichungen

Artikel 1:

Zimmermann K, Schuetz T, Weimar H (2018) Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany. Eur J For Res 137:463–475

Artikel 2:

Zimmermann, K, Schuetz, T, Weimar, H, Dieter M (2021) Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events. Eur J For Res 140:37–50

Artikel 3:

Zimmermann K, Jochem D (2024) Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 37 p, Thünen Working Paper 244, DOI:10.3220/WP1722506779000

1 Einführung

Für die deutsche Forstwirtschaft sind natürliche Störungsereignisse in den vergangenen Jahrzehnten zu einem wichtigen Faktor geworden. Insbesondere die schweren Sturmereignisse Vivian und Wiebke (1990), Lothar (1999) und Kyrill (2007) sowie in den Jahren 2018 bis 2022 der Kalamitätskomplex aus Sturmereignissen, extremer Trockenheit und damit einhergehend Borkenkäferkalamitäten traten in dieser Zeit in Erscheinung.

Die Forstwirtschaft ist durch natürliche Störungsereignisse hohen ökonomischen Belastungen ausgesetzt. Nach Möhring et al. (2021) beläuft sich beispielsweise der durch den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer verursachte wirtschaftliche Schaden in den 3 Jahren von 2018 bis 2020 für die Forstwirtschaft in Deutschland summarisch auf 12,7 Mrd. Euro. Davon entfallen etwa 3,4 Mrd. Euro und somit 27 % des Schadens auf Mindererlöse, die im Wesentlichen auf kalamitätsbedingte Rückgänge der Rundholzpreise zurückgeführt werden können. Die durch das entstehende Überangebot induzierten Preisrückgänge bilden den Anstoß für Forstbetriebe zur Einlagerung der Schadholzeinschläge über mehrjährige Zeiträume. Hiermit ergibt sich die Möglichkeit, den Absatz des Schadholzes von den natürlichen Störungsereignissen zeitlich zu entkoppeln.

Schadholzlagerbestände nach schweren natürlichen Störungsereignissen nehmen beträchtliche Ausmaße an. Nach dem schweren Sturmereignis Lothar im Jahr 1999 wurden beispielsweise allein im Bundesland Baden-Württemberg etwa 4,7 Mio. Efm Schadholz eingelagert (Odenthal 2004). Trotz zunehmender Anzahl und Intensität von natürlichen Störungen (Burton et al. 2020 und McCarthy et al. 2001) sowie hoher assoziierter Schadholzlagerbestände werden forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen bislang gutachterlich geschätzt (z. B. Dieter et al. 2004).

Dabei sind empirische Erkenntnisse über Muster hinsichtlich der Bildung und des Abbaus von Schadholzlagerbeständen sowie assoziierte Modelle aus verschiedenen Gründen wertvoll. Neben dem Erkenntnisgewinn über die forstbetriebliche Schadholzlagerhaltung an sich sowie möglicher natürlicher und wirtschaftlicher Ableitungen, kann eine systematische Quantifizierung forstbetrieblicher Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen zur Genauigkeit der

nationalen Einschlagsberechnung anhand der Thünen-Einschlagsrückrechnung beitragen.

Die Thünen-Einschlagsrückrechnung verfolgt grundsätzlich den Ansatz der verwendungsseitigen Rückrechnung des Holzeinschlags. Die Genauigkeit der nationalen Einschlagsberechnung wird dabei wesentlich höher eingestuft, als die der amtlichen Statistik (vgl. Jochem et al. 2015). Bei der Thünen-Einschlagsrückrechnung werden allerdings forstbetriebliche Lagerbestandsänderungen auf der Grundlage verfügbarer Daten gutachterlich abgeschätzt. Quantitative Modelle über die forstbetriebliche Schadholzlagerhaltung nach natürlichen Störungsereignissen können daher zur Verbesserung der Genauigkeit der Berechnung der Thünen-Einschlagsrückrechnung und zur Erfüllung der Berichtspflichten auf nationaler und internationaler Ebene beitragen.

Die Höhe der Holznutzung stellt bereits auf betrieblicher Ebene eine der zentralen Zielgrößen hinsichtlich der Nachhaltigkeit der Holznutzung dar. Auf nationaler Ebene stellt die Höhe der Holznutzung darüber hinaus eine wesentliche Steuerungs- und Entscheidungsgrundlage hinsichtlich einer nachhaltigen Rohstoffnutzung, Rohstoffverfügbarkeit beziehungsweise ungenutzter Rohholzpotentiale dar. Informationen über die Höhe der nationalen Holznutzung sind daher ein zentraler Faktor der forst- und waldbezogenen Politik zur Überprüfung gesetzter Ziele und zur Konzeptionierung staatlicher Maßnahmen (Dieter und Englert 2005).

Mit dem nachwachsenden Rohstoff Holz und seiner Verwendung stehen eine Vielzahl funktionaler Verwendungen, positive Umweltwirkungen sowie eine hohe wirtschaftliche Bedeutung in Verbindung. Der funktionale Nutzen ergibt sich durch den Einsatz von Holz beispielsweise für konstruktive Zwecke oder zur energetischen Nutzung. Die wirtschaftliche Bedeutung von Holz geht über den reinen Produktionswert hinaus. Sie erstreckt sich auf das Cluster Forst und Holz, in welchem im Jahr 2020 in Deutschland Waren und Dienstleistungen in Höhe von 180,6 Mrd. Euro umgesetzt wurden und dem 1,032 Mio. Mitarbeitende zugeordnet sind (Thünen-Institut für Waldwirtschaft 2024b). Die positiven Umweltwirkungen von Holz basieren im Wesentlichen auf Kohlenstoffspeichereffekten und Kohlenstoffsubstitutionseffekten.

2 Stand des Wissens

2.1 Natürliche Störungsereignisse

Natürliche Störungsereignisse in Form von Sturmereignissen, hydrologischen Störungen, Feuer, Trockenheit, oder auch Erkrankungsausbrüchen können beträchtliche naturale, ökonomische oder humanitäre Schäden verursachen (Berlemann 2016). Natürliche Störungsereignisse sind als zeitlich und räumlich diskrete Ereignisse zu verstehen, die in Ökosystemen zur Umwandlung von lebender in tote Biomasse führen. Charakteristische Eigenschaften sind ein abrupter Anfang, die Dauer sowie die Stärke eines Störungsereignisses. In Relation zur Lebensspanne, zur Reproduktionsrate, zur Wachstumsrate oder der Sukzessionsrate eines Ökosystems ist die Dauer eines Störungsereignisses kurz (Wohlgemuth 2022).

Wohlgemuth (2022) definiert die Abruptheit eines Störungsereignisses als Funktion aus Stärke und Dauer, wobei die Stärke als prozentuale Veränderung eines Parameters, z. B. dem Biomasseverlust, gemessen werden kann. Hiervon abzugrenzen sind Prozesse, die kontinuierlich und ohne direkten Einfluss auf die Ökosystemstruktur wirken. Diese sind als Stress und nicht als Störungen zu bezeichnen. Auch Prozesse, die über lange Zeiträume wirken und somit keinen Ereignischarakter aufweisen und/oder bei denen kein Biomasseverlust erfolgt, werden nicht als Störungsereignisse, sondern als Umweltvariabilität bezeichnet.

Natürliche Störungen sind ein wesentlicher Bestandteil von Waldökosystemen (Sommerfeld et al. 2018). Natürlichen Störungsereignissen können in biotische und abiotische Störungsereignisse kategorisiert werden (Brunette et al. 2015; Holec and Hanewinkel 2006). Hierbei begleiten die abiotischen Störungskategorien Feuer, Trockenheit und Sturmereignisse aber auch biotische Störungen insbesondere in Form von Insektenkalamitäten die Entwicklungsgeschichte europäischer Waldbestände.

In den Jahren 1950 bis 2000 fielen in europäischen Wäldern durch derartige Störungen jährlich durchschnittlich etwa 35 Millionen m³ Schadholz an (Schelhaas et al. 2003).

Im Zuge des Klimawandels haben Anzahl und Intensität von natürlichen Störungsereignissen zugenommen (Burton et al. 2020 und McCarthy et al. 2001). Die Bedeutung natürlicher Störungsereignisse nimmt dabei auch für Wälder weiter zu (Bolte et al. 2009, Glatthorn et al. 2023). Zunehmende Dürre, Borkenkäferbefall und Feuer machen sich weltweit bemerkbar (Sommerfeld et al. 2018). Gerade in den borealen und gemäßigten Breiten erhöht der Klimawandel den Einfluss von Störungen auf Wälder deutlich. Grund dafür ist die hohe Klimasensitivität von Störungen in diesen Ökosystemen (Seidl et al. 2020). Es ist ein signifikanter Anstieg von natürlichen Störungsereignissen in europäischen Wäldern in der Betrachtung von 1950 bis 2019 zu verzeichnen. Am häufigsten waren Sturmereignisse, gefolgt von Feuer und Borkenkäfern (Patacca 2022).

In den vergangenen drei Jahrzehnten hat sich die Störungsrate in Mitteleuropa jedoch mehr als verdoppelt (Seidl 2023). Der Großteil der Schäden wurde durch Stürme verursacht (Riguelle et al. 2015; Schelhaas et al. 2003). Schäden durch biotische Störungen verzeichnen in der jüngeren Vergangenheit allerdings insbesondere aufgrund des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer hohe Steigerungsraten (Seidl 2023). Schäden haben hierbei in den vergangenen drei Dekaden bei allen Baumartengruppen zugenommen. Nadelbäume und unter diesen die Fichte zeigten sich für entsprechende Schädigungen besonders anfällig (Thorn et al. 2017, Weller et al. 2022). Bezogen auf Deutschland waren besonders schwere Sturmereignisse im Jahr 1990 Vivian und Wiebke mit 72 Mio. Efm Schadholz, im Jahr 1999 Lothar mit 34,3 Mio. Efm Schadholz (Odenthal-Kahabka 2004) und im Jahr 2007 Kyrill mit 37 Mio. Efm Schadholz (Hillmann 2007).

Seit dem Jahr 2018 vollzieht sich von solchen Sturmereignissen abweichend in Deutschland ein mehrjähriger Störungskomplex aus Sturmereignissen, extremer Dürre sowie ausgeprägter Borkenkäferkalamitäten, der eine neue Dimension im forstlichen Schadgeschehen darstellt. Im Zeitraum der Jahre 2018 bis 2022 wurden summarisch 233 Mio. Efm Schadholz aufgearbeitet (Schadholzmengen des Statistischen Bundesamts), wobei die Gesamtschadholzmenge der Jahre 2018 bis 2020 nochmals wesentlich höher lag, als die aufgearbeitete Schadholzmange (Möhring et al. 2021). Demnach ergab die Erhebung der Jahre 2018 bis 2020 eine Gesamtschadholzmenge von 177 Mio. Efm. Die genannten Schadholzmengen stehen im Verhältnis zu durchschnittlichen nationalen jährlichen Nutzung in Deutschland von 75 Mio. Efm/a als Mittelwert der Jahre 2002 bis 2012 (BWI3 2014).

2.2 Rohholzmarkt und Rohholzaufkommen

Der Rohholzmarkt bezeichnet grundsätzlich den Ausgleich von Angebot von und Nachfrage nach Rohholz. Der Markttheorie folgend, bildet der Rohholzpreis in der Regel den entscheidenden wirtschaftlichen Faktor für den Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage ab (Mantel 1973). Die Nachfrage nach Rohholz wird durch die Verwendungssektoren einschließlich der Nachfrage aus dem Ausland (z. B. Sägeindustrie oder Privathaushalte zur energetischen Nutzung) und deren entsprechenden Holzbedarf bestimmt.

Die Nachfrage wird insbesondere von wirtschaftlichen und technologischen Rahmenbedingungen beeinflusst. Zu den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zählen beispielsweise die Preisentwicklung von substituierenden Rohstoffen (fossile Energieträger, Metalle etc.) und die konjunkturelle Wirtschaftslage. Zu den technologischen Rahmenbedingungen gehören beispielsweise Produktionsprozesse und deren Innovation. Durch Effizienzsteigerungen kann auch der Rohholzbedarf, z. B. zur Schnittholzproduktion gesenkt werden. Es spielen aber auch andere Faktoren wie z. B. im Kontext Energieholz jahreszeitliche Temperaturschwankungen eine Rolle für die Nachfrage nach Rohholz. Darüber hinaus können weitere Rahmenbedingungen wie die Änderung politischer Rahmenbedingungen das Marktgeschehen beeinflussen.

Die Angebotsseite beinhaltet das Rohholzaufkommen aus der forstwirtschaftlichen Produktion sowie den Import von Rohholz (Mantel 1973, Jochem et al. 2015). Bei schweren natürlichen Störungsereignissen entstehende Schadholzmengen sowie die daraus resultierende Erhöhung der Gesamtholzeinschläge erzeugen ein Überangebot. Dies löst der Markttheorie folgend Reaktionen der Holzmärkte in Form von Holzpreisrückgängen aus (z.B. Kinnucan 2016; Udali et al. 2021).

2.3 Forstbetriebliche Perspektive auf natürliche Störungsereignisse

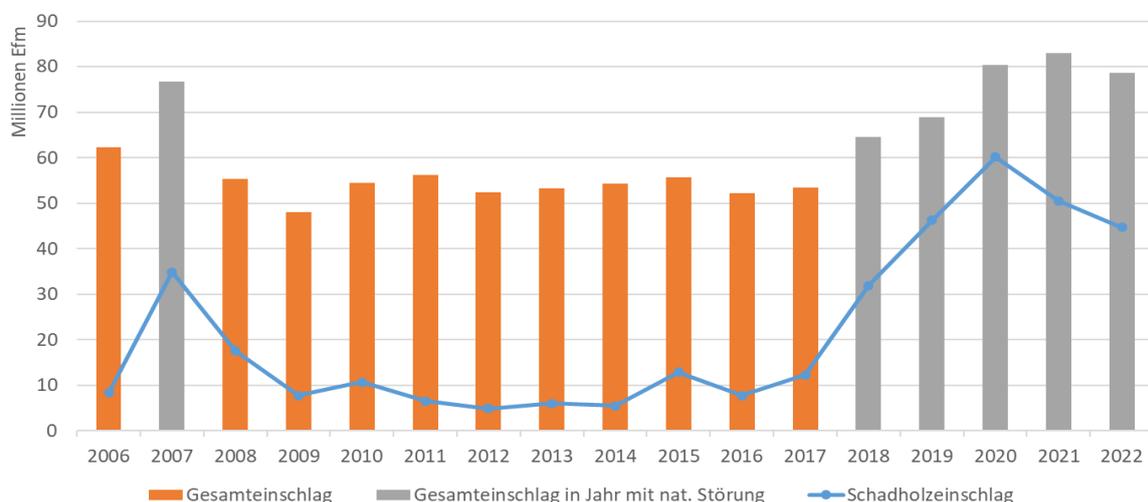
Natürliche Störungsereignisse wie Dürre, Borkenkäferbefall oder Stürme stellen Forstbetriebe vor große Herausforderungen (Glatthorn et al. 2023). Ausgelöst durch den Schadkomplex aus Stürmen und Dürre, gefolgt von Insektenschäden,

insbesondere durch den Borkenkäfer, hatten in jüngster Vergangenheit deutsche Forstbetriebe allein in den Jahren 2018 bis 2020 Rekord-Schadholzanteile von 74% der Gesamtholzproduktion zu verzeichnen (Spathelf et al. 2022).

Natürlichen Störungsereignissen verursachen hohe ökonomische Verluste bei den Forstbetrieben (Fuchs 2024). Neben den ökonomischen Verlusten, beispielsweise durch gesunkene Holzpreise oder zusätzliche Kosten für Pflanzung, sind Probleme bei der Arbeitssicherheit der Schadholzaufarbeitung, Logistikkengpässe, mangelnde Arbeits- und Schadholzlagerkapazitäten für viele Forstbetriebe eine große Herausforderung (Sangines de Carcer et al. 2021).

In Abbildung 1 werden die nationalen Holzeinschläge und das Schadholzaufkommen der Jahre 2006 bis 2022 dargestellt. In den Jahren von 2008 bis 2017 ist zu beobachten, dass der nationale Jahreseinschlag relativ konstant ist. In Bezug auf die deutsche Forstwirtschaft fanden in den vergangenen Jahrzehnten eine Reihe schwerer natürlicher Störungsereignisse statt. Diese Abweichungen im Vergleich zu den Jahren ohne schwere natürliche Störungsereignisse gehen mit deutlich erhöhten Schadholzmengen einher.

Abbildung 1: Gesamt- und Schadholzeinschlag in Deutschland



Quelle: Zimmermann und Jochem (2024) nach Statistisches Bundesamt (Destatis)

Forstbetriebe lagern überschüssige Schadholzmengen teils über mehrjährige Zeiträume ein, um den Absatz des Schadholzes zeitlich vom Störungsereignis zu entkoppeln (Englert und Seintsch 2014). Dies führt zu einer temporären Erhöhung der Schadholzlagerbestände. Forstbetriebliche Schadholzlagerbestandszuwächse sind

dem Rohholzaufkommen zuzurechnen und so in der nationalen und internationalen Berichterstattung zu berücksichtigen.

Im Rahmen der schweren natürlichen Störungsereignisse Kyrill (2007) sowie dem Schadkomplex Sturm Dürre Borkenkäfer (2018 bis 2022) steigen die jährlichen nationalen Erntemengen deutlich über das Niveau der Jahre 2008 bis 2017 an, da der Anfall der großen Schadholzmengen nicht mehr durch die Minderung geplanter Einschläge kompensiert werden kann. Im Zuge der Aufarbeitung des entstandenen Schadholzes steigt somit in diesen Jahren auch der nationale Gesamtholzeinschlag.

Das Vorliegen schwerer natürlicher Störungsereignisse im Rahmen der vorliegenden Dissertation setzt neben dem Auftreten erheblicher Schadholzmengen im Zuge von in der Literatur dokumentierten forstlichen Störungen mindestens auf Landes- oder auf Bundesebene auch erhöhte Jahreseinschläge mindestens auf Landes- oder auf Bundesebene voraus.

Die mit dem Überangebot einhergehenden Holzpreisreaktionen und die resultierenden Mindererlöse für Schadholz verursachen hohe ökonomische Schäden für betroffene Betriebe. Diese setzen sich aus Erlösabschlägen durch verminderte Erntevolumina (z. B. Gesundschnitten von Brüchen etc.) und Sortenverschiebungen (z. B. Abwertung des Stammholzes) sowie Reaktionen des Rundholzmarktes insbesondere bei der Fichte zusammen. (Möhring et al. 2021).

Bei einer Gesamtschadensabschätzung im Kontext des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer von 2018 bis 2020 benennen Möhring et al. (2021) Mindererlöse mit einer Höhe von 3,39 Mrd. Euro als wichtigen Faktor. Den mittleren Erlösabschlag je Erntefestmeter schätzen Möhring et al. (2021) auf 26,31 Euro, wobei die Fichte als am stärksten betroffene Baumart Erlösabschläge in Höhe von 45 % zu verzeichnen hatte. Dabei blieben aufgrund der in der Forstwirtschaft verbreiteten mittel- bis langfristigen Lieferverträge die Preise für Fichten-Schadholz im Jahr 2018 noch relativ stabil.

Zur Minderung der ökonomischen Schäden lagern Forstbetriebe Teile der anfallenden Schadholzmengen temporär ein. Der Verkauf des eingelagerten Schadholzes kann so zeitlich von überangebotsbedingten Holzpreiseinbrüchen entkoppelt und bis zur Erholung der Holzmärkte zeitlich aufgeschoben werden (Kinnucan 2016). So wurden beispielsweise im Bundesland Baden-Württemberg nach dem Sturmereignis Lothar insgesamt 4,7 Mio. Efm Schadholz eingelagert (Odenthal-Kahabka 2004), was einem

Anteil von etwa 40 % der regulären jährlichen Holzeinschlagsmengen in diesem Bundesland entspricht (BWI3 2014). In diesem Zusammenhang wird auch erwähnt, dass der staatliche Forstbetrieb zur Stabilisierung des Holzmarktes und somit zur Entlastung der kommunalen und privaten Forstbetriebe besonders hohe Schadholzanteile einlagerte (Odenthal-Kahabka 2004).

Schadholz kann mehrere Jahre in Nasslagern eingelagert werden, ohne dass dieses an Wert verliert. Odenthal-Kahabka (2004) schlägt für nassgelagertes Nadelholz eine Lagerdauer von 2 bis 3 Jahren als geeignete Dauer vor und stellt nach 3 Jahren Lagerdauer eine zunehmende Qualitätsminderung fest. Eine Untersuchung der technischen Holzeigenschaften von Kiefer nach 5 Jahren Nasslagerung zeigt nur geringe Qualitätsminderungen (Hapla 1992). Für die Lagerung von Buche schlägt Odenthal-Kahabka (2004) dagegen eine Lagerdauer von maximal einem Jahr vor, bevor sich die Qualität wesentlich verschlechtert.

2.4 Bedeutung der Schadholzlagerbestandsabschätzung

Bereits im Rahmen der mengenbasierten Holz-Distributionsanalyse von Kraft (1975) wird die Einbeziehung von Lagerbeständen bzw. deren Änderung diskutiert, aufgrund mangelnder Datenqualität jedoch nicht umgesetzt. In der Studie von Dieter et al. (2004) zur Forstwirtschaftlichen Gesamtrechnung werden Lagerverläufe aufgrund von Datenlücken mit Hilfe von Annahmen und wenigen empirischen Daten nach Schadereignissen möglichst plausibel geschätzt. Auch die Studie von Mantau (2004) zur Holzrohstoffbilanz für Deutschland sieht vor, Lagerbestandsänderungen aufzunehmen, wobei die Daten zu Lagerbeständen in der Forstwirtschaft in Ermangelung anderer Quellen von Dieter et al. (2004) übernommen werden.

In jüngerer Vergangenheit ergibt sich ein erneuter Bedarf für ein systematisches Verfahren zur Schätzung forstbetrieblicher Lagerbestände nach schweren natürlichen Störungsereignissen. Hintergrund ist ein Berechnungsverfahren nach Jochem et al. (2015) in Form der Thünen-Einschlagsrückrechnung zur Ermittlung des jährlichen Holzeinschlags in Deutschland, welches vom Thünen-Institut für Waldwirtschaft in Kooperation mit der Universität Hamburg weiterentwickelt wurde (Thünen-Institut für Waldwirtschaft 2024).

Die Thünen-Einschlagsrückrechnung wurde entwickelt, um die Qualität der nationalen jährlichen Holzeinschlagsdaten zu verbessern, da die amtliche Holzeinschlagsstatistik die tatsächlichen Einschlagsmengen meist erheblich unterschätzt (Jochem et al. 2015). Dabei sind detaillierte Kenntnisse über die Änderungen der forstbetrieblichen Lagerbestände und deren zeitliche Entwicklung für die Thünen-Einschlagsrückrechnung von großer Bedeutung.

Die Herleitung der Rohholzmengen aus dem Wald auf Grundlage der verschiedenen stofflichen und energetischen Verwendungswege in Industrie, Gewerbe und privaten Haushalten bildet die konzeptionelle Grundlage der Thünen-Einschlagsrückrechnung. Das Verfahren dient zum einen der Bestimmung des nationalen Gesamtholzeinschlags und zum anderen auch der Untersuchung der Nutzungsmengen der unterschiedlichen Rohholz-Verwendungsbereiche. Daten über Lagerbestandsänderungen von gefällttem Rohholz im Wald sowie in der Industrie werden benötigt, um diese bei der Berechnung des Holzeinschlags berücksichtigen zu können. Auch der Außenhandel mit Rohholz wird in dem Verfahren berücksichtigt.

Im Detail ist für die Rückrechnung des Holzeinschlags in Deutschland die Identifikation aller Sektoren erforderlich, die Rohholz verwenden. Die verfügbaren Daten für diese Sektoren werden kontinuierlich untersucht und bewertet. Das Rohstoffmonitoring Holz, beispielsweise in Form der Arbeiten von Mantau et al. (2018a und 2018b), nimmt hierbei eine zentrale Bedeutung ein. Darüber hinaus werden Modelle genutzt, die verbleibende Datenlücken schließen (Jochem et al. 2015, Thünen-Institut für Waldwirtschaft 2024).

Durch amtliche Statistiken und Angaben der Verbände können die Veränderungen der Lagerbestände in der Holzwirtschaft mit hoher Zuverlässigkeit bestimmt werden. Vergleichbare Daten fehlen aktuell für die Bestandsveränderungen von forstbetrieblichen Lagerbeständen im Wald. Für die Schätzung des nationalen Holzeinschlags sind die Veränderungen der forstbetrieblichen Lagerbestände jedoch von wesentlicher Bedeutung.

Nationale Holzeinschlagsdaten werden für verschiedene nationale und internationale Berichtssysteme und als Grundlage für politische Entscheidungen verwendet. Ihre Genauigkeit ist daher von großer Bedeutung. Die Holzeinschlagsdaten fließen beispielsweise auf nationaler Ebene in die Holzbilanzen des Thünen-Instituts (z. B. Weimar 2020) und die Fortwirtschaftliche Gesamtrechnung (z. B. Rosenkranz et al.

2023) ein. Auf internationaler Ebene fließen die Holzeinschlagsdaten unter anderem in den Joint Forest Sector Questionnaire (JFSQ) der UNECE/FAO/Eurostat/ITTO oder die European Forest Accounting (EFA) von Destatis/Eurostat ein.

3 Zielsetzung

Erkenntnisse über forstbetriebliche Schadholzlagerbestände, die nach schweren natürlichen Störungsereignissen beträchtliche Ausmaße annehmen können, tragen wesentlich zur Kenntnis der tatsächlichen Höhe der Holznutzung und somit zur Bemessung der Nachhaltigkeit der Forstwirtschaft in Deutschland bei. Aufgrund der zunehmenden Häufigkeit und Erhöhung der Intensität natürlicher Störungsereignisse wird den quantitativen Erkenntnissen über die forstbetriebliche Lagerhaltung von Schadholz nach natürlichen Störungsereignissen eine steigende Relevanz zuteil.

Zentrales Ziel der vorliegenden kumulativen Dissertation ist der Gewinn von Erkenntnissen hinsichtlich der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung nach schweren natürlichen Störungsereignissen. In Zusammenhang mit den Untersuchungen der Schadholzlagerbestände werden für das Vorliegen schwerer natürlicher Störungsereignisse neben dem Auftreten erheblicher Schadholzmengen im Zuge von in der Literatur dokumentierten forstlichen Störungen mindestens auf Landes- oder auf Bundesebene auch erhöhte Jahreseinschläge mindestens auf Landes- oder auf Bundesebene vorausgesetzt.

Die vorliegende Dissertation untersucht die bestimmenden Faktoren der forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager (Artikel 1) und die erklärenden Variablen für die Abflüsse von Schadholz aus dem Lager über einen mehrjährigen Zeitraum (Artikel 2). Im Rahmen der Artikel 1 und 2 steht die explorative Untersuchung der bestimmenden Faktoren der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung im Vordergrund.

Hierbei wird zunächst der Einfluss des betrieblichen störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{comp}) sowie eine Reihe weiterer Variablen hinsichtlich der betrieblichen Zuflüsse in Schadholzlager (TSA_{comp}) untersucht (Artikel 1). Mögliche Muster hinsichtlich der forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager werden durch statistische Modelle erkannt und beschrieben. Auf die Erkenntnisse aus Artikel 1 aufbauend, werden in Artikel 2 die Einflussfaktoren auf den zeitlichen Verlauf der betrieblichen Abflüsse aus Schadholzlagern (TSO_{comp}) identifiziert. Auch hinsichtlich der bestimmenden Faktoren für die Abflüsse aus den forstbetrieblichen Schadholzlagern werden mögliche Muster durch statistische Modelle beschrieben.

Darüber hinaus wird im Rahmen der vorliegenden Dissertation ein Verfahren zur Schätzung der nationalen Schadholzlagerbestände nach schweren natürlichen Störungsereignissen entwickelt (Artikel 3). Hierbei werden die explorativen betrieblichen Erkenntnisse von Artikel 1 und Artikel 2 in ein nationales Schadholzlagerbestandsmodell nach schweren natürlichen Störungsereignissen überführt.

4 Zusammenfassung der Artikel im thematischen Kontext

Empirische Erkenntnisse über Muster hinsichtlich der Zuflüsse zu und Abflüsse von Schadholzlagerbeständen nach schweren natürlichen Störungsereignissen können neben dem Erkenntnisgewinn sowie möglicher natürlicher und wirtschaftlicher Ableitungen insbesondere zu einer weiteren Verbesserung der Genauigkeit der nationalen Einschlagsberechnung auf Grundlage der Thünen-Einschlagsrückrechnung beitragen.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird im Rahmen der Artikel 1 und 2 die forstbetriebliche Schadholzlagerhaltung nach schweren natürlichen Störungsereignissen bestehend aus Zuflüssen ins Schadholzlager und Abflüssen aus dem Schadholzlager im zeitlichen Verlauf explorativ untersucht. Zentrale Eingangsgrößen sind die störungsbedingten Mehreinschläge (DAM_{comp}), die Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) sowie die Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{comp}) auf forstbetrieblicher Ebene in einem mehrjährigen Betrachtungszeitraum. Darüber hinaus werden in Artikel 1 und Artikel 2 die erklärenden Variablen Sturmereignis (SE), Baumartengruppe (SG), Eigentumsart des Forstbetriebs (OT), Größenklasse des Betriebs (ASC) und störungsbedingte Holzpreisänderung (TPA) untersucht. Zusätzlich wird in Artikel 2 der Einfluss der erklärenden Variable Betriebliche Kapazität an forstlichen Arbeitskräften (FWC) untersucht. Basierend auf den Vollzeitäquivalenten der in den Forstbetrieben beschäftigten forstlichen Arbeitskräfte wird eine kontinuierliche Variable erzeugt, die die forstbetriebliche Fixkostenstruktur repräsentiert. Die zentrale empirische forstbetriebliche Datengrundlage bildet hierbei das forstliche Testbetriebsnetz (TBN-Forst), auf dessen Grundlage Variablen teils direkt genutzt und teils rechnerisch hergeleitet werden.

Die bezüglich der Abflüsse von Schadholz aus dem Lager über einen mehrjährigen Betrachtungszeitraum durchgeführten Untersuchungen (Artikel 2) basieren auf einer Übertragung einer insbesondere in der hydrologischen Disziplin verbreiteten Methode zur Untersuchung von Verweilzeitverteilungen. Diese Methode wird im Rahmen der Studie auf die forstökonomischen Fragestellungen angepasst bzw. angewendet.

In einem weiteren Schritt wird auf Grundlage der Erkenntnisse von Artikel 1 und Artikel 2 ein Modell für nationale Schadholzlagerbestände nach schweren natürlichen

Störungsereignissen empirisch parametrisiert und ein Verfahren zur Skalierung des Modells vorgestellt (Artikel 3).

Die Ergebnisse der drei Artikel stehen in folgendem Zusammenhang: Die in Artikel 1 gewonnenen Erkenntnisse über die bestimmenden Faktoren der forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager werden genutzt, um in Artikel 2 die zeitliche Komponente in Form der Verweilzeitverteilungen der forstbetrieblichen Lagerhaltung von Schadholz nach natürlichen Störungsereignissen zu untersuchen. Die Erkenntnisse über die Zuflüsse ins Schadholzlager (Artikel 1) und über die Abflüsse aus dem Schadholzlager (Artikel 2) werden verwendet, um die forstbetriebliche Schadholzlagerhaltung über einen mehrjährigen Zeitraum zu modellieren (Artikel 3).

Aufgrund der niedrigen Schadholzmengen sowie der technischen Schwierigkeiten der Lagerungsfähigkeit der Baumartengruppen Buche und Eiche ergibt sich eine geringe Bedeutung für die längerfristige Schadholzlagerung. Daher fokussiert sich Artikel 1 in Teilen und Artikel 2 und Artikel 3 vollständig auf Nadelholz und somit die Untersuchung der Baumartengruppen Fichte und Kiefer.

4.1 Artikel 1: Zimmermann et al. (2018) „Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany“

Analyse der bestimmenden Faktoren der forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager nach schweren Sturmereignissen in Deutschland.

Die Autoren des Artikels 1 „Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany“ sind Klaus Zimmermann (Hauptautor) sowie die Coautoren Tobias Schuetz und Holger Weimar. Der Artikel wurde am 24. August 2017 in dem Journal „European Journal of Forest Research“ eingereicht und in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. In überarbeiteter Fassung wurde der Artikel am 19. Februar 2018 eingereicht. Der Artikel wurde am 26. April 2018 akzeptiert und am 04. Mai 2018 veröffentlicht (online). Die Entwicklung des konzeptionellen Rahmens und der Methode, die Analyse der Daten, die Diskussion der Ergebnisse sowie die Schlussfolgerungen wurden im Wesentlichen von Klaus Zimmermann durchgeführt. Der Artikel wurde im Wesentlichen von Klaus Zimmermann verfasst. Tobias Schütz

trug insbesondere durch die konstruktive Diskussion der Methode und Datenanalyse zum Artikel bei. Alle Coautoren trugen durch weitere Diskussion sowie die Überarbeitung der Kapitel in geringerem Umfang zum Artikel bei.

Das primäre Ziel des Artikels liegt in der Identifikation der bestimmenden Faktoren der forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) nach natürlichen Störungsereignissen. Damit einhergehend ist die Forschungsfrage wie folgt formuliert: „Welche Variablen haben Einfluss auf die Holzvorratsbildung nach schweren Sturmereignissen?“ Der bestehende Forschungsbedarf hinsichtlich der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung nach natürlichen Störungsereignissen wird beispielsweise durch Jochem et al (2015) benannt.

Die im Rahmen von Artikel 1 gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die weiteren Studien, die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt werden. Die Studie bestätigt weitgehend die getroffenen Annahmen hinsichtlich der bestimmenden Faktoren der forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager nach schweren natürlichen Störungsereignissen. Dabei werden die Einflüsse unterschiedlicher kategorialer sowie kontinuierlicher Variablen auf die forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager mittels empirischer Daten für die Sturmereignisse Lothar (1999) und Kyrill (2007) quantifiziert. Mögliche erklärende Variablen werden kausal hergeleitet und ihr Einfluss mittels verschiedener statistischer Verfahren untersucht. Die Auswahl der untersuchten Variablen zeichnet sich durch die Einbeziehung natürlicher, betrieblicher sowie holzmarktbezogener Faktoren aus und liefert so umfangreiche Erkenntnisse über die forstbetriebliche Schadholzlagerhaltung. Die zentrale Methode des Artikels zur Untersuchung der Zuflüsse ins Schadholzlager liegt in einer multiplen linearen Regressionsanalyse. Darüber hinaus wird eine hierarchische moderierte Regressionsanalyse durchgeführt, um zu untersuchen, ob zwischen Holzpreisänderung und Schadenshöhe Interaktionen bestehen bzw. ob die störungsbedingten Holzpreisänderungen (TPA) als Moderatorvariable für die Beziehung zwischen den Variablen Schadenshöhe und Zufluss ins Schadholzlager wirken.

Das forstliche Testbetriebsnetz des Bundes (TBN-Forst), welches eine langjährige systematische Zeitreihe forstbetrieblicher Kennzahlen repräsentiert, stellt die zentrale Datengrundlage des Artikels 1 dar. Durch den langen Erhebungszeitraum liegen in dem Datensatz Informationen über Reaktionen von Forstbetrieben im Kontext der

Stürme Lothar und Kyrill, die zu den schwersten Stürmen seit Beginn der geregelten Forstwirtschaft in Deutschland gehören (Hillmann 2007).

Um die effektive Stichprobe in Form der in die Untersuchung einbezogenen Forstbetriebe zu generieren, wurde eine räumlich definierte Betrachtung in Form der Bundesländer vorgenommen. Neben Betroffenheit vom Störungsereignis war eine ausreichende Repräsentanz der Kategorien der analysierten Variablen für die Einbeziehung der Bundesländer bzw. der repräsentierten Betriebe ausschlaggebend. Mehrere Bundesländer wurden aufgrund fehlender sturmbedingter Schäden oder unzureichender Stichproben ausgeschlossen. Bei der Auswahl der analysierten Störungsereignisse konnten erkennbare TSA-Signale nur in Korrelation mit den extrem schweren Sturmereignissen Lothar und Kyrill identifiziert werden. Darüber hinaus wurden Fälle mit DAM-Werten unter $1 \text{ m}^3/\text{ha}$ ausgeschlossen, um vergleichsweise hohen Unsicherheiten bei kleinen DAM-Werten Rechnung zu tragen.

Da die Datengrundlage in Form des TBN-Forst eine Auswahlstichprobe und keine Zufallsstichprobe darstellt, können Verzerrungen grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird im Rahmen des TBN-Forst ein Erweiterungsfaktor generiert, indem die Anzahl der Forstbetriebe in der Stichprobe in definierten Straten ins Verhältnis zur Anzahl der Forstbetriebe der Grundgesamtheit, die aus einer vollständigen Aufnahme aller Forstbetriebe stammt, gesetzt wird. Wie Zimmermann et al. (2018) zeigen konnten, wird die Repräsentativität der Stichprobe durch die Verwendung des Erweiterungsfaktors wesentlich verbessert.

Gewichtungsvariablen sind dann sinnvoll, wenn Beobachtungen mit unterschiedlichen Varianzen vorliegen (Backhaus et al. 2016). In Artikel 1 tritt dieser Zustand ein, da die einzelnen Fälle keine standardisierten Stichprobenflächen darstellen. Betriebe mit einer größeren Fläche als Basis für die korrelierten Werte sollten stärker zur Regressionsfunktion beitragen als Fälle mit einer kleineren Fläche. Daher ist die Gewichtung der Stichprobe für die multiple lineare Regressionsanalyse unverzichtbar. Folglich wird die zugrundeliegende Stichprobenfläche verwendet, um die Fälle der Stichprobe zu gewichten. Einhergehend wird der Stichprobenerweiterungsfaktor des TBN-Forst multiplikativ in die Gewichtungsvariable integriert. Die Gewichtungsvariable skaliert den Beitrag des Falls zur Verlustfunktion mit $w^{-1/2}$ (JMP 2017; SAS Institute 2016). Die Gewichtungsvariable hat somit Auswirkungen auf die Schätzungen und Standardfehler. Sie hat jedoch keinen Einfluss auf die Freiheitsgrade, die in den Hypothesentests verwendet werden.

Auf Grundlage der empirischen einzelbetrieblichen Daten des TBN-Forst wird mit Hilfe der gewichteten multiplen linearen Regressionsanalyse der Einfluss der erklärenden Variablen Betrieblicher störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{comp}), Sturmereignis (SE), Baumartengruppe (SG), Eigentumsart des Forstbetriebs (OT) sowie Größenklasse des Betriebs (ASC) auf die Variable Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) untersucht. Der betriebliche störungsbedingte Mehreinschlag (DAM_{comp}) repräsentiert hierbei ein berechnetes Schadenssignal, das auf den betrieblichen Einschlagszeitreihen beruht. Der Variablenwert ergibt sich, indem die Summe der positiven Abweichungen der Einschläge des Sturmjahres sowie der fünf Folgejahre vom Durchschnitt der Einschläge der fünf Jahre vor Schadereignis gebildet wird. Der betriebliche störungsbedingte Mehreinschlag (DAM_{comp}) repräsentiert also nicht das betriebliche Schadholzaufkommen.

Die betrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) repräsentieren ebenfalls eine berechnete kontinuierliche Variable, die analog zum Berechnungsverfahren von DAM_{comp} hergeleitet wird. Die Größenklasse des Betriebs (ASC) repräsentiert eine nominale Variable, bei welcher drei Ausprägungen in Form von ASC1 ($0 \text{ ha} < x < 200 \text{ ha}$), ASC2 ($200 \text{ ha} \leq x < 500 \text{ ha}$) und ASC3 ($x \geq 500 \text{ ha}$) getestet werden. Die Variablen DAM_{comp} und TSA_{comp} sind stark links-schief verteilt. Daher werden sie für bestimmte Gleichungen in natürliche Logarithmen transformiert und dort, als $TSA_{comp} \ln = \ln(TSA)$ und $DAM_{comp} \ln = \ln(DAM)$ bezeichnet.

Die nach Kenntnisstand der Autoren im Rahmen des Artikels erstmalig durchgeführte empirische Analyse eröffnet weitreichende Erkenntnisse hinsichtlich der forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager nach natürlichen Störungsereignissen. Die Ergebnisse zeigen, dass nach den natürlichen Störungsereignisse Lothar und Kyrill die Einlagerung von Schadholz gängige forstbetriebliche Praxis ist.

Die gewichtete multiple lineare Regressionsanalyse zeigt bei einem adj. R^2 von 0,74, dass die getesteten unabhängigen Variablen Betrieblicher störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{comp}), Sturmereignis (SE), Baumartengruppe (SG), Eigentumsart des Forstbetriebs (OT) und Größenklasse des Betriebs (ASC) einen signifikanten Einfluss auf den betrieblichen Zufluss ins Schadholzlager (TSA_{comp}) bei einem 99% bzw. 95% Konfidenzintervall haben.

Dabei wird mehr als die Hälfte des betrieblichen störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{comp}) eingelagert, was die hohe Relevanz der Schadholzlagerung im

Zusammenhang mit extremen Sturmereignissen zum Ausdruck bringt. Bezüglich der Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) nach Eigentumsarten (OT) wird festgestellt, dass Staatsforstbetriebe die höchsten Schadholzanteile einlagern, gefolgt von kommunalen und privaten Forstbetrieben. Diese Ergebnisse entsprechen der von Odenthal (2004) festgestellten Zurückhaltung staatlicher Forstbetriebe beim Schadholzverkauf zur Entlastung des Holzmarktes zugunsten privater und kommunaler Forstbetriebe. Entsprechend der Erwartungen wird empirisch belegt, dass weitaus größere Mengen Nadelholz ins Schadholzlager fließen, als Laubholz, was durch höhere störungsbedingte Mehreinschläge sowie eine bessere Eignung für die mehrjährige Lagerung erklärt werden kann. Schadholz der Baumartengruppe Fichte weist hierbei den höchsten Koeffizienten hinsichtlich der Zuflüsse ins Schadholzlager auf. In Bezug auf die Variable Sturmereignis (SE) zeigen die Ergebnisse einen signifikant niedrigeren Lagerzuflusskoeffizienten für SE2 (Kyrill, 2007) im Vergleich zu SE1 (Lothar, 1999). Dieser Unterschied hinsichtlich der Zuflüsse ins Schadholzlager wird als Folge unterschiedlicher Rahmenbedingungen und hierbei insbesondere den Holzpreisreaktionen zwischen den beiden Sturmereignissen gesehen. Nach dem Sturm Lothar werden stärkere Holzpreisrückgänge registriert, wohingegen im Jahr 2007 durch eine deutlich höhere Nachfrage geringere Holzpreisrückgänge erfasst werden (Jochem et al. 2015). Die Untersuchung der Variable Betriebliche Größenklasse (ASC) zeigt, dass die Kategorie ASC2 den höchsten Lagerzuflusskoeffizienten vorweist, während ASC1 und ASC3 auf einem ähnlichen Niveau liegen. Die Erwartungshaltung, dass größere betriebliche Einheiten aufgrund von Skaleneffekten höhere Anteile des entstehenden Schadholzes einlagern, wird an dieser Stelle nicht erfüllt. Unterschiede in der Sturmbetroffenheit zwischen den ASCs als möglicher Grund für dieses Ergebnis können nicht ausgeschlossen werden.

In der Studie wird darüber hinaus, unabhängig von der zuvor durchgeführten gewichteten multiplen linearen Regressionsanalyse, mit einer hierarchisch moderierten Regressionsanalyse untersucht, ob störungsbedingte Holzpreisänderungen (TPA) als Moderatorvariable für die Beziehung zwischen den Variablen Betrieblicher störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{comp}) und Zufluss ins Schadholzlager wirken und somit eine Interaktion zwischen den beiden Variablen DAM_{comp} und TPA besteht.

Im Rahmen eines dreistufigen Verfahrens werden wie von Robinson und Schumacker (2009) empfohlen, in einem ersten Schritt die Kontrollvariablen in einer gewichteten multiplen linearen Regressionsanalyse untersucht. Dann werden in Schritt 2 die Hauptvariablen (hier DAM_{compln} und TPA) in die gewichtete multiple lineare Regressionsanalyse mit aufgenommen. Schließlich wird in Schritt 3 der Interaktionsterm $DAM_{\text{compln}} \times TPA$ in die gewichtete multiple lineare Regressionsanalyse mit aufgenommen.

Die Autoren formulieren die Hypothese, dass die Variable Holzpreis aus der Beziehung zwischen Schadenshöhe, die die Angebotsseite widerspiegelt, und Marktkapazität, die die Nachfrageseite des Holzmarktes widerspiegelt, resultiert. Da Forstbetriebe ihre Entscheidung, Schadholz einzulagern oder zu verkaufen, an das Holzpreisniveau koppeln, könnte die Holzpreisvariable im Umkehrschluss auch einen Erklärungsbeitrag zur forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung liefern. Die Untersuchung wird aufgrund der Schadensschwerpunkte durch Lothar und Kyrill ausschließlich für die Baumartengruppen Fichte und Kiefer umgesetzt.

Im Rahmen der Studie bestätigt sich, dass störungsbedingte Holzpreisänderungen (TPA) Moderatorvariable für das Verhältnis zwischen störungsbedingten Mehreinschlägen und Zuflüssen ins Schadholzlager sind. Dabei erhöht sich das adj. R^2 der hierarchisch moderierten Regressionsanalyse von 0,86 auf 0,88 bei der Einbeziehung des Interaktionsterms von Schritt 2 zu Schritt 3. Davon abgeleitet könnten empirische Daten über störungsbedingte Holzpreisreaktionen dazu beitragen, die Schätzgenauigkeit hinsichtlich der eingelagerten Schadholzanteile zu verbessern.

4.2 Artikel 2: Zimmermann et al. (2021) „Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events“

Untersuchung der bestimmenden Faktoren für die Verweilzeiten von Schadholz im Lager nach schweren Sturmereignissen

Die Autoren des Artikels 2 „Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events“ sind Klaus Zimmermann (Hauptautor) sowie die Coautoren Tobias Schuetz, Holger Weimar und Matthias Dieter. Der Artikel wurde am

30. April 2019 in dem Journal „European Journal of Forest Research“ eingereicht und in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. In überarbeiteter Fassung wurde der Artikel am 31. März 2020 eingereicht. Der Artikel wurde am 06. August 2020 akzeptiert und am 01. Oktober 2020 veröffentlicht (online). Die Entwicklung des konzeptionellen Rahmens und der Methode, die Analyse der Daten, die Diskussion der Ergebnisse sowie die Schlussfolgerungen wurden im Wesentlichen von Klaus Zimmermann durchgeführt. Der Artikel wurde im Wesentlichen von Klaus Zimmermann verfasst. Tobias Schütz trug insbesondere durch seine Beiträge zur Überführung einer in der Fachrichtung Hydrologie gebräuchlichen Methode zur Untersuchung von Verweilzeitverteilungen in den Kontext von Artikel 2 sowie die konstruktive Diskussion der Methode und Datenanalyse zum Artikel 2 bei. Alle Coautoren trugen durch weitere Diskussion sowie die Überarbeitung der Kapitel in geringerem Umfang zum Artikel 2 bei.

Zur Vervollständigung der Untersuchung der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung nach natürlichen Störungsereignissen liegt im Anschluss an Artikel 1 das primäre Ziel des Artikels 2 in der Identifikation der bestimmenden Faktoren für den zeitlichen Verlauf der forstbetrieblichen Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{comp}) nach schweren natürlichen Störungsereignissen. Damit einhergehend ist die Forschungsfrage der Untersuchung (Artikels 2) wie folgt formuliert: Welche Variablen bestimmen den zeitlichen Verlauf der Abflüsse aus dem Schadholzlager? Quantitative Forschungsarbeiten hinsichtlich der forstbetrieblichen Abflüsse aus dem Schadholzlager nach natürlichen Störungsereignissen sind den Autoren nicht bekannt.

Ein wesentliches Element der Untersuchung liegt in der Parametrisierung der empirischen Beobachtungen in Form der einzelbetrieblichen Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{comp}) über einen 6-jährigen Zeitraum. Die Parametrisierung erfolgt mit Hilfe der statistischen Momentenanalyse. Die empirischen Abflüsse aus dem Schadholzlager der einzelnen Forstbetriebe werden anhand der Parameter τ (mittlere Verweilzeit) und σ^2 (Varianz der mittleren Verweilzeit) über einen 6-jährigen Betrachtungszeitraum beschrieben.

Die Auswahl der erklärenden Variablen baut auf die Ergebnisse von Artikel 1 auf. Daher werden die erklärenden Variablen Sturmereignis (SE), Baumartengruppe (SG), Eigentumsart des Forstbetriebs (OT), Größenklasse des Betriebs (ASC) und Störungsbedingte Holzpreisänderung (TPA) analog zu Artikel 1 untersucht. Darüber hinaus wird zusätzlich in Artikel 2 der Einfluss der erklärenden Variable Betriebliche

Kapazität an forstlichen Arbeitskräften (FWC) untersucht. Basierend auf den Vollzeitäquivalenten der beschäftigten forstlichen Arbeitskräfte wird hiermit eine kontinuierliche Variable erzeugt, die die Dichte der angestellten forstlichen Arbeitskräfte je Hektar Betriebsfläche und somit die forstbetriebliche Fixkostenstruktur repräsentiert. Auch die in Kapitel 4.1 für Artikel 1 beschriebene Auswahl der Betriebe zur Erzeugung der effektiven Stichprobe sowie das dort beschriebene Gewichtungsverfahren der multiplen linearen Regressionsanalysen wird analog in Artikel 2 angewendet.

Die Parameter τ und σ^2 werden mit Hilfe von gewichteten multiplen linearen Regressionsanalysen hinsichtlich der erklärenden Variablen untersucht. Das Erklärungsmodell der mittleren Verweilzeiten ergibt ein adj. R^2 von 0,28 und das Erklärungsmodell der Varianzen ein adj. R^2 von 0,25. Die Ergebnisse der gewichteten multiplen linearen Regressionsanalysen verdeutlichen die mehrjährige Relevanz der Schadholzlagerhaltung nach schweren natürlichen Störungsereignissen. So wird im Durchschnitt erst etwa zwei Jahre nach Eintritt des Störungsereignisses das Schadholzlager auf etwa 50% der maximalen Höhe reduziert. Es kann auf betrieblicher Ebene ein statistisch signifikanter Einfluss des Sturmereignisses (SE), der Holzpreisänderung (TPA), der Baumartengruppen (SG), der Eigentumsart des Forstbetriebs (OT) und der betrieblichen Kapazität an forstlichen Arbeitskräften (FWC) auf die mittleren Verweilzeiten des eingelagerten Holzbestands und deren Varianzen nachgewiesen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Baumartengruppe Fichte im Vergleich zur Baumartengruppe Kiefer eine kürzere Verweilzeit und eine längere Streuungsperiode aufweist.

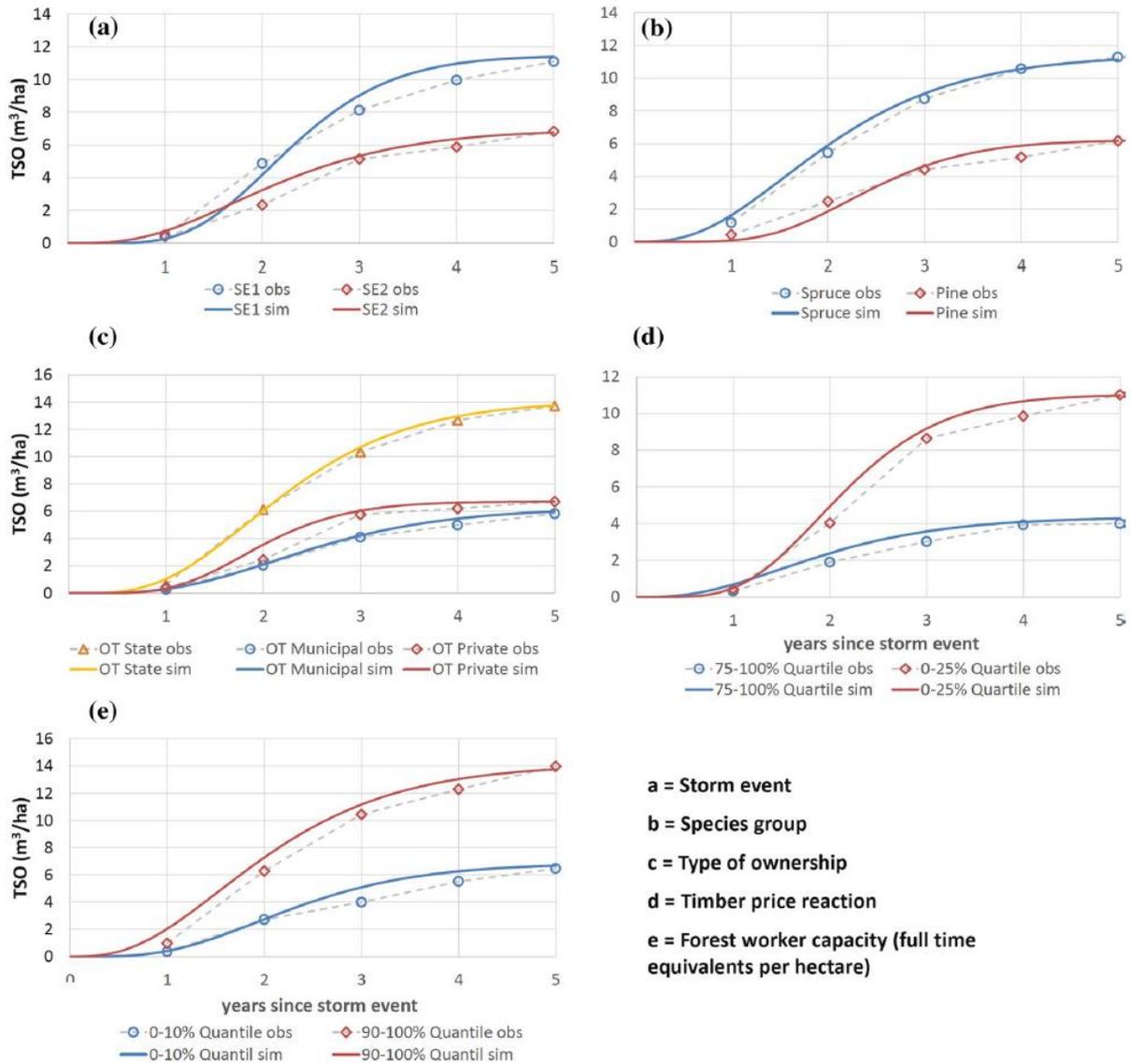
Auch wird die zentrale quantitative Rolle der Fichte hinsichtlich der Schadholzlagerung nach natürlichen Störungsereignissen untermauert. Der Vergleich der Eigentumskategorien (OT) der Forstbetriebe hebt die herausragende quantitative Rolle der staatlichen Forstbetriebe hinsichtlich der Schadholzlagerhaltung heraus. Darüber hinaus zeigt sich, dass die privaten Forstbetriebe ihre Schadholzlager relativ schnell abbauen. Trotz der längeren Lagerungsdauer sind die mittleren TSO-Niveaus zwischen den kommunalen und den privaten Forstbetrieben ähnlich.

Bei der Betrachtung der Variable Holzpreisreaktion (TPA) wird entsprechend der Erwartungen deutlich, dass die Fälle mit stärkeren Holzpreisrückgängen (1. Quartil) mit höheren Schadholzlagerbeständen verbunden sind, als die Fälle mit weniger ausgeprägten Holzpreisrückgängen (4. Quartil). In Bezug auf die eingesetzten

Waldarbeiterkapazitäten pro Hektar (FWC) zeigt sich neben der Korrelation hinsichtlich des Streuungszeitraums ein höherer Schadholzlagerbestand für die Forstbetriebe mit einer höheren Anzahl an Waldarbeitern (90–100%-Quantil) (vergleiche Abbildung 2).

Zur Darstellung der Auswirkungen der verschiedenen erklärenden Variablen werden die betrieblichen Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{comp}) in Abbildung 2 einerseits auf Grundlage der empirischen Werte in kumulierter Form dargestellt. Andererseits werden mit den empirisch hergeleiteten Parametern τ (mittlere Verweilzeit) und σ^2 (Varianz der mittleren Verweilzeit) kontinuierliche Gammaverteilungsfunktionen zur Simulation hergeleitet. Im Vergleich zu den empirischen Werten kann eine gute Repräsentativität der kontinuierlichen Gammaverteilungen beobachtet werden.

Abbildung 2: Kumulative Verteilung der beobachteten und simulierten TSO-Werte der Variablen a Sturmereignis, b Baumartengruppe, c Eigentumsart, d Holzpreisänderung, e Kapazität an forstlichen Arbeitskräften



Quelle: Zimmermann et al. (2021)

Bei der Betrachtung der Korrelation zwischen den Abflüssen aus dem Schadh Holzlager (TSO_{comp}) und den Zuflüssen in das Schadh Holzlager (TSA_{comp}) der Forstbetriebe zeigt sich, dass das Integral aller beobachteten TSO_{comp} (t) etwa TSA_{comp} entspricht. Die Steigung der entsprechenden Regressionsgerade liegt bei 0,93 mit einem R^2 von 0,91. Dies drückt aus, dass auf Grundlage der Regressionsergebnisse 93 % der kumulierten

Schadholzlagermengen (TSA) als Abflüsse aus Schadholzlägern (TSO) in den empirischen Daten zu finden sind.

4.3 Artikel 3: Zimmermann und Jochem (2024) „Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung“

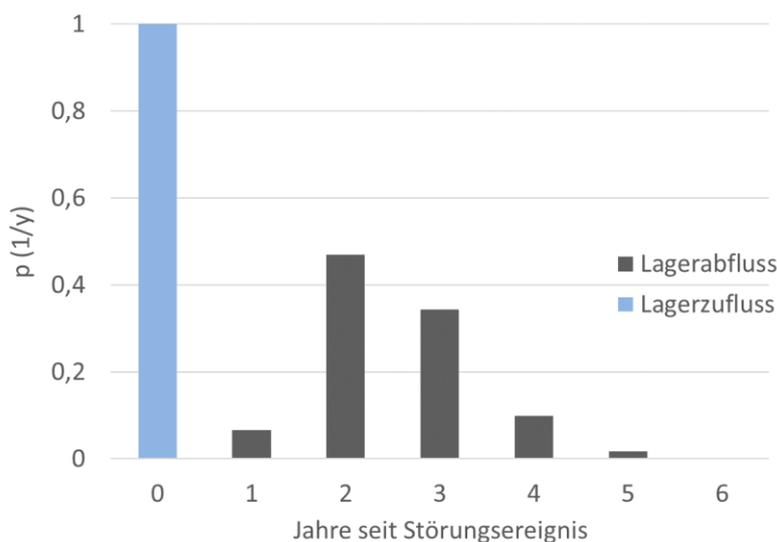
Die Autoren des Artikels 3 „Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung“ sind Klaus Zimmermann (Hauptautor) sowie der Co-Autor Dominik Jochem. Der Artikel wurde im Rahmen der Thünen Working-Paper-Reihe im August 2024 veröffentlicht (online). Die Entwicklung des konzeptionellen Rahmens und der Methode, die Analyse der Daten, die Diskussion der Ergebnisse sowie die Schlussfolgerungen wurden im Wesentlichen von Klaus Zimmermann durchgeführt. Der Artikel wurde im Wesentlichen von Klaus Zimmermann verfasst. Dominik Jochem trug insbesondere zum Stand des Wissens in Form der Einordnung der Bedeutung der Erkenntnisse über die forstbetrieblichen Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen für die Thünen-Einschlagsrückrechnung bei. Dominik Jochem trug darüber hinaus durch weitere Diskussion sowie die Überarbeitung der Kapitel in geringerem Umfang zum Artikel bei.

Aufbauend auf den Untersuchungen zu den Einflussfaktoren auf die Zuflüsse in forstbetriebliche Schadholzlager und die Abflüsse aus forstbetrieblichen Schadholzlagerbeständen (Artikel 1 und Artikel 2) liegt das zentrale Ziel der vorliegenden Arbeit (Artikel 3) in der Entwicklung eines Verfahrens zur nationalen Schätzung der forstbetrieblichen Schadholzlagerbestände nach schweren natürlichen Störungsereignissen. Artikel 3 bezieht sich wie Artikel 1 teilweise und Artikel 2 gänzlich auf die Baumartengruppen Fichte und Kiefer.

In einem mehrstufigen Verfahren werden die empirischen Betriebsdaten des forstlichen Testbetriebsnetzes (TBN-Forst) verwendet, um ein überbetriebliches Schadholzlagerbestandsmodell zu erstellen. Zentrale Eingangsvariablen für das Schadholzlagerbestandsmodell sind grundsätzlich die betrieblichen störungsbedingten Mehreinschläge (DAM_{comp}), die betrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) sowie die betrieblichen Abflüsse aus dem Schadholzlager

(TSO_{comp}). In den Artikeln 1 und 2 werden diese Variablen auf betrieblicher Ebene explorativ untersucht. Die vorliegende Arbeit (Artikel 3) überführt die empirischen Zusammenhänge auf ein überbetriebliches bzw. nationales Niveau. Hierzu sind folgende Schritte definiert: Der nationale störungsbedingte Mehreinschlag (DAM_{nat}) wird in Schritt 1 hergeleitet. Die Herleitung des nationalen Zuflusses zum Schadh Holzlager (TSA_{nat}) erfolgt darauf aufbauend in Schritt 2. Durch die Bilanzierung des nationalen Zuflusses in das Schadh Holzlager (TSA_{nat}) und des nationalen Abflusses aus dem Schadh Holzlager (TSO_{nat}) im zeitlichem Verlauf wird das nationale Schadh Holzlagerbestandsmodell zunächst in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung über den Zeitraum von 6 Jahren nach Eintritt des natürlichen Störungsereignisses berechnet. Die Zuflüsse in das Schadh Holzlager werden auf den Eintritt des natürlichen Störungsereignisses (Jahr 0) datiert (vergleiche Abbildung 3).

Abbildung 3: Eintrittswahrscheinlichkeiten von Lagerzufluss und Lagerabfluss



Quelle: Zimmermann und Jochem (2024)

In Schritt 4 erfolgt die Skalierung des nationalen Schadh Holzlagerbestandsmodells. Hierbei wird das Schadh Holzlagerbestandsmodell auf Grundlage der nationalen Zuflüsse ins Schadh Holzlager skaliert, die durch die nationalen störungsbedingten Mehreinschläge hergeleitet werden. Auf Grundlage dieses Schadh Holzlagerbestandsmodells wird im Rahmen von Artikel 3 die Schadh Holzlagerhaltung für die natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill sowie den

Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer abgeschätzt. Als Ergebnis liegen die jährlichen Zuflüsse ins Schadholzlager für Deutschland durch den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer zwischen 6,9 Mio. Efm im Jahr 2018 und 20,1 Mio. Efm im Jahr 2021. Durch die Simulation der Schadholzlagerbestände über mehrjährige Zeiträume kumulieren die jährlich einlagerten Schadholzmengen im Jahr 2022 bei 38,6 Mio. Efm während des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer durch den Anfall hoher Schadholzmengen über mehrere aufeinanderfolgende Jahre.

Im Rahmen von Artikel 3 wird auch eine Erweiterung des Verfahrens vorgestellt, in welchem bei der Schadholzlagerbestandsberechnung eine Korrektur des nationalen störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{nat}) durch die Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz von Rohholz vorgenommen wird.

Hierbei werden im Rahmen einer Baselinekorrektur von einem Normalwert der Außenhandelsbilanz in Form des Mittelwerts der drei Jahre vor Eintritt des Störungsereignisses ausgehend (Baseline), die Außenhandelsabweichungen des Jahres bestimmt, in welchem ein schweres natürliches Störungsereignis auftritt. Diese kalamitätsinduzierten Rohholzexporte (DAM_{exp}) werden zur Korrektur der Lagerzufluss- und Lagerabflusssummen verwendet. Hierzu werden die kalamitätsinduzierten Rohholzexporte vom nationalen störungsbedingten Mehreinschlag (DAM_{nat}) subtrahiert, um einen korrigiertes inländisches störungsbedingtes Holzaufkommen zu erzeugen.

Bei Anwendung des erweiterten Verfahrens fallen die Schadholzlagerbestandswerte für den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer mit einem Lagerbestandshöchstwert von 24,1 Mio. Efm im Jahr 2022 wesentlich geringer aus. Dies entspricht einer Minderung des absoluten Schadholzlagerbestandes um etwa 14,5 Mio. Efm im Vergleich zum Verfahren ohne Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz. Unter Berücksichtigung der kalamitätsinduzierten Rohholzexporte ergeben sich für Deutschland maximale Zuflüsse ins Schadholzlager von 13,2 Mio. Efm im Schadensjahr 2021. Dies entspricht einer Minderung von 6,9 Mio. Efm im Vergleich zur ursprünglichen Methode.

5 Diskussion der Artikel im thematischen Kontext

5.1 Artikel 1: Zimmermann et al. (2018) „Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany“

Analyse der bestimmenden Faktoren der forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager nach schweren Sturmereignissen in Deutschland.

Im Rahmen von Artikel 1 werden auf empirischer Grundlage Erkenntnisse über die bestimmenden Faktoren der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung gewonnen. Artikel 1 bildet die Basis für die weiteren Studien (Artikel 2 und Artikel 3), die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt werden.

Ein wesentlicher methodischer Bestandteil der Studie (Artikel 1) liegt in der multiplen gewichteten linearen Regressionsanalyse zur Untersuchung der bestimmenden Faktoren für die forstbetrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) nach natürlichen Störungsereignissen. Es werden bei einem adj. R^2 von 0,74 statistisch signifikante Koeffizienten für die erklärenden Variablen Störungsbedingter Mehreinschlag (DAM), Sturmereignis (SE), Baumartengruppe (SG), Eigentumsart (OT) und Größenklasse des Betriebs (ASC) festgestellt. Dies wird unter den gegebenen Rahmenbedingungen als gute Qualität des Erklärungsmodells erachtet.

Ein weiteres zentrales methodisches Element der Studie ist die Untersuchung der Holzpreisrückgänge (TPA) im Rahmen einer moderierten hierarchischen Regressionsanalyse. Aufgrund der Steigerung des adj. R^2 von 0,86 auf 0,88 bei der Einbeziehung der Interaktionsvariable von Schritt 2 zu Schritt 3 sowie der statistisch festgestellten Signifikanz der Interaktionsvariable $DAM_{ln} \times TPA$ wird der moderierende Effekt der Variable TPA bestätigt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit höheren Rückgängen der Holzpreise nach natürlichen Störungsereignissen höhere Schadholzmengen eingelagert werden. Daher hilft die Variable TPA zu erklären, welcher Anteil störungsbedingter Mehreinschläge eingelagert wird. Da Interaktionsterme jedoch bei getrennter Berechnung erheblich unterschiedliche Regressionsmodelle erzeugen können, sollten zugehörige Koeffizienten mit Vorsicht

interpretiert werden. Um eine robustere Interpretation des Interaktionseffekts zu ermöglichen, wurden, wie von Robinson und Schumacker (2009) vorgeschlagen, die Regressionsmodelle separat in den erläuterten drei Schritten für jede Ebene der Interaktionsvariable berechnet. Aufgrund der folgenden Aspekte wird auf die Einschränkungen hinsichtlich der Robustheit der zugehörigen Interpretationen hingewiesen. Da Holzpreise über die lange Zeitreihe ausschließlich von staatlichen Forstbetrieben verfügbar waren, wurden diese auf alle Eigentumsarten angewendet. Darüber hinaus konnte die Variable TPA nur in Verbindung mit Nadelholz-SGs untersucht werden. Die jährliche Varianz der Holzpreise für Nadelholz-SGs war mit Ausnahme der erwarteten starken Reaktion im jeweiligen Sturmjahr gering. Dagegen war die Varianz für Laubholz-SGs über die Jahre hinweg ohne klaren Grund sehr hoch. Der Grund für die Holzpreisvariation könnten Qualitätsunterschiede der zugrundeliegenden Sortimente zwischen den Jahren sein, aber auch weitere Gründe, wie z. B. Angebots- und Nachfragebeziehungen, könnten ursächlich sein.

Die grundlegenden Anforderungen in Bezug auf Multikollinearität, Autokorrelation sowie Heteroskedastizität sind bei den angewandten Analysen erfüllt. Hierbei wurde zunächst ein Test auf Multikollinearität mithilfe des Varianzinflationsfaktors (VIF) durchgeführt. Die Werte des VIF lagen deutlich unter dem von Neter et al. (1985) empfohlenen Grenzwert von 10. Die Autokorrelation wurde mithilfe der Durbin-Watson-Statistik getestet. Keines der Ergebnisse wies Anzeichen für Autokorrelation auf. Die Heteroskedastizität wurde durch eine visuelle Überprüfung der Verteilung der Residuen über die Vorhersagen gemäß der Empfehlung von Gujarati (2003) untersucht und es konnten keine verdächtigen Anzeichen einer nicht zufälligen Verteilung der Residuen identifiziert werden.

Trotz der guten Qualität der Erklärungsmodelle reduziert die mit dem forstbetrieblichen Handeln im Kontext mit schweren natürlichen Störungsereignissen verbundene hohe Komplexität die statistische Robustheit der Modelle für Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) im Hinblick auf die Verwendbarkeit für Vorhersagen. Ein Grund hierfür liegt darin, dass aufgrund der Notwendigkeit einer weit zurückreichenden Datenreihe mit möglichst detaillierten forstbetrieblichen Informationen, die Auswahl verfügbarer Daten beschränkt ist. In der Datenquelle sollten möglichst viele natürliche Störungsereignisse repräsentiert sein. Das forstliche Testbetriebsnetz (TBN-Forst) stellt in dieser Hinsicht die beste verfügbare Datenquelle dar.

Dennoch führte die Verwendung des TBN-Forst zu einer Reihe von daten- und stichprobenbezogenen Herausforderungen. Das Stichprobenverfahren klassifiziert das TBN-Forst als Ermessensstichprobe, was zu dem allgemeinen Problem möglicher Verzerrungen führt. Wenn das Modell zur Erkennung und Korrektur von Stichprobenverzerrungen falsch spezifiziert ist (z. B. wichtige Variablen fehlen, nur Haupteffekte angegeben werden, wenn Wechselwirkungen vorhanden sind oder Linearität angenommen wird, wenn Nichtlinearität vorliegt), können Korrekturmethode wie Gewichtungen von Stichproben ungenau sein oder die Schätzungen sogar verschlechtern (Cuddeback et al. 2004). Obwohl die Robustheit umstritten ist, z. B. Carroll und Ruppert (1988), sind die vorgenommenen Stichprobengewichtungsmaßnahmen gemäß dem durchgeführten Repräsentativitätsvergleich geeignet. Die Analysen und Schätzungen könnten hingegen ohne die Gewichtung verzerrt sein.

Eine weitere Konsequenz der Verwendung des TBN-Forst war die notwendige rechnerische Herleitung der Variablen DAM und TSA auf Grundlage der Originaldaten. Das Baseline-Verfahren zur Generierung der Variablenwerte weist Unsicherheiten auf, da keine längerfristigen Trends, wie z. B. marktbedingte Anpassungen der Holzeinschlagsmengen, berücksichtigt werden. Bei visueller Begutachtung konnten in der zugrundeliegenden Stichprobe jedoch keine derartigen Trends erkannt werden.

Die Anwendung der Bundesländergrenzen zur Festlegung der effektiven Stichprobe als Näherungswert für die vom Sturm betroffenen Regionen könnte durch Interaktionseffekte mit Nachbarregionen zu Verzerrungen der Ergebnisse führen. Im Rahmen des gewählten Ansatzes werden solche möglichen Effekte nicht berücksichtigt. Von Vorteil ist die Verwendung der Bundesländergrenzen, da beispielsweise die TPA-Variable auf kongruenter Flächenbasis generiert und die Stichprobenrepräsentativität mit Informationen der jeweiligen Bundesländer aus alternativen Datenquellen verglichen werden kann. Diese Informationen zur Stichprobenrepräsentativität sind teilweise nur auf Bundesländerebene verfügbar. Die Analyse möglicher Interaktionseffekte mit Nachbarregionen könnte Gegenstand weiterer Forschung sein.

Für die allgemeine Anwendbarkeit unserer Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass das TBN-Forst nur Daten von Forstbetrieben erfasst, deren produktive Waldfläche größer als 200 ha ist. Aus unseren Ergebnissen lassen sich daher keine Rückschlüsse auf

kleinere Forstbetriebe ziehen. Zukünftig könnten bestehende Testbetriebsnetze der Bundesländer für Kleinprivatwaldbetriebe mit unseren Ergebnissen verglichen werden.

Ein weiterer Aspekt, der in der Studie nicht berücksichtigt wurde, ist die Qualitätsverteilung des anfallenden Schadholzes. Die Qualitätsverteilung des anfallenden Schadholzes könnte aufgrund von schlechteren Sortierungen und somit ökonomischen Werten und damit geringeren erzielbaren Preisen ebenfalls Einfluss auf TSA haben. In Ermangelung geeigneter Variablen konnte die Qualitätsverteilung des anfallenden Schadholzes nicht untersucht werden.

5.2 Artikel 2: Zimmermann et al. (2021) „Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events“

Untersuchung der bestimmenden Faktoren für die Verweilzeiten von Schadholz im Lager nach schweren Sturmereignissen

In Artikel 2 werden auf empirischer Basis grundlegende Erkenntnisse über die forstbetriebliche Schadholzlagerhaltung nach schweren natürlichen Störungsereignissen gewonnen. Artikel 2 baut auf den Erkenntnissen von Artikel 1 auf und bildet zusammen mit Artikel 1 die zentrale Grundlage für Artikel 3. Wie in Artikel 1 unterstützen auch die Erkenntnisse aus Artikel 2 grundsätzlich die wichtige Rolle der Schadholzlagerung für Forstbetriebe im Zusammenhang mit schweren natürlichen Störungsereignissen.

Im Rahmen von Artikel 2 werden Erkenntnisse über die zeitlichen Verläufe der Abflüsse aus dem forstbetrieblichen Schadholzlager ($T_{SO_{comp}}$) gewonnen. Es kann gezeigt werden, dass Forstbetriebe über mehrjährige Zeiträume erhebliche Mengen an Holz und damit an Kohlenstoff lagern. Diese forstbetrieblichen Schadholzlagerbestände sollten, wie von Jochem et al. (2015) vorgeschlagen, bei der nationalen und internationalen Berichterstattung berücksichtigt werden.

Methodisch werden in Artikel 2 die von den einzelbetrieblichen Abflussinformationen aus dem Schadholzlager ($T_{SO_{comp}}$) abgeleiteten Parameter τ (mittlere Verweilzeit) und σ^2 (Varianz der mittleren Verweilzeit) mit Hilfe gewichteter multipler linearer

Regressionsanalysen hinsichtlich der erklärenden Variablen untersucht. Das Erklärungsmodell der mittleren Verweilzeiten ergibt ein adj. R^2 von 0,28 und das Erklärungsmodell der Varianzen ein adj. R^2 von 0,25. Hinsichtlich der mittleren Verweilzeit von Schadholz im Lager werden statistisch signifikante Koeffizienten für die erklärenden Variablen Baumartengruppe (SG), Holzpreisreaktion (TPR), Waldarbeiterkapazität (FWC), Eigentumsart (OT) und Sturmereignis (SE) identifiziert. Die erklärende Variable Betriebliche Größenklasse (ASC) zeigt in den durchgeführten Regressionsanalysen keine statistisch signifikanten Koeffizienten. Dies wird als zufriedenstellende Gesamtqualität der Erklärungsmodelle betrachtet. Bei den durchgeführten multiplen Regressionsanalysen werden die Anforderungen hinsichtlich Heteroskedastizität, Autokorrelation und Multikollinearität erfüllt. Zur Prüfung wurde, wie von Gujarati (2003) empfohlen, die Heteroskedastizität durch eine visuelle Überprüfung der Verteilung der Residuen über die Vorhersagen überprüft. Autokorrelation wurde mit der Durbin-Watson-Statistik getestet. Der Test auf Multikollinearität wurde, wie von Neter et al. (1985) empfohlen, mit dem Varianzinflationsfaktor (VIF) durchgeführt.

Wie bei Artikel 1, umfasst die dem Artikel 2 zugrundeliegende Datenbasis die beiden schweren natürlichen Störungsereignisse Lothar (1999) und Kyrill (2007).

Trotz der zufriedenstellenden Qualität der Erklärungsmodelle ist, aufgrund der hohen Komplexität des Phänomens der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung nach schweren natürlichen Störungsereignissen, die statistische Robustheit der Modellergebnisse in Bezug auf Vorhersagen begrenzt. In Bezug auf die den Analysen zugrundeliegenden Daten ist das forstliche Testbetriebsnetz (TBN-Forst) als Beurteilungsstichprobe anfällig für Verzerrungen (Toscani 2016; Toscani und Sekot 2018). Trotz Kontroversen hinsichtlich der Robustheit von Schätzungen im Zusammenhang mit Gewichtungen, z. B. Carroll und Ruppert (1988), wird das angewandte Gewichtungsverfahren als geeignet erachtet. Laut der Repräsentativitätsanalyse in Artikel 1 sind die durchgeführten Gewichtsmaßnahmen der Stichprobe geeignet, um die auf dem Stichprobenverfahren basierende Verzerrung der Daten des TBN-Forst zu korrigieren.

Wie bei Artikel 1 könnte die Verwendung der Bundesländergrenzen als Näherungswert für die vom Sturm betroffenen Regionen durch Interaktionseffekte mit Nachbarregionen zu Verzerrungen führen. Im Rahmen des gewählten Ansatzes werden solche möglichen Effekte nicht berücksichtigt. Die Analyse möglicher

Interaktionseffekte mit Nachbarregionen könnte Gegenstand weiterer Forschung sein. Ebenfalls gilt für die vorliegende Untersuchung wie bei Artikel 1, dass nur Daten von Forstbetrieben erfasst sind, deren produktive Waldfläche größer als 200 ha ist. Aus den Ergebnissen lassen sich daher keine Rückschlüsse auf kleinere Forstbetriebe ziehen. Darüber hinaus kann ein möglicher Einfluss sortiments- und qualitätsbezogener Probleme auf die langfristige Schadholzlagerung nicht ausgeschlossen werden.

Bei der Untersuchung der baumartengruppenbezogenen Abflüsse aus dem Schadholzlager zeigt die Baumartengruppe Fichte im Vergleich zur Baumartengruppe Kiefer eine kürzere mittlere Verweilzeit und eine längere Streuungsperiode. Die hohen gebundenen Geldwerte bedingt durch die großen Schadholzmengen der Fichte könnten hierfür verantwortlich sein. Auch die von Hapla (1992) und Odenthal-Kahabka (2004) festgestellte bessere Eignung der Kiefer für eine längere Lagerung stützt dieses Ergebnis.

Bezüglich der Variable Eigentumsart (OT) zeigen die Ergebnisse, dass bei staatlichen und kommunalen Forstbetrieben im Vergleich zu privaten Forstbetrieben das Schadholz länger im Lager verbleibt. Odenthal (2004) begründet dies als marktentlastendes Verhalten zur Minderung der negativen wirtschaftlichen Effekte für private Forstbetriebe. Im Rahmen von Artikel 1 konnten bereits verstärkte Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) staatlicher Forstbetriebe im Vergleich zu privaten Forstbetrieben festgestellt werden. Veränderte Rahmenbedingungen wie z.B. andere Schadensbetroffenheiten der verschiedenen Eigentumsarten könnten zu Veränderungen der Schadholzlagerhaltung führen.

Hinsichtlich der störungsbedingten Holzpreisänderungen (TPA) zeigen die Ergebnisse eine signifikante negative Korrelation mit der Verweildauer τ von Schadholz im Lager. Die Relevanz von Holzpreisreaktionen für die Schadholzlagerhaltung wird auch an dieser Stelle bestätigt. Stärkere Preisrückgänge bewirken somit längere mittlere Verweilzeiten. Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse eine statistisch signifikante positive Korrelation zwischen TPA und Varianz (σ^2). Bei zunehmendem

Holzpreisrückgang sinkt die Varianz. Der Peak der Abflüsse aus dem Schadholzlager wird also ausgeprägter.¹

Es bestehen grundsätzlich Unsicherheiten hinsichtlich des kausalen Zusammenhangs zwischen Preisänderungen und den bestimmenden Faktoren. Ein Grund könnte beispielsweise in der globalen Finanzkrise liegen, die in den Jahren nach 2007 stattfand. In dieser Zeit war die Nachfrage nach Holz auf einem Tiefstand, was hauptsächlich auf eine Krise im Bausektor zurückzuführen war. Dementsprechend sanken die Holzpreise, was für Forstbetriebe ein Anreiz gewesen sein könnte, ihr gelagertes Schadholz nicht zu verkaufen. Da die zugrundeliegenden Holzpreise nicht auf einzelbetrieblicher Ebene verfügbar waren, stellen sie darüber hinaus möglicherweise nicht die individuelle Grundlage für die Entscheidung dar, Holz aus dem Schadholzlager abzuverkaufen.

Bezüglich der fixen internen Produktionskosten der Forstbetriebe besteht eine signifikante positive Korrelation zwischen relativen Waldarbeiterkapazitäten (FWC) und dem Verteilungsparameter Varianz (σ^2). Hohe Waldarbeiterkapazitäten (FWC) und somit betriebliche Fixkosten pro Hektar führen also zu einem eher gleichmäßigen Abbau der Schadholzlager über die betrachteten Folgejahre. Hierbei ist zu beachten, dass Forstbetriebe seit den betrachteten Sturmereignissen ihre Fixkosten senken (Wippel et al. 2015). Folglich könnten sich auch die Verweilzeiten des Schadholzes im Lager aufgrund der Änderungen in der Fixkostenstruktur der Forstbetriebe in Folge zukünftiger Sturmereignisse ändern.

Hinsichtlich der Variable SE zeigen die Ergebnisse, dass SE1 (Lothar) im Vergleich zu SE2 (Kyrill) eine signifikant kürzere mittlere Verweilzeit aufweist. Die globale Finanzkrise, die ihren Höhepunkt im Jahr 2008 hatte, könnte hierfür der ausschlaggebende Grund sein. In dieser Zeit ging die Nachfrage nach Holz und infolgedessen die Holzpreise deutlich zurück (Jochem et al. 2015). Forstbetriebe könnten ihr Schadholz während dieser Niedrigpreisphase länger im Lager belassen haben, was zu einer längeren mittleren Verweildauer nach SE2 führte. Weitere unbeobachtete Determinanten können angesichts der relativ geringen Erklärungskraft der Regressionsmodelle in Bezug auf τ und σ^2 als abhängige Variablen für den Verlauf von TSO nicht ausgeschlossen werden. Ein Grund für die relativ niedrigen R^2 -Werte

¹ In Artikel 2 (Zimmermann et al. 2021) wurden die Korrelationen der störungsbedingten Holzpreisänderungen (TPA) mit der Verweildauer τ und der Varianz (σ^2) invers interpretiert. Die hier dargestellten Interpretationen sind gültig.

in den durchgeführten multiplen Regressionsanalysen könnte in den verwendeten regionalen Holzpreisdaten (TPR) liegen. Da diese verallgemeinerten Preise möglicherweise nicht die Holzpreise der einzelnen Forstbetriebe darstellen, können die damit verbundenen Lagerhaltungsentscheidungen individuell abweichen. Darüber hinaus könnten möglicherweise Lagerkapazitäten einen wichtigen Erklärungsbeitrag leisten. Genehmigungsverfahren für langfristige Nasslagerstätten könnten sich erschwert und somit die Lagerhaltung geändert haben.

5.3 Artikel 3: „Zimmermann und Jochem (2024) Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung“

Auf Grundlage der Erkenntnisse von Artikel 1 und Artikel 2 wird in Artikel 3 ein Verfahren zur Schätzung nationaler Schadholzlagerbestände nach schweren natürlichen Störungsereignissen entwickelt. Wie bei den Artikeln 1 und 2 zeigen auch die Erkenntnisse aus Artikel 3 die große quantitative Bedeutung der Schadholzlagerung auf nationaler Ebene im Zusammenhang mit schweren natürlichen Störungsereignissen.

Wie bei Artikel 1 und Artikel 2 stellt das forstliche Testbetriebsnetz des Bundes (TBN-Forst) die zentrale Datengrundlage von Artikel 3 dar. Die verwendete Stichprobe repräsentiert die beiden schweren Sturmereignisse Lothar (1999) und Kyrill (2007). Wie bereits für Artikel 1 und Artikel 2 ausgeführt, schränkt die geringe Anzahl natürlicher Störungsereignisse sowie die mangelnde Vielfalt hinsichtlich alternativer primärer Schadensursachen wie Trockenheit oder Insekten sowie weiterer möglicher Einflussfaktoren die Zuverlässigkeit des resultierenden Modells für Vorhersagezwecke ein.

Das in Artikel 3 vorgestellte Verfahren zur Schätzung der nationalen Schadholzlagerhaltung gilt übergreifend für die repräsentierten Baumartengruppen, Eigentumsarten, Schadereignisse (Lothar und Kyrill) und Betriebsgrößenklassen. Aufbauend auf der TBN-Stichprobe von Artikel 1 und Artikel 2 wird in Artikel 3 ein durchschnittlicher Lagerzuflussquotient auf Grundlage der einzelbetrieblichen Zuflüsse in das Schadholzlager (TSA_{comp}) und einzelbetrieblichen störungsbedingten

Mehreinschlägen (DAM_{comp}) hergeleitet. Im Rahmen der explorativ ausgerichteten Studien (Artikel 1 und Artikel 2) konnte neben der Variable DAM_{comp} ein signifikanter Einfluss weiterer erklärender Variablen auf die Schadholzlagerhaltung festgestellt werden. In Artikel 3 wird jedoch aufgrund der geringen Anzahl der durch die Modelle repräsentierten Störungsereignisse sowie dem Mangel an zuverlässigen Eingangsdaten, wie beispielsweise bezüglich der Betroffenheit der verschiedenen Eigentumsarten, von der Einbeziehung weiterer Variablen zur Bildung des Schadholzlagerbestandsmodells abgesehen. Es wird empfohlen, das Modell durch die Erweiterung der Datengrundlage und in Folge durch Einbeziehung zusätzlicher Variablen zu erweitern.

Mehrere für die Parametrisierung des Schadholzlagerhaltungsmodells relevante Variablen sind im TBN-Forst nicht direkt verfügbar, sondern werden über rechnerische Verfahren hergeleitet. Die störungsbedingten Mehreinschlagsvariablen auf betrieblicher Ebene (DAM_{comp}) und nationaler Ebene (DAM_{nat}) repräsentieren nicht die betrieblichen oder nationalen baumartengruppenspezifischen Schadholzmengen. Wie für Artikel 1 werden auch für Artikel 3 störungsbedingte Mehreinschläge (DAM_{comp} und DAM_{nat}) auf Grundlage der betrieblichen Einschlagszeitreihen rechnerisch hergeleitet. Somit handelt es sich bei den Variablen DAM_{comp} und DAM_{nat} um Einschlagsabweichungen, die kausal Störungsereignissen zugeordnet werden. Auf Grundlage der Untersuchung des empirischen Zusammenhangs mit den Zuflüssen ins Schadholzlager (TSA_{comp} bzw. TSA_{nat}) wird mit Artikel 3 das Ziel verfolgt, die nationalen Zuflüsse ins Schadholzlager abzuschätzen. Wie bereits bei Artikel 1 und Artikel 2 diskutiert, bestehen bei rechnerischen Herleitungen Unsicherheiten hinsichtlich der unterstellten Kausalität und somit hinsichtlich der Belastbarkeit der erzielten Ergebnisse.

Wie bei Artikel 1 werden auch für Artikel 3 die betrieblichen Zeitreihen der unverkauften Holzmengen der Berichtsjahre, die im TBN-Forst erfasst werden, zur rechnerischen Herleitung der Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp} bzw. TSA_{nat}) verwendet. Darüber hinaus werden, wie bei Artikel 2, auch bei Artikel 3 die betrieblichen Zeitreihen der verkauften Holzmengen der Vorjahre, die im TBN-Forst erfasst werden, zur rechnerischen Herleitung der Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{comp} bzw. TSO_{nat}) genutzt. Sowohl TSA_{comp} bzw. TSA_{nat} als auch TSO_{comp} bzw. TSO_{nat} werden kausal den untersuchten Störungsereignissen zugeordnet. Wie bereits bei Artikel 1 und Artikel 2 diskutiert, bestehen bei rechnerischen Herleitungen Unsicherheiten

hinsichtlich der unterstellten Kausalität und somit hinsichtlich der Belastbarkeit der erzielten Ergebnisse.

Im Zuge des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer zeigten sich in den Jahren 2018 und 2019 deutliche Preisrückgänge insbesondere bei Fichtenstammholz. Allerdings stiegen die Preise ab September 2020 aus unterschiedlichen Gründen wieder rasch an (vergleiche Abbildung 4). Jochem et al. (2023) und ForstBW (2022) führen hierfür die Reduktion des Holzeinschlags durch das Forstschäden-Ausgleichsgesetz auf Bundesebene, coronabedingte Nachholeffekte der Baubranche und überproportional hohe Exportmengen ins Ausland an. Die hohe Nachfrage nach Rundholz sowie die schnelle Erholung der Holzpreise ab dem Jahr 2021 sind Indikatoren für verminderte Schadholzlagerungsquoten.

Abbildung 4: Preisindices der Staatsforstbetriebe in Prozent (2015 = 100 %)



Quelle: Zimmermann und Jochem 2024; Statistisches Bundesamt (Destatis)

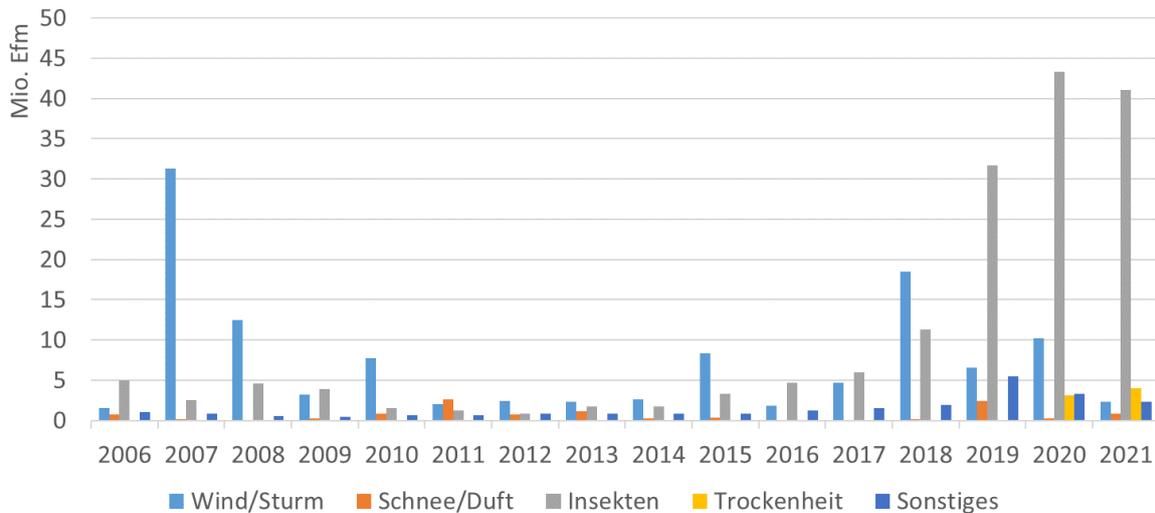
Hinsichtlich der Änderung der Rohholzaußenhandelsbilanz im Zuge des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer stellt Artikel 3 ein Verfahren zur Einbeziehung der störungsbedingten Abweichungen der Rohholzaußenhandelsbilanz vor, welches in Kapitel 4.3 näher erläutert wird. Unsicherheiten hinsichtlich des kausalen Zusammenhangs zwischen natürlichem Störungsereignis und baselinekorrigierter Abweichungen der Außenhandelsbilanz können hierbei nicht

ausgeschlossen werden. Dennoch wird das Verfahren als wichtige Erweiterung zur besseren Abschätzung der nationalen Schadholzlagerhaltung erachtet.

In Artikel 3 werden für die Berechnung des nationalen störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{nat}) die Daten der amtlichen Holzeinschlagsstatistik des Statistischen Bundesamts verwendet. Wie bei den betrieblichen Holzeinschlagszeitreihen des TBN-Forst, liegt die Begründung im Bedarf einer langen Holzeinschlagszeitreihe auf nationaler Ebene (vergleiche Schritt 1: Nationaler störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) im Methodenteil). Sowohl die Thünen-Einschlagsrückrechnung nach Jochem et al (2015) als auch die amtliche Holzeinschlagsstatistik erfüllen dieses Kriterium. Aufgrund ihrer mangelhaften Datenqualität und zuletzt insbesondere aufgrund der Unterschätzung des tatsächlichen Holzeinschlags wird die amtliche Holzeinschlagsstatistik kritisiert (z. B. Jochem et al. 2015). Allerdings benennen Jochem et al. (2023) auch Unsicherheiten im Rahmen der Thünen-Einschlagsrückrechnung bezüglich der Schätzung des Waldlagerspekts ab 2018, da der Waldlagerbestand seit 2018 im Testbetriebsnetz Forst nicht mehr erhoben wird. Aufgrund der Abschätzung des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer seit 2018 ist dieser Zeitraum allerdings von besonderem Interesse. Da die Variable DAM_{nat} die Einschlagsabweichung zwischen Zeiträumen ohne und mit Störungsereignis repräsentiert, spielt die kritisierte absolute Einschlagshöhe auch eine untergeordnete Rolle. Die amtliche Einschlagsstatistik ist darüber hinaus die einzige verfügbare nationale Datenquelle zum Aufkommen von Schadholz. Diese Faktorenkombination war ausschlaggebend für die Verwendung der amtlichen Einschlagsstatistik.

Im Rahmen des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer traten seit 2018 zwar mehrere Sturmwürfe auf, dennoch lag die dominierende Schadensursache in Insektenschäden (vergleiche Abbildung 5).

Abbildung 5: Forstliche Schadensursachen in Deutschland von 2006 bis 2021



Quelle: Zimmermann und Jochem 2024; Statistisches Bundesamt (Destatis)

Durch die verwendete Stichprobe, werden die im Zusammenhang mit den beiden Sturmereignissen Lothar und Kyrill stehenden Parameter als Grundlage für das Schadh Holzlagerhaltungsmodell verwendet. Deren primäre Schadensursache liegt in Sturmwürfen. Bezüglich des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer besteht die primäre Schadensursache allerdings in Insektenkalamitäten und es ist zu hinterfragen, ob die Schadh Holzlagerhaltungsparameter von Insektenkalamitätsholz denen von Sturmholz entsprechen. Hinsichtlich der wirtschaftlichen Rentabilität der Schadh Holzlagerung könnte bei Käferholz aufgrund des verminderten Eingangswerts und eines möglichen geringeren wirtschaftlichen Mehrwerts eine niedrigere Schadh Holzlagerungsquote vorliegen. Auch der zeitliche Verlauf des Abbaus der Schadh Holzlager über einen mehrjährigen Zeitraum könnte bei Käferholz von den Modellparametern abweichen. Wauer (2007) und Odenthal (2004) gehen aufgrund der Perforation der Rinde und einer stärkeren Exposition für Pilzbefall von einer schlechteren technischen Lagerungseignung von Käferholz aus.

Die Schätzung der Schadh Holzlagerbestände wird weiter erschwert, da davon auszugehen ist, dass der Aufwand zur Bereitstellung von zusätzlichen Lagerkapazitäten exponentiell zunimmt. Im Rahmen von Artikel 3 betrifft dies insbesondere die hohen Schadh Holz mengen im Rahmen des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer. Der zunehmende Aufwand liegt einerseits darin, dass technisch geeignete Flächen durch aufwändige wasserrechtliche

Genehmigungsverfahren geprüft werden und hierbei Naturschutzbehörden, Baurechtsbehörden, Fischereirechtsbehörden sowie evtl. Verkehrs- und Straßenbaubehörden beteiligt werden müssen. Andererseits liegt der zunehmende Aufwand auch in der technischen Verfügbarkeit von geeigneten Nasslagerplätzen aufgrund von Wasserverfügbarkeit, Zufahrtsmöglichkeit und Flächenverfügbarkeit begründet. Auch nach dem schweren Sturmereignis Lothar (1999) sind trotz der geringeren Schadholzmengen im Vergleich zum Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer Schwierigkeiten hinsichtlich der Verfügbarkeit von Lagerkapazitäten dokumentiert (Odenthal 2004).

6 Gesamtdiskussion der Teilergebnisse

Die vorliegende Dissertation präsentiert wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung nach schweren natürlichen Störungsereignissen und eröffnet die Möglichkeit zur quantitativen Schätzung der nationalen Lagerbestände insbesondere zur Verbesserung der Abschätzung der nationalen Holznutzung.

Das forstliche Testbetriebsnetz des Bundes (TBN-Forst) stellt die zentrale Datengrundlage der Artikel 1, Artikel 2 und Artikel 3 der vorliegenden kumulativen Dissertation dar. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die begrenzte Anzahl von schweren natürlichen Störungsereignissen (SEs) in Form der beiden schweren Sturmereignisse Lothar (SE1, 1999) und Kyrill (SE2, 2007). Im explorativen Kontext der Artikel 1 und Artikel 2 liefert die vorliegende Dissertation grundlegende Erkenntnisse auf empirischer Grundlage in guter statistischer Qualität. Trotz der guten Qualität der statistischen Modelle in Bezug auf die analysierten Sturmereignisse wird die Anwendbarkeit zur Schätzung für neue natürliche Störungsereignisse aufgrund der hohen Komplexität und der sich ergebenden Unsicherheiten in Bezug auf die Auswirkungen unterschiedlicher Rahmenbedingungen kritisch beurteilt.

Daher werden Unsicherheiten hinsichtlich der Vorhersagequalität des Schadholzlagerhaltungsmodells im Rahmen von Artikel 3 erwartet. Die zugrundeliegenden empirischen Daten führen dazu, dass das entwickelte Modell durch singuläre Sturmereignisse parametrisiert ist. Somit ist das nationale Schätzverfahren beispielsweise nicht für den mehrjährigen Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer parametrisiert. Die aufgezeigte Erweiterung des Schätzverfahrens durch die Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz für Rohholz könnte zur Verbesserung der Schätzungen der Schadholzlagerbestände beitragen.

Die Integration weiterer forstbezogener natürlicher Störungsereignisse wird empfohlen. Sie kann in Zukunft durch die Einbeziehung weiterer erklärender Variablen dazu beitragen, die Vorhersagequalität weiter zu verbessern. Zusammenfassend stellen die empirisch fundierten Ergebnisse der vorliegenden Dissertation methodisch transparent hergeleitete Erkenntnisse hinsichtlich der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung dar, die für Wissenschaftler, politische Entscheidungsträger

und Marktteilnehmer im Zusammenhang mit zukünftigen Sturmereignissen von Interesse sein könnten.

7 Schlusswort und Ausblick

Natürliche Störungsereignisse gewinnen im Zuge des sich vollziehenden Klimawandels auch in Wäldern immer mehr an Bedeutung. Forstbetriebe stehen aufgrund waldbaulicher Entscheidungsnöte hinsichtlich zukünftiger standörtlicher Bedingungen und notwendiger Anpassungen sowie enormer ökonomischer Belastungen vor großen Herausforderungen. Die Lagerung von Schadholz, teils über mehrjährige Zeiträume, stellt hierbei eine wichtige Maßnahme von Forstbetrieben zur Minderung der ökonomischen Schäden dar.

Die Ergebnisse der drei durchgeführten Studien im Rahmen der vorliegenden Dissertation liefern erstmalig weitreichende Erkenntnisse hinsichtlich der forstbetrieblichen Schadholzlagerhaltung nach schweren natürlichen Störungsereignissen. Diese liegen zum einen in explorativen Untersuchungen der bestimmenden Faktoren der forstbetrieblichen Zuflüsse in das Schadholzlager und der Abflüsse aus dem Schadholzlager. Zum anderen wird ein Verfahren entwickelt, mit dem eine Schätzung der nationalen Schadholzlagerbestände nach schweren natürlichen Störungsereignissen ermöglicht wird. Die Ergebnisse können im Rahmen der Thünen-Einschlagsrückrechnung nach Jochem et al. (2015) zur Qualität der Bestimmung der nationalen Holznutzung beitragen.

Die Erkenntnisse bestätigen die große quantitative Bedeutung der forstbetrieblichen Schadholzlagerbestände nach schweren natürlichen Störungsereignissen. Die durchgeführten Untersuchungen liefern wertvolle Informationen hinsichtlich der ausgewerteten Sturmereignisse Lothar und Kyrill. Die Datenbasis reicht jedoch nicht aus, um das forstbetriebliche Schadholzlagerungsverhalten im Zusammenhang mit natürlichen Störungsereignissen in allen Facetten beantworten zu können. Hierfür sind die Erweiterung der Datengrundlage sowie deren Auswertung mittels weiterer empirischer Studien unverzichtbar.

Es wird empfohlen, die Datengrundlage mit weiteren natürlichen Störungsereignissen zu diversifizieren. Auf einer breiteren Datengrundlage könnten weitere Variablen in das nationale Schätzmodell für Schadholzlagerbestände integriert werden. Hierzu ist die Fortführung bestehender Monitoringsysteme mit entsprechenden Kennzahlen wie das forstliche Testbetriebsnetz (TBN-Forst) eine essentielle Voraussetzung.

8 Literaturverzeichnis

Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (2016) *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. Lehrbuch, 14. überarbeitete und aktualisierte Auflage edn. Springer Gabler, Berlin

Berlemann M (2016) Does hurricane risk affect individual well-being?. Empirical evidence on the indirect effects of natural disasters. *Ecol Econ* 124:99–113

Bolte A, Ammer C, Löf M, Madsen P, Nabuurs GJ, Schall P, Spathelf P, Rock J (2009) Adaptive forest management in central Europe: climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand J For Res* 24:473–482. <https://doi.org/10.1080/02827580903418224>

Brunette M, Holec J, Sedliak M, Tucek J, Hanewinkel M (2015) An actuarial model of forest insurance against multiple natural hazards in fir (*Abies Alba Mill.*) stands in Slovakia Forest. *Policy Econ* 55:46–57. <https://doi.org/10.1016/j.forpo.2015.03.001>

Burton P. J., Jentsch A., Walker L. R. (2020) The Ecology of Disturbance Interactions. *BioScience* 70/10: 854-870

BWI3 (2014) *Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur*. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin

Carroll RJ, Ruppert D (1988) *Transformation and weighting in regression*. Chapman & Hall Ltd, London

Cuddeback G, Wilson E, Orme JG, Combs-Orme T (2004) Detecting and statistically correcting sample selection bias. *J Soc Serv Res* 30:19–33. https://doi.org/10.1300/J079v30n03_02

Dieter M, Rosin A, Thoro C (2004): *Die Forstwirtschaftliche Gesamtrechnung der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des ESGV 1995 für die Jahre 1991 bis 2002*. Bundesforschungsanstalt für Forst und Holzwirtschaft, Institut für Ökonomie, Zentrum Holzwirtschaft Universität Hamburg, Hamburg, Arbeitsbericht (2004/15).

Dieter M, Englert H (2005) *Gegenüberstellung und forstpolitische Diskussion unterschiedlicher Holzeinschlagsschätzungen für die Bundesrepublik Deutschland*. BFH, Arbeitsbericht Institut Ökonomie, Hamburg, p 14 2005/2

Englert H, Seintsch B (2014) *Aktualisierte Methodenbeschreibung zur Waldgesamtrechnung mit Tabellen für das Berichtsjahr 2012 (endgültig) und 2013 (vorläufig); Projektbericht für die umweltökonomischen Gesamtrechnungen des Statistischen Bundesamtes*. Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie, Hamburg, p 122

Fuchs J M (2024): Economic potentials and limitations of tree-species diversification as an adaptation strategy to climate change and extreme weather events. 129 S.

Glatthorn J, Schweier J, Streit K, Thees O, Hobi M (2023) Adaptiver Waldbau – mit Wissen, Vorsicht und Mut. Schweizer Zeitschrift für Forstwesen 174/2: 64-69

Gujarati DN (2003) Basic econometrics, 4th edn. McGraw-Hill, Boston

Hapla F (1992) Holzqualität von Kiefern aus einem Waldschadensgebiet nach fünfjähriger Naßlagerung. Holz als Roh-und Werkstoff 50(7–8):268–274

Hillmann M (2007) Kyrill—das Ende der Solidarität. AFZ Wald 62(22):1190–1191

Holecy J, Hanewinkel M (2006) A forest management risk insurance model and its application to coniferous stands in southwest Germany. For Policy Econ 8:161–174. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2004.05.009>

Institute SAS (2016) JMP 13 multivariate methods. SAS Institute, Cary

JMP (2017). http://www.jmp.com/support/help/Launch_the_Fit_Model_Platform.shtml#213135. (Zugriff am 22.05.2017)

Jochem D, Weimar H, Dieter M (2023) Holzeinschlag im Jahr 2022 erreicht 80,7 Mio. m³ : Die energetische Verwendung von Rohholz ist annähernd konstant, während die stoffliche Nutzung etwas abnimmt. Holz Zentralbl 149(40):675-676

Jochem D, Weimar H, Bösch m, Mantau U, Dieter M (2015) Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood, Eur J Forest Res 134(5):869-888

Kinnucan HW (2016) Timber price dynamics after a natural disaster: Hurricane Hugo revisited. J For Econ 25:115–129. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2016.09.002>

Knapp N, Wellbrock N, Bielefeldt J, Dühnelt P. (2024) From single trees to country-wide maps: Modeling mortality rates in Germany based on the Crown Condition Survey. Forest Ecology and Management 586:122081 DOI:10.1016/j.foreco.2024.122081

Kraft H (1975): Analytische Untersuchung der Distribution des Holzes in der Bundesrepublik Deutschland – Grundlagen und Problematik – dargestellt an den Ergebnissen des Jahres 1970. Dissertation, Freiburg, 1975, 132 S.

Mantau U (2004): Holzrohstoffbilanz Deutschland—Bestandsaufnahme 2002. University of Hamburg, Centre of Wood Science and Technology, Department of Economics, Hamburg

Mantau U, Döring P, Weimar H, Glasenapp S, Jochem DI, Zimmermann K (2018a): Rohstoffmonitoring Holz: Erwartungen und Möglichkeiten. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 32 S.

Mantau U, Döring P, Weimar H, Glasenapp S (2018b): Rohstoffmonitoring Holz: mengenmäßige Erfassung und Bilanzierung der Holzverwendung in Deutschland. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 161 S., SchrR Nachwachs Rohstoffe 38.

Mantel K (1973): Holzmarktlehre. Verlag J. Neumann-Neudamm. Melsungen, 700 S.

McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds) (2001) Climate change 2001: impacts, adaption and vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, p 1008

Möhring B, Bitter A, Bub G, Dieter M, Dög M, Hanewinkel M, Hatzfeldt N Graf von, Köhler J, Ontrup G, Rosenberger R, Seintsch B, Thoma F (2021) Schadenssumme insgesamt 12,7 Mrd. Euro: Abschätzung der ökonomischen Schäden der Extremwetterereignisse der Jahre 2018 bis 2020 in der Forstwirtschaft. Holz Zentralbl 147(9):155-158

Neter J, Wasserman W, Kutner MH (1985) Applied linear statistical models. Regression, analysis of variance, and experimental designs, 2nd edn. Irwin, Homewood

Odenthal-Kahabka J (2004) Orkan "Lothar" - Bewältigung der Sturmschäden in den Wäldern Baden-Württembergs: Dokumentation, Analyse, Konsequenzen. Landesforstverwaltung, Stuttgart

Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M. E., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., Hauf, Y., Jasinevičius, G., Labonne, S., Linkevičius, E., Mahnken, M., Milanovic, S., Nabuurs, G.-J., Nagel, T. A., Nikinmaa, L., Panyatov, M., Bercak, R., Seidl, R., Ostrogović Sever, M. Z., Socha J., Thom D., Vuletic D., Zudin S., Schelhaas M.-J. (2022) Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*. 29/5: 1359-1376

Polley H (2006) The Second National Forest Inventory—NFI 2. Results; Covering the National Forest Inventory Surveys of 2001–2002 and 1986–1988. Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection, Berlin

Robinson C, Schumacker RE (2009) Interaction effects: centering, variance inflation factor, and interpretation issues. *Mult Linear Regres Viewp* 35:6–11

Rosenkranz L, Peters MJ, Franz K, Seintsch B (2023) Ergebnisse der forstwirtschaftlichen Gesamtrechnung 2021. *Forst Holz Jagd Taschenb* 2024:165-170

Riguelle S, Hébert J, Jourez B (2015) WIND-STORM: a decision support system for the strategic management of windthrow crises by the forest community. *Forests* 6:3412

Sangines de Carcer P, Mederski P, Magagnotti N, Spinelli R, Engler B, Seidl R, Eriksson A, Eggers J, Bont L, Schweier J. (2021) The Management Response to Wind Disturbances in European Forests. *Current Forestry Reports*. 7:167-180

Sathre R, O'Connor J (2010) Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environ. Sci. Policy* 13 (2):104-114

Seidl, R, Honkaniemi, J, Aakala, T, Aleinikov, A, Angelstam, P, Bouchard, M, Boulanger, Y, Burton, P.J, De Grandpré, L, Gauthier, S et al. (2020) Globally consistent climate sensitivity of natural disturbances across boreal and temperate forest ecosystems. *Ecography*, 43:967–978

Seidl R (2023) Störung und Resilienz in Europas Wald. *WSL Berichte* 144:7-10

Schelhaas M-J, Nabuurs G-J, Schuck A (2003) Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Glob Change Biol* 9:1620–1633. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x>

Sommerfeld, A., Senf, C., Buma, B. et al. Patterns and drivers of recent disturbances across the temperate forest biome. *Nat Commun* 9, 4355 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06788-9>

Spathelf P, Ammer C, Annighöfer P, Bolte A, Seifert T, Weimar H (2022) Fakten zum Thema: Wälder und Holznutzung. *AFZ Wald*. 39–44

Thünen-Institut für Waldwirtschaft (2024a): Holzeinschlag und Rohholzverwendung [online]. Hamburg: Thünen-Institut für Waldwirtschaft. Zu finden unter: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/holzeinschlag-und-rohholzverwendung> (Zugriff am 01.08.2024)

Thünen-Institut für Waldwirtschaft (2024b): Clusterstatistik [online]. Hamburg: Thünen-Institut für Waldwirtschaft. Zu finden unter: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/clusterstatistik-forst-holz> (Zugriff am 23.08.2024)

Toscani P (2016) Methodische Aspekte und Informationspotentiale Forstlicher Testbetriebsnetze in Österreich. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Toscani P, Sekot W (2018) Forest accountancy data networks—a European approach of empirical research, its achievements, and potentials in regard to sustainable multiple use forestry. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Udali A, Andrighetto N, Grigolato S Gatto P (2021) Economic Impacts of Forest Storms—Taking Stock of After-Vaia Situation of Local Roundwood Markets in Northeastern Italy. *Forests*, 12, 414. <https://doi.org/10.3390/f12040414>

van Lierop P, Lindquist E, Sathyapala S, Franceschini G (2015) Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. *For Ecol Manag* 352:78–88. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.010>

Wauer A (2007) So lagern Sie Rundholz richtig! *LWF aktuell* 56, S. 43-45

Weimar H (2011) Der Holzfluss in der Bundesrepublik Deutschland 2009 - Methode und Ergebnis der Modellierung des Stoffflusses von Holz. Hamburg: vTI, 36 p, Arbeitsber Inst Ökon Forst Holzwirtsch vTI 2011/06

Weimar H (2020) Holzbilanzen 2017 bis 2019 für die Bundesrepublik Deutschland. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 37 p, Thünen Working Paper 153, DOI:10.3220/WP1598873344000

Weller A, Böckmann T, Noltensmeier A (2022) Betriebssicherheit der Hauptbaumarten. Eine Untersuchung im niedersächsischen Landeswald zu abiotischen und biotischen Schadereignissen. *Holz-Zentralblatt* 2022/5:79-81

Wohlgemuth T. (2022) Störungen und Extremereignisse: ein Überblick. *Regio Basiliensis*. 63/2 2022 S. 89-98

Zimmermann K, Schuetz T, Weimar H (2018) Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany. *Eur J For Res* 137:463–475

Zimmermann, K., Schuetz, T., Weimar, H. Dieter M (2021) Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events. *Eur J For Res* 140:37–50

Zimmermann K, Jochem D (2024) Forstbetriebliche Schadh Holzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 37 p, Thünen Working Paper 244, DOI:10.3220/WP1722506779000

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gesamt- und Schadhholzeinschlag in Deutschland.....	13
Abbildung 2:	Kumulative Verteilung der beobachteten und simulierten TSO- Werte der Variablen a Sturmereignis, b Baumartengruppe, c Eigentumsart, d Holzpreisänderung, e Kapazität an forstlichen Arbeitskräften.....	30
Abbildung 3:	Eintrittswahrscheinlichkeiten von Lagerzufluss und Lagerabfluss	32
Abbildung 4:	Preisindices der Staatsforstbetriebe in Prozent (2015 = 100 %)	43
Abbildung 5:	Forstliche Schadensursachen in Deutschland von 2006 bis 2021	45

Anhang I: Der kumulativen Dissertation zugrundeliegende Artikel

I.1 Wissenschaftliche Artikel

Artikel 1

Artikel 2

I.2 Transferartikel

Artikel 3

I.1 Wissenschaftliche Artikel

Artikel 1

Zimmermann K, Schuetz T, Weimar H (2018) Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany. Eur J For Res 137:463–475



Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany

Klaus Zimmermann¹ · Tobias Schuetz² · Holger Weimar¹

Received: 24 August 2017 / Revised: 19 February 2018 / Accepted: 26 April 2018 / Published online: 4 May 2018
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

Abstract

In this study, we explore the determinants of forest enterprises' timber storage accumulation after severe storm events. The explanatory power of variables reflecting economic, institutional and tree species-related factors is tested via econometric analyses. Timber storage accumulation is assessed conducting a weighted multiple linear regression analysis. In addition, the moderating effect of timber price alterations on timber storage accumulation is tested employing timber price alterations as a moderator variable in a hierarchical regression analysis. The results show a linear positive relation between forest enterprises' damaged and stored timber quantities. It was found that coniferous timber was stored to a greater extent than non-coniferous timber which can be explained by higher storm damage as well as better suitability for multiyear storage. State forestry stored the highest shares of damaged timber, followed by municipal and private forest enterprises, which can be explained as a countervailing measure. A further central finding of our study is that the timber price drops after storm events act as a moderator variable on the relation between damaged and stored timber quantities. Hence, empirical timber price reactions help to improve estimation accuracy regarding the shares of damaged timber which are stored. Derived from our results, we find timber storage accumulation to be a common practice by forest companies to mitigate revenue losses caused by extreme storm events. As coefficients vary strongly among the analyzed variables' categories, we consider case-specific storage accumulation estimations to be crucial for improving the accuracy of national wood and timber accounting, but also for a full view on storm-related economic damage in the forest sector. In addition, it is likely that capturing the proportions of timber storage in forests will gain relevance in the future, since forest damage from natural disturbances is expected to increase as a consequence of climate change.

Keywords Fallen timber · Timber storage · Forest enterprises · Wind storms · Timber balance · Regression analysis

Introduction

Large-scale timber storage can be found in conjunction with extreme storm events in European forestry as a measure for forest enterprises to mitigate revenue losses. However, the factors, through which forest enterprises' timber storage behavior can be specified, remain uncertain. This

paper analyzes determinants for timber storage accumulation (TSA) after extreme storm events. On the one hand, this is relevant to the economic assessment of storm-related consequences for forestry. On the other hand, as timber storage estimates for existing forest-related accounting schemes are currently generated by using semiquantitative “expert knowledge” (Dieter et al. 2004), the empirical analysis of determinants for TSA in forests is beneficial in attaining higher accuracy in such schemes as, e.g., the use-side estimation of wood removal and felling quantities in Germany. This is especially noteworthy as reliable and accurate information on wood removal and felling quantities is of high importance for forest-related policy processes (Jochem et al. 2015). Further forestry-related accounting schemes, such as the German Wood Resource Balance (Mantau 2015), the Greenhouse Gas Emission Reporting System for the National Inventory Report (NIR), Economic Accounts

Communicated by Arne Nothdurft.

✉ Klaus Zimmermann
klaus.zimmermann@thuenen.de

¹ Thünen Institute of International Forestry and Forest Economics, Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg, Germany

² Hydrology Department, FBVI Regional and Environmental Sciences, Trier University, Behringstraße 21, 54296 Trier, Germany

for Forestry (EAF) or European Forest Accounting (EFA), formerly the Framework for Integrated Environmental and Economic Accounting for Forests (IEEAF), could also benefit from more transparency with regard to TSA assessment.

Despite an increasing threat to forest stocks by natural disturbances, and the recurring phenomenon of timber storage, to the best of our knowledge, no study exists to date analyzing the determinants of forest companies' TSA after extreme weather events. Thus, the purpose of our study lies in the identification and analysis of such variables.

In general, forest disturbances can be divided into the main categories: (1) abiotic disturbances such as storms, fire, snow and (2) biotic disturbances such as bark beetles (Brunette et al. 2015; Holeczy and Hanewinkel 2006). From 1950 to 2000 an annual average of 35 million m³ of damaged timber was generated in European forests by such disturbances (Schelhaas et al. 2003). The majority of damage was caused by storms (Riguelle et al. 2015; Schelhaas et al. 2003), to which particularly coniferous forests are vulnerable (Thorn et al. 2017). Regarding the future development of natural disturbances and extreme weather events, an increasing risk of substantial stock losses is expected: On the one hand, climate change is supposed to cause progressive numbers of extreme weather events (McCarthy et al. 2001), and on the other hand, increasing forest stock levels enhance the damaging potential of storms (Bolte et al. 2009).

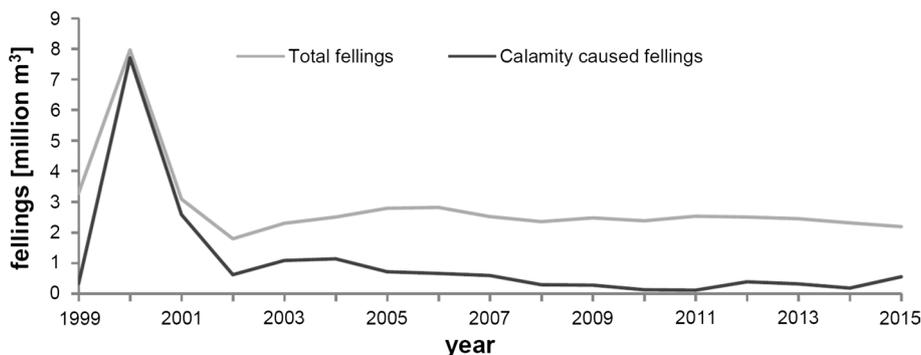
The empirical time series of total and calamity-caused felling quantities of Baden-Wuerttemberg state forestry provides an example of the harvesting behavior of forest companies related to the occurrence of fallen timber (see Fig. 1). In the year 2000 the extreme wind storm Lothar caused a strong increase in total and calamity-caused felling quantities. Calamity-caused felling quantities exceeded the average harvesting volume more than twice. The share of calamity-caused felling quantities against total felling quantities in this year lies at 97%. The following years 2001 and 2002 were still strongly related to the storm event; thus, the year 2001 is characterized by the mandatory harvest of the remaining fallen timber and the year 2002 shows a slightly reduced total harvesting volume to compensate

storm-caused losses in forest stocks. Despite varying values of annually occurring fallen timber quantities, the total harvesting volume does not correlate with these alterations in the subsequent years.

However, with regard to severe windstorms, unintended felling quantities often exceed planned annual felling quantities at the enterprise level or even on a larger spatial scale. If supplied to the market, such additional timber quantities potentially induce decreases in timber prices and cause revenue losses for forest enterprises (Kinnucan 2016). Hence, forest enterprises store certain proportions of their surplus timber quantities, anticipating timber prices to recover over time (Englert and Seitsch 2014). For instance, a total of 4.72 million m³ of timber was stored in the federal state Baden-Wuerttemberg after the storm event Lothar (Odenthal-Kahabka 2004), corresponding to a share of approximately 40% of the regular annual felling quantities in this federal state (NFI3 2014). Countervailing behavior of state forestry toward the municipal and private ownership groups has also been mentioned in this context (Odenthal-Kahabka 2004). In wet periods storage timber can persist for several years without being devalued. Odenthal-Kahabka (2004) suggests a period of 2–3 years as ideal storage duration for wet-stored coniferous timber and asserts increasing quality degradation after 3 years of storage. A study on the technical wood properties of *pine* after 5 years of wet storage shows only minor quality degradation (Hapla 1992). On the other hand, with regard to non-coniferous tree species, Odenthal-Kahabka (2004) suggests a maximum storage duration of 1 year for *beech* before quality begins to deteriorate.

Due to the indications from the state of knowledge, we derived the following two research hypotheses h_1 : “Damage quantity, tree species group, type of ownership, storm event and areal size class affect forest companies' timber storage accumulation after severe storm events,” and subsequently h_2 : “The level of price drops for raw timber after severe storm events has an influence on the share of timber storage accumulation from damaged timber.” In line with our research goal, which was to identify the determinants

Fig. 1 Total felling quantities and calamity-caused felling quantities for Baden-Wuerttemberg state forestry. The peak visible in both time series is caused by the windstorm “Lothar”. *Source*: special analysis at Forest Research Institute of Baden-Württemberg (FVA) based on an in-house management information system (FoFIS)



of timber storage accumulation, our research question was formulated as follows: “Which variables have an influence on timber storage accumulation after severe storm events?” The variable selection related to our research hypotheses is described in detail in the following section.

Methods

In this section, we first describe the conceptual assumptions, upon which we specified our model including the selection of variables which we chose to test with regard to their explanatory contribution to timber storage accumulation. Then the characteristics of the German Forest Accountancy Data Network (FADN) as our primary empirical database are described. We then describe the selected variables we used to test our hypotheses and to answer our research question. In this section, we also explain the calculative procedures needed for the application to the variables. Then the multiple least squares regression analysis, which we applied to test h_1 , is defined. Finally, we describe the hierarchical moderated regression analysis which we performed to test h_2 .

Conceptual framework

In line with our research hypothesis h_1 , the variables damage (DAM), tree species group (SG), type of ownership (OT), storm event (SE), and areal size class (ASC) were tested for their explanatory contribution toward forest companies’ timber storage accumulation (TSA). The damage (DAM) variable was chosen as we expected forest enterprises’ timber storage quantities to be positively related to their damage quantities. Then the variable tree species group (SG) was chosen due to indications regarding differences in storm affectedness as well as suitability for long-term storage between species groups. The variable type of ownership (OT) was chosen to test for a countervailing behavior of state forestry toward other ownership groups in terms of temporarily holding back damaged timber quantities from the market. The variable storm event (SE) was chosen to test for general differences in TSA between the embedded storm events in our data set. Areal size class (ASC) was chosen as a variable to test for scale effects between forest companies regarding TSA. To explore and to quantify the impact of these variables, we conducted a weighted multiple regression analysis which is described in detail below.

Regarding h_2 , we assume that the variable timber price alteration (TPA) is resulting from the relation between fallen timber quantities reflecting the supply-side and market capacity conditions reflecting the demand side of the timber market. As forest companies act as price taker and adapt their store or sell decisions to the level of price alterations,

we want to test whether TPAs act as a moderator toward the relation between the forest companies’ DAM and TSA variables. We tested the related hypothesis h_2 , conducting a hierarchical moderated regression analysis which is described in detail below. No further explanatory variables have been tested in this study or excluded from our model due to missing explanatory contribution.

Data

Forest Accountancy Data Network (FADN)

A valuable asset for the economic monitoring of German forestry is the Forest Accountancy Data Network (FADN), which is a long-standing systematic collection of forest companies’ operational data. The data set contains forest companies’ physical timber production variables, as well as cost and revenue variables from 1991 ongoing until today on an annual basis. The data collection of the German FADN is coordinated by the Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) (Lohner et al. 2016). Due to the sampling procedure it is classified as a judgement sample. An annual number of approx. 350 forest companies of the ownership categories state forestry, municipal forest companies, and private forest companies with a company production area of at least 200 ha constitute the sample. The questionnaire contains a section in which TSA is surveyed, and thus, we can use the FADN to analyze the influence of economic, institutional and species-related variables with regard to their explanatory contribution toward TSA. Another advantage of the German FADN lies in its long survey period containing historical information on timber storage affected by the SEs Lothar and Kyrill, which are classified to be among the severest wind storms since the beginning of regulated forestry in Germany (Hillmann 2007) (see Table 1).

Characteristics for these exceptionally severe storms are the substantial amounts of damaged timber, plus additional quantities in neighboring countries. This is especially noteworthy, as the average regular annual felling levels of German forestry were at a level of approximately 60 million m^3 of timber harvested on average in the time period between 1987 and 2002 (Polley 2006), and 75 million m^3 of timber harvested on average in the time period between 2002 and 2012 (NFI3 2014).

The FADN data set contains specific information of the tree species group categories *spruce*, *pine*, *beech*, and *oak*. These were integrated into the data set as dummy variables. To test for an explanatory contribution of different production areas toward TSA, as described above, ASC was added to the data set as a further dummy variable. The three ASC categories we tested were specified as ASC1 ($0 \text{ ha} < x < 200 \text{ ha}$), ASC2 ($200 \text{ ha} \leq x < 500 \text{ ha}$), and ASC3 ($x \geq 500 \text{ ha}$).

Table 1 Most severe storm events for German forestry since 1990

Date	Name of storm events	Main impact area (federal states)	Damaged timber (million m ³)
25.2.1990–1.3.1990	Vivian and Wiebke	Rhineland-Palatinate, Saarland, Hesse, Thuringia, Bavaria, Baden-Wuerttemberg	72 ^a
26.12.1999	Lothar	Baden-Wuerttemberg, Bavaria, Rhineland-Palatinate	34.3 ^b
18.1.2007–19.1.2007	Kyrill	North Rhine-Westphalia, Rhineland-Palatinate, Saarland, Hesse, Thuringia, Bavaria	37 ^c

^{a,b}Odenthal-Kahabka (2004), ^cHillmann (2007)

Generally, the collection of a random sample can be seen as an essential step to deduce empirical inferences about a population based on a sample (Cuddeback et al. 2004; Kish 1965). Since the German FADN does not represent a random sample, bias cannot be excluded. To account for representability concerns, the data set provides a sample expansion factor. Regarding the procedure of generating the sample expansion factor, the number of forest companies of the unexpanded sample is compared with the number of forest companies of the parent population, gained from a full census of forest companies (Statistisches Bundesamt 2001). Regarding this comparison, seven strata are specified for each federal state: One stratum accounts for state forestry (STRAT1), three strata account for different areal size classes of municipal forest companies (STRAT2: 200 ha ≤ *x* < 500 ha, STRAT3: 500 ha ≤ *x* < 1000 ha, STRAT4: *x* ≥ 1000 ha), and three strata account for the same areal size classes of private forest companies. Based on the respective ratio between sample size and parent population size, sample expansion factors are generated annually for each stratum. The expanded sample is provided by applying the expansion factors (see Table 2).

In our comparison between the unexpanded sample, the expanded sample, and Third National Forest Inventory data (NFI3 2014), noticeable distribution deviations were found for the variable “ownership category.” As expected, state forestry is overrepresented in the unexpanded sample (79%) compared to private and municipal forest companies (a total of 21%). The reason lies in the FADNs’ stratified surveying scheme. State forestry’s area accounts for 30% of the parent population area, but is represented by only one company in each federal state. However, the FADN surveys all state forest companies, because they represent an obligatory stratum for surveying. Hence, their partial representability is comparable to a full census in contrast to private and municipal ownership categories, which are represented as a partial sample. An unbalanced representability occurs as a consequence. The sample expansion factor balances this representability issue effectively (see Table 2). After implementation of the expansion factor, state forestry represents an area proportion of 36% compared to the parent population value of 30%. The remaining deviation of the areal share of private forest companies between the parent population value of 42% and the expanded sample

Table 2 Comparison of sample, expanded sample, and population by the areal distribution of the categories among the variables: (1) SG; (2) OT; (3) federal states as well as the number of cases in the sample, respectively

Variable	Unexpanded sample (%)	Expanded sample (%)	Third National Forest Inventory data ^a (%)	<i>N</i> (number of cases in the sample)
Species groups’ areal distribution				
<i>Spruce</i>	45	45	39	110
<i>Pine</i>	17	15	15	94
<i>Beech</i>	31	32	36	101
<i>Oak</i>	8	8	10	82
Ownership categories’ areal distribution				
Municipal	13	47	28	270
Private	8	17	42	110
State	79	36	30	7
Federal states’ areal distribution				
Baden-Wuerttemberg	27	29	24	226
Bavaria	43	32	46	57
Hesse	20	26	15	40
Rhineland-Palatinate	10	14	15	64

^aSource: NFI3 (2014)

value of 17% can be explained due to the fact that the FADN does not represent forest companies below 200 ha, whereas these smaller entities are nonetheless contained in the parent population percentage. The same applies for municipal forest companies. Consequently, the expanded sample is used for the subsequent analyses.

As described above, in order to test h_1 , we took into account the FADN-based variables damage (DAM), type of ownership (OT), tree species group (SG), and areal size class (ASC). To take into account the timber market situation and its response to the storm event in terms of price changes, in line with h_2 , timber price alteration (TPA) was chosen as a further variable, based on ZMP (2002, 2008), to be tested regarding its explanatory power toward TSA (see Table 3).

In order to generate the effective sample applicable to this study, a spatial delineation of the analysis units was carried out. Federal states' boundaries were used as an approximation unit for the spatial definition of the selected sample. Selection criteria were "storm affectedness" and a sufficient representation of all categories of the analyzed variables in the respective federal states. Reversely, several federal states were excluded from the sample due to a lack of storm-related damage or insufficient sample size. Regarding the selection of analyzed SEs, recognizable TSA signals could be solely identified in correlation with the extremely severe storm events SE1 and SE2. Furthermore, cases with DAM values below 1 m³/ha were excluded from the analyses in order to account for comparatively high uncertainties regarding small DAM values. Regarding the FADN-based variable DAM, variable values are derived from the time series of annual felling quantities of each forest enterprise after the following procedure:

$$\alpha(T) = \left(\frac{1}{5} \sum_{T-5}^{T-1} x(T) \right), \tag{1}$$

where T is the year of SE and x stands for annual felling values. Applying Eq. (1) we first generate a baseline value

(α) for each data set by calculating the average felling value in the 5 years before the respective SE.

$$\beta(T) = \begin{cases} x(T) - \alpha(T), & \text{if } \alpha \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{2}$$

Applying Eq. (2) the previously generated baseline is subtracted from the actual felling values. The resulting annual values (β) must not be below zero. Our related rationale is that forest companies' transfer from damage into storage usually happens in the respective year and thus negative damages would falsely mitigate damage quantities when suing up several years' values as subsequently performed.

$$X(T) = \sum_T^{T+5} \beta(T). \tag{3}$$

Applying Eq. (3), the resulting values from Eq. (2) are summed up for the storm year and the five following years. The results constitute the storm-related DAM values (X).

Regarding the variable TSA, variable values are derived from the FADN-based time series of unsold timber quantities in conformity with the above-described procedure related to the derivation of DAM.

Timber price alterations

As timber supply increases, market reactions in terms of progressive timber price decreases are likely to arise. Accordingly, we expect the incentive for forest enterprises to store additional quantities of surplus fallen timber to rise with decreasing prices after extreme weather events.

To facilitate the analysis of the influence of TPA on TSA, the use of regional timber price data was mandatory. State forestry departments' timber price data were employed to approximate TPA of the storm-affected federal states (ZMP 2002, 2008). Considerable price reactions could only be found for the species groups *spruce* and *pine*, which is

Table 3 Variable abbreviations and explanations

Variable	Variable explanation	Scale	Unit	Related hypotheses	Transformation	Source
TSA	Timber storage accumulation	Continuous	m ³ /ha	h_1 and h_2	In-transformation	FADN
DAM	Damage	Continuous	m ³ /ha	h_1 and h_2	In-transformation	FADN
TPA	Timber price alteration in connection with storm event	Continuous	€/m ³	h_1 and h_2		ZMP
SE	Names of the storm events: Lothar (SE1) and Kyrill (SE2)	Nominal	Binary	h_1 and h_2		FADN
SG	Species groups: SG <i>Spruce</i> (<i>Spruce</i> , <i>fir</i> , <i>Douglas fir</i>), SG <i>Pine</i> (<i>Pine</i> , <i>larch</i> and other coniferous species), SG <i>Beech</i> (<i>Beech</i> and other broad-leaved species), SG <i>Oak</i> (<i>Oak</i>)	Nominal	Binary	h_1 and h_2		FADN
OT	Type of ownership: OT State forest, OT Municipal forest, OT Private forest	Nominal	Binary	h_1 and h_2		FADN
ASC	Areal size class: ASC1 (0 ha < x < 200 ha), ASC2 (200 ha ≤ x < 500 ha), and ASC3 (x ≥ 500 ha)	Nominal	Binary	h_1 and h_2		FADN

plausible taking into consideration that these are the most affected species groups in terms of unintended felling quantities. Furthermore, in contrast to coniferous timber, prices for non-coniferous timber showed a relatively high variance over time for unknown reasons. For these reasons, we limited subsequent analyses of the relation of TPA with TSA to the coniferous species groups. TPAs were calculated as deviations of the timber prices (PS) from the year before storm to the timber prices in the storm year (T). These delta values were subsequently corrected from price trends by subtracting the corresponding timber price (PN) delta values of non-storm-affected regions, respectively, non-storm-affected federal states in Germany:

$$\text{TPA} = \left(\overline{\text{PS}}_T - \overline{\text{PS}}_{T-1} \right) - \left(\overline{\text{PN}}_T - \overline{\text{PN}}_{T-1} \right), \quad (4)$$

where $\overline{\text{PS}}$ is the mean of timber prices in storm-affected federal states and $\overline{\text{PN}}$ is the mean of timber prices in non-storm-affected federal states.

Hence, historical TPA (coniferous SGs only) related to SE1 and SE2 at the spatial scale of the federal states was extracted as €/m³.

Testing of TPA via ordinary least squares regression analysis showed a significant influence on TSA at a 99% confidence interval (n (sum of weights): 1.086.899, R^2 : .43, p value: 145.94, slope: $-.71$). These results do not capture the influence of further explanatory variables on TSA, based on the described indications from the state of knowledge, which we want to explore as stated in our research question. Therefore, in the next step we apply a multiple regression analysis, in which we will integrate further explanatory variables, as explained below.

Analysis

Weighted multiple linear regression analysis

Timber storage accumulation (TSA) as dependent variable will be explained by forest companies' damage values (DAM) as continuous independent variable as well as storm event (SE), species group (SG), type of ownership (OT), and areal size class (ASC) as nominal independent variables. For all nominal variables the alpha numerical last category is excluded from the subsequent regression analyses to avoid the dummy trap problem or perfect multicollinearity between the categories, respectively. The variables DAM and TSA are highly left-skewed. Therefore, we transform them into natural logarithms and denote them $\text{TSAIn} = \ln(\text{TSA})$ and $\text{DAMIn} = \ln(\text{DAM})$, where applied. The resulting estimation function of the multiple linear regression is:

$$\ln(\text{TSA}) = \ln(\text{DAM}_1)\beta_1 + \text{SE}_2\beta_2 + \text{SG}_3\beta_3 + \text{OT}_4\beta_4 + \text{ASC}_5\beta_5 + \varepsilon, \quad (5)$$

where β are the coefficients and ε is the error term.

Weight variables are useful in situations where there are observations with different variances (Backhaus et al. 2016). In our study this condition occurs as the individual cases do not represent a standardized sampling area. Cases involving a larger forest area as base for correlated values should contribute more heavily to the regression function than cases involving a smaller forest area; thus, weighting of the sample is indispensable for the multiple linear regression analysis. Consequently, the underlying sampling area is used to weight the cases of the sample. Furthermore, the previously mentioned FADNs' sample expansion factor is integrated into the weight variable in a multiplicative way to correct for the above-mentioned representability issues of FADN. The weight scales the case's contribution to the loss function by $w^{-1/2}$ (JMP 2017; SAS Institute 2016). In the case of standard least squares estimation in a linear model the loss function is the sum of squared deviations of the observations from the model. The weight variable has an impact on estimates and standard errors. However, it does not affect the degrees of freedom used in the hypothesis tests.

Analysis of interaction effects

Hierarchical moderated regression analysis

Generally, moderation analysis aims at discovering interactions between variables in a multiplicative way involving a multiple linear regression analysis. The adjusted regression equation including the TPA variable as well as an interaction variable between the two independent variables DAMIn and TPA is:

$$\begin{aligned} \ln(\text{TSA}) = & \ln(\text{DAM}_1)\beta_1 + \text{TPA}_2\beta_2 + (\ln(\text{DAM}_3) \\ & \times \text{TPA}_3)\beta_3 + \text{SE}_4\beta_4 + \text{SG}_5\beta_5 + \text{OT}_6\beta_6 \\ & + \text{ASC}_7\beta_7 + \varepsilon, \end{aligned} \quad (6)$$

where β are the coefficients and ε is the error term. The coefficient β_3 describes the interaction effect of the term $(\ln(\text{DAM}) \times \text{TPA})$. Moderator variables have an effect on other independent variables in terms of the strength and/or direction of their relation to the dependent variables. Our hypothesis regarding the moderating effect of TPA on the relation between the independent variable DAMIn and the dependent variable TSAIn is tested conducting a hierarchical moderated regression analysis. According to Aiken and West (1991), we enter the independent variables into the model in a three-step procedure to analyze the predictive impact of the added variables on the model. In the first step the control variables SE, SG, OT, and ASC are entered into the model. In the second step the main effect variables DAMIn and TSA are added to the model. In the third step the interaction

variable $DAMIn \times TPA$ is added to the model. In order to minimize multicollinearity between the main effect variables and the interaction variable, the variables $DAMIn$ and TPA are mean-centered (Aiken and West 1991). To analyze our data set we used the fit model platform of JMP statistics software version 12.2.0.

Measurement assessment

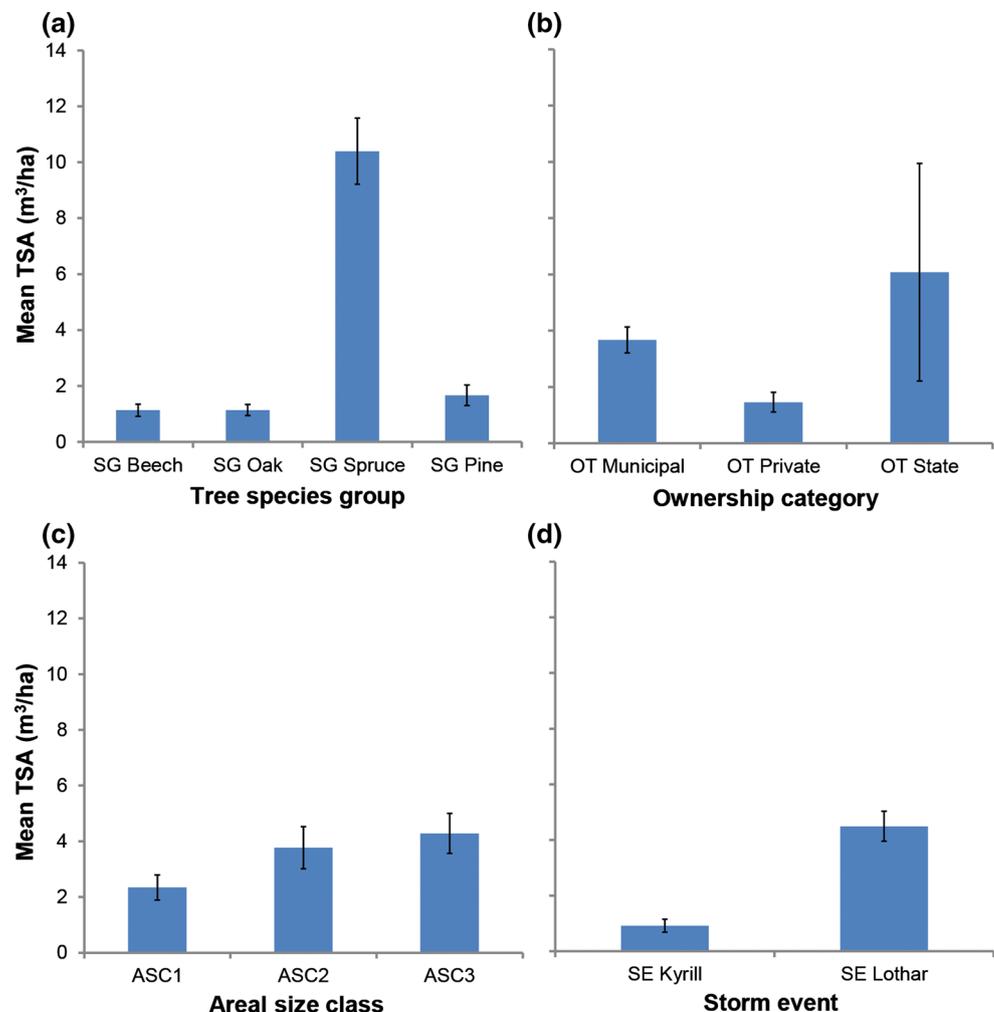
The study considered whether the fundamental requirements regarding multicollinearity, autocorrelation as well as heteroscedasticity are met in the applied analyses. Therefore, at first a test on multicollinearity was performed using the variance inflation factor (VIF). The values of the VIF were considerably below the cutoff of 10 as recommended by Neter et al. (1985). Autocorrelation was tested via Durbin–Watson statistic. No related results showed indications of autocorrelation. Heteroscedasticity was examined by a visual inspection of the distribution of residuals over the predictions as recommended by Gujarati (2003). Regarding

heteroscedasticity, no suspicious signs of a non-random distribution of the residuals could be identified.

Results

Along with our expectations regarding mean distributions we found timber storage accumulation (TSA) to be on the highest level for *spruce* and *pine*, with an average of 10.40 and 1.66 m³/ha, respectively, followed by *oak* and *beech* at a level of 1.14 and 1.13 m³/ha, respectively (see Fig. 2). These results make obvious the far superior role of *spruce* in terms of TSA due to storm affectedness as well as storage suitability. Regarding mean distribution among ownership categories, along with our expectations due to countervailing measures, we found state forestry storing the highest amounts of timber with an average of 6.07 m³/ha, followed by municipal and private forestry with an average of 3.67 and 1.45 m³/ha, respectively. Furthermore, along with our expectations due to scale effects, we found that larger areal size classes (ASCs) to store larger amounts of timber. ASC3 was found to store an

Fig. 2 Descriptive graphs of TSA distribution among nominal variables **a** tree species group, **b** ownership category, **c** areal size class, and **d** storm event. The bars show the respective means and standard deviations of the sample



average of 4.28 m³/ha, followed by ASC2 and ASC1 storing 3.76 and 2.34 m³/ha, respectively. Considering the analyzed storm events, we found a much higher TSA value in relation to Lothar at a level of 4.49 m³/ha compared to Kyrill .91 m³/ha, which we interpret as a consequence of the much higher spatial concentration of storm-caused forest damages after Lothar and a much higher demand for timber after Kyrill along with related timber price reactions (Jochem et al. 2015).

Regarding the performed multiple regression analysis, we found that all tested independent variables DAM, TPA, SE, SG, OT, and ASC have a significant influence on TSA at a 99% or a 95% confidence interval, respectively (compare descriptive statistics in Table 3 and coefficient results for the best model fit in Table 4). As shown in Table 4, TSA_{ln} increases by .54% at an increase of DAM_{ln} by 1% in the setting of the omitted nominal variables SE2, SG *Pine*, OT State forest, and ASC3. This result means that more than half of the damaged timber is put into storage under the given variable setting which expresses the high relevance of timber storage in the context of extreme storm events. Regarding the variable storm event, the results show a significantly lower storage accumulation coefficient for SE2 compared to SE1. The difference in the intercept between the two categories lies at .79. We see this difference in TSA as a consequence of different framework conditions, e.g., timber price reactions between the two storm events. After the storm Lothar more severe timber price falls were registered which are in line with a significantly higher demand for industrial roundwood in 2007 compared to 2000/2001 (Jochem et al. 2015). In return, the economic pressure on forest enterprises increased and led to higher storage rates. Considering species groups (SGs), as expected, coniferous SGs have higher storage accumulation coefficients than non-coniferous species groups, whereas damaged timber from *spruce* shows the highest share of timber storage accumulation. These results are in line with our expectations due to higher storm affectedness as well as better suitability for multiyear storage. *Spruce* is followed by *pine* and *oak*, which are at a similar level, followed by *beech* with the lowest storage accumulation coefficient. The difference in the intercept between spruce and pine lies at 1.30, between pine and oak at .07, and between oak and beech at .51, which expresses the predominant role of spruce in relation to timber storage. Regarding the variable type of ownership (OT), state forestry obtains the highest storage accumulation coefficient, whereas the categories private and municipal forestry are on a similar level, with private forestry obtaining a slightly lower storage accumulation coefficient. The difference

in the intercept between state and municipal forestry lies at 1.98 and between municipal and private forestry at .53. These results are in line with our expectations due to countervailing measures of state forestry in terms of storing behavior to take pressure of the timber market. The rather weakly expressed difference between private and municipal forestry further supports this hypothesis as these categories seem to store timber on a similar level.

Looking at the categories of the variable areal size class (ASC), the intermediate category ASC2 shows the highest storage accumulation coefficient, whereas ASC1 and ASC3 are on a similar level. The difference in the intercept between ASC2 and ASC1 lies at 1.40 and between ASC1 and ASC3 at .66. As we would have expected larger forest entities to implement a higher degree of timber storage due to scale effects, these results do not reflect our expected outcome. We cannot exclude differences in storm affectedness between the ASCs as a possible reason for this result. The related model shows high explanatory power (see R² in Tables 4 and 5).

We find a sufficient representation of observed TSA_{ln} values along the nominal variables' categories of our model without the integration of the variable TPA, as described in Table 4 (see Fig. 3). A differentiation within the scatterplots' distributions is noticeable for the variables SE and SG. SG's scatterplot shows that the distribution for SG *Spruce* lies on a higher storage accumulation level within the distribution compared to the categories SG *beech*, SG *oak* and SG *pine*, whereas, besides a slight

Table 5 Best fit results of the weighted multiple regression analysis without the variable TPA

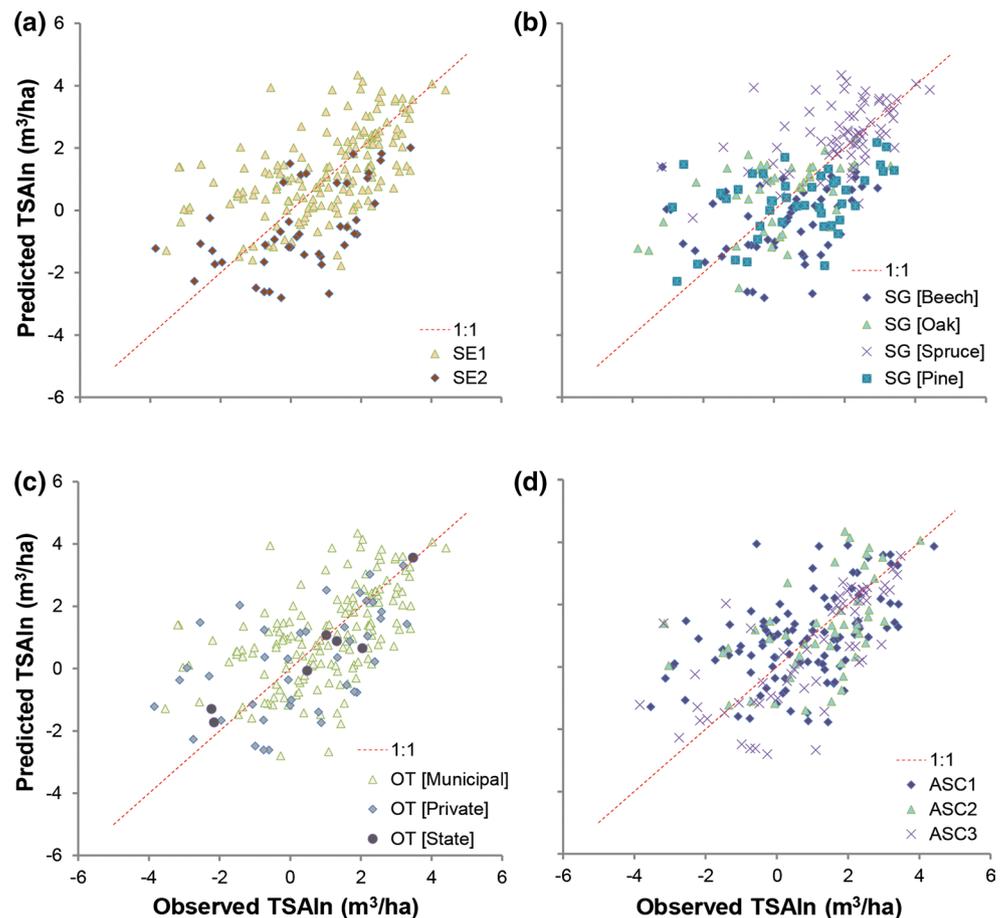
Variable	Coefficient estimates	t value
DAM _{ln}	.54	5.32***
SE1	-.79	-8.22***
SG <i>Beech</i>	-.58	-3.78***
SG <i>Oak</i>	-.07	-.25
SG <i>Spruce</i>	1.30	7.66***
OT Municipal forest	-.30	-1.98**
OT Private forest	-.48	-2.51**
ASC1	.14	.66
ASC2	.42	2.06**
Constant	-.67	-2.75***

N = 196, adj. R² = .74, Durbin–Watson test for autocorrelation = 1.991
 *p ≤ .10; **p ≤ .05; ***p ≤ .01

Table 4 Descriptive statistics of the continuous variables TSA, DAM, and TPA, added to the weighted multiple regression analysis

Variable	Unit	Mean	SD	Min	Max	N
TSA	m ³ /ha	3.65	7.89	0	82.58	206
DAM	m ³ /ha	21.37	29.84	1.00	196.38	387
TPA	€/m ³	-19.03	8.30	-29.34	-5.43	204

Fig. 3 Scatterplots of predicted TSAIn over observed TSAIn and distribution of nominal variables **a** storm event, **b** species group, **c** type of ownership and **d** areal size class without the variable TPA



overrepresentation of the SG *Spruce*, all SG categories are well represented by the model. SE's distribution for SE2 lies slightly below SE2's distribution which could be interpreted as an underrepresentation of storage accumulation for this SE category by our model.

As described in Methods section, we tested the isolated influence of TPA on TSA via ordinary least squares regression analysis. The results can be interpreted as a substantial influence of TPA on TSA. By a decrease in TPA of € 1, an increase in timber storage of $.71 \text{ m}^3$ is found in the underlying sample. In addition to the isolated testing of TPA via ordinary least squares regression analysis with R^2 of $.43$, we could enhance R^2 substantially by integrating further explanatory variables in the following models. Testing the main effect variables in model step 1, we reached an R^2 of $.72$. After the integration of the main effect variables DAMIn and TPA in model step 2, we could enhance R^2 of our model by $.14$. Following our hypothesis h_2 , by integrating TPA as a moderator variable toward the relation between DAMIn and TSAIn, we could further increase R^2 by $.02$ after the integration of the interaction variable DAMIn \times TPA, with a final R^2 of $.88$ in model step 3. Furthermore, the interaction variable DAMIn \times TPA showed to be significant at a 99% confidence interval (see

Table 6). Consequently, we find the validity of h_2 regarding the moderating role of TPA on the relation between TSA and DAM to be supported.

After the integration of the variable TPA as well as the interaction variable DAMIn \times TPA into our model we find an improved representation regarding the disparately distributed variables SE and SG compared to our previous results (see Fig. 4). Regarding the prediction results of the variables OT and ASC, no distribution anomalies were acquired in the extended model prediction results.

Discussion

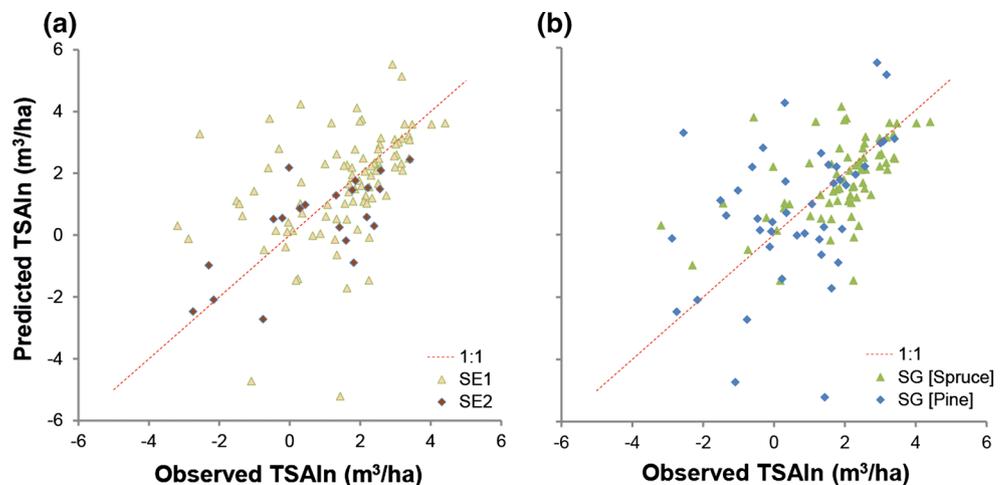
Regarding h_1 , we found statistically significant coefficients among the variables damage (DAM), storm event (SE), tree species group (SG), type of ownership (OT), and areal size class (ASC). Thus, the results of our study support our research hypothesis h_1 . Regarding DAM, strong statistical indications of a positive linear correlation between forest companies' damaged and stored timber quantities are present, leading to the general conclusion that with rising damage quantities, also rising storage quantities can be found. Reversely, no nonlinear relation could be identified between

Table 6 Test results of the hierarchical regression on the moderating role of TPA on the relation between DAMIn and TSAIn

Variable	Step 1		Step 2		Step 3	
	Coefficient estimates	<i>t</i> value	Coefficient estimates	<i>t</i> value	Coefficient estimates	<i>t</i> value
Controls						
SE2	−1.06	−11.93***	−1.36	−5.75***	−.90	−3.14***
SG (<i>Spruce</i>)	1.82	12.33***	.87	7.68***	.60	4.08***
OT (Municipal forest)	−.26	−1.58	−.22	−1.48	−.16	−1.09
OT (Private forest)	−.39	−1.91*	−.72	−3.77***	−.96	−4.67***
ASC1	.31	1.29	.11	.49	−.02	−.11
ASC2	.40	1.84*	.10	.47	.09	.44
Constant	.32	1.89*	−.17	−.39***	−.94	−1.84*
Main effects						
DAMIn			1.26	9.68***	1.44	10.11***
TPA			.12	5.49***	.08	3.24***
Interaction						
DAMIn × TPA					.03	2.70***
<i>N</i>	109		109		109	
Adj. <i>R</i> ²	.72		.86		.88	
Δ <i>R</i> ²			.14		.02	
Durbin–Watson	1.97		1.91		2.02	

p* ≤ .10; *p* ≤ .05; ****p* ≤ .01

Fig. 4 Scatterplots of predicted TSAIn over observed TSAIn and distribution of nominal variables **a** storm event and **b** species group, after integration of the variable TPA and the interaction variable TPA × TSAIn



these variables, which is interesting as a progressive correlation could be assumed due to initial fixed costs in terms of the creation of timber storage facilities. With regard to SGs, our assumption that coniferous SGs' coefficients would be at a higher level than those of non-coniferous SGs was statistically confirmed. We see this to be related to higher storm affectedness, and thus exposure to timber price drops, as well as the better suitability of coniferous SGs for multiyear storage. Hence, a stronger exposure of coniferous forests to storm-caused damages compared to non-coniferous forests is indicated by our results. In response to the increased risk, a stronger priority of timber storage management and assessment for regions with increasing prevalence of coniferous

forests is recommended. Silvicultural measures to stabilize coniferous stands, as well as appropriate site selection for coniferous tree species, could mitigate the risk of storm damages to coniferous species (Thorn et al. 2017). Considering OT, we found that state forestry stored the highest shares of damaged timber followed by municipal and private forest companies. This is in line with our expectations due to countervailing measures of state forestry to take pressure of the timber market, as stated by Odenthal-Kahabka (2004). On the other hand, private and municipal forest companies strive for minimal economic losses by storing as little timber as possible, due to storage costs and delayed returns. Changes of framework conditions, such as the current shift

toward the privatization of state forestry departments, provide possible risks in changing TSA behavior in the future. Proactive TSA of state forestry toward market stabilization, aiming at an economic alleviation of private and municipal forest companies as can be observed in the present data, might decrease in future storm events and influence coefficients across other independent variables. Considering SE, we found a significantly higher share of damaged timber was put into storage after Lothar as compared to Kyrill. One reason was different market situations between the storm events in terms of stronger timber price fall after Lothar due to significantly higher demand after Kyrill in 2007 (Jochem et al. 2015). This in return increased the economic pressure on forest companies after Lothar and led to higher storage rates. But also, further reasons, such as more difficult permits for long-term timber storage areas, or different regional site availability for installing timber storage areas, cannot be excluded as triggers for this result. Areal size class (ASC) was chosen as a variable to test for scale effects between forest companies regarding TSA. In this context, we anticipated higher storage accumulation coefficients with greater ASC. The results do not reflect our expected outcome as the intermediate category ASC2 obtained the highest TSA coefficient. We assume random differences in storm affectedness between the ASCs as a possible reason for this result. But also, other unknown reasons cannot be excluded.

A further central finding of our study is the confirmation of h_2 due to the increase in explanatory power, as well as the statistically found significance of the interaction variable $DAM \ln \times TPA$. As expected, we found that with increasing timber price drops after storm events, higher shares of timber were put into storage. In conjunction with this, we obtained improved variable representation in our resulting model. Hence, timber price reactions help to explain which share of damaged timber is put into storage. Nevertheless, as interaction terms can produce significantly different regression models when computed separately, related coefficients should be interpreted with sufficient caution. To account for this, as suggested by Robinson and Schumacker (2009), we computed the regression models separately in the explained three steps for each level of the interaction variable to provide a more robust interpretation of the interaction effect.

We also conducted an isolated test of the influence of TPA on TSA via ordinary least squares regression analysis. Related results showed to be significant at a 99% confidence interval. We attained a slope of $-.71$, which states that by a decrease in TPA of € 1, an increase in timber storage of $.71 \text{ m}^3$ is found in the underlying sample. The related result could be of interest for market participants and policy makers due to the clear interpretability. Nevertheless, due to the following limitations, we want to point out the restrictions regarding the robustness of related interpretations. As previously mentioned, TPA data were solely available from

state forestry and thus needed to be applied to the according groups of forest enterprises. Furthermore, we could only analyze TPA in conjunction with coniferous SGs. While the annual variance of timber prices for coniferous SGs was small with the exception of the expected strong reaction in the respective storm year, without a clear reason the variance for non-coniferous SGs was very high throughout the years. We suspect a variance in quality of the underlying assortments between the years is responsible for the timber price variance, but also further reasons, such as supply and demand relations, cannot be excluded. However, due to the fact that coniferous SGs are much more strongly affected by storms in terms of fallen timber quantities and in terms of TSA, our corresponding analyses are still relevant.

The related high complexity of the timber storage phenomenon reduces the statistical robustness of our model in terms of the usability for predictions. A contributory factor here is that we were limited to choosing from available forestry-related historical databases due to the mandatory requirement for a historical time series of data, capturing empirical TSA data of as many severe storm events as possible. As stated earlier, we believe that the German Forest Accountancy Data Network (FADN) is presently the best source of data for our information requirements and data quality. Nevertheless, the use of the FADN led us to a row of data- and sample-related challenges. The sampling procedure classifies the FADN as a judgement sample, which leads to the general problem of possible bias. A random survey, on the other hand, would mean an immense additional annual effort and is therefore not applied for the FADN.

If the model for detecting and correcting sample bias is incorrectly specified (e.g., important variables are missing, only main effects are specified when interactions are present, or linearity is specified in the presence of nonlinearity), correcting methods may be inaccurate or may make estimates even worse (Cuddeback et al. 2004). Although controversial with regard to the robustness of related estimations, e.g., Carroll and Ruppert (1988), we think that according to our performed representability comparison the sample weighting measures undertaken are appropriate and that resulting analyses and estimates could otherwise be severely biased.

A further consequence of using the German FADN was the described calculative variable generation of DAM and TSA based on the original data. The baseline approach for generating the analyzed DAM values could be subject to uncertainties because, as applied, it does not account for longer-term trends, such as market-induced adaption of felling quantities. Nevertheless, upon visual inspection, no such trends could be identified in the underlying sample.

The use of federal states' boundaries as an approximation for the storm-affected regions could be subject to bias through interaction effects with neighboring regions. Under the chosen approach such possible effects were neglected.

Rather, a TPA variable could be generated on a congruent areal basis and the sample could be compared with respective federal states' population information from alternative data sources. This information regarding sample representability is available solely at the federal state scale. In line, we suggest that the analysis of such interaction effects could be a subject for further research.

As mentioned above, an important aspect of our study is the limited number of SEs we could use from the database. Available SEs were limited to Lothar (SE1) and Kyrill (SE2), leading to uncertainties regarding the predictive quality of our model. Reversely, the integration of further SEs in the future can help to mitigate this weakness.

Regarding the general applicability of our results, it is important to consider that the FADN only collects data from forest companies with a total productive forest area greater than 200 ha. As a consequence, no conclusions can be drawn from our results for smaller forest companies. In the future, existing federal states' FADNs for small-scale forest companies could be compared with our results. One further issue which has not been taken into account in our study is the matter of damaged timber quality. We assume that the quality distribution of damaged timber also has an influence on TSA due to differing values and, hence, differing achievable prices. In the absence of appropriate variables, we were not able to test and include the according coefficients into our model.

The implications for a future integration of TSA in forest-related accounting schemes are twofold: First, we want to stress that despite the good statistical quality of our model regarding the analyzed storm events, the applicability to future storm events cannot be assured due to uncertainties regarding the effects of different framework conditions, as mentioned above. However, we want to emphasize that the revealed quantitative variable expressions, in terms of their coefficients, should be considered in regard to timber storage estimations, as they might help to achieve an improved timber storage estimation accuracy in the future.

In summary, we believe that our empirically based results provide a substantiated and methodologically transparent basis for assessing the timber storage accumulation behavior of forest companies, which could be of interest for scientists, policy makers, and market participants in the context of future storm events.

Conclusions

Storage of fallen timber after storm events can help to prevent economic losses for forest companies. Concluding from our results we want to point out the superior role of the species group *spruce* regarding timber storage accumulation.

We want to stress that stored timber quantities after severe storm events can reach substantial levels. Thus, it is important that these quantities are correctly allocated in the according forest-related balances. The results obtained in this paper improve the understanding of the distribution of timber storage accumulation after severe storm events. Related findings can be useful for improving the accuracy of annual wood and timber balances, which is important for a more precise monitoring as well as international reporting on supply and demand of wood resources. Furthermore, related reporting has an impact on national and international policies such as the derivation of forest-related carbon accounting and related national obligations. Another utilization of our results can lie in advanced analyses of storm-related economic damages for the forest sector, as related costs, delayed revenues, and achieved timber prices could be connected with more precise timber storage quantities. In addition, it should be considered that capturing the proportions of timber storage in forests will gain relevance in the future, since forest damages from natural disturbances are expected to increase as a consequence of climate change.

Despite a lack of comparable studies, we assume that most of the findings of our model regarding timber storage accumulation, such as the positive correlation with damage timber quantities, the influence of timber price drops, as well as differences between tree species and types of ownership which were found in this study, are generally transferable to other European countries. Nevertheless, differing legislative framework conditions as well as differing distributions of, e.g., tree species groups or types of ownership could lead to differing parameter estimates compared to our results. Similar empirical studies in other European countries would be a great enrichment to this field of research. By such, further causes which influence timber storage accumulation on an international level could be provided. We also recommend further research in the field of the economic optimization of timber storage management as, by doing so, economic potentials in terms of ideal storage could be utilized. In this context, we want to emphasize the importance of time-specific analysis of outflows from timber storage.

Extreme wind throws have an undisputed economic relevance for European forestry. In this regard, timber storage can be found as an important measure of forest enterprises toward the mitigation of revenue losses. We believe that our research on the characteristics of timber storage accumulation in such conditions is timely and can contribute to an improved assessment of such economic consequences in the future.

Acknowledgements Financial support by the Agency of Renewable Resources (FNR) under the auspices of the Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) within the project Wood Resource Monitoring

(“Rohstoffmonitoring Holz”) is gratefully acknowledged. We would like to thank Matthias Dieter for his continuous support, Niels Janzen for productive discussion, and Nils Ermisch, Emanuel Meier, and Wolfgang Hercher for the provision of data.

Funding This study was funded by the Agency of Renewable Resources (FNR) within the project Wood Resource Monitoring (“Rohstoffmonitoring Holz”) (Grant Number 22021614).

Compliance with ethical standards

Conflict of interest The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Aiken LS, West SG (1991) Multiple regression. Testing and interpreting interactions. Sage Publication, Newbury Park
- Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (2016) Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Lehrbuch, 14. überarbeitete und aktualisierte Auflage edn. Springer Gabler, Berlin
- Bolte A, Ammer C, Löf M, Madsen P, Nabuurs GJ, Schall P, Spathelf P, Rock J (2009) Adaptive forest management in central Europe: climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand J For Res* 24:473–482. <https://doi.org/10.1080/02827580903418224>
- Brunette M, Holec J, Sedliak M, Tucek J, Hanewinkel M (2015) An actuarial model of forest insurance against multiple natural hazards in fir (*Abies Alba Mill.*) stands in Slovakia Forest. *Policy Econ* 55:46–57. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.03.001>
- Carroll RJ, Ruppert D (1988) Transformation and weighting in regression. Chapman & Hall Ltd, London
- Cuddeback G, Wilson E, Orme JG, Combs-Orme T (2004) Detecting and statistically correcting sample selection bias. *J Soc Serv Res* 30:19–33. https://doi.org/10.1300/J079v30n03_02
- Dieter M, Rosin A, Thoroë C (2004) Die forstwirtschaftliche Gesamtrechnung der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des ESVG 1995 für die Jahre 1991 bis 2002. Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie; 2004/15. Institut für Ökonomie, Hamburg
- Englert H, Seintsch B (2014) Aktualisierte Methodenbeschreibung zur Waldgesamtrechnung mit Tabellen für das Berichtsjahr 2012 (endgültig) und 2013 (vorläufig); Projektbericht für die umweltökonomischen Gesamtrechnungen des Statistischen Bundesamtes. Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie, Hamburg, p 122
- Gujarati DN (2003) Basic econometrics, 4th edn. McGraw-Hill, Boston
- Hapla F (1992) Holzqualität von Kiefern aus einem Waldschadensgebiet nach fünfjähriger Naßlagerung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 50(7–8):268–274
- Hillmann M (2007) Kyrill—das Ende der Solidarität. *AFZ Wald* 62(22):1190–1191
- Holec J, Hanewinkel M (2006) A forest management risk insurance model and its application to coniferous stands in southwest Germany. *For Policy Econ* 8:161–174. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2004.05.009>
- Institute SAS (2016) JMP 13 multivariate methods. SAS Institute, Cary
- JMP (2017). http://www.jmp.com/support/help/Launch_the_Fit_Model_Platform.shtml#213135. Accessed 22 May 2017
- Jochem D, Weimar H, Bösch M, Mantau U, Dieter M (2015) Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. *Eur J Forest Res* 134:869–888. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0896-9>
- Kinnucan HW (2016) Timber price dynamics after a natural disaster: Hurricane Hugo revisited. *J For Econ* 25:115–129. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2016.09.002>
- Kish L (1965) Survey sampling. Wiley, New York
- Lohner P, Appel V, Dieter M, Seintsch B (2016) Das TBN-Forst: Ein Datenschatz für die deutsche Forstwirtschaft, vol 17/2016
- Mantau U (2015) Wood flow analysis: quantification of resource potentials, cascades and carbon effects. *Biomass Bioenerg* 79:28–38. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.013>
- McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds) (2001) Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, p 1008
- Neter J, Wasserman W, Kutner MH (1985) Applied linear statistical models. Regression, analysis of variance, and experimental designs, 2nd edn. Irwin, Homewood
- NFI3 (2014) Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin
- Odenthal-Kahabka J (2004) Orkan “Lothar” - Bewältigung der Sturmschäden in den Wäldern Baden-Württembergs : Dokumentation, Analyse, Konsequenzen. Landesforstverwaltung, Stuttgart
- Polley H (2006) The Second National Forest Inventory—NFI 2. Results; Covering the National Forest Inventory Surveys of 2001–2002 and 1986–1988. Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection, Berlin
- Riguelle S, Hébert J, Jourez B (2015) WIND-STORM: a decision support system for the strategic management of windthrow crises by the forest community. *Forests* 6:3412
- Robinson C, Schumacker RE (2009) Interaction effects: centering, variance inflation factor, and interpretation issues. *Mult Linear Regres Viewp* 35:6–11
- Schelhaas M-J, Nabuurs G-J, Schuck A (2003) Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Glob Change Biol* 9:1620–1633. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x>
- Statistisches Bundesamt (2001) Agrarstrukturerhebung/Landwirtschaftszählung 1999. Metzler-Poeschel, Stuttgart
- Thorn S, Bässler C, Svoboda M, Müller J (2017) Effects of natural disturbances and salvage logging on biodiversity—Lessons from the Bohemian Forest. *For Ecol Manag* 388:113–119. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.006>
- ZMP-Marktbilanz Forst und Holz (2002) ZMP-Marktbilanz. Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle für Erzeugnisse der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft 2002
- ZMP-Marktbilanz Forst und Holz (2008) ZMP-Marktbilanz. Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle für Erzeugnisse der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft 2008

I.1 Wissenschaftliche Artikel

Artikel 2

Zimmermann, K, Schuetz, T, Weimar, H, Dieter M (2021) Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events. Eur J For Res 140:37–50



Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events

Klaus Zimmermann^{1,3,4} · Tobias Schuetz² · Holger Weimar³ · Matthias Dieter³

Received: 30 April 2019 / Revised: 31 March 2020 / Accepted: 6 August 2020 / Published online: 1 October 2020
© The Author(s) 2020

Abstract

The storage of significant amounts of timber from thrown or dead trees after natural disturbances is an established practice for forest enterprises. Timber storage mitigates economic losses caused by supply-driven timber price falls after natural disturbances. We use a forest accounting database to explore the controls of residence times of coniferous timber stocks in storage following severe storm events. We characterize forest enterprises' timber stock outflow distributions from storage over several years by mean residence times and their variances. We conduct regression analyses on the expected residence times and their variances. We assess the significance of several explanatory variables representing economic, institutional and tree species-related factors on these metrics using multiple linear regression analyses. Illustrating the effect of these variables on timber storage residence time distributions we reanalyze the database by grouping the FADN data sets with regard to the identified control variables and determine their mean timber storage outflow distributions after the storm events as well as associated expected residence times and their variances. Applying the resulting parameters with the continuous gamma distribution to simulate TSO residence time distributions clearly illuminates the effect of the control variables on storage management. We show that besides market price dynamics, species groups, ownership categories and forest worker capacities are statistically significant controls for mean residence times of timber stock in storage and their variances. We find that stronger timber price falls correlate with shorter mean residence times of timber stocks in storage. We relate this to liquidity maintenance of forest enterprises. We model duration times parameterizing the Gamma distribution. The application of the Gamma distribution to characterize storage management behavior offers the potential to describe differences in timber stock quantities even on shorter timescales than the mean storage residence times. According to our results, we propose to assess timber stocks in storage over a multi-year period in order to improve related national and international accounting schemes.

Keywords Storm events · Forests · Timber storage · Gamma distribution

Introduction

Severe storm events cause damage to humans and property and substantial economic losses on large-scale levels (Berlemann 2016). With regard to forests, severe storm events have the potential to cause substantial quantities of timber from thrown or dead trees (van Lierop et al. 2015). This has a negative effect on forest functions (Thorn et al. 2017). For example timber stocks of the affected stands are reduced, and by this, the importance of forests as a carbon sink is diminished. Sustainable forest management practices aiming at the continuous supply with timber are also threatened in the long term. Increasing numbers of extreme weather events due to climate change (McCarthy et al. 2001) cause substantial forest stock losses and surplus harvesting quantities (Bolte et al. 2009). This can

Communicated by Arne Nothdurf.

✉ Klaus Zimmermann
klaus.zimmermann@uni-hamburg.de;
klaus.zimmermann@forst.bwl.de

- ¹ Institute of Wood Science, University of Hamburg, Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg, Germany
- ² Hydrology Department, FBVI Regional and Environmental Sciences, Trier University, Behringstraße 21, 54296 Trier, Germany
- ³ Thünen Institute of International Forestry and Forest Economics, Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg, Germany
- ⁴ Forest Research Institute Baden-Wuerttemberg, Wonnhaldestraße 4, 79110 Freiburg, Germany

negatively affect the function of forests as a carbon sink (Lindroth et al. 2009). An excessive timber supply after severe and large-scale storm events, can cause timber markets to react with increasing price falls. In such cases, timber storage plays an important role for forest enterprises to mitigate economic losses by such supply-driven timber price falls (Kinnucan 2016).

There is a wealth of literature related to climate change-induced extreme weather events as well as numerous publications dealing with impacts of natural disturbances on forests, such as Thorn et al. (2017) as well as related adaptation strategies, such as Yousefpour et al. (2017). However, literature exploring the recurring phenomenon of timber storage in the context of natural disturbances is scarce. In this context, to the best of our knowledge only Zimmermann et al. (2018) have analyzed the determinants for timber storage accumulation after severe storm events in Germany.

Nevertheless, the identification of controls for forest enterprises' timber storage behavior is essential for two reasons. Time-specific information on the continuance of timber from thrown or dead trees is important to assess the economic impacts of storm events on forestry and to generate improvement strategies toward storm-related forest management practices as proposed by Riguelle et al. (2017). Moreover, detailed information on the temporal progression of timber storage after severe storm events helps to improve national and international timber accounting schemes (Jochem et al. 2015), such as the Greenhouse Gas Emission Reporting System for the National Inventory Report (NIR), the Economic Accounts for Forestry (EAF) or the European Forest Accounting (EFA).

One reason for the divergent behavior of forest enterprises with regard to timber storage could lie in technical suitability of long-term storage of affected tree species. The coniferous tree species groups *Norway spruce* (*Picea abies* L. Karst) and *Scots pine* (*Pinus sylvestris* L.) are suitable for multi-year wet storage. The non-coniferous tree species groups *European beech* (*Fagus sylvatica* L.) and *oak* (*Quercus spec.*) are recommended to be stored for a maximum duration of less than 1 year, as wood quality deteriorates significantly within that time period (Odenthal-Kahabka 2004). Regarding wet storage of *pine*, Hapla (1992) suggests a maximum storage duration of 5 years. For *spruce*, Odenthal-Kahabka (2004) suggests a maximum wet storage duration of 3 years.

Another factor, which potentially affects forest enterprises' timber storage behavior, is the timber price reaction after a specific storm event (Rosenkranz et al. 2018). Generally, stronger price falls are connected to higher timber quantities from natural disturbances (Kinnucan 2016). In contrast, the affected forest enterprises may be confronted with higher up front logging expenses. The forest enterprises might be forced to sell higher quantities of their stored

timber at an earlier stage after the storm event to maintain corporate liquidity.

Different ownership groups might show significant differences regarding their timber storage behavior. Countervailing measures by the state and municipal forest enterprises to support the private forest enterprises have already been found in conjunction with extreme storm events in terms of increased timber storage accumulation activities (Odenthal-Kahabka 2004; Zimmermann et al. 2018). In accordance, such countervailing measures by the public forest enterprises could result in prolonged storage durations as well as longer residence times of timber in storage.

A further factor which could influence forest enterprises' timber storage behavior is the market power effect of forest enterprises. Larger forest enterprises might be able to sell their stored timber earlier due to a stronger market position. Therefore, larger forest enterprises should show shorter residence times of timber in storage.

Forest enterprises' internal production cost structures might have an influence on distributions of timber storage outflows. Forest enterprises with high relative fixed costs for their production capacities in terms of permanent staff costs might need to maintain their timber production at higher levels after a storm event compared to those with low relative fixed costs. Consequently, the related forest enterprises might distribute outflows from timber storage over an extended period of time as compared to others.

The availability of data in the context of severe storm events is crucial to assess the impact of such factors on timber storage.

So far, the typical residence times of timber in storage and, thus, the timescales on which storage management has an impact on the market have not yet been explored. However, when comparing storm-related storage in- and outflows of a large forestry database (German Forest Accountancy Data Network (FADN)), outflows from timber storage show a diverging distribution in terms of delayed and longer lasting time sequences (see Fig. 1).

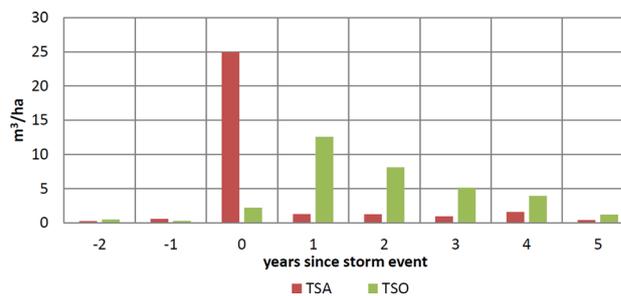


Fig. 1 Exemplary annual means of timber storage accumulation (TSA) and timber storage outflows (TSO) based on German FADN data

In the past, in environmental systems the concept of “residence times” was often used to characterize the average carbon-related residence in a specific system. These include, e.g., forests (Prescott et al. 1989); bamboo stands (Isagi 1994); soils (Post et al. 1982) or native and cultivated ecosystems as a whole (Buyanovsky et al. 1987). These approaches describe mean carbon residence times based on observed or simulated long- or short-term carbon balances with continuous in- and outflows into and out of the system (growth and degradation of biomass). To prevent the degradation of wood quality, calamity-caused fellings are harvested and taken into timber storage within a year of the storm event (Odenthal-Kahabka 2004). Severe storm events cause single pulses of large felling quantities in timber storage inventories (Zimmermann et al. 2018). We thus utilize an approach for systems characterized by a single input pulse and continuous output signals originating from chemical sciences: residence time distributions of chemical reactors as described by Danckwerts (1953) and also Levenspiel (1972). The Gamma distribution is a commonly used distribution to quantify residence time dynamics in environmental systems such as wetlands (e.g., Kadlec 1994) and groundwater aquifers (e.g., Maloszewski and Zuber 1982; Gilmore et al. 2016) or carbon storage in ecosystems (e.g., Belshe et al. 2019; Oberle et al. 2019).

Since forest enterprises’ storage management decisions show noticeable deviations in terms of the empirical normalized distributions of timber storage outflows (see exemplary cases in Fig. 2), it is our goal to detect and to characterize the related controls.

Our methodological approach is to characterize the empirical frequency distribution of the hectare normalized TSO by the 1st and 2nd moment of their probability density function. The 1st moment τ translates into the expected residence time, and the 2nd moment σ^2 translates into the variance around τ . Since the Gamma distribution is the

typical function for duration time analysis, we expect it to suit empirical normalized distributions of timber storage outflows.

Our research goal is to explore and characterize the determining groups for different shapes of the distribution functions of timber storage outflows. Therefore, τ and σ^2 are analyzed by means of regression analysis.

Based on the identified control variables from the regression analysis, we reanalyze the database by grouping the data sets and determine their mean timber storage outflow distributions after the storm events as well as associated expected residence times and their variances. We apply the resulting parameters with the continuous gamma distribution to simulate TSO residence time distributions.

The related research question is formulated as follows: “Which variables determine the temporal course of timber storage outflows?”

We formulate the following research hypothesis based on the previously deduced indications from the current state of knowledge and our described rationale: Forest enterprises’ management decisions regarding the release of timber from storage in the years following severe storm events are affected by tree species group, timber price reaction, forest worker capacities per hectare, type of ownership and areal size class.

For the purpose of a detailed and temporally higher resolved (sub-annual timescale) analysis of storm event-related timber storage management, the application of established mathematical distribution functions offers the possibility to predict continuous storage outflows over the complete relevant time span.

Methods

Database

The FADN is a valuable time series to analyze forest enterprises’ decision-making processes (Wildberg and Möhring 2019). With respect to our research goal, we find the FADN to be a suitable source of data. The FADN is coordinated by the German Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL). Forest enterprises’ operational data are available from 1991 ongoing till to date (Lohner et al. 2016). This allows us to include the two storm events, Lothar (1999) and Kyrill (2007), in our analyses. The two storms are classified to be among the severest wind storms since the beginning of regulated forestry in Germany (Hillmann 2007). The data set contains a section in which forest enterprises’ annual timber storage accumulation as well as timber storage outflow is surveyed. Furthermore, the questionnaire contains economic, institutional and species-related variables which are suitable for testing with regard to their explanatory

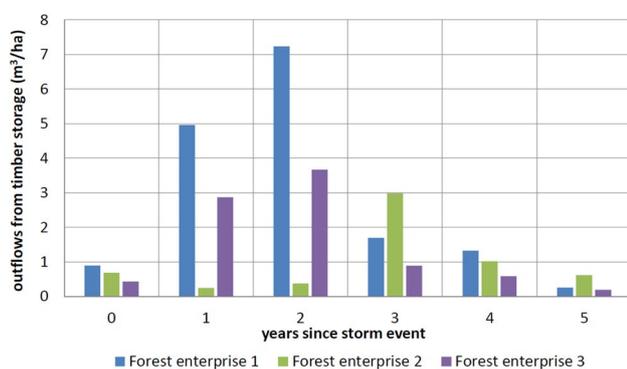


Fig. 2 Visualization of differing empirical normalized distributions of timber storage outflows of selected forest enterprises for spruce related to storm events from the storm year to the 5th year after the storm based on FADN data

contribution toward the residence time of timber stocks in storage. The sample is restricted to forest enterprises with a total production area of at least 200 ha. The sample size lies at about 350 state, municipal and private forest enterprises annually. As the FADN, due to its underlying sampling procedure, is classified as a judgment sample, a sample weight, which is provided in the FADN database, is used to balance occurring representability deviations, as described in Zimmermann et al. (2018).

With regard to storm event impacts, the signal isolation of storm-related changes in timber storages is our first step before the actual data analysis is carried out. In accordance with Zimmermann et al. (2018), who used the same approach to estimate storm-related timber storage accumulation (TSA), we apply a baseline correction on the original data to reduce uninformative short-term fluctuations as far as possible and thus isolate the storm-related values from the regular timber storage outflows as follows:

$$\alpha(t) = \frac{1}{5} \sum_{t=-5}^{t=-1} x(t), \quad (1)$$

Here t is the year of a storm event and x stands for the annual timber storage outflow values. Applying Eq. (1) we firstly generate a baseline value (α) by calculating an average timber storage outflow value based on the 5 years before the respective SE.

$$\text{TSO}(t) = \begin{cases} x(t) - \alpha(t), & \text{if } x(t) - \alpha(t) \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Applying Eq. (2) we subtract the previously generated baseline value from the actual outflow values of the years of the storm and the five following years. The resulting annual values (TSO (t)) represent each of the storm years' as well as the five poststorm years' outflow values from timber storage. Each annual TSO value cannot turn negative by means of the baseline correction. The α , x and TSO are measured in m^3 .

To approximate the timber price reactions (TPR) of the storm-affected regions, we employ the state forestry departments' annual timber price data (ZMP 2002, 2008). Based on the timber prices from the year before the storm event and the storm year we calculate timber price delta values (PDS). We correct these delta values from other price trends by subtracting the corresponding timber price (PDN) delta values of non-storm-affected regions, respectively, non-storm-affected federal states:

$$\text{TPR} = (\overline{\text{PDS}}_t - \overline{\text{PDS}}_{t-1}) - (\overline{\text{PNS}}_t - \overline{\text{PNS}}_{t-1}), \quad (3)$$

where $\overline{\text{PDS}}$ is the mean of the timber prices in storm-affected federal states and $\overline{\text{PNS}}$ is the mean of the timber prices in non-storm-affected federal states. TPR at the spatial scale of federal states is extracted as $\text{€}/\text{m}^3$.

Statistical moments of empirical observations

The following supplemental information about distribution properties (Jawitz 2004) holds for arbitrary distributions and not only for our developed duration model.

The residence time distribution RT (t) of timber stock in storage can be described by normalizing observed annual timber storage outflows (TSO (t)) with the sum of storm event-related TSO over all observation years:

$$\text{RT}(t) = \frac{\text{TSO}(t)}{\int_0^{\infty} \text{TSO}(t) dt}. \quad (4)$$

The integral of all observed TSO (t) should approximately equal timber storage accumulation (TSA), as described in Zimmermann et al. (2018) in the year of the storm event. Based on observed TSO (t), RT (t) now describes the distribution of probabilities of each annual fraction of TSA to be released from timber storages over the observation period with the unit 1/year and thus

$$\int_0^{\infty} \text{RT}(t) dt = 1. \quad (5)$$

Using statistical moment analysis, the mean residence time of timber stock in storage (τ) can be determined by

$$\tau = \int_0^{\infty} t \text{RT}(t) dt \quad (6)$$

and the temporal variance (σ^2) by

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \tau)^2 \text{RT}(t) dt. \quad (7)$$

Selection of independent variables

Following our research hypothesis, we test the independent variables species group (SG), timber price reaction (TPR), forest worker capacity (FWC), type of ownership (OT), areal size class (ASC) and storm event (SE) regarding their explanatory contribution toward the residence time of timber in storage.

We test the variable species group (SG) due to differences in storm affectedness, monetary value as well as suitability for long-term storage. Because of the indicated longer storage capability we expect a longer mean residence time for *pine* compared to *spruce*. As perennial timber storage is only relevant for coniferous species groups, related analyses are limited to the relevant species groups (SGs) *spruce* and *pine* based on dummy variable coding.

We use the variable timber price reaction (TPR) to test for strategical sales decisions from storage in order to

minimize financial losses by sales at low timber prices. One possible result could be a negative correlation with τ . At higher price falls, forest enterprises might be under a higher economic pressure due to accumulated harvesting expenses. Reversely, a positive correlation with σ^2 is expected due to the ambition of forest enterprises to sell remaining stored timber as late as possible in order to minimize financial losses.

We test the variable forest worker capacity (FWC) as a measure for forest enterprises’ fixed production cost structure. Based on forest enterprises’ full-time equivalents of employed forest workers, we create a continuous variable expressing the relative density of employed forest workers in forest enterprises. Here we divide full-time equivalents of employed forest workers by the total production area. We expect a positive correlation between FWC and τ . Forest enterprises with high fixed costs in terms of employed forest workers might maintain their timber production at higher levels after a storm event compared to such with low relative fixed costs. Related forest enterprises might extend the dispersion period of stored timber.

The variable type of ownership (OT) is used to test for a countervailing behavior of state and municipal forest enterprises toward private forest enterprises. We expect public forest enterprises to hold back stored timber quantities for an extended period to alleviate timber markets.

We use areal size class (ASC) as a variable to test for differences in timber storage residence times based on market power effects between forest enterprises. Accordingly, we expect larger forest enterprises to show shorter residence times of timber in storage. We add three ASC categories to the data set to test for the presence of market power effects. Depending on the species group-specific production areas, we test the areal size class (ASC) categories ASC1 ($0 \text{ ha} < x < 200 \text{ ha}$), ASC2 ($200 \text{ ha} \leq x < 500 \text{ ha}$) and ASC3 ($x \geq 500 \text{ ha}$).

We employ the variable storm event (SE) to test for general effects between the underlying SEs regarding timber storage residence times in our data set. Related significances could be a sign for, e.g., different storage regimes possibly related to the chronological incidence of the storm events or differences in the availability of storage locations in the affected regions.

To generate the effective sample, a spatial selection of storm-affected regions is carried out on the federal states’ level. Furthermore, a sufficient representation of all categories of the analyzed variables is mandatory for the selection of regions. In this regard, we could solely identify considerable TSO signals in correlation with the extremely severe storm events Lothar (2000) and Kyrill (2007) (for the used variables see Table 1).

Weighted multiple linear regression analysis

We characterize RT (t) of each forest enterprise, SE and SG in the FADN based on the parameters τ and σ^2 , as described in detail above. Accordingly, we conduct two separate multiple linear regression analyses for the parameters τ and σ^2 .

Here, τ is explained by species group (SG), timber price reaction (TPR), forest worker capacities (FWC), type of ownership (OT), areal size class (ASC) and storm event (SE) as independent variables. The resulting estimation function of the multiple linear regression analysis regarding τ is:

$$\tau = SG\beta_1 + TPR\beta_2 + FWC\beta_3 + OT\beta_4 + ASC\beta_5 + SE\beta_6 + \varepsilon, \tag{8}$$

where β is the coefficient and ε is the error term.

So, τ expresses the mean residence time of storm event related timber in storage. The parameter value can be interpreted in relation to the respective storm event ($t=0$).

Table 1 Variable abbreviations and explanations

Variable	Explanation	Scale	Unit	Source
TSO	Timber storage outflow	Continuous	m ³ /ha	FADN
τ	TSO-based distribution parameter explaining the mean of the residence time of timber in storage	Continuous	Year	FADN
σ^2	TSO-based distribution parameter explaining the dispersion of outflows from storage timber	Continuous	Year ²	FADN
SE	Name of storm event: Lothar (SE1) and Kyrill (SE2)	Nominal	Binary	FADN
SG	Species group: SG spruce (spruce, fir, douglas fir), SG pine (pine, larch and other coniferous species)	Nominal	Binary	FADN
OT	Type of ownership: OT state forest, OT municipal forest, OT private forest	Nominal	Binary	FADN
ASC	Species group-specific areal size class: ASC1 (0 ha < x < 200 ha), ASC2 (200 ha ≤ x < 500 ha) and ASC3 (x ≥ 500 ha)	Nominal	Binary	FADN
TPR	Timber price reaction in connection with storm event	Continuous	€/m ³	ZMP
FWC	Employed forest worker capacities	Continuous	Full-time job equivalent/ha	FADN

Consequently, estimates of τ represent the elapsed time after the respective storm event in years.

To avoid model-over-specification, we eliminate insignificant variables from our final model in a backward selection procedure.

The parameter σ^2 is explained by species group (SG), timber price reaction (TPR), forest worker capacities (FWC), type of ownership (OT), areal size class (ASC) and storm event (SE) as independent variables. The resulting estimation function of the multiple linear regression analysis is:

$$\sigma^2 = SG\beta_1 + TPR\beta_2 + FWC\beta_3 + OT\beta_4 + ASC\beta_5 + SE\beta_6 + \varepsilon, \quad (9)$$

where β is the coefficient and ε is the error term.

We eliminate insignificant variables ASC and SE in a backward selection procedure from our final model to avoid model-over-specification.

The enterprises have different forest areas. According to Backhaus et al. (2016), cases involving larger sampling areas contribute more heavily to the regression function than cases involving smaller sampling areas. Consequently, we use the underlying sampling areas to weight the cases of the sample. Furthermore, we integrate the FADNs' sample expansion factor into the weight variable in a multiplicative way to achieve the highest possible representability of the sample. The resulting weight scales the case's contribution to the loss function by $w^{-1/2}$ (JMP 2017; SAS Institute 2016). The loss function is the sum of squared deviations of the observations from the model, in our case of standard least squares estimation in a linear model. The weight variable has an impact on estimates and standard errors. However, it does not affect the degrees of freedom used in the hypothesis tests.

Concerning the performed multiple regression analyses, we consider whether the requirements regarding heteroscedasticity, autocorrelation and multicollinearity are met in the applied analyses. As recommended by Gujarati (2003), we examine heteroscedasticity by a visual inspection of the distribution of residuals over the predictions. We test autocorrelation with Durbin–Watson statistic. Finally a test on multicollinearity is performed using the variance inflation factor (VIF), as recommended by Neter et al. (1985).

Continuous simulation of timber stock residence time distributions

Jawitz (2004) gives a detailed overview how the parameterization of continuous univariate distributions can be facilitated for the simulation of probability density functions of environmental processes by using the statistical moments of each distribution. One of the recommended

distributions is the probability density function of the Gamma distribution

$$p(x) = \frac{\beta^b x^{b-1} e^{-\beta x}}{\Gamma(b)}, \quad (10)$$

which is implemented in this form (Eq. 10) in many data analysis and spreadsheet software packages (e.g., Microsoft Excel). While $\Gamma(b)$ describes the Gamma function, the shape parameter b and the scale parameter p can be related to the statistical moments of the probability density function. To allow the continuous description (simulation) of the empirical residence time distribution RT (t) the statistical moments τ and σ^2 of the observed distribution can be used to parameterize the probability distribution function of a given continuous univariate distribution (e.g., Maloszewski and Zuber 1982). The parameters of the probability density function of the Gamma distribution are related to the mean of the distribution (equals τ) and its variance (equals σ^2) as follows:

$$\tau = \frac{b}{p} \quad (11)$$

$$\sigma^2 = \frac{b}{p^2}. \quad (12)$$

We use mean τ and σ^2 obtained by the multiple linear regression analysis to characterize typical residence time distributions with regard to the different explaining variables and to parameterize the probability distribution function of the Gamma function.

We scale estimated continuous RT (t) to observed TSO (t) by using the group-specific mean sums of TSO (t) over the observation period to evaluate modeling results of τ and σ^2 with observed TSO. Subsequently we compare the group-specific scaled cumulative RT (t) to cumulative observations of group-related annual mean sums of TSO (t).

Results

After the selection of storm-affected regions, timber stock outflow data from 111 forest enterprises can be analyzed. We find clear differences within the data set: Over all data sets the mean residence time τ is 2.48 years, which varies between 0.64 years and as a maximum 4.59 years, combined with variances σ^2 in mean larger than 1 year². The related minimum and maximum values of τ and σ^2 illustrate the big range captured by the FADN data set. The strongest price fall in the data set lies at TPR 29.34 €/m³ and the weakest price fall at TPR –5.43 €/m³. The forest enterprises contained in the FADN represent a considerable range of employed forest workers per hectare which starts at FWC = 0 and goes up to

Table 2 Statistical moment analysis of continuous variables τ , σ^2 , TPR and FWC

Variable	Unit	Mean	SD	Min.	Max.	N
τ	Year	2.48	.99	.64	4.59	111
σ^2	Year ²	1.11	.91	.05	3.81	111
TPR	€/m ³	- 21.84	8.06	- 29.34	-5.43	111
FWC	Full-time job equivalent/ha	.10	.23	0	.91	105

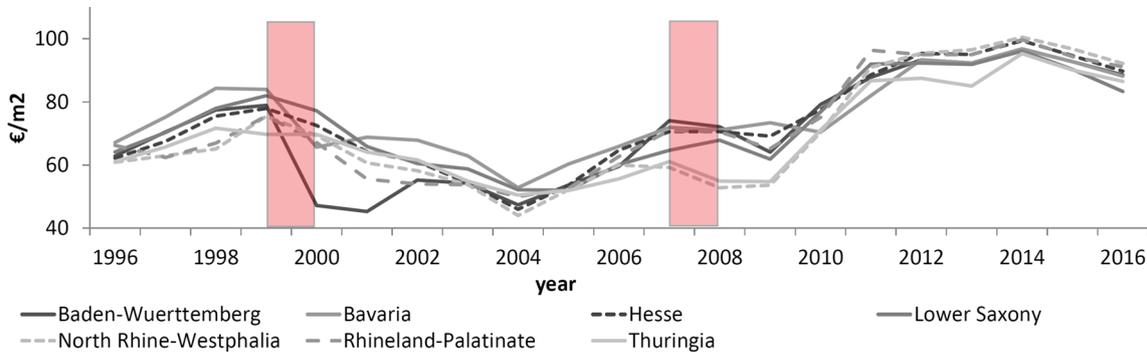


Fig. 3 Selected federal states’ timber prices for *spruce* from 1996 to 2016 based on ZMP (2002, 2008) and HMI-Marktbilanz Forst und Holz (2013, 2018)

FWC = .91 with a mean of one worker/10 ha (an overview on the descriptive statistics is given in Table 2).

Storm-induced timber price reactions

For the species group spruce in Baden-Wuerttemberg a strong price reaction can be found in conjunction with the storm event Lothar (1999) (see Fig. 3 based on ZMP 2002, 2008). We find a price fall of 25.8 €/m³ from the year before the storm (- 1) to the storm year (0) after the correction from price trends as explained in methods section. In the subsequent years, a recovery and approximation of the price for *spruce* in Baden-Wuerttemberg to timber prices of the non-affected regions can be found.

Only weak differences in price reactions between the affected (e.g., Rhineland-Palatine, North Rhine-Westphalia) and the non-affected federal states (e.g., Baden-Wuerttemberg) can be observed related to the storm event Kyrill (2007). One major reason for the weak price reactions after Kyrill is seen in the high demand for timber at that time (Jochem et al. 2015) causing relatively stable timber prices.

Weighted multiple linear regression analysis

Concerning the requirements of the performed multiple regression analyses, we cannot identify suspicious signs of a non-random distribution of the residuals. No related results show indications of autocorrelation (see Tables 2,

Table 3 Best fit results of the weighted multiple regression analysis on the TSO distribution parameter τ

Variable	Coefficient estimates	t value
SG <i>spruce</i>	- .18	- 3.11***
TPR	- .03	- 2.20**
OT municipal forest	.18	1.98**
OT private forest	- .46	- 2.78***
SE2	.38	3.33***
Constant	1.98	9.17***

N = 111, adj. R² = .28, Durbin–Watson test for autocorrelation = 1.71

*p ≤ .10; **p ≤ .05; ***p ≤ .01

3). Regarding multicollinearity, all related results are considerably below the cutoff of 10, so no suspicious signs of multicollinearity occur.

To identify the determinants for the residence times of the coniferous timber stocks in storage succeeding severe storm events, we analyze the empirical TSO-based parameters τ and σ^2 of the resulting RT (t)s as dependent variables in two separate linear multiple regression analyses, as explained in methods section.

We find that the explanatory variables SE, SG, OT, TPR and the constant show a significant correlation with τ at a 99% confidence interval or at a 95% confidence interval, respectively (compare coefficient results in Table 3). The estimated constant expresses the culmination of timber storage outflows under the nominal variables’ setting SE1, SG

pine and OT state forest. The related coefficient estimate lies at 1.98, expressing that almost two years after the storm event the mean residence time of TSO can be observed.

Looking at the variable type of ownership (OT), the private forest enterprises show the shortest interval between the storm event and the mean residence time of TSO. These are followed by the state and the municipal forest enterprises. The distance between the private and the state forest enterprises lies at .46 and between the state and the municipal forest enterprises at .18.

Regarding the variable storm event (SE), Lothar (SE1) shows a remarkably shorter mean residence time compared to Kyrill (SE2). The distance between the coefficients lies at .38.

Considering the analyzed species groups (SGs) *spruce* and *pine*, we find a shorter mean residence time for *spruce* compared to *pine*. The distance between the coefficients for *spruce* and *pine* lies at .18.

The variable timber price reaction (TPR) shows a significant negative correlation with a coefficient estimate of $-.03$. Accordingly, the mean residence time of timber in storage shortens at .03 years at a price decrease of each Euro.

We cannot identify significant differences between the tested categories with regard to the analyzed variable areal size class (ASC). This result indicates that forest enterprises' behavior in terms of the mean residence time of timber in storage does not vary significantly between the different size classes. Reversely, our results do not support a relation between storage disposals of forest enterprises and market power effects. Due to the avoidance of model-over-specification, we eliminate the variable ASC in a backward-elimination procedure from our model.

Because of a relatively high remaining unexplained variation, the related statistical model shows a relatively low explanatory power (see R^2 in Table 3), but the residual analyses revealed no systematic trends, so we can assume that the remaining variability is purely random and does not contain any necessary information. The model validity

is thus not compromised by the relatively high remaining variability.

The parameter σ^2 was estimated with a weighted multiple linear regression analysis under the nominal variables' setting SG *pine* and OT state forest (compare coefficient results in Table 4). The resulting mean estimate lies at $\sigma^2 = 1.41$ which translates into an average stretch of TSO (RT (t), respectively) of almost one and a half years.

Looking at the different ownership categories (OT), the shortest and most accentuated outflow period can be found for the private forest enterprises, followed by the state and the municipal forest enterprises. The distance between the private and the state forest enterprises lies at .41 years and between the state and the municipal forest enterprises at .38 years.

Considering the variable employed forest worker capacities (FWC), we find a significant positive correlation with σ^2 . The coefficient value lies at .51, which can be translated into an additional storage stretch of half of a year for each additional forest worker per hectare.

The variable species group (SG) shows a significantly higher σ^2 for *spruce* compared to *pine* with a coefficient difference of .32.

Furthermore, we find a significant positive correlation of timber price reaction (TPR) with σ^2 . The coefficient value of .03 can be interpreted as follows: at an additional price fall of 1€, the dispersion period from storage prolongs at .03 years. This result is in line with the relevance of timber price reactions for timber storage. It indicates a substantial influence of the timber price reaction on the TSO distribution. While stronger price falls induce shorter mean residence times due to increased initial cash flow-oriented economic pressure, they lead to a wider stretch of the TSO distribution due to a longer continuance of the remaining stored timber.

Regarding the variables storm event (SE) and areal size class (ASC), we cannot find a significant correlation with σ^2 in the underlying data. This indicates that neither the considered storm events nor the considered areal size classes vary significantly in terms of the dispersion duration of timber from storage. Due to the avoidance of model-over-specification, we eliminate the insignificant variables SE and ASC in a backward-elimination procedure from our statistical model.

A relatively high remaining unexplained variation between the individual cases leads to a rather low explanatory power of the resulting statistical model (see R^2 in Table 4).

Table 4 Best fit results of the weighted multiple regression analysis regarding the TSO distribution parameter σ^2

Variable	Coefficient estimates	t value
SG <i>spruce</i>	.32	4.70***
TPR	.03	3.16***
FWC	.51	1.78*
OT municipal forest	.38	3.02***
OT private forest	-.41	-2.41**
Constant	1.41	8.05***

$N = 105$, adj. $R^2 = .25$, Durbin-Watson test for autocorrelation = 2.09

* $p \leq .10$; ** $p \leq .05$; *** $p \leq .01$

Continuous simulation of timber stock residence time distributions

In order to transform our results into a continuous distribution, we first generate mean expressions of the significant variables categories. Subsequently, we generate the related mean τ and mean σ^2 values and utilize them to parameterize the probability density function of the Gamma distribution as described in Chapter 2.5. As suggested by Hill and Lewicki (2006), we estimate least squares means (LS means) based on our linear regression model to account for the influence of all used factors of the model. Resulting curves represent probability density functions of mean RT (t) related to the time since the storm event (see Fig. 4). Considering the variable storm event (SE), SE1 shows a smaller τ compared to SE2. Regarding the analyzed species groups (SGs), *spruce* shows a smaller τ but a higher σ^2 value, which is expressed in a lower peak and a larger spread. Regarding the types of ownership, the private forest enterprises show the smallest τ and σ^2 values. This can be translated into the earliest culmination and the shortest storage duration followed by the state and the municipal forest enterprises. To simulate the impact of the continuous variable timber price reactions (TPR) on the curvature of TSO, we first take the empirical quartiles directly from the data. Then we calculate τ and σ^2 of the lower and the upper quartile from the empirical data. As a result, a shorter mean residence time can be observed

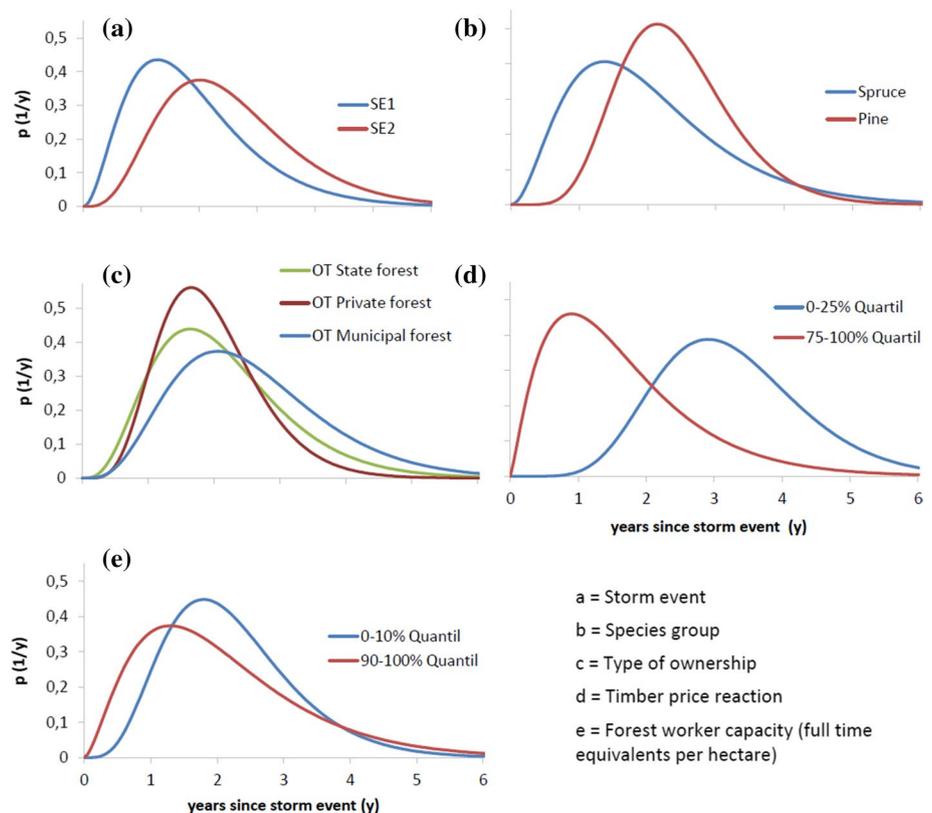
for high price reactions (lower quartile), while low price reactions (upper quartile) are related to later outflows from timber storage. Regarding the continuous variable fixed cost effects in terms of the employed forest worker capacities per hectare (FWC), we principally apply the same visualizing procedure as applied for TPR. However, we use the lower and the upper 10% quantile to visualize the influence of the variable expression on the residence time of timber in storage. As a result, we find the main difference is a higher σ^2 value for the forest enterprises with a greater relative stock of employed forest workers upper 10% quantile).

To validate these results and to visualize the categories' differing storage levels, we scale the continuous probability density distributions with the corresponding empirical TSO mean sums and generate cumulated TSO progressions (see Fig. 5). Considering the analyzed storm events (SEs), we find higher total storage after Lothar (SE1) compared to Kyrill (SE2), possibly related to the stronger price falls and the higher damage rates per hectare after Lothar as compared to Kyrill.

Regarding the considered species groups (SGs), we find a higher storage level for *spruce* compared to *pine*, substantiating the outstanding affectedness of *spruce* in terms of storm-related timber quantities and the central quantitative role of *spruce* regarding timber storage.

Scaling the probability distributions of the forest enterprises' ownership categories (OT) emphasizes the prominent

Fig. 4 Continuous residence time distributions of TSO for the variables **a** storm event, **b** species group, **c** type of ownership, **d** timber price reaction and **e** forest worker capacity



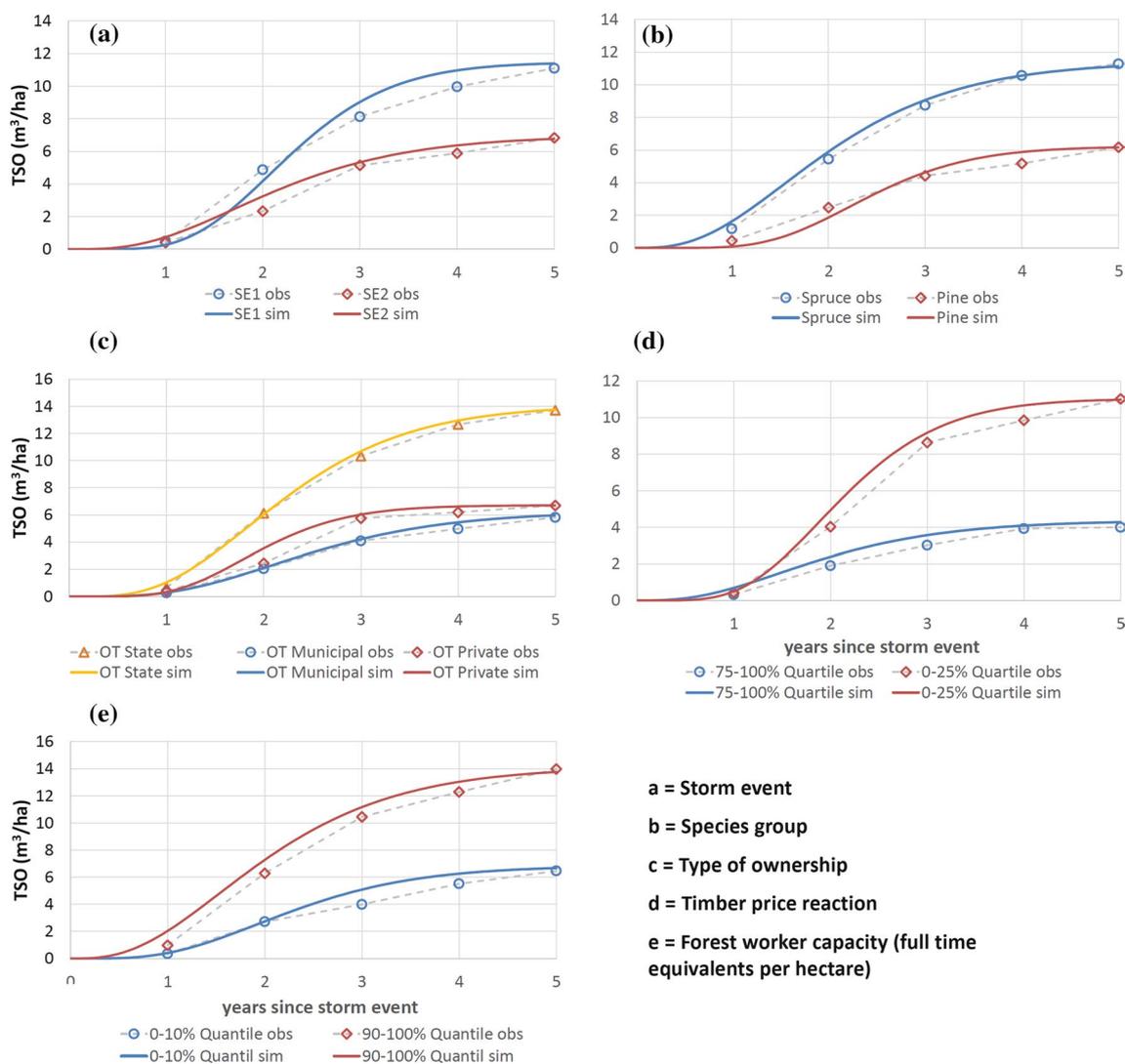


Fig. 5 Cumulative distributions of simulated and observed TSO values after the storm event of the variables **a** storm event, **b** species group, **c** type of ownership, **d** timber price reaction, **e** forest worker capacity

role of the state forest enterprises in terms of leveling timber storage quantities. Furthermore, it reveals that despite the longer storage retention of the municipal forest enterprises mean TSO levels between the municipal and the private forest enterprises are on a similar level.

Looking at the variable timber price reaction (TPR), it becomes evident that the cases with stronger timber price falls (1st quartile) are related to a higher TSO level compared to the cases with less pronounced timber price falls (4th quartile).

With regard to the employed forest worker capacities per hectare (FWC), besides the mentioned correlation regarding the dispersion period, we find a higher storage

level for the forest enterprises with higher numbers of forest workers (90–100%-Quantile).

Besides the scaled and accumulated continuous residence times of timber in storage, we plot the annual mean TSO values related to the variables categories. In comparison with these empirical mean values, we find a good representability of our continuous Gamma distributions (see Fig. 5).

Discussion

Our results fundamentally support the relevance of timber storage for forest enterprises in the context of surplus harvesting quantities after severe storm events, as stated by Kinnucan (2016). Forest enterprises store significant quantities of timber or carbon, respectively, over an extended period of time. They create a temporary pool, which should be taken into consideration for national timber accounting duties as proposed by Jochem et al. (2015).

Regarding mean timber stock storage residence times and associated variances we find statistically significant coefficients among the variables tree species group (SG), timber price reaction (TPR), forest worker capacity (FWC), type of ownership (OT) and storm event (SE) which supports our research hypothesis. Conversely, the variable areal size class (ASC) does not show any significance among its categories in the conducted regression analyses which does not support our research hypothesis.

Concerning the variable SG, *spruce* shows a shorter residence time and a longer dispersion period regarding its TSO distribution compared to *pine*. This can be explained by the higher monetary value and storm-related timber quantities of *spruce*. Also, the better suitability for longer-term storage for *pine* compared to *spruce* as found by Hapla (1992) and Odenthal-Kahabka (2004) supports this result. According to the increased exposure of the coniferous species toward storms but also toward biotic damages such as bark beetle calamities, we recommend a stronger focus on timber storage management for regions with high incidence of *spruce* and *pine*.

Concerning the variable OT, our results confirm our assumption in terms of public forest enterprises showing a delayed and prolonged TSO course compared to private forest enterprises as stated by Odenthal-Kahabka (2004). Also Zimmermann et al. (2018) noted an intensified timber storage accumulation of public forest enterprises compared to private forest enterprises. Conversely, shifts in framework conditions such as the privatization of public forest enterprises could potentially lead to changes in the proportions of timber storage across other independent variables.

In line with the findings of Kinnucan (2016), our results regarding the variable TPR show a correlation with the residence time of timber stocks in storage. The regression results show a significant negative correlation between the timber price reactions (TPR) and the TSO-based τ . We refer this to an increased cost pressure and the need to monetarize the stored timber at an earlier stage after the storm event. Reversely, we find a significant positive correlation between the timber price reactions (TPR) and the TSO-based σ^2 . We refer this to forest enterprises' economic incentive to

increase the duration of storage with increasing timber price falls. Regarding timber price data, we observe a relatively high variability between different federal states and years due to the complexity and the interrelation of timber markets and timber prices. Therefore, uncertainties regarding the causal relation between price changes and storm events cannot be neglected. Furthermore, timber prices were not available on the individual enterprises' level. Accordingly, they might not represent the individual basis for storage-related decision-making. Another reason could lie in the global financial crisis, which took place in the years after 2007. During that time the demand for timber was at a low point mainly due to a crisis in the construction sector. Accordingly, timber prices declined which might have been an incentive for forest enterprises not to sell their stored timber.

Regarding forest enterprises' fixed internal production costs, the regression results indicate that our hypothesis can be partially confirmed. As expected, we find a significant positive correlation between relative forest worker capacities (FWC) and σ^2 in our results. This result can be traced back to higher fixed costs and less flexibility for the related forest enterprises in terms of cutting back their harvesting volumes. Fixed costs for harvesting capacities in terms of the employed forest workers per hectare lead to an extended period and a less accentuated peak of timber storage outflows. It should be noted that forest enterprises have substantially increased the degree of contracting since the considered storm events to reduce their fixed costs (Wippel et al. 2015). Consequently, timber storage residence times might change in succession of future storm events due to the changes in forest enterprises' fixed cost structure.

With regard to the variable SE, we find that SE1 shows a significantly shorter mean residence time compared to SE2. One central reason could lie in the global financial crisis which had its peak in 2008, as during this time the demand for timber and consequently timber prices went down significantly. Accordingly, forest enterprises kept their stored timber in storage during that low price phase (Jochem et al. 2015), which led to a longer mean residence time after SE2.

With regard to the relatively low explanatory power (see R^2 in Tables 2, 3) of the regression models related to τ and σ^2 as dependent variables, we cannot exclude further unobserved determinants for the course of TSO. One reason for the relatively low R^2 values in the performed multiple regression analyses could lie in the used regional timber price data (TPR). As these generalized prices might not represent the individual forest enterprises' timber prices, the related management decisions regarding storage continuation might deviate individually. Furthermore, timber storage capacities could be subject to change. As environmental protection is gaining importance, approval procedures for long-term sites for wet storage might have aggravated and thus storage behavior might have changed.

The database used includes solely the two severe storm events Lothar and Kyrill. Due to the high complexity of the timber storage phenomenon succeeding severe storm events, the statistical robustness of our statistical models in terms of predictions is limited.

With regard to the underlying data of our analyses, the FADN as a judgment-based sample is vulnerable toward bias (Toscani 2016; Toscani and Sekot 2018). Conversely, collecting a random sample causes a great additional effort and is, therefore, rejected in the FADN context. Hence, the German Forest Accountancy Data Network (FADN) is the most appropriate source of data for our purpose. Despite controversy with regard to the robustness of estimations related to weighting, e.g., Carroll and Ruppert (1988), we assert that resulting estimates are most possibly accurate and could otherwise be severely biased. According to the representability analysis by Zimmermann et al. (2018), the conducted sample weighting measures are appropriate to correct for sampling-based bias of the FADN.

We assume that our effective sample is sufficient for the conducted analysis. The data set used contains the data of approximately 350 forest enterprises from 1991 until 2015. Nevertheless, a spatial selection of storm-affected regions with a sufficient representation of all categories of the analyzed variables is carried out which remarkably reduces our effective sample.

The applied baseline approach for generating the analyzed TSO values could be subject to uncertainties, as it does not account for long-term trends regarding TSO continuation. Nevertheless, upon visual inspection, no such trends could be identified in the underlying sample.

Looking at the correlation between forest enterprises' TSO and TSA, we notified in methods section that the integral of all observed TSO (t) should approximately equal TSA in the year of the storm event. The slope of the according regression line lies at .93 with an R^2 of .91 meaning that based on the regression results 93% of the accumulated timber storage quantities (TSA) can be found as outflows from timber storage (TSO) in the empirical data. This relation is plausible, as the missing share of 7% can be interpreted either as loss rate due to quality deterioration or as estimation error of the applied baseline procedure.

With regard to the used lag order 5, we tested the appearance of timber in storage in the used data set by visual inspection of the annual mean storage quantities. We could not find any remarkable signs of timber in storage later than 5 years after the storm events. Also, timber should not be stored longer than 5 years (Odenthal-Kahabka 2004). Additionally, comparing the magnitudes of total (6 year) TSO with storm-TSA we found that the mean storage outflow of the five storm-antecedent years as a baseline value results in clear agreement of both measures (R^2 , slope significance).

Nevertheless, we did not perform a sensitivity analysis of the lag order toward the regression results.

Another concern we want to address is that under the chosen approach, possible interaction effects between the chosen storm-affected regions in terms of German federal states and neighboring regions were neglected. However, keeping the federal states' boundaries for our analysis has the advantages of a comparability with other sources regarding representability concerns and the spatial congruence of the variable timber price reaction (TPR) which also relates to the federal states' level. Therefore, we suggest that such interaction effects should be analyzed by further research. The FADN does not provide data for forest enterprises with a productive forest area below 200 hectares. However, because small-scale forest enterprises represent a substantial group, it would be of great interest to test this group of forest enterprises via existing small-scale FADNs in relation to the existing data. Additionally, we are not able to exclude a possible influence of assortment- and quality-related issues regarding their influence on long-term timber storage, which could be another topic for further research.

In line with the recommendations of Riguelle et al. (2017), we believe that developing appropriate storage strategies can be crucial for the mitigation of economic pressure for European forestry after severe storm events. We assert that our quantitative results can be an integral component for such strategic storage planning. For example, we are able to derive the related species group-specific timber storage residence times based on the defined shares of outflows from the total stored timber quantities, as e.g., 50% in Fig. 6. We can show group-specific differences in storage management after specific time intervals (compare e.g., years 1 and 4 for pine and spruce in Fig. 6). After the extrapolation with related timber quantities, the time-specific demand as well as the costs for storage facilities could be derived and distributed fairly among stakeholders of the forest-based sector.

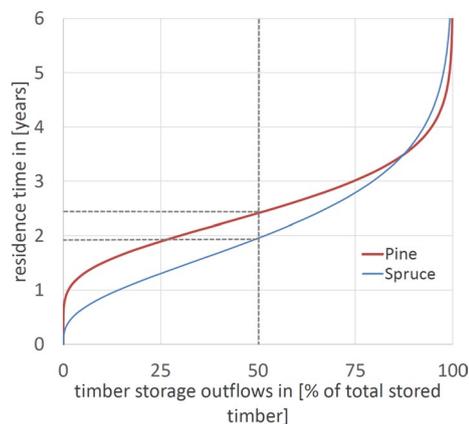


Fig. 6 Percentage residence time of timber in storage for the species groups *spruce* and *pine*

Conclusions

Concluding from our results we want to point out that individual controls should be taken into account for the estimation of timber stock residence times in storage, as they support timber accounting accuracy, especially under the European forestry framework conditions. Due to the complexity of the analyzed timber storage phenomenon, we want to stress that the related statistical models could profit from the integration of further empirically based data regarding their reliability for predictions. Further existing European FADN databases in Austria, Denmark, Finland, Germany, Norway, Sweden, Switzerland and the UK could be employed to enhance the robustness of related estimations.

The development of specific timber storage strategies in the context of biotic drivers such as bark beetle calamities succeeding severe phases of drought could also play an important role for forest enterprises as substantial quantities of timber may arise through such threats. Our methodological approach based on the residence time concept could be suitable to develop appropriate strategies for the logistical challenges related to bark beetle-infested timber. Due to their empirical foundation, the methodological approach used and missing supplementary studies, we believe that our results are of interest for scientists, policy makers and market participants related to the timber and forest sector in the context of climate change and related forest damages.

Acknowledgements We gratefully acknowledge financial support by the Agency of Renewable Resources (FNR) on behalf of the Federal Ministry of Food and Agriculture, based on a decision of the German parliament within the project “Wood Resource Monitoring” (“Rohstoffmonitoring Holz”). We would like to thank Emanuel Meier and Hermann Englert for the provision of data.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL. The Agency of Renewable Resources (FNR) funded this study within the project “Wood Resource Monitoring” (“Rohstoffmonitoring Holz”) (Grant Number 22021614).

Compliance with ethical standards

Conflict of interest The authors declare that they have no conflict of interest.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article’s Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article’s Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (2016) *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung, 14., überarbeitete und aktualisierte Auflage* ed. Springer Gabler, Berlin
- Belshe EF, Sanjuan J, Leiva-Dueñas C, Piñeiro-Juncal N, Serrano O, Lavery P, Mateo MA (2019) Modeling organic carbon accumulation rates and residence times in coastal vegetated ecosystems. *J Geophys Res Biogeosci* 124:3652–3671. <https://doi.org/10.1029/2019JG005233>
- Berlemann M (2016) Does hurricane risk affect individual well-being?. Empirical evidence on the indirect effects of natural disasters. *Ecol Econ* 124:99–113
- Bolte A, Ammer C, Löf M, Madsen P, Nabuurs GJ, Schall P, Spathelf P, Rock J (2009) Adaptive forest management in central Europe: climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand J For Res* 24:473–482. <https://doi.org/10.1080/02827580903418224>
- Buyanovsky GA, Kucera CL, Wagner GH (1987) Comparative analyses of carbon dynamics in native and cultivated ecosystems. *Ecology* 68(6):2023–2031
- Carroll RJ, Ruppert D (1988) *Transformation and weighting in regression*. Chapman & Hall Ltd, London
- Dankwerts PV (1953) Continuous flow systems: distribution of residence times. *Chem Eng Sci* 2:1–13
- Gilmore TE, Genereux DP, Solomon DK, Solder JE (2016) Groundwater transit time distribution and mean from streambed sampling in an agricultural coastal plain watershed, North Carolina, USA. *Water Resour Res* 52(3):2025–2044
- Gujarati DN (2003) *Basic econometrics*, 4th edn. McGraw-Hill, Boston
- Hapla F (1992) Holzqualität von Kiefern aus einem Waldschadensgebiet nach fünfjähriger Naßlagerung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 50:268–274
- Hill T, Lewicki P (2006) *Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry, and data mining*, 1st edn. StatSoft, Tulsa
- Hillmann M (2007) “Kyrill”—das Ende der Solidarität? *AFZ*, pp 1190–1191
- HMI-Marktbilanz Forst und Holz (2013) *Holzmarktinfo Marktbilanz Forst und Holz 2013 Deutschland*
- HMI-Marktbilanz Forst und Holz (2018) *Holzmarktinfo Marktbilanz Forst und Holz 2018 Deutschland*
- Isagi Y (1994) Carbon stock and cycling in a bamboo *Phyllostachys bambusoides* stand. *Ecol Res* 9(1):47–55
- Jawitz JW (2004) Moments of truncated continuous univariate distributions. *Adv Water Resour* 27(3):269–281
- JMP (2017) http://www.jmp.com/support/help/Launch_the_Fit_Model_Platform.shtml#213135. Accessed 12 Oct 2018
- Jochem D, Weimar H, Bösch M, Mantau U, Dieter M (2015) Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. *Eur J For Res* 134:869–888
- Kadlec RH (1994) Detention and mixing in free water wetlands. *Ecol Eng* 3(4):345–380
- Kinnucan HW (2016) Timber price dynamics after a natural disaster: Hurricane Hugo revisited. *J For Econ* 25:115–129. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2016.09.002>
- Levenspiel O (1972) *Chemical reaction engineering*, 2nd edn. Wiley, New York, p 578
- Lindroth A, Lagergren F, Grelle A, Klemedtsson L, Langvall O, Weslien P, Tuulik J (2009) Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. *Glob Change Biol* 15:346–355. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01719.x>

- Lohner P, Appel V, Dieter M, Seintsch B (2016) Das TBN-Forst: Ein Datenschatz für die deutsche Forstwirtschaft, AFZ-DerWald
- Małozzewski P, Zuber A (1982) Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers: 1. Models and their applicability. *J Hydrol* 57(3–4):207–231
- McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds) (2001) *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, p 1008
- Neter J, Wasserman W, Kutner MH (1985) *Applied linear statistical models. Regression, analysis of variance, and experimental designs*, 2nd edn. Irwin, Homewood
- Oberle B, Lee MR, Myers JA, Osazuwa-Peters OL, Spasojevic MJ, Walton ML, Young DF, Zanne AE (2019) Accurate forest projections require long-term wood decay experiments because plant trait effects change through time. *Glob Change Biol* 26:864–875. <https://doi.org/10.1111/gcb.14873>
- Odenthal-Kahabka J (2004) Orkan “Lothar” - Bewältigung der Sturmchäden in den Wäldern Baden-Württembergs: Dokumentation, Analyse, Konsequenzen. Landesforstverwaltung, Stuttgart
- Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG (1982) Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298(5870):156
- Prescott CE, Corbin JP, Parkinson D (1989) Input, accumulation, and residence times of carbon, nitrogen, and phosphorus in four Rocky Mountain coniferous forests. *Can J For Res* 19(4):489–498
- Riguelle S, Jourez B, Hébert J, Pirothon B, Lejeune P (2017) Identification of sprinkling storage facilities for windblown timber using a GIS-based modeling approach, vol 21
- Rosenkranz L, Englert H, Jochem DI, Seintsch B (2018) Methodenbeschreibung zum Tabellenrahmen der European Forest Accounts und Ergebnisse der Jahre 2014 und 2015: Abschlussbericht Teilprojekt 3. 2. revidierte Fassung. Thünen-Institut, Braunschweig
- SAS Institute (2016) *JMP 13 Multivariate Methods*. SAS Institute
- Thorn S, Bäessler C, Svoboda M, Müller J (2017) Effects of natural disturbances and salvage logging on biodiversity—Lessons from the Bohemian Forest. *For Ecol Manag* 388:113–119. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.006>
- Toscani P (2016) *Methodische Aspekte und Informationspotentiale Forstlicher Testbetriebsnetze in Österreich*. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna
- Toscani P, Sekot W (2018) *Forest accountancy data networks—a European approach of empirical research, its achievements, and potentials in regard to sustainable multiple use forestry*. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna
- van Lierop P, Lindquist E, Sathyapala S, Franceschini G (2015) Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. *For Ecol Manag* 352:78–88. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.010>
- Wildberg J, Möhring B (2019) Empirical analysis of the economic effect of tree species diversity based on the results of a forest accountancy data network. *For Policy Econ* 109:101982. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.101982>
- Wippel B, Kastenholz E, Bacher-Winterhalter M, Storz S, Ebertsch J (2015) *Praxisnahe Anhaltswerte für die mechanisierte Holzerte: Abschlussbericht*. http://www.cluster-forstholz-bw.de/fileadmin/cluster/cluster_pdf/2015-10-20%20Bericht%20Praxisnahe%20Anhaltswerte.pdf. Accessed 18 Mar 2019
- Yousefpour R et al (2017) A framework for modeling adaptive forest management and decision making under climate change, vol 22. <https://doi.org/10.5751/es-09614-220440>
- Zimmermann K, Schuetz T, Weimar H (2018) Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany. *Eur J For Res* 137:463–475
- ZMP-Marktbilanz Forst und Holz (2002) *ZMP-Marktbilanz Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle für Erzeugnisse der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft 2002*
- ZMP-Marktbilanz Forst und Holz (2008) *ZMP-Marktbilanz Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle für Erzeugnisse der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft 2008*

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

I.2 Transferartikel

Artikel 3

Zimmermann K, Jochem D (2024) Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 37 p, Thünen Working Paper 244, DOI:10.3220/WP1722506779000

Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung

Klaus Zimmermann, Dominik Jochem

Thünen Working Paper 244

Klaus Zimmermann
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Abteilung Forstökonomie und Management
Wonnhaldestraße 4
79100 Freiburg
Tel.: 0762 4018-0
E-Mail: klaus.zimmermann(at)forst.bwl.de

Dominik Jochem
Thünen-Institut für Waldwirtschaft
Leuschnerstraße 91
21031 Hamburg
Tel.: 040 73962-325
E-Mail: dominik.jochem(at)thuenen.de

Thünen Working Paper 244

Braunschweig/Germany, August 2024

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	ii
Zusammenfassung	iii
Abstract	iv
1 Hintergrund	1
1.1 Natürliche Störungsereignisse in Wäldern	2
1.2 Datenbedarfe nationaler Berichtssysteme am Beispiel der Thünen-Einschlagsrückrechnung	4
1.3 Einflussfaktoren auf die Schadholzlagerhaltung von Forstbetrieben	5
2 Methode	7
2.1 Konzeptioneller Rahmen	7
2.2 Schritt 1: Nationaler störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat})	9
2.3 Schritt 2: Nationale Zuflüsse in das Schadholzlager (TSA_{nat})	9
2.4 Schritt 3: Nationale Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{nat}) und Bildung des Lagerbestandsmodells	10
2.5 Schritt 4: Skalierung des Lagerbestandsmodells	12
2.6 Datengrundlage	12
3 Ergebnisse	13
3.1 Schritt 1: Nationaler störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat})	13
3.2 Schritt 2: Nationale Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat})	14
3.3 Schritt 3: Nationale Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{nat}) und Bildung des Lagerbestandsmodells	15
3.4 Schritt 4: Skalierung des Lagerbestandsmodells	17
3.5 Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz für Rohholz zur Schätzung der nationalen Lagerbestände für das natürliche Störungsereignisse Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer	18
3.6 Herleitung des skalierten Schadholzlagerbestandsmodells für Deutschland	21
4 Diskussion	23
4.1 Datengrundlage und Methode	23
4.2 Anwendung des Verfahrens für den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer (seit 2018)	24
5 Schlussfolgerungen	27
Literaturverzeichnis	28

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gesamt- und Schadholzeinschlag in Deutschland	3
Abbildung 2:	Deutsche Importe und Exporte von Rohholz von 1996 bis 2023	6
Abbildung 3:	Eintrittswahrscheinlichkeiten von Lagerzufluss und -abfluss	7
Abbildung 4:	Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Abflüsse aus dem Schadholzlager	11
Abbildung 5:	Modellierung des Lagerbestands in [%]	11
Abbildung 6:	Störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) der natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill und des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer für Deutschland	13
Abbildung 7:	Baselineeinschläge, Einschläge der Schadjahre, störungsbedingte Mehreinschläge (DAM_{nat}) und Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}) im Kontext der natürlichen Störungsereignisse Lothar (2000), Kyrill (2007) und Sturm/Dürre/Borkenkäfer (2018 bis 2022)	15
Abbildung 8:	Wahrscheinlichkeitsverteilung für die nationalen Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{nat}) auf Grundlage der TBN-Stichprobe	16
Abbildung 9:	Lagerbestandsmodell auf Grundlage der TBN-Stichprobe	16
Abbildung 10:	Skaliertes Lagerbestandsmodell für Deutschland für das Sturmereignis Lothar	17
Abbildung 11:	Zeitreihe der Schadholzlagerbestände für die natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill und Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer für Deutschland	18
Abbildung 12:	Außenhandelsbilanz für Rohholz von 2010 bis 2023 mit Darstellung eines Baseline-Verfahrens zur Abschätzung der kalamitätsinduzierten zusätzlichen Rohholzexporte von 2018 bis 2023	19
Abbildung 13:	Baselineeinschläge, Einschläge der Schadjahre, störungsbedingte Mehreinschläge (DAM_{nat}) Außenhandelsbilanzdeltas, störungsbedingtes Holzaufkommen und Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}) im Kontext des natürlichen Störungsereignisses Sturm/Dürre/Borkenkäfer (2018 bis 2022)	20
Abbildung 14:	Modellierte Zeitreihe der nationalen Lagerbestände für die natürliche Störungsereignisse Lothar, Kyrill und Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer unter Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz	21
Abbildung 15:	Forstliche Schadensursachen in Deutschland von 2006 bis 2021	25
Abbildung 16:	Preisindizes der Staatsforstbetriebe in Prozent (2015 = 100 %)	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Schadholzanfall nach extremen natürlichen Störungsereignisse in der deutschen Forstwirtschaft seit 1990	3
Tabelle 2:	Variablenabkürzungen und Beschreibungen	8
Tabelle 3:	Störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) der natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill und des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer für Deutschland auf Basis der Einschlagszeitreihe des Statistischen Bundesamts	14
Tabelle 4:	Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}) auf Basis der störungsbedingten Mehreinschläge (DAM_{nat}) für die Störungsereignisse Lothar, Kyrill und Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer	14
Tabelle 5:	Deskriptive Statistik der Variablen τ_{nat} und σ^2_{nat} , die den zeitlichen Verlauf der nationalen Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{nat}) parametrisieren	15
Tabelle 6:	Zuflüsse ins Schadholzlager des Störungsereignisses Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer unter Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz für Rohholz	20

Zusammenfassung

Natürliche Störungsereignisse wie Feuer, Trockenheit, Insektenkalamitäten und Sturmereignisse sind heute zu einem zentralen Thema für Deutschlands Wälder und Forstbetriebe geworden. Ökonomische Schäden durch Mindererlöse nach natürlichen Störungsereignissen mit hohem Schadholzaufkommen nehmen beträchtliche Ausmaße an. Um den Absatz der Schadhölzer zeitlich von schweren natürlichen Störungsereignissen zu entkoppeln, lagern Forstbetriebe große Schadholzmengen teils über mehrjährige Zeiträume ein.

Das zentrale Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in einem Verfahren zur Abschätzung der forstbetrieblichen Lagerbestände nach schweren natürlichen Störungsereignissen auf nationaler Ebene. Die vorliegende Arbeit basiert zu wesentlichen Teilen auf den Ergebnissen von Zimmermann et al. (2018) und Zimmermann et al. (2021). Die empirischen Betriebsdaten des forstlichen Testbetriebsnetzes des Bundes (TBN-Forst) werden im Zusammenhang mit den natürlichen Störungsereignissen Lothar (1999) und Kyrill (2007) in mehreren Schritten zu einem überbetrieblichen Lagerbestandsmodell überführt.

Zentrale Eingangsgrößen der Studien von Zimmermann et al. (2018, 2021) sind die störungsbedingten Mehreinschläge (DAM_{comp}), die Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) sowie die Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{comp}) auf forstbetrieblicher Ebene in einem mehrjährigen Betrachtungszeitraum. Die einzelnen Schritte der vorliegenden Studie zur Überführung der betrieblichen Informationen in eine Schätzung der Lagerhaltung auf nationaler Ebene sind wie folgt gegliedert: In Schritt 1 wird ein nationaler störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) hergeleitet. Schritt 2 zeigt darauf aufbauend die Herleitung der nationalen Zuflüsse zum Schadholzlager (TSA_{nat}). Schritt 3 zeigt, wie aus Zufluss und zeitlichem Verlauf der Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{nat}) ein nationales Lagerbestandsmodell parametrisiert werden kann. Das Vorgehen zur Skalierung des nationalen Lagerbestandsmodells wird in Schritt 4 vorgestellt. Das entwickelte Lagerbestandsmodell wird auf Grundlage der nationalen Zuflüsse ins Schadholzlager, welche durch die nationalen störungsbedingten Mehreinschläge hergeleitet werden, skaliert. Auf Grundlage des Modells wird die Lagerhaltung für die natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill sowie den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer abgeschätzt.

Die Untersuchung zeigt deutlich die mehrjährige Relevanz der Lagerhaltung von Schadholz nach natürlichen Störungsereignissen. Die mittels des vorgestellten Verfahrens geschätzten Lagerzuflüsse für Deutschland liegen zwischen 6,9 Mio. Efm im Jahr 2018 und 20,1 Mio. Efm durch den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer im Jahr 2021. Auf Grundlage der mehrjährigen Simulation kumulieren während des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer durch den jährlichen Anfall enormer Schadholzmengen die eingelagerten Schadholzmengen im Jahr 2022 bei 38,6 Mio. Efm.

Da die Außenhandelsbilanz sich im Zuge des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer ungewöhnlich stark ändert, wird im Rahmen dieser Studie ein Verfahren vorgestellt, in welchem eine Korrektur des störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{nat}) im Zuge der Lagerbestandsberechnung vorgenommen wird. Unter Einbeziehung der Außenhandelsbilanz ergeben sich Minderungen der Lagerbestände für den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer mit einem Maximum bei 24,1 Mio. Efm und somit einer Reduktion um etwa 14,5 Mio. Efm des Lagerbestandes im Jahr 2022.

Schlüsselwörter: Klimawandel, natürliche Störungsereignisse, Schadholzlager, Berichterstattung

Abstract

Natural disturbances such as fire, drought, insect calamities and storm events have now become a central issue for Germany's forests and forestry companies. Economic damage due to reduced revenues after natural disturbances with high levels of damaged timber is taking on considerable proportions. In order to decouple the sale of damaged timber from severe natural disturbance events, forestry companies store large quantities of damaged wood, sometimes over periods of several years.

The central aim of this work is to develop a method for estimating forest companies' timber storage after severe natural disturbance events at the national level. This work is based to a large extent on the results of Zimmermann et al. (2018) and Zimmermann et al. (2021). For this purpose, the empirical operational data of the federal forestry test network (TBN-Forst) in connection with the natural disturbance events Lothar (1999) and Kyrill (2007) are transferred in several steps to a national timber storage model.

The key input variables are the disturbance-related additional felling quantities (DAM_{comp}), the inflows into damaged timber storage (TSA_{comp}) and the outflows from damaged timber storage (TSO_{comp}) at the company level over a multi-year observation period. The individual steps of this study for transferring the operational information to estimate timber storage at the national level are structured as follows: In step 1, national disturbance-related additional felling quantities (DAM_{nat}) are derived. Step 2 shows the inflows into damaged timber storage (TSA_{nat}). Step 3 shows how a national timber storage model can be parameterized from the inflow and temporal course of the outflows from the damaged timber storage (TSO_{nat}). The procedure for scaling the national timber storage model is presented in step 4. The timber storage model is scaled on the basis of the national inflows into the damaged timber storage, which are derived from the national disturbance-related additional felling quantities. National timber storage is estimated for the natural disturbance events Lothar, Kyrill and the damage complex storm/drought/bark beetle.

The analysis of damaged timber storage after natural disturbances clearly shows the multi-year relevance. The annual inflow into timber storage for Germany estimated using the method presented lie between 6.9 million m^3 in 2018 and 20.1 million m^3 due to the damage complex storm/drought/bark beetle in 2021. Based on the multi-year simulation, the total amount of damaged timber stored during the damage complex storm/drought/bark beetle accumulates at 38.6 million m^3 in 2022 due to the annual accumulation of enormous amounts of damaged timber.

Since the foreign trade balance changes unusually sharply as a result of the storm/drought/bark beetle damage complex, this study presents a procedure in which a correction of the disturbance-related additional felling (DAM_{nat}) is made in the course of the damaged timber storage calculation. Taking the foreign trade balance into account, there are significant reductions in inventories for the storm/drought/bark beetle damage complex, with a maximum of 24.1 million m^3 and thus a reduction of around 14.5 million m^3 in inventory in 2022.

Keywords: climate change, natural disturbances, damaged timber storage, reporting

1 Hintergrund

Natürliche Störungsereignisse haben eine zentrale Bedeutung für die deutsche Forstwirtschaft eingenommen. In jüngster Vergangenheit wurden in den Jahren 2018 bis 2022 Deutschlands Wälder durch Sturmereignisse, extreme Trockenphasen und damit einhergehende Borkenkäferkalamitäten stark geschädigt. Als weitere schwere natürliche Störungsereignisse der vergangenen Jahrzehnte in Deutschland sind insbesondere die Stürme Vivian und Wiebke (1990), Lothar (1999) und Kyrill (2007) zu nennen.

Die Forstwirtschaft unterliegt hierdurch hohen ökonomischen Belastungen. Möhring et al. (2021) bezifferten die wirtschaftliche Schadenssumme aus dem Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer für die deutsche Forstwirtschaft allein in den Jahren 2018 bis 2020 mit 12,7 Mrd. Euro. Davon entfielen knapp 3,4 Mrd. Euro und somit 27 % der Schadenssumme auf Mindererlöse, die insbesondere durch kalamitätsbedingte Rückgänge der Rundholzpreise begründet sind. Temporäre Preisrückgänge bilden eine der Entscheidungsgrundlagen für Forstbetriebe zur Einlagerung der Schadholzeinschläge über mehrjährige Zeiträume im Zuge der zeitlichen Entkopplung des Absatzes der Schadhölzer von schweren natürlichen Störungsereignissen.

Schätzungen über die Lagerbestände von Schadholz nach natürlichen Störungsereignissen für forstbezogene Bilanzierungssysteme wurden bislang auf der Grundlage verfügbarer Daten und komplementierender gutachterlicher Schätzungen erstellt (z. B. Dieter et al. 2004). Zum einen sind empirische Erkenntnisse über die Einflussfaktoren auf die forstbetriebliche Lagerhaltung nach natürlichen Störungsereignissen von grundsätzlicher Bedeutung. Zum anderen trägt die Quantifizierung der forstbetrieblichen Lagerhaltung nach natürlichen Störungsereignissen zur Verbesserung der Genauigkeit der Berechnung der Einschläge im Rahmen der Thünen-Einschlagsrückrechnung (ESRR) (vgl. Jochem et al. 2015) und somit zur Erfüllung der Berichtspflichten auf nationaler und internationaler Ebene bei.

Zwischenzeitlich untersuchten Zimmermann et al. (2018) die Determinanten für den Aufbau von Lagerbeständen nach schweren Sturmereignissen und Zimmermann et al. (2021) die Verweilzeit von Schadholz im Lager in Deutschland auf empirischer Basis insbesondere auf Grundlage des forstlichen Testbetriebsnetzes. Auf Grundlage der bestehenden explorativen betrieblichen Erkenntnisse der Studien von Zimmermann et al. (2018; 2021) wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Einlagerungsschätzung auf nationaler Ebene durchgeführt.

Die hier vorgestellte Quantifizierung der Lagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen bezieht sich, wie auch die Studien von Zimmermann et al. (2018; 2021), auf Extremereignisse, da zwar Schadholz praktisch in jedem Jahr auftritt, jedoch nur nach Extremereignissen nennenswerte Lagerbestandsmengen entstehen (Zimmermann et al. 2018). Das Verfahren kann insbesondere in Verbindung mit der Thünen-Einschlagsrückrechnung (Jochem et al. 2015, Thünen-Institut für Waldwirtschaft 2024) ein Schritt zur Verbesserung der nationalen und internationalen Holzbilanzierungssysteme, wie beispielsweise dem System zur Meldung von Treibhausgasemissionen für den Nationalen Inventarbericht (NIR), Wirtschaftskonten für die Forstwirtschaft (EAF), dem Gemeinsamen Fragebogen für die Forstwirtschaft (JFSQ) oder zur Europäische Forstbuchhaltung (EFA) sein.

1.1 Natürliche Störungsereignisse in Wäldern

Natürliche Störungsereignisse wie Feuer, Trockenheit, Erkrankungsausbrüche, hydrologische Störungen oder Sturmereignisse verursachen erhebliche naturale, ökonomische oder gar humanitäre Schäden (Berlemann 2016). Auch für Wälder spielen natürliche Störungsereignisse eine bedeutende Rolle. Grundsätzlich werden biotische und abiotische Störungsereignisse unterschieden. Regional in unterschiedlichen Ausprägungen und Intensitäten wiederkehrend, begleiten natürliche Störungsereignisse die Entwicklungsgeschichte deutscher und europäischer Waldbestände. Aufgrund des Klimawandels nimmt die Bedeutung natürlicher Störungsereignisse für Wälder zu (McCarthy et al. 2001).

Natürliche Störungsereignisse können in Wäldern erhebliche Vorratsverluste und überschüssige Erntemengen verursachen (Bolte et al. 2009). Ein kalamitätsbedingter großräumiger Anfall von Schadholz kann sich negativ auf eine Vielzahl von Waldfunktionen auswirken (Thorn et al. 2017). Nachhaltige Waldbewirtschaftungspraktiken, die auf eine kontinuierliche Holzerzeugung abzielen, werden gefährdet. Durch die erheblichen wirtschaftlichen Schäden werden Forstbetriebe langfristig unter Druck gesetzt. Darüber hinaus wird beispielsweise auch die Funktion von Wäldern als Kohlenstoffsенke negativ beeinflusst (Lindroth et al. 2009).

In Deutschland verursachten in den vergangenen Jahrzehnten insbesondere schwere Sturmereignisse wiederholt erhebliche Mengen Schadholz durch geworfene oder abgebrochene Bäume (van Lierop et al. 2015). Vivian und Wiebke mit 72 Mio. Efm Schadholz, Lothar mit 34,3 Mio. Efm Schadholz (Odenthal-Kahabka 2004) und Kyrill mit 37 Mio. Efm Schadholz (Hillmann 2007) sind hierbei als zentrale Sturmereignisse zu nennen. Darüber hinaus nimmt seit 2018 ein Schadkomplex aus verschiedenen Sturmereignissen, Dürre und Borkenkäferkalamitäten mit summarisch 233 Mio. Efm aufgearbeitetem Schadholz im Zeitraum der Jahre 2018 bis 2022 (Schadholzmengen des Statistischen Bundesamts) eine wichtige Rolle im forstlichen Schadgeschehen ein. Gemäß der Studie von Möhring et al. (2021) lag die Gesamtschadholzmenge der Jahre 2018 bis 2020 nochmals wesentlich höher als die aufgearbeitete Schadholzmenge. Allein die Jahre 2018 bis 2020 führten zu einer Gesamtschadholzmenge von etwa 177 Mio. Efm (vergleiche Tabelle 1). Dies ist besonders bemerkenswert, da, wie bereits von Zimmermann et al. (2018) ausgeführt, die jährliche Nutzung in Deutschland zwischen 1987 und 2002 durchschnittlich bei etwa 60 Mio. m³ Rundholz (Polley 2006) und im Zeitraum zwischen 2002 und 2012 durchschnittlich bei etwa 75 Millionen m³ (BW13 2014) lag.

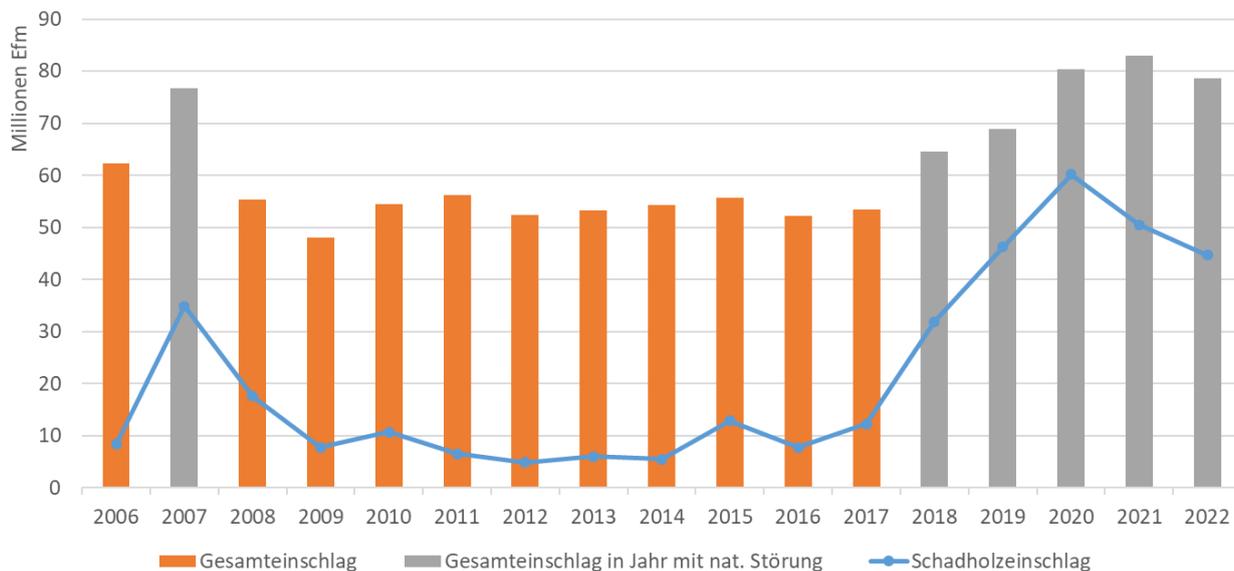
Tabelle 1: Schadholtzanfall nach extremen natürlichen Störungsereignisse in der deutschen Forstwirtschaft seit 1990

Datum	Bezeichnung	Hauptschadensregion (Bundesländer)	^{bd} Aufgearbeitetes Schadholtz (Efm); ^{ace} Gesamtschadholtzmenge (Efm)
25.02.1990	Vivian und Wiebke	Rheinland-Pfalz, Saarland, Hessen, Thüringen, Bayern, Baden-Württemberg	72,0 ^a
26.12.1999	Lothar	Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz	34,3 ^b
18.01.2007- 19.01.2007	Kyrill	Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Hessen, Thüringen, Bayern	37,0 ^c
2018	Schadkomplex Sturm/ Dürre/Borkenkäfer	Bundesweit	31,9 ^d ; 35,6 ^e
2019	Schadkomplex Sturm/ Dürre/Borkenkäfer	Bundesweit	46,2 ^d ; 68,7 ^e
2020	Schadkomplex Sturm/ Dürre/Borkenkäfer	Bundesweit	60,1 ^d ; 72,5 ^e
2021	Schadkomplex Sturm/ Dürre/Borkenkäfer	Bundesweit	50,5 ^d
2022	Schadkomplex Sturm/ Dürre/Borkenkäfer	Bundesweit	44,7 ^d

Quelle: ^{ab} Odenthal-Kahabka (2004); ^c Hillmann (2007); ^d Statistisches Bundesamt (Destatis); ^e Möhring et al. (2021) gemäß Länderabfrage des BMEL

Als Resultat der natürlichen Störungsereignisse sind in den nationalen Einschlagsdaten des Statistischen Bundesamts beispielsweise im Jahr 2007 höhere Einschläge als in den jeweiligen Vor- und Nachjahren zu erkennen. Die erhöhten Einschläge seit 2018 stehen mit dem mehrjährigen Schadkomplex aus Sturmereignissen, Dürre und Borkenkäferkalamitäten in Verbindung. Die Einschläge korrelieren dabei zeitlich mit den Schadholtzmengen auf nationaler Ebene (Abbildung 1).

Abbildung 1: Gesamt- und Schadholtzeinschlag in Deutschland



Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis)

1.2 Datenbedarfe nationaler Berichtssysteme am Beispiel der Thünen-Einschlagsrückrechnung

Das Thünen-Institut für Waldwirtschaft führt seit mehreren Jahren Berechnungen zum jährlichen Holzeinschlag in Deutschland durch (Thünen-Institut für Waldwirtschaft 2024). Hierbei wird eine in Kooperation mit der Universität Hamburg weiterentwickelte Methode genutzt, die kontinuierlich an neue Daten und Informationen angepasst wird. Die rechnerische Ermittlung des Holzeinschlags ist erforderlich, da die offizielle Holzeinschlagsstatistik über lange Zeiträume hinweg die tatsächlichen Einschlagsmengen zumeist erheblich unterschätzt (Jochem et al. 2015).

Die grundlegende Idee der Thünen-Einschlagsrückrechnung basiert auf der Ermittlung der Rohholzmengen, die aus dem Wald in die verschiedenen stofflichen und energetischen Verwendungswege in Industrie, Gewerbe und privaten Haushalten gelangen. Parallel dazu werden auch insbesondere Daten über Veränderungen der Lagerbestände von Rohholz im Wald (gefalltes Holz) sowie in der Industrie benötigt, damit diese teils erheblichen Mengen in der Berechnung des Einschlags Berücksichtigung finden können. Zusätzlich wird der Außenhandel mit Rohholz implementiert. Somit wird mit Hilfe des Verfahrens nicht nur die Bestimmung der Gesamtmenge des Holzeinschlags ermöglicht, sondern auch die Analyse aktueller Entwicklungen in den verschiedenen Verwendungsbereichen von Rohholz.

Für die Rückrechnung des Holzeinschlags in Deutschland ist zunächst die Identifikation aller Sektoren erforderlich, die Rohholz verwenden. Anschließend werden alle verfügbaren Daten für diese Sektoren analysiert und hinsichtlich ihrer Qualität bewertet. Sofern keine offiziellen Daten verfügbar sind oder die vorhandenen Daten nicht ausreichend sind, werden alternative Informationsquellen wie Verbandsstatistiken oder empirische Studien herangezogen. Besondere Bedeutung kommt dabei den Untersuchungen des Rohstoffmonitorings Holz zu, wie beispielsweise den Arbeiten von Mantau et al. (2018a und 2018b). Verbleibende Datenlücken werden mittels individueller, sektorspezifischer Modelle geschlossen (Jochem et al. 2015, Thünen-Institut für Waldwirtschaft 2024).

Für die Schätzung des Holzeinschlags, insbesondere in den Jahren 2018 bis 2022, sind die Lagerbestandsveränderungen von Rohholz im Wald von wesentlicher Bedeutung. Während amtliche Statistiken und Verbandsangaben die Lagerbestandsveränderungen in der Holzwirtschaft valide abbilden, fehlen aktuell vergleichbare Daten für die Bestandsveränderungen von Schadholzlagerbeständen im Wald. Da seit 2018 keine Informationen mehr zu Waldlagerbestandsänderungen durch das Testbetriebsnetz Forst erhoben werden, werden in der Thünen-Einschlagsrückrechnung seit dem Jahr 2019 Waldlagerbestandsänderungen über die Korrelation der Lagerbestandsveränderungen im Wald und der Holzindustrie geschätzt. Es ist jedoch möglich, dass dieser Zusammenhang, insbesondere in den Schadjahren seit 2018, nicht mehr zutrifft und im Wald wesentlich größere oder auch kleinere Mengen als anhand der früheren Korrelationen abgeschätzt eingelagert wurden. Jedoch gibt es weder in der aktuellen Literatur noch in Pressemitteilungen Hinweise auf besonders hohe Lagerbestandsveränderungen im Jahr 2022. Somit wurden im Rahmen der Thünen-Einschlagsrückrechnung zum Stichjahr 2022 zuletzt die Lagerbestandsveränderungen der Rohholzlager im Wald für die Jahre 2018 bis 2022 weiterhin anhand der Lagerbestandsveränderungen in der Holzwirtschaft geschätzt. Ferner wurden Expertenschätzungen aus der Branche zur Plausibilisierung der Daten herangezogen (Thünen-Institut für Waldwirtschaft 2024).

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellte Verfahren zur Abschätzung von Waldlagerbestandsveränderungen soll einen Beitrag dazu leisten, die Thünen-Einschlagsrückrechnung weiter zu verbessern. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der Bedeutung von genauen Einschlagsdaten für verschiedene nationale und internationale Berichtssysteme oder Stellungnahmen und Berichte für die Bundesregierung von großer Wichtigkeit. Auf nationaler Ebene fließen die berechneten Daten zum Holzeinschlag u. a. in die Holzbilanzen des Thünen-Instituts (z. B. Weimar 2020) und die Fortwirtschaftlich Gesamtrechnung (z. B. Rosenkranz et al. 2023) ein. Auf internationaler Ebene werden die o. g. Ergebnisse zum Holzeinschlag

beispielsweise für den Joint Forest Sector Questionnaire (JFSQ) der UNECE/FAO/Eurostat/ITTO oder die European Forest Accounting (EFA) von Destatis/Eurostat verwendet.

1.3 Einflussfaktoren auf die Schadholzlagerhaltung von Forstbetrieben

Im Zusammenhang mit natürlichen Störungsereignissen entstehende Schadholzmengen führen, sobald sie die geplanten Erntemengen auf regionaler Ebene überschreiten, zu einem baumartenspezifischen Überangebot. Dies führt der Markttheorie folgend zu Reaktionen der Holzmärkte in Form von baumartenspezifischen Holzpreisrückgängen. Möhring et al. (2021) bewerten im Rahmen einer Gesamtschadensabschätzung im Kontext des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer von 2018 bis 2020 Mindererlöse als zentrale Position mit einer Höhe von 3,39 Mrd. Euro. Hierbei handelt es sich um Erlösabschläge, die durch vermindertes Erntevolumen (durch Gesundschneiden von Brüchen etc.), durch Sortenverschiebungen (z. B. Abwertung des Stammholzes von B nach C) sowie insbesondere Reaktionen des Rundholzmarktes insbesondere bei der Fichte entstehen. Den mittleren Erlösabschlag im Kontext des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer von 2018 bis 2020 schätzen Möhring et al. (2021) auf 26,31 Euro/Efm. Möhring et al. (2021) führen hierbei aus, dass die Fichte als zentral betroffene Baumart von Erlösabschlägen im Mittel der drei Jahre in Höhe von rund 45 % betroffen war. Dabei waren die Erlösabschläge im Jahr 2018 für Fichten-Schadholz noch gering, da die in der Forstwirtschaft verbreiteten mittel- bis langfristigen Lieferverträge mit entsprechenden Volumina die Preise noch relativ stabil hielten. Damit einhergehend reduzieren Forstbetriebe durch eine temporäre Einlagerung angefallenen Schadholzes ihre wirtschaftlichen Einbußen, indem der Verkauf angefallenen Schadholzes zeitlich bis zur Erholung der Holzmärkte von angebotsbedingten Holzpreiseinbrüchen zeitlich aufgeschoben wird (Kinnucan 2016).

Der Kenntnisstand bezüglich der bestimmenden Faktoren der Schadholzlagerhaltung von Forstbetrieben nach natürlichen Störungsereignissen beschränkt sich mit Ausnahme der wissenschaftlichen Untersuchungen von Zimmermann et al. (2018, 2021) nach Kenntnisstand der Autoren auf den technischen Bereich der Lagerung von Schadholz sowie qualitative Hinweise und Dokumentationen von Störungsereignissen. Bislang wurden die forstbetrieblichen Schadholzlager nach natürlichen Störungsereignissen für forst- und holzbezogene Bilanzierungssysteme mittels einfacher Schätzverfahren abgeleitet (z. B. Dieter et al. 2004).

Auf Grundlage der empirischen Daten des Testbetriebsnetzes Forst untersuchten Zimmermann et al. (2018) mit Hilfe einer gewichteten multiplen linearen Regressionsanalyse den Zusammenhang zwischen rechnerischen Schadholzmengen und rechnerisch hergeleiteten Einlagerungsmengen von Forstbetrieben. Ihre Untersuchung zeigte einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen den beiden Variablen. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass Nadelholz die zentrale Rolle bei der Einlagerung nach den natürlichen Störungsereignissen Lothar (1999) und Kyrill (2007) spielte, was durch höhere Schadholzvolumina sowie die Eignung zur mehrjährigen Nasslagerung zu erklären ist. Bezüglich der Verteilung der Einlagerung auf die Eigentumsarten konnten Zimmermann et al. (2018) zeigen, dass Staatsforstbetriebe die höchsten Schadholzanteile einlagerten, gefolgt von kommunalen und privaten Forstbetrieben. Ein weiteres zentrales Ergebnis der Studie von Zimmermann et al. (2018) lag darin, dass der Holzpreisrückgang nach Sturmereignissen als Moderatorvariable auf das Verhältnis zwischen den Schadholzmengen und den eingelagerten Holz mengen wirkte. Daher können Informationen über Holzpreisreaktionen dazu beitragen, die Schätzgenauigkeit hinsichtlich der eingelagerten Schadholzmengen zu verbessern.

Auf Grundlage der empirischen Daten des Testbetriebsnetzes Forst untersuchten Zimmermann et al. (2021) bestimmende Faktoren für die Verweilzeiten von Nadelrundholz in Lagerbeständen nach den schweren Sturmereignissen Lothar (1999) und Kyrill (2007). Die Verteilung der Verweilzeiten von Nadelholz in den Lagerbeständen der einzelnen Forstunternehmen charakterisierten sie hierbei anhand der Parameter TAU (mittlere Verweilzeit) und Varianz der mittleren Verweilzeit. Mittels linearer multipler Regressionsanalysen konnten Zimmermann et al. (2021) zeigen, dass neben der Marktpreisdynamik Baumartengruppen, Waldbesitzarten und die Fixkostenstruktur der Forstunternehmen statistisch signifikante Einflussgrößen auf die

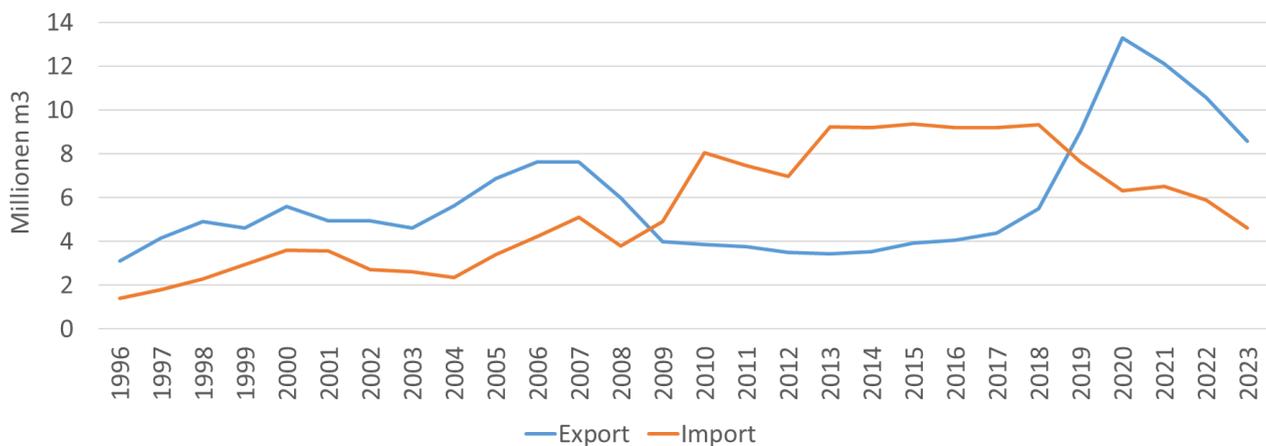
mittleren Verweilzeiten des eingelagerten Holzbestands und deren Varianzen sind. Weitere quantitative Forschungsarbeiten über die forstbetriebliche Lagerhaltung nach natürlichen Störungsereignissen sind den Autoren nicht bekannt.

Auswirkungen des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer auf die Außenhandelsbilanz für Rohholz

Der Schadensumfang des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer seit 2018 ist im Vergleich zu den Sturmereignissen Lothar und Kyrill überproportional hoch. Durch den massiven Anfall an Schadholz und einen entsprechenden Preiseinbruch für Nadelrohholz eröffneten sich Absatzkanäle ins Ausland. Die Außenhandelsbilanz für Rohholz lag in den Jahren von 2010 bis 2017 relativ konstant bei einem Importüberschuss zwischen 5,81 Mio. Efm (2013) und 3,45 Mio. Efm (2012). Ab dem Jahr 2018 ändert sich die Rohholzbilanz in Richtung eines Exportüberschusses. Der höchste Bilanzwert liegt im Jahr 2020 bei einem Exportüberschuss von 6,97 Mio. Efm.

Die Änderung in der Außenhandelsbilanz für Rohholz kann zum einen durch den steigenden inländischen Preisdruck für Rohholz ab 2018 begründet werden. Zum anderen sind eine gestiegene Nachfrage und relativ hohe Preise insbesondere aus China teils durch coronabedingte Konjunkturprogramme dokumentiert (ForstBW 2022).

Abbildung 2: Deutsche Importe und Exporte von Rohholz von 1996 bis 2023



Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis)

2 Methode

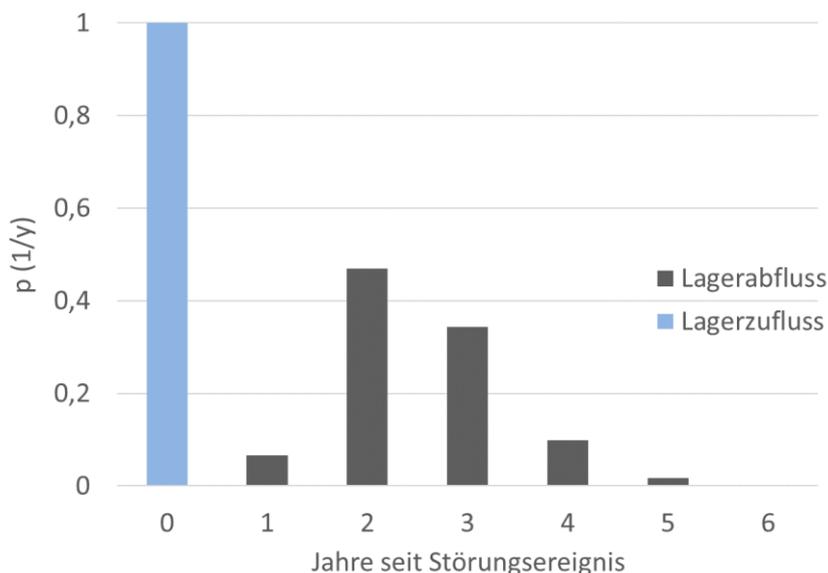
2.1 Konzeptioneller Rahmen

Das zentrale Ziel der vorliegenden Studie ist die Entwicklung eines Verfahrens zur nationalen Schätzung der Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen im zeitlichen Verlauf. Zimmermann et al. (2018; 2021) entwickelten auf Grundlage empirischer Daten des deutschen Testbetriebsnetzes Forst (TBN-Forst) statistische Modelle für die Einflussfaktoren auf Zuflüsse in und Abflüsse aus forstbetrieblichen Schadholzlägern.

Prozessual untersuchten Zimmermann et al. (2018) in einem ersten Schritt den Einfluss des störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{comp}) sowie eine Reihe weiterer Variablen hinsichtlich der betrieblichen Zuflüsse in Schadholzlager (TSA_{comp}) mit Hilfe multipler linearer Regressionsanalysen. Im zweiten Schritt untersuchten Zimmermann et al. (2021) die Einflussfaktoren auf den zeitlichen Verlauf der betrieblichen Abflüsse aus Schadholzlägern (TSO_{comp}) mittels einer statistischen Momentenanalyse von mittlerer Verweilzeit sowie Varianz. Aufgrund der geringen Kalamitätsbetroffenheit in der Vergangenheit sowie der technischen Restriktionen der Baumartengruppen Buche und Eiche und der resultierenden geringen Bedeutung hinsichtlich einer mehrjährigen Einlagerung beschränkte sich die Studie von Zimmermann et al. (2018) in Teilen und die Studie von Zimmermann et al. (2021) vollständig auf die Untersuchung der Baumartengruppen Fichte und Kiefer.

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden für das Lagerbestandsmodell Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Zuflüsse in das Schadholzlager auf den Eintritt des natürlichen Störungsereignisses als Zeitpunkt 0 datiert. Die Abflüsse aus dem Schadholzlager werden als Eintrittswahrscheinlichkeiten im zeitlichen Verlauf modelliert. Es wird hierfür ein Zeitraum von 6 Jahren nach Eintritt des natürlichen Störungsereignisses berücksichtigt. In Abbildung 3 werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Zuflüsse in das Schadholzlager und der Abflüsse aus dem Schadholzlager beispielhaft dargestellt. Wie auch die Studien von Zimmermann et al. (2018, 2021) bezieht sich die vorliegende Arbeit aus den oben genannten Gründen auf die Baumartengruppen Fichte und Kiefer.

Abbildung 3: Eintrittswahrscheinlichkeiten von Lagerzufluss und -abfluss



Quelle: Eigene Berechnung

Anhand der folgenden Schritte wird gezeigt, wie auf Grundlage der bestehenden Erkenntnisse der Studien von Zimmermann et al. (2018; 2021) eine Einlagerungsschätzung auf nationaler Ebene durchgeführt werden kann. Die folgenden Bezeichnungen beziehungsweise Abkürzungen lehnen sich zur Nachvollziehbarkeit an die verwendeten Bezeichnungen in den Studien von Zimmermann et al. (2018; 2021) an, wobei den Variablen zur besseren Zuordnung _{comp} als Subskript für „einzelbetrieblich“ und _{nat} als Subskript für „national“ hinzugefügt wurde.

Die Struktur der Schritte zur Schätzung der nationalen Lagerhaltung stellt sich wie folgt dar. Zunächst wird in Schritt 1 ein nationaler störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) hergeleitet. In Schritt 2 werden darauf aufbauend die nationalen Zuflüsse zum Schadholzlager (timber storage accumulation, TSA_{nat}) berechnet. In Schritt 3 wird aus Zufluss und zeitlichem Verlauf der Abflüsse aus dem Schadholzlager (timber storage outflows, TSO_{nat}) ein nationales Lagerbestandsmodell erstellt. In Schritt 4 wird das Vorgehen zur Skalierung des nationalen Lagerbestandsmodells vorgestellt. Ergänzend wird im Rahmen dieser Studie ein Verfahren zur Einbeziehung der Außenhandelsbilanz vorgestellt, die sich im Zuge des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer ungewöhnlich stark ändert.

Tabelle 2: Variablenabkürzungen und Beschreibungen

Variable	Beschreibung	Skala	Einheit	Quelle
DAM	Störungsbedingter Mehreinschlag	Kontinuierlich	m ³ /ha	TBN-Forst
DAM _{exp}	Störungsbedingter Rohholzexport	Kontinuierlich	m ³	Eigene Berechnung
EF	Einlagerungsfaktor	Kontinuierlich		Eigene Berechnung
SUP _{nat}	Störungsbedingtes Holzaufkommen nach Abzug des störungsbedingten Rohholzexports	Kontinuierlich	m ³	Eigene Berechnung
TS	Lagerbestand	Kontinuierlich	m ³ /ha	Eigene Berechnung
TSA	Eingang in das Schadholzlager	Kontinuierlich	m ³ /ha	TBN-Forst
TSO	Ausgang aus dem Schadholzlager	Kontinuierlich	m ³ /ha	TBN-Forst
τ	TSO basierter Verteilungsparameter, der die mittlere Verweilzeit beschreibt	Kontinuierlich	Jahr	TBN-Forst
σ ²	TSO basierter Verteilungsparameter, der die Varianz um τ beschreibt	Kontinuierlich	Jahr ²	TBN-Forst
SG	Baumartengruppe: SG Fichte (Fichte, Tanne, Douglasie), SG Kiefer (Kiefer, Lärche und andere Koniferen)	Nominal	Binär	TBN-Forst
_{comp}	Subskript für „einzelbetrieblich“			
_{nat}	Subskript für „national“			

Quelle: TBN-Forst; eigene Berechnungen

2.2 Schritt 1: Nationaler störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat})

Baselinekorrekturverfahren dienen der Trennung der Dynamik von langjährigen Entwicklungen und kurzfristigen Abweichungen. Im Rahmen der Untersuchung der Lagerhaltung wurde von Zimmermann et al. (2018; 2021) und wird auch in dieser Studie der durch ein extremes natürliches Störungsereignis hervorgerufene Anstieg der Einschlagsmenge von den langjährigen Einschlägen ohne Störung im Rahmen eines Baselinekorrekturverfahrens isoliert.

Als erklärende Variable für die betrieblichen Zuflüsse ins Schadh Holzlager (TSA_{comp}) ermittelten Zimmermann et al. (2018) den betrieblichen störungsbedingten Mehreinschlag (DAM_{comp}) als baselinekorrigierte Einschlagsmenge eines definierten Schadenszeitraums. Die Baseline wurde als durchschnittlicher Holzerntewert basierend auf den fünf Jahren vor dem natürlichen Störungsereignis berechnet. Zimmermann et al. (2018) identifizierten diese Variable (DAM_{comp}) als eine der zentralen bestimmenden Variablen zur Erklärung der betrieblichen Zuflüsse in das Schadh Holzlager (TSA_{comp}).

Zur Schätzung der Zuflüsse in das Schadh Holzlager (TSA_{nat}) auf nationaler Ebene wird im Rahmen der vorliegenden Studie in Analogie zu dem betrieblichen störungsbedingten Mehreinschlag (DAM_{comp}) von Zimmermann et al. (2018) ein störungsbedingter Mehreinschlag auf nationaler Ebene (DAM_{nat}) auf Basis der deutschlandweiten Einschlagszeitreihe des Statistischen Bundesamts hergeleitet.

Der störungsbedingte Mehreinschlag DAM_{nat} soll, wie auch DAM_{comp} , nicht die tatsächlichen Schadh Holz mengen widerspiegeln. Wie bei der genannten betrieblichen Untersuchung dient die rechnerisch hergeleitete Variable nationaler störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{comp}) als Eingangsvariable für die folgende Herleitung der nationalen Zuflüsse zum Schadh Holz lager (TSA_{nat}) (Schritt 2).

$$\alpha_{nat}(t) = \frac{1}{3} \sum_{t=-3}^{t=-1} x(t), \quad (1)$$

dabei ist t das Jahr des Sturmereignisses und x steht für die jährlichen Holzerntewerte. Unter Anwendung von Gleichung (1) generieren wir zunächst einen Baselinewert (α_{nat}), indem wir einen durchschnittlichen Holzerntewert basierend auf den drei Jahren vor dem jeweiligen natürlichen Störungsereignis berechnen.

$$DAM_{nat}(t) = \begin{cases} x(t) - \alpha_{nat}(t), & \text{if } x(t) - \alpha_{nat} \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Durch die Anwendung von Gleichung (2) wird die zuvor generierte Baseline von den tatsächlichen Holzerntewerten abgezogen. Die Ergebnisse stellen die sturmbedingten nationalen DAM_{nat} -Werte dar.

Die zeitliche Grundlage zur Berechnung der Baseline $\alpha_{nat}(t)$ von DAM_{nat} wurde mit dem gleitenden Mittelwert von 3 Jahren kürzer gewählt als in der Studie von Zimmermann et al. (2018), um die Auswirkungen der über die lange Zeitreihe tendenziell steigenden Einschläge auf die Höhe von DAM_{nat} möglichst gering zu halten. Für das mehrjährige Störungsereignis Schadhkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer wurde die Baseline der 3 Jahre vor Eintritt (2015 bis 2017) für die Störungsjahre ab 2018 fortgeschrieben.

2.3 Schritt 2: Nationale Zuflüsse in das Schadh Holz lager (TSA_{nat})

Zur Erstellung des statistischen Einlagerungsmodells ermittelten Zimmermann et al. (2018) die betrieblichen Zuflüsse zum Schadh Holz lager (TSA_{comp}) einzelbetrieblich als baselinekorrigierte unverkaufte Holz mengen der Berichtsjahre auf Grundlage des TBN-Forst. Zur Verbesserung der Repräsentativität der Stichprobe wurden die betrieblichen Werte mit den TBN-spezifischen Hochrechnungsfaktoren der Stichprobe gewichtet.

Im Rahmen der vorliegenden Studie findet die Ermittlung der Zuflüsse in das Schadh Holz lager TSA_{nat} auf Basis des nationalen störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{nat}) unter Verwendung der Holzeinschlagsstatistik des Statistischen Bundesamts statt. Die Verwendung dieser Datenquelle wird in der Diskussion ausführlich erörtert. Basierend auf den Daten und dem Gewichtungungsverfahren der Studie von Zimmermann et al. (2018), wird aus

einzelbetrieblichem Zufluss in das Schadh Holzlager (TSA_{comp}) und einzelbetrieblichem störungsbedingtem Mehreinschlag (DAM_{comp}) das durchschnittliche Verhältnis über die gesamte Stichprobe übergreifend für die repräsentierten Eigentumsarten, Baumartengruppen, Betriebsgrößenklassen und Schadereignisse (Lothar und Kyrill) hergeleitet. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Quotient genutzt, um den nationalen Zufluss in das Schadh Holzlager (TSA_{nat}) auf Grundlage des zuvor berechneten nationalen störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{nat}) auf Basis der Einschlagsdaten des Statistischen Bundesamts (Schritt 1) abzuschätzen.

2.4 Schritt 3: Nationale Abflüsse aus dem Schadh Holzlager (TSO_{nat}) und Bildung des Lagerbestandsmodells

Zimmermann et al. (2021) ermittelten die betrieblichen Abflüsse aus dem Schadh Holzlager als baselinekorrigierte verkaufte Holz mengen aus Einschlägen der Vorjahre auf Grundlage des TBN-Forst über einen Zeitraum von sechs Jahren nach Eintritt des natürlichen Störungsereignisses. Diese jährlichen Abflüsse aus dem Schadh Holzlager (TSO_{comp}) wurden von Zimmermann et al. (2021) auf einzelbetrieblicher Ebene als Wahrscheinlichkeitsverteilung mittels einer statistischen Momentenanalyse untersucht. Daraus wurde die betriebliche mittlere Verweilzeit (τ_{comp}) sowie die betriebliche Varianz der Verweilzeit (σ^2_{comp}) im Schadh Holzlager abgeleitet. Die Verweilzeitverteilung ($RT_{comp}(t)$) des eingelagerten Holzbestands wurde durch Normalisieren der beobachteten jährlichen Abgänge von Schadh Holz aus dem Lager ($TSO_{comp}(t)$) mit der sturmbedingten Summe von TSO_{comp} über alle Beobachtungsjahre hinweg beschrieben:

$$RT_{comp}(t) = \frac{TSO_{comp}(t)}{\int_0^{\infty} TSO_{comp}(t) dt}. \quad (3)$$

Basierend auf den beobachteten $TSO_{comp}(t)$ beschreibt $RT_{comp}(t)$ die Wahrscheinlichkeitsverteilung jedes jährlichen Anteils an TSA_{comp} , der über den Beobachtungszeitraum aus dem Schadh Holzlager mit der Einheit 1/Jahr abfließt und somit

$$\int_0^{\infty} RT_{comp}(t) dt = 1. \quad (4)$$

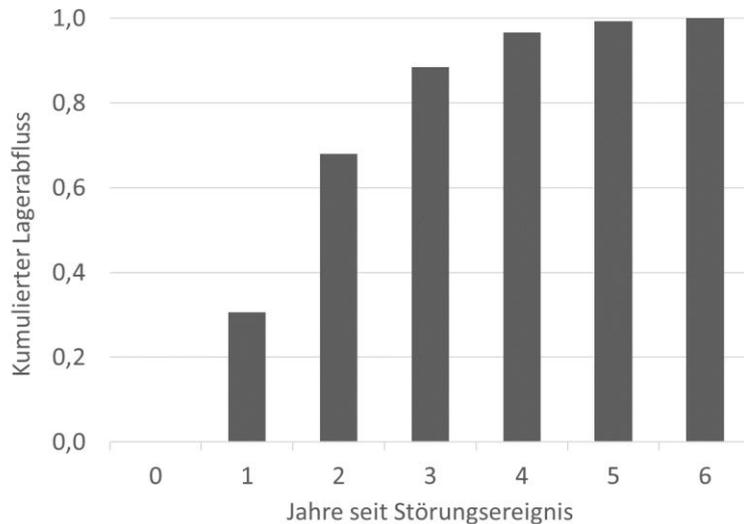
Mithilfe der statistischen Momentenanalyse ermittelten Zimmermann et al. (2021) einzelbetrieblich die mittlere Verweilzeit des Holzbestands im Lager (τ_{comp}) durch

$$\tau_{comp} = \int_0^{\infty} t RT_{comp}(t) dt \quad (5)$$

und einzelbetrieblich die zeitliche Varianz (σ^2_{comp}) durch

$$\sigma^2_{comp} = \int_0^{\infty} (t - \tau_{comp})^2 RT_{comp}(t) dt. \quad (6)$$

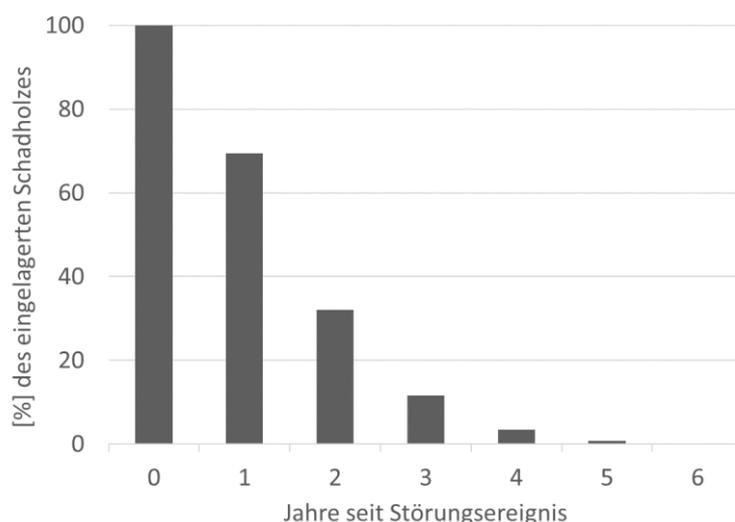
Im Rahmen der vorliegenden Studie wird die nationale mittlere Verweilzeit des Lagerbestands (τ_{nat}) und die nationale Varianz (σ^2_{nat}) durch Bildung eines gewichteten Mittelwerts basierend auf dem Gewichtungsverfahren der einzelbetrieblichen Werte der Studie von Zimmermann et al. (2021) hergeleitet. Wie in Abbildung 4 zunächst beispielhaft dargestellt, können nun die nationalen Eintrittswahrscheinlichkeiten der Abflüsse aus dem Schadh Holzlager gebildet und kumuliert werden.

Abbildung 4: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Abflüsse aus dem Schadh Holzlager

Quelle: Eigene Berechnungen

Wie in Zimmermann et al. (2021) ausgeführt, sollte das Integral aller beobachteten Abflüsse aus dem Schadh Holzlager ($T_{SO_{comp}}(t)$) dem Zufluss in das Schadh Holzlager ($T_{SA_{comp}}$) im Jahr des Sturmereignisses entsprechen.

Der Zufluss in das Schadh Holzlager ($T_{SA_{comp}}$) erfolgt im Modell zum Zeitpunkt des natürlichen Störungsereignisses ($t=0$)¹. Durch die Subtraktion der Abflüsse aus dem Schadh Holzlager ($T_{SO_{comp}}(t)$) vom Zufluss in das Schadh Holzlager ($T_{SA_{comp}}$) kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt ($t=x$) der Lagerbestand hergeleitet werden (vergleiche Abbildung 5).

Abbildung 5: Modellierung des Lagerbestands in [%]

Quelle: Eigene Berechnungen

¹ t entspricht in der Regel dem Jahr des natürlichen Störungsereignisses. Wenn das natürliche Störungsereignis kurz vor Jahreswechsel eintritt und die Effekte erst im Folgejahr auftreten, wird das Folgejahr des Störungsereignisses als $t=0$ definiert.

2.5 Schritt 4: Skalierung des Lagerbestandsmodells

In Schritt 4 kann das zunächst mit der nationalen mittleren Verweilzeit (τ_{nat}) und der nationalen Varianz (σ^2_{nat}) parametrisierte Modell des Lagerbestands mit dem nationalen Zufluss in das Schadholzlager (TSA_{nat}) skaliert werden. Dies kann, sofern bekannt, direkt über den nationalen TSA_{nat} -Wert erfolgen. Sofern dieser Wert unbekannt ist, kann eine Herleitung von TSA_{nat} durch den nationalen störungsbedingten Mehreinschlag (DAM_{nat}) unter Verwendung des empirisch hergeleiteten Einlagerungsquotienten erfolgen (vergleiche Schritt 2: Nationale Zuflüsse in das Schadholzlager (TSA_{nat})). Wie beschrieben, wird in der vorliegenden Studie DAM_{nat} auf Grundlage der amtlichen Einschlagsstatistik des Statistischen Bundesamts berechnet. Die Verwendung dieser Datenquelle wird in der Diskussion ausführlich erörtert.

2.6 Datengrundlage

Wie für die zugrundeliegenden Studien von Zimmermann et al. (2018; 2021) ist auch für die vorliegende Arbeit das deutsche forstliche Testbetriebsnetz (TBN-Forst) die zentrale Datengrundlage. Das TBN-Forst stellt eine wichtige Ressource zur Untersuchung wirtschaftlicher Parameter der deutschen Forstwirtschaft dar. Das forstliche Testbetriebsnetz (TBN-Forst) ist eine lange Zeitreihe von forstlichen Betriebsdaten. Das TBN-Forst stellt physische Holzproduktionsvariablen der Forstbetriebe sowie Kosten- und Umsatzvariablen von 1991 bis heute in jährlicher Auflösung bereit. Die Datenerhebung des TBN-Forst wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) koordiniert (Lohner et al. 2016). Das Stichprobenverfahren klassifiziert das TBN-Forst als Beurteilungsstichprobe. Die Stichprobe setzte sich in den vergangenen Jahrzehnten jährlich aus etwa 350 staatlichen, kommunalen und privaten Forstbetrieben mit einer Betriebsfläche von mindestens 200 ha zusammen. Leider sinkt die Zahl teilnehmender Betriebe und liegt bei der Erhebung des Forstwirtschaftsjahrs (FWJ) 2022 nur noch bei 163 Betrieben (BMEL 2024).

Eine Schlüsseleigenschaft des TBN-Forst für die vorliegende Arbeit besteht darin, dass über einen langen Erhebungszeitraum hinweg Informationen über den Holzabsatz von Forstbetrieben verfügbar sind. Auf Grundlage der Daten des forstlichen Testbetriebsnetzes wurden von Zimmermann et al. (2018, 2021) sowohl Zu- als auch Abflüsse in bzw. aus dem Schadholzlager der Testbetriebe rechnerisch hergeleitet. Durch die vorliegenden Daten konnten zwei natürliche Störungsereignisse in Form der Stürme Lothar und Kyrill in den Jahren 1999 und 2007 in die Untersuchung einbezogen werden, die zu den schwersten Störungsereignissen seit Beginn der geregelten Forstwirtschaft in Deutschland gehören (Hillmann 2007). Beide außergewöhnlich schweren Stürme verursachten erhebliche Schadholzmengen in Deutschland sowie zusätzliche Mengen in Nachbarländern.

Um die effektive Stichprobe für ihre Studien zu generieren, nahmen Zimmermann et al. (2018; 2021) eine Auswahl der Datensätze anhand der Kriterien „Sturmbetroffenheit“ sowie Repräsentanz der analysierten Variablen in den jeweiligen Bundesländern vor. Umgekehrt wurden mehrere Bundesländer aufgrund der Ermangelung von Sturmschäden oder zu geringer Repräsentanz der analysierten Variablen von der Stichprobe ausgeschlossen.

Bei der Auswahl der analysierten natürlichen Störungsereignisse identifizierten Zimmermann et al. (2018) betriebliche Einlagerungssignale (TSA_{comp}) ausschließlich im Zusammenhang mit den schweren Sturmereignissen Lothar und Kyrill. So wurden für das Sturmereignis Lothar insbesondere Testbetriebe der Bundesländer Baden-Württemberg und für das Sturmereignis Kyrill Testbetriebe der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz abgebildet. Darüber hinaus schlossen Zimmermann et al. (2018) Datensätze mit DAM_{comp} -Werten unter $1 \text{ m}^3/\text{ha}$ von der Analyse aus, um die vergleichsweise hohen Unsicherheiten bei kleinen DAM_{comp} -Werten zu berücksichtigen. Entsprechende Implikationen gelten auch für die vorliegende Arbeit.

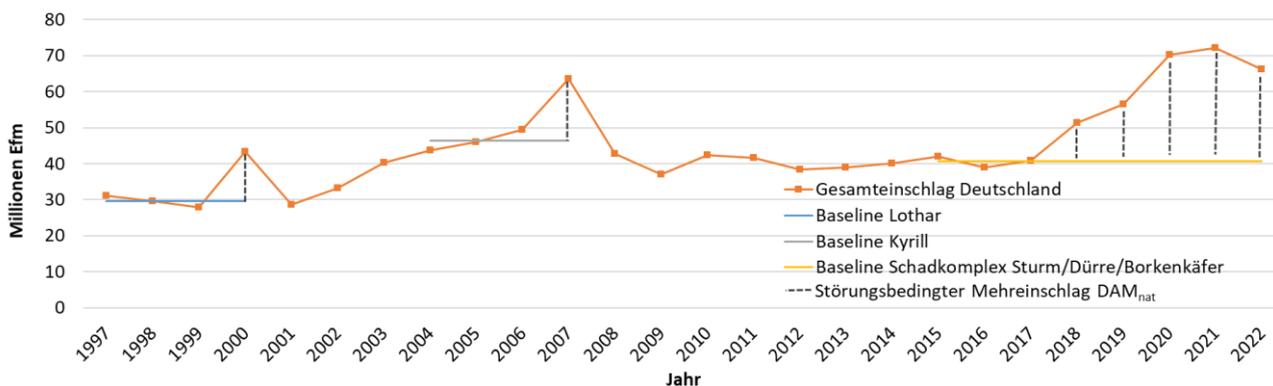
3 Ergebnisse

3.1 Schritt 1: Nationaler störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat})

Wie im Methodenteil beschrieben, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit im ersten Schritt auf Grundlage der Einschlagszeitreihe des Statistischen Bundesamts mittels einer Baselinekorrektur ein nationaler störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) hergeleitet. Das Verfahren wird im Rahmen der vorliegenden Studie für die drei extremen natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill sowie den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer in den Jahren ab 2018 – aufgrund der Datenverfügbarkeit des Statistischen Bundesamts – bis zum Jahr 2022 angewendet.

Der ermittelte nationale störungsbedingte Mehreinschlag (DAM_{nat}) für das natürliche Störungsereignis Lothar und die Baumartengruppen Fichte und Kiefer beläuft sich auf 13,8 Mio. Efm. DAM_{nat} für das natürliche Störungsereignis Kyrill beläuft sich auf 17,2 Mio. Efm. Die jährlichen DAM_{nat}-Werte für den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer belaufen sich von 2018 bis 2022 auf ein Spektrum zwischen 10,8 Mio. Efm (2018) und 31,5 Mio. Efm (2021). In Summe der Jahre 2018 bis 2022 verursachte der Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer einen störungsbedingten Mehreinschlag (DAM_{nat}) in Höhe von 113,1 Mio. Efm (vergleiche Abbildung 6 und Tabelle 3). Wie im Methodenteil erläutert, soll der störungsbedingte Mehreinschlag nicht die absoluten Schadholzmengen repräsentieren. Er dient als rechnerische Eingangsvariable für die folgende Ermittlung der Einlagerungsmenge. Wie im Methodenteil beschrieben, wurde für das mehrjährige Störungsereignis Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer die Baseline der 3 Jahre vor Eintritt (2015 bis 2017) für die Störungsjahre ab 2018 fortgeschrieben.

Abbildung 6: Störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) der natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill und des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer für Deutschland



Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis); eigene Berechnungen

Tabelle 3: Störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) der natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill und des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer für Deutschland auf Basis der Einschlagszeitreihe des Statistischen Bundesamts

Natürliches Störungsereignis	Bezugsjahr	Baselinewert (Efm)	Einschlagswert Schadjahr (Efm)	Störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) (Efm)
Lothar	2000	29.513.258	43.285.536	13.772.278
Kyrill	2007	46.415.682	63.612.294	17.196.612
Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer	2018	40.665.585	51.448.900	10.783.315
	2019	40.665.585	56.489.100	15.823.515
	2020	40.665.585	70.211.200	29.545.615
	2021	40.665.585	72.130.300	31.464.715
	2022	40.665.585	66.187.200	25.521.615

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis); eigene Berechnungen

3.2 Schritt 2: Nationale Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat})

Der hochgerechnete störungsbedingte Mehreinschlag (DAM_{nat}) auf Grundlage der verwendeten TBN-Forst-Stichprobe für die Baumartengruppen Fichte und Kiefer beläuft sich auf 16,2 Mio. Efm. Der analoge hochgerechnete Wert der Gesamtschadholzeinlagerung (TSA_{nat}) beläuft sich auf 10,4 Mio. Efm. Auf Grundlage der TBN-Stichprobe ergibt sich somit übergreifend für die repräsentierten Eigentumsarten, Betriebsgrößenklassen und Schadereignisse (Lothar und Kyrill) sowie für die Baumartengruppen Fichte und Kiefer ein durchschnittlicher Einlagerungsfaktor von 0,64 des störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{nat}).

Wie im Methodenteil beschrieben wird dieser Einlagerungsfaktor im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Abschätzung der nationalen Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}) auf Grundlage der rechnerischen nationalen Schäden (DAM_{nat}) genutzt. Für das natürliche Störungsereignis Lothar ergibt sich ein Zufluss ins Schadholzlager von 8,8 Mio. Efm und für Kyrill ergibt sich ein Zufluss ins Schadholzlager von 11,0 Mio. Efm. Die jährlichen Zuflüsse ins Schadholzlager für den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer belaufen sich von 2018 bis 2022 auf ein Spektrum zwischen 6,9 Mio. Efm (2018) und 20,1 Mio. Efm (2021). Der Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer verursachte in den Jahren 2018 bis 2022 eine rechnerische Summe von Zuflüssen ins Schadholzlager in Höhe von 67,7 Mio. Efm (vergleiche Tabelle 4).

Tabelle 4: Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}) auf Basis der störungsbedingten Mehreinschläge (DAM_{nat}) für die Störungsereignisse Lothar, Kyrill und Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer

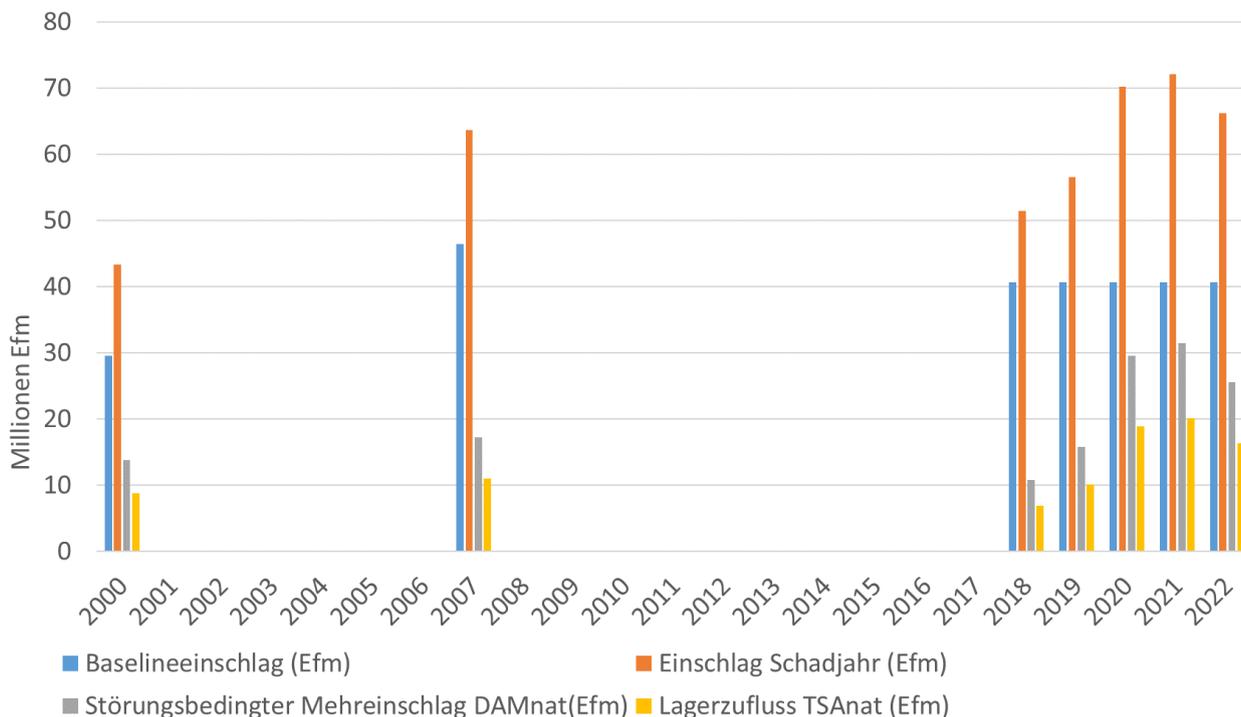
Natürliches Störungsereignis	Bezugsjahr	Störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) (Efm)	Zufluss ins Schadholzlager (TSA_{nat}) (Efm)
Lothar	2000	13.772.278	8.814.258
Kyrill	2007	17.196.612	11.005.832
Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer	2018	10.783.315	6.901.322
	2019	15.823.515	10.127.050
	2020	29.545.615	18.909.194
	2021	31.464.715	20.137.418
	2022	25.521.615	16.333.834

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis); eigene Berechnungen

In Abbildung 7 werden grafisch die Baselineinschläge, die Einschläge der Schadensjahre und die daraus resultierenden störungsbedingten Mehreinschläge (DAM_{nat}) sowie die korrespondierenden rechnerisch mittels

Einlagerungsquotient hergeleiteten Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}) auf nationaler Ebene für die Störungsereignisse Lothar, Kyrill und Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer dargestellt.

Abbildung 7: Baselineeinschläge, Einschläge der Schadjahre, störungsbedingte Mehreinschläge (DAM_{nat}) und Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}) im Kontext der natürlichen Störungsereignisse Lothar (2000), Kyrill (2007) und Sturm/Dürre/Borkenkäfer (2018 bis 2022)



Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis); eigene Berechnungen

3.3 Schritt 3: Nationale Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{nat}) und Bildung des Lagerbestandsmodells

Der gewichtete Mittelwert der mittleren Verweilzeit des Schadholzes im Lager (τ_{nat}) für die Baumartengruppen Fichte und Kiefer auf Basis der Einzelwerte TBN-Stichprobe (τ_{comp}) bestehend aus 111 Fällen beträgt 2,19 Jahre mit einer Standardabweichung von 0,99. Der gewichtete Mittelwert der Varianz der Verweilzeit des Schadholzes im Lager für die Baumartengruppen Fichte und Kiefer (σ^2_{nat}) auf Basis der Einzelwerte der TBN-Stichprobe (σ^2_{comp}) beträgt 1,27 Jahre mit einer Standardabweichung von 0,92 (vergleiche hierzu Tabelle 5).

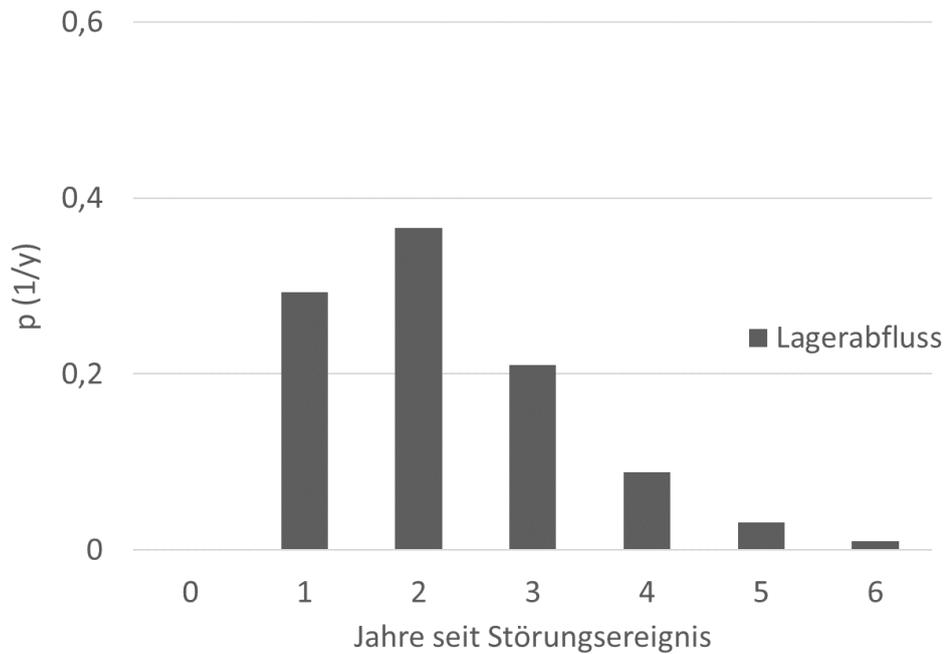
Tabelle 5: Deskriptive Statistik der Variablen τ_{nat} und σ^2_{nat} , die den zeitlichen Verlauf der nationalen Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{nat}) parametrisieren

Variable	Einheit	Mittelwert gewichtet	Standardabweichung	Min	Max	N
τ_{nat}	Jahre	2,19	0,99	0,64	4,59	111
σ^2_{nat}	Jahre	1,27	0,92	0,06	3,81	111

Quelle: Eigene Berechnungen

Aus den ermittelten Parametern τ_{nat} und σ^2_{nat} auf Basis der TBN-Stichprobe ergibt sich eine empirisch hergeleitete Wahrscheinlichkeitsverteilung für die nationalen Abflüsse aus dem Schadholzlager (vergleiche Abbildung 8).

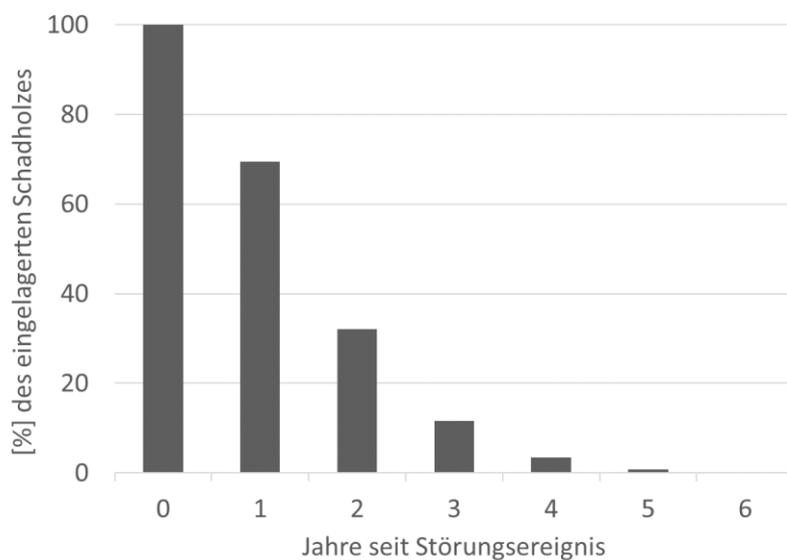
Abbildung 8: Wahrscheinlichkeitsverteilung für die nationalen Abflüsse aus dem Schadh Holzlager (TSO_{nat}) auf Grundlage der TBN-Stichprobe



Quelle: Eigene Berechnungen

Aufbauend auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die nationalen Abflüsse aus dem Schadh Holzlager (TSO_{nat}) auf Basis der TBN-Stichprobe kann das Lagerbestandsmodell in Form des eingelagerten Schadh Holzanteils in [%] generiert werden (vergleiche Abbildung 9).

Abbildung 9: Lagerbestandsmodell auf Grundlage der TBN-Stichprobe

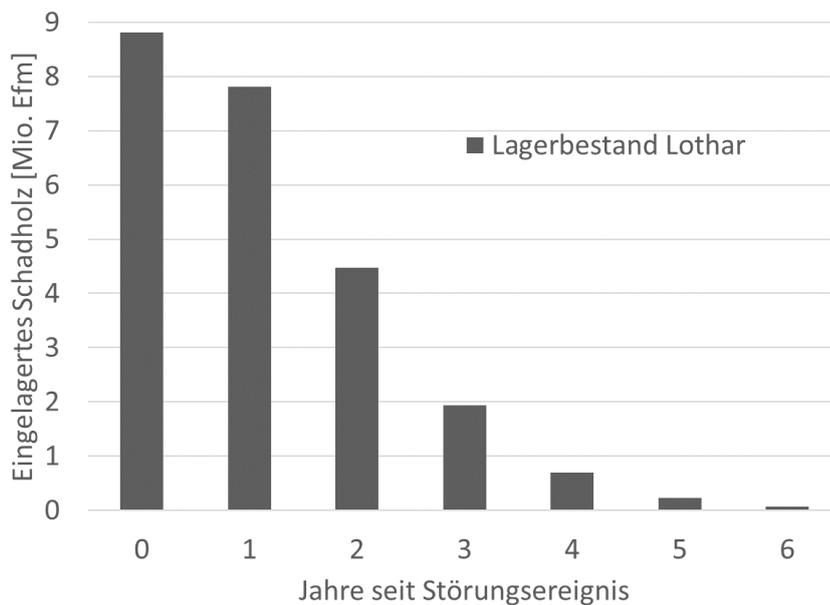


Quelle: Eigene Berechnungen

3.4 Schritt 4: Skalierung des Lagerbestandsmodells

Das empirisch parametrisierte Lagerbestandsmodell von Schritt 3 kann nun mit dem nationalen Zufluss ins Schadholzlager (TSA_{nat}) (Schritt 2), der auf Basis des störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{nat}) (Schritt 1) für Deutschland hergeleitet wird, skaliert werden. Wie beschrieben, beläuft sich für das Beispiel des natürlichen Störungsereignisses Lothar der Lagerbestand zum Zeitpunkt 0 auf 8,8 Mio. Efm Schadholz. Das entsprechende skalierte Lagerbestandsmodell für das Beispiel des natürlichen Störungsereignisses Lothar ist in Abbildung 10 dargestellt.

Abbildung 10: Skaliertes Lagerbestandsmodell für Deutschland für das Sturmereignis Lothar



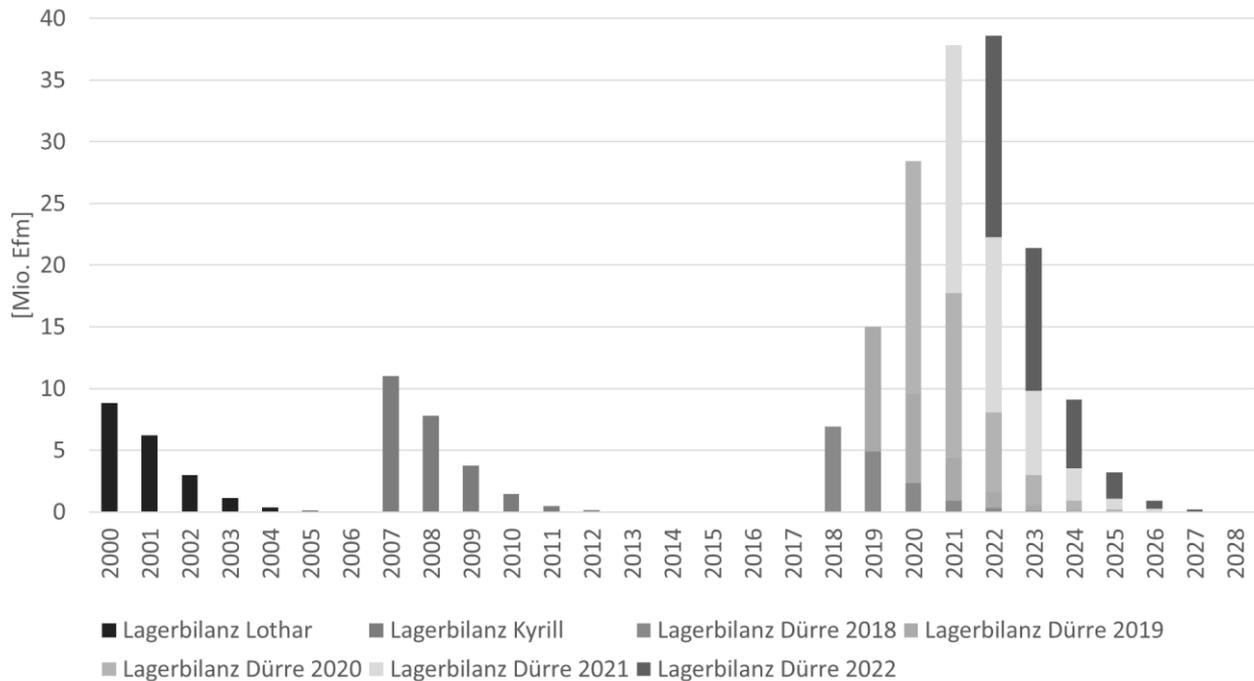
Quelle: Eigene Berechnungen

Anwendung des Verfahrens für die natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill sowie den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer

Bei Anwendung des Verfahrens (Schritte 1 bis 4) für die natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill sowie den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer unter Einbeziehung der Schadjahre 2018 bis 2022 ergeben sich für Deutschland jährliche Zuflüsse in das Schadholzlager (TSA_{nat}) zwischen 8,8 Mio. Efm durch Lothar und 20,1 Mio. Efm durch den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer im Schadensjahr 2021.

Auf Grundlage der mehrjährigen Modellierung kumulieren durch den jährlichen Anfall großer Schadholzmengen über einen mehrjährigen Zeitraum die eingelagerten Schadholzmengen während dem Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer bei 38,6 Mio. Efm im Jahr 2022. Die Jahre 2023 bis 2028 stellen eine Prognose der Lagerbestände auf Grundlage des vorgestellten Verfahrens (Schritte 3 und 4) dar.

Abbildung 11: Zeitreihe der Schadholzlagerbestände für die natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill und Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer für Deutschland



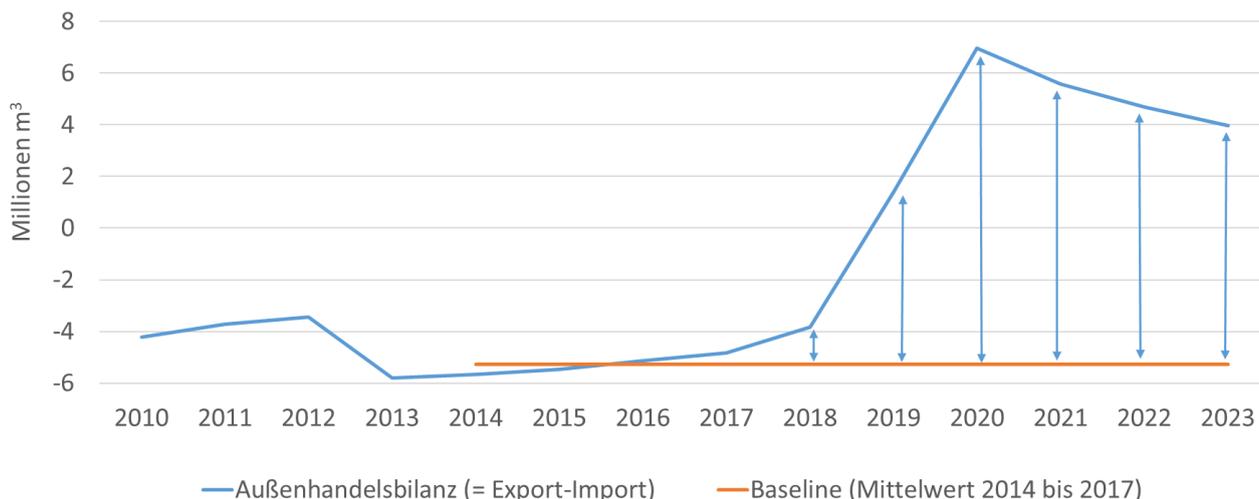
Quelle: Eigene Berechnungen

Die detaillierten Ergebnisse der zugehörigen störungsbedingten Mehreinschläge (DAM_{nat}) und der Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}) für die natürlichen Störungsereignisse Lothar, Kyrill und Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer für Deutschland können Tabelle 4 entnommen werden.

3.5 Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz für Rohholz zur Schätzung der nationalen Lagerbestände für das natürliche Störungsereignisse Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer

Da sich die Außenhandelsbilanz im Zuge des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer ungewöhnlich stark ändert, wird im Rahmen dieser Studie ein Verfahren vorgestellt, in welchem eine Korrektur des störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{nat}) im Zuge der Lagerbestandsberechnung vorgenommen wird. Im Rahmen einer Baselinekorrektur werden von einem Normalwert der Außenhandelsbilanz ausgehend (Baseline), beispielsweise hier in Form des Mittelwerts der drei Jahre vor Eintritt des Störungsereignisses, die Außenhandelsabweichungen der Kalamitätsjahre bestimmt (DAM_{exp}). Die Abweichungen zwischen Baselinewert (-5,27 Mio. Efm) und Realwert liegen zwischen 1,44 Mio. Efm (2018) und 12,24 Mio. Efm (2020) (vergleiche Abbildung 12).

Abbildung 12: Außenhandelsbilanz für Rohholz von 2010 bis 2023 mit Darstellung eines Baseline-Verfahrens zur Abschätzung der calamitätsinduzierten zusätzlichen Rohholzexporte von 2018 bis 2023



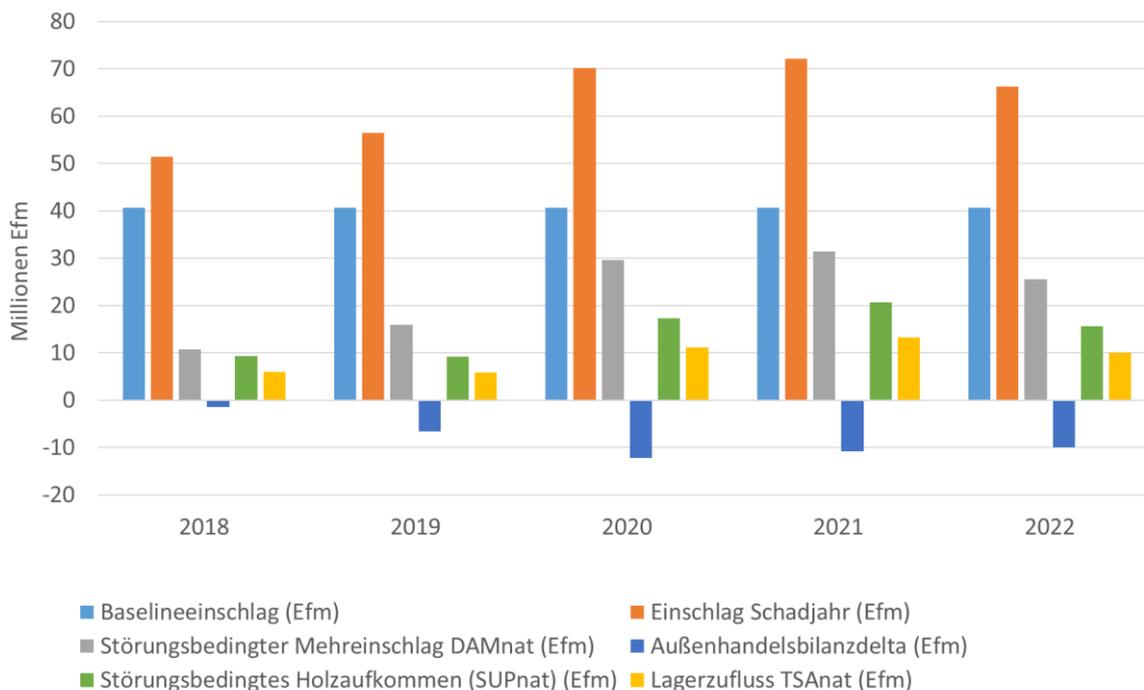
Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis); eigene Berechnungen

Im nächsten Schritt könnten die calamitätsinduzierten Rohholzexporte (DAM_{exp}) zur Verbesserung der Abschätzung der Lagerbestände im Kontext des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer verwendet werden. Hierzu könnte DAM_{exp} vom nationalen störungsbedingten Mehreinschlag (DAM_{nat}) abgezogen werden um das inländische Holzaufkommen zu korrigieren.

In Tabelle 6 werden die störungsbedingten Exporte (DAM_{exp}) von den störungsbedingten Mehreinschlägen (DAM_{nat}) abgezogen, um ein korrigiertes inländisches Holzaufkommen (SUP_{nat}) zu erzeugen. Die Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}) werden durch Anwendung des Einlagerungsquotienten (vergleiche Ergebnisse Schritt 2: Nationale Zuflüsse in das Schadholzlager (TSA_{nat})) auf das nationale störungsbedingte Holzaufkommen (SUP_{nat}) hergeleitet.

Die korrigierten Holzaufkommenswerte (SUP_{nat}) und folglich die Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}) durch den Kalamitätskomplex fallen unter dieser Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz wesentlich geringer aus. Bei Anwendung des Verfahrens (Schritte 1 bis 4) für den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer unter Einbeziehung des erhöhten Außenhandels ergeben sich für Deutschland Lagerzugänge von maximal 13,2 Mio. Efm im Schadensjahr 2021 was einer Minderung von 6,9 Mio. Efm im Vergleich zur ursprünglichen Methode entspricht (vergleiche Abbildung 13).

Abbildung 13: Baselineeinschläge, Einschläge der Schadjahre, störungsbedingte Mehreinschläge (DAM_{nat}) Außenhandelsbilanzdeltas, störungsbedingtes Holzaufkommen und Zuflüsse ins Schadh Holzlager (TSA_{nat}) im Kontext des natürlichen Störungsereignisses Sturm/Dürre/Borkenkäfer (2018 bis 2022)



Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis); eigene Berechnungen

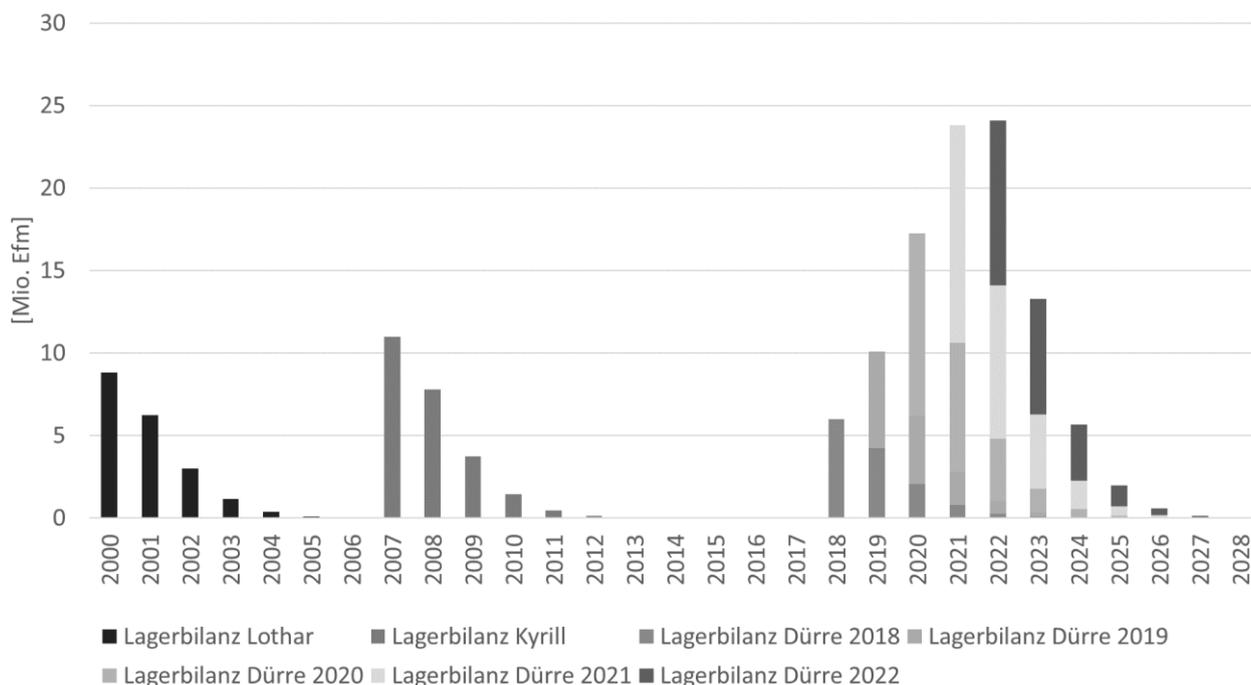
Auf Grundlage der angepassten Simulation kumulieren durch den jährlichen Anfall großer Rohholzexportdeltas über einen mehrjährigen Zeitraum die eingelagerten Rundholzmengen während des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer bei 24,1 Mio. Efm im Jahr 2022 was einer Minderung von 14,5 Mio. Efm im Vergleich zur ursprünglichen Methode entspricht.

Tabelle 6: Zuflüsse ins Schadh Holzlager des Störungsereignisses Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer unter Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz für Rohholz

Bezugs-jahr	Störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) (Efm)	Delta der Außenhandelsbilanz (DAM_{exp})	Störungsbedingtes Holzaufkommen (SUP_{nat}) (Efm)	Zufluss ins Schadh Holzlager (TSA_{nat}) (Efm)
2018	10.783.315	-1.437.281	9.346.034	5.981.462
2019	15.823.515	-6.673.262	9.150.253	5.856.162
2020	29.545.615	-12.243.133	17.302.482	11.073.588
2021	31.464.715	-10.853.460	20.611.255	13.191.203
2022	25.521.615	-9.958.033	15.563.582	9.960.692

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis); eigene Berechnungen

Abbildung 14: Modellierte Zeitreihe der nationalen Lagerbestände für die natürliche Störungsereignisse Lothar, Kyrill und Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer unter Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz



Quelle: Eigene Berechnungen

3.6 Herleitung des skalierten Schadholzlagerbestandsmodells für Deutschland

An dieser Stelle wird das Vorgehen zur Erzeugung des Schadholzlagerbestandsmodells für Deutschland vorgestellt. Zur Anpassung der Gamma-Verteilung aus T_{nat} (mittlere Verweilzeit) und σ^2_{nat} (Varianz) (vergleiche Ergebnisse Schritt 3: Nationale Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{nat}) und Bildung des Lagerbestandsmodells) werden zunächst mit Hilfe der Formeln 7 und 8 die Gleichungsparameter α und β hergeleitet. Die mittlere Gammaverteilung wird durch die Nutzung der Gleichungen skaliert auf das mittlere Lagerabflussverhalten.

$$\alpha = \frac{T_{nat}^2}{\sigma^2_{nat}} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\sigma^2_{nat}}{T_{nat}} \quad (8)$$

Variante 1: Skalierte nationale Lagerbestände TS_{nat} ohne Einbeziehung des störungsbedingten Rohholzexports

Um die skalierten nationalen Lagerbestände TS_{nat} ohne Einbeziehung des störungsbedingten Rohholzexports zu erzeugen, werden in Formel 9 vom Schadjahr ($t=0$) ausgehend die jährlichen kumulierten Eintrittswahrscheinlichkeiten gebildet und der Annahme folgend, dass TSA_{nat} der Summe von TSO_{nat} entspricht, jeweils von 1 abgezogen, um das Lagerbestandsmodell zu erzeugen. Der nationale Lagerzufluss TSA_{nat} wird gebildet, indem der störungsbezogene Mehreinschlag DAM_{nat} mit dem Einlagerungsfaktor EF_{nat} multipliziert wird. Die jährlichen kumulierten Eintrittswahrscheinlichkeiten werden mit TSA_{nat} skaliert.

$$TS_{nat}(t) = DAM_{nat} * EF_{nat} * (1 - \int_{t=0}^t RT_{nat}(t) * dt) \quad (9)$$

Variante 2: Skalierte nationale Lagerbestände TS_{nat} mit Einbeziehung des störungsbedingten Rohholzexports

Um die skalierten nationalen Lagerbestände TS_{nat} mit Einbeziehung des störungsbedingten Rohholzexports zu erzeugen, werden in Formel 10 vom Schadjahr ($t=0$) ausgehend die jährlichen kumulierten

Eintrittswahrscheinlichkeiten gebildet und der Annahme folgend, dass TSA_{nat} der Summe von TSO_{nat} entspricht, jeweils von 1 abgezogen, um das Lagerbestandsmodell zu erzeugen. Der nationale Lagerzufluss TSA_{nat} wird gebildet, indem der störungsbezogene Mehreinschlag DAM_{nat} abzüglich des störungsbedingten Exports DAM_{exp} mit dem Einlagerungsfaktor EF_{nat} multipliziert wird. Die jährlichen kumulierten Eintrittswahrscheinlichkeiten werden mit TSA_{nat} skaliert.

$$TS_{nat}(t) = (DAM_{nat} - DAM_{exp}) * EF_{nat} * (1 - \int_{t=0}^t RT_{nat}(t) * dt) \quad (10)$$

4 Diskussion

4.1 Datengrundlage und Methode

Zentrale Datengrundlage der vorliegenden Arbeit bildet das forstliche Testbetriebsnetz des Bundes (TBN-Forst). Die in der Stichprobe repräsentierten und somit dem Verfahren zur Schätzung von Schadholzlagerbeständen zugrundeliegenden natürlichen Störungsereignisse sind die beiden schweren Sturmereignisse Lothar (1999) und Kyrill (2007). Deren primäre Schadensursache liegt in Sturmwürfen. Somit ist die Datengrundlage aufgrund der geringen Anzahl der repräsentierten natürlichen Störungsereignisse kritisch zu betrachten. Darüber hinaus ist die Datenbasis auch hinsichtlich der Vielfalt von Schadensursachen wie Trockenheit oder Insekten und sonstiger Einflussfaktoren eingeschränkt.

Die betriebliche Schadensmenge wird im TBN-Forst nicht baumartengruppenspezifisch erhoben. Zimmermann et al. (2018) leiteten jedoch einen baumartengruppenspezifischen störungsbedingten Mehreinschlag (DAM_{comp}) auf Grundlage der baumartengruppenspezifischen Einschlagszeitreihen rechnerisch her. Auch betriebliche Zuflüsse ins Schadholzlager und Abflüsse aus dem Schadholzlager werden im TBN-Forst nicht direkt erhoben. Als Annäherung nutzten Zimmermann et al. (2018) die unverkauften Holzmengen der Berichtsjahre als Berechnungsgrundlage für die Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}). Zimmermann et al. (2021) nutzten die verkauften Holzmengen der Vorjahre als Berechnungsgrundlage für die Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{comp}). Die betrieblichen Variablen DAM_{comp} , TSA_{comp} und TSO_{comp} wurden von Zimmermann et al. (2018, 2021) mittels eines Baselinekorrekturverfahren rechnerisch hergeleitet.

Diese rechnerisch hergeleiteten betrieblichen störungsbedingten Mehreinschläge (DAM_{comp}), die rechnerisch hergeleiteten betrieblichen Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{comp}) und die rechnerisch hergeleiteten betrieblichen Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{comp}) tragen, wie im Methodenteil unter Schritt 2 und Schritt 3 beschrieben, zur Herleitung der nationalen Zuflüsse ins Schadholzlager (TSA_{nat}), zur Parametrisierung der nationalen Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{nat}) und somit schließlich zum nationalen Lagerbestandsmodell bei. Entsprechende rechnerische Herleitungen bergen oft Unsicherheiten hinsichtlich der unterstellten Kausalität. Die ermittelten Variablenwerte könnten von weiteren Faktoren abhängen und somit muss kein direktes Verhältnis zwischen den Variablenwerten und den natürlichen Schadereignissen bestehen. In der Arbeit von Zimmermann et al. (2018) konnte aber ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen den betrieblichen Variablen DAM_{comp} und TSA_{comp} gezeigt werden. Wie im Methodenteil beschrieben, ist hierbei die Klarstellung wichtig, dass die störungsbedingten Mehreinschlagsvariablen (DAM_{comp} bzw. DAM_{nat}) nicht das Ziel verfolgen, die gesamten betrieblichen oder nationalen baumartengruppenspezifischen Schadholzmengen zu repräsentieren. Sie sind eine Einschlagsabweichung die kausal dem Störungsereignis zugeordnet wird und dem Ziel der Erklärung der Zuflüsse ins Schadholzlager (DAM_{comp} bzw. DAM_{nat}) dienen.

Bezüglich des nationalen störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{nat}) ergibt sich für die Baumartengruppen Fichte und Kiefer nach dem natürlichen Störungsereignis Lothar auf Grundlage der hochgerechneten TBN-Stichprobe summarisch ein Wert in Höhe von 14,1 Mio. Efm. Auf Grundlage der Holzeinschlagsstatistik des Statistischen Bundesamts ergibt sich analog dazu ein störungsbedingter Mehreinschlag in Höhe von 13,8 Mio. Efm. Die Abweichung der störungsbedingten Mehreinschlagswerte zwischen TBN- und Statistisches Bundesamt-Daten von unter 5 % für das gewählte Beispiel wird unter den komplexen Berechnungsbedingungen als positiv eingestuft und spricht für die gewählte Methodik sowie die Repräsentativität der Stichprobe.

Bezüglich des rechnerischen Zuflusses ins Schadholzlager (TSA_{nat}) liegt der hochgerechnete Wert für die Baumartengruppen Fichte und Kiefer nach dem natürlichen Störungsereignis Lothar auf Basis der TBN-Stichprobe summarisch bei 8,8 Mio. Efm. Auf Grundlage der TBN-Stichprobe ergibt sich so der im Rahmen dieser Studie verwendete Einlagerungsfaktor von 0,64 des störungsbedingten Mehreinschlags (13,8 Mio. Efm.). Zum Vergleich konnte als Literaturquelle die Sturmschadensdokumentation von Odenthal (2004) herangezogen werden. Demnach wurden nach Lothar in Baden-Württemberg lediglich 4,6 Mio. Efm. Schadholz eingelagert. Hierfür

könnte zum einen der räumliche Faktor eine Rolle spielen, da die verwendete TBN-Stichprobe sich grundsätzlich nicht auf Baden-Württemberg beschränkt. Darüber hinaus ist wie oben erläutert die rechnerische Herleitung der Einlagerungsvariable nur eine Annäherung an die Realität. Die zur Berechnung der Variable TSA_{comp} herangezogenen „unverkauften Holz mengen des Berichtsjahrs“ können durch die höheren Aufarbeitungsmengen höhere Werte ergeben, auch wenn keine längerfristige Einlagerung erfolgt. Insofern ist auch in der Dokumentation von Odenthal (2004) nicht beschrieben, ob auch kurzfristige Lagerhaltung erfasst wurde – so nimmt die Lagerungsmenge in unserem Modell innerhalb des ersten Jahres nach Störungsereignis bereits deutlich ab. Bezüglich weiterer Vergleichsmöglichkeiten ist die Einlagerung nach natürlichen Störungsereignissen in Deutschland leider nur lückenhaft dokumentiert.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird, basierend auf der gesamten TBN-Stichprobe der Studien von Zimmermann et al. (2018, 2021), aus den einzelbetrieblichen störungsbedingten Mehreinschlägen (DAM_{comp}) und den einzelbetrieblichen Zuflüssen in das Schadholzlager (TSA_{comp}) das durchschnittliche Verhältnis übergreifend für die repräsentierten Eigentumsarten, Baumartengruppen, Betriebsgrößenklassen und Schadereignisse (Lothar und Kyrill) hergeleitet. Im Rahmen der explorativ ausgerichteten Studien von Zimmermann et al. (2018, 2021) konnte neben der Variable DAM_{comp} ein signifikanter Einfluss weiterer Variablen auf die Lagerhaltung festgestellt werden. Insbesondere aufgrund der geringen Anzahl repräsentierter Störungsereignisse, der unzureichenden Parametrisierung für Variablen wie der Schadensursache und somit einer hohen Vulnerabilität hinsichtlich der Verwendung für Vorhersagen, wird im Rahmen der vorliegenden Studie auf die Einbeziehung weiterer Variablen zur Modellierung der Lagerhaltung verzichtet. Es wird empfohlen, die Datengrundlage zu erweitern und gegebenenfalls das Modell im Rahmen weiterer Forschung durch Einbeziehung weiterer Variablen zu verbessern.

Für die Berechnung des nationalen störungsbedingten Mehreinschlags (DAM_{nat}) werden in der vorliegenden Studie als Grundlage die Daten der amtlichen Holzeinschlagsstatistik des Statistischen Bundesamts verwendet. Eine Begründung liegt in dem Bedarf einer langen nationalen Einschlagszeitreihe in Analogie zu den betrieblichen Einschlagszeitreihen des TBN-Forst (vergleiche Schritt 1: Nationaler störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) im Methodenteil). Diese musste aufgrund der Notwendigkeit der Ermittlung einer Baseline für Lothar bis zum Jahr 1997 zurückreichen. Demnach könnte sowohl die Thünen-Einschlagsrückrechnung nach Jochem et al (2015) als auch die amtliche Holzeinschlagsstatistik verwendet werden. Die amtliche Holzeinschlagsstatistik wird aufgrund der Datenqualität und zuletzt insbesondere aufgrund der Unterschätzung des tatsächlichen Holzeinschlags kritisiert (z. B. Jochem et al. 2015). Da der Waldlagerbestand seit 2018 im Testbetriebsnetz Forst nicht mehr erhoben wird, benennen Jochem et al. (2023) allerdings Unsicherheiten im Rahmen der Thünen-Einschlagsrückrechnung bezüglich der Schätzung des Waldlagerspekts ab 2018, die sich in Folge auch auf die Gesamtschätzung des nationalen Holzeinschlags auswirken. Zudem repräsentiert die Variable DAM_{nat} die Einschlagsabweichung zwischen Zeiträumen ohne und mit Störungsereignis. Die kritisierte absolute Einschlagshöhe spielt somit eine untergeordnete Rolle. Da im Rahmen der vorliegenden Untersuchung auch die Lagerhaltung ab 2018 abgeschätzt wird, war diese Faktorenkombination ausschlaggebend für die Verwendung der amtlichen Einschlagsstatistik. Die amtliche Einschlagsstatistik ist darüber hinaus die einzige verfügbare nationale Datenquelle zum Aufkommen von Schadholz.

4.2 Anwendung des Verfahrens für den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer (seit 2018)

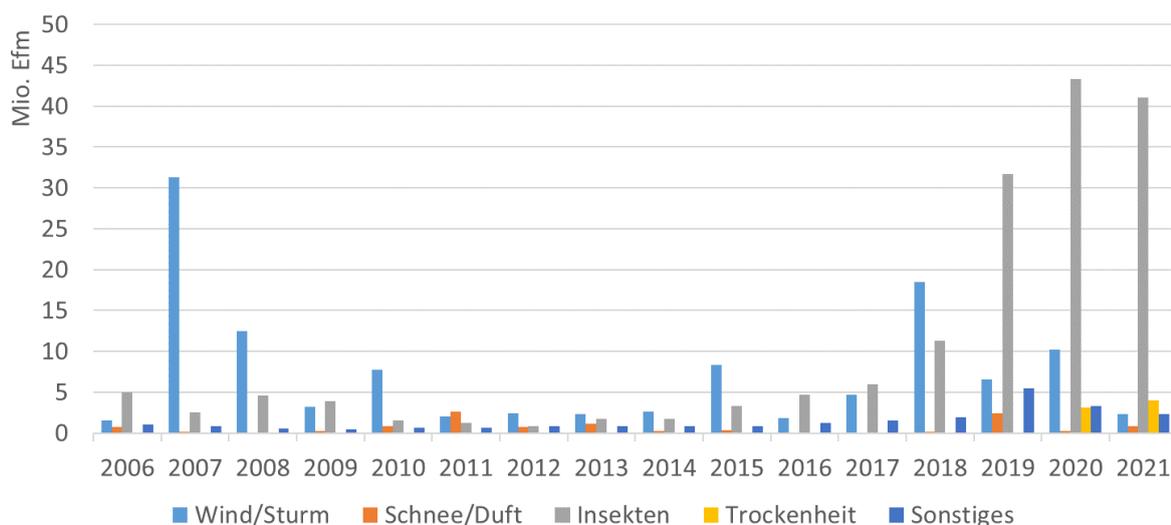
Der Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer nimmt seit dem Jahr 2018 eine enorme Rolle im forstlichen Schadgeschehen ein. Der Schadkomplex verursacht enorme naturale und ökonomische Schäden. Diese ergeben sich aus verschiedenen Sturmereignissen, Dürre und Borkenkäferkalamitäten und betragen summarisch 233 Mio.

Efm aufgearbeitetes Schadholz im Zeitraum der Jahre 2018 bis 2022 (Schadholzmengen des Statistischen Bundesamts) (vergleiche Kapitel 1.1).

Insektenschäden als primäre Schadursache

Beim Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer (seit 2018) ist die Schadensursache vielschichtig. Während wiederholt Sturmwürfe auftraten, so lag die dominierende Schadensursache in Insektenschäden (vergleiche Abbildung 15). Durch die in der verwendeten Stichprobe auf Grundlage des TBN-Forst enthaltenen Informationen zum forstbetrieblichen Lagerungsverhalten werden die im Zusammenhang mit den beiden Sturmereignissen Lothar und Kyrill stehenden störungsbedingten Mehreinschläge (DAM_{comp} bzw. DAM_{nat}) und Lagerzuflüsse (TSA_{comp} bzw. TSA_{nat}) sowie deren Verhältnisse zueinander als Grundlage verwendet. Die primäre Schadensursache liegt entsprechend ihrer Bezeichnung in Sturmwürfen.

Abbildung 15: Forstliche Schadensursachen in Deutschland von 2006 bis 2021



Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis)

In Frage steht hierbei, ob die Zuflüsse in das Schadholzlager (TSA_{comp} bzw. TSA_{nat}) durch Insektenkalamitätsholz denen von Sturmholz entsprechen und ob daher der empirische Einlagerungsfaktor entsprechend angewendet werden kann. Dies betrifft zunächst die technische Einlagerungsfähigkeit. Durch die Perforation der Rinde und damit verbunden eine höhere Anfälligkeit für Pilzbefall besteht vermutlich eine schlechtere technische Einlagerungseignung (Wauer 2007; Odenthal 2004). Zum anderen stellt sich die Frage nach dem ökonomischen Ausgangswert von durch Käfer geschädigtem Holz sowie damit verbunden die Frage der Wirtschaftlichkeit der Einlagerung. Durch die Minderung des Eingangswerts und den sich ergebenden geringeren wirtschaftlichen Nutzen der längerfristigen Einlagerung von Käferholz kann vermutlich von einer geringeren Einlagerungsquote von Käferholz ausgegangen werden.

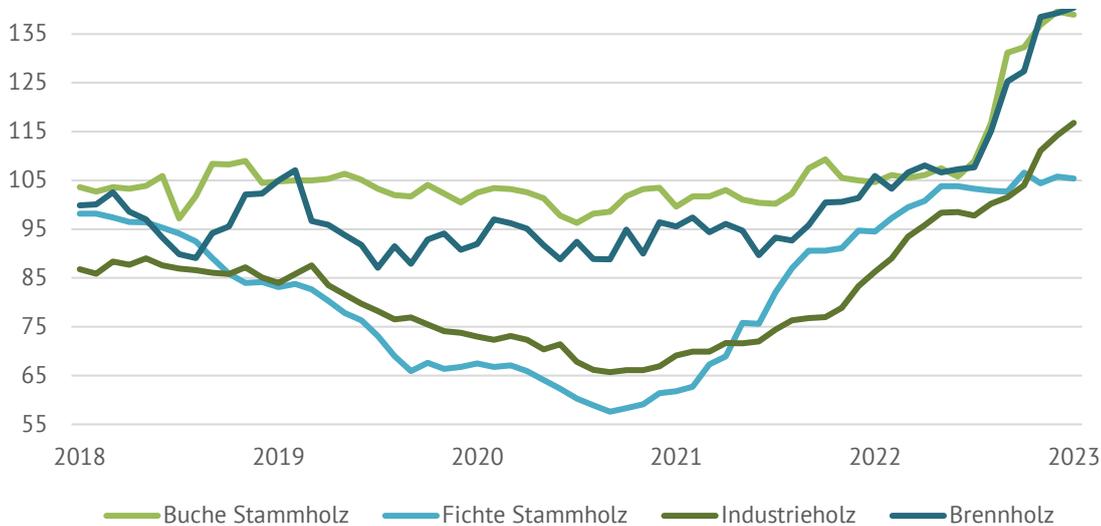
Es bestehen darüber hinaus Unsicherheiten, ob der zeitliche Verlauf des Abbaus der Schadholzlager über einen mehrjährigen Zeitraum für den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer mit den Sturmereignissen der Stichprobe korreliert. Daraus resultierend stellt sich die Eignung des aktuellen Lagerbestandsmodells für Störungsereignisse mit anderen Schadholzkonfigurationen als unsicher dar.

Holzpreise und Einbeziehung der Außenhandelsbilanz für Rohholz in die Schätzung der Lagerhaltung

Nach einer stabilen Holzpreisphase von 2011 bis 2017 konnten bereits 2018 und 2019 sortimentsübergreifend deutliche Preisrückgänge insbesondere bei Fichtenstammholz festgestellt werden (ForstBW 2022). Aufgrund

verschiedener Faktoren erholten sich die Preise für Nadelrundholz seit September 2020 (vergleiche Abbildung 16). In der Literatur werden hierfür insbesondere coronabedingte Nachholeffekte der Baubranche, große Exportmengen ins Ausland und die Reduktion des Fichteneinschlags durch das Forstschäden-Ausgleichsgesetz auf Bundesebene genannt (Jochem et al. 2023; ForstBW 2022). Die rasche Erholung der Rundholzpreise trotz der weiterhin enormen Schadh Holz mengen spricht deutlich für verminderte Einlagerungsquoten insbesondere ab dem Jahr 2021.

Abbildung 16: Preisindizes der Staatsforstbetriebe in Prozent (2015 = 100 %)



Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis)

Da die Außenhandelsbilanz sich im Zuge des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer ungewöhnlich stark ändert, wird im Rahmen dieser Studie ein Verfahren zur Einbeziehung der störungsbedingten Abweichungen der Außenhandelsbilanz vorgestellt. Auch wenn das Verfahren Unsicherheiten hinsichtlich des kausalen Zusammenhangs zwischen Störungsereignis und Störungspuls der Außenhandelsbilanz-Zeitreihe in Form der baselinekorrigierten Abweichungen der Außenhandelsbilanz unterliegt, ist es eine wichtige konzeptionelle Erweiterung zu einer umfassenderen Abschätzung zukünftiger Lagerzugänge.

Begrenzte Lagerkapazitäten für Nadelrohholz

Eine weitere Komplikation für die Schätzung der Lagerbestände der hohen Nadelroh Holz mengen im Rahmen des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer liegt in einem exponentiell zunehmenden Aufwand zur Bereitstellung von zusätzlichen Lagerkapazitäten. Dies betrifft zum einen die technische Verfügbarkeit von geeigneten Nasslagerplätzen insbesondere aufgrund der Faktoren Flächenverfügbarkeit, Wasserverfügbarkeit und Zufahrt. Zum anderen müssen technisch geeignete Flächen im Rahmen wasserrechtlicher Genehmigungsverfahren unter Beteiligung von Naturschutzbehörden, Baurechtsbehörden, Fischereirechtsbehörden sowie evtl. Verkehrs- und Straßenbaubehörden geprüft und genehmigt werden. Schon nach Lothar (1999) führte dies bei deutlich geringeren Schadh Holz mengen zu enormen Problemen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Lagerkapazitäten (Odenthal 2004).

5 Schlussfolgerungen

Im Zuge des sich vollziehenden Klimawandels ist bereits eine Zunahme extremer Wetter- und Witterungsereignisse zu verzeichnen und auch in Zukunft weiter zu erwarten. Natürliche Störungsereignisse gewinnen daher auch in Wäldern immer mehr an Bedeutung. Neben den waldbaulichen Fragestellungen hinsichtlich zukünftiger standörtlicher Bedingungen und notwendigen Maßnahmen in Form von Bestandesstabilisierung und Waldumbau mit zukunftsorientierten Baumarten stehen Betriebe vor enormen ökonomischen Herausforderungen.

Der Holzverkauf stellt nach wie vor die Haupteinnahmequelle von Forstbetrieben dar. Monetäre Entschädigungen für Ökosystemleistungen der Wälder oder Angebote durch Diversifizierung spielen bislang eine untergeordnete Rolle. Durch die Notwendigkeit, kurzfristig große Schadholzmengen zu ernten und die Wiederaufforstung der entstehenden Kahlfelder entstehen für Forstbetriebe enorme Mehrkosten, Mindererlöse sowie Abschreibungen. Staatliche Soforthilfeprogramme nach natürlichen Störungsereignissen decken in der Regel nur Bruchteile der entstandenen Schäden (Möhring et al. 2021).

Eine Maßnahme von Forstbetrieben ist die Lagerung von Schadholz teils über mehrjährige Zeiträume. Aus den oben genannten Gründen ist es wahrscheinlich, dass auch die Erfassung der Anteile der Lagerung von Schadholz in Wäldern in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. Unter Berücksichtigung der benannten Limitationen stellt das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Verfahren eine Möglichkeit dar, die Lagerung von Schadholz im Forstsektor auf nationaler Ebene abzuschätzen. Lagerbestände sollten hierbei über einen mehrjährigen Zeitraum abgeschätzt werden, um die damit verbundenen nationalen und internationalen Berichtssysteme zu verbessern.

Die zugrundeliegenden empirischen Daten führen dazu, dass das entwickelte Modell durch einmalige Sturmereignissen parametrisiert ist. Aus den in der Diskussion benannten Gründen ist das Verfahren beispielsweise nicht für den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer parametrisiert. Entsprechende Ergebnisse sind daher aktuell unsicher. Die gezeigte Berücksichtigung der Außenhandelsbilanz für Rohholz könnte dabei helfen, die Schätzungen der Lagerbestände weiter zu verbessern. Wir erachten die Erweiterung der empirischen Daten um alternative Schadursachen als essentiell, um die Genauigkeit der Schätzungen der Lagerbestände für die forstliche Berichterstattung zu verbessern und um eine geeignete Grundlage zur Untersuchung der wirtschaftlichen Schäden durch natürliche Störungsereignisse im Forstsektor zu erzeugen.

Literaturverzeichnis

- Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (2016) *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. Lehrbuch, 14. überarbeitete und aktualisierte Auflage edn. Springer Gabler, Berlin
- Berlemann M (2016) Does hurricane risk affect individual well-being?. Empirical evidence on the indirect effects of natural disasters. *Ecol Econ* 124:99–113
- BMEL (2024) *Die wirtschaftliche Lage der forstwirtschaftlichen Betriebe – Buchführungsergebnisse 2022*. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bonn
- Bolte A, Ammer C, Löf M, Madsen P, Nabuurs GJ, Schall P, Spathelf P, Rock J (2009) Adaptive forest management in central Europe: climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand J For Res* 24:473–482. <https://doi.org/10.1080/02827580903418224>
- BWI3 (2014) *Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur*. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin
- Dieter M, Rosin A, Thoroe C (2004) *Die forstwirtschaftliche Gesamtrechnung der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des ESVG 1995 für die Jahre 1991 bis 2002*. Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie; 2004/15. Institut für Ökonomie, Hamburg
- ForstBW (2022) *Nachhaltigkeitsbericht 2021* https://www.forstbw.de/fileadmin/user_upload/Bilder_ForstBW/UEber_uns/Zahlen_und_Fakten/Jahresabschluss_2021/Nachhaltigkeitsbericht_2021.pdf
- Gujarati DN (2003) *Basic econometrics*, 4th edn. McGraw-Hill, Boston
- Hillmann M (2007) Kyrill—das Ende der Solidarität. *AFZ Wald* 62(22):1190–1191
- Institute SAS (2016) *JMP 13 multivariate methods*. SAS Institute, Cary
- Jawitz JW (2004) Moments of truncated continuous univariate distributions. *Adv Water Resour* 27(3):269–281
- JMP (2017). http://www.jmp.com/supporthelp/Launch_the_Fit_Model_Platform.shtml#213135. Accessed 22 May 2017
- Jochem D, Weimar H, Dieter M (2023) Holzeinschlag im Jahr 2022 erreicht 80,7 Mio. m³ : Die energetische Verwendung von Rohholz ist annähernd konstant, während die stoffliche Nutzung etwas abnimmt. *Holz Zentralbl* 149(40):675-676
- Jochem D, Weimar H, Bösch M, Mantau U, Dieter M (2015) Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. *Eur J Forest Res* 134:869–888. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0896-9>
- Kinnucan HW (2016) Timber price dynamics after a natural disaster: Hurricane Hugo revisited. *J For Econ* 25:115–129. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2016.09.002>
- Lindroth A, Lagergren F, Grelle A, Klemedtsson L, Langvall O, Weslien P, Tuulik J (2009) Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. *Glob Change Biol* 15:346–355. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01719.x>
- Lohner P, Appel V, Dieter M, Seintsch B (2016) *Das TBN-Forst: Ein Datenschatz für die deutsche Forstwirtschaft*, vol 17/2016
- Mantau U, Döring P, Weimar H, Glasenapp S, Jochem DI, Zimmermann K (2018a): *Rohstoffmonitoring Holz: Erwartungen und Möglichkeiten*. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 32 S.
- Mantau U, Döring P, Weimar H, Glasenapp S (2018b): *Rohstoffmonitoring Holz: mengenmäßige Erfassung und Bilanzierung der Holzverwendung in Deutschland*. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 161 S., SchrR Nachwachs Rohstoffe 38.
- McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds) (2001) *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, p 1008
- Möhring B, Bitter A, Bub G, Dieter M, Dög M, Hanewinkel M, Hatzfeldt N Graf von, Köhler J, Ontrup G, Rosenberger R, Seintsch B, Thoma F (2021) Schadenssumme insgesamt 12,7 Mrd. Euro: Abschätzung der ökonomischen Schäden der Extremwetterereignisse der Jahre 2018 bis 2020 in der Forstwirtschaft. *Holz Zentralbl* 147(9):155-158
- Neter J, Wasserman W, Kutner MH (1985) *Applied linear statistical models. Regression, analysis of variance, and experimental designs*, 2nd edn. Irwin, Homewood

- Odenthal-Kahabka J (2004) Orkan "Lothar" - Bewältigung der Sturmschäden in den Wäldern Baden-Württembergs: Dokumentation, Analyse, Konsequenzen. Landesforstverwaltung, Stuttgart
- Polley H (2006) The Second National Forest Inventory—NFI 2. Results; Covering the National Forest Inventory Surveys of 2001–2002 and 1986–1988. Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection, Berlin
- Rosenkranz L, Peters MJ, Franz K, Seintsch B (2023) Ergebnisse der forstwirtschaftlichen Gesamtrechnung 2021. Forst Holz Jagd Taschenb 2024:165-170
- Statistisches Bundesamt (Destatis), Genesis-Online. Datenlizenz by-2-0. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> (letzter Zugriff am 01.08.2024)
- Thorn S, Bässler C, Svoboda M, Müller J (2017) Effects of natural disturbances and salvage logging on biodiversity—Lessons from the Bohemian Forest. For Ecol Manag 388:113–119. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.006>
- Thünen-Institut für Waldwirtschaft (2024): Holzeinschlag und Rohholzverwendung [online]. Hamburg: Thünen-Institut für Waldwirtschaft. Zu finden unter: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/holzeinschlag-und-rohholzverwendung> (Zugriff am 12.07.2024)
- van Lierop P, Lindquist E, Sathyapala S, Franceschini G (2015) Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. For Ecol Manag 352:78–88. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.010>
- Wauer A (2007) So lagern Sie Rundholz richtig! LWF aktuell 56, S. 43-45.
- Weimar H (2020) Holzbilanzen 2017 bis 2019 für die Bundesrepublik Deutschland. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 37 p, Thünen Working Paper 153, DOI:10.3220/WP1598873344000
- Zimmermann K, Schuetz T, Weimar H (2018) Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany. Eur J For Res 137:463–475
- Zimmermann, K., Schuetz, T., Weimar, H. Dieter M (2021) Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events. Eur J For Res 140:37–50

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek
verzeichnet diese Publikationen in
der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet unter
www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek
(German National Library) lists this
publication in the German National
Bibliographie; detailed bibliographic
data is available on the Internet at
www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene
Bände finden Sie im Internet unter
www.thuenen.de

Volumes already published in this
series are available on the Internet at
www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:
Zimmermann K, Jochem D (2024) Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände
nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung.
Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 37 p, Thünen Working
Paper 244, DOI:10.3220/WP1722506779000

Die Verantwortung für die Inhalte
liegt bei den jeweiligen Verfassern
bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are
responsible for the content of
their publications.



Thünen Working Paper 244

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut

Bundesallee 50

38116 Braunschweig

Germany

thuenen-working-paper@thuenen.de

www.thuenen.de

DOI:10.3220/WP1722506779000

urn:nbn:de:gbv:253-202408-dn068516-1

Anhang II: Summary

Natural disturbance events in various forms, frequencies and intensities have been occurring worldwide for many millennia. However, anthropogenically induced climate change is leading to increasing numbers and intensity (McCarthy et al. 2001). Natural disturbance events have therefore become an issue with high economic relevance (Berlemann 2016).

Forests and forest companies in Germany are also affected by the effects of natural disturbance events such as storms, insect calamities, fire and drought. Forestry companies are directly burdened in particular by additional costs and reduced revenues from the damaged wood that needs to be processed, depreciation of the processed damaged wood, the unripeness of the damaged wood stocks for felling and reforestation. However, forest companies can also be indirectly economically burdened by natural disturbance events through loss of growth and destabilization of the remaining stocks, a fall in market prices for roundwood from normal felling or refraining from felling, postponement of regular measures and reduction of the sustainable felling rate (Möhring et al. 2021).

Reduced revenues for the resulting damaged wood due to reactions of the timber markets after severe natural disturbance events cause high economic damage for affected forest companies (Möhring et al. 2021). In order to keep the economic damage associated with these reduced revenues as low as possible, forest companies sometimes decouple the sales of damaged wood from natural disturbance events. They store damaged wood, sometimes for periods of several years.

The need for knowledge about stored damaged wood quantities after natural disturbances arises not only from the knowledge gain itself but also from the aim of making a contribution to determining the actual level of wood use in Germany. Since official statistics show considerable deficits with regard to the actual level of wood felling (cf. Mantau et al. 2007 and Weimar 2011), the Thünen felling calculation according to Jochem et al. (2015) makes a significant contribution to the quality of the determination of wood use. A central problem of the Thünen felling calculation, however, is that the method has not yet been able to directly take into account forestry stockpiles of damaged wood after natural disturbances.

The particular importance of determining the level of wood use arises from the carbon storage and carbon substitution effects in terms of the positive environmental impacts associated with the raw material wood (Sathre and O'Connor 2010). The level of wood use at the national level is an important monitoring and control variable with regard to key criteria such as the sustainability of wood use (Dieter and Englert 2005) or unused raw wood potential. For political decision-makers, associations, non-governmental

organizations and companies, knowledge of the level of wood use is therefore essential with regard to their operational and strategic actions.

Although research about the economic impacts of natural disasters has increased considerably in the recent past (Berlemann 2016), there is a lack of scientific knowledge in the research field of forest economic impacts and especially in the area of forestry storage of damaged wood after natural disturbance events (Zimmermann et al. 2018). Possible factors influencing the storage of damaged wood in forestry operations have already been published sporadically (e.g. Odenthal 2004). However, empirical studies on the determining parameters for the storage of damaged wood of forest companies do not yet exist. The need for research into the storage of damaged wood in forestry was also identified by Jochem et al (2015). The substantial amount of storage stocks of damaged wood in forestry documented in the literature after natural disturbance events (e.g. Odenthal 2004) and the findings obtained in the context of this dissertation illustrate the relevance of the storage of damaged wood, for example with regard to its inclusion in the Thünen felling calculation (Zimmermann et al. 2018, Zimmermann et al. 2021, Zimmermann and Jochem 2024).

In this dissertation, Zimmermann et al. (2018) empirically investigate the determinants of the build-up of damaged wood storage after severe storm events (Article 1), and Zimmermann et al. (2021) investigate the residence time of damaged wood in storage in Germany (Article 2). Essentially based on the exploratory operational findings of the studies by Zimmermann et al. (2018; 2021), a method for estimating damaged wood storage after natural disturbance events at the national level is developed as part of the study by Zimmermann and Jochem (2024) (Article 3). The method for estimating damaged wood storage after natural disturbance events, like the studies by Zimmermann et al. (2018; 2021), on severe natural disturbance events, since although damaged wood occurs regularly in the forest, nationally significant changes in damaged wood stocks only occur after severe natural disturbance events (Zimmermann et al. 2018).

Article 1 of Zimmermann et al. (2018) examines the determining factors of forestry inflows into damaged wood storage after severe natural disturbance events. The study is based primarily on data from the German Forest Accountancy Data Network (FADN), in which the two severe storm events Lothar in 1999 and Kyrill in 2007 are represented. As part of the study, the explanatory contributions of variables reflecting economic, institutional and tree species-related factors are tested using a multiple linear weighted regression analysis. In addition, wood price changes are examined as a moderator variable in a hierarchical regression analysis with regard to forestry damaged wood storage. The results enable further combined analyses regarding the relationships between forestry inflows into damaged wood storage (Article 1) and outflows from damaged wood storage (Article 2).

The work by Zimmermann et al. (2021) (Article 2) uses the FADN-data to investigate determining factors for the residence times of coniferous roundwood in damaged wood storage over a period of several years after the two severe storm events Lothar and Kyrill. The distributions of the outflows from forestry damaged wood storage over a period of several years are characterized using the mean residence times and their deviations. Using multiple linear weighted regression analyses, determining factors with regard to the mean residence times and their deviations of the damaged wood in storage are investigated. The explanatory power of variables representing economic, institutional and technical aspects is tested. To investigate the impact of these variables on the residence time distributions of forestry damaged wood storage, the FADN-data are grouped with regard to the identified control variables and their mean residence time distributions after the storm events are determined. Thus, the deviations between empirical residence time distributions and simulated residence time distributions can be investigated to investigate the model quality.

The analyses of forestry damaged wood storage accumulation in the form of the article by Zimmermann et al. (2018) (Article 1) are combined with the investigations into the residence times of damaged wood in storage by Zimmermann et al. (2021) (Article 2) in the work by Zimmermann and Jochem (2024) (Article 3). The findings of the work in connection with the natural disturbance events Lothar (1999) and Kyrill (2007) are transferred to a cross-company damaged wood storage model. In order to estimate damaged wood storage after severe natural disturbance events for the national level, a cross-company damaged wood storage model is first parameterized based on the empirical data from the FADN. Based on the national logging time series of the Federal Statistical Office, the model is scaled with national disturbance-related additional logging due to the natural disturbance events Lothar and Kyrill as well as the drought/bark beetle damage complex, which has played a significant role in forest damage in Germany since 2018.

With the help of Articles 1 (Zimmermann et al. 2018) and 2 (Zimmermann et al. 2021), the factors influencing the forestry inflows into damaged wood storage and the outflows from damaged wood storage are quantified for the first time on an empirical basis using scientific methods. Article 3 (Zimmermann and Jochem 2024) creates a cross-company damaged wood storage model for the first time and presents a method for national scaling. The method for estimating damaged wood storage in German forestry after natural disturbance events (Jochem 2015), which has so far been based mainly on expert estimates, is significantly expanded with the help of the three articles prepared and published as part of this cumulative dissertation and through the comprehensive consideration of the results generated on an empirical basis. In particular, in conjunction with the Thünen felling back calculation (Jochem et al. 2015, Thünen Institute of Forestry 2024a), the method can contribute to improving national and international forest and wood-related reporting, such as the greenhouse gas emission reporting system for the National Inventory Report (NIR), Economic Accounts

for Forestry (EAF), the Joint Forestry Questionnaire (JFSQ) or the European Forest Accounting System (EFA).

Erklärungen zum Eigenanteil

Erklärung zum Eigenanteil an folgendem Artikel:

Artikel 1: *Zimmermann K, Schuetz T, Weimar H (2018) Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany. Eur J For Res 137:463–475*

Auszug aus Kapitel 4.1:

Die Autoren des Artikels 1 „Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany“ sind Klaus Zimmermann (Hauptautor) sowie die Coautoren Tobias Schuetz und Holger Weimar. Der Artikel wurde am 24. August 2017 in dem Journal „European Journal of Forest Research“ eingereicht und in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. In überarbeiteter Fassung wurde der Artikel am 19. Februar 2018 eingereicht. Der Artikel wurde am 26. April 2018 akzeptiert und am 04. Mai 2018 veröffentlicht (online). Die Entwicklung des konzeptionellen Rahmens und der Methode, die Analyse der Daten, die Diskussion der Ergebnisse sowie die Schlussfolgerungen wurden im Wesentlichen von Klaus Zimmermann durchgeführt. Der Artikel wurde im Wesentlichen von Klaus Zimmermann verfasst. Tobias Schütz trug insbesondere durch die konstruktive Diskussion der Methode und Datenanalyse zum Artikel bei. Alle Coautoren trugen durch weitere Diskussion sowie die Überarbeitung der Kapitel in geringerem Umfang zum Artikel bei.

Bestätigung durch Betreuer



Prof. Dr. M. Dieter

Erklärung zum Eigenanteil an folgendem Artikel:

Artikel 2: *Zimmermann, K, Schuetz, T, Weimar, H, Dieter M (2021) Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events. Eur J For Res 140:37–50*

Auszug aus Kapitel 4.2:

Die Autoren des Artikels 2 „Exploring controls of timber stock residence times in storage after severe storm events“ sind Klaus Zimmermann (Hauptautor) sowie die Coautoren Tobias Schuetz, Holger Weimar und Matthias Dieter. Der Artikel wurde am 30. April 2019 in dem Journal „European Journal of Forest Research“ eingereicht und in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. In überarbeiteter Fassung wurde der Artikel am 31. März 2020 eingereicht. Der Artikel wurde am 06. August 2020 akzeptiert und am 01. Oktober 2020 veröffentlicht (online). Die Entwicklung des konzeptionellen Rahmens und der Methode, die Analyse der Daten, die Diskussion der Ergebnisse sowie die Schlussfolgerungen wurden im Wesentlichen von Klaus Zimmermann durchgeführt. Der Artikel wurde im Wesentlichen von Klaus Zimmermann verfasst. Tobias Schütz trug insbesondere durch seine Beiträge zur Überführung einer in der Fachrichtung Hydrologie gebräuchlichen Methode zur Untersuchung von Verweilzeitverteilungen in den Kontext von Artikel 2 sowie die konstruktive Diskussion der Methode und Datenanalyse zum Artikel 2 bei. Alle Coautoren trugen durch weitere Diskussion sowie die Überarbeitung der Kapitel in geringerem Umfang zum Artikel 2 bei.

Bestätigung durch Betreuer



Prof. Dr. M. Dieter

Erklärung zum Eigenanteil an folgendem Artikel:

Artikel 3: *Zimmermann K, Jochem D (2024) Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 37 p, Thünen Working Paper 244, DOI:10.3220/WP1722506779000*

Auszug aus Kapitel 4.3:

Die Autoren des Artikels 3 „Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung“ sind Klaus Zimmermann (Hauptautor) sowie der Co-Autor Dominik Jochem. Der Artikel wurde im Rahmen der Thünen Working-Paper-Reihe im August 2024 veröffentlicht (online). Die Entwicklung des konzeptionellen Rahmens und der Methode, die Analyse der Daten, die Diskussion der Ergebnisse sowie die Schlussfolgerungen wurden im Wesentlichen von Klaus Zimmermann durchgeführt. Der Artikel wurde im Wesentlichen von Klaus Zimmermann verfasst. Dominik Jochem trug insbesondere zum Stand des Wissens in Form der Einordnung der Bedeutung der Erkenntnisse über die forstbetrieblichen Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen für die Thünen-Einschlagsrückrechnung bei. Dominik Jochem trug darüber hinaus durch weitere Diskussion sowie die Überarbeitung der Kapitel in geringerem Umfang zum Artikel bei.

Bestätigung durch Betreuer



Prof. Dr. M. Dieter

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt zu haben.

Sofern im Zuge der Erstellung der vorliegenden Dissertationsschrift generative Künstliche Intelligenz (gKI) basierte elektronische Hilfsmittel verwendet wurden, versichere ich, dass meine eigene Leistung im Vordergrund stand und dass eine vollständige Dokumentation aller verwendeten Hilfsmittel gemäß der Guten wissenschaftlichen Praxis vorliegt. Ich trage die Verantwortung für eventuell durch die gKI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate.

Freiburg im Breisgau, den 04.11.2024



Klaus Zimmermann