

Zimmermann, Klaus; Jochem, Dominik

Working Paper

Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung

Thünen Working Paper, No. 244

Provided in Cooperation with:

Johann Heinrich von Thünen Institute, Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries

Suggested Citation: Zimmermann, Klaus; Jochem, Dominik (2024) : Forstbetriebliche Schadholzlagerbestände nach natürlichen Störungsereignissen - Verfahren zur nationalen Schätzung, Thünen Working Paper, No. 244, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, <https://doi.org/10.3220/WP172250677900>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/302169>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

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 Schadh Holzlager (TSA_{comp}) sowie die Abflüsse aus dem Schadh Holzlager (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 Schadh Holzlager (TSA_{nat}). Schritt 3 zeigt, wie aus Zufluss und zeitlichem Verlauf der Abflüsse aus dem Schadh Holzlager (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 Schadh Holzlager, 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 Schadh Holz 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 Schadh Holz mengen die eingelagerten Schadh Holz mengen 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, Schadh Holz lager, 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.

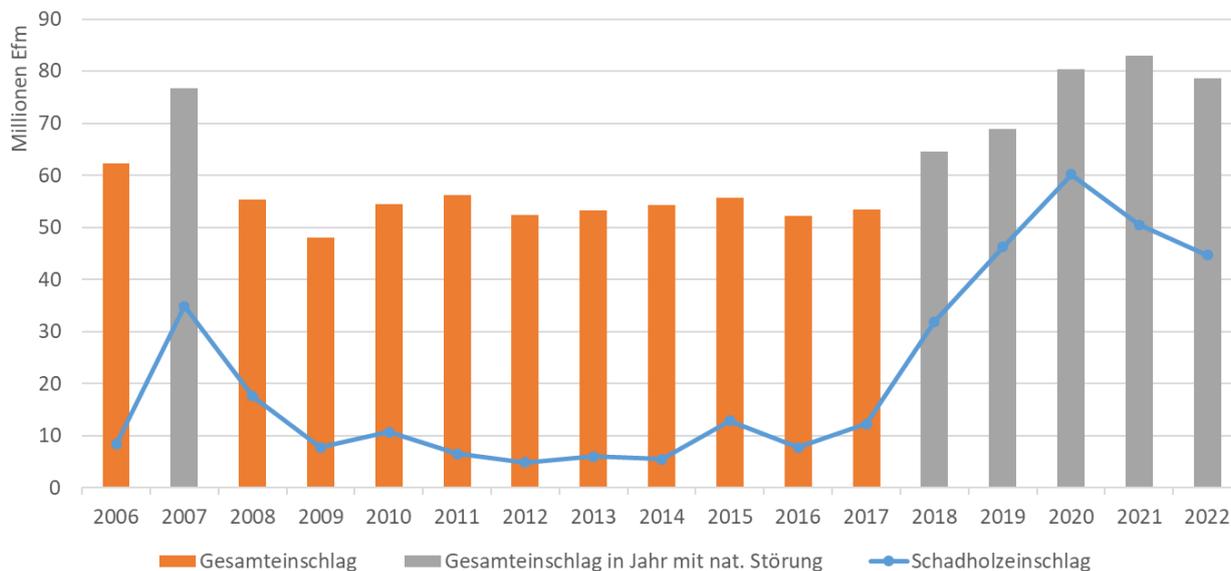
Tabelle 1: Schadholanfall nach extremen natürlichen Störungsereignisse in der deutschen Forstwirtschaft seit 1990

Datum	Bezeichnung	Hauptschadensregion (Bundesländer)	^{bd} Aufgearbeitetes Schadh Holz (Efm); ^{ace} Gesamtschadh Holzmenge (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 Schadh Holz mengen auf nationaler Ebene (Abbildung 1).

Abbildung 1: Gesamt- und Schadh Holzeinschlag 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

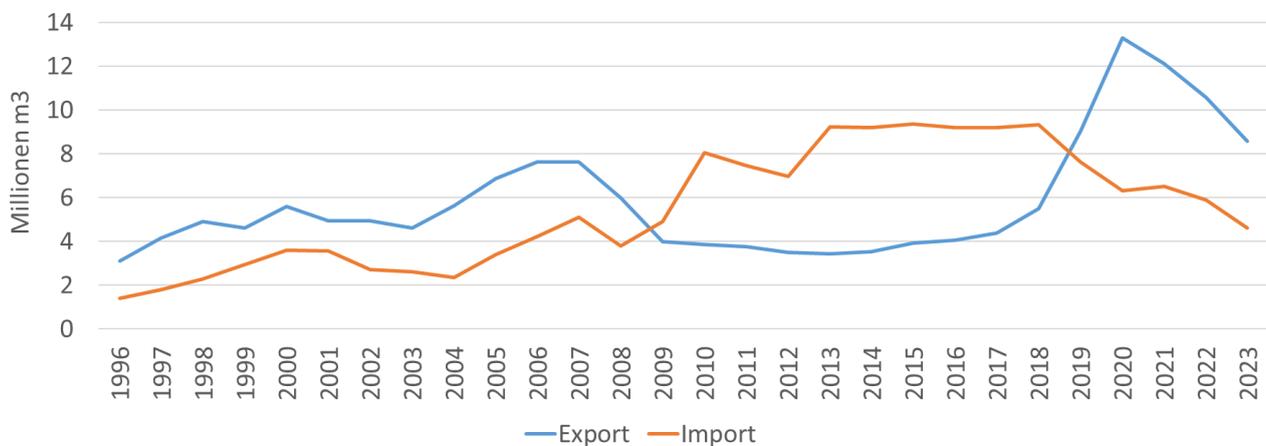
mittleren Verweilzeiten des eingelagerten Holzbestands und deren Varianzen sind. Weitere quantitative Forschungsarbeiten über die forstbetriebliche Lagerhaltung nach natürlichen Störungsereignissen sind den Autoren nicht bekannt.

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

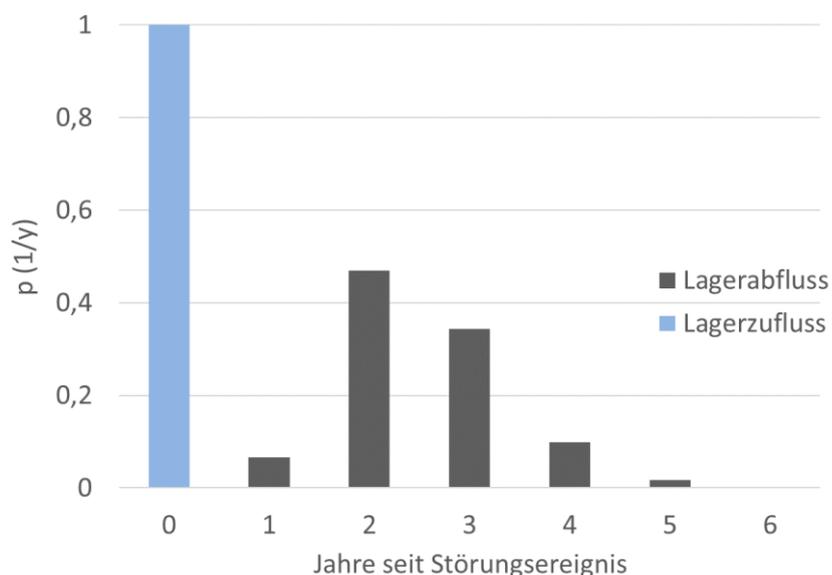
2.1 Konzeptioneller Rahmen

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 Gewichtungsverfahren 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

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

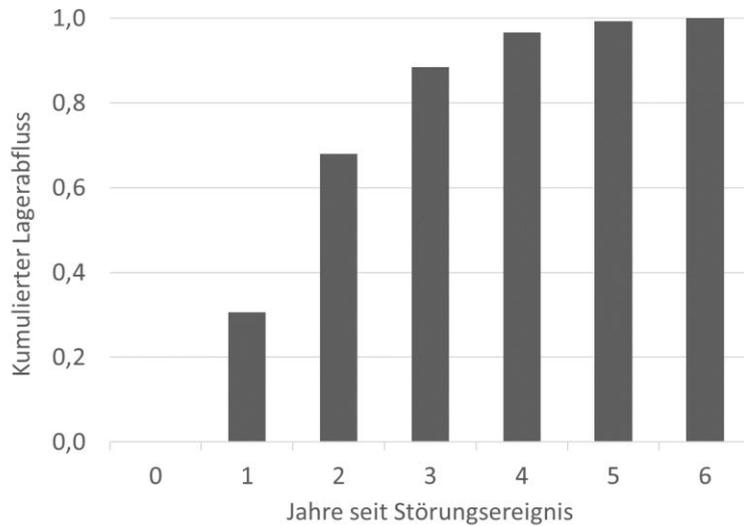
Mithilfe der statistischen Momentenanalyse ermittelten Zimmermann et al. (2021) einzelbetrieblich die mittlere Verweilzeit des Holzbestands im Lager (τ_{comp}) durch

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

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

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

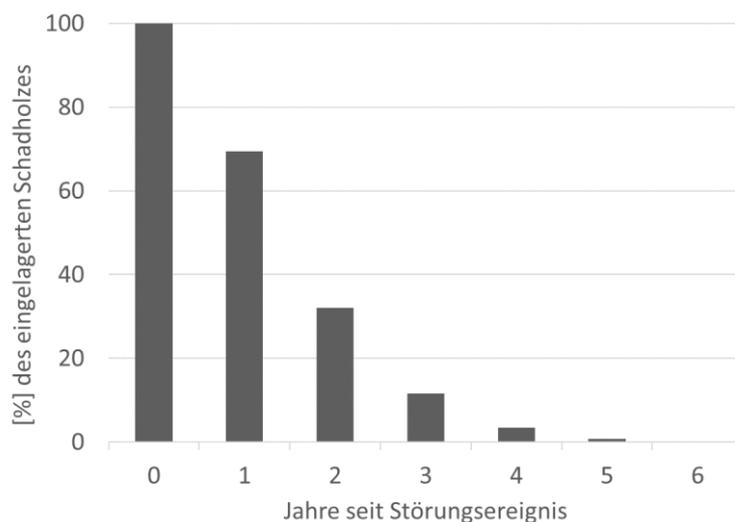
Im Rahmen der vorliegenden Studie wird die nationale mittlere Verweilzeit des Lagerbestands (τ_{nat}) und die nationale Varianz (σ^2_{nat}) durch Bildung eines gewichteten Mittelwerts basierend auf dem Gewichtungsverfahren der einzelbetrieblichen Werte der Studie von Zimmermann et al. (2021) hergeleitet. 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 Schadholzlager

Quelle: Eigene Berechnungen

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

Der Zufluss in das Schadholzlager ($T_{SA_{comp}}$) erfolgt im Modell zum Zeitpunkt des natürlichen Störungsereignisses ($t=0$)¹. Durch die Subtraktion der Abflüsse aus dem Schadholzlager ($T_{SO_{comp}}(t)$) vom Zufluss in das Schadholzlager ($T_{SA_{comp}}$) 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.

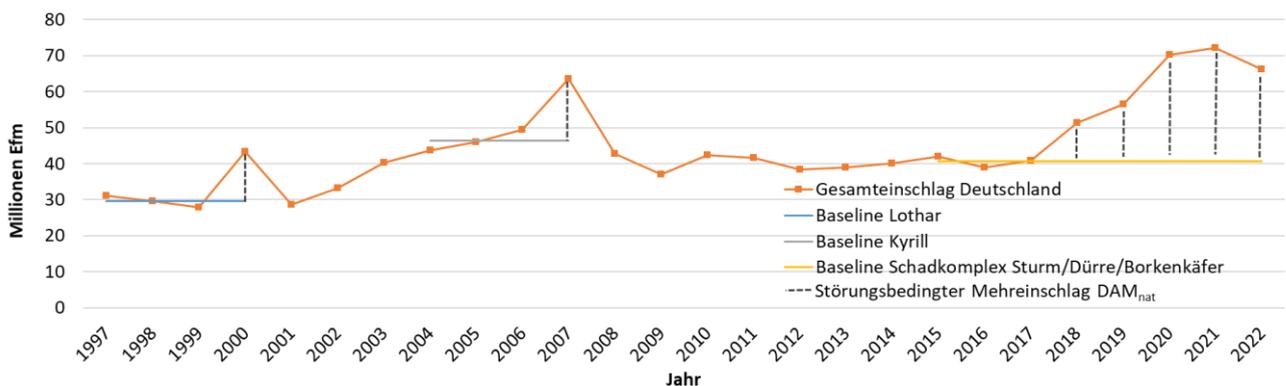
3 Ergebnisse

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

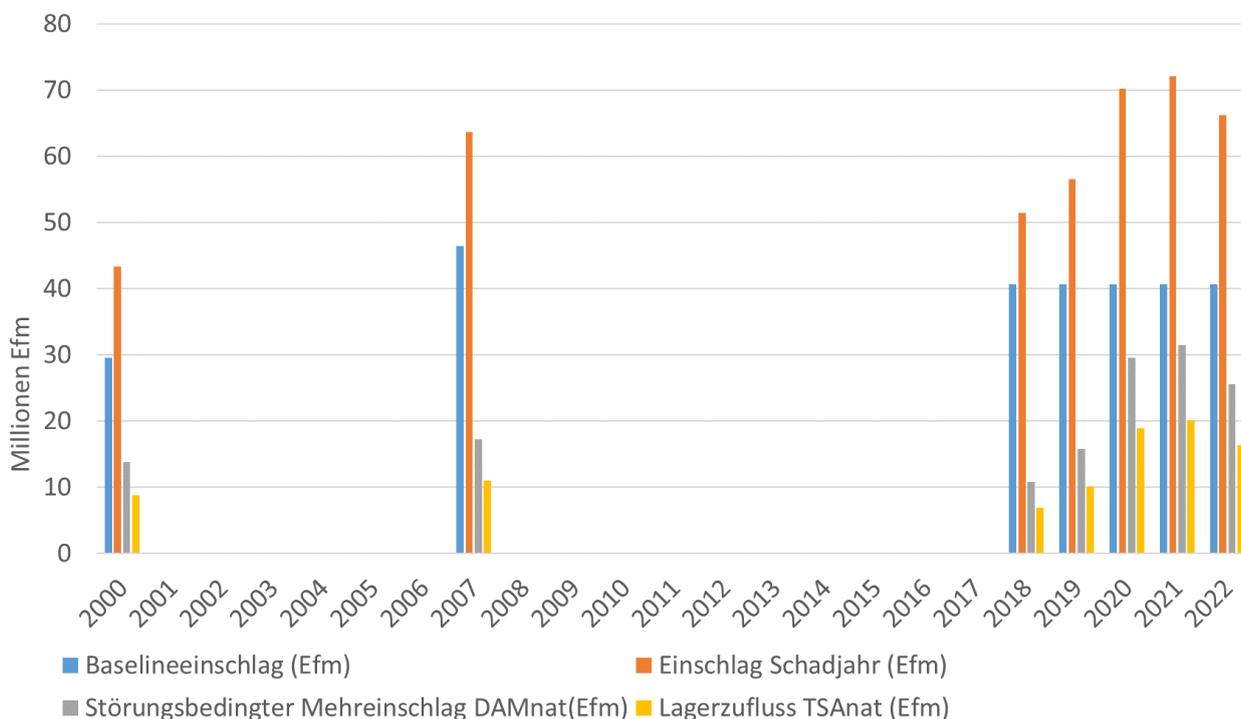
Natürliches Störungsereignis	Bezugsjahr	Störungsbedingter Mehreinschlag (DAM_{nat}) (Efm)	Zufluss ins Schadholzlager (TSA_{nat}) (Efm)
Lothar	2000	13.772.278	8.814.258
Kyrill	2007	17.196.612	11.005.832
Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer	2018	10.783.315	6.901.322
	2019	15.823.515	10.127.050
	2020	29.545.615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

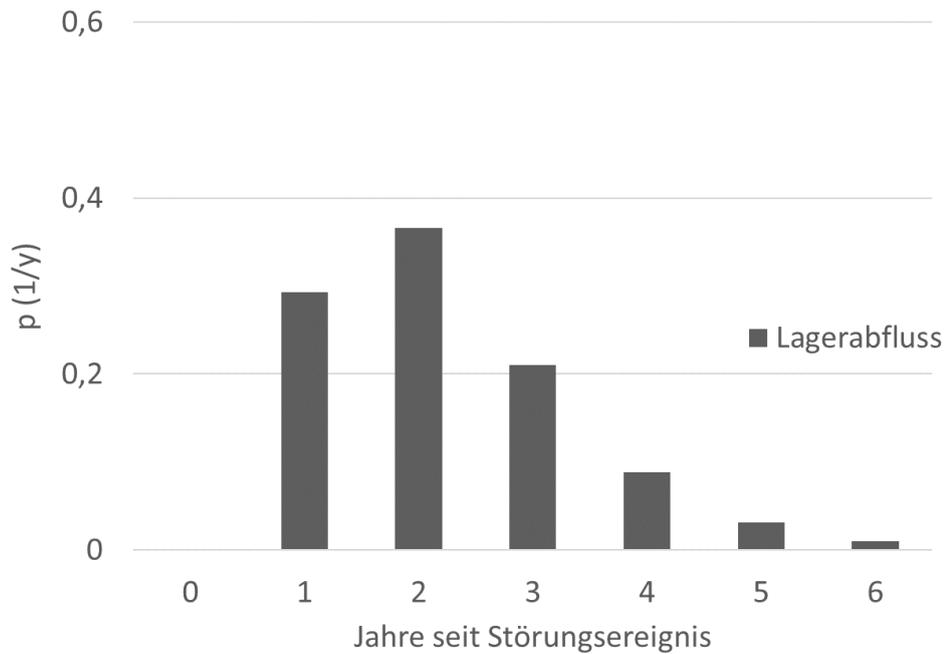
Tabelle 5: Deskriptive Statistik der Variablen τ_{nat} und σ^2_{nat} , die den zeitlichen Verlauf der nationalen Abflüsse aus dem Schadholzlager (TSO_{nat}) parametrisieren

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).

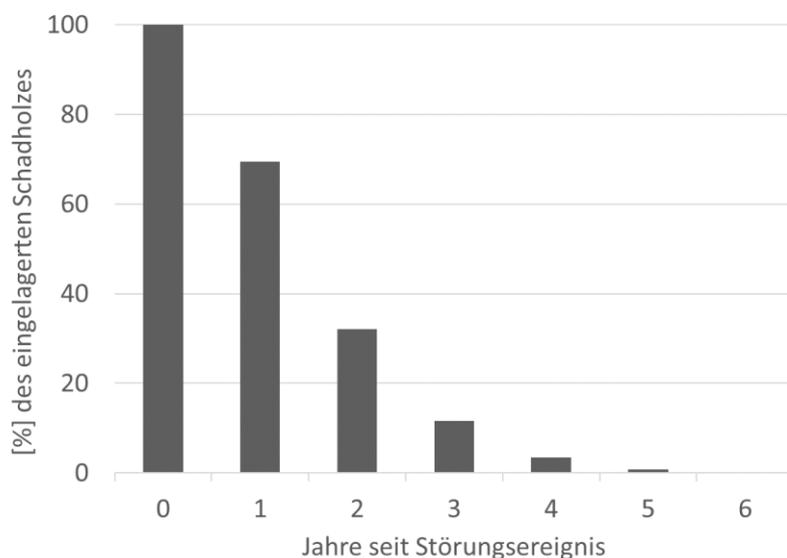
Abbildung 8: Wahrscheinlichkeitsverteilung für die nationalen Abflüsse aus dem Schadh Holzlager (TSO_{nat}) auf Grundlage der TBN-Stichprobe



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

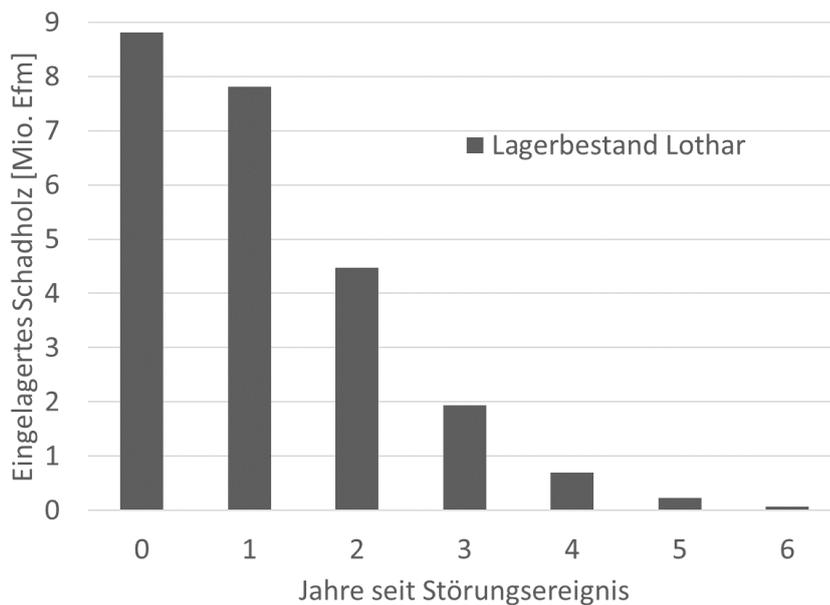


Quelle: Eigene Berechnungen

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



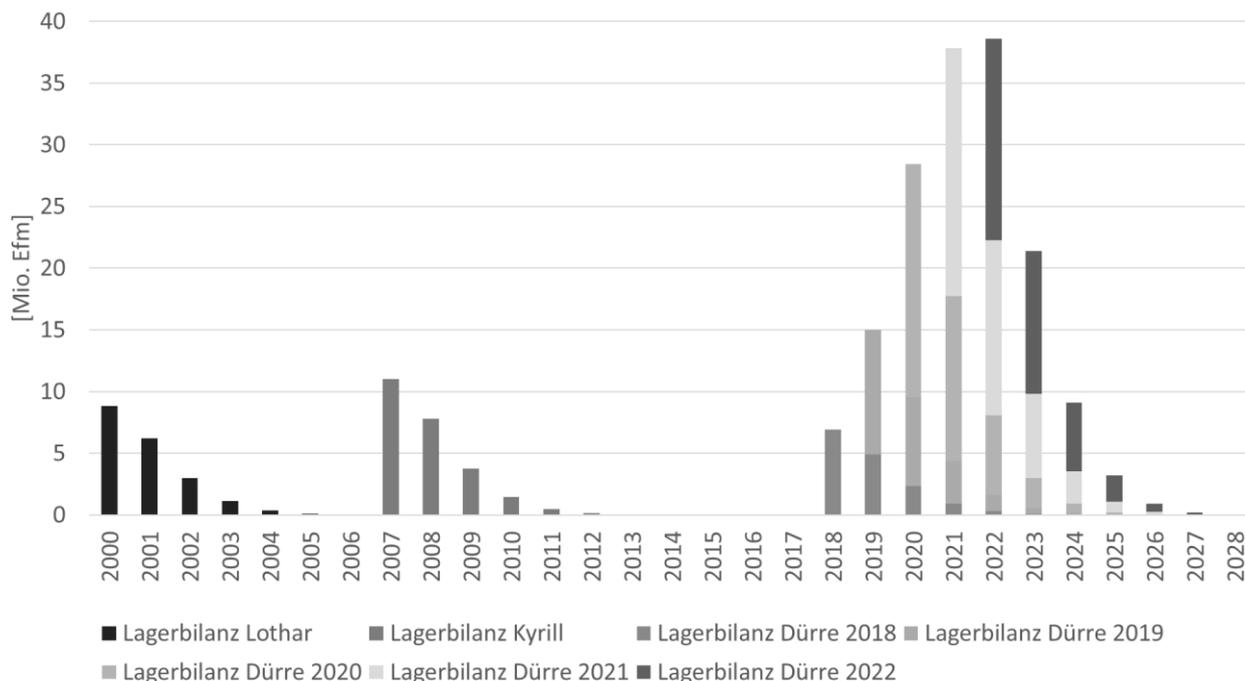
Quelle: Eigene Berechnungen

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



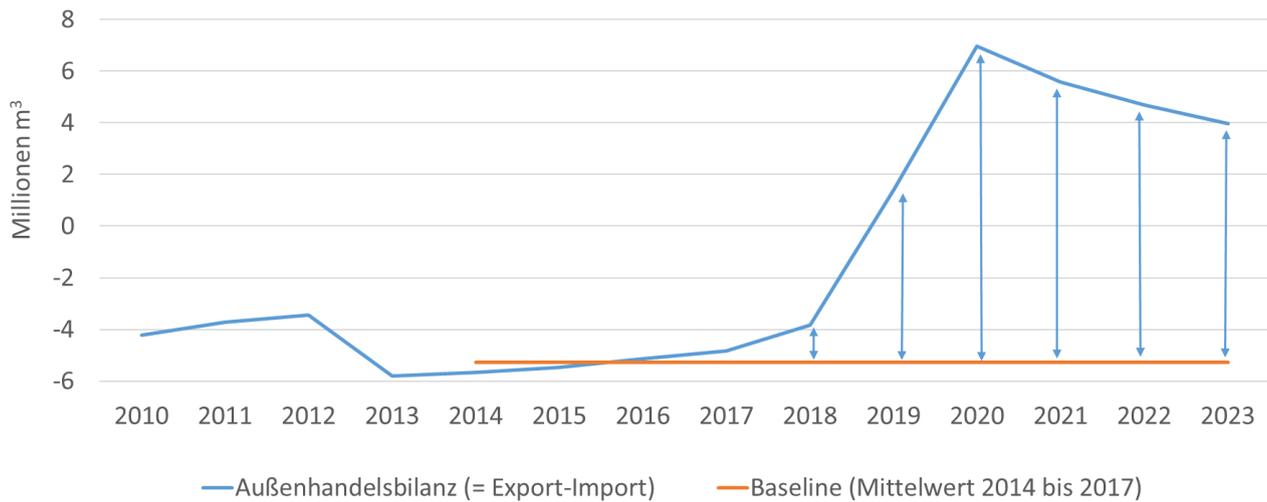
Quelle: Eigene Berechnungen

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



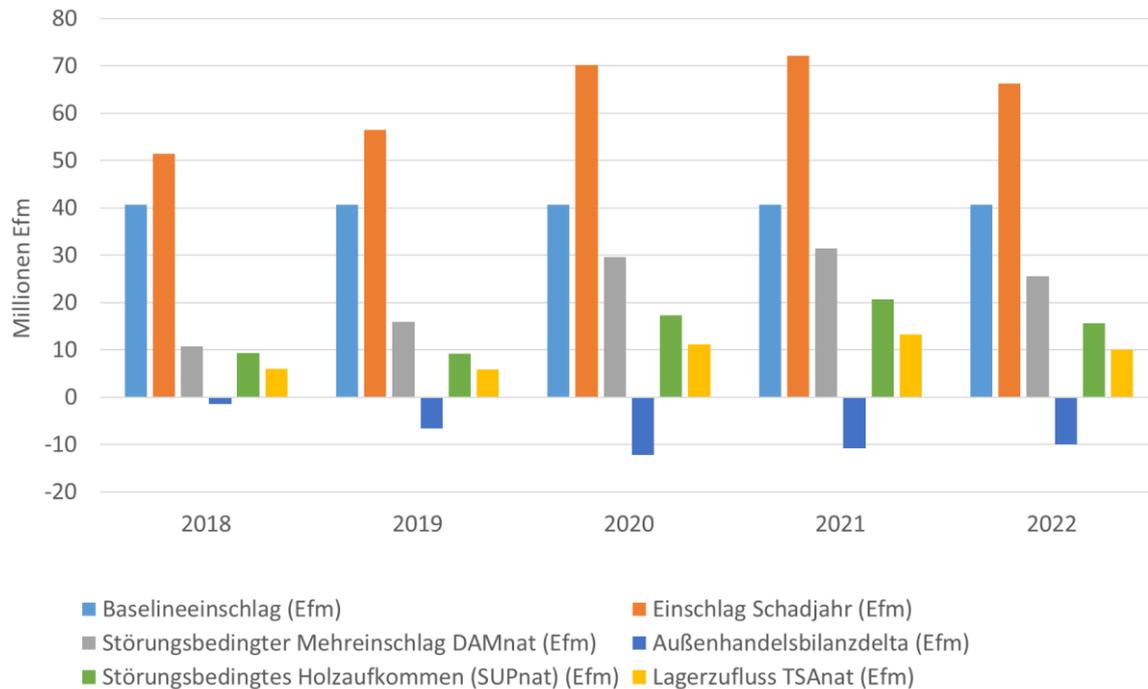
Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis); eigene Berechnungen

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

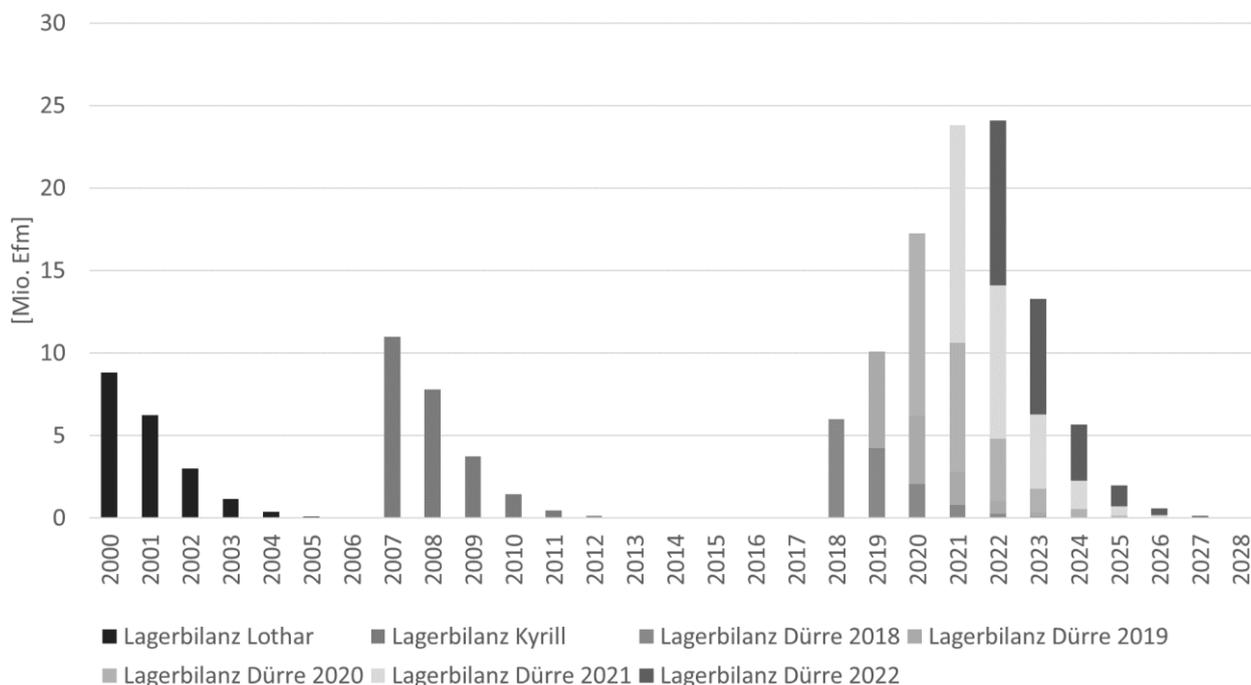
Auf Grundlage der angepassten Simulation kumulieren durch den jährlichen Anfall großer Rohholzexportdeltas über einen mehrjährigen Zeitraum die eingelagerten Rundholzmengen während des Schadkomplexes Sturm/Dürre/Borkenkäfer bei 24,1 Mio. Efm im Jahr 2022 was einer Minderung von 14,5 Mio. Efm im Vergleich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

$$\alpha = \frac{T_{nat}^2}{\sigma^2_{nat}} \tag{7}$$

$$\beta = \frac{\sigma^2_{nat}}{T_{nat}} \tag{8}$$

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.

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

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.

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

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 Holzmenzen 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)

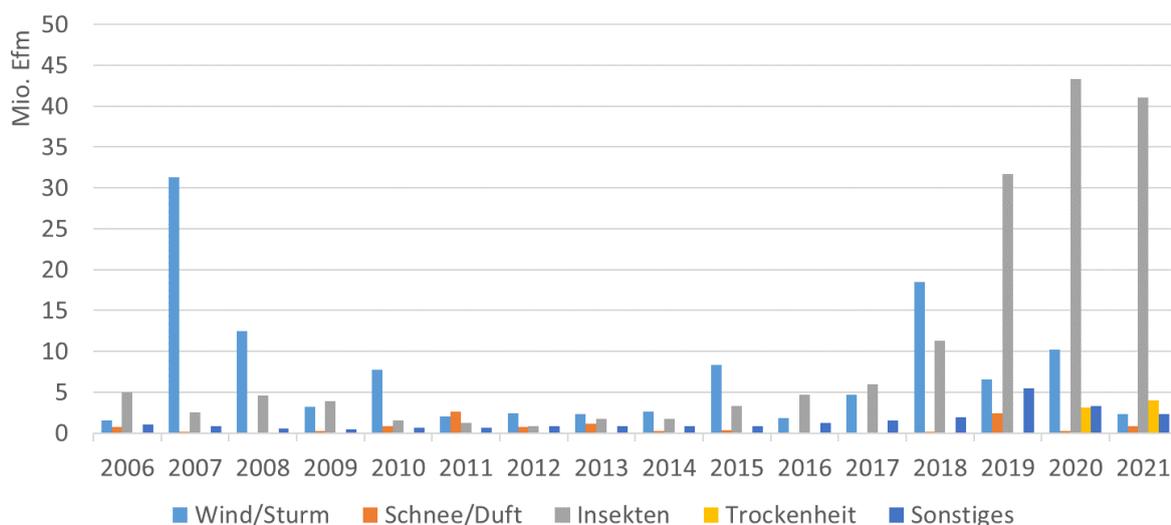
Der Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer nimmt seit dem Jahr 2018 eine enorme Rolle im forstlichen Schadgeschehen ein. Der Schadkomplex verursacht enorme naturale und ökonomische Schäden. Diese ergeben sich aus verschiedenen Sturmereignissen, Dürre und Borkenkäferkalamitäten und betragen summarisch 233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

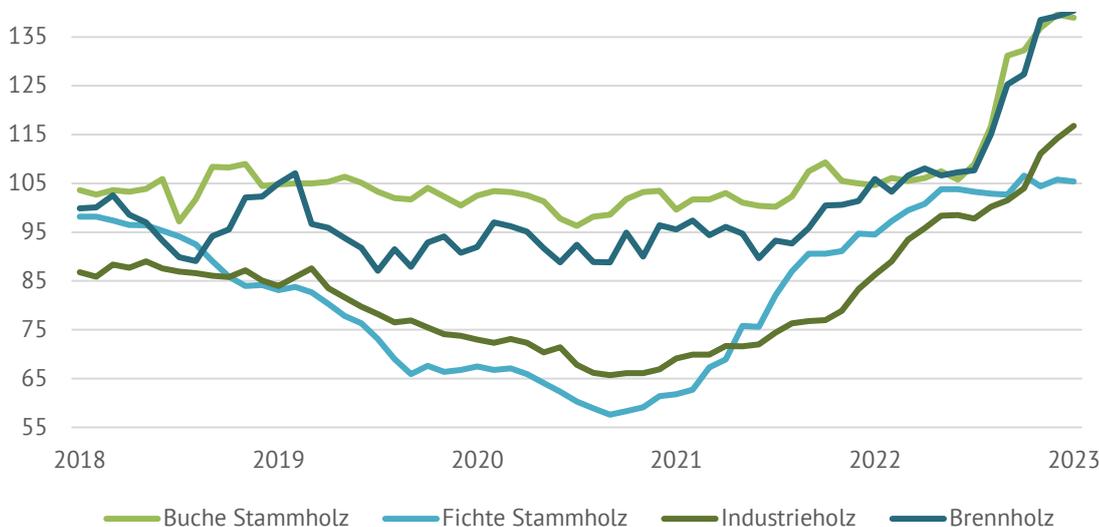
Es bestehen darüber hinaus Unsicherheiten, ob der zeitliche Verlauf des Abbaus der Schadholzlager über einen mehrjährigen Zeitraum für den Schadkomplex Sturm/Dürre/Borkenkäfer mit den Sturmereignissen der Stichprobe korreliert. Daraus resultierend stellt sich die Eignung des aktuellen Lagerbestandsmodells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