

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem Waldschäden (FNEWs)

Zuwendungsempfänger:

**Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig**

Förderkennzeichen:

2220NR013

Laufzeit:

01.05.2020 bis 31.12.2023

Monat der Erstellung:

02/2024

Datum der Veröffentlichung:

15.07.2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

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

Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem Waldschäden (FNEWs)

Katja Oehmichen, Niklas Langner, Lea Henning, Jörg Ackermann, Petra Adler, Julian Backa, Philip Beckschäfer, Gwendolyn Dasser, Janik Deutscher, Philipp Eisnecker, Simon Fleckenstein, Kristin Franz, Christian Ginzler, Karina Hoffmann, Martin Puhm, Eike Reinosch, Thomas Riedel, Marius Rüetschi, Mathias Schardt, David Schicketanz, Rudolf Seitz, Björn Seintsch, David Small, Christoph Straub, Andreas Uhl, Lars Waser, Jens Wieseahn, Andreas Wimmer



Ausführende Stelle:

Thünen-Institut für Waldökosysteme

Alfred-Möller-Str. 1, Haus 41/42

16225 Eberswalde

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Hintergrund, Aufgabenstellung und Arbeitsablauf	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.3 Stand der Wissenschaft und Technik	2
1.4 Planung und Ablauf	3
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2 Schaffung der IT-Infrastruktur	6
2.1 Datenverarbeitungsleistung und Datenvolumen	6
2.2 Serverspezifikation der Plattform CODE-DE	7
2.3 IT-Systemarchitektur auf CODE-DE	8
3 Untersuchungsgebiete und forstliche Grunddaten	10
3.1 Auswahl der Untersuchungsgebiete	10
3.2 FNEWs-Walddefinition & weitere Definitionen	11
3.3 Definition der Anforderungen an Referenzdaten	12
3.4 Anwendung forstlicher Daten und Zusatzdaten – bundes-/europaweit	14
3.5 Beschaffung und Aufbereitung Referenzdaten	15
3.6 Baumartenkarten für die Untersuchungsgebiete	16
3.7 Erstellung einer aktuellen Holzbodenmaske	17
4 Detektion von Waldschäden durch Zeitreihenanalyse	19
4.1 Optimierung der Datenvorprozessierung	19
4.2 Methodenentwicklung Zeitreihenanalyse	20
4.3 Methodenentwicklung zur Trennung von Schadensursachen	22
5 Schnellerkennung von Sturmschäden mit Sentinel-1 C-band SAR-Daten	23
5.1 Ausblick für eine potentielle bundesweite Implementierung	23
5.1.1 Darstellung der Hinweiskarte	23
5.1.2 Übersicht der Wartezeit	24
5.1.3 Analyse der Dauer des Workflows für die Hinweiskartengenerierung	25
5.1.4 Kombination mit RADARSAT Constellation Mission	26
5.2 Fazit	26
6 Implementierung der Ergebnisse in forstliche IT-Strukturen und Optimierung der Schaderkennungsergebnisse	27
6.1 Anforderungen und Abstimmung mit Nutzern der FVA-BW	27
6.2 Definition der Schnittstellen zur Integration der Projektergebnisse in landeseigenen IT-Strukturen der LWF	27
6.3 NW-FVA	29

6.3.1	Integration der Projektergebnisse in forstbetriebliche IT-Infrastrukturen der NW-FVA	29
6.3.2	Webbasierte Bereitstellung von Projektergebnissen	29
6.3.3	Generierung einer Baumartenkarte	30
6.3.4	Generierung und Bereitstellung verbesserter Schadensdaten nach Stürmen und während laufender Borkenkäferkalamitäten	32
6.4	Staatsbetrieb Sachsenforst	33
6.4.1	Definition der Schnittstellen zur Integration der Projektergebnisse in die landeseigenen IT-Strukturen von Sachsenforst	33
6.4.2	Verfeinerte Schadkartierung mittels hochauflösender Daten für landeseigene Datenanforderungen	35
6.4.3	Übertragung der verfeinerten SBS-Schadkartierung Sachsens auf Modellregion in Baden-Württemberg	37
7	Validierung der Ergebnisse	39
7.1	Validierungskonzept	39
7.1.1	Ausarbeitung Validierungskonzept	39
7.1.2	Definition Anforderung an Validierungsdaten	41
7.1.3	Validierungsdatenbankstruktur	41
7.1.4	Validierungstool	42
7.2	Validierungsdaten	43
7.3	Validierung der Ergebnisse des AP 4	44
7.3.1	Jahresprodukt	44
7.3.2	Near-Real-Time Produkt	48
7.4	Validierung der Ergebnisse des AP 5	50
8	Technologie- und Wissenstransfer	52
9	Web User Applikation	53
9.1	Back End und Front End Funktionen der Forschungsdateninfrastruktur – Thünen-Atlas	53
9.2	Ergebnisdarstellung im Thünen-Atlas	54
10	Ökonomische Bewertung	56
10.1	Recherche und Prüfung ökonomischer Bewertungskonzepte von Waldschäden	56
10.2	Identifizierung von Einflussfaktoren für Marktreaktionen der Rohholzmärkte nach Kalamitäten	57
10.2.1	Ergebnisse der Literaturanalyse	58
10.2.2	Ergebnisse der Experteninterviews	64
10.2.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	71
10.3	Ansätze zur Implementierung in ein kontinuierliches Monitoring- und Berichtssystem	71
10.3.1	Bewertungsmethoden und deren Eingangsdaten	71
10.3.2	Bewertungsergebnisse für die FNEWs-Untersuchungsgebiete	72
10.3.3	Schlussfolgerungen	74
11	Synthese und Ausblick	75
11.1	Ausblick	76
11.2	Präsentationen, Veröffentlichungen & Öffentlichkeitsarbeit	77
11.2.1	Vorträge	77

11.2.2	Poster	78
11.2.3	Publikationen	78
11.2.4	Datenveröffentlichungen	79
11.2.5	Projektwebpage	79
11.3	Erkenntnisse von Dritten	79
Literatur		80
Anhang		93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der FNEWs-Arbeitspakete	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung der IT-Systemarchitektur auf CODE-DE	8
Abbildung 3: Die FNEWs-Untersuchungsgebiete und deren Sentinel 2-Kachelabdeckung	10
Abbildung 4: Schematische Darstellung zur Aktualisierung der Holzbodenmaske.....	18
Abbildung 5: Unterjährige Kartierung von Schadflächen im NRT-Modus.....	21
Abbildung 6: Jährliche Kartierung auf Basis der gefilterten Sentinel-2 Bilder.....	22
Abbildung 7: Beispiel des Hektar-Rasters im UG Niedersachsen.....	24
Abbildung 8: Aufnahmefrequenz von Sentinel-1 (S1) über Deutschland.. ..	25
Abbildung 9: Workflow der Einbindung von zukünftigen FNEWs Produkten - LWF	28
Abbildung 10: Schematische Darstellung zum Workflow der Baumartenklassifizierung.	30
Abbildung 11: Geodateninfrastruktur von Sachsenforst.....	34
Abbildung 12: WMS FNEWs für die sächsischen Untersuchungsgebiete in FGIS_online	35
Abbildung 13: Darstellung der Schaddetektion anhand der Luftbilddaten.....	36
Abbildung 14: Schematische Darstellung von Schadflächen.....	40
Abbildung 15: Aktueller Workflow zum Einspielen der FNEWs Daten in die Datenbank.....	42
Abbildung 16: Beispiel für die einheitliche Auswertung von Stichprobenpunkten.....	43
Abbildung 17: Überblick der vier Untersuchungsgebiete sowie Validierungsgebiete	45
Abbildung 18: Genauigkeiten des AP4 Jahresprodukts Produkts	45
Abbildung 19: Beispiel von erkannten Schadflächen des AP4 Jahresprodukts	47
Abbildung 20: Räumliche Verteilung der größten Schäden von Sturm Kalle bei Passau.	51
Abbildung 21: Komponenten der Forschungsdateninfrastruktur	53
Abbildung 22: Beispieldarstellung des Waldschadensproduktes	55
Abbildung 23: Bewertungsrahmen für die ökonomischen Auswirkungen von Waldschäden	57
Abbildung 24: Einflussfaktorbereiche für Marktreaktionen der Rohholzmärkte	59
Abbildung 25: Gesamtschaden differenziert nach Schadenskomponenten	73
Abbildung 26: Zeitlicher Anfall der Schadenskomponenten.....	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abschätzung der Datenverarbeitungsleistung pro Granule und Jahr	6
Tabelle 2: Abschätzung des Datenvolumens pro Prozessierungslevel und S2 Granule/Jahr	6
Tabelle 3: Prozessierungslevel Sentinel-2 Pre-Processings.....	9
Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Höhenmodelle	14
Tabelle 5: Dauer der SAR-Vorprozessierung mittels SNAP.....	25
Tabelle 6: Validierung der Luftbildauswertungen.....	37
Tabelle 7: Genauigkeiten und Schadausmaß des AP4 Jahresprodukts Produkts	47
Tabelle 8: Genauigkeiten des AP4 Jahresprodukts Produkts für unterschiedliche MMU	48
Tabelle 9: Genauigkeiten des AP4 NRT Produkts für unterschiedliche Validierungsgebiete	49
Tabelle 10: Genauigkeiten des AP5 Produkts für die vier validierten Sturmereignisse	50
Tabelle 11: Übersicht laufender und abgeschlossener Projekte	93

Abkürzungsverzeichnis

BMEL	Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung
FNEWs	Fernerkundungsbasierte Nationale Erfassungssystem Waldschäden
VCT	Vegetation Change Tracker
BFAST	Breaks for Additive Season and Trend
CCDC	Continuous Change Detection and Classification- Algorithmus
JR	Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
FVA-BW	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden- Württemberg
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
NW-FVA	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
SBS	Staatsbetrieb Sachsenforst
TI-WO	Thünen-Institut für Waldökosysteme
TI-WF	Thünen-Institut für internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie
SKD	Servicestelle Fernerkundung im satellitengestützten Krisen- und Lagedienst
BKG	Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie
HPC	High Performance Cluster
CODE-DE	Copernicus Open Data and Exploitation Plattform Deutschland
BMVI	Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
RFM	DLR-Raumfahrtmanagement
WLM	Work Load Manager
SLURM	Simple Linux Utility for Ressource Management
VM	Virtuelle Maschine
LVM	Logical Volume Manager

VG	Logische Datenspeichergruppe (Volume Group)
UTM	Universal Transverse Mercator
DWD	Deutscher Wetterdienst
DGM	Digitales Geländemodell
EU-DEM	Copernicus European Digital Elevation Model
COP-DEM	Copernicus DEM
BI	Betriebsinventur
nDSM	normalisiertes digitales Oberflächenmodell (normalized Digital Surface Model)
SVM	Support Vektor Machine
NDVI	Normalisierte differenzierte Vegetationsindex
FESA pro	Forsteinrichtungssystem Sachsen
WIS	Waldinformationssystem Sachsen
HRL	High Resolution Layer
Basis-DLM	Digitale Landschaftsmodell Deutschlands
LUCAS	Land Use and Coverage Area frame Survey
TCD	Tree Cover Density
FADSL	Forest Additional Support Layers
NRT	Near Realtime
TOA	Top-of-atmosphere
BOA	Bottom of Atmosphere
KF	Kalman Filter
CUSUM	Cumulative sum
SWIR	Short wave infrared
MCD	Kovarianzdeterminante
SAR	Synthetic Aperture Radar
RCM	RADARSAT Constellation Mission
UG	Untersuchungsgebiet
SNAP	Sentinel Application Platform
WMS	Web Map Service
WFS	Web Feature Service

WMTS	Web Map Tile Service
WCS	Web Coverage Services
BayWIS	Bayerisches Wald-Informationssystem
DOYNG	Tag des Jahres (Day of Year)
NG	Nutzergenauigkeit
OGC	Open Geospatial Consortium
TBN-Forst	Testbetriebsnetz Forst

1 Hintergrund, Aufgabenstellung und Arbeitsablauf

1.1 Hintergrund

Seit Beginn des Jahres 2018 sind in Deutschland erhebliche Waldschäden durch Stürme, extreme Dürre, Waldbrand und Schadinsekten, insbesondere durch Borkenkäferbefall, entstanden. Das BMEL hat auf Grundlage von Schätzungen der Bundesländer im Spätsommer 2019 für die vergangenen beiden Jahre eine Schadfläche von 180.000 ha und einen Schadholzanfall von 105 Mio. m³ ermittelt. Aufgrund der Trockenheit im Winter 2019/2020 und des niederschlagsarmen Frühjahrs ist mit weiteren großflächigen Waldschäden zu rechnen. Die Erhebung vollständiger und belastbarer Zahlen zu diesen Schäden gestaltet sich jedoch schwierig und ist bisher mit zeitlichen Verzögerungen verbunden. Das Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung (BMEL) benötigt daher zeitnah nach einem Schadereignis Daten zu Schadflächen, Schadmengen und einer monetären Bewertung der Schäden, um mit dem Bundesfinanzministerium, dem Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur und den Ländern über steuerliche, verkehrsrechtliche und förderrechtliche Konsequenzen aus der Schadenslage zu verhandeln. Diese Informationen bilden eine wichtige Grundlage für das Krisenmanagement von Waldschäden und den damit verbundenen Entscheidungen von Politik, Wirtschaft und der Gesellschaft.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund soll das Projekt „Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem Waldschäden“ (FNEWs) belastbare Informationen zu Waldflächen und Holzmengen liefern, die durch abiotische und biotische Schadereignisse wie Sturm, Trockenheit, Schadinsekten oder Waldbrand abgestorben sind. Das System soll aktuelle Hinweiskarten mit Hilfe einer weitgehend automatischen Schnelldetektion erzeugen und jährliche Berichte über den Umfang der Schäden ermöglichen. Die Zielstellung des Projektes ist:

- zeitnahe Erkennung von betroffenen Gebieten nach Schadereignis („Schnelldetektion, Hinweiskarte“) und Schadflächenerkennung bei Sturm, Waldbrand, Schädlingsfraß (Ergebnis möglichst innerhalb eines Monats),
- jährliche Berichte über Schadflächen, Schadholzmengen und ökonomische Bewertung basierend auf einem bundeseinheitlichen Verfahren für den gesamten Wald Deutschlands,
- Validierung und Qualitätssicherung der Daten nach bundeseinheitlichem Verfahren.

Insbesondere sollen folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Quantifizierung des Befalls und der Schäden (Fläche, Holzmenge)
 - Schnelldetektion für Schadens-Hinweisgebiete ab 0,5 ha,
 - Erkennung der Schadflächen ab einer minimalen Flächengröße von 0,25 ha (für jährliche Berichte),
- Klassifizierung der Ursachen (Sturm, Schnee- und Eisbruch, Trockenheit, Waldbrand, Forstschädlinge, Forstkrankheiten bzw. Komplexerkrankungen),
- Erstellen von bundesweiten Statistiken und Karten zu ausgewählten Zielgrößen,
- monetäre Bewertung der Schäden.

Mit dem Projekt FNEWs sollen die Voraussetzungen für die Implementierung eines fernerkundungsbasierten Erfassungssystems für Waldschäden erprobt und geschaffen werden, das nach positiver Evaluierung in den Dauerbetrieb übergeben soll. In dem Projekt sollen technische Methoden entwickelt werden, die belastbare Informationen zu Schäden am und im Wald sowie deren Ursachen für ganz Deutschland auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten liefern. Dazu sollen bekannte und bewährte Lösungsansätze in Verbindung mit möglichen

Neuentwicklungen auf Untersuchungsgebietsebene getestet und die erfolgversprechendsten in eine bundesweite, operationell einsetzbare Anwendung überführt werden. Ziel des Projektes ist auch ein Technologie- und Wissenstransfer, sodass das Thünen-Institut nach Projektende ein entsprechendes Monitoring- und Berichtssystem mit Unterstützung der Bundesländer aufbauen und fortführen kann.

1.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Die folgenden Absätze umfassen eine Kurzbeschreibung des methodischen State-of-the Art zu Beginn des Projektes bezüglich der Detektion von Schadflächen im Wald mittels optischer Sensoren, insbesondere auf Basis der im Projekt verwendeten Sentinel-2-Daten. Eine detailliertere Übersicht findet sich in Hirschmugl et al., 2017 und Puhm et al., 2020.

Aktuelle Erdbeobachtungsmissionen mit optischen Sensoren erfassen eine große Menge an Daten. Durch eine genaue Georeferenzierung und atmosphärische Korrektur der Satellitenbilder ist es möglich, pixelbasiert konsistente Zeitreihen für Waldanalysen zu erstellen. Diese Zeitreihen ermöglichen es erstmals, auch kleinere Veränderungen regelmäßig und möglichst zeitnah zu kartieren. Dabei kann sich „klein“ sowohl auf die räumliche Ausdehnung als auch auf das Ausmaß der spektralen Veränderung beziehen. Zeitnahe Kartierungen von spektral wenig markanten Änderungen stellen eine große Herausforderung an die Methodik dar, da die zugrundeliegenden Zeitreihen beobachteter Spektralwerte einige negative Eigenschaften haben. Dazu gehören einerseits Unsicherheiten in der Vorprozessierung, z. B. bei der geometrischen Registrierung, der radiometrischen Korrektur oder der zuverlässigen Maskierung von Wolken, Wolkenschatten und anderer Signalartefakte. Hinzu kommen Eigenschaften wie eine ausgeprägte Saisonalität des Signals sowie ein irreguläres Beobachtungsintervall. Wiederkehrende saisonale Muster können auf die Phänologie der Pflanzen und/oder unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen aufgrund von Topografie und Sonneneinstrahlung zurückgeführt werden. Da sich auch die jährlichen Temperatur- und Niederschlagsschwankungen auf die Phänologie auswirken, können die saisonalen Muster von Jahr zu Jahr variieren, was aber keine Änderung im Sinne eines Schadens ist.

Die zu Projektbeginn häufig verwendeten Algorithmen lassen sich danach unterteilen, wie sie mit den oben beschriebenen Merkmalen der Zeitreihen umgehen. Ansätze, die die Saisonalität nicht berücksichtigen, bilden eine erste Gruppe von Algorithmen. In diesem Zusammenhang stellen sowohl der Vegetation Change Tracker (VCT) (Huang et al., 2010) als auch der LandTrendr-Ansatz (Kennedy et al., 2010) weit verbreitete Algorithmen dar, die jedoch nicht für eine unterjährig, kontinuierliche Kartierung ausgelegt sind. Eine zweite Gruppe von Algorithmen berücksichtigt ausdrücklich die Saisonalität, indem sie Regressionsmodelle auf der Grundlage trigonometrischer Funktionen verwendet, um die Saisonalität der spektralen Signaturen unabhängig für jedes Pixel zu erfassen. Bei diesem Ansatz, der häufig auch als harmonische Regression bezeichnet wird, werden Perioden mit stabiler Landbedeckung als deterministische, kontinuierliche Funktion der Zeit modelliert. Unregelmäßige Stichprobenintervalle und Datenlücken sind daher unproblematisch, aber die deterministische Natur des Modells lässt keine Variationen des saisonalen Musters zwischen verschiedenen Jahren zu. Das saisonale Modell stellt einen Durchschnitt verschiedener Bedingungen dar, die innerhalb einer stabilen Periode auftreten, z. B. trockene und feuchte Jahre, späte und frühe Ausbrüche. Weit verbreitete Algorithmen in dieser Gruppe sind BFAST (Breaks for Additive Season and Trend) (Verbesselt et al., 2010) und seine Weiterentwicklung BFAST Monitor (Verbesselt et al., 2012) sowie der Continuous Change Detection and Classification-Algorithmus (CCDC), bei dem das ursprüngliche Konzept (Zhu et al., 2012b) erweitert wurde, um neben Wald auch andere Arten der Bodenbedeckung sowie einen Klassifizierungsrahmen einzubeziehen (Zhu et al., 2014). Ein dritter Algorithmus, der die harmonische Regression verwendet, nutzt die Residuen der Regression mit statistischen Qualitätskontrollkarten (Brooks et al., 2014).

Die dritte Gruppe von Algorithmen zeichnet sich dadurch aus, dass sie auch zwischenjährliche Schwankungen des saisonalen Musters berücksichtigt. Strukturelle Zeitreihenmodelle ermöglichen

die dynamische Zerlegung eines Signals in direkt interpretierbare Komponenten wie Trends, Zyklen und Saisonalität. Ihre statistische Behandlung basiert auf der Zustandsraumdarstellung und dem Kalman-Filter und wurde erstmals für die Zeitreihenanalyse in der Ökonometrie beschrieben (Harvey et al., 1989). Im Vergleich zum harmonischen Regressionsansatz ist das Modell nicht mehr deterministisch. Die Kalman-Filterung ist ein vielseitiges Verfahren zur Parameterschätzung, das optimale Schätzungen im statistischen Sinne liefert (Kalman, 1960). Diese Konzepte wurden von Joanneum Research aufgegriffen, um ein optimiertes strukturelles Zeitreihenmodell auf Basis des Kalmanfilters für Sentinel-2 Daten zu entwickeln (Puhm, 2018; Puhm et al., 2020). Dabei wurde die für harmonische Regressionsalgorithmen typische pixelbasierte Modellierung mit der Fähigkeit des Kalman-Filters zur dynamischen Anpassung des Modells auf der Grundlage neuer Beobachtungen kombiniert. Der neue Algorithmus ist weitgehend datengesteuert und wurde speziell für echtzeitnahe Kartierungen in web- oder cloudbasierten Überwachungsdiensten entwickelt, um auch ein großflächiges Roll-Out zu ermöglichen.

Zur Schnellerkennung von Sturmschäden mittels satellitengestütztem SAR gab es zu Projektstart einige wenige publizierte Fallstudien. Eriksson et al. (2012) und Thiele et al. (2012) berichteten über eine Empfindlichkeit der HH-Rückstreuung für geschädigte Gebiete in ALOS PALSAR L-Band, RADARSAT-2 C-Band- und TerraSAR-X X-Band-Daten. Der Anstieg der Rückstreuung aus geschädigten Gebieten im C-Band nach dem Ereignis wurde teilweise auf die erhöhte Oberflächenrauheit zurückgeführt. Ulander et al. (2005) testeten verschiedene räumliche Auflösungen zwischen 10 und 30 m von RADARSAT-1 und ENVISAT-ASAR C-Band-Daten zur Erkennung von Sturmschäden. Sie kamen zu dem Schluss, dass die räumliche Auflösung von 30 m aus ASAR-Daten nicht ausreichend war. Im Gegensatz dazu konnten geschädigte Gebiete teilweise mit RADARSAT-1 HH-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 10 m erkannt werden. Kurz vor dem Projektstart wurden zudem Fallstudien publiziert, die von erfolgreicher Erkennung mittels der zurzeit aktiven Satellitenmissionen berichteten. Ein schwellenwertbasierter Ansatz ermöglichte unter Verwendung von ALOS PALSAR L-Band-Daten die erfolgreiche Erkennung von Sturmschäden (Tanase et al., 2018). Ebenso wurde aufgezeigt, dass eine rasche Erkennung von Sturm- und Schneeschäden mittels Sentinel-1 C-band-Daten möglich ist (Rüetschi et al., 2019a; Tomppo et al., 2019). In keiner der genannten Studien wurden die Methoden jedoch großflächig evaluiert, sondern nur kleinere Studiengebiete bearbeitet.

Im Bereich der Ökonomie kann an verschiedene Vorarbeiten angeknüpft werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Rohstoffmonitoring Holz - Stoffliche und energetische Nachfrage nach Holz“ des Thünen-Institutes wurde von Zimmermann et al. (2018) die Einflussfaktoren für die Einlagerung von Rohholz nach Sturmkalamitäten als eine Marktreaktion multivariat analysiert. Caurila et al. (2015) analysierten die Einflussfaktoren zur Einlagerung oder Export als Marktreaktionen auf Sturmereignisse mit einem partiellen Gleichgewichtsmodell. In einem Teilprojekt des Verbundprojektes „Agrarrelevante Extremwetterlagen“ wurde ein ökonomisches Bewertungsverfahren für Trockenschäden an der Verjüngung und nach Sturmschäden entwickelt (Gömann et al. (2015: 204ff.)). Als weitere ökonomische Studien zur Bewertung von Waldschäden ist die Analyse von Kinnucan (2016) zu den Einflussfaktoren für Holzpreisentwicklungen nach Sturmschäden zu nennen. Sikora und Ukalska (2014) widmen sich ebenfalls der Analyse der Holzpreisentwicklung nach Waldschäden. Die Effekte von Waldschadensereignissen auf die Rohholzmärkte werden ebenfalls von Sikora (2017) analysiert. Basierend auf der Dempster-Shafer theory wird von Bernetti et al. (2011) ein Ansatz zur Abschätzung der wirtschaftlichen Waldschäden durch Klimawandel vorgestellt.

1.4 Planung und Ablauf

Das Projekt wurde durch ein internationales Konsortium bestehend aus den sieben nachfolgend aufgeführten Partnern aus den Bereichen Forstwirtschaft, Wissenschaft und Technologie

durchgeführt: Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH (JR-Österreich), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL-Schweiz), Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS) und Johann Heinrich von Thünen-Institut (TI). Das Thünen-Institut war mit dem Thünen-Institut für internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie (TI-WF) und dem Thünen-Institut für Waldökosysteme (TI-WO) am Projekt beteiligt. Die Projektleitung lag beim TI-WO.

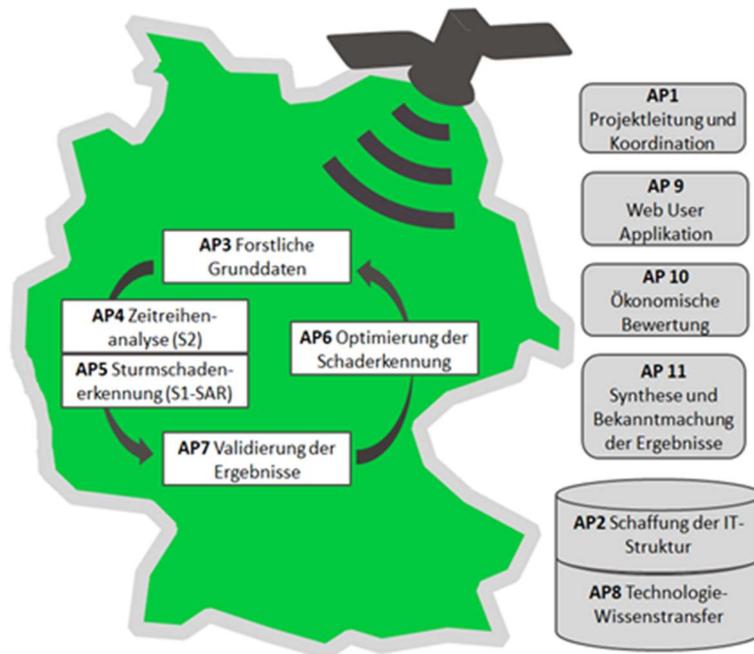


Abbildung 1: Übersicht der FNEWs-Arbeitspakete

Das Gesamtprojekt war in elf Arbeitspakete unterteilt (Abbildung 1), die von den Partnern des Projektkonsortiums durchgeführt wurden. Die entsprechenden Aufgaben, Zuständigkeiten und zu erarbeitenden Ergebnisse sind nachfolgend für die einzelnen Arbeitspakete jeweils in den einzelnen AP detailliert dargelegt. Aufgrund der individuellen Aufgaben im Arbeitspaket 6 wird dieses differenziert für die einzelnen Partner vorgestellt.

Die Startphase des Projektes war eine besondere Herausforderung, da die Zusammensetzung des Projektkonsortiums und die Vergabe der Aufträge an die Unterauftragnehmer im laufenden Projekt durchgeführt wurde. Die Stellenbesetzungen konnten daher erst im ersten Quartal 2021 erfolgen. Der zeitlich versetzte Einstieg der verschiedenen Projektpartner erforderte eine gut strukturierte Anfangsphase des Projektes, die jedoch einen größeren Zeit- und Arbeitsbedarf als gewöhnlich mit sich gebracht hat. Ebenso stellten die erhöhten Auflagen der Dokumentations- und Berichtspflichten des Projektträgers FNR eine Arbeitsmehrlast dar. Erschwerend kam hinzu, dass die anhaltenden Einschränkungen der Corona-Pandemie Einschränkungen der Projektarbeit mit sich gebracht haben. Die Einarbeitungs- und Kennenlernphase der Mitarbeitenden vollzog sich vollständig im Homeoffice. Projekttreffen konnten nur online per Videokonferenz abgehalten werden. Der Austausch, die Vorstellung und Präsentation der Projektarbeiten auf Tagungen und Konferenzen konnte nur sehr eingeschränkt erfolgen.

Durch entsprechende mehrfache Anpassungen der Zeit-, Arbeits- und Finanzpläne konnten die Projektergebnisse erfolgreich erreicht werden. Der für das Projektende ursprünglich geplante Abschlussworkshop musste entfallen. Die Ergebnisse des Projektes sollen daher an geeigneten Stellen publiziert und präsentiert werden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Seit Mitte 2022 ist die Servicestelle Fernerkundung im satellitengestützten Krisen- und Lagedienst (SKD) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) als zentrale Schnittstelle für die Beschaffung von hochaufgelösten Satellitenbildern für die Bundesverwaltung verantwortlich. Zu den Nutzern gehören sämtliche Einrichtungen des Bundes sowie das Thünen-Institut als Ressortforschungseinrichtung des BMEL. Neben der Beschaffung von höchstauflösten Satellitendaten verwaltet die Servicestelle den Datenkatalog sämtlicher über den SKD beschaffter Satellitendaten und steht als Ansprechpartner für Nutzende bereit. Das Projekt FNEWS gehört zu den ersten Nutzern der Servicestelle und konnte ab 2022 den gesamten Bedarf an Zusatzdaten in Kooperation mit dem BKG beschaffen. Im Rahmen der Zusammenarbeit wurden hoch- und höchstauflöste Satellitendaten zur Validierung verschiedener Projektprodukte beschafft und dem FNEWS-Projekt kostenfrei zur Verfügung gestellt. Die Kooperation und Nutzung des Angebots der Servicestelle war zum Zeitraum der Projektplanung und Konzeption nicht absehbar.

Entgegen der ursprünglichen Projektplanung wurde statt dem High Performance Cluster (HPC) des Thünen-Instituts die Serverumgebung der Plattform Copernicus Open Data and Exploitation Plattform Deutschland (CODE-DE) zur Prozessierung der Daten und Verwaltung der Ergebnisse aus dem Projekt FNEWS genutzt. CODE-DE wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) durch das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) finanziert und entwickelt. Die Plattform bietet insbesondere Behörden eine BSI-zertifizierte cloudbasierte Prozessierungsumgebung für Fernerkundungsdaten. Der Datenkatalog verfügt über einen aktualisierten Zugang zu Sentinel-Satellitendaten und den Copernicus Kerndiensten. Die Plattform ist seit 1. April 2020 online. Seit Mitte 2021 wurde in ersten Teststudien die Nutzbarkeit der Plattform CODE-DE zur Einrichtung des fernerkundungsbasierten Monitoringsystems von Waldschäden untersucht. Das Projekt FNEWS gehört zu den größten Nutzern der Plattform CODE-DE und ist im regelmäßigen Austausch mit dem DLR und dem CODE-DE Projektteam. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wurden unterschiedliche Daten-Infrastrukturen und Prozessierungslinien des Monitoringsystems auf CODE-DE entwickelt und implementiert.

2 Schaffung der IT-Infrastruktur

Zum Aufbau des bundesweiten Schadensmonitorings ist eine IT-Infrastruktur zur Prozessierung und Verwaltung von Geodaten erforderlich. Diese Daten-Infrastruktur muss die Anforderungen der zu implementierenden Softwaremodule erfüllen. Dazu wurden in der ersten Projektphase eine Bedarfserhebung und Serverspezifikation (Kapitel 2.1 und 2.2 0) durchgeführt. Im Anschluss wurde eine Systemarchitektur konzipiert und auf der Plattform Copernicus Data and Exploitation Plattform Deutschland (CODE-DE) eingerichtet (Kapitel 2.3). Auf dem konfigurierten Rechencluster wurden die Softwaremodule des Joanneum Research zusammen mit einer Datenbankstruktur implementiert.

2.1 Datenverarbeitungsleistung und Datenvolumen

Die Performance der Verarbeitungsumgebung ist essentiell für die Bearbeitungszeit der Software. Dabei ist die erforderliche Leistung vom Prozessierungslevel und der Phase der Prozessierung abhängig. In der ersten Phase wird das Modell mit historischen Daten berechnet. Diese Phase ist extrem verarbeitungsintensiv und erfordert eine hohe Rechenleistung (Tabelle 1). In der zweiten Phase wird das Modell mit aktuellen Daten erweitert. Diese Phase erfordert deutlich weniger Rechenleistung, da nur ~ 20 neue Szenen pro Tag aufgenommen werden. Ein gewisser Anteil davon entfällt für weitere Prozessierungsschritte durch einen zu hohen Wolkenanteil. In dieser Phase kann die Rechenleistung der virtuellen Maschine (VM) wieder erheblich reduziert werden.

Tabelle 1: Abschätzung der Datenverarbeitungsleistung pro Granule und Jahr

Beschreibung	Rechenleistung
Fmask: 1 Jahre x ca. 200 Szenen * 0.25 CPUh	50 CPUh
sen2cor: 1 Jahre x ca. 100 Szenen *0.5 CPUh	50 CPUh
stacking: 1 Jahre x ca. 100 Szenen *0.05 CPUh	5 CPUh
Co-Register: 1 Jahre x ca. 100 Szenen *0.6 CPUh	60 CPUh
Masking: 1 Jahre x ca. 100 Szenen *0.05 CPUh	5 CPUh
Terrain/BRDF: 1 Jahre x ca. 100 Szenen *1 CPUh	100 CPUh
Gesamt: (pro Granule)	270 CPUh

Das Gesamtdatenvolumen ist abhängig von der Speicherung der Zwischenprodukte und des verwendeten Kachelsystems. Die vorgestellten Hochrechnungen basieren auf dem Sentinel-2 Kachelsystem und führen zu einer Gesamtspeichermenge von 53 TB/ Jahr (Tabelle 2). Mittlerweile wurde im Projekt auf das LAEA-Kachelsystem umgestellt. Die Gesamtspeichermenge reduziert sich dadurch auf circa 30 TB/Jahr.

Tabelle 2: Abschätzung des Datenvolumens pro Prozessierungslevel und S2 Granule/Jahr (JR)

Prozessierungslevel	Speichervolumen
L1C	Eine Szene ca. 1GB (je nach Bewölkung), d.h. man muss mit maximal etwa 100GB pro Jahr und Granule rechnen.
L1CAux	Fmask ~1Mb -> 150 MB
L1D	150GB

L2A	50GB/Jahr/Granule (basierend auf der Annahme, dass nur die Hälfte der Szenen aufgrund der Wolkenbedeckung verwertbar ist)
L2AAux	75GB
L2B	60GB
L2C	60GB
L2D	60GB
L2E	60GB
L2F	abhängig von der Anzahl der zu berechnenden Indices: bei 10 Indices: ca. 100GB
Gesamt	715,150 GB

Zusätzlicher Speicherbedarf für Datensicherungen und Backups ist hierbei noch nicht berücksichtigt. Die Daten für die weiteren Prozessierungslevel (Level 3 und 4) sind hierbei noch nicht eingerechnet. Zukünftige Datenmengen, die für eine bundesweite Anwendung nach der Projektlaufzeit anfallen, müssen auf derselben jährlichen Basis von ca. 53 TB/y bzw. 30 TB/y noch hinzugerechnet werden. Grundlage für die Erhebung des Datenvolumens ist die Festlegung der Vorprozessierungsstufen.

Diese Abschätzungen und Hochrechnungen stellen sozusagen den „worst case“ dar, also eine dauerhafte Speicherung aller historischen Daten inklusive Zwischenprodukte. Analog zur benötigten Prozessorleistung gilt aber auch für den Speicherbedarf, dass dieser in der Anfangsphase, d.h. der Verarbeitung der historischen Daten, besonders hoch ist und dann stark abnimmt, sobald historische Zwischenprodukte wieder gelöscht werden können.

2.2 Serverspezifikation der Plattform CODE-DE

Entgegen der ursprünglichen Planung wurde statt dem High Performance Cluster (HPC) des Thünen-Instituts die Serverumgebung der Plattform Copernicus Open Data and Exploitation Plattform Deutschland (CODE-DE) zur Prozessierung und Verwaltung der Ergebnisse aus dem Projekt FNEWS eingesetzt. Die Plattform CODE-DE hat das Ziel, Nutzern in Deutschland, insbesondere Behörden, einen einfachen und schnellen Zugang zu Daten der Sentinel-Satelliten sowie den Copernicus Kerndiensten zu ermöglichen (<https://code-de.org/de/>). Die Plattform wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und dem DLR-Raumfahrtmanagement (RFM) finanziert und entwickelt. Betrieben wird die Plattform durch die Firmen CloudFerro und Pixely Technologies. Die Server befinden sich in einem BSI zertifiziertem Rechenzentrum in Frankfurt und bieten eine für Behörden sichere Arbeitsumgebung.

Über das Openstack-Dashboard können Nutzende auf Ressourcen, Produkte und Dienste der Plattform zugreifen. Im Rahmen der fortlaufenden Projektentwicklung von CODE-DE wird der Produktkatalog, sowie Funktionen und Anwendungen der Plattform kontinuierlich erweitert. Aufgrund der Anpassungen und Erweiterungen sind teilweise Verzögerungen durch unvollständige Datenkataloge oder geänderte Nutzerkonfigurationen nicht vermeidbar. Die Plattform ist seit 1. April 2020 online und bietet einen umfangreichen Datenkatalog an Satellitenbildern, Geodaten und Diensten. Die Ressourcenzuweisung der Plattform ist nutzerspezifisch. Bundesbehörden haben über den Rahmenvertrag des DLR kostenfreien Zugang. Ursprünglich wurden die Ressourcen als Kontingente mit festen Rechen- und Datenspeicherkapazitäten bereitgestellt. Im Rahmen einer Systemänderung wurde der Betrieb auf ein kreditbasiertes System umgestellt.

Im Projekt FNEWS wird ein Premium Plus Kontingent bzw. ein repräsentierendes Kreditbudget eingesetzt. Vorteile der Plattform liegen in dem direkten Datenzugriff auf das kontinuierlich aktualisierte Copernicus Sentinel-Datenarchiv. Dazu steht über die Plattform eine umfangreiche Prozessierungsumgebung bereit. Einschränkungen der Plattform bestehen in limitierten Kontingent- und Kreditgrenzen. Dabei führt die befristete Projektlaufzeit von CODE-DE zur größten

Unsicherheit für die Implementierung von Anwendungen und Diensten. Während der Projektlaufzeit von FNEWS bestand keine Alternative zur Verwendung von CODE-DE.

2.3 IT-Systemarchitektur auf CODE-DE

Für die Prozessierung der Software zur Waldschadenserkennung wurde auf CODE-DE ein Rechencluster, also ein Verbund von vernetzten Computern, eingerichtet. Das Linux-Cluster besteht aus virtuellen Maschinen, die im Batchbetrieb mit dem Work Load Manager (WLM) SLURM (Simple Linux Utility for Resource Management) verwaltet werden. Jede VM wird mit dem Betriebssystem Ubuntu 20.04 LTS vorkonfiguriert. Das Netzwerk besteht aus einer VM zur Verwaltung des zentralen Daten- und Softwarespeichers sowie mehreren VMs zur Prozessierung (Abbildung 2). Die Verwaltungseinheit wurde als NFS-Server eingerichtet, sodass die Prozessierungseinheiten als Klienten vernetzt sind. Über die Verwaltungseinheit sind der physische Datenspeicher „fnews-software“ und der logische Datenspeicher „fnews-daten“ im Netzwerk eingebunden. Durch die Netzwerkstruktur können alle Prozessierungseinheiten auf die zentrale Softwarekonfiguration zugreifen und Updates können zentral installiert werden. Die konfigurierte und mit der Impact-Software eingerichtete Prozessierungseinheit „fnews_pz_01“ wird als Klon für alle weiteren Prozessierungseinheiten verwendet. Dadurch kann das Rechencluster beliebig skaliert werden. Bedarfsgerecht können Prozessierungseinheiten erweitert oder reduziert werden. Die Gesamtheit der Prozessierungseinheiten werden über ein SLURM Batch System betrieben. SLURM ermöglicht die Optimierung der Hardware-Ressourcen durch bedarfsgerechte Zuweisung.

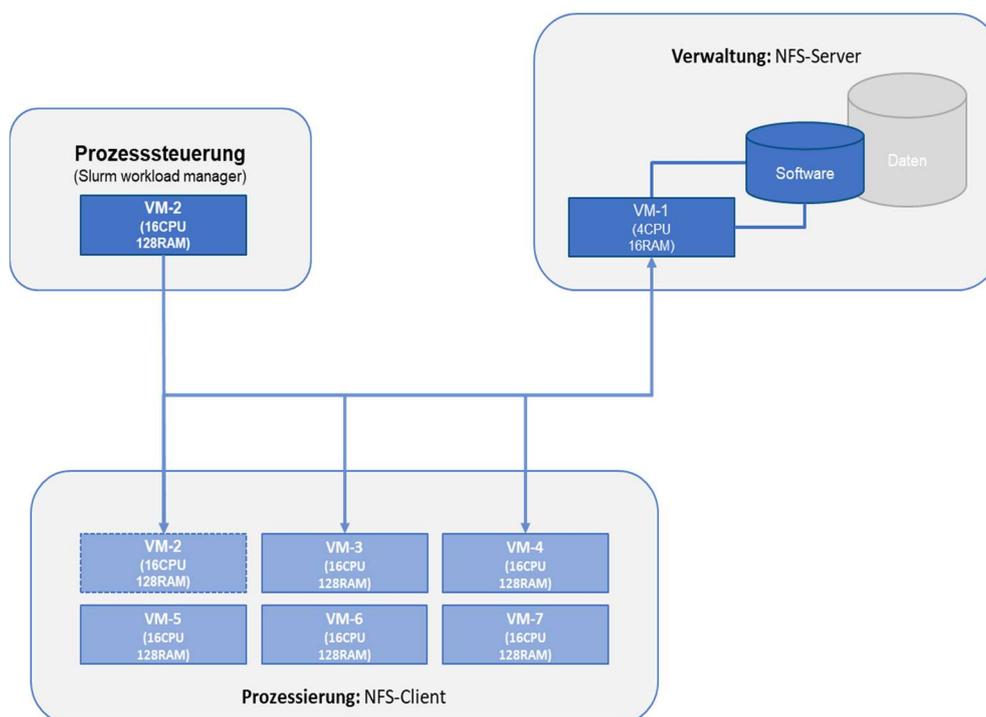


Abbildung 2: Schematische Darstellung der IT-Systemarchitektur auf CODE-DE

Aufgrund des anwachsenden Datenspeicherbedarfs wurde ein Logical Volume Manager (LVM) zusammen mit einer logischen Datenspeichergruppe (VG) und einem logischen Datenträger (LV) eingerichtet. Das LVM ermöglicht es, physische Festplatten und Partitionen zu einem flexiblen, virtuellen Datenspeicher zusammenzufassen. Durch die Verwendung der Datenspeichergruppe können Speicherplatzänderungen dynamisch vorgenommen werden, ohne das Dateisystem zu beeinträchtigen, was eine effiziente Verwaltung von Speicherplatz und Datensicherung ermöglicht. Insgesamt wurde der Datenspeicher in drei physische Speicher von jeweils 40 Terrabyte unterteilt,

wobei die physischen Datenspeicher über das Openstack-Dashboard von CODE-DE eingerichtet wurden. Erweiterungen sollen in Partitionsgrößen von 30 bis 40 Terrabyte eingebunden werden. Das LVM kann über die Software Gparted verwaltet werden. Darüber können physische Datenspeicher entfernt oder erweitert werden.

Das Datenbankschema für die Speicherung der anfallenden Raster- und Vektordateien wird durch eine Verzeichnisstruktur realisiert, welche an die Prozessierungslevel angelehnt wurde (Tabelle 1). Alle im Rahmen des Projektes entstandenen Daten auf der Prozessierungsplattform CODE-DE unterliegen diesem Datenbankschema. Von einem Basisverzeichnis ausgehend werden Unterverzeichnisse für jeden Prozessierungslevel angelegt. Um die Anzahl der Dateien pro Unterverzeichnis zu reduzieren werden sie nach Granule und Jahr aufgeteilt. Die darin enthaltenen Raster und Vektordatensätze folgen ebenso einem einheitlichen und definierten Namensschema, um eine einfache Identifikation der Daten zu gewährleisten.

Tabelle 3: Prozessierungslevel Sentinel-2 Pre-Processings (JR)

Prozessierung	Beschreibung
1C	TOA Daten wie sie vom Sentinel 2 Provider zur Verfügung gestellt werden. Sie dienen als Startpunkt für alle weiteren Prozessierungsschritte
1CAux	Ergebnis der FMask Prozessierung, d.h. eine Maske mit 20m Auflösung welche jedem gültigen Pixel einer Szene ein Klassenlabel „Clear Sky“, „Shadow“, „Snow“ oder „Cloud“ zuordnet
1D (optional)	Die Level 1C Daten als 10-Kanal Bildstapel mit ausmaskierten Wolkenbereichen, d.h. im Bild werden alle als bewölkt (oder optional auch als Schnee) detektieren Gebiete als no-data markiert.
2A	Atmosphärisch korrigierte BOA Daten welche mittels sen2cor prozessiert werden. Wird immer auf einen gültigen L1C Datensatz angewendet. Es ist möglich die Datenmenge zu reduzieren, in dem nur Szenen mit einer maximalen Wolkenbedeckung prozessiert und gespeichert werden.
2AAux	Beinhaltet extrahierte Versionen von einigen wichtigen Daten aus der zugehörigen L2A Szene, also 10-Kanal Bildstapel, Sonnenstandswinkel (5km Auflösung) Sensorwinkel (5km Auflösung) und optional Informationen wie „sen2cor scene classification“, cloud confidence und dergleichen. Der 10-Kanal Bildstapel welcher alle Spektralkanäle mit 10 oder 20m räumlicher Auflösung aus den Level 2A Daten beinhaltet. Alle Kanäle in diesem Bild sind falls nötig per „6-point bicubic“ Interpolation auf 10 m übergeführt.
2B	Ergebnis einer Ko-registrierung der 2B Daten zu einem „global reference Image“. Verwirklicht durch „polynomial resampling“ auf Basis von korrespondierenden Punkten welche mit speziellen Punkt-Matching Techniken ermittelt wurden. Grundvoraussetzung hierfür wäre die Verfügbarkeit einer Global Referenz entweder aus einer offiziellen Quelle (ESA) oder durch manuelle Selektion von geeigneten Sentinel 2 Szenen.
2C	Der L2A 10-Kanal Bildstapel mit ausmaskierten Wolkenbereichen wie sie durch die Fmask Ergebnisse aus 1CAux berechnet wurden.
2D	Radiometrische Gelände- und BRDF Korrektur. Anwendung der besten zur Verfügung stehenden Methoden, um radiometrische Ungenauigkeiten, welche durch Topographische Effekte verursacht werden, auszugleichen. Auch Effekte, welche durch unterschiedliche Sichtwinkel des Sentinel 2 Sensors bei Aufnahmen aus verschiedenen relativen Orbits entstehen, können minimiert werden.

3 Untersuchungsgebiete und forstliche Grunddaten

3.1 Auswahl der Untersuchungsgebiete

Die Methodenentwicklung wurde in Untersuchungsgebieten durchgeführt, um den Daten-Prozessierungsaufwand in dieser Phase zu begrenzen. Ein Untersuchungsgebiet ist laut Projektdefinition jeweils eine ganze Sentinel-2 Kachel. Diese sind im Sentinel-2 Tiling Grid definiert und basieren auf dem UTM (Universal Transverse Mercator) System, das die Erde in 60 Zonen einteilt. Sie haben eine Fläche von jeweils 110x110 km².

Auf Basis vorkommender Schadensereignisse, der geografischen Lage und bestehender Referenzdatenverfügbarkeit wurden pro Projektpartner jeweils ein bis zwei Kacheln als Untersuchungsgebiet ausgewählt. Ziel war es dabei auch, dass sie insgesamt ein breites Spektrum an Baumarten, Altersklassen, Waldstrukturen und Standortbedingungen abdecken. In Niedersachsen wurde basierend auf diesen Kriterien die Kachel 32UNC ausgewählt, in Sachsen 33UUS und 33UVS, in Bayern 32UNA und 32UPA und in Baden-Württemberg die Kacheln 32UMU und 32TMT (Abbildung 3). Insgesamt umfassen sie rund 2.407.000 ha Waldfläche (22 % der Waldfläche Deutschlands).

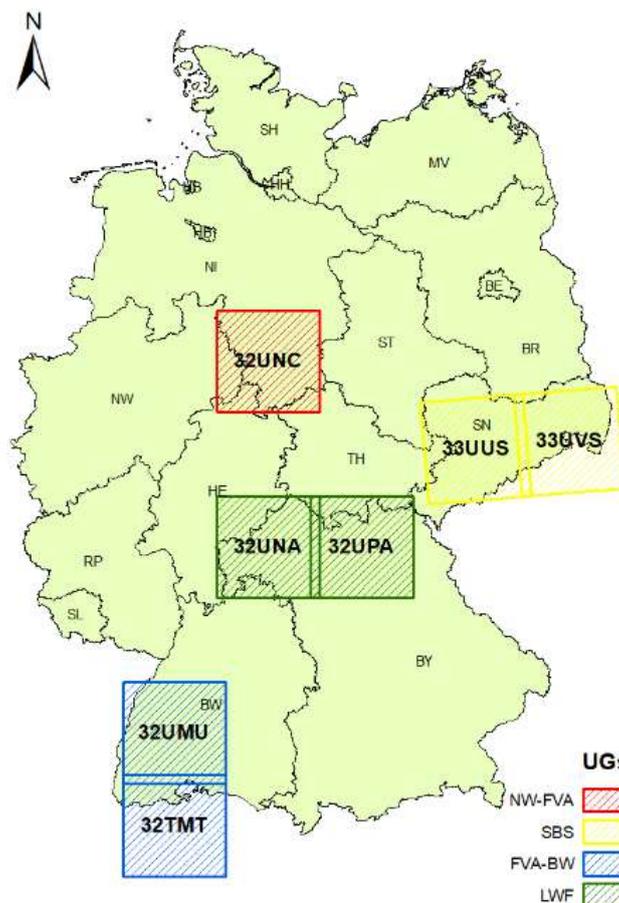


Abbildung 3: Die FNEWs-Untersuchungsgebiete und deren Sentinel 2-Kachelabdeckung

Die Untersuchungsgebiete 32UMU und 32TMT in **Baden-Württemberg** werden im Wesentlichen durch das Oberrheintal im Westen, das Schwarzwaldgebirge in der Mitte von Nord nach Süd, seine Ausläufer und die angrenzende Schwäbische Alb im Osten definiert. Die Höhenlage liegt zwischen 119 m und 1493 m ü.NN, die jährliche Niederschlagsmenge liegt zwischen 508 mm und 2015 mm (DWD, 1981–2010). Etwa 77 % des Untersuchungsgebiets sind von Wald bedeckt, von dem der

größte Teil kommerziell bewirtschaftet wird. Ausnahmen sind der Nationalpark Schwarzwald. Fichte (*Picea abies*) und Weißtanne (*Abies alba*) sind die dominierenden Arten im Schwarzwald, während die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) in den meisten anderen Teilen des Untersuchungsgebietes dominiert. Weitere Arten sind Eiche (*Quercus spp.*) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*). Die meisten Waldschäden in dieser Region sind auf Borkenkäfer (*Scolytinae*) zurückzuführen. Die Kombination aus mehreren trockenen Sommern und schweren Stürmen, darunter Eleanor (03.01.2018) und Friederike (18.01.2018), schwächte den Wald, was zu einem Borkenkäferbefall führte. Verstreute kleinräumige Waldstörungen im ganzen Land sind die Folge, wobei es aufgrund der Baumartenzusammensetzung und der Geografie zu einigen Unterschieden in den Verbreitungsmustern im Land kommt.

Die Untersuchungsgebiete 32UNA und 32UPA in **Bayern** sind geprägt von hügeligem Gelände und kleinen Gebirgszügen, wie dem Frankenwald, mit Höhenlagen zwischen 102 m und 1045 m ü.NN. Die durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge liegt zwischen 530 mm und 1338 mm (DWD, 1981–2010). Etwa 40 % der Fläche sind Wald, der sowohl mit Misch- als auch mit Reinbeständen bestockt ist. Dominierende Baumarten sind Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Eiche (*Quercus spp.*) in der Mitte, Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) im Süden und Gemeine Fichte (*Picea abies*) im Osten. In diesem Untersuchungsgebiet gab es eine Vielzahl von Störungstypen, darunter Windwurf durch die Sommerstürme Fabienne (23.09.2018) und Bernd (18.08.2019), Komplexkrankheiten an Buchenbeständen im Jahr 2019, Befall mit Schwammspinner (*Lymantria dispar*) an Eichenbeständen in den Jahren 2018 und 2019 und anhaltender Borkenkäferbefall (*Scolytinae*) von Fichten seit 2019.

Das Untersuchungsgebiet 32UNC umfasst den südlichen Teil **Niedersachsens** mit Höhenlagen zwischen 5 m und 927 m ü. NN und einer mittleren Jahresniederschlagsmenge von 585 mm bis 1760 mm (Deutscher Wetterdienst DWD, 1981–2010). Etwa 37 % der Fläche sind von Wäldern bedeckt. In tieferen Lagen ist das Gebiet von Mischwäldern geprägt, die von der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) dominiert werden, welche etwa 68 % der gesamten Waldfläche ausmacht. Homogene Fichtenbestände (*Picea abies*) kommen vor allem in höheren Lagen im Harz vor, welcher zum großen Teil als Nationalpark geschützt ist. Die Wälder in dieser Region wurden vom Sturmtief Friederike (18.01.2018) stark geschädigt. In den letzten Jahren wurden die Fichtenbestände stark von Borkenkäferbefall (*Scolytinae*) betroffen.

Die Untersuchungsgebiete 33UUS und 33UVS in **Sachsen** umfassen mehrere Mittelgebirge, vor allem das Erzgebirge, dessen höchster sächsischer Gipfel Fichtelberg mit 1215 m ü.d.M. liegt. Der nördliche Teil Sachsens zeichnet sich durch flaches Gelände mit einer Mindesthöhe von 73 m ü. NN aus, während die zentrale Region hügeliges Gelände aufweist, das dem Gebiet eine ausgeprägte Landschaftsform verleiht. Die jährliche Niederschlagsmenge in Sachsen liegt zwischen 562 mm und 1242 mm (DWD, 1981–2010). Etwa 28 % der Untersuchungsfläche in Sachsen sind Wald. Die vorherrschenden Baumarten in der Region sind die Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) im Norden und die Gemeine Fichte (*Picea abies*) im Süden, die sowohl in Mischwäldern als auch in Reinbeständen gedeihen. Das Untersuchungsgebiet umfasst den Nationalpark Sächsische Schweiz, in dem die Waldbewirtschaftung in der Kernzone streng auf Verkehrssicherung entlang von Straßen und Wanderwegen beschränkt ist. Der Wintersturm Friederike (18.01.2018) und der Herbststurm Fabienne (23.09.2018) führten zu gravierenden ökologischen und ökonomischen Verlusten in den sächsischen Wäldern. Borkenkäferbefall (*Scolytinae*) in den Folgejahren führte sowohl zu vereinzelt Schäden als auch zu erheblichen Störereignissen.

3.2 FNEWs-Walddefinition & weitere Definitionen

Eine eindeutige **Walddefinition** wird für die Ableitung von Waldschadensflächen zur Maskierung aller Nichtwaldflächen benötigt. Die Walddefinition der Bundeswaldinventur dient primär der terrestrischen Erhebung der forstlichen Inventurdaten im Gelände. Damit ist diese Definition nicht auf eine Erhebung des Waldes mittels Fernerkundung ausgelegt. Eine direkte Umsetzung der

Walddefinition mit Fernerkundungsdaten ist daher nicht möglich, da der BWI-Wald eine Kombination aus Landbedeckung und Landnutzung ist.

Da die Fernerkundung sensitiv auf Landbedeckung und nicht Landnutzung ist, sollte für das Projekt die Walddefinition anhand von quantifizierbaren und technisch umsetzbaren Kriterien festgelegt und umgesetzt werden. Dies sind folgende Parameter: *Wald ist eine mit Bäumen bestockte Landfläche mit einer Baumkronenüberdeckung von mehr als 10 %, grösser als 0,1 Hektar und einer Mindestbreite von 10 m.* Auf die Einbeziehung der Mindesthöhe der Bestockung wurde bewusst verzichtet, da kein bundesweiter Datensatz mit dieser Information vorhanden war. Unbestockte Waldflächen (vorübergehend unbestockt oder Nichtholzboden) werden durch diese Definition bewusst ausgelassen, da diese nicht relevant sind für das Projektziel.

Als **Schadensgebiet** bezeichnen wir im Projekt eine Region innerhalb von Untersuchungsgebieten, in dem durch ein oder mehrere Ereignisse zahlreiche Waldschäden auftreten. Diese bilden die Grundlage für die Referenzdatenerhebungen.

Als **Schadfläche** bezeichnen wir im Projekt ein einzelnes Polygon mit einer vollgeschädigten Fläche >0.25 ha. Schadflächen im Kontext der Referenzdatenerhebung liegen i.d.R. innerhalb von Schadensgebieten und immer innerhalb von Untersuchungsgebieten. Schadflächen können sowohl stehendes wie liegendes Totholz aufweisen oder bereits aufgearbeitete Kahlfächen sein.

Im Rahmen der Referenzdatenerhebung werden **Schadpolygone** kartiert und attribuiert. Die Schadpolygone werden auf Basis eines definierten Aufnahmeschlüssels erstellt, dabei sollen unterschiedliche Schadursachen und Schadausmaße nach spezifischen Mindestgrößen kartiert werden. Die kleinste Mindestgröße von 0,1 ha bilden flächige Borkenkäferschäden, eine Maximalgröße wurde nicht festgelegt.

3.3 Definition der Anforderungen an Referenzdaten

Um einen möglichst gut verwertbaren Referenzdatensatz mit effektivem Ressourceneinsatz gewinnen zu können, wurde zu Beginn des Projekts intensiv daran gearbeitet, die nötigen Anforderungen an die Referenzdaten zu definieren. Dazu wurden Attribute bestimmt und definiert, Mindestgrößen und -anzahlen bestimmt und Beispiele generiert.

Im Rahmen des Projektes werden die Referenzdaten nach ihrer zeitlichen Abdeckung unterschieden. Forstliche Schadereignisse aus den Jahren 2018, 2019, 2020 (vor Projektbeginn) sind insbesondere als Trainingsdaten für die Klassifikation und für die Methodenentwicklung relevant. Diese werden im Projekt als **historische Referenzdaten** bezeichnet. Die historischen Referenzdaten wurden auf Basis von bereits aufgenommenen Daten und existierenden Erhebungen erstellt.

Neu erhobene Daten zu Schadereignissen aus den Jahren 2021 und 2022 (während der Projektlaufzeit) werden als **aktuelle Referenzdaten** bezeichnet. Zur Erfassung der aktuellen Referenzdaten wurden teils eigene Datenerhebungen (Befliegung, Begehung, VHR-Satellitenbilder) durchgeführt.

Die **Relevanz und Priorität möglicher Attribute** der Referenzdaten für die Arbeitspakete 4 und 5 wurden durch gemeinsame Besprechungen und eine Abfrage in der Projektanfangsphase eingeordnet. Dadurch konnten sowohl essenzielle als auch unwichtige Attribute identifiziert werden und so eine effiziente Referenzdatenerfassung ermöglicht werden.

Die Folgenden **Attribute** wurden für die Referenzdaten erfasst:

Schadtyp - beschreibt die Art oder die Ursache des Schadens. Neben biotischen und abiotischen Waldschäden wurden auch regulärer Holzeinschlag sowie ungeschädigte Flächen erfasst. Die meisten Referenzflächen sind vom Typ *Borkenkäfer*, geschädigte Nadelbaumbestände mit hoher Wahrscheinlichkeit für Vitalitätsverlust durch Borkenkäferbefall. Optional sind einige dieser Flächen

weiter untergliedert in die Stufen *Green Attack*, *Red Attack* und *Grey Attack*. Sie beschreiben die Phase des Befalls von initial bis fortgeschritten. Der Schadtyp *Komplexerkrankungen* wurde für Flächen vergeben auf denen Trockenstress in Zusammenspiel mit Schaderregern wie der Nonne als Hauptschadensursache ausgemacht wurde. *Schwammspinner* wurde vergeben für Schäden in Eichenbeständen bei denen nach einem temporären Laubverlust eine erneute Begrünung stattfand. Von den beiden letztgenannten Typen kamen im den Untersuchungsgebieten verhältnismäßig wenig Schadflächen vor. Der Typ *Sturmwurf* wurde für Flächen nach Sommer- und Winterstürmen in den Untersuchungsgebieten vergeben. *Unbekannter Schadtyp* bezeichnet Flächen bei denen es sich um Schadflächen handelt, bei denen der Typ aber nicht eindeutig zugewiesen werden konnte. Dies war zum Beispiel häufig der Fall, wenn nach einem Sturm große Schadflächen ersichtlich waren, welche aber bereits geräumt wurden. Sehr wenige Referenzdaten waren für regulären *Holzeinschlag* vorhanden. Als Referenzflächen wurden innerhalb jedes Untersuchungsgebietes auch *ungeschädigte Flächen* ohne ersichtliche Schäden ausgewiesen.

Aufarbeitungszustand - definiert den Zustand der Schadfläche zum Zeitpunkt der Referenzdatenerhebung. Hier wurde zwischen *ungeräumten* und bereits *aufgearbeiteten* Flächen unterschieden. In weiteren Attributen (*Datum_aufgearbeitet*, *Datum_unaufgearbeitet*) wurde auch der Zeitpunkt der Flächenbearbeitung weiter eingegrenzt.

Schadausmaß - erfasst den prozentualen Anteil der Schäden in der Referenzfläche. Beim Schadensausmaß unterscheiden wir zwischen *vollgeschädigten* ($\geq 90\%$) und *teilgeschädigten* ($< 90\%$) Flächen. Im Rahmen der Referenzdatenerhebung wird zudem zwischen Schadpolygonen mit *flächigen Schäden* ($\geq 90\%$ Schaden im Schadpolygon) und Schadpolygonen mit *Streuschäden* ($\geq 31\%$ und $< 90\%$ Schadfläche) unterschieden. Streuschäden werden basierend auf dem prozentualen Schadensausmaß in die Kategorien $\geq 31-60\%$ und $\geq 61-90\%$ Schadflächenanteil untergliedert. Die Mindestgröße für Schadpolygone mit Streuschäden beträgt 1 ha. Die Mindestgröße für flächige Schadpolygone beträgt 0.25 ha für Sturmwürfe, ca. 0.1 ha für Borkenkäferbefall, 1 ha für Waldbrandflächen und 0.5 ha für Komplexerkrankungen mit einer Mindestbreite von 20 m.

Schaddatum - beschreibt das Datum an dem der Schaden zum ersten Mal erfasst wurde, also den spätestmöglichen Eintritt. Daher ist es oftmals gleich mit dem Aufnahmedatum. Eine genaue Bestimmung des Schaddatums ist meist nicht möglich, da hierfür eine zeitlich hochaufgelöste Referenzdatenreihe nötig wäre. Eine Ausnahme bilden hier Sturmschäden. Da bei großen Stürmen das genaue Datum bekannt ist, ist die Wahrscheinlichkeit bei Flächen mit Sturmschadenscharakteristika für dieses Schaddatum besonders hoch und wurde deshalb auch im Nachgang diesen zugeordnet.

Aufnahmedatum – beschreibt das Datum der Aufnahme der verwendeten Referenzdaten.

Referenzmethode – beschreibt die Methode der Referenzdatenerfassung, um einen Anhaltspunkt über die Sicherheit der Attributbestimmung zu bekommen. Es kommen die Typen *terrestrisch*, *Luftbilddauswertung*, *Drohnenbilddauswertung* und *Satellitenbilddauswertung* vor. Der mit Abstand größte Teil der Referenzdaten wurde basierend auf Luftbildern ausgewertet.

Waldtyp - beschreibt die Baumartenzusammensetzung der Schadfläche vor Schädigung. Dieser wird nach Möglichkeit unterschieden in *Fichte* ($>90\%$), *Kiefer* ($>90\%$), *sonstiger Nadelwald* (umfasst alle Nadelbaumarten $>90\%$) *Laubwald* ($>90\%$) und *Laubnadel- sowie Nadellaubmischwald*.

Mittlere Oberhöhe - beschreibt die mittlere Bestandesoberhöhe vor Schädigung. Sie wurde abgeleitet aus einem normalisierten digitalen Oberflächenmodell und auf volle Meter gerundet.

Überschirmungsprozent - beschreibt näherungsweise den prozentualen Überschirmungsgrad der Baumkronen vor dem Schadereignis in 10 % - Schritten und wird in Dezimalklassen angegeben.

Neubegrünung - beschreibt den prozentualen Anteil an Wiederbegrünung innerhalb der Schadflächen nach einem Primärschaden. Dies kommt bei einer Schädigung durch die Nonne vor.

Neben den manuell kartierten Attributen wurden eine Reihe weiterer Attribute automatisiert für alle Referenzdaten abgeleitet, dazu gehören unter anderem Schlüsselattribute (**ID**), **Flächengrößen** sowie **Neigung** und **Exposition**.

Für die benötigte **Mindestanzahl an Referenzdaten** wurde je eine Matrix für Sturmschäden und sonstige Schäden erstellt, in denen eine Mindestanzahl an Flächen unter verschiedenen Bedingungen als Zielvorstellung definiert wurde. Für die Sturmschäden sollten Referenzdaten nach Möglichkeit jeweils für Sommer- und Winterstürme mit flächigen und Streuschäden in verschiedenen Waldtypen, Überschirmungsgraden und Expositionen bereitgestellt werden. Bei den sonstigen Schäden wurde eine Anzahl getrennt nach Waldtypen für flächige und gestreute Borkenkäferschäden sowie Komplexerkrankungen und zusätzlich noch eine Gesamtzahl großflächiger Waldbrandschäden festgelegt.

3.4 Anwendung forstlicher Daten und Zusatzdaten – bundes-/europaweit

Für das Projekt wurden mehrere digitale Höhenmodelle verwendet. In erster Linie kam das Digitale Geländemodell mit einer Gitterweite von 10 m (DGM10) des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) zum Einsatz. Für die Vorprozessierung der Sentinel-Daten, Analysen und Vergleiche standen jedoch auch die drei weiteren bundes- respektive europaweiten Höhenmodelle Digitales Geländemodell mit Gitterweite von 25 m (DGM25), Copernicus *European Digital Elevation Model* (EU-DEM) und Copernicus DEM (COP-DEM) zur Verfügung. Für das AP5 war dies gefordert, um den Einfluss der Geländemodellgenauigkeit und des Geländemodelltyps zu evaluieren. Bezüglich der Genauigkeit unterscheiden sich die Höhenmodelle in der räumlichen Auflösung und der vertikalen Genauigkeit. Bezüglich des Geländemodelltyps handelt es sich bei den DGMs um digitale Geländemodelle und bei den europaweiten um digitale Oberflächenmodelle. Eine Übersicht der Unterschiede ist in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Höhenmodelle

Name, Herausgeber	Typ	Gitterweite [m]	Vertikale Genauigkeit [m]
Digitales Geländemodell Gitterweite 10 m (DGM10), BKG	DGM	10	± 2
Digitales Geländemodell Gitterweite 25 m (DGM25), BKG	DGM	25	± 3
European Digital Elevation Model v1.1 (EU-DEM), Copernicus	DOM	25	± 7 (RMSE)
Copernicus DEM (COP-DEM), Copernicus	DOM	10 (für Variante EEA-10)	<4m (90% linear error)

Zu Beginn des Projektes war keine flächendeckende Baumartenkarte für Deutschland verfügbar. Bundesweit verfügbare Daten waren das Basis-DLM-Ebene „VEG02“ und der HRL Dominant Leaf Type von Copernicus. Aus diesem Grund wurde parallel zum Projekt eine deutschlandweite Baumartenkarte am TI-WO entwickelt. Die Karte und weiterführende Informationen sind unter Blickensdörfer et al. (2022) zu finden.

3.5 Beschaffung und Aufbereitung Referenzdaten

Für die Ableitung der Referenzdaten wurden von den Projektpartnern forstliche Daten und weitere Zusatzdaten genutzt. Diese und weitere Daten wurden soweit möglich den anderen Projektpartnern zur Verfügung gestellt, um detailliertere Auswertungen, eine ökonomische Schadensmodellierung, ein verbessertes Modelltraining und eine Modellevaluation zu ermöglichen. Diese Daten beinhalten unter anderem Orthofotos, hochaufgelöste Satellitenbilddaten, detaillierte Höhenmodelle (Geländemodell und Oberflächenmodell), Forsteinrichtungsdaten, fernerkundungsbasierte Baumartenklassifizierungen, Holzvorratskarten und Waldmasken.

In **Baden-Württemberg** wurden Referenzdaten aus den Jahren 2018, 2019 und 2020 sowie in einem kleinen Schadgebiet auch Daten von 2021 aufgenommen. Insgesamt wurden dazu 3849 Polygone digitalisiert. Hauptdatengrundlage für die Digitalisierung der Referenzdaten waren die vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL) in Auftrag gegebenen Luftbildbefliegungen. Neben den amtlichen Aufnahmen wurden auch Aufnahmen vom Nationalpark (NLP) Schwarzwald genutzt, welcher durch Luftbildbefliegungen in jährlichem Turnus aufgenommen wird. Für die Erfassung von Sturmschäden durch den Wintersturm Burglind am 3. Januar 2018 wurden für den Landkreis Waldshut zwei Aufnahmen des Satelliten PlanetScope mit einer Auflösung von 3 m beschafft. Eine Aufnahme wurde vor dem Sturm am 31. Oktober 2017 aufgenommen, die zweite nach dem Sturm stammt vom 7. Mai 2018. Zur Erfassung der Referenzdaten wurden mehrere, über das Untersuchungsgebiet verteilte Schadensgebiete aus unterschiedlichen Jahren definiert.

In **Bayern** wurden 3089 Referenzpolygone in fünf Teilgebieten der Untersuchungsgebiete zu verschiedenen Schadtypen generiert. Die Waldschäden nach Sommersturm Bernd (18.08.2019) wurden basierend auf Luftbildern von kurz vor und nach dem Sturm generiert, die für Sommersturm Fabienne (24.09.2018) basierend auf Bilddaten der Landesbefliegung. Für die Referenzdatenerstellung zu Komplexerkrankungen (2019) im Gebiet Waldbrunn konnte auf vorliegende Kartierungsergebnisse (KI-basiert) der Firma IABG zurückgegriffen werden. Diese wurden kontrolliert und adaptiert. Im Bereich Uffenheim wurden Schäden des Schwammspinners kartiert. Besonders bei diesen Schäden ist, dass sich ein Großteil der befallenen Bäume bis August bereits erholt hatte und in den Aufnahmen kurze Zeit später bereits wieder belaubt war. Weitere Komplexschäden und Schwammspinnerfraß wurden in einem anderen Gebiet für die Jahre 2019-2021 manuell kartiert. Und auch im Frankenwald wurden Borkenkäferschäden in den Jahren 2019-2021 manuell kartiert.

In **Niedersachsen** konnten als Ausgangsbasis für die Aufbereitung historischer Referenzdaten auf die großflächige Kartierung von Waldschäden aus einem vorherigen Projekt (MiStriKli - Minimierung des Sturmschadensrisikos in Wäldern vor dem Hintergrund des Klimawandels) zurückgegriffen werden. Darin wurden Schäden nach Sturm Friederike in einem Großteil des Untersuchungsgebietes detailliert und vollflächig zu den Zeitpunkten Februar 2018, Februar 2019 und Oktober 2019 kartiert. Dazu wurden einerseits Orthobilder aus der Landesbefliegung genutzt und des Weiteren durch die NW-FVA im Auftrag der Niedersächsischen Landesforsten (NLF) eigene Luftbildbefliegungen in Südniedersachsen durchgeführt. Die erstellten Schadflächenkartierungen wurden mit weiteren Daten (Baumartenkartierung, Oberflächenmodell und Forsteinrichtungsdaten) verschnitten, um Referenzdaten nach den projekteigenen Anforderungen ableiten und filtern zu können. Daraus wurde ein Datensatz an historischen Referenzdaten mit 11267 Polygonen erstellt.

In **Sachsen** wurden primär Sturmschäden und Borkenkäferschäden aus den Jahren 2018, 2019 und 2020, aber auch Komplexerkrankungen und Schäden durch Trockenheit erfasst. Die Referenzdaten für Sturmschäden basieren auf den erfassten Auswirkungen der Stürme Friederike (18.01.2018) und Fabienne (23.09.2018), bei denen Daten aus einer bestehenden Kartierung übernommen werden konnten. Die Referenzdaten für den Schadtyp Borkenkäfer wurden im Rahmen des Projektes basierend auf Daten der Landesbefliegung des GeoSN (Landesamt für Geobasisinformation Sachsen) neu digitalisiert. Insgesamt wurden 1760 Flächen in den Datensatz aufgenommen. Davon sind 1183 dem Schadtyp Sturmwurf zuzuordnen, 433 Flächen sind dem Schadtyp Borkenkäfer zuzuordnen und 144 Elemente sind ungeschädigte Waldflächen.

3.6 Baumartenkarten für die Untersuchungsgebiete

Unter einer Baumartenkarte wird eine Karte verstanden, welche für eine Waldfläche die dominierende Baumart anzeigt. Dies können einerseits Karten für spezifische Arten sein, aber auch aggregierte Produkte, welche den Mischungsgrad von verschiedenen Baumarten in einer Waldfläche angeben. Die meisten verfügbaren Produkte unterscheiden jedoch nicht nach Baumarten, sondern nur nach Waldtyp. Dabei wird meist zwischen Laub-/Nadel-/Mischwald unterschieden, wobei die Grenzwerte für Mischwald definiert werden müssen. Baumartenkarten liefern essentielle Informationen für die Detektion von Schadflächen durch Holzschädlinge, da einzelne Schädlinge oft nur eine bestimmte Baumart befallen. Ebenso können diese Zusatzinformationen für die Entwicklung des Zeitreihenmodells genutzt werden. Da zu Beginn des Projektes keine deutschlandweite Baumartenkarte verfügbar war, wurde geprüft, welche Daten für die Untersuchungsgebiete verfügbar sind.

Für die Untersuchungsgebiete in **Baden-Württemberg** wurde eine Laub-Nadel-Mischwaldkarte erstellt. Das Modell zur Berechnung der Laub-Nadel-Mischwaldkarte basiert auf Sentinel-2 Daten. Neben einer atmosphärischen Korrektur der Daten wurde zudem ein Resampling aller Bänder auf 10 m gerechnet. Als verwendete Szenen wurden jene genutzt, die einen Wolkenanteil < 5% aufweisen. Als Referenzdaten für die Modellierung wurden Daten der Betriebsinventur (BI) verwendet. Als Antwortvariable für die entwickelten Modelle wurde der Volumenanteil der Laubbaumvegetation genutzt. Um den Fehler der Eingangsdaten zu minimieren, wurden nur BI-Plots als Referenzdaten zur Modellierung verwendet, die folgende Kriterien erfüllen:

- Es handelt sich um einen kompletten Probekreis (Radius 12 m).
- Es gab im Jahr der Aufnahme nach der Inventur im verwendeten Plot keinen Eingriff.
- Der Plot ist weiter als 20m von der Waldaußengrenze sowie von befahrenen Waldstraßen entfernt.

Zusätzlich wurde die Lagegenauigkeit der BI-Plots mit Hilfe eines linearen Modells überprüft. Hierfür wurde die maximale Höhe für jeden Plot aus einem normalisierten Digitalen Oberflächenmodell (normalized Digital Surface Model, nDSM) extrahiert. Anschließend wurde eine lineare Regression zwischen der maximalen Höhe, die das nDSM für den Plot angibt und der maximalen Höhe, die in der BI aufgezeichnet wurde, durchgeführt. Alle Plots, die nicht in das 95%-Konfidenzintervall dieser Regression fielen, wurden nicht für die Modellierung verwendet. Um den Laubbaumanteil für jeden Pixel eines Granules zu schätzen, wurde eine Support Vektor Maschine (SVM) Regression durchgeführt. Die Bänder der jeweils verwendeten Szenen wurden einer Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis, PCA) unterzogen. Als Eingabeparameter für die Regression wurden die Hauptkomponenten verwendet, welche zusammen 90% der Varianz der Daten erklären. Ratios und der NDVI wurden nicht verwendet. Die kontinuierlichen Ergebnisse, die den Laubbaumanteil pro Pixel schätzen, wurden anschließend in Klassen eingeteilt. Die Grenzen der Klassen wurden wie folgt definiert:

- Laubbaumanteil $\leq 20\%$ = Nadelklasse
- $20\% < \text{Laubbaumanteil} < 80\%$ = Mischklasse
- Laubbaumanteil $\geq 80\%$ = Laubklasse

Für **Bayern** steht eine Laub-Nadelholz-Karte zur Verfügung. Sie unterscheidet zwischen Bereichen mit niedriger Überschirmung laubholzdominierten und nadelholzdominierten Bereichen. Die Karte

wurde mittels Random Forest modelliert basierend auf Sentinel-2 Aufnahmen von 26.08.2015, 28.03.2017, 19.06.2017 und 14.05.2019. Die Auflösung ist 22,3 m, da die Karte mit Stichprobenkreisen (500 m²) der Bayerischen Staatsforsten validiert wurde. Des Weiteren steht eine Kiefer-Fichten-Karte bereit. Sie gibt an, wie hoch der Prozentsatz von Kiefern bzw. Fichten in einer Region ist. Die Auflösung ist 100 m. Die Karte wurde mittels Random Forest Regression basierend auf Landsat 8 Aufnahmen modelliert.

In **Niedersachsen** lagen zu Projektbeginn keine flächendeckenden Daten zur dominierenden Baumart beziehungsweise zu dem Waldtyp vor. Um diese Informationen dennoch allen Schadflächen zuordnen zu können, wurde in dem Projekt eine eigene Baumartenklassifizierung basierend auf Sentinel-2 Daten erstellt. Detaillierte Informationen zu dem Workflow unter Kapitel 6.1.2.

Für die Untersuchungsgebiete in **Sachsen** wurde eine Baumartenkarte mit 16 Klassen (Aktualitätsstand 01.07.2017) genutzt. Die Daten haben eine räumliche Auflösung von 10x10 m². Sie basieren auf 3 verschiedenen Quellen von Eingangsdaten, die je nach Verfügbarkeit und Aktualität für die Erstellung einer sachsenweiten, eigentumsübergreifenden Baumartenkarte genutzt wurden und zum Gesamtwald_raster- Datenbestand von Sachsenforst gehören. Die Basisdaten sind für den Landes- und Körperschaftswald die Daten des Forsteinrichtungssystem Sachsens (FESA_pro) und für den Privatwald die Daten des Waldinformationssystem Sachsens (WIS). Darüber hinaus werden die zum Zeitpunkt der GW_raster – Ableitung noch nicht sachsenweit vorliegenden Baumartenklassifikationen aus Fernerkundungsdaten (Orthobilddaten, Satellitenbilddaten) des Gesamtwaldprojektes von Sachsenforst genutzt.

3.7 Erstellung einer aktuellen Holzbodenmaske

Die Holzbodenmaske basiert auf der in Kapitel 3.2 genannten Walddefinition unter Ausschluss der nicht bestockten Waldfläche. Die Waldschadensdetektion wird auf die Fläche der Holzbodenmaske eingegrenzt. Bei der Erstellung der Holzbodenmaske wurden bundesweit verfügbare Daten eingesetzt.

Bei der Entwicklung des Workflows zur Erstellung der Holzbodenmaske wurden verschiedene Konfigurationen zur Herleitung der Waldfläche getestet. Grundlage dabei bilden die Daten der Copernicus High Resolution Layer (HRL) sowie das Digitale Landschaftsmodell Deutschlands (Basis-DLM). Insgesamt wurden fünf Versionen der Holzbodenmaske, basierend auf unterschiedlichen Konfigurationen angefertigt und verglichen. Zum Vergleich unterschiedlicher Waldstrukturen, Topographien und Geländebestandteilen wurde die Analyse der Holzbodenmaske in den Testgebieten der Sentinel-2 Kacheln 32UNC und 33UVS getestet. Neben der visuellen Bewertung der Holzbodenmasken, wurde eine statistische Genauigkeitsbewertung durchgeführt und eine Konfusionsmatrix berechnet. Die Genauigkeit der Holzbodenmaske wurde sowohl mit den Referenzpunkten aus der LUCAS-Erhebung (Land Use and Coverage Area frame Survey) der EU, als auch mit den Ergebnissen des Waldentscheids der Kohlenstoffinventur 2017 bestimmt.

In der finalen Version wurden eine historische und eine aktuelle Holzbodenmaske erstellt. Die historische Holzbodenmaske basiert auf dem HLR-Tree Cover Density (TCD) 2015 Produkt und umfasst sämtliche Waldschäden ab Anfang 2016. Die aktuelle Holzbodenmaske basiert auf dem Tree Cover Density 2018 und kann für die Waldschadensdetektion ab 2019 eingesetzt werden. Dazu wurden die TCD Produkte (2015 und 2018) durch Resampling, Umprojektion, und Align an die S2-Pixel angepasst. Die TCD – Produkte wurden dann mit den Vegetationsklassen des DLM 2018 (AX_Wald, AX_Sumpf und AX_Moor) maskiert und ausgeschnitten. Waldstraßen und bestockte Nichtwaldflächen werden durch Verwendung des Copernicus HRL Forest Additional Support Layers (FADSL) ausgeschlossen. Kleine Waldbereiche werden durch die Anwendung einer Minimum Mapping Unit von 0,25 ha gefiltert. Anschließend wird die historische Holzbodenmaske zusätzlich mit der aktuellen Holzbodenmaske verschmolzen, so dass alle Flächen der aktuellen Holzbodenmaske in der historischen Holzbodenmaske enthalten sind. Die Holzbodenmaske basiert auf der oben genannten Walddefinition unter Ausschluss der nicht

bestockten Waldfläche. Basierend auf der oben genannten Validierung konnte eine Genauigkeit von insgesamt 96,5 % erreicht werden.

Zur Aktualisierung der Holzbodenmaske wurde ein Workflow ausgearbeitet (Abbil), der die Holzbodenmaske jährlich mit Stand Ende August aktualisiert. Dieser funktioniert auf Basis der detektierten Waldänderungen. Dazu werden die detektierten Waldschäden des aktuellen Schadensjahres mit einer Minimum Mapping Unit von 0,1 ha gefiltert und diese Bereiche dann in der Holzbodenmaske ausmaskiert. Das finale Produkt ist unter Langner et al. (2022) beschrieben und im Thünen-Atlas unter https://atlas.thuenen.de/layers/geonode:fnews_holzbodenmaske_2018_32632 abrufbar.

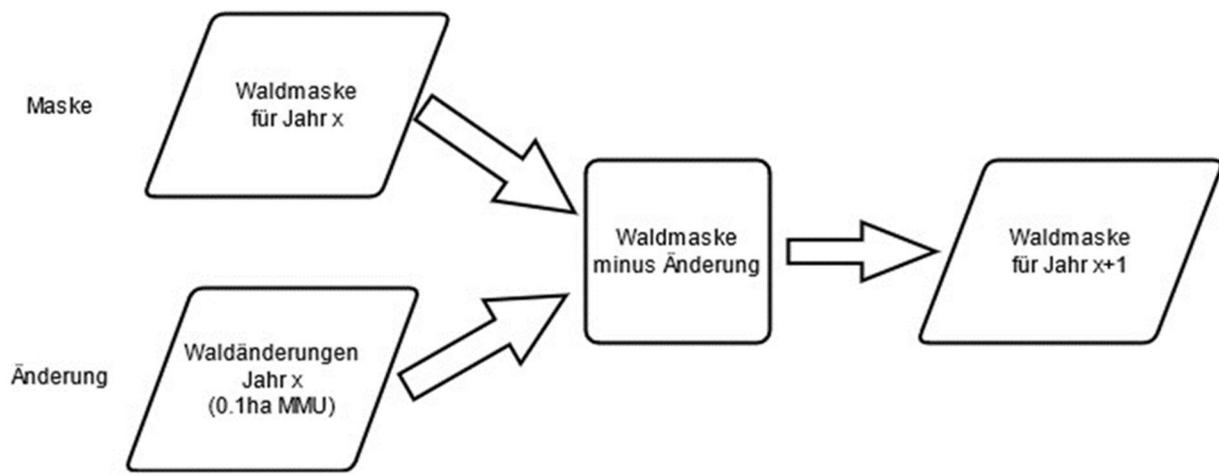


Abbildung 4: Schematische Darstellung zur Aktualisierung der Holzbodenmaske

4 Detektion von Waldschäden durch Zeitreihenanalyse

Das Arbeitspaket 4 des Vorhabens umfasste die Entwicklung und Implementierung eines Monitoring-Systems, das optische Satellitenbilder der Sentinel-2 Mission verarbeitet und in der Lage ist, Schadgebiete möglichst zeitnah zu ihrer Entstehung im Jahresverlauf zu detektieren und räumlich abzugrenzen. Dazu sollen Methoden der Zeitreihenanalyse angewendet werden. Bei der Entwicklung wurden vier übergeordnete Ziele verfolgt:

- Bereitstellung eines NRT-Produkts (near real-time) zur möglichst zeitnahen Abgrenzung von neu entstandenen Schadgebieten im Jahresverlauf, aber vor allem während der Vegetationsperiode. Minimale Kartierungseinheit 0,25 ha.
- Bereitstellung eines Jahresprodukts, welches die während eines Kalenderjahres neu hinzugekommenen Schadgebiete zusammenfasst und dabei sowohl eine höhere Genauigkeit als auch eine feinere minimale Kartierungseinheit von 0,1 ha erreicht im Vergleich zum akkumulierten NRT-Produkt.
- Bereitstellung einer Information zur Schadursache für die detektierten Schadflächen.
- Die entwickelte Methodik sollte hinsichtlich des Prozessierungsaufwands und Abhängigkeiten zu notwendigen externen Datensätzen (d.h. nicht im Projekt FNEWs erstellt) für eine deutschlandweite Anwendung geeignet sein. Die Entwicklung, Implementierung und Erprobung wurde in vier über Deutschland verteilten Untersuchungsgebieten durchgeführt (siehe Kapitel 3.1).

Nachfolgend ist die in den einzelnen Entwicklungsabschnitten entstandene Methodik zusammengefasst.

4.1 Optimierung der Datenvorprozessierung

Die Datenvorprozessierung (oder -vorverarbeitung) umfasst Schritte, die unabhängig für jedes aufgenommene Satellitenbild durchgeführt werden und kann als erster Abschnitt der gesamten Prozesskette verstanden werden. Im ersten Schritt wird zunächst für alle verfügbaren top-of-atmosphere (TOA) Bilder eine Wolkenmaske unter Verwendung des Fmask -Algorithmus (Zhu et al., 2015; Frantz et al., 2018) berechnet. Die Vorverarbeitung eines Bildes wird nur dann fortgesetzt, wenn ein definierter Mindestanteil (z.B. 10%) an gültigen Pixeln vorhanden ist. Als Wolken-, Wolkenschatten- oder Schnee klassifizierte Pixel werden als ungültig betrachtet. Wenn ein ausreichender Anteil gültiger Pixel vorhanden ist, folgt die Atmosphärenkorrektur mit der sen2cor Software (Loius et al., 2016), die von der ESA angeboten wird. Das Ergebnis sind Daten der Prozessierungsstufe L2A, die radiometrisch einer kalibrierten bottom-of-atmosphere (BOA) Reflexion entsprechen. Nach der Atmosphärenkorrektur erfolgt eine Verbesserung der geometrischen Lagegenauigkeit der Bilder zueinander. Als Referenzbild wurde hier ein ganz Deutschland abdeckendes Mosaik gewählt. Durch Koregistrierung wird jedes Bild des Zeitreihenstapels in seiner Lage bestmöglich an die Referenz angepasst. Im nächsten Schritt der Vorprozessierung werden auf Basis des Fmask-Klassifizierungsergebnisses ungültige Pixel ausmaskiert. Zuletzt wird noch eine topographische Korrektur nach der Minnaert-Methode (Gallaun et al., 2007) durchgeführt. Das zugrundeliegende Geländemodell ist das Copernicus Digital Elevation Model (COP-DEM), das für Europa in 10 m Auflösung verfügbar ist. Im Rahmen der topographischen Korrektur wird auch eine BRDF-Korrektur (bidirectional reflectance distribution function) ausgeführt, welche systematische Effekte aufgrund unterschiedlicher Aufnahmewinkel (abhängig vom Satellitenorbit) ausgleicht (Roy et al., 2016; Roy et al., 2017; Roy et al., 2017b).

4.2 Methodenentwicklung Zeitreihenanalyse

Im zweiten Abschnitt der Prozesskette wird eine Zeitreihenfilterung durchgeführt. Die in verschiedenen Spektralbändern über die Zeit beobachtete BOA Reflexion repräsentiert das zu filternde Signal. Zum Einsatz kommen strukturelle Zeitreihenmodelle, die mit einem Kalman Filter (KF) zur dynamischen Schätzung der Modellparameter kombiniert werden (Gibbs, B.P., 2011; Harvey, A.C., 1989; Puhm, M. et al., 2020). Wichtig für NRT - Anwendungen ist, dass die für Reflexionswerte von Waldpixeln typischen saisonalen Schwankungen des Signals im Zeitreihenmodell erfasst werden können. Die Funktionsweise des Kalman Filters ist rekursiv, das heißt die Zeitreihe wird Bild für Bild verarbeitet. Jede Rekursion besteht aus zwei Schritten, dem time update und dem measurement update. Beim time update erfolgt eine Modellvorhersage der erwarteten Reflexion zum Aufnahmezeitpunkt des aktuellen Bildes ausgehend vom Datum des zuletzt verarbeiteten Bildes. Beim measurement update wird die Modellvorhersage (und mit ihr die Modellparameter) durch Integration der aktuellen Daten korrigiert. Für die korrekte Erfassung von saisonalen Signalkomponenten ist es notwendig, eine mehrjährige historische Zeitreihe zu verarbeiten, um das Modell zu trainieren. Nach der Trainingsphase liefert die Kalman-Filterung für jedes in der monitoring Phase neu verfügbare Bild zwei outputs, die für die spätere Ableitung der Produkte im letzten Teil der Prozesskette verwendet werden. Zum einen sind das die sogenannten innovations, die vereinfacht gesagt die Differenzen aus den Modellvorhersagen und den tatsächlich beobachteten Signalwerten repräsentieren. Zum anderen entstehen gefilterte Versionen der input Bilder, die für großflächige Waldschadenskartierungen interessante Eigenschaften aufweisen. Durch die Wolkenmaskierung verursachte Lücken in den originalen Bildern werden durch die Modellvorhersagen aufgefüllt und verbliebenes zufälliges Signalrauschen reduziert. Durch measurement updates werden durch Waldschäden verursachte nachhaltige Signaländerungen mit einem gewissen delay auch in den gefilterten Bildern sichtbar. Eine insbesondere für NRT-Anwendungen herausfordernde Eigenschaft der hier verwendeten Signale ist jedoch, dass sie nicht nur zufällig verteiltes Rauschen enthalten, sondern auch Ausreißer durch unmaskierte Wolken oder Wolkenschatten sowie systematische Einflüsse durch schlechte Atmosphärenbedingungen (Dunst, Aerosole). Um die Robustheit der Zeitreihenfilterung und der darauf aufbauenden Produkte gegen diese Effekte zu erhöhen, wurde ein neues Konzept zur Bestimmung der Qualität eines Messwerts entwickelt. Dabei sollte anstatt einer typischen Wolkenmaske ein pixelweiser, kontinuierlicher Qualitätsindex entstehen. Das Konzept nutzt vereinfachte Annahmen, die für Waldanwendungen als zulässig erachtet werden, sowie die speziellen Eigenschaften der Zeitreihen zweier Features der Tasseled Cap Transformation (Crist, Eric P. 1985). Der berechnete Qualitätsindex fließt in das Beobachtungsmodell des Kalman Filters ein und bestimmt mit, wie stark eine Beobachtung beim measurement update gewichtet wird. Der Einfluss von Artefakten wird sowohl in der Sequenz der innovations als auch in den gefilterten Bildern reduziert.

Im dritten Abschnitt der Prozesskette werden die Outputs der vorhergehenden Zeitreihenfilterung genutzt um sowohl das NRT- als auch das Jahresprodukt zu berechnen. Die Detektion von Änderungen im NRT Modus basiert auf der CUSUM Methode (cumulative sum). Dabei wird ausgenutzt, dass die Sequenz der KF Innovations bei guter Übereinstimmung zwischen Vorhersage und Beobachtung annähernd einen Mittelwert von Null und geringe zeitliche Autokorrelation hat. Die mit dem Auftreten eines Schadens verbundene Signaländerung bewirkt eine Änderung dieser Eigenschaften, was mit dem CUSUM Test detektiert werden kann. Typischerweise nehmen die beobachteten Spektralwerte im roten und SWIR (short wave infrared) Band beim Eintreten von Schäden zu.

Für das Jahresprodukt wird immer ein Paar aus gefilterten Bildern zum Stichtag Ende August (Vorjahr und aktuelles Jahr) analysiert. Die Grundannahme war, dass durch den Filterungsprozess die Informationen aller bis zum jeweiligen Zieldatum verfügbaren Bilder berücksichtigt wurden, um die beste Schätzung des aktuellen Bodenzustands abzuleiten. Um nun geschädigte von ungeschädigten Waldpixeln abzugrenzen, werden zunächst an vordefinierten Stichprobenorten, die Laub- und Nadelwälder repräsentieren, Features extrahiert, um drei statistische Modelle aufzustellen. Wir sind davon ausgegangen, dass sowohl die absolute charakteristische Reflexion der Waldklassen als auch die spektralen Unterschiede zum letzten Jahr als multivariat

normalverteilt modelliert werden können, wobei der jeweilige Mittelwert und die Kovarianz für jede Klasse mithilfe des robusten Algorithmus der minimalen Kovarianzdeterminante (MCD) geschätzt werden (Rousseeuw, P. J., 1984.; Rousseeuw, P. J., 1999). Diese statistischen Modelle ermöglichen die Kennzeichnung von Wald- und Nichtwald-Pixeln sowie von Pixeln mit ungewöhnlich großen spektralen Unterschieden auf der Grundlage bestimmter Signifikanzniveaus α . Darüber hinaus bietet der Median des NDVI eine Entscheidungsgrenze für die Kennzeichnung von Pixeln mit geringerer Vitalität (d. h. unter dem Median). Geschädigte Pixel vereinen die Eigenschaften Nichtwald, signifikant hohe Spektraldifferenz zum Vorjahr sowie geringe Vitalität relativ zu gesunden Pixeln der Waldklasse.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Produkte für zwei Beispielgebiete. In Abbildung 5 wird die unterjährige Kartierung von Schadflächen im NRT-Modus und die damit verknüpfte Schadursachenklassifikation für ein Gebiet im Frankenwald gezeigt. Die Spalten der Grafik entsprechen ausgewählten Zeitpunkten von 2022-06-15 bis 2022-09-03 (Datum jeweils links oben in der ersten Bildzeile). Die erste Bildzeile stellt die Sentinel-2 Aufnahme (Bandkombination R=B11, G=B08, B=B04) im Prozessierungslevel L2A dar, ausmaskierte Bereiche sind weiß. In der zweiten Zeile ist das Ergebnis der Schadursachenklassifikation dargestellt, in der dritten das Datum der Detektion.

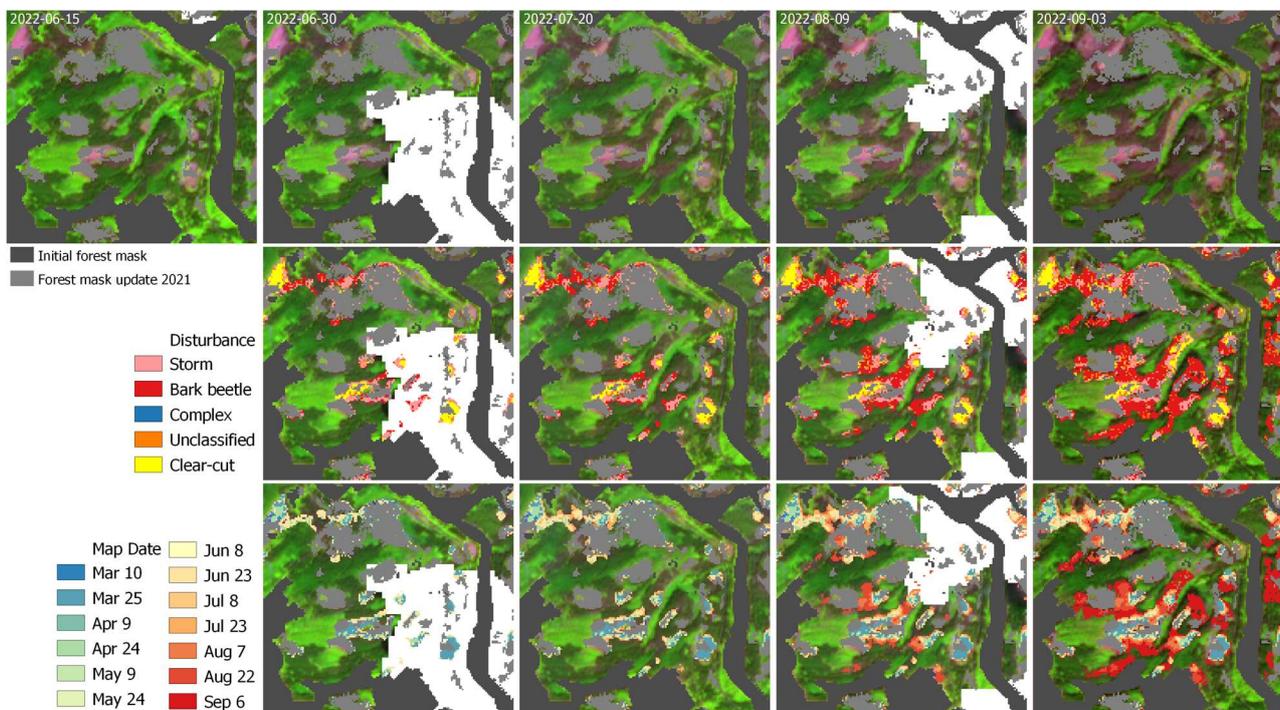


Abbildung 5: Unterjährige Kartierung von Schadflächen im NRT-Modus

In Abbildung 6 ist die jährliche Kartierung auf Basis der gefilterten Sentinel-2 Bilder für ein Gebiet im Schwarzwald dargestellt. Die Spalten bilden wieder die Zeitachse. In der ersten Zeile ist eine möglichst wolkenfreie Szene (Bandkombination R=B08, G=B04, B=B03) in der Nähe des Stichdatums dargestellt, ausmaskierte Bereiche sind weiß. In der zweiten Zeile ist das gefilterte Bild zum Stichdatum 31. August zu sehen. In der dritten Zeile sind die jährlich kumulierten Schadflächen der Jahresprodukte abgebildet.

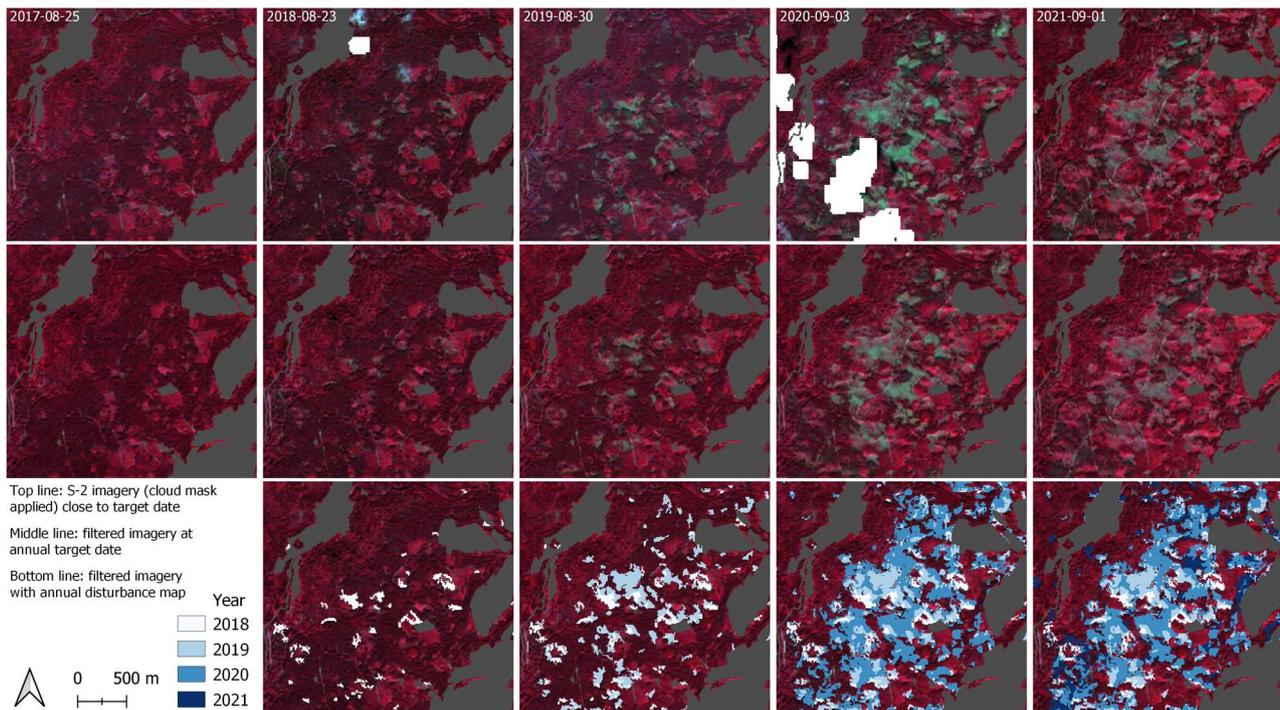


Abbildung 6: Jährliche Kartierung auf Basis der gefilterten Sentinel-2 Bilder

4.3 Methodenentwicklung zur Trennung von Schadensursachen

Bei der Konzeption der Schadtypen-Klassifikation wurde besonders auf eine Überlegung Rücksicht genommen: es wird angenommen, dass der Schadtyp am besten zeitlich möglichst nahe am Schadereignis zuordenbar ist. Dies gilt insbesondere dann, wenn so wie in Deutschland üblich, nach Sturmwüfen oder bei Borkenkäferbefall mitunter sehr schnell Räumungsarbeiten durchgeführt werden und danach eine Trennung der Ursache nicht mehr möglich ist. Daraus entstand ein Ansatz, der die Schadtypen-Klassifikation mit dem NRT-Produkt verknüpft. Die Schadtypen-Klassifikation erfolgt rein spektral, wobei für das Training des Klassifikators gezielt die Spektralwerte nahe dem Schadereignis (immer danach) verwendet wurden.

In der Theorie macht diese Kopplung zwischen NRT-Detektion und Schadtypen-Klassifikation durchaus Sinn, die Übertragung der Methodik auf die Untersuchungsgebiete hat aber gezeigt, dass eine verlässliche, zeitnahe Detektion nicht garantiert ist. Das Klassifikationsergebnis ist in Folge oft unspezifisch oder falsch, vermutlich auch weil die spektrale Streuung der Referenzsamples die Realität unzureichend widerspiegelt. Daraus ergibt sich, dass die Abgrenzung der Schadflächen im Jahresprodukt zwar relativ gut ist, für viele Pixel aber keine wirklich nutzbare Schadtyp-Information angegeben werden kann.

Eine umfassende Methodenbeschreibung ist im technischen Bericht zu AP 4.1.1 zu finden.

5 Schnellerkennung von Sturmschäden mit Sentinel-1 C-band SAR-Daten

Um Schäden unabhängig von Bewölkung rasch zu erfassen, sind aktive Sensoren, wie SAR (Synthetic Aperture Radar) nötig. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die Potentiale der SAR-Daten für die Generierung von Hinweiskarten für Windwurfflächen für das Fernerkundungsbasierte Nationale Erfassungssystem Waldschäden (FNEWs) analysiert und aufgezeigt. Dabei wird das hauptsächlich in der Schweiz mit Sommerstürmen im belaubten Zustand entwickelte Verfahren auf verschiedene Sturmereignisse in Deutschland angewandt. Es wird ermittelt, welche Methoden operationell anwendbar sind und wo bzw. wann mit welchen Limitierungen gerechnet werden muss. Die verschiedenen Sturmereignisse unterscheiden sich von den Entwicklungsgebieten in der Schweiz bezüglich Jahreszeit, Waldeigenschaften und Ausmass der betroffenen Fläche. Da in Deutschland ein bundesweit verfügbares Vegetationshöhenmodell zum Zeitpunkt der Prozessierung der SAR-Daten fehlte und dies im Verfahren für die Definition der potentiell vom Sturm betroffenen Waldfläche verwendet wird, ergibt sich weiter auch die Möglichkeit, einen Ersatz für die Definition der Waldfläche zu testen.

5.1 Ausblick für eine potentielle bundesweite Implementierung

5.1.1 Darstellung der Hinweiskarte

Innerhalb des Projektkonsortiums wurde entschieden, die Hinweiskarte auf einem räumlichen Detaillierungsgrad von einem Hektar zu generieren. Dies erleichtert die Nutzung der Karte, da ein Produkt mit diesem Detaillierungsgrad Hinweise auf Windwürfe und keine Kartierung der Flächenumrisse suggeriert. Dafür wurden die Primärergebnisse aus dem Verfahren mit einer Gitterweite von 10 m * 10 m auf den Hektaren-Raster des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (2021) aggregiert (Abbildung 7). Es wurden alle WI-Werte der Hinweispixel jeweils innerhalb der 100 m * 100 m-Zellen aufsummiert. Zellen mit dem Wert 0 beinhalten keinen Windwurfhinweis. Alle Zellen mit Werten grösser als 0 beinhalten Hinweise und über diese Werte können auch Abstufungen vorgenommen werden. So kann über die pro Hektare erreichte Summe abgeschätzt werden, 1) wie viele 10 m * 10 m-Pixel innerhalb der Hektare einen Hinweis gegeben haben (Flächenkriterium) und 2) wie gross die beobachteten WI-Werte in diesen sind (Intensitätskriterium).

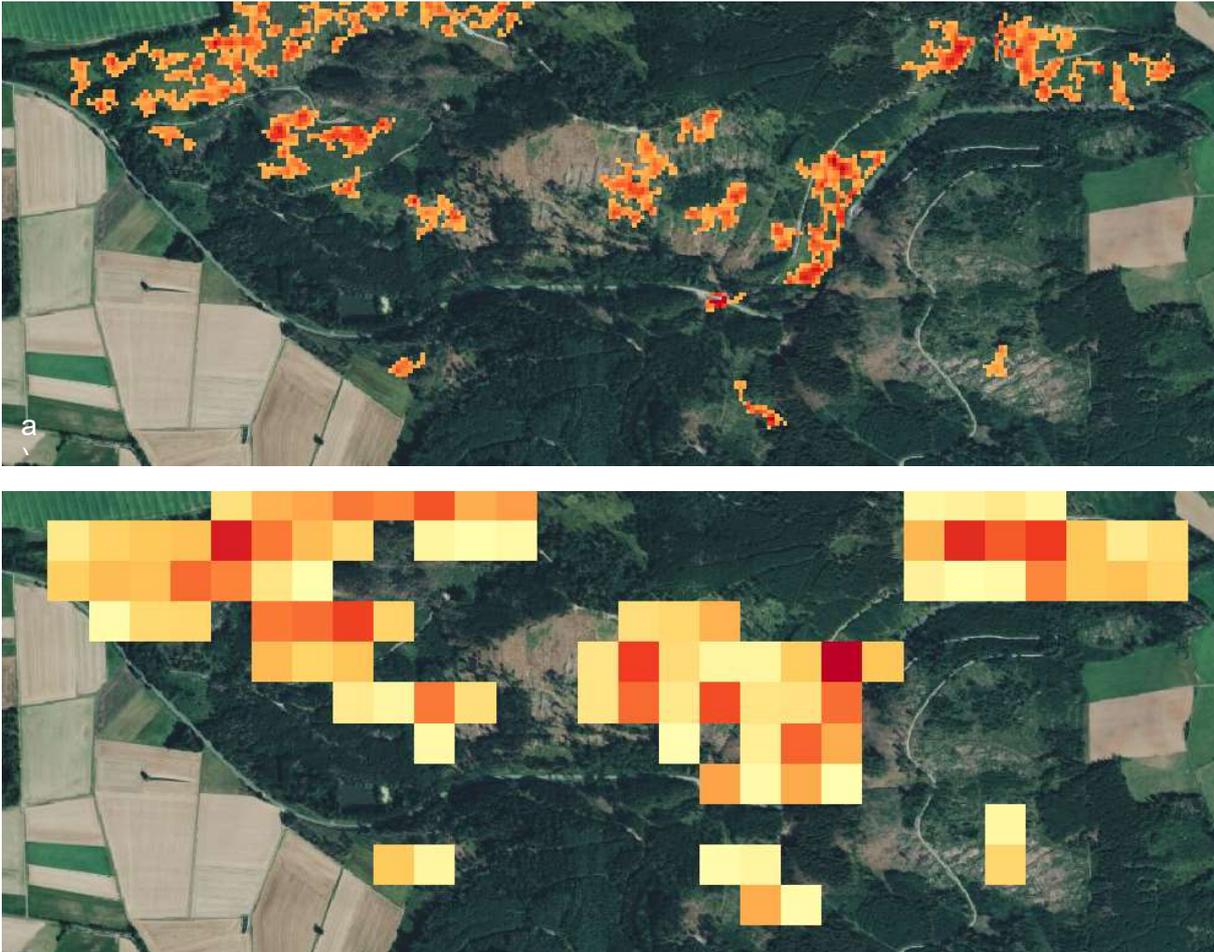


Abbildung 7: Beispiel des Hektar-Rasters im UG Niedersachsen. a) zeigt eine Luftbildaufnahme mit dem Primärergebnis des Verfahrens, bei welchem höhere WI-Werte mit intensiverem Rot dargestellt sind. In b) ist der daraus generierte Hektaren-Raster dargestellt. Je roter die Hektar-Zelle, desto wahrscheinlicher ist ein Flächenschaden innerhalb dieser Hektare. © Bing; beinhaltet modifizierte Copernicus Sentinel-Daten (2018)

5.1.2 Übersicht der Wartezeit

Da die S1-Aufnahmefrequenz in Deutschland nicht überall gleich ist, dauert es abhängig von der Region unterschiedlich lange, bis die oben diskutierten Genauigkeiten für die Detektion von Windwürfen erreicht werden. In Abbildung 8 ist die Aufnahmefrequenz über Deutschland dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass für einen Großteil des Landes die Aufnahmefrequenz genügend hoch ist, um innerhalb von sechs Tagen eine Windwurfhinweiskarte basierend auf vier S1-Aufnahmen zu generieren. In gewissen Regionen gibt es jedoch eine längere Wartezeit auf vier Aufnahmen. Vor allem innerhalb der sieben hellgrünen Rauten, wo es nur zwei Aufnahmen pro sechs Tagen gibt, ist die Wartezeit verdoppelt. Es ist zu beachten, dass die Abbildung die Aufnahmefrequenz der vollständigen Sentinel-1-Konstellation darstellt. Seit Dezember 2021 liefert Sentinel-1B jedoch keine Aufnahmen mehr (Copernicus Open Access Hub, 2022). Der Start von Sentinel-1C wurde auf das Frühjahr 2023 geplant, um die Konstellation wieder zu vervollständigen (ESA, 2022).

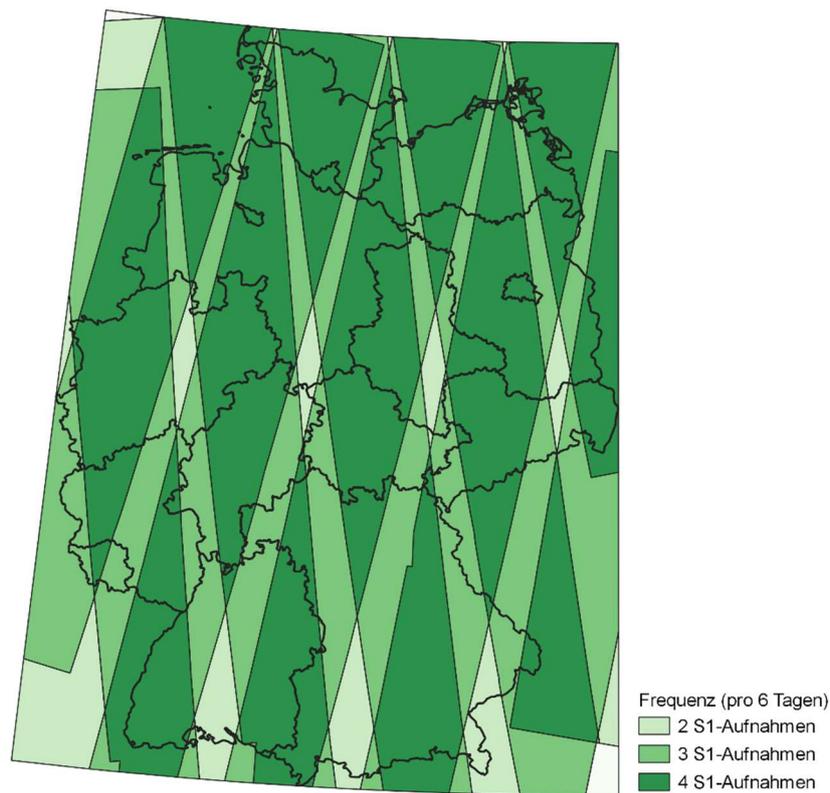


Abbildung 8: Aufnahmefrequenz von Sentinel-1 (S1) über Deutschland. Ein Großteil (grüne und dunkelgrüne Gebiete) ist mit mindestens drei Aufnahmen innerhalb sechs Tagen abgedeckt.

5.1.3 Analyse der Dauer des Workflows für die Hinweiskartengenerierung

Zusätzlich zur Wartezeit auf die S1-Aufnahmen kommt in einem konkreten Sturmereignis auch die Dauer zur Generierung der Hinweiskarten dazu. Tabelle 5 zeigt diese im Fall der SAR-Vorprozessierung mittels SNAP für die drei UGs, für welche die SAR-Produkte mit SNAP generiert wurden. Die S1-Aufnahmen wurden mit einem Computer mit den folgenden Spezifikationen vorprozessiert: Intel Xeon W-2125 CPU @ 4 GHz, 64 GB RAM, 64-bit Windows 10 Education, SNAP Version 9.0. Bei abweichenden Spezifikationen sollte mit anderen Werten gerechnet werden. Zudem soll hier erwähnt werden, dass weder bei der SAR-Vorprozessierung noch beim Verfahren zur Windwurfdetektion ein Fokus auf die Effizienz der Algorithmen gelegt wurde.

Tabelle 5: Dauer der SAR-Vorprozessierung mittels SNAP für die drei UGs Baden-Württemberg (BW), Bayern (BY) und Niedersachsen (NI). Aufgelistet ist die Dauer der Vorprozessierung für vor und nach dem Sturm (t) mit der jeweiligen Anzahl verarbeiteter Sentinel-1 GRDH-Aufnahmen (# S1), die Dauer der Detektion der Windwurfinweise sowie die Gesamtdauer und Geschwindigkeit (v) für jedes UG in Abhängigkeit zur UG-Fläche (A).

	vor Sturm			nach Sturm		Detektion	Gesamt	
	A [km ²]	# S1	t [h]	# S1	t [h]	t [h]	t [h]	v [km ² /h]
BW	2838	5	11.18	4	8.43	0.07	19.68	144.24
BY	1961	5	12.08	4	12.06	0.05	24.19	81.06
NI	12402	7	22.40	6	19.93	0.13	42.45	292.13

Nach gut 20 Stunden waren die Hinweiskarten für die beiden UGs Baden-Württemberg und Bayern generiert. Für das deutlich grössere UG Niedersachsen dauerte die Generierung etwa doppelt so

lang mit 40 Stunden. An der Geschwindigkeit kann jedoch abgelesen werden, dass die Rechen-
dauer für grössere Gebiete relativ schneller ist als für kleinere Gebiete. In einem konkreten Anwen-
dungsfall wäre es möglich, während der Wartezeit auf die S1-Aufnahmen nach dem Sturm, die
Vorprozessierung der Aufnahmen vor dem Sturm bereits vorzunehmen. Somit halbiert sich prak-
tisch die Dauer der Vorprozessierung der S1-Aufnahmen. Aus der Tabelle wird auch deutlich, dass
die Generierung der Hinweiskarten deutlich weniger Zeit beansprucht als die Vorprozessierung der
SAR-Daten mittels SNAP.

5.1.4 Kombination mit RADARSAT Constellation Mission

Um die zeitliche Auflösung der SAR-Daten zu erhöhen, um damit eine kürzere Wartezeit zu errei-
chen, wäre eine Kombination von S1- mit *RADARSAT Constellation Mission* (RCM)-Daten möglich
(Small et al., 2022). Die kanadische Raumfahrtbehörde betreibt im Rahmen der RCM drei Satelliten
mit je einem C-band SAR-Sensor derselben Frequenz wie S1 (Canadian Space Agency, 2020).
Deshalb wäre es möglich, durch Kombination beider Missionen praktisch täglich SAR-Aufnahmen
zu erhalten und damit die gewünschte Anzahl Aufnahmen für die Verarbeitung in LRW-Komposite
in kürzerer Wartezeit als nur mit S1-Daten zu erreichen. Da RCM erst seit Dezember 2019 opera-
tionell ist, war es jedoch nicht möglich, RCM-Daten für die bearbeiteten Stürme zu integrieren.
Zudem müsste die aktuelle RCM-Aufnahmestrategie in Europa für ein Waldmonitoring angepasst
werden, da im Gegensatz zu S1 keine kontinuierlichen und standardisierten SAR-Aufnahmen von
Deutschland gemacht werden.

5.2 Fazit

Grundsätzlich ist es möglich, die Methode zur Schnellerkennung von Sturmschäden mittels
Sentinel-1-Daten in Deutschland anzuwenden. Die Resultate im UG Niedersachsen zeigten
exemplarisch auf, dass die Methode auch im unbelaubten Zustand und ohne Verfügbarkeit eines
Vegetationshöhenmodells für die Definition der potenziell geschädigten Waldfläche funktioniert. Die
Resultate der anderen drei UGs zeigten jedoch auch auf, dass es für eine operationelle Anwendung
noch zu viele Unsicherheiten gibt, die vertiefter untersucht werden müssen. Dabei handelt es sich
um sowohl meteorologische als auch Einflüsse des Waldtyps auf die SAR-Rückstreuung. So wurde
in den anderen beiden UGs mit Winterstürmen beobachtet, dass nasser Schnee einen starken
Einfluss auf die Verlässlichkeit der Methode hat. Ebenso wurde im Sommersturmgebiet Bayern
beobachtet, dass Windwürfe in dessen Kiefernbeständen nicht erkannt werden können.

Im UG Niedersachsen, welches im Vergleich zu den anderen Gebieten auch deutlich am meisten
Referenzflächen aufwies, konnten jedoch einige Analysen gemacht werden. So konnte aufgezeigt
werden, dass die vertikale Genauigkeit des für die Vorprozessierung der SAR-Daten verwendeten
Höhenmodells wichtiger ist als dessen Gitterweite. Ebenso wurden höhere Genauigkeiten erreicht
bei Vergrößerung der Zielgrösse von 0.5 auf 1 ha und bei Einbezug aller möglichen S1-Aufnahmen
des jeweiligen UG, was jedoch eine längere Dauer der Vorprozessierung der SAR-Daten zur Folge
hat.

Die Tests der gesamten Vorprozessierung der SAR-Daten mittels SNAP verliefen erfolgreich. Es
konnte gezeigt werden, dass Windwurfhinweiskarten auch basierend auf mit SNAP
vorprozessierten SAR-Daten generiert werden können.

6 Implementierung der Ergebnisse in forstliche IT-Strukturen und Optimierung der Schaderkennungsergebnisse

Neben der Erfüllung der Projektziele für das BMEL stehen die Ergebnisse auch den Partnern aus den Bundesländern zur Verfügung. Damit diese Daten genutzt werden können, wurden in diesem Arbeitspaket die Anforderungen für die Integration der Ergebnisse in die landeseigenen forstlichen IT-Infrastrukturen der Landesforstbetriebe sowie der betreuenden forstlichen Institutionen definiert, die Ergebnisse entsprechend aufbereitet und schließlich integriert. Darüber hinaus sollen die Projektergebnisse einem erweiterten forstlichen Nutzerkreis (sonstige Forstverwaltungen, Landesverwaltungen, Dritte) vorrangig über Web Services bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt. Hierfür wurden entsprechende Anforderungsbefragungen und Abstimmungsprozesse mit den Nutzern geführt. Im Weiteren wurden landesspezifische Verfeinerungen der Schadkartierungsergebnisse mittels hochauflösender Fernerkundungsdaten und durch Einbindung weiterer betriebs- oder landesspezifischer Geodaten entwickelt und ergänzend zu den Ergebnissen zur Verfügung gestellt.

6.1 Anforderungen und Abstimmung mit Nutzern der FVA-BW

Ein WMS- bzw. WFS-Dienst wäre ausreichend, um die FNEWs Produkte in Baden-Württemberg zur Verfügung zu stellen. Die Produkte bis 2022 bzw. 2023 würden vor allem innerhalb der FVA BW von Interesse sein. Eine von Waldbesitzern genutzte App wäre WaldExpert, welches auch an der FVA BW entwickelt wurde. Eine Implementierung der Produkte in die App wäre allerdings nur von Interesse, wenn jährliche Produkte in Zukunft geliefert werden können.

6.2 Definition der Schnittstellen zur Integration der Projektergebnisse in landeseigenen IT-Strukturen der LWF

Um zukünftige FNEWs Produkte in BayWIS zur Verfügung zu stellen, benötigt die LWF die Vektordaten der Schadflächen als Download. Ein WMS- bzw. WFS-Dienst ist nicht ausreichend, da die Daten auch offline verfügbar sein müssen. Ein vorstellbarer Workflow zur Einbindung der FNEWs-Ergebnisse in die Landes-IT ist in Abbildung 9 dargestellt.

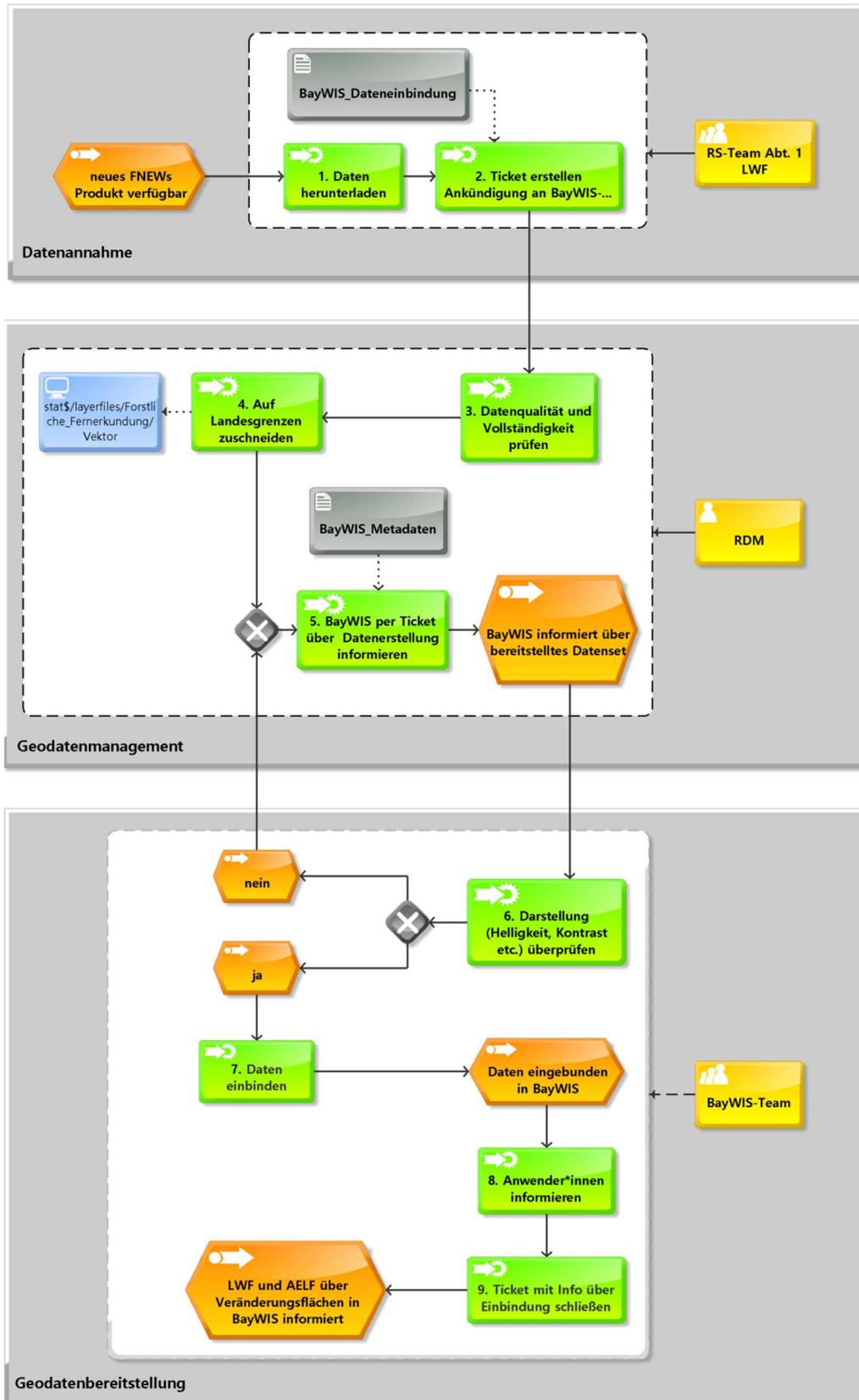


Abbildung 9: Workflow der Einbindung von zukünftigen FNEWs Produkten in die Landes-IT (BayWIS) der LWF

6.3 NW-FVA

6.3.1 Integration der Projektergebnisse in forstbetriebliche IT-Infrastrukturen der NW-FVA

Eine Analyse der bestehenden forstbetrieblichen Geo-Informationssysteme bei den Landesforstverwaltungen und Waldbesitzer betreuenden Institutionen in den Trägerländern der NW-FVA hat ergeben, dass alle Systeme in der Lage sind standardisierte Webdienste (WMS, WMTS) einzubinden. Eine Übernahme und Einbindung der Daten des Schadensmonitorings aus dem Projekt wäre somit über Webdienste problemlos möglich, um diese in den Geo-Informationssystemen zu visualisieren. Da die Daten über den Thünen-Atlas bereitgestellt werden und direkt als WMS abgerufen werden können, entfällt die eigenständige Entwicklung von Verfahren zur automatisierten Aufbereitung und Datenbereitstellung.

Die Validierungen für die Sturmschadenshinweise aus AP5 haben gezeigt, dass dieses Produkt noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit bedarf. Für eine Integration der Daten in forstliche Infrastrukturen sind die Genauigkeiten bisher zu gering.

Die Daten aus AP4 zeigen zwar eine recht gute Genauigkeit, sind aber für die landesweite Integration in die forstlichen IT-Infrastrukturen aus verschiedenen Gründen nur bedingt geeignet:

- Für eine frühzeitige Erkennung von Borkenkäferschäden um rechtzeitig befallene Bäume erkennen und entnehmen zu können müssten diese Schäden in einem sehr initialen Befallsstadium (Green Attack) zuverlässig erkannt werden. Dies ist aber bisher weder in diesem Projekt noch in anderen Projekten basierend auf Fernerkundungsdaten gelungen. Für präventive Schadensregulierung ist die Schadenserkenntnis nicht schnell genug.
- Akteure wie das Planungsamt oder das Ministerium benötigen Daten auf ganzer Bundeslandfläche um landesweite Aussagen machen zu können oder den Forstbetrieb planen zu können. Es reicht daher nicht diese Daten auf Untersuchungsgebietsebene zu liefern. Durch die (bisher) eingeschränkte Abdeckung sind die Daten aus dem Projekt für diese Anwendungen leider nicht konkurrenzfähig zu flächendeckenden Produkten.
- Um die Daten sinnvoll in bestehende Infrastrukturen einbinden zu können, sollten diese regelmäßig (mindestens jährlich) bereitgestellt werden, ansonsten kann eine langfristige Integration der Daten für operative Geschäftsprozesse nicht durchgeführt werden. Aufgrund fehlender Planungssicherheit ist die Nachnutzung der Daten in darauf aufbauenden Prozessen schwierig.

Aus den oben genannten Limitationen wurden die Ergebnisse der Arbeitspakete 4 und 5 bisher nicht standardmäßig in bestehende IT-Systeme integriert, durch die Bereitstellung der Daten als WMS ist eine kurzfristige Einbindung aber jederzeit möglich. Sobald die Daten flächendeckend berechnet werden und falls eine kontinuierliche Fortführung absehbar ist können diese schnell integriert werden.

6.3.2 Webbasierte Bereitstellung von Projektergebnissen

Eine Analyse hinsichtlich des Bedarfs nach Waldschadensdaten hat gezeigt, dass solche Daten grundsätzlich für verschiedene Akteure von Interesse sind. So werden Daten zur Schadenslage bisher beispielsweise von dem Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, dem Forstplanungsamt und teilweise den Forstbetrieben nachgefragt. Auch private Unternehmen fragen solche Daten an, beispielsweise zur Planung von Windkraftanlagen im Wald auf geschädigten Flächen. Eine landesspezifische Integration der Daten ist wie oben beschrieben bisher nicht erfolgt. Über den Thünen-seitig bereitgestellten WMS Dienst ist die webbasierte Bereitstellung der Ergebnisse aber umgesetzt und für interessierte Nutzer erreichbar. Dieser Weg ist effektiv und erspart fehleranfällige und zeitintensive Zwischenschritte über die IT-Infrastrukturen der Länder. Eine eigenständige Aufbereitung und Bereitstellung der Daten seitens der NW-FVA ist somit nicht nötig, könnte bei Bedarf aber durchgeführt werden.

6.3.3 Generierung einer Baumartenkarte

Sowohl für die Biomasseschätzung als auch für die Schadenserkenkung sind Informationen zur vorherrschenden Baumart wichtige Eingangsinformationen. In ausreichendem Maßstab lagen diese Daten für Niedersachsen bis zum Projektstart nicht flächendeckend vor. Weder fernerkundungsbasierte Produkte noch Daten aus der Forsteinrichtung standen für alle Wälder Niedersachsens zur Verfügung. Vor diesem Hintergrund ist die Entscheidung getroffen worden, im Rahmen des FNEWS-Projektes an einer eigenen Baumartenklassifizierung für Niedersachsen zu arbeiten, um den projektseitigen Bedarf nach flächendeckenden Baumarteninformationen decken zu können.

Die Methodik basiert primär auf Sentinel-2 Bildern als Eingangsdaten zur Klassifizierung und Forsteinrichtungsdaten als Referenzdaten für das Trainieren des Modells. Außerdem wurden OpenStreetMap Daten zur Filterung weiterer Trainingsdaten genutzt und Inventurdaten zur Validierung verwendet. Das Training und die Klassifizierung der Bilddaten erfolgte in der Cloud-Umgebung Google Earth Engine. Damit lassen sich extrem große Datenmengen effizient in der Cloud berechnen. Abbildung 10 gibt einen schematischen Überblick über die Methodik. Im Anschluss werden die einzelnen Teilschritte der Methodik beschrieben.

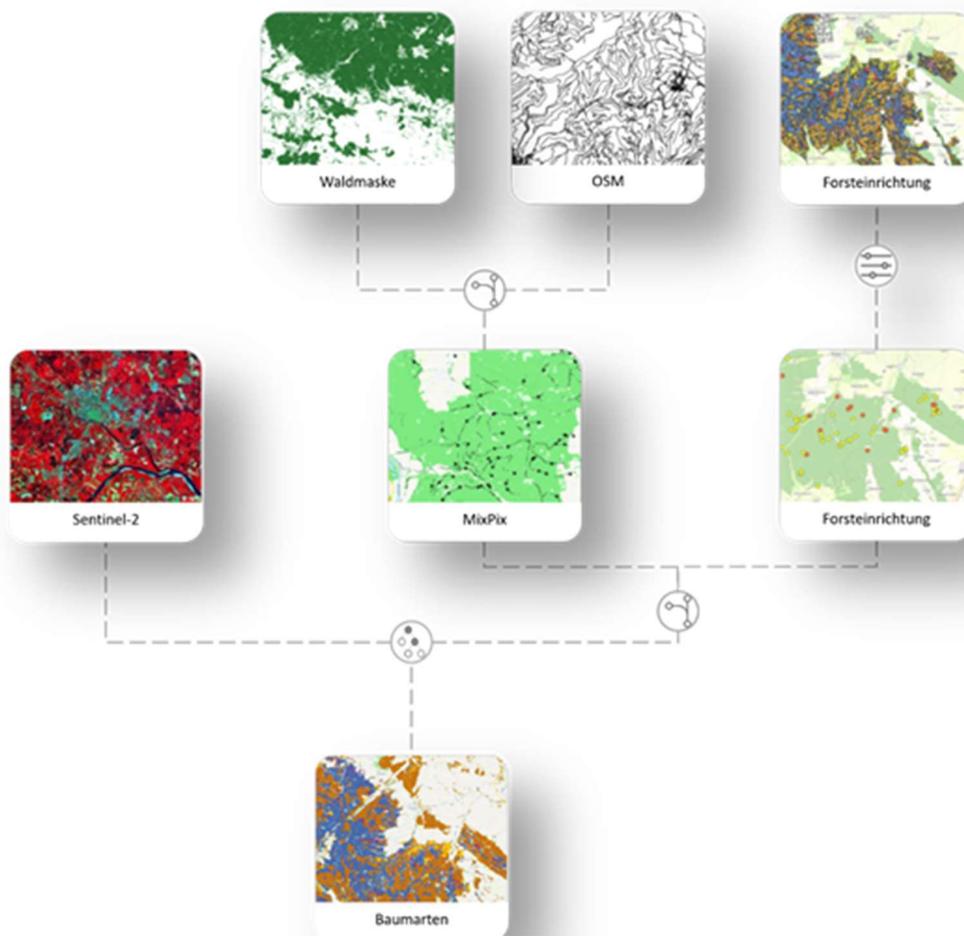


Abbildung 10: Schematische Darstellung zum Workflow der Baumartenklassifizierung.

Als Eingangsdaten zur Baumartenklassifizierung wurden Sentinel-2 Bilder des Prozessierungslevels 2A verwendet. Dazu wurden Sentinel-2 Szenen der Jahre 2018 bis 2020 Jahres-übergreifend in vier phänologisch interessanten Zeiträumen zusammengefasst: (DOY) 65-95, DOY 95-125, DOY 125-155 und DOY 155-185. Sämtliche Bilder aller drei Jahre in den genannten Zeiträumen wurden genutzt. Wolken und Wolkenschatten wurden maskiert und aus den unmaskierten Bereichen der Bilder wurde das 33%-Perzentil berechnet.

Der Referenzdatensatz wurde zum einen aus Punkten der häufigsten Baumarten(gruppen) und zum anderen aus Punkten entlang von Forstwegen generiert. Diese zusätzlichen Punkte dienten später als eine weitere Klasse, um Pixel mit gemischten Reflektanzwerten separat ausweisen und filtern zu können. An allen Referenzpunkten wurden dann die Spektralwerte aus den Sentinel-2 Bildkompositen extrahiert und davon im Anschluss Ausreißer (1-99% Perzentil pro Band) herausgefiltert. Potenziell fehlerhafte Referenzpunkte mit besonders hohen bzw. niedrigen Reflektanzwerten innerhalb der jeweiligen Klasse und des jeweiligen Bildkanals wurden so minimiert.

Referenzdaten der Baumarten wurden aus Forsteinrichtungsdaten der Trägerländer der NW-FVA generiert. Die Bestandesdaten der Forsteinrichtung wurden pro Unterabteilung auf Baumartenebene aggregiert, wobei nur der Hauptbestand betrachtet wurde (Bestandesschicht 1). Aus den Forst-Unterabteilungen wurden diejenigen Bestände genutzt, welche einen Mischungsanteil der Hauptbaumart von mindestens 75% aufwiesen, sowie über 20 Jahre alt waren und einen Bestockungsgrad von mindestens 0,7 hatten. Aus diesen Flächen wurde der Centroid-Punkt berechnet und als Referenzpunkt der entsprechenden Baumart genutzt. Referenzdaten der 10 häufigsten Baumarten wurden proportional zu ihrer Abundanz in Niedersachsen gewählt. Dadurch ergeben sich folgende Baumarten(-gruppen): Birke, Buche, Douglasie, Eiche, Erle, Esche, Fichte, Kiefer, Lärche, Roteiche.

In vorläufigen Klassifizierungen traten besonders häufig Fehler entlang von Waldrändern, an Forstwegen und anderen Bereichen mit gemischter spektraler Signatur (Mischpixel aus Wald und anderen Klassen) auf. Deshalb wurde für diese Klassifikation eine separate Klasse für diese Bereiche eingeführt. Um Referenzdaten für diese sogenannten Mischpixel zu generieren, wurden aus den OpenStreetMap Daten alle Wege bestimmter Klassen in Niedersachsen gefiltert. Anschließend wurden die Wege mit der Waldmaske und dem mittleren NDVI der Sommermonate (Juni bis August) aus den Jahren 2018-2020 verschnitten. Um die Referenzpunkte zu generieren wurden in den Überlagerungsbereichen von Wegen und Waldmaske 1000 zufällige Punkte generiert. Um Wegbereiche mit vollständiger Kronenüberschirmung zu vermeiden, wurden dabei nur Bereichen mit einem mittlerem NDVI unter 0.85 in Betracht gezogen.

Zur Klassifikation der Bilddaten wurden RandomForest-Klassifikatoren genutzt. Um die optimalen Hyperparameter des Klassifikators zu finden, wurde der Referenzdatensatz 70/30 geteilt. 70% wurden als Trainingsdaten genutzt und 30% als Testdaten für das Hyperparameter-Tuning. In einem ersten Schritt wurden dabei folgende Parameter der Reihe nach optimiert: Number of Trees, Variables per Split und Minimal Leaf Population. Die optimale Parameterwahl der vorhergehenden Variablen wurde dabei jeweils für die nächste Variablenoptimierung genutzt. Mit den optimierten Werten dieser Variablen wurde dann eine FeatureSelection durchgeführt, um die Anzahl der Eingangsvariablen (Spektralbänder) zu reduzieren. Mit den 20 wichtigsten Spektralbändern als Eingangsvariablen wurde die Parameteroptimierung (*Number of Trees*, *Variables per Split*, *Minimal Leaf Population*) dann nochmals durchgeführt und das performanteste Modell nach Abschluss dieser Optimierung als finales Modell übernommen. Das finale genutzte Modell nutzt die folgenden Hyperparameter: *numberOfTrees* = 90, *variablesPerSplit* = 8 und *minLeafPopulation* = 3

Zur unabhängigen Validierung der Klassifikation wurde die Genauigkeit (Overall Accuracy) basierend auf der Konfusionsmatrix von Klassifizierung und Inventurpunkten errechnet. Als Inventurpunkte wurden dabei die niedersächsischen Daten der dritten Bundeswaldinventur genutzt, ebenfalls aggregiert nach Baumarten(-gruppen) und gefiltert auf Bestände mit einem Anteil der Hauptbaumart von mindestens 75%.

Ergebnis der Klassifizierung ist eine deutschlandweite Karte der oben genannten Baumarten-Verbreitungen mit einer Auflösung von 10x10m. Die Gesamtgenauigkeit der Klassifizierung liegt bei 79%. Besonders die Klassen seltener Baumarten (Birke, Esche, Roteiche) haben eine geringe Genauigkeit und sollten daher mit Vorsicht interpretiert werden.

6.3.4 Generierung und Bereitstellung verbesserter Schadensdaten nach Stürmen und während laufender Borkenkäferkalamitäten

Es sollte die Möglichkeit evaluiert werden, inwieweit sich die Schadflächenableitung durch die Nutzung von kommerziellen, hochauflösenden Satellitenbilddaten verbessern lässt und zwar zum einen möglichst zeitnah nach Sturmschäden, und zum anderen für die jährliche Ableitung von Waldschäden, insbesondere durch aktuell laufende Borkenkäferkalamitäten. Die Grundannahme zu dieser Überlegung war, dass Sturmschäden in AP4 mittels Sentinel-1 Radar Daten nur recht grob abgeleitet werden können. Das Produkt aus den Sentinel-1 Daten soll lediglich Hinweiskarten liefern wo potenziell Sturmschäden aufgetreten sein könnten. Und bei der jährlichen Schadenskartierung mittels Sentinel-2 gibt es zumindest eine Limitation hinsichtlich der räumlichen Auflösung der Daten. Da Sentinel-2 Daten auf eine zeitliche Auflösung von ca. 5 Tagen und eine räumliche Auflösung von 10/20 m beschränkt sind, sollte getestet werden, ob sich die Kartierung mittels hochaufgelöster Planet-Dove Daten verfeinern lässt. Theoretisch werden diese Daten täglich (mehrmals) aufgenommen und haben eine Auflösung von ca. 3 m. Die Annahme war daher, dass sich nutzbare Bilder einerseits schneller nach einem Sturmereignis finden lassen und andererseits kleinere Pixel zu einer detaillierteren Schadflächenabgrenzung führen könnten.

Das Untersuchungsgebiet wurde unter Berücksichtigung vorkommender Schadbilder und vorhandener Referenzdaten ausgewählt. Die Wahl fiel dabei auf das Gebiet rund um den Solling und das Weserbergland im Südwesten Niedersachsens. Das Gebiet umfasst insgesamt 1426 km², wovon ein Großteil bewaldet ist. Durch Sturm Friedrike Anfang 2018 und im Zuge der folgenden Extremwetterjahre kam es in dem Gebiet zu vielen Waldschäden.

Für das Gebiet wurden Planet Dove Daten der Firma Planet Labs bestellt. Eine Bestellung beinhaltete Planet Basemaps (eine Komposition mehrerer Bilder unterschiedlicher Zeitpunkte innerhalb eines Zeitraums) zum Stichtag 31. August 2018, 2019, 2020 und 2021, mit jeweils ca. einem Monat Kulanz nach vorne und hinten. Die andere Bestellung beinhaltete Planet Orthotiles (Bilddaten eines einzelnen Überflugs) möglichst nah vor und nach Sturm Friederike. Die nächstmöglichen Zeitpunkte mit einigermaßen geringer Wolkenbedeckung waren der 15./16.10.2017 vor dem Sturm und der 21.04.2018 nach dem Sturm.

Die Planet-Bilddaten wurden in der Software R mit einem RandomForest Algorithmus klassifiziert in die Klassen Wald (ungeschädigt) und Nichtwald (geschädigt). Als Referenzdaten wurde der Teil der generellen Referenzdaten (aus AP3) aus dem Untersuchungsgebiet 32UNC in Südniedersachsen genutzt, welcher sich mit den Bilddaten überschneidet und Schäden des entsprechenden Jahres abbildet. Da der RandomForest Algorithmus laut manchen Studien auf die Verteilung der Trainingsdaten sensibel sein kann wurde aus diesem Datensatz der größtmögliche Teil der Daten genutzt, mit welchem eine proportionale Verteilung von geschädigten zu ungeschädigten Pixeln im Verhältnis von 10 zu 90 erreicht werden konnte. Dies entspricht grob dem erwarteten Schädigungsgrad in dem Untersuchungsgebiet in dem Jahr.

Die Klassifizierungen der Planet Basemaps aus August 2018 und August 2019 zeigen grundsätzlich positive Ergebnisse. Es lässt sich erkennen, dass Freiflächen gut von bestocktem Wald differenziert werden können. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass die Klassifikation nur so gut ist wie die zugrundeliegende Waldmaske, da wir die Änderungen aus monotemporalen Bildern nicht direkt ableiten können. Freiflächen werden an den Rändern schärfer abgegrenzt als basierend auf den Sentinel-2 Daten und auch kleinere unbestockte Flächen werden erkannt. Gleichzeitig werden dadurch aber auch potenzielle False Positives mit ausgegeben, also Flächen welche keine Änderung durchlaufen haben. Dies ist besonders entlang von Forststraßen ersichtlich. Im eigentlichen Sinne der Klassifizierung ist dies nicht falsch, da wir bestockte und

unbestockte Flächen klassifizieren, allerdings sind dies keine Schadflächen im Sinne des Projektes.

Eine Random-Forest Klassifizierung basierend auf den Orthotiles vom 21. April 2018, also drei Monate nach dem Sturm, ergibt gemischte Ergebnisse. Vermutlich durch die gerade einsetzende Laubausbildung, schlechte Lichtverhältnisse (niedriger Sonnenstand) und eine Mischung aus geräumten und ungeräumten Flächen, kommt es teilweise zu Fehlklassifizierungen. Größere Schadflächen werden zwar erkannt, bei kleineren Flächen kommt es aber häufiger zu Fehlern. Es wurde auch getestet ob eine gemeinsame Klassifizierung der Orthotiles von vor und nach dem Sturm zu besseren Ergebnissen kommt. Dabei werden aber noch größere Bereiche fehlklassifiziert, da Wolken und NoData Bereiche zunehmen. Für eine genaue Änderungsklassifizierung müssen zu beiden Zeitpunkten valide Daten vorhanden sein.

Die Klassifikationsergebnisse haben gezeigt, dass die Daten grundsätzlich für die Ableitung von unbestockten Beständen genutzt werden können, aber mit einigen Einschränkungen. Der größte Nachteil ist, dass eine direkte Waldschadenskartierung mit monotemporalen Bildern nicht möglich ist. Es kommt zu False Positives falls keine detaillierte Waldbestockungsmaske vorhanden ist.

Für die Waldschadensableitung nach Winterstürmen sind die Daten weniger geeignet, da wolkenfreie Bilddaten ebenso rar sind wie bei Sentinel-2 Daten. Eine Anwendung hier wird als wenig zielführend angesehen.

Im Vergleich zu der Klassifizierung von Sentinel-2 lassen sich mit PlanetScope in der Theorie detailliertere Abgrenzungen ableiten. Unsere Klassifizierungen haben aber gezeigt, dass die Fehlklassifizierungen noch größer sein können als bei den Sentinel-2 Bildern. Dies liegt zum einen an der angewandten Methodik und zum anderen an der oben genannten Problematik der Datenmaske, sowie der Datenverfügbarkeit. Mit dem Kalman-Filter werden sehr viele Sentinel-Bilder in einer Zeitreihe verarbeitet und dadurch einzelne Bildteile mit Wolken etc. ausgeglichen. In der angewandten Methodik für die Ableitung aus Planet-Bildern wurden jeweils einzelne Bilder oder Vorher-Nachher-Bilder klassifiziert, wodurch Bildbereiche mit Artefakten automatisch zu Fehlern führen, bzw. Bildbereiche mit funktionierender Maske zu unauswertbaren Bereichen.

Für eine jährliche Ableitung von Waldschäden zu einem bestimmten Zeitpunkt (hier Ende August) basierend auf den Basemaps lassen sich die Daten mit ähnlicher Genauigkeit wie Sentinel-Daten nutzen. Die teils schärfere Abbildung entlang von Freiflächen wird von den falsch klassifizierten Flächen (z.B. Forstwege) relativiert.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass eine Nutzung von Planet-Daten mit hohen Kosten und relativ hohem Aufwand für die Prozessierung verbunden ist. Demgegenüber stehen nur leichte Verbesserungen oder sogar schlechtere Ergebnisse als mit Sentinel-2 Daten, zumindest solange man nicht viel Geld und Zeit investiert um eine Zeitreihenanalyse basierend auf vielen Bildern zu entwickeln.

6.4 Staatsbetrieb Sachsenforst

6.4.1 Definition der Schnittstellen zur Integration der Projektergebnisse in die landeseigenen IT-Strukturen von Sachsenforst

Die Ergebnisdaten des Fernerkundungsbasierten Nationalen Erfassungssystems Waldschäden (FNEWs) sollen vom Thünen-Institut künftig als WMS und voraussichtlich auch WFS bereitgestellt werden. Es wurde geprüft, inwieweit die bereitgestellten Daten in die im Staatsbetrieb Sachsenforst bereits vorhandenen Applikationen (web und mobil) integriert werden können (Abbildung 11), um

einerseits möglichst eine breite Akzeptanz der Nutzer zu erzielen und andererseits die bei Sachsenforst vorhandene Applikations-Landschaft nicht noch weiter zu vergrößern.



Abbildung 11: Geodateninfrastruktur von Sachsenforst

Im Ergebnis der Analyse wurde festgestellt, dass künftig die FNEWs-Daten sowohl in die Web-Applikation FGIS_online als auch in die mobile App FGIS_offline integriert werden können. Dies setzt eine permanente Laufendhaltung der Daten durch das TI voraus.

Der vom TI bereitgestellte WMS wurde in die beim Staatsbetrieb Sachsenforst vorhandene WebApplikation FGIS_online integriert und damit einem breiten Nutzerkreis im Sächsischen Verwaltungsnetz/Kommunalen Datennetz zur Verfügung gestellt. FGIS_online stellt forstlich relevante Geo- und Sachdaten zur Unterstützung der forstfachlichen Tätigkeiten und Arbeitsprozesse bereit. Durch die transparente Überlagerung verschiedener Kartenthemen und deren Verknüpfung mit Sachinformation lassen sich zahlreiche forstliche Fragestellungen beantworten. Der WMS ist permanent im Karteninhalt unter der Rubrik „Waldschäden“ mit dem Titel „Fernerkundungsgestütztes Nationales Erfassungssystem Waldschäden - Erfassung von Waldschäden mit Sentinel-2-Daten - (Thünen Institut)“ eingebunden. Die Visualisierung der Daten erfolgt unter Berücksichtigung bereits vorhandener Wertebereiche und Symbolisierungsvorschriften. Abbildung 12 veranschaulicht beispielhaft die Einbindung des im Ergebnis des FNEWs-Projektes veröffentlichten WMS für die sächsischen Untersuchungsgebiete.

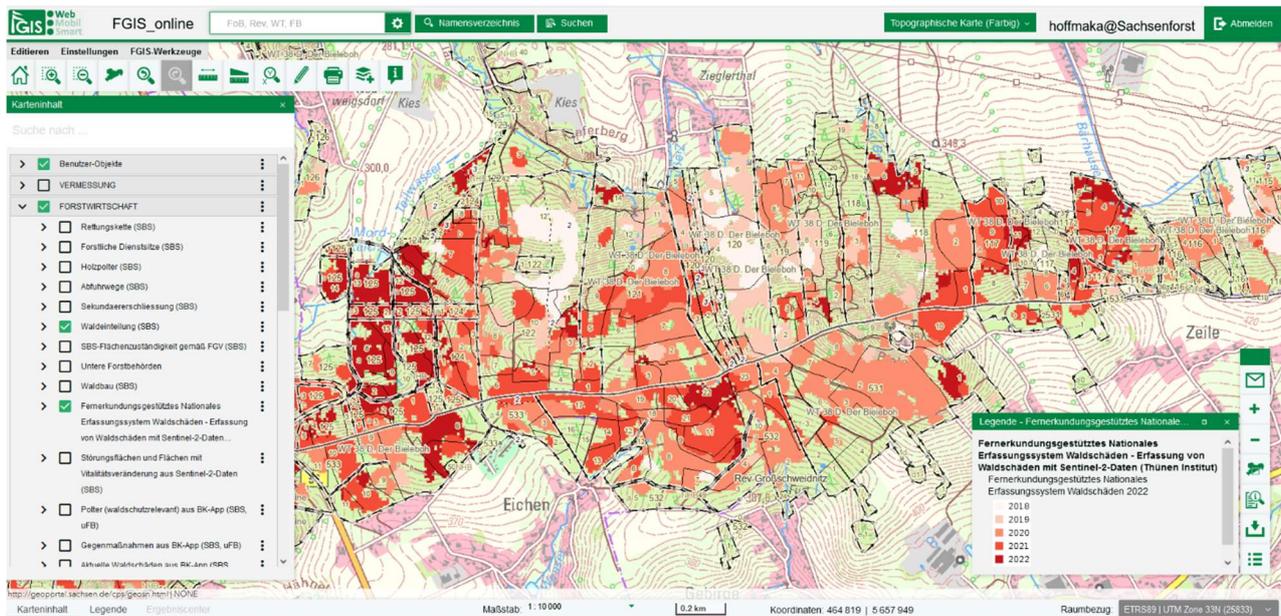


Abbildung 12: WMS „Fernerkundungsgestütztes Nationales Erfassungssystem Waldschäden - Erfassung von Waldschäden mit Sentinel-2-Daten (Thünen-Institut)“ für die sächsischen Untersuchungsgebiete in FGIS_online

Darüber hinaus ist die Nutzung der Daten in FGIS_offline und deren dateibasierte Bereitstellung als Shapefiles bzw. künftig als Geopackages auf dem Geodatenserver der Geschäftsleitung von Sachsenforst geplant. Im Rahmen der laufenden Synchronisation der Daten werden diese zeitnah auf die Forstbezirksserver und Revier-PCs übertragen werden. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung war die Form der physischen Datenübergabe an die Bundesländer (WFS oder filebasiert) noch nicht eindeutig geklärt. In beiden Fällen werden die Entwicklung von Routinen zur standardisierten Datenübernahme und Homogenisierung auf vorliegende landesspezifische Datenmodelle erforderlich. Bei der Bereitstellung der Daten als WFS müssen die Daten zusätzlich standardisiert in Shapefiles oder Geopackages konvertiert werden.

6.4.2 Verfeinerte Schadkartierung mittels hochauflösender Daten für landeseigene Datenanforderungen

Die Auswertung der jährlichen Bildflüge des Nationalparks Sächsische Schweiz sollte im Rahmen des FNEWs-Projekts weiterentwickelt, auf andere Regionen angewandt und für andere Baumarten sowie für andere hochauflösende Daten (World-View 2, Pléiades, SkySat) adaptiert werden. Die Grundlage dafür bildete die aus dem IpsPro (Ips Typographus + Prognose) – Projekt („Verbesserte Abschätzung des Risikos für Buchdruckerbefall – Grundlagen für ein Prognosewerkzeug als Bestandteil des integrierten Waldschutzes“) vorhandene Methodik. Dabei handelt es sich um eine semiautomatisierte Auswertung von Luftbildern mit einer Bodenauflösung von 20 cm. Dazu wird ein Random Forest Klassifikator in einem ersten Modell trainiert und dieser dann in einem zweiten Modell zur Klassifikation für den gesamten Fichtenbestand im Nationalpark angewandt. Dabei liegt der Fokus auf der Erkennung von Borkenkäferschäden in folgenden Klassen: red-attack, grey-attack und eingeschlagen (entstandene Freiflächen, liegendes Totholz). Das Trainieren des Random Forest Klassifikators und die anschließende Klassifikation wurden mit der Software ERDAS IMAGINE durchgeführt. Die Dokumentation des IpsPro - Projekts war äußerst umfangreich und lieferte auch Anleitungen zur Durchführung des Prozesses. Die Beschreibung des komplexen ERDAS Spatial Modells war im Detail nicht nachvollziehbar.

Das komplexe Modell enthält neben der Verarbeitung der DOP-Daten auch die Auswertung von Sentinel-2 Daten. Der Teilprozess der Sentinel-2-Auswertung wurde zur besseren Übersicht und Verarbeitung der Daten aus dem Modell entfernt. Im weiteren Verlauf des Projekts wurde das Modell adaptiert, so dass verschiedene Teilprozesse in Submodellen zusammengefasst und die

Prozesse verkürzt werden konnten. Weiterhin wurden die Operatoren auf den aktuellen Stand der Version ERDAS IMAGINE 2023 angepasst. Damit konnte die Übersichtlichkeit des Modells entschieden verbessert werden. Des Weiteren wurde eine übersichtliche Dokumentation der Prozesse erstellt.

Zunächst erfolgte die manuelle Erfassung der Trainingsdatensätze. Dazu wurden in einem GIS zehn Polygonen pro Klasse digitalisiert. Die Anzahl der Klassen beläuft sich auf 15. Als vorteilhaft erwies sich die automatisierte Segmentierung von Trainingspolygone und deren Zuweisung zu den Klassen. Dazu wurden pro Klasse 50 Polygone selektiert. Diese Methodik wurde in den Verfahrensprozess integriert.

Zur Erstellung der benötigten Fichtenmaske wurden ursprünglich die Forsteinrichtungsdaten verwendet. Bei näherer Betrachtung der vorherigen Ergebnisse, wurde festgestellt, dass einige Fichtenschäden nicht detektiert werden konnten, da diese nicht innerhalb der verwendeten Fichtenmaske lagen. Daher wurde die vorhandene Fichtenmaske erweitert. Dafür wurden Ergebnisse aus dem Gesamtwaldprojekt von Sachsenforst hinzugezogen. Im Rahmen des Gesamtwaldprojektes wurden auf Basis von Fernerkundungsdaten (Digitale Orthobilddaten, Laserdaten, Sentinel-2-Daten) für den Gesamtwald Sachsens zwischen 2011 und 2021 Waldzustandsdaten automatisiert erfasst. Dazu gehörte neben der Detektion von Wuchsklassen, Baumhöhenklassen, Bestandeshöhen, Überhältern, Waldflächenzu- und -abgängen auch die Klassifikation von Baumartengruppen (z.B. Fichte).

Die Migration der in ERDAS IMAGINE 2020 erzeugten Modelle auf die neusten ERDAS IMAGINE Versionen 2022 und 2023 gestaltete sich äußerst kompliziert und zeitaufwändig. Hierbei wurde auch im Rahmen von bei Sachsenforst bestehenden EVB-IT-Verträgen auf den Support der Firma GEOSYSTEMS GmbH zurückgegriffen. So wurde z.B. ein Workshop mit der Firma GEOSYSTEMS zum besseren Verständnis der Operatoren und Verbesserung der Modelle durchgeführt. Zusätzlich erfolgte ein Treffen mit dem Entwickler des Modells, um Lücken bei der Verfahrensdokumentation zu schließen. So konnten die programmtechnischen Probleme Schritt für Schritt beseitigt werden. Als negativ erwiesen sich auch die eingeschränkten Rechte für Anwender von ERDAS IMAGINE auf dem verwendeten Rechner aufgrund der bei Sachsenforst bestehenden IT-Sicherheitsrichtlinien. Mit Administratoren-Rechten können softwareseitige Probleme von ERDAS schneller behoben werden.

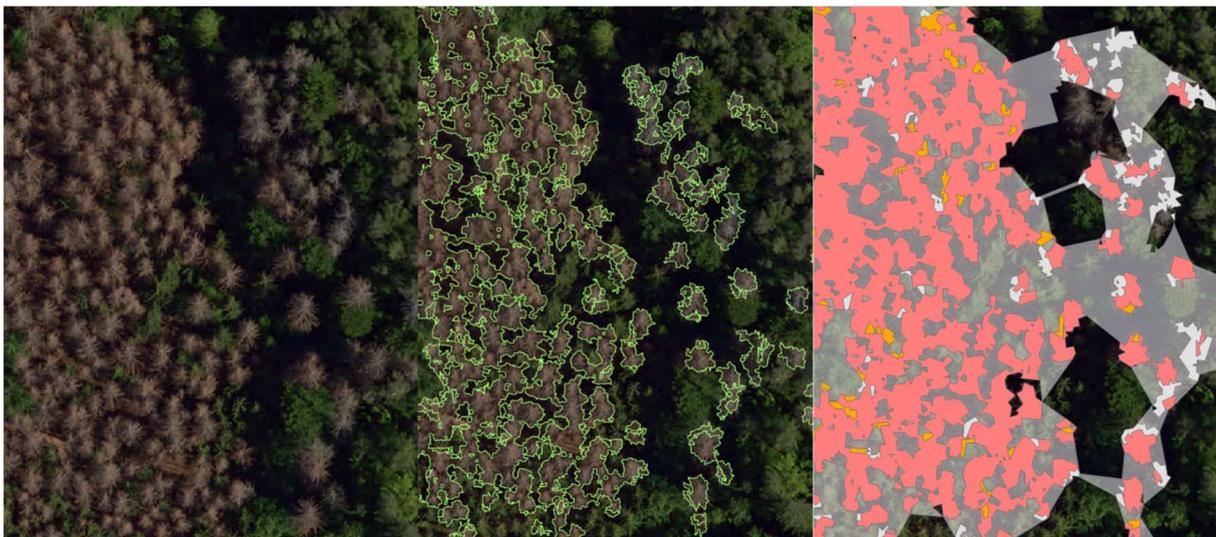


Abbildung 13: Darstellung der Schaddetektion anhand der Luftbilddaten. Links ist auf dem Luftbild deutlich der Schaden zu erkennen. In der Mitte das klassifizierte Zwischenergebnis von ERDAS und rechts das fertige Produkt, welches für den Gebrauch im Nationalpark flächiger dargestellt wird. Außerdem sind hier die Klassen „red-attack“ in rot und „grey-attack“ in grau visualisiert

Im Rahmen von FNEWs wurden die digitalen Orthophotos von 2021, 2022 und 2023 für den Nationalpark Sächsische Schweiz ausgewertet. Da Vegetationshöhenmodelle für die Auswertung benötigt werden, erfolgte die automatisierte Ableitung von luftbildbasierten digitalen Oberflächenmodellen jeweils aus den Luftbilddaten 2021 bis 2023. Für die Klasse „eingeschlagen“ mussten manuelle Nacharbeiten durchgeführt werden. Danach wurde eine Validierung der detektierten Schadklassen durchgeführt. Hierbei wurden 500 Validierungspunkte innerhalb der drei Klassen zufällig verteilt. Die Gesamtgenauigkeit, die Nutzergenauigkeit und die Produzentengenauigkeit sind für alle Jahrgänge sehr gut (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Validierung der Luftbilddauswertungen

Validierungsjahr	Genauigkeiten [%]		
	Gesamtgenauigkeit	Nutzergenauigkeit	Produzentengenauigkeit
2021	92,24	94,02	91,68
2022	95,06	95,27	95,15
2023	92,50	94,70	86,70

Es muss festgestellt werden, dass die angestrebten Weiterentwicklungen nicht im vollen Umfang durchgeführt werden konnten. Es erfolgte keine Adaption der Modelle für höchst aufgelöste Satellitendaten. Zum einen lag dies an den langen Krankheitsphasen des Projektmitarbeiters und zum anderen an der sich als äußerst kompliziert erwiesenen Migration der Modelle auf die neueste ERDAS IMAGINE Version.

Die Methodik wurde im Rahmen des Projekts auf den Nationalpark Schwarzwald übertragen (vgl. Kapitel 6.4.2).

6.4.3 Übertragung der verfeinerten SBS-Schadkartierung Sachsens auf Modellregion in Baden-Württemberg

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die eigenständige, jährliche Anwendung des von Sachsenforst entwickelten Modells zur Schaderkennung an der FVA BW in der Modellregion Nationalpark Schwarzwald. Um die Bereitstellung des Modells und dessen zugehörige Daten zu gewährleisten, wurde ein Kooperationsvertrag zwischen Sachsenforst und der FVA BW aufgesetzt. Dieser ermöglicht der FVA BW mit dem Modell von Sachsenforst an Rechner der FVA BW zu arbeiten, dessen Anleitung zu verwenden und das Modell an die Eigenheiten der Modellregion anzupassen. Gleichzeitig wird Sachsenforst über jede Veränderung am Modell informiert. Neben der Bereitstellung des Modells und seiner Anleitung und der Schaffung eines rechtlichen Rahmens, wurde die FVA BW von Sachsenforst außerdem in der Implementierung des Modells an Rechnern der FVA BW unterstützt. Dazu gehörten Soft- und Hardware-Fragen, als auch eine genaue Aufarbeitung der benötigten Input-Dateien. Zudem wurde durch Sachsenforst eine Schulung für die Software des Modells (ERDAS IMAGINE), mit Fokus auf die Verbesserung der Performance des Modells, durchgeführt, an welcher die FVA BW teilnehmen durfte. Die Schulung wurde ausgeführt durch die GEOSYSTEMS GmbH, einem lizenzierten Partner von Hexagon AB, dem Vertreiber der Software.

Da das Modell in der optischen Analyse- und Auswertungssoftware ERDAS IMAGINE ausgeführt wird, wurden der FVA BW spezifische GMDX-Dateien übergeben, welche im ERDAS IMAGINE Spatial Modeler dem Modell ein GUI geben. Da die Anwendung dieses Modells bestimmte Rahmenbedingungen erfordert, kann das Modell zurzeit nur an einem Remoterechner der FVA BW ausgeführt werden. Die von der FVA BW benötigten Input-Dateien bestehen aus den jährlichen Befliegungen des Nationalparks als digitale Orthophotos, dem Bildflugdatum, dem Umriss des

Nationalparks, einer Fichtenmaske und einem Vegetationshöhenmodell und ein Trainingsdatensatz. An diesem Trainingsdatensatz wird im ersten Teil des Modells ein Random-Forest-Klassifikator angewendet, welcher eine MIZ-Datei generiert. Diese Datei wird im zweiten Teil des Modells dann zusammen mit den weiteren Input-Dateien auf einzelne Kacheln / Ausschnitte des Untersuchungsgebietes angewendet.

Der Trainingsdatensatz für das Random-Forest-Modell wurde nach Anleitung von Sachsenforst erstellt. In Absprache mit Sachsenforst gab es mehrere Ansätze, um den Trainingsdatensatz zu optimieren. Es gibt 17 Hauptklassen, welche teilweise noch in Sonnenseite / Schattenseite unterteilt sind. Jede dieser Klassen benötigt eine bestimmte Anzahl an zugewiesenen Trainingspolygonen. Die optimale Anzahl der Polygone pro Klasse wurde noch nicht ermittelt. Aktuell werden 30+ Polygone pro Klasse erstellt. Ursprünglich wurden die Polygone per Hand gezogen, inzwischen wurde ein Segmentierungsmodell erstellt, welche die Trainingsgebiete in einzelne Polygone zerlegt, die dann nur noch ihrer Klasse zugewiesen werden müssen. So kann in kürzerer Zeit ein größerer Trainingsdatensatz erstellt werden und die Polygonform basiert auf einem Algorithmus.

Durch die zu verarbeitende Datenmenge ist die benötigte Rechenleistung des Computers sehr hoch. Die Rechenzeit ist daher ein zentraler Punkt um das Modell anwendbar für die jährliche Auswertung der Nationalparkfläche zu machen. Durch eine Verschiebung der für die Rechnung benötigten Dateien (Modell, als auch Input-Dateien) auf eine SSD-Karte auf dem ausführenden Remoterechner, als auch eine Anpassung der Zwischenspeicherordner des Modells konnten unnötige Transfers innerhalb der FVA BW Serverstruktur vermieden werden. Dies hat die Rechendauer für eine Kachel von mehreren Tagen auf einige Stunden verkürzt. Auch ein auf der Schulung entwickeltes Modell hat zu einer effektiveren Berechnung geführt. Dennoch würde die Berechnungszeit für alle Kacheln eines Jahres aufsummiert aktuell noch bei mehreren Wochen liegen.

Die aktuellen Ergebnisse sind noch nicht zufriedenstellend, da auch ohne durchgeführte Validierung von einer ungenügenden Genauigkeit gesprochen werden kann. Es werden wiederholt Forstwege und Freiflächen als Schaden klassifiziert und deutlich zu erkennende Schadflächen werden nicht erkannt. Neben dem Trainingsdatensatz liegt dies vor allem an der Fichtenmaske, welche auf einem FVA BW eigenen Ansatz basiert. Aufgrund der Auflösung von 10 Metern werden viele potentielle Schadflächen, vor allem an den Randbereichen von Wäldern zu Freiflächen oder Forstwegen, schon vor der Klassifizierung durch das Modell ausgeschnitten. Verschiedene Methoden zur Verbesserung der Fichtenmaske wurden bisher ausprobiert. Bei einer flächendeckenden Fichtenmaske werden Forstwege mit als Schadflächen klassifiziert. Die Baumartenkarte des Thünen-Instituts ist vergleichbar mit der Fichtenmaske der FVA BW und hat daher ähnliche Probleme. Das nDOM mit allen Werten über einem Schwellenwert (z.B. 15m) als Fichtenmaske zu verwenden ist die bisher vielversprechendste Methode. Allerdings werden auch hier pauschal potentielle Schadfläche herausgeschnitten. Es laufen derzeit Tests, um die Bestockungslayer und die Baumlayer der FVA BW auf ihre Eignung hin zu untersuchen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Übertragung des Modells der verfeinerten Schadkartierung vom SBS auf die Modellregion Nationalpark Schwarzwald der FVA BW funktioniert hat. Das Modell läuft auf der Hardware der FVA BW und liefert Ergebnisse. Für die Verbesserung der Ergebnisse sowie die Beseitigung der übrigen Fehlermeldungen ist nun die FVA BW verantwortlich. Ob das Modell im aktuellen Zustand auf der ganzen Nationalparkfläche anwendbar ist, ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht geklärt. Die Validierung der Ergebnisse ist daher noch offen, da erst die komplette Fläche des NLP durch das Modell laufen muss.

7 Validierung der Ergebnisse

Die Validierung im Projekt FNEWs dient der Beurteilung der Ergebnisse aus der Zeitreihenanalyse (Arbeitspaketen 4) und den Sturmschadenskarten (Arbeitspaket 5). Mit Hilfe dieser Beurteilung wurde die Genauigkeit und Aussagekraft der berechneten Produkte ermittelt.

Die Ergebnisse in Arbeitspaket 4 zeigen die Veränderungen in Waldflächen, die entweder innerhalb eines Monats (NRT-Produkt) oder eines Jahres (Jahresprodukt) stattgefunden haben. Die Zuverlässigkeit der ermittelten Veränderungen soll durch die Validierung berechnet werden. Für die Sturmschadenskarte aus Arbeitspaket 5 sollte zusätzlich ermittelt werden, welcher Schwellwert der Rückstreuendifferenz einer Kachel am genauesten eine Schädigung voraussagt. Zudem werden die Ergebnisse verschiedener Modelle miteinander verglichen.

7.1 Validierungskonzept

Die zu validierenden Daten stellten spezielle Anforderungen an den Validierungsprozess. Um eine transparente und zwischen den Bundesländern einheitliche Validierung zu ermöglichen, welche zudem möglichst aussagekräftige Ergebnisse liefert, wurde im Rahmen dieses Projektes ein neues Validierungskonzept entwickelt. Die Dokumentation des Validierungskonzeptes beinhaltet eine klare Darstellung eines Prozesses, um möglichst einheitlich und reproduzierbar zu sein. Eine detailliertere Beschreibung des Validierungskonzeptes befindet sich im Bericht „Validierungskonzept und Anforderung an die Validierungsdaten“.

7.1.1 Ausarbeitung Validierungskonzept

AP4 und AP5 werden mit einem ähnlichen, aber nicht identischen Verlauf validiert, da es sich um verschiedene Produkte mit unterschiedlichen Zielen handelt. Für AP4 werden Stichprobenpunkte zufällig im Validierungsgebiet verteilt und der Sentinel-2 Pixel, der durch diesen Punkt identifiziert wird, wird validiert. Für AP5 werden zufällige Validierungskacheln des Produkts mit Auflösung 100x100 m ausgewählt und validiert.

Für die Validierung werden drei Straten, basierend auf den Schadflächen der Produkte, gebildet. Durch die Stratenbildung wird sichergestellt, dass ausreichend Validierungspunkte (bzw. -kacheln) innerhalb der Schadflächen sowie in den Übergangsbereichen zu ungeschädigten Bereichen vorhanden sind. Ohne die Stratenbildung würden entweder nur sehr wenige Validierungspunkte in diese Bereiche fallen, was zu einer unzuverlässigen Validierung führt, oder es wäre eine sehr große Menge an Stichprobenpunkte nötig, wodurch der Aufwand der Validierung unnötig steigen würden. Bei der Stratenbildung werden die erkannten Schadflächen als Grundlage genutzt und das untersuchte Waldgebiet in folgende Straten aufgeteilt: Kernbereich, Randbereich und Außenbereich (Abbildung 14).

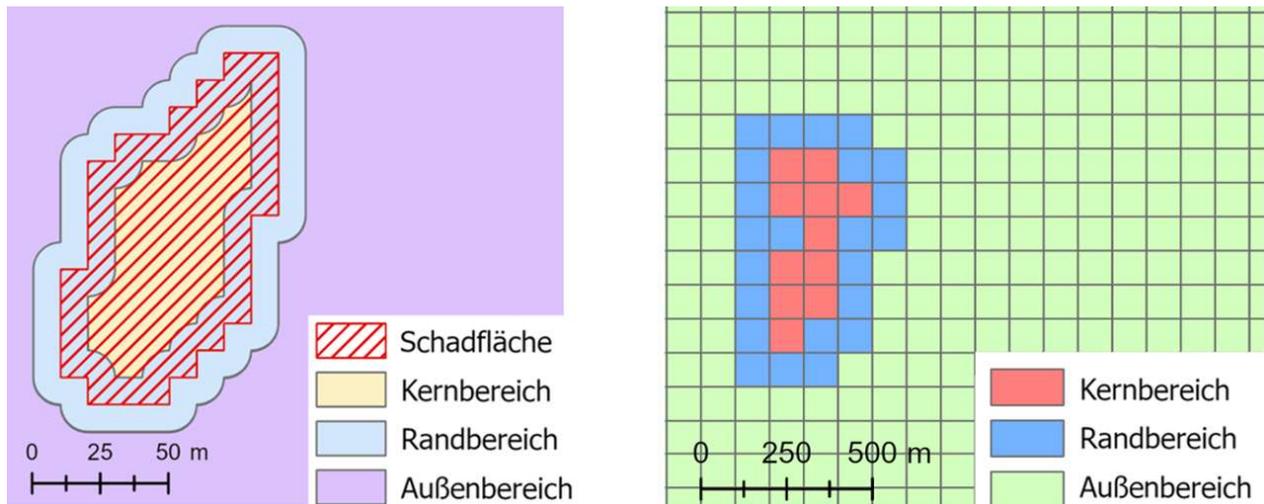


Abbildung 14: Schematische Darstellung von Schadflächen mit den drei Straten: Kernbereich, Randbereich und Außenbereich für AP4 (links) und AP5 (rechts).

AP4

Für die Validierung von AP4 wurden die Straten wie folgt gebildet: 1. Der *Kernbereich* bildet die vom Modell erkannte Schadfläche abzüglich des Randbereichs. 2. Der *Randbereich* repräsentiert einen Puffer von 10 m um den Umfang der erkannten Schadfläche, sowohl nach innen als auch nach außen. 3. Der restliche Bereich bildet das Stratum *Außenbereich*.

Für die Validierung wurden pro Untersuchungsgebiet bzw. Bundesland 3 bis 7 Validierungsgebiete ausgewertet. Validierungsgebiete unterscheiden sich untereinander durch ihre Lage und/oder das Validierungsjahr. In Niedersachsen wurde beispielsweise in den Jahren 2019, 2021 und 2022 der gleiche Bereich im Harz validiert. Da in diesem Fall unterschiedliche Jahre validiert werden, zählt jedes Jahr als einzelnes Validierungsgebiet, obwohl der gleiche Bereich abgedeckt wird. Jedes Validierungsgebiet beinhaltet mehrere Hundert Stichprobenpunkte, welche manuell durch die Interpreten ausgewertet wurden.

Die Stichprobenpunkte wurden zufällig innerhalb der ermittelten Straten verteilt. Die Anzahl der Stichprobenpunkte wurde anhand von Olofsson et al. (2014) berechnet. Für die Aufteilung der Punkte auf die Straten erhalten die beiden Straten *Kernbereich* und *Randbereiche* jeweils mindestens 100 Punkte und der Rest wird im *Außenbereich* verteilt. Außerdem wurde bei der Verteilung der Punkte, falls möglich, ein minimaler Abstand von 50 m zueinander eingehalten. Damit sollte verhindert werden, dass benachbarte oder nah beieinanderliegende Pixel untersucht werden.

Bei der Validierung wurde unter anderem festgehalten, ob das jeweilige Pixel >50 % Schaden aufweist und ob die Minimum Mapping Unit (MMU) von 0,1 ha für das Jahresprodukt bzw. 0,25 ha für das NRT-Produkt erreicht wurde. Außerdem wurden die Schadursache, das Schadausmaß der angrenzenden Pixel und der Waldtyp (Nadel-, Laub- oder Mischwald) erfasst. Die Validierung fand zunächst blind statt. Der Interpret kennt also während diesem Validierungsschritt das Modellergebnis nicht. Nach der blinden Validierung wurde zudem eine Plausibilitätsanalyse durchgeführt. Für diesen Schritt wurden die Punkte zusammen mit den Modellergebnissen betrachtet und die Plausibilität der Modellergebnisse bewertet. Hierbei wurden Punkte betrachtet, bei denen die Einschätzung des Interpreten während der blinden Validierung nicht mit den Ergebnissen des Modells übereinstimmten. Die in diesem Bericht angegebenen Genauigkeiten sind die der Plausibilitätsanalyse. Die Genauigkeiten ohne Plausibilitätsanalyse sind in den Validierungsberichten der Länder zu finden.

AP5

Für die Validierung von AP5 wurden die Straten wie folgt gebildet: 1. Der *Kernbereich* ist identisch mit den erkannten Schadflächen. 2. Der *Randbereich* umfasst alle Kacheln angrenzend an den *Kernbereich*. 3. Der restliche Bereich bildet das Stratum *Außenbereich*.

Als Stichprobenzahl wurde eine Anzahl von 200 Kacheln pro Stratum definiert. Die Kacheln wurden zufällig über das Untersuchungsgebiet verteilt. Es wurde zwischen flächigem Schaden, Streuschaden und ungeschädigten Kacheln unterschieden. Bei einem flächigen Schaden muss die geschädigte Fläche einen Schaden von > 90 % auf einer Fläche von $\geq 0,5$ ha aufweisen. Dabei ist es egal ob nur ein kleiner Teil des Schadens in der Kachel liegt. Bei einem Streuschaden muss ein Schaden von > 30 % innerhalb der Kachel vorliegen. Für die Validierung von AP5 wurde nur blind validiert, eine Plausibilitätsanalyse wurde nicht durchgeführt.

AP4 und AP5

Für die Auswertung der Stichprobenpunkte bzw. der Validierungskacheln wurde eine flächengewichtete Auswertung nach Stehman (2014) durchgeführt. Hierbei wurden die folgenden Genauigkeitsmetriken berechnet: 1. Gesamtgenauigkeit, 2. Nutzergenauigkeit der Schadflächen, 3. Produzentengenauigkeit der Schadflächen und 4. gesamte Schadfläche.

7.1.2 Definition Anforderung an Validierungsdaten

Mit Validierungsdaten sind die Referenzbilder (Luftbilder und Satellitenaufnahmen) gemeint, welche für die Validierung von AP4 und AP5 genutzt wurden. Dafür werden bereits vorhandene hoch aufgelöste Satellitenaufnahmen und Luftbilder genutzt. Es wurden die gleichen Daten genutzt wie für das Training der Modelle. Zusätzlich wurden für 2021 und 2022 Satellitendaten bestellt, um die Validierung des Jahresprodukts von AP4 zu erweitern und die Validierung des NRT-Produkts zu ermöglichen. Für die unabhängige Validierung von AP5 wurden Luftbilder der Schäden von Sturm Zeynep im Februar 2022 aufgenommen.

Die Luftbilder haben Auflösungen von 0,1 m bis 0,2 m mit einer sehr guten Lagegenauigkeit. Die Satellitendaten haben Auflösungen bis 3 m, mit einer niedrigeren Lagegenauigkeit und Verkipnungen, sind jedoch ausreichend, um eine Validierung der 10 m aufgelösten Sentinel-2 Produkte zu ermöglichen. Die Aufnahmezeitpunkte der Luft- und Satellitenbilder sollen so nah wie möglich am Zeitpunkt des validierten Produkts liegen. Für das AP4 Jahresprodukt sollten die Bilder möglichst nahe am 31.08. des validierten Jahres liegen, für das AP4 NRT Produkt möglichst zum Ende des validierten Monats und für AP5 möglichst zeitnah nach dem Sturmereignis. Die Validierungsdaten für AP4 liegen innerhalb der ausgewählten Sentinel-2 Kacheln (Abbildung 3). In Niedersachsen ist dies 32UNC, in Sachsen sind es 33UUS und 33UVS, in Bayern 32UNA und 32UPA und in Baden-Württemberg 32UMU und 32TMT.

7.1.3 Validierungsdatenbankstruktur

Die Projektpartner LWF, NW-FVA, FVA-BW und SBS haben in unterschiedlichen Arbeitspaketen im Verlauf des Projektes verschiedene Vektordaten erhoben und an das TI-WO geliefert. Ziel der Validierungsdatenbank ist es, diese Daten der Partner zusammen zu führen, zentral auf Konsistenz zu prüfen und nachfolgend zusammengeführt zu speichern. Die Datenbank kann weiterführend als Grundlage für die geplante Webdarstellung der Ergebnisse dienen.

Die FNEWs Datenbank liegt intern beim Thünen Institut. Dort wurde eine PostgreSQL Datenbank mit der Erweiterung PostGIS eingerichtet. In dieser Datenbank werden Daten vom Typ Vektor tabellarisch abgespeichert und können mit Metadaten verknüpft werden, welches zum einen eine sehr gute Dokumentation aber auch eine konsistente Speicherung ermöglicht. Aktuell sind in der Datenbank von den Bundeslandpartnern die Referenzdaten aus Arbeitspaket 3 sowie die

Validierungspunkte aus Arbeitspaket 7 gespeichert. Die Daten werden jeweils einzeln, manuell in ein Rohdatenschema hochgeladen, gesichtet und dann in einem finalen Schema gemeinsam abgespeichert. Das gleiche gilt für die Referenzdaten sowie für die Validierungsdaten aus Arbeitspaket 4 und 5. Zusätzlich sind weitere Basisdatensätze in der Datenbank enthalten, welche allgemeine Daten, wie zum Beispiel die Untersuchungsgebiete, enthalten. Der aktuelle Workflow zum Einspielen der Daten ist in Abbildung 15 dargestellt.

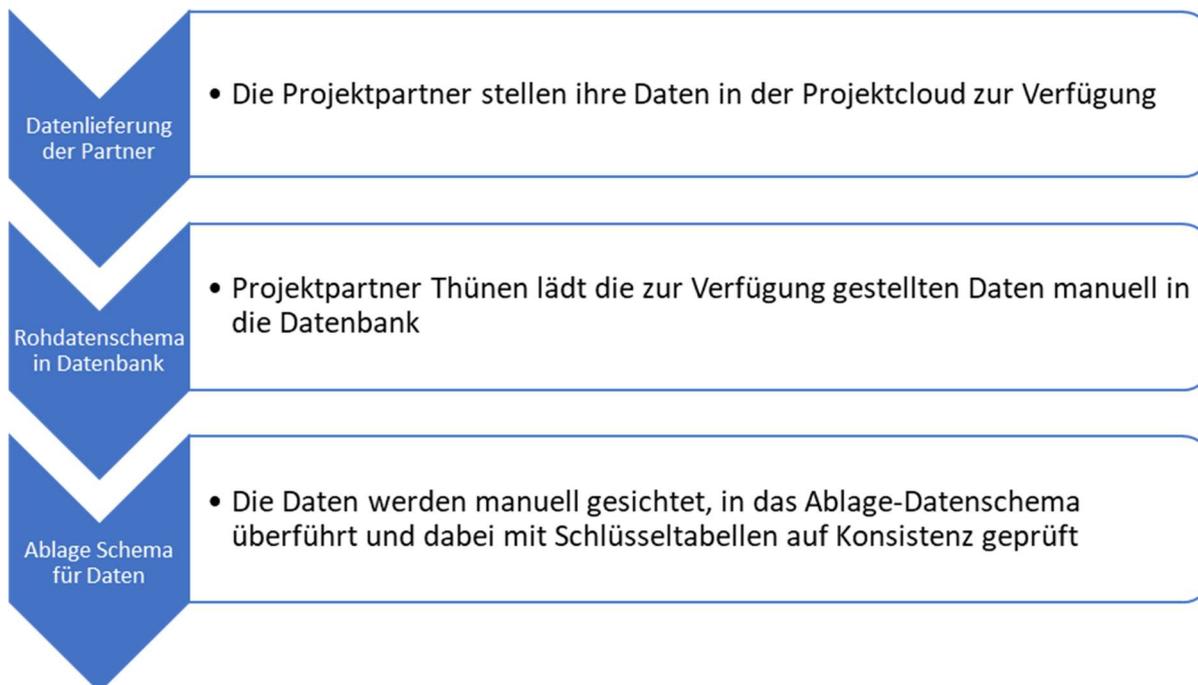


Abbildung 15: Aktueller Workflow des Ablaufes zum Einspielen der FNEWs Daten in die Datenbank

7.1.4 Validierungstool

Das Validierungstool besteht aus zwei Teilen: 1. Skripte für die einheitliche Generierung und Auswertung der Stichprobenpunkte (AP4) und Validierungskacheln (AP5) und 2. konkrete Beispiele zur korrekten Validierung unterschiedlicher Stichprobenpunkte.

1. Die Skripte wurden in RStudio verfasst. Für die Generierung der Stichprobenpunkte werden die drei Straten automatisch berechnet, basierend auf den angegebenen Schadflächen, dem Schadjahr und der Waldmaske. Die Stratengrößen und die gesamte Schadfläche werden als CSV-Datei exportiert, und für die Gewichtung der Straten während der Auswertung der Genauigkeiten genutzt. Anschließend wird basierend auf Olofsson et al. (2014) die gesamte Stichprobenanzahl berechnet. Von der berechneten Anzahl werden je 100 Punkte zufällig in den Straten *Kernbereich* und *Randbereich* verteilt. Die Restlichen Punkte werden im *Außenbereich* verteilt. Die Punkte werden anschließend als Geopackage exportiert und können nun validiert werden. Die Generierung der Validierungskacheln für AP5 erfolgt ähnlich, nur dass keine Punkte gesetzt werden, sondern zufällige Kacheln ausgewählt werden. Es werden 200 Kacheln pro Stratum ausgewählt.

Die Auswertung der Genauigkeiten erfolgt flächengewichtet nach Stehman (2014). Punkte mit einer 99 im Attribut Schaden (Punkt nicht auswertbar wegen Wolken, schlechter Bildqualität etc.) oder einer 3 im Attribut MMU (unklar ob die MMU erreicht wurde), werden

von der Auswertung ausgeschlossen. Die verbleibenden Punkte erhalten eine Gewichtung abhängig von der Größe ihres Stratum. In den meisten Fällen ist der *Kernbereich* das kleinste Stratum, gefolgt vom *Randbereich*. Der *Außenbereich* ist das größte Stratum und Punkte darin erhalten demnach meist das höchste Gewicht. Es wird die Gesamtgenauigkeit, sowie die Nutzer- und Produzentengenauigkeiten der Schadflächen und deren Konfidenzintervalle berechnet. Außerdem wird das tatsächliche Schadausmaß, basierend auf diesen Genauigkeiten, berechnet. Wir können auch mehrere Validierungsgebiete zusammen auswerten, um so beispielsweise die Genauigkeit des Produkts insgesamt, in bestimmten Jahren oder in bestimmten Bundesländern zu bestimmen.

- Die konkreten Beispiele zur korrekten Validierung unterschiedlicher Stichprobenpunkte diente der verbesserten Vergleichbarkeit der Validierung zwischen unterschiedlichen Interpreten. In Grenzfällen ist es oft schwierig zu entscheiden, wie ein Stichprobenpunkt ausgewertet werden soll. Die Beispiele befassen sich mit diesen Grenzfällen (z.B., wenn das zu validierende Pixel nur teilweise geschädigt ist, Abbildung 16) und geben den Interpreten eine einheitliche Anleitung, wie diese Punkte auszuwerten sind. Besonders bei Validierungen mit weniger genauen und schlechter aufgelösten Satellitendaten ist die Validierung dennoch oft schwierig und die Validierung unterschiedlicher Interpreten weicht stärker voneinander ab. Deshalb ist es wichtig, möglichst viele Gebiete zu validieren und gesammelte Genauigkeiten unterschiedlicher Interpreten gemeinsam auszuwerten.

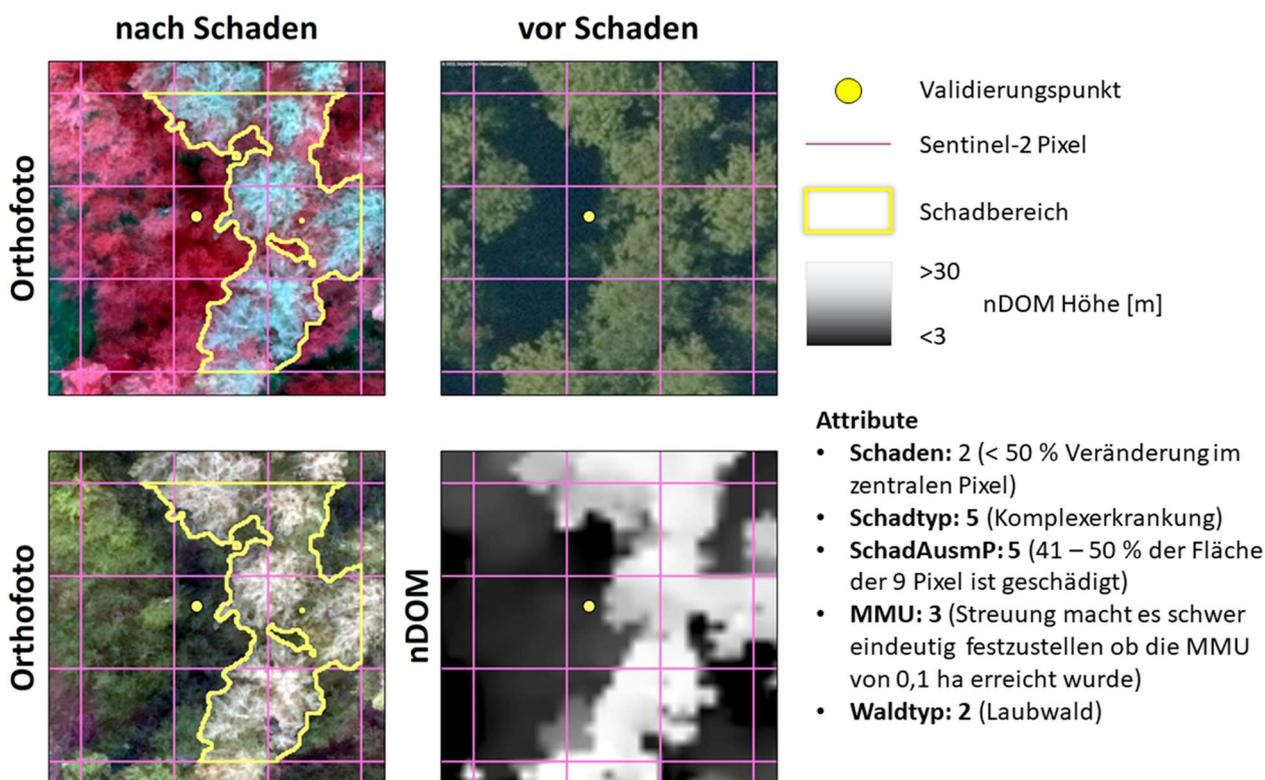


Abbildung 16: Beispiel für die einheitliche Auswertung von Stichprobenpunkten

7.2 Validierungsdaten

Für die Validierung von historischen Jahren (2018 – 2021) wurden bereits vorhandene Aufnahmen genutzt, sofern diese vorhanden waren. Für das Jahr 2018 waren keine Validierungsdaten verfügbar. Für die Validierung der Jahre 2019-2021 wurden in Niedersachsen und Bayern ausschließlich vorhandene und meist orthorektifizierte Luftbilder mit einer Auflösung von 0,2 m genutzt. Für die Validierung in Sachsen wurden für 2020 und 2021 vorhandene Luftbilder mit Auflösungen von 0,2 m genutzt. Zusätzlich wurden in Sachsen für 2020 WorldView Satellitenaufnahmen mit einer Auflösung von 0,5 m beschafft und für 2021 Planet Scope

Satellitenaufnahmen mit einer Auflösung von 3 m. In Baden-Württemberg wurden für 2020 vorhandene Luftbilder mit einer Auflösung von 0,1 m bzw. 0,2 m genutzt. Für 2021 wurden für Baden-Württemberg WorldView und Pléiades Satellitenaufnahmen mit einer Auflösung von 0,5m beschafft.

Für die Validierung der aktuellen Modellergebnisse von 2022 wurden bereits vorhandene orthorektifizierte Luftbilder mit einer Auflösung von 0,2 m genutzt. Dies war der Fall für den Harz in Niedersachsen und den Frankenwald in Bayern. Für Baden-Württemberg, Sachsen und eine zusätzliche Validierung in Bayern wurden Pléiades Satelliten-Aufnahmen mit einer Auflösung von 0,5 m bestellt. Für die Validierung des NRT-Produkts wurden Planet SkySat Aufnahmen mit einer Auflösung von 0,5 m für Sachsen und Bayern bestellt und Planet Scope Aufnahmen mit einer Auflösung von 3 m für Niedersachsen, Sachsen und Baden-Württemberg. Bei allen Satellitenaufnahmen kommt es durch den Aufnahmewinkel zu Verkippungen. Die horizontale Genauigkeit liegt bei den Satellitenaufnahmen bei wenigen Metern. Detaillierte Beschreibungen der Validierungsdaten für jedes Validierungsgebiet befinden sich in den Validierungsberichten der beteiligten Landesanstalten.

7.3 Validierung der Ergebnisse des AP 4

7.3.1 Jahresprodukt

Die 20 Validierungsgebiete verteilen sich auf vier Untersuchungsgebiete (Abbildung 17) in Niedersachsen (A), Sachsen (B), Baden-Württemberg (C) und Bayern (D). Für alle vier Untersuchungsgebiete zusammen erreichte das Jahresprodukt eine Gesamtgenauigkeit (GG) von $99,1 \pm 0,1$ %. Schadflächen wurden mit einer Nutzergenauigkeit (NG) von $84,4 \pm 2,0$ % und einer Produzentengenauigkeit (PG) von $85,1 \pm 3,4$ % erkannt (Abbildung 18). Die Genauigkeiten waren im Stratum *Außenbereich* am höchsten und *Randbereich* am niedrigsten. Im Durchschnitt betrug die GG $93,4 \pm 1,1$ % im Stratum *Kernbereich*, $84,8 \pm 2,0$ % im *Randbereich* und $99,7 \pm 0,1$ % im *Außenbereich*.

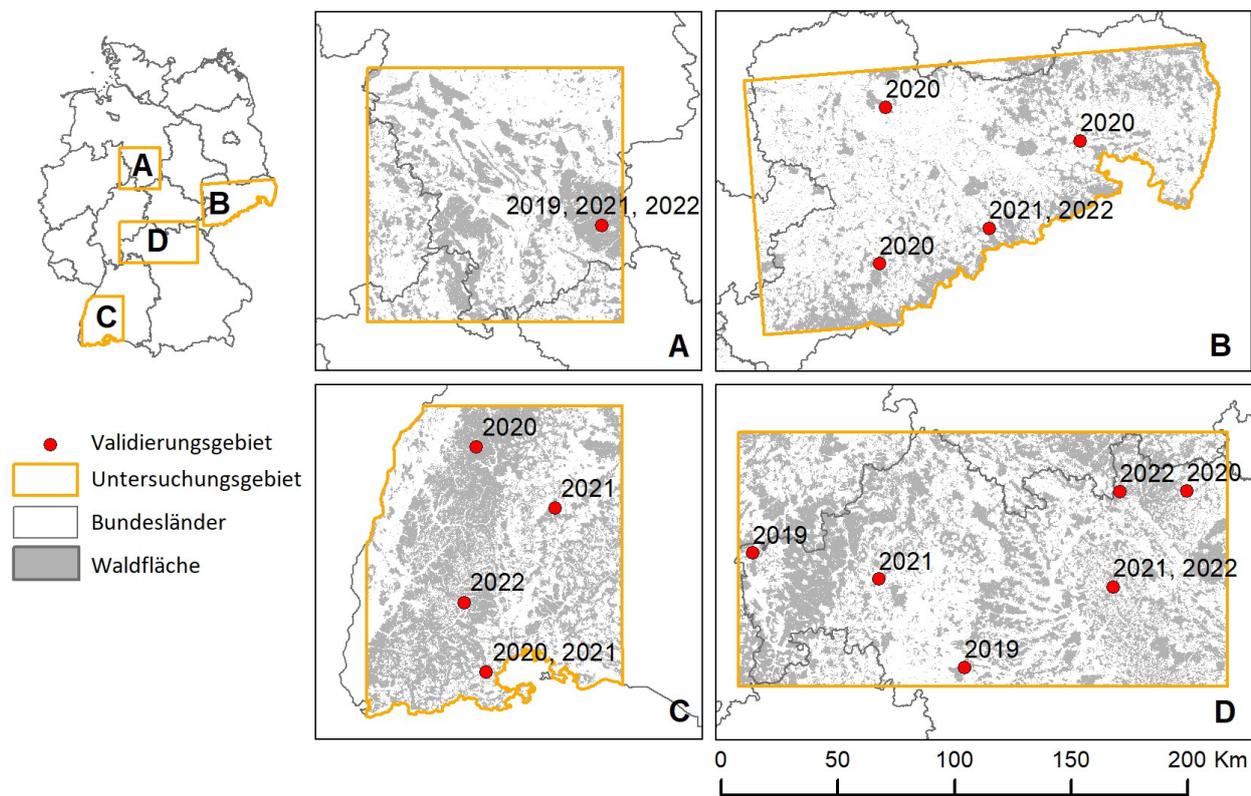


Abbildung 17: Überblick der vier Untersuchungsgebiete sowie deren jeweiliger Validierungsgebiete mit Jahresangabe (Reinosch et al., 2024).

In allen Untersuchungsgebieten erreicht das Jahresprodukt eine GG von mindestens $95,8 \pm 1,1$ %. Die NGs liegen zwischen $75,2 \pm 5,5$ % im Untersuchungsgebiet C und $92,4 \pm 3,2$ % im Untersuchungsgebiet A. Die PGs liegen zwischen $76,3 \pm 11,2$ % für das Untersuchungsgebiet C und $96,2 \pm 2,8$ % für das Untersuchungsgebiet D. Die Untersuchungsgebiete B und C haben ähnliche NGs und PGs. Die Unterschiede zwischen den Genauigkeiten in den Untersuchungsgebieten A und D sind größer. Im Folgenden beziehen wir uns auf die einzelnen Validierungsgebiete nach ihrem Standort, wobei das Jahr der Validierung in Klammern angegeben ist.

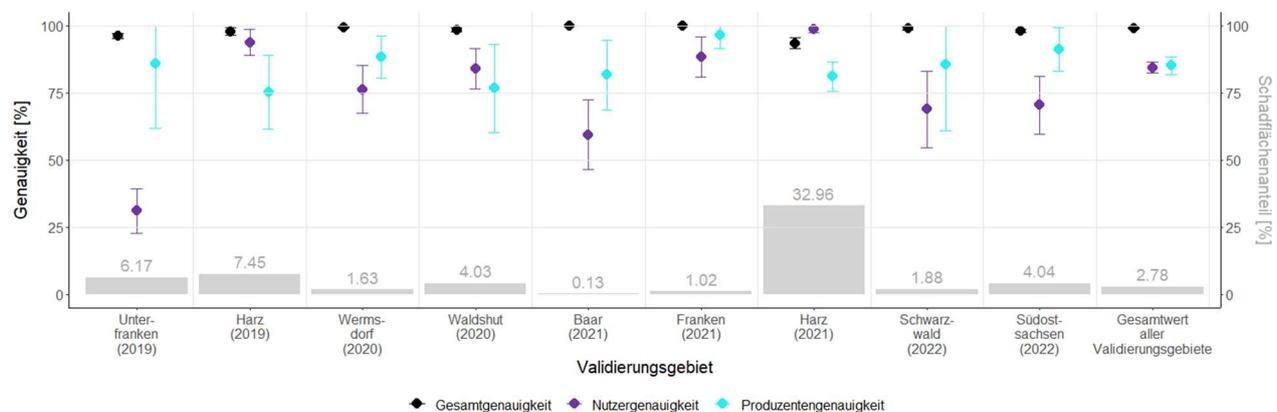


Abbildung 18: Genauigkeiten des AP4 Jahresprodukts in 10 der 20 Validierungsgebiete

Das Untersuchungsgebiet A besteht aus drei Validierungsgebieten, die alle im gleichen Bereich des Nationalparks Harz in den Jahren 2019, 2021 und 2022 durchgeführt wurden. Die meisten Störungen wurden durch kontinuierlichen Borkenkäferbefall verursacht (Abbildung 17 A). Diese Validierungsgebiete hatten die niedrigsten GGs aller Validierungsgebiete, nämlich $93,5 \pm 2,1$ % bis $97,8 \pm 1,4$ %. Die Schäden decken $7,5 \pm 0,2$ % bis $33,0 \pm 0,4$ % der Waldfläche ab, was den größten Prozentsatz aller Validierungsgebiete darstellte. Die NGs reichen von $76,5 \pm 11,5$ % bis $93,8 \pm 4,8$ % und die PGs von $75,2 \pm 13,7$ % bis $95,9 \pm 5,8$ %. Im Harz (2019, 2021) übersteigen die NGs die PGs um etwa 18 %, was auf eine Unterschätzung der tatsächlichen Schadmenge hinweist. Im Harz (2022) überstiegen die PG die NG um 19,4 %, was auf eine Überschätzung hinweist.

Das Untersuchungsgebiet B umfasst drei Validierungsgebiete aus dem Jahr 2020 und je ein Validierungsgebiet aus den Jahren 2021 und 2022. Die Validierungsgebiete sind über ganz Sachsen verteilt. Sie beinhalten sowohl kleine, isolierte Schadflächen unbestimmten Ursprungs als auch große, stetig wachsende Flächen im Zusammenhang mit Borkenkäferbefall (Abbildung 17 B). Die NGs reichen von $70,4 \pm 10,9$ % für das Validierungsgebiet von Südostsachsen (2022) bis $93,6 \pm 5,5$ % für den Validierungsgebiet von Chemnitz (2020). In beiden Fällen stehen die meisten Schäden im Zusammenhang mit Borkenkäfern, wobei in Chemnitz (2020) vor allem große Schadflächen auftreten. Die PGs sind hoch, d. h. $84,0 \pm 10,1$ % bis $100,0 \pm 0,0$ % für alle Validierungsgebiete, außer für Chemnitz (2020), wo die PG nur $68,9 \pm 31,0$ % beträgt.

Das Untersuchungsgebiet C besteht aus fünf Validierungsgebieten von 2020 bis 2022 in Baden-Württemberg. Die Schadflächen waren meistens kleiner als in den anderen Untersuchungsgebieten, verstreut und oft mit Borkenkäferbefall verbunden (Abbildung 17 C). Dieses Untersuchungsgebiet weist insgesamt die niedrigsten NG und PG auf. Die NGs variieren zwischen $51,7 \pm 11,6$ % und $84,0 \pm 7,5$ % und die PGs zwischen $60,5 \pm 37,3$ % und $85,5 \pm 24,5$ %. Die beiden niedrigsten NGs in diesem Untersuchungsgebiet sind die Validierungsgebiete Schwarzwald (2020) und Baar (2021) mit $51,7 \pm 11,6$ % bzw. $59,4 \pm 13,0$ %. Sie umfassen 385 ± 33 ha und 78 ± 13 ha gestörte Fläche, was nur 1,2 % bzw. 0,1 % der Waldfläche entspricht. Die höchste NG ($84,0 \pm 7,5$ %) erzielt das Validierungsgebiet Waldshut (2020), in dem auch die meisten Schäden auftreten (2968 ± 73 ha).

Das Untersuchungsgebiet D umfasste sieben Validierungsgebiete von 2019 bis 2022 in Nordbayern. Die Schadmuster und -ursachen waren sehr vielfältig und umfassen sogar vorübergehende Schäden durch Schwammspinnerbefall (Abbildung 17 D). Die NGs sind hoch, d. h. $82,5 \pm 9,7$ % bis $96,6 \pm 4,1$ %, mit Ausnahme des Validierungsgebiete für Unterfranken (2019). Dort bestehen die Schäden aus stark gestreuten Komplexerkrankungen und einem großflächigen Befall durch Schwammspinner. Der entsprechende NG beträgt nur $31,0 \pm 8,4$ % und ist damit die niedrigste NG aller Validierungsgebiete. Die PGs reichen von $85,9 \pm 24,0$ % bis $100,0 \pm 0,0$ % über alle Validierungsgebiete, was die höchste kombinierte PG unter allen Untersuchungsgebieten ergibt. Die vier Validierungsgebiete mit großflächigem Borkenkäferbefall weisen wie in den anderen Untersuchungsgebieten hohe Genauigkeiten auf. Insbesondere das Validierungsgebiet für Franken (2021), welches hauptsächlich aus kleinen, verstreuten Störungsflächen besteht, erzielte mit einem NG von $88,5 \pm 7,5$ % und einem PG von $96,4 \pm 4,9$ % sehr hohe Werte.

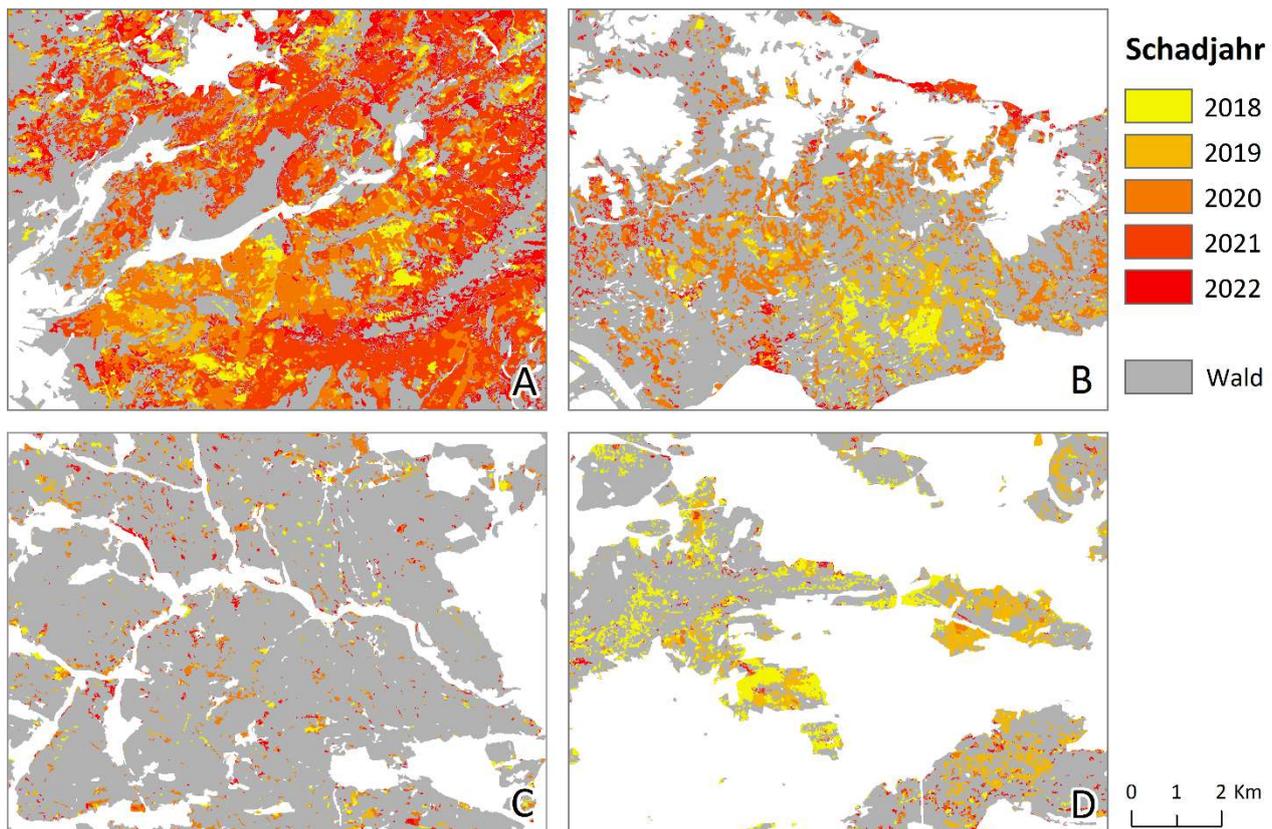


Abbildung 19: Beispiel von erkannten Schadfleichen des AP4 Jahresprodukts in (A) Niedersachsen, (B) Sachsen, (C) Baden-Württemberg und (D) Bayern (Reinosch et al., 2023; im Review)

Es wurde nicht nur die Genauigkeit des Produkts bei der Kartierung einzelner Schadfleichen bewertet, sondern auch, wie zuverlässig es das gesamte Schadausmaß abbildet. Für die von den Validierungsgebieten abgedeckten Waldfläche kartiert das Jahresprodukt während des gesamten Beobachtungszeitraums von August 2018 bis August 2022 27.582 ha Schadausmaß. Dies entspricht 2,86 % der gesamten Waldfläche. Unter Verwendung der Validierungsgebiete wird das fehlerbereinigte tatsächliche Schadausmaß auf 26.847 ± 201 ha oder $2,78 \pm 0,02$ % der gesamten Waldfläche geschätzt. Insgesamt hat das Produkt also das tatsächliche Schadausmaß leicht überschätzt. Das Schadausmaß einzelner Jahre wurde ebenfalls ausgewertet, um die Schwankungen zwischen den Jahren zu beurteilen (Tabelle 7). Für die Jahre 2020 und 2021 unterschätzt das Jahresprodukt das Schadausmaß um 9,1 % bzw. 5,8 %. Für 2019 und 2022 wird Überschätzungen von 11,1 % und 22,9 % festgestellt. Diese Überschätzung im Jahr 2022 ist in allen fünf Validierungsreihen sichtbar.

Tabelle 7: Genauigkeiten und Schadausmaß des AP4 Jahresprodukts zusammenfasst für unterschiedliche Jahre

Validierungs-jahr	Genauigkeiten [%]			Schadausmaß [%]	
	GG	NG	PG	Erkannter Schaden	Fehlerkorrigierter Schaden
2019	97.4±0.8	75.6±4.1	79.1±11.3	6.21	5.59±0.14
2020	98.8±0.4	82.0±4.3	77.4±9.4	2.71	2.98±0.05
2021	99.6±0.1	94.0±1.7	84.6±4.1	1.80	1.91±0.02
2022	98.4±0.4	78.0±5.0	94.7±4.7	6.22	5.06±0.08
Kombiniert	99.1±0.1	84.4±2.0	85.1±3.4	2.86	2.78±0.02

Ursprünglich war für das Jahresprodukt eine MMU von 0,25 ha geplant. Diese wurde jedoch auf 0,1 ha reduziert, um auch kleinere Schadflächen erkennen zu können. Um die Vor- und Nachteile unterschiedlicher MMU zu vergleichen, wurden fünf Validierungsgebiete sowohl mit einer MMU von 0,1 ha, als auch mit einer MMU von 0,25 ha ausgewertet. Die eine größere MMU führt bei drei der fünf Validierungsgebiete zu deutlich höheren Genauigkeiten, allerdings auf Kosten eines geringeren erkannten Schadausmaßes (Tabelle 9). Das Validierungsgebiet für Südosachsen (2020) weist bei einer MMU von 0,1 eine NG und eine PG von rund 84 % auf, bei einer MMU von 0,25 jedoch eine höhere Genauigkeit von rund 98 %. Das Validierungsgebiet für den Frankenwald (2020) weist ebenfalls höhere Genauigkeiten auf, wenn die MMU erhöht wird. Die NG steigt von 87,2 % auf 91,1 % und die PG von 87,9 % auf 97,2 %. Für Baden-Württemberg (2021) wurden ebenfalls Verbesserungen beobachtet, und zwar von 59,4±13,0 % auf 73,5±9,9 % für die NG und von 81,7±12,9 % auf 100,0±0,0 % für die PG. Bei den beiden anderen Validierungsgebieten gibt es keine nennenswerten Veränderungen der Genauigkeit. Natürlich verringerte sich durch die Erhöhung der MMU das erkannte Schadausmaß. Diese Verringerung reicht von 4,9 % für das Validierungsgebiet Harz (2021) bis zu 30,9 % für Südosachsen (2020).

Tabelle 8: Genauigkeiten des AP4 Jahresprodukts Produkts für unterschiedliche Validierungsgebiete MMU

Validierungs- gebiet	Untersuchungs- gebiet	MMU [ha]	GG [%]	NG [%]	PG [%]	Schadaus- maß [ha]
Harz (2021)	Niedersachsen	0.1	93.5±2.1	98.8±1.3	81.1±5.4	6683±78
		0.25	93.7±2.1	96.9±2.2	82.6±5.4	6356±72
Südostsachse n (2020)	Sachsen	0.1	98.2±0.7	84.3±6.8	84.0±10.1	2399±63
		0.25	99.9±0.1	97.7±3.2	98.8±2.3	1658±42
Baden-Württ. (2021)	Baden- Württemberg	0.1	99.9±0.0	59.4±13.0	81.7±12.9	641±36
		0.25	99.8±0.1	73.5±9.9	100.0±0.0	470±29
Frankenwald (2020)	Bayern	0.1	99.7±0.1	87.2±8.8	87.9±8.9	252±20
		0.25	99.9±0.1	91.1±5.9	97.2±3.9	186±16
Frankenwald (2021)	Bayern	0.1	99.9±0.1	96.6±4.1	95.7±4.7	1990±49
		0.25	99.9±0.1	96.6±3.8	95.5±4.3	1830±41

Insgesamt erreicht das Jahresprodukt eine gute bis sehr gute Genauigkeit. Es kommt allerdings zu starken Schwankungen in der Genauigkeit abhängig von der Größe der Schadflächen, der Schadursache und der Schadintensität. Große, zusammenhängende Schadflächen etwa durch Borkenkäfer werden mit höherer Genauigkeit erkannt als kleinere, gestreute Schäden z.B. durch Trockenstress. Lokal kann die Genauigkeit deshalb stark abweichen von der insgesamt berechneten Genauigkeit. Das gesamte Schadausmaß wird in den meisten Fällen gut geschätzt, allerdings kann es in besonders trockenen Sommern zu einer Überbestimmung der Schäden kommen, wahrscheinlich hervorgerufen durch temporäre Trockenschäden. Eine MMU von 0,1 ha erzielt gute Genauigkeiten und ist in den meisten Fällen einer MMU von 0,25 ha vorzuziehen.

7.3.2 Near-Real-Time Produkt

Das Near-Real-Time (NRT) Produkt besteht aus zwei Teilen: Die Erkennung von Schadflächen mit einer MMU von 0,25 ha und die Erkennung der Schadursache. Die Erkennung der Schadursache funktioniert nicht gut genug, um sie als zuverlässiges Werkzeug einzusetzen. Aus diesem Grund wurde nur die Erkennung der Schadflächen validiert und nicht die Erkennung der Schadursache. Das NRT-Produkt wurde ausschließlich für das Jahr 2022 validiert, da nur für dieses Jahr ausreichend Validierungsdaten mit enger Zeitabfolge verfügbar sind.

Für die Erkennung von NRT-Schadflächen wurde in den vier Untersuchungsgebieten jeweils eine Fläche von 100 km² ausgewählt. Innerhalb dieser Flächen wurde das NRT-Produkt für mehrere Sommermonate von 2022 validiert. Welche Monate validiert wurden hängt je nach Untersuchungsgebiet von der Datenverfügbarkeit und dem Schadausmaß ab. In Baden-Württemberg war eine Validierung nicht möglich, da das Schadmuster keine aussagekräftige Validierung zuließ. Die Schäden waren zu klein und zerstreut, um eine Validierung mit PlanetScope-Daten zu ermöglichen. Ein ausführlicher Bericht liegt dem Validierungsbericht der FVA-BW bei. In Sachsen kam es bei der Auswertung einzelner Monate zu einer sehr großen Anzahl an nicht auswertbaren Punkten, da viele Punkte in bereits zuvor geschädigte Bereiche fielen. Aus diesem Grund wurde der Monat August in Sachsen erneut validiert und auch Schäden der Monate Juni und Juli wurden als korrekt erkannt gewertet. Ein ausführlicher Bericht der Problematik und der anderen ausgewerteten Monate liegt dem Validierungsbericht von Sachsenforst bei.

Wie erwartet sind die Genauigkeiten des NRT-Produkts in den meisten Fällen niedriger als die des Jahresprodukts. Die NG ist oft deutlich höher als die PG, was auf eine starke Unterschätzung der tatsächlichen Schadfläche hindeutet. Die NG reicht von 73,5±9,5 % bis 93,9±5,8 %. Die PG schwankt jedoch deutlich stärker zwischen 25,3±13,1 % und 84,2±21,8 % (Tabelle 9). Die Schadbilder sind in allen Gebieten sehr ähnlich: es handelt sich um großflächige Borkenkäferschäden und damit verbundene Räumungsarbeiten. Die schwankende PG lässt sich mit der Anzahl der nutzbaren Aufnahmen pro Pixel erklären. Wenn die Aufnahmen eines Monats wolken- und schattenfrei sind, kann Sentinel-2 im Idealfall bis zu 5 nutzbare Aufnahmen pro Pixel im Monat aufnehmen; in doppelt abgedeckten Bereichen sogar 10 Werte. So konnten beispielsweise in Niedersachsen im August 4,54 nutzbare Aufnahmen pro Pixel aufgenommen werden (doppelt abgedeckt) und in Bayern im Juli nur 2,25 nutzbare Aufnahmen und in Sachsen im August ebenfalls nur 2,32. In Monaten mit schlechtem Wetter und vielen Wolken sinkt die Anzahl nutzbarer Aufnahmen, wie in Bayern im September mit nur 0,78. Sind nicht genug nutzbare Aufnahmen vorhanden, erkennt das NRT-Produkt die Schäden oft erst 1 – 2 Monate später und die PG ist niedrig. In Monaten mit vielen Aufnahmen erkennt das NRT-Produkt die meisten großflächigen Schäden bereits innerhalb eines Monats und die PG ist besser.

Unter optimalen Zuständen (große Schadflächen, starke Veränderung und keine Bewölkung) ähnelt die Genauigkeit des NRT-Produkts der Genauigkeit des Jahresprodukts. In den meisten Fällen ist insbesondere die PG jedoch deutlich geringer und das tatsächliche Schadausmaß wird unterschätzt. Dies ist insbesondere bei gestreuten Schäden mit nur langsamer Veränderung der Fall, wie zum Beispiel bei Trockenstress.

Tabelle 9: Genauigkeiten des AP4 NRT Produkts für unterschiedliche Validierungsgebiete und Monate

Untersuchungsgebiet und Validierungsmonat	NG [%]	PG [%]	Mittlere Anzahl nutzbarer Aufnahmen pro Pixel
Niedersachsen – Juli	88,2±6,8	49,3±16,0	3,74
Niedersachsen – August	73,5±9,5	77,4±15,4	4,54
Bayern – Juli	93,9±5,8	84,2±21,8	2,25
Bayern – August	82,2±10,4	38,2±21,2	2,60
Bayern – September	90,4±8,4	25,6±13,9	0,78

Sachsen – August	83,3±8,3	25,3±13, 1	2,32
------------------	----------	---------------	------

7.4 Validierung der Ergebnisse des AP 5

Für die Validierung von AP5 wurden die Ergebnisse von vier Sturmereignissen ausgewertet: Sturm Herwart in Sachsen (29.10.2017), Sturm Kolle in Bayern (20.08.2017), Sturm Friederike in Niedersachsen (18.01.2018) und Sturm Zeynep in Niedersachsen (16.02.2022 – 21.02.2022).

Neben den vier validierten Sturmereignissen, waren ursprünglich auch Validierungen von drei weiteren Stürmen geplant. Diese wurden allerdings nicht durchgeführt, da schnell klar war, dass das Produkt dort keine brauchbaren Ergebnisse liefern würde. Die Gründe hierfür waren die Veränderung der Bodenfeuchte durch Schneefall während der Sturmereignisse (Sachsen und Baden-Württemberg) bzw. die Hauptbaumart Kiefer (Bayern). Die Veränderung der Bodenfeuchte beeinflusste die Rückstreuung der Sentinel-1 Wellen und überlagerte das gewünschte Ergebnis. Warum die Methodik in Kiefernbeständen nicht funktionierte, konnte nicht festgestellt werden.

Tabelle 10: Genauigkeiten des AP5 Produkts für die vier validierten Sturmereignisse

Validierungsgebiet	Jahreszeit	GG [%]	NG [%]	PG [%]
Sturm Herwart 2017	Herbst	96,8	40,8±7,2	6,3±2,8
Sturm Kolle 2017	Sommer	84,8±4,6	67,0±6,5	5,9±1,8
Sturm Friederike 2018	Winter	93,3±0,1	74,4±1,1	49,6±0,1
Sturm Zeynep 2022	Winter	91,9±3,4	11,1±4,5	1,7±1,0

Die Genauigkeiten des AP5 Produkts sind für drei der vier Sturmereignisse sehr niedrig (Tabelle 10). Nur für Sturm Friederike in Niedersachsen konnten hinreichende Genauigkeiten für eine Schnellerkennung erzielt werden. Dort war die NG 74,4±1,1 % und die PG 49,6±0,1 %. In allen Fällen war die PG deutlich niedriger als die NG – das tatsächliche Schadausmaß wurde also stark unterschätzt. Dies ist vor allem bei den Stürmen Herwart, Kolle und Zeynep sichtbar, wo nur einstellige PG erreicht wurden. Das tatsächliche Schadausmaß wurde dort ungefähr um den Faktor 10 unterschätzt.

Der Großteil der Trainingsdaten stammt von Sturm Friederike aus Niedersachsen, da dort eine vollständige Kartierung der Schadflächen vorhanden war und eine große Anzahl an Flächen geschädigt wurden. Es ist deshalb nicht überraschend, dass die Genauigkeit für die Schadflächen von Sturm Friederike deutlich höher ist als die der anderen Sturmereignisse. Dies bedeutet jedoch, dass das Modell nicht auf andere Sturmereignisse übertragbar ist. Der Einfluss der Bodenfeuchte, der Waldtypen und der Aufarbeitungsarbeiten hat einen zu großen Einfluss auf die Rückstreuung der Sentinel-1 Wellen, um die Veränderung durch auf dem Boden liegende Baumstämme klar zu erkennen. Das Modell ist in diesem Zustand nicht für ganz Deutschland nutzbar.



Abbildung 20: Räumliche Verteilung der größten Schäden von Sturm Kalle bei Passau. Erkannte Schadflächen des Modells sind in schwarz und die manuell erstellten Referenzpolygone sind gelb dargestellt. Die Deutschlandkarte zeigt die Lage des Bildausschnitts in Rot.

8 Technologie- und Wissenstransfer

Ziel des Technologie- und Wissenstransfers ist die Befähigung des Thünen-Instituts zur selbständigen Anwendung des im Projekt entwickelten Monitoringsystems zur Waldschadenserfassung. Bestandteil des Wissenstransfers war die Entwicklung und Evaluierung von Prototypprodukten für die Untersuchungsgebiete. Parallel wurde die Plattform Copernicus Open Data and Exploitation Plattform Deutschland (CODE-DE) als Server-Infrastruktur zur effizienten Prozessierung von Fernerkundungsdaten und zum Aufbau des Monitoringsystems getestet. In diesem Rahmen wurde eine Testumgebung entwickelt, welche nach erfolgreichem Abschluss etabliert und erweitert wurde (siehe Kapitel 2). Als Grundlage zum Technologie- und Wissenstransfers wurde im Rahmen eines Workshops ein Workflow zur Prozessierung der Waldschadensprodukte erarbeitet. Die Bedingung und Workflow-Dokumentation wurden als Handbuch zusammengefasst. Ergänzend hat ein regelmäßiger Austausch der Projektpartner JR und TI-WO per Online-Videokonferenzen stattgefunden. Dabei wurden methodische und technische Fragen des Monitoringsystems und des Verfahrens der Zeitreihenanalyse diskutiert. Die technische Beschreibung der Einrichtung des Monitoringsystems wurde ebenfalls in einem technischen Bericht dokumentiert.

9 Web User Applikation

Ziel der Web User Applikation ist die Visualisierung und Bereitstellung der Projektergebnisse, insbesondere des Jahresproduktes, in einem Web Interface. Die Ergebnisse sollen als Geodaten auf Basis des GeoNode-Portals „Thünen-Atlas“ dargestellt werden. Der Thünen-Atlas bildet die Grundlage zur öffentlichen Darstellung von Geodaten innerhalb der Forschungsdateninfrastruktur des Thünen-Instituts. Diese Infrastruktur wurde parallel zum Projekt entwickelt und soll als generische Lösung zur Verwaltung von Geodaten am Thünen-Institut eingesetzt werden. Auf dieser Basis wurde auf die Entwicklung einer individuellen Web User Applikation im Projekt verzichtet.

9.1 Back End und Front End Funktionen der Forschungsdateninfrastruktur – Thünen-Atlas

Als zentrale Schnittstelle zur Verwaltung von Geodaten betreibt und entwickelt das Thünen-Institut eine Forschungsdateninfrastruktur (FDI). Grundlage dieser FDI sind Geodatenportal-Anwendungen, die auf dem OSGeo-Projekt [GeoNode](#) basieren. Die FDI besteht aus mehreren miteinander verknüpften Komponenten, wie in Abbildung 21 dargestellt:

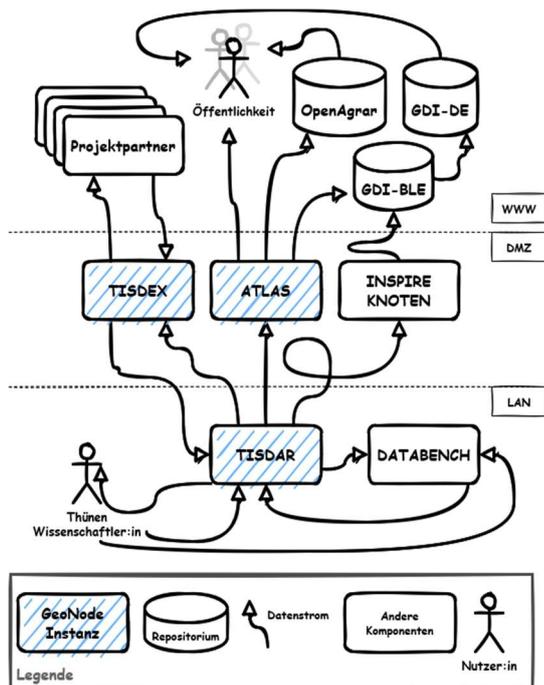


Abbildung 21: Komponenten der Forschungsdateninfrastruktur

Zur Sicherung der Dienste und zur Bereitstellung modifizierter Benutzeroberflächen für bestimmte Anwendungsfälle werden drei getrennte GeoNode-Instanzen als Frontend eingesetzt (Abbildung 21). Zur öffentlich zugänglichen Bereitstellung sowie als Applikation für die Datenexploration wird die ATLAS-Instanz verwendet.

Das Portal veröffentlicht die räumlichen Informationen gemäß der vom Open Geospatial Consortium (OGC) definierten Schnittstellen, wie z.B.:

- Web Map Services (WMS),
- Web Feature Services (WFS),
- Web Coverage Services (WCS).

Der Zugriff auf die oben genannten OGC-Dienste kann nutzerspezifisch konfiguriert werden.

Der Thünen-Atlas basiert auf dem Open-Source-Projekt GeoNode in der Version 3.3.2. Das Portal läuft auf einer Ubuntu 20.04 LTS VM unter Python 3.8 und verwendet als Backend eine PostgreSQL Datenbank in der Version 13 mit der räumlichen Erweiterung PostGIS in Version 3.1. Die OGC-Dienste werden über einen GeoServer in der Version 2.18.2 veröffentlicht. In diesem Portal wird die Mapping-Anwendung [MapStore2](#) als Web-GIS-Client und Kartenansicht verwendet. Die über GeoNode hochgeladenen Ebenen werden als Karten zusammengefasst und können mit sogenannten Widgets, wie Diagrammen und Tabellen, dargestellt werden. Zusätzlich können die Karten mit anderen Medien zu Applikationen, wie Dashboards oder Präsentationen, zusammengeführt werden. Die interaktiven Widgets erlauben dem Nutzer einfache räumliche und zeitliche Abfragen von Vektordaten. Die Erfassung von Basis-Funktionalitäten aus Anzeige, Download, Upload, Interaktion, Datenformate ist sowohl für Raster- als auch Vektordaten möglich. Einschränkungen der Widgets-Elemente sind folgende:

- Keine räumliche Filterung für Raster-/ Vektordaten
- Keine räumlichen Abfragen und Statistiken für Rasterdaten
- keine WMS/ WFS-Verbindung zu Einzelprodukten (nur Gesamtdatenkatalog)

In naher Zukunft werden diese Portale auf die derzeit in der Entwicklung befindliche Version 4.0 von GeoNode aktualisiert. Bestandteil der Aktualisierung ist die Weiterentwicklung der Funktionalität und die Behebung der Einschränkungen.

Der Thünen-Atlas kann unter der Adresse <https://atlas.thuenen.de/> erreicht werden.

9.2 Ergebnisdarstellung im Thünen-Atlas

Im Projekt FNEWS wird der Thünen-Atlas zur Verwaltung, Sicherung, und Veröffentlichung von Forschungsergebnissen eingesetzt. Die umfangreichen Möglichkeiten zur Visualisierung und Bereitstellung von Geodaten werden zur Darstellung der Projektergebnisse, wie auch nicht öffentlichen Sicherung verwendet. Für alle im Thünen-Atlas veröffentlichte Datensätze wird für im Repositorium OpenAgrar eine DOI definiert. Folgende Datensätze sind zurzeit im Thünen-Atlas eingebunden und öffentlich verfügbar:

1. **Jahresprodukte** (für UG) (Langner et al. 2024)
 - Schadfläche pro Jahr (2018 - 2022)
2. **Bestockte Holzbodenkarte 2018** (Langner et al. 2022)
3. **Dominierende Baumartenkarte 2017/ 2018** (Blickensdörfer et al. 2022)
4. **Referenzdaten** (für UG) (Langner et al. 2023)
 - SBS, FVA-BW, NW-FVA 2018 bis 2021



Abbildung 22: Beispieldarstellung des Waldschadensproduktes. Räumliche und zeitliche Statistiken der Jahresprodukte 2018 bis 2022 aus den Untersuchungsgebieten. Links die Legende der eingeblendeten Karten. Rechts die Ergebnisdigramme der räumlichen Abfrage als Balken- und Liniendiagramm sowie als Summenfunktion

Eingebundene Datensätze können individuell als Datenprodukte sowie als Kartenanwendungen, Dashboards oder Geostories zusammengefasst werden. Kartenprodukte und Dashboards können mit interaktiven Widgets erweitert werden. Die interaktiven Widgets ermöglichen räumliche Abfragen und Statistiken der eingebundenen Geodaten. Die Ergebnisse können als Balken-, Kreis- oder Liniendiagramm abgebildet werden.

10 Ökonomische Bewertung

10.1 Recherche und Prüfung ökonomischer Bewertungskonzepte von Waldschäden

Wiederholt auftretende und in ihrer Intensität zunehmende Waldschäden stellen die Waldwirtschaft auf vielen Teilen der Erde vor große Herausforderungen. Hierbei können insbesondere diejenigen Waldbesitzer und Forstbetriebe, die mit großen Schadholzmengen und wieder zu bewaldenden Schadflächen konfrontiert werden, in eine große wirtschaftliche Notlage geraten. Das eigentliche wirtschaftliche Ausmaß von Waldschadensereignissen ist jedoch häufig kaum bekannt. In Deutschland liegt das zum Beispiel vor allem daran, dass existierende Monitoring- und Berichtssysteme lediglich die Größe der betroffenen Flächen und die angefallenen Schadholzmengen erfassen. Die ökonomischen Auswirkungen von größeren Schadensereignissen wurden bisher überwiegend ad hoc nach ihrem Auftreten bewertet. Aufgrund von Unterschieden beim Bewertungsrahmen sowie der angewandten Bewertungsmethoden sind die ökonomischen Bewertungsergebnisse dieser Studien nur eingeschränkt miteinander vergleichbar (z. B. Hartebrodt (2004), MULNV (2010)). Vor diesem Hintergrund wurden in diesem Arbeitspaket Möglichkeiten für die Entwicklung eines kontinuierlichen nationalen Monitoringsystems von ökonomischen Verlusten infolge von Waldschadensereignissen in Deutschland untersucht.

Eine Grundvoraussetzung für die ökonomische Schadensbewertung ist die Festlegung eines Bewertungsrahmens. Der Fokus des FNEWs-Verbundprojektes liegt auf der Identifizierung und Analyse der direkten natürlichen und ökonomischen Auswirkungen von Waldschäden auf die Rohholzerzeugung der deutschen Forstwirtschaft. Weitere Folgewirkungen von Waldschäden, wie bspw. auf die nachgelagerte Holzindustrie als auch auf die Bereitstellung weiterer Ökosystemdienstleistungen des Waldes (z. B. Klima- oder Biodiversitätsschutzleistungen) wurden daher zunächst nicht berücksichtigt. Der Bewertungsrahmen ist aber so gestaltet, dass dieser bei Bedarf um weitere Schadenskomponenten ergänzt werden kann.

Für das Bewertungssystem wurde ein analytischer Ansatz gewählt, der den Gesamtschaden innerhalb des entwickelten Bewertungsrahmens in einzelne Schadenskomponenten zerlegt. Die Schadenskomponenten werden dabei jeweils einzeln bewertet und bilden in ihrer Summe die Höhe des Gesamtschadens. Die Entwicklung des Bewertungsrahmens mit den zu bewertenden Schadenskomponenten sowie den gewählten ökonomischen Bewertungsverfahren basieren auf einer umfassenden Analyse der nationalen und internationalen Literatur. Im Rahmen der Literaturanalyse wurden die einzelnen wirtschaftlichen Schadenskomponenten aus der wissenschaftlichen und grauen Literatur identifiziert und nach dem zu erwartenden zeitlichen Eintritt kategorisiert. Auf dieser Basis wurde eine literaturbasierte Zusammenstellung potentieller Bewertungsmethoden für die einzelnen Schadenskomponenten erarbeitet.

Für eine kontinuierliche, bundesweite ökonomische Waldschadensbewertung sind bundesweit anwendbare Bewertungsmethoden und die Verfügbarkeit der hierfür erforderlichen Daten von entscheidender Bedeutung. Deshalb können nur solche Schadenskomponenten berücksichtigt werden, für die diese Bewertungsgrundlagen vorliegen. Dabei ist zu beachten, dass eine bundesweite Bewertung grundsätzlich nur mit Vereinfachungen und unter Berücksichtigung der wichtigsten Zusammenhänge möglich ist.

Der entwickelte Bewertungsrahmen unterscheidet zwischen Schadenskomponenten mit kurzfristigen und langfristigen wirtschaftlichen Wirkungen. Diese Unterscheidung wird damit begründet, dass Waldschadensereignisse nicht nur zu unmittelbar wirkenden Mindererlösen und Mehraufwendungen führen, sondern auch langfristig wirkende Verluste verursachen können.

In Abbildung 23 ist der entwickelte ökonomische Bewertungsrahmen dargestellt. Grün markiert sind die Schadenskomponenten, die mit aktuell verfügbaren Methoden und Daten bewertbar sind. Für die Bewertung dieser Schadenskomponenten liegen die über die Fernerkundung detektierbaren

Schadensflächen und das im Nachgang abgeleitete Schadensvolumen sowie die erforderlichen ökonomischen Eingangsgrößen vor. Die weiß hinterlegten Komponenten können aktuell nicht bewertet werden. Für eine Bewertung der Schadenskomponente „Marktpreisverfall Rohholz“, sind noch mehr Informationen über die Reaktion des Holzmarktes nach Kalamitätsereignissen nötig. Für die Schadenskomponente „Zuwachsverluste“, welche insbesondere auf Trockenheit zurückzuführen sind, fehlt die naturale Grundlage, da über die Fernerkundung nur letale Schäden detektiert werden. Neben den konkreten Zuwachsverlusten, welche über einzelne regionale Studien oder auf Basis der Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2022 abschätzbar sein dürften, bedarf es auch der Information ab welcher Trockenheitsintensität ein Jahr zu einem Trockenjahr wird, das mit Zuwachsverlusten verbunden ist. Auch eine regionale Differenzierung wird nötig sein.

Zeitlich ist die ökonomische Bewertung auf das jeweilige Berichtsjahr des fernerkundungsbasierten Monitorings begrenzt. D. h. mögliche zukünftige naturale Sekundärschäden werden als Schadenskomponenten erst berücksichtigt, wenn sie tatsächlich aufgetreten sind. Sie werden im kontinuierlichen Waldschadensmonitoring im Jahr ihres tatsächlichen Auftretens über das Fernerkundungstool detektiert und anschließend ökonomisch bewertet.

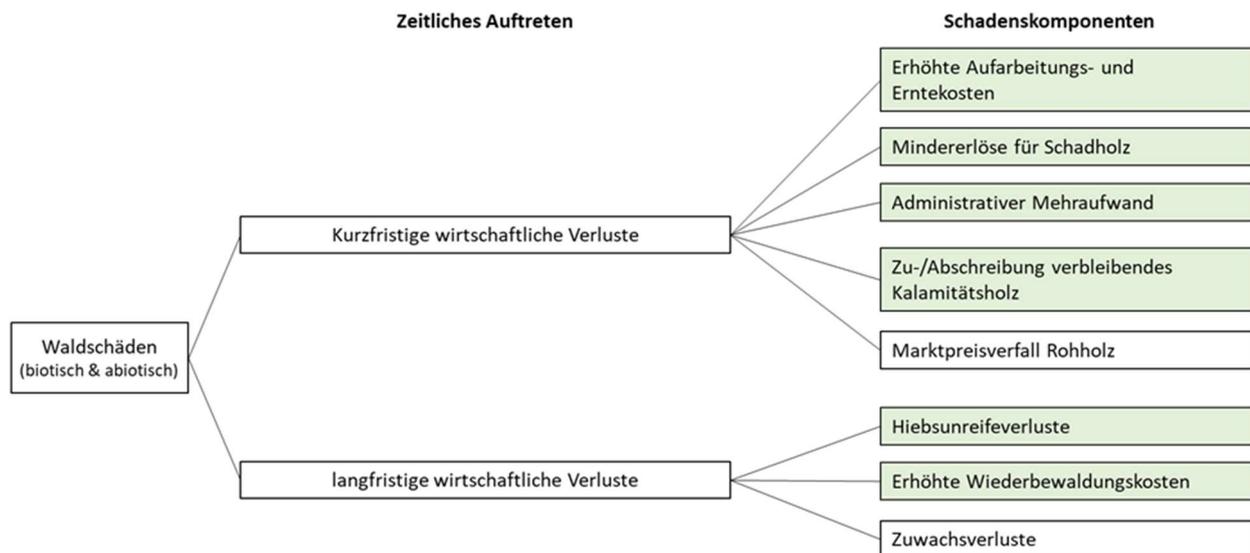


Abbildung 23: Bewertungsrahmen für die ökonomischen Auswirkungen von Waldschäden auf die Rohholzerzeugung der Forstwirtschaft in Deutschland (Anmerkung: „Grüne“ Signatur: bewertbare, „weiße“ Signatur: derzeit nicht bewertbare Schadenskomponenten)

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse des Arbeitspaketes findet sich in: Fleckenstein, S.; Franz, K.; Seintsch, B.; Dieter, M.; Möhring, B. (2023). *Economic damage assessment of forest disturbances on forestry: State of knowledge and challenges for a continuous economic loss monitoring in Germany*. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*. 193. 41-64. 10.23765/afjz00092.

10.2 Identifizierung von Einflussfaktoren für Marktreaktionen der Rohholzmärkte nach Kalamitäten

Die Rundholzpreise waren in den letzten Jahren in Deutschland und weltweit von einer hohen Volatilität gekennzeichnet. Die Hintergründe für diese Preisentwicklungen an den Rohholzmärkten sind vielseitig und komplex. Als eine zentrale Einflussgröße hierfür können jedoch die weitreichenden Waldschäden in Deutschland und anderen europäischen Ländern in jüngster Zeit betrachtet werden. Die Extremwetterjahre 2018 bis 2020 führten zu erhöhten und zum Teil kaum absetzbaren Schadholzmengen (Möhring et al., 2021). Aus diesem kalamitätsbedingten Angebotsüberhang resultierte ein starker Preisverfall insbesondere von Fichtenrundholzsortimenten. In manchen Regionen konnte das eingeschlagene Schadholz kaum

kostendeckend vermarktet werden, weshalb große Schadholzmengen nicht aufgearbeitet in den Wäldern verblieben. Das infolge der Kalamitäten entstandene nationale Überangebot an Fichtenrundholz konnte kurze Zeit später aber durch eine hohe Auslandsnachfrage abgedeckt werden. Außerdem führten niedrige Schnittholzlagerstände im ersten Halbjahr 2021 bei einer gleichzeitig hohen Auftragslage u.a. aufgrund der weltweit aufgesetzten Konjunkturprogramme während der Covid-19 Pandemie zu rasant steigenden Rohholzpreisen. Im zweiten Halbjahr hingegen wurde ein spürbarer Preisrückgang verzeichnet u.a. aufgrund der temporären Auslastung von Industrielagern (Ebner, 2021a, 2021b)¹. Diese Beobachtungen verdeutlichen, dass die Absetzbarkeit von Rundholz in Kalamitätsfällen und damit das temporäre Auftreten von Preisschwankungen von unterschiedlichen Einflussvariablen abhängt.

Der marktbedingte Preisverfall ist als eine relevante Schadkomponente identifiziert worden (vgl. Kapitel 10.1). Allerdings konnte aufgrund nichtausreichender Informationen zum Einfluss von Kalamitäten auf Marktreaktionen keine Bewertungsmethode für ein kontinuierliches nationales Monitoring empfohlen werden. Arbeitspakt 10.2 hatte deshalb die Identifizierung von Einflussfaktoren auf die Reaktion der Marktteilnehmern am Rohholzmarkt in Deutschland mit einem besonderen Fokus auf den Auswirkungen von Kalamitäten zum Gegenstand.

Die folgenden Ausführungen zu den Einflussfaktoren auf Marktreaktionen der Rohholzmärkte nach Kalamitäten basieren auf den Ergebnissen eines Scoping Reviews der Literatur und anschließenden Experteninterviews mit zehn Marktteilnehmern des deutschen Rohholzmarktes. Befragt wurden fünf Rohholzanbieter aus der Forstwirtschaft, zwei Rohholzhändler und drei Rohholznachfrager aus der Holzwirtschaft. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse der Literaturanalyse und der Experteninterviews zu Einflussfaktoren auf Marktreaktionen der Rohholzmärkte nach Kalamitäten als Thünen-Working Paper ist in Bearbeitung.

10.2.1 Ergebnisse der Literaturanalyse

Die Vielfalt der gefunden Einflussfaktoren auf Marktreaktionen am Holzmarkt in der Literatur konnten zu sechs Faktorenbereichen zusammengefasst werden. Daneben gibt es zwei Rahmenbedingungen, welche mehr oder weniger direkt Einfluss auf den Holzmarkt ausüben. Dies sind zum einen Politiken, die die Faktorenbereiche beeinflussen. Hierunter fallen politische Maßnahmen auf Länder-, Bundes- oder EU-Ebene. Zum anderen ist das der Klimawandel (Abbildung 24), welcher u.a. Auswirkungen auf das Waldwachstum und das Risiko des Auftretens von Waldschäden hat. Im Folgenden werden die identifizierten sechs Faktorenbereiche mit ihren Einzelfaktoren kurz erläutert.

¹ Sources: https://www.holzkuerier.com/schnittholz/2021/09/zuerst_zu_viel_jetztzuwenignachfrage.html; <https://www.holzkuerier.com/schnittholz/2021/03/warum-steigen-preise-der-art-stark-.html>

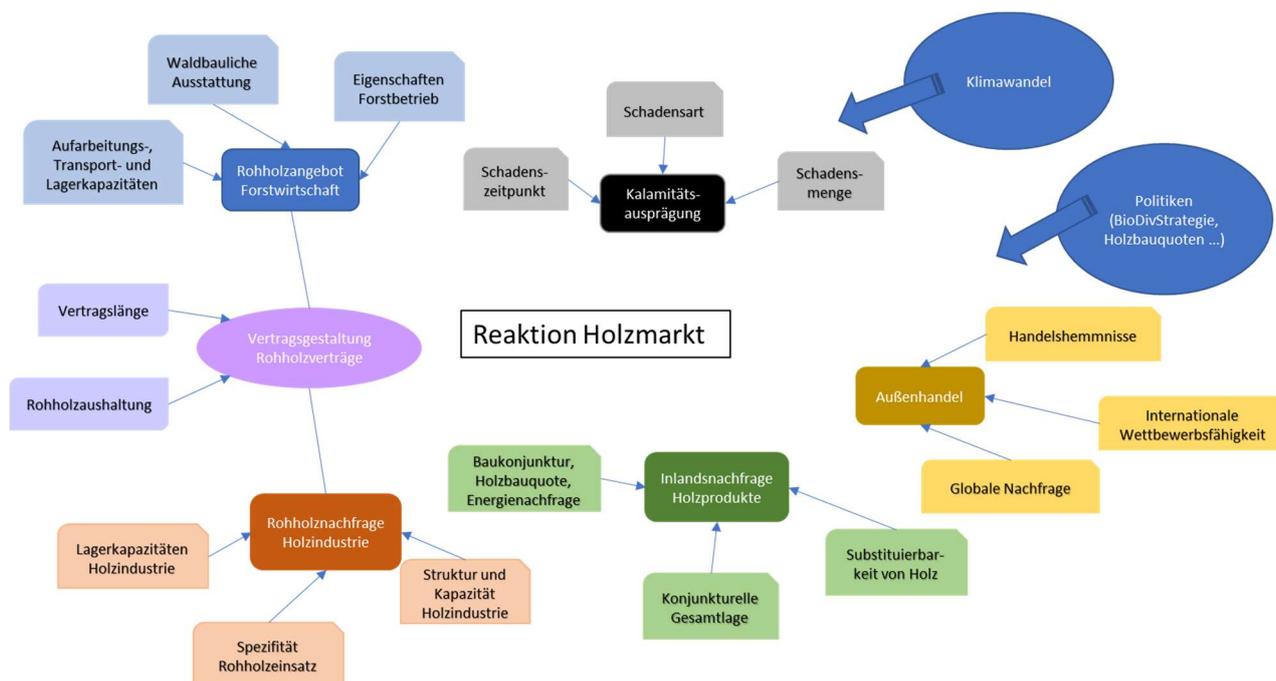


Abbildung 24: Einflussfaktorbereiche für Marktreaktionen der Rohholzmärkte nach Literaturreview

10.2.1.1 Rohholzangebot der Forstwirtschaft

Der erste Faktorenbereich umfasst das Rohholzangebot durch die Forstwirtschaft. Wie sich das Rohholzangebot durch die kalamitätsbetroffenen Forstbetriebe gestaltet, wird bestimmt durch deren forstbetriebliche Eigenschaften, die waldbauliche Ausstattung der Wälder und die zur Verfügung stehenden Aufarbeitungs-, Transport- und Lagermöglichkeiten.

Als relevante **forstbetriebliche Eigenschaften** mit Einfluss auf das Rohholzangebot werden in der Literatur die Ziele der Forstbetriebe genannt. Diese können mit der Eigentumsart zusammenhängen, so sind öffentliche Forstbetriebe häufig stärker dem Gemeinwohl verpflichtet als private Forstbetriebe, was zum Beispiel auch die Aufrechterhaltung eines stabilen Rohholzangebotes am Markt beinhalten kann (Bogle und van Kooten, 2015; Udali et al., 2021; Fleischman et al., 2022). Aber auch Eigenschaften wie bspw. das Alter, Geschlecht oder der Wissenstand des Waldeigentümers oder der Forstbetriebsleitung wirken sich auf die Entscheidungen zum Rohholzangebot des Forstbetriebes aus (Gong et al., 2005; Bolkesjø et al., 2007; Klepacka et al., 2017; Tian et al., 2017; Zhao et al., 2020; Rørstad et al., 2022). Weitere Auswirkungen auf das Rohholzangebot im Kalamitätsfall haben die "Non-Timber-Values" im Vergleich zu "Timber-Values", die dem Wald vom Waldeigentümer beigemessen werden (Prestemon und Holmes, 2000; Alig et al., 2002; Gong et al., 2005; Niskanen et al., 2007; Brown et al., 2010; Bogle, 2012; Nordström et al., 2016; Rahman et al., 2016; Klepacka et al., 2017; Thompson et al., 2017; Zhao et al., 2020). Eine weitere Rolle spielt die Liquidität der Forstbetriebe und deren finanzielle Abhängigkeit vom Holzverkauf (J. Riis, 1998).

Unter den Forstbetriebseigenschaften spielt die Holzbodenfläche in der Literatur eine besondere Rolle für das Auftreten am Rohholzmarkt. Als ausschlaggebend für die forstbetriebliche Marktmacht ist demnach das potentielle Rohholzangebot zu betrachten (White et al., 2010; Klepacka et al., 2017; Juutinen et al., 2021; Bogdanski, 2011; Álvarez-Díaz et al., 2015). Große Forstbetriebe haben daneben durch ein stetigeres Rohholzangebot besser die Möglichkeit Erfahrungswissen und Netzwerke aufzubauen (Prestemon et al., 2013; Klepacka et al., 2017). Kleinere Waldbesitzer haben häufiger einen Informationsmangel und werden dadurch auf dem Rohholzmarkt benachteiligt (Prestemon und Holmes, 2000; Suchomel et al., 2012; Kolis et al., 2014; Zhang und Stottlemyer, 2021). Durch Vermarktungszusammenschlüsse können kleine Forstbetriebe diesen

Nachteil allerdings reduzieren (Zhou und Buongiorno, 2005; Niskanen et al., 2007; Brown et al., 2010; Suchomel et al., 2012; Kolis et al., 2014; Kim und Cieszewski, 2015; Klepacka et al., 2017).

Die **waldbauliche Ausstattung** und die Wuchsleistung bestimmt als naturale Grundlage ebenfalls die potentiellen Rohholzsortimente und -mengen, die auf den Markt gebracht werden können (Abt et al., 2010; Brown et al., 2010; Klepacka et al., 2017). Auch das Kalamitätsrisiko ist stark durch die Baumartenzusammensetzung und Bestandesstruktur beeinflusst (Fuchs et al., 2022). Zudem können waldbauliche Notwendigkeiten die Reaktionsfähigkeit der Forstbetriebe einschränken (Klepacka et al., 2017). Weltweit kann das Rohholzangebot durch die großräumige Anlage von Plantagen erhöht werden (Wear et al., 2007; Abbott et al., 2009; He und Xu, 2011; Jonsson, 2013; Wear et al., 2016; Nepal et al., 2021).

Damit das Rohholz auf den Markt kommen kann, sind entsprechende **Aufarbeitungs-, Transport- und Lagerkapazitäten** erforderlich. Sowohl die Rohholzaufarbeitungskosten als auch die Verfügbarkeit des Rohholzes hängen dabei zumindest teilweise, von der Aufarbeitungsmenge ab (Klepacka et al., 2017). Insbesondere bei kalamitätsbedingten Zwangsnutzungen wird die Marktreaktion der betroffenen Forstbetriebe i.d.R. auch durch das Vorhandensein von Lagerkapazitäten beeinflusst, da diese – bei vorhandener Liquidität - flexiblere Reaktionen ermöglichen (Schwarzbauer, 2006; Udali et al., 2021).

10.2.1.2 Rohholznachfrage der Holzindustrie

Neben den Forstbetrieben als Rohholzanbieter ist die Holzverarbeitende Industrie als Nachfrager von Rohholz auf den Rohholzmärkten aktiv. Die Reaktionsmöglichkeiten der Rohholznachfragenden Holzindustrie auf Kalamitäten hängen dabei insbesondere von deren Struktur und den Kapazitäten, von der Spezifität der eingesetzten Rohstoffe und von den Lagermöglichkeiten, sowohl des Rohstoffes als auch der produzierten holzbasierten Halb- und Fertigwaren, ab.

Unter dem Einflussfaktor **Struktur und Kapazität der Holzindustrie** ist insbesondere die Anzahl und die Größe der Holzverarbeitenden Unternehmen in einer Region zu betrachten. Diese hängen direkt mit der Nachfrage nach Rohholz, den Produktionskapazitäten und Transportkosten zusammen und wirken sich auf die Konkurrenzverhältnisse am Rohholzmarkt aus (White und Carver, 2004; Brown et al., 2010; Prestemon et al., 2013; Kolis et al., 2014; Kim und Cieszewski, 2015; Klepacka et al., 2017; Zastocki et al., 2021). Je weniger potentielle Abnehmer vorhanden sind, desto stärker können sie ihre Marktmacht durchsetzen (White und Carver, 2004; Zhou und Buongiorno, 2006; Álvarez-Díaz et al., 2015; Klepacka et al., 2017). Wenn über einen langen Zeitraum ein erhebliches Überangebot an Rohholz und eine hohe Nachfrage nach holzbasierten Halb- und Fertigwaren besteht, kann sich die Produktionskapazität in der Holzindustrie dauerhaft verändern. So können z.B. neue Sägewerke in Betrieb gehen oder vorhandene ihre Produktionskapazität ausbauen (Prestemon und Holmes, 2004; Bogdanski, 2011). Im Regelfall dürfte der kalamitätsbedingte Angebotsüberhang an Rohholz jedoch zu kurzfristig sein, um mittel- bis langfristige Investitionen in einen Ausbau der Produktionskapazitäten zu rechtfertigen (Brecka et al., 2018; Zhang und Stottlemyer, 2021). Andererseits kann ein Rückgang des langfristigen Rohholzaufkommenspotentials der Forstwirtschaft nach großflächigen Schadereignissen zur Schließung von Betrieben der Holzindustrie führen, da diese nicht ausreichend mit Rohstoffen versorgt werden können (Leppänen et al., 2005; Schwab et al., 2009; Suchomel et al., 2012; Daigneault et al., 2016; Schier et al., 2018).

Auch auf der Nachfragerseite spielen **Lagerkapazitäten der Holzindustrie** eine Rolle. In Kalamitätssituationen führen hohe freie Lagerkapazitäten bei den Rohholzverwendern zu einem (potenziell) erhöhten Aufnahmevermögen für Schadholz (Song et al., 2011; Gejdoš und Danihelová, 2015; Fuchs et al., 2022). Gleichzeitig führen volle Rohholzlager in der Holzindustrie zu stabilen und niedrigeren Rohholzpreisen bei steigender Nachfrage nach holzbasierten Halb- und Fertigwaren (Zhang und Stottlemyer, 2021).

Ebenfalls eine wichtige Rolle für die Möglichkeiten flexibel auf Kalamitäten agieren zu können, spielt die **Spezifität des Rohholzeinsatzes** in den Betrieben der Holzindustrie. Insbesondere Laub- und Nadelholz sind in der stofflichen Rohholzverwendung oft nur schwer gegeneinander substituierbar (Gejdoš und Danihelová, 2015; Schier et al., 2018). Bei der Produktion von Zellstoff hingegen kann Nadelholz zumindest teilweise durch Laubholz ersetzt werden (Luppold und Sendak, 2004; Zhou, 2021). Bei der energetischen Verwendung besteht die größte Flexibilität hinsichtlich der verwendeten Rohholzart, wobei Laubholz aufgrund seiner höheren Heizwerte pro Volumeneinheit oft als besser geeignet angesehen wird (Lauri et al., 2013). Innerhalb derselben Baumart differenziert sich das Rohholzangebot in unterschiedliche dimensions- und qualitätsspezifische Sortimente, die je nach Verwendungsbereich unterschiedlich flexibel eingesetzt werden können. Dabei können qualitativ höherwertige Sortimente immer geringwertige Sortimente ersetzen, andersherum gilt dies aber nicht. Bei Rohholz aus Kalamitätsflächen kann es je nach Schadensursache zu Rohholzentwertungen kommen, welche die Verwendungsmöglichkeiten einschränken. Für die Zellstoff- und Holzwerkstoffindustrie ist insbesondere eine zu geringe Holzfeuchte eine Herausforderung. Diese Eigenschaften sind für die Steuerung des Produktionsprozesses entscheidend. Die Anpassung der entsprechenden Parameter des Produktionsprozesses sind i.d.R. nicht einfach möglich. Genau wie der Bau neuer Produktionskapazitäten erfordert eine rentable Umstellungen des Produktionsprozesses auf veränderte Rohholzeigenschaften ein langfristig erhöhtes Schadholzaufkommen mit solchen Holzeigenschaften (Bogdanski, 2011). In der Vergangenheit wurde Schadholz deshalb häufig in den Verwendungslinien mit dem geringsten Anspruch an Baumarten, Dimensionen und Holzqualitäten genutzt, was insbesondere auf holzbasierte Biomassekraftwerke und die Produktion von Holzpellets zutrifft. Das liegt auch daran, dass die Produktion von Holzpellets auch im kleinen Maßstab ohne größere Investitionskosten wirtschaftlich darstellbar ist (Bogdanski, 2011; Prestemon et al., 2013; Russell et al., 2017).

10.2.1.3 Vertragsgestaltung von Rohholzverträgen

Nach der Literatur hat bei der **Vertragsgestaltung von Rohholzverträgen** insbesondere die **Vertragslaufzeit** einen Einfluss auf die Reaktionsfähigkeit. Je langfristiger Verträge ausgelegt sind, desto mehr wirken sie gegen die Volatilität am Rohholzmarkt. Insbesondere zwischen großen Forstbetrieben und Großbetrieben der Holzindustrie sind Langfristverträge verbreitet, um trotz großer Entfernungen langfristige Beziehungen zu erhalten, Investitionen zu ermöglichen, Unsicherheiten zu vermeiden und gegenseitige Einflussnahme zu ermöglichen (Klepacka et al., 2017). Grundsätzlich wird zwischen Ex-ante-Verträgen, bei denen Volumen und der Preis im Vorhinein festgelegt sind, und Ex-Post-Verträgen, bei denen der Preis nachverhandelt werden kann, unterschieden. Als langfristige Verträge sind Quartalsverträge relativ weitverbreitet (Brodrechtova, 2015). Sie ermöglichen den Marktteilnehmern eine gewisse Balance zwischen einer Reduktion des organisatorischen Aufwands und der Möglichkeit auf Marktpreisveränderungen reagieren zu können. Quartalsverträge führen aber kaum zu einer Verminderung der Volatilität der Rohholzpreise. Der zu erwartende Preisabfall nach Kalamitäten kann durch vorab geschlossene Verträge verzögert werden, wenn die Vertragsbedingungen auch (anteilig) Schadholzlieferungen zulassen (Fuchs et al., 2022). Außerhalb Deutschlands sind auch andere Vertragsbedingungen und -laufzeiten üblich. So wurden in der Slowakei Zehnjahresverträge mit großen Rohholzmengen zwischen dem Staatswaldforstbetrieb und vier großen Sägewerksunternehmen abgeschlossen (Gejdoš und Danihelová, 2015; Gejdoš et al., 2019). In den Vereinigten Staaten von Amerika sind der Stockverkauf mit oftmals zweijährigem Erntezeitraum üblich. Diese Stockverkäufe werden über Submissionen vereinbart. Längere Vertragslaufzeiten führen dabei zu höheren Rohholzpreisen im Stockverkauf, da der Käufer flexibler seine Einschläge und Rohholznachfrage planen kann (Brown et al., 2010; Kim und Cieszewski, 2015).

Ein weiterer Aspekt der Vertragsgestaltung ist die vereinbarte **Aushaltung des Rohholzes**. Für diese werden häufig allgemein anerkannte und marktübliche Regeln genutzt, da dies die Transaktionskosten der Vertragsverhandlungen reduziert. Wenn feststehende Regeln für die Aushaltung bestehen, müssen lediglich der Preis und das Volumen eines Rohholzvertrages neu vereinbart werden. Wenn eine Partei jedoch von den allgemein anerkannten Normen abweicht,

führt dies zu einer Einschränkung der Zahl der potentiellen Handelspartner (Stone, 2009). Durch die vereinbarten Standards der dimensions- und qualitätsspezifischen Sortimentsbewertung wird auch das Verkaufsvolumen beeinflusst, da darüber bestimmt wird, welche Anteile die einzelnen Rohholzsortimente mit ihren spezifischen Rohholzpreisen an der Verkaufsmenge haben (Suchomel et al., 2012; Härtl und Knoke, 2014; Gejdoš und Danihelová, 2015). Insbesondere in Kalamitätssituationen kann der Effekt offensichtlich werden, wenn z.B. Schadholz allgemein zu einer Qualität mit geringem Festpreis zugeordnet wird, anstatt es differenziert zu bewerten (Udali et al., 2021). Auch wenn der Verkäufer ein Informationsdefizit über die Qualität und Menge des Rohholzangebotes bei Stockverkäufen hat, führt das zu geringeren Preisen (Suchomel et al., 2012; Klepacka et al., 2017).

10.2.1.4 Inlandsnachfrage nach Holzprodukten

In der Literatur wird die **Inlandsnachfrage nach Holzprodukten** als ein wichtiger Einflussfaktor auf den Rohholzmarkt genannt. Sie ist insbesondere von der konjunkturellen Gesamtlage, der Baukonjunktur, Holzbauquote und Energienachfrage sowie der Substituierbarkeit von Holz abhängig.

Die Nachfrage nach Holzprodukten wird u.a. durch die **konjunkturelle Gesamtlage** einer Volkswirtschaft bestimmt, welche sich z.B. im Bruttosozialprodukt oder dem kurzfristigen Zinssatz widerspiegelt (Gonzalez-Gomez und Bergen, 2014). Die inländische Nachfrage nach holzbasierten Halb- und Fertigwaren ist dabei relativ unabhängig vom nationalen Rohholzangebot. Eine hohe Inlandsnachfrage nach Holzprodukten kann bei Rohholzmangel i.d.R. durch Importe ausgeglichen werden (Baek, 2011; He und Xu, 2011; Hu et al., 2015; Wear et al., 2016; Karvinen et al., 2019; Rong et al., 2019). Demgegenüber hat ein (temporärer) Angebotsüberhang an Rohholz aufgrund von Kalamitäten üblicherweise nur einen geringeren Einfluss auf die Nachfrage nach Holzprodukten und deren Preise im Inland (Hodges et al., 2011; Hautamäki et al., 2012; Suchomel et al., 2012; Gejdoš und Danihelová, 2015; Wear et al., 2016; Gejdoš et al., 2019; Gejdoš et al., 2020; Kožuch und Banaš, 2020; Udali et al., 2021). Bei einer guten volkswirtschaftlichen Lage können schadensbedingte Mehrmengen an Rohholz oft ohne größere Preisabschläge vom Markt aufgenommen werden (Gejdoš et al., 2019; Zhai und Kuusela, 2020), während dies bei einer ungünstigen konjunkturellen Lage nicht der Fall ist.

Ein weiterer Einflussfaktoren für die Marktreaktionen auf den Rohholzmärkten sind die **Baukonjunktur, Holzbauquote und Energienachfrage**. Einen besonders großen Anteil der Holznachfrage macht die Nachfrage nach Bauholz aus. So sind der Neubau, die Renovierung und die Herstellung von Einrichtungsgegenständen die größten Treiber der Holznachfrage (Zhang und Stottlemeyer, 2021). Eine der bislang größten Rezession im Holzsektor wurde daher auch durch die Immobilienkrise in den Jahren 2006 bis 2009 ausgelöst (Hodges et al., 2011; Pelkki, 2012; Prestemon et al., 2013; Wear et al., 2016). Aber auch in wirtschaftlich normalen Zeiten können Teile der jährlichen Preisschwankungen von Rohholz sowie holzbasierten Halb- und Fertigwaren durch saisonale Veränderungen im Bausektor erklärt werden (Schlosser, 2020). Auch bei einer geringeren Zahl neuer Bauvorhaben kann jedoch die Holznachfrage groß sein, wenn das verfügbare Einkommen ausreichend hoch ist. Es werden dann auch Reparaturen und Renovationen durchgeführt werden, die ebenfalls Bauholz benötigen (Baek, 2012). Wenn Holzprodukte durch Produkte aus anderen Rohstoffen substituiert werden können, spielen auch die Preise für diese Materialien eine Rolle für die Holznachfrage (Schwarzbauer, 2006; Bogdanski, 2011). So besteht ein gewisser Zusammenhang zwischen Metall- und Holzpreisen, da diese Materialien in bestimmten Verwendungsbereichen untereinander ausgetauscht werden können (Wear et al., 2007; He und Xu, 2011). Aufgrund der Substituierbarkeit von fossilen Energieträgern durch Holz gibt es auch einen Zusammenhang zwischen Energieholzpreisen und dem Erdölpreis (Suchomel et al., 2012; Härtl und Knoke, 2014; Klepacka et al., 2017; Gejdoš et al., 2019).

10.2.1.5 Außenhandel

Insbesondere nach Kalamitäten kann der Außenhandel als „Ventil“ wirken und damit einen nationalen Angebotsüberhang an Rohholz durch Exporte reduzieren und so einem starken Preisverfall auf dem heimischen Markt entgegenwirken (Sikora, 2017). Ob der Außenhandel so wirken kann, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu zählen die globale Nachfrage nach Holzprodukten, die internationale Wettbewerbsfähigkeit des Sektors Forst- und Holzwirtschaft sowie bestehende Handelshemmnisse.

Inwieweit Schadholzexporte eine Option sind, hängt zunächst von der **globalen Nachfrage** ab. So beeinflussen höhere Nachfrage und Preise im Ausland die Exporte stärker, als die eigene Wettbewerbsfähigkeit gemessen am Währungswert (Baek, 2012). Globale Rezessionen wirken sich insgesamt negativ auf die Holznachfrage aus (Schwab et al., 2009; Bogdanski, 2011; Hautamäki et al., 2012; Pelkki, 2012). Wichtige wachsende Märkte für den globalen Holzhandel sind China, Südost Asien, Mexiko sowie der mittlere Osten (Turner et al., 2005; Dieter und Englert, 2007; Bogdanski, 2011). Insbesondere das Wirtschaftswachstum der Volksrepublik China und der damit einhergehende Holzbedarf sind von großer Bedeutung für den globalen Rohholzhandel (Bogdanski, 2011; He und Xu, 2011; Chang und Gaston, 2016; Karvinen et al., 2019; Zhao et al., 2019; Toth et al., 2020).

Des Weiteren ist die **internationale Wettbewerbsfähigkeit des Sektors Forst- und Holzwirtschaft** für den Außenhandel mit Rohholz ein wichtiger Einflussfaktor. Eine rückläufige internationale Wettbewerbsfähigkeit kann in Form von rückgängigen Exportvolumen an holzbasierten Rohstoffen sowie Halb- und Fertigwaren beobachtet werden (Dieter und Englert, 2009).

Inwieweit temporäre Angebotsüberhänge an Rohholz in Folge von Kalamitäten über den Außenhandel abgebaut werden können, hängt auch von **Handelshemmnissen** ab. Intention vieler Handelshemmnisse ist es die eigene Volkswirtschaft vor unerwünschten Import und/Exporten zu schützen. Hierbei kann zwischen tarifären und nicht-tarifären Hemmnissen unterschieden werden. Zu den tarifären Hemmnissen gehören u.a. Exportsteuern und -zölle, welche den Export der Waren verteuern und oft von den importierenden Marktpartnern getragen werden müssen (Abbott et al., 2009), sowie Importsteuern und -zölle, welche die Warenimporte verteuern (Baek, 2012). Nicht-tarifäre Hemmnisse erschweren ausländischen Marktteilnehmern den Zugang zum inländischen Markt ohne dafür Zölle zu verhängen. Eine häufige Maßnahme ist das Festlegen von Handelsvolumen, die nicht überschritten werden dürfen (Baek, 2012). Zudem können im internationalen Vergleich hohe Umweltauflagen als Handelshindernis wahrgenommen werden (Houghton und Naughton, 2017). Auch durch abweichende Vorgaben zur Rohholzsortierung im Exportland, sowie durch vorzuweisende Dokumente und Zertifikate kann der Holzhandel zudem eingeschränkt werden (Lauri et al., 2013; Gejdoš und Danihelová, 2015; Karvinen et al., 2019).

10.2.1.6 Kalamitätsausprägung

Neben den bisher genannten Einflussfaktoren, die das Agieren der Marktteilnehmer auf den Rohholzmärkten nach Kalamitäten beeinflussen können, spielt die **Kalamitätsausprägung** eine zentrale Rolle. In der Literatur werden hierzu insbesondere die Schadensmenge, die Schadensart und der Schadenzeitpunkt angeführt.

Die angefallene **Schadholzmenge** selbst hat großen Einfluss auf die Marktreaktionen (Schwarzbauer, 2006). Auch in „Normaljahren“ ist das Rohholzaufkommen der deutschen Forstwirtschaft immer durch einen gewissen Schadholzanteil gekennzeichnet (StBa: Holzeinschlagsstatistik). Diese Schwankungen des „regulären“ jährlichen Schadholzanfalls haben aber nur geringe Auswirkungen auf die Holzpreise (Schwarzbauer, 2006). Jedoch führen außerordentlich hohe Schadholzmengen regelmäßig zu geringeren Rohholzpreisen, häufig auch für mehrere Jahre (J. Riis, 1998; Prestemon und Holmes, 2000; White et al., 2010; Bogdanski, 2011; Pye et al., 2011; Suchomel et al., 2012; Hartebrodt und Stenzel, 2013; Álvarez-Díaz et al., 2015; Gejdoš und Danihelová, 2015; Gejdos und Potkány, 2017; Klepacka et al., 2017; Da Kaniński

Silva et al., 2020; Gejdoš et al., 2020; Kožuch und Banaš, 2020; Toth et al., 2020; Zhai und Kuusela, 2020; Hlásny et al., 2021a; Udali et al., 2021; Fuchs et al., 2022; Rørstad et al., 2022). Wie stark und langanhaltend die Auswirkungen von Kalamitäten auf den Rohholzmarkt sind, hängt wiederum von den bereits vorgestellten Einflussfaktoren ab.

Auch die Häufigkeit und Regelmäßigkeit mit der Waldschäden auftreten, können Auswirkungen auf den Rohholzmarkt haben. Durch häufige und regelmäßige Schadereignisse können die Marktreaktionen auf das einzelne Ereignis abgeschwächt werden (Álvarez-Díaz et al., 2015), da sich die Marktteilnehmer auf solche wiederkehrende Schadereignisse besser einstellen können. Andererseits können wiederholte Schadereignisse im Wald in kurzer Zeit zu einer Summierung der Schadholzmengen führen. Aus mehreren kleinen Waldschäden in kurzer Folge können sich dann in Summe hohe Angebotsüberhänge auf dem Rohholzmarkt aufbauen (Suchomel et al., 2012; Fuchs et al., 2022).

Langfristig kann eine starke Reduktion des Holzvorrates durch Kalamitäten zu dauerhaften Preiserhöhungen führen, da die Erntemengen und damit das Angebot permanent sinken (Abbott et al., 2009; Schwab et al., 2009; Abt et al., 2010; Prestemon und Holmes, 2010; Bogdanski, 2011; Álvarez-Díaz et al., 2015; Corbett et al., 2016). Davon profitieren allerdings nicht unbedingt die kalamitätsbetroffenen Forstbetriebe, sondern stärker die nicht direkt betroffenen Forstbetriebe (Prestemon und Holmes, 2000; Pye et al., 2011; Kinnucan, 2016; Sun, 2016; Hlásny et al., 2021b).

Die Marktreaktion auf eine Kalamität hängt neben der Schadholzmenge auch von der **Schadensart** ab. Je nach Schadensursache kann sich ein unmittelbarer, schockartiger Schadholzanfall ergeben (z.B. durch Windwürfe) oder ein sich kontinuierlich aufbauendes Schadholzaufkommen (z.B. durch Borkenkäfer) (Prestemon und Holmes, 2000; Schwarzbauer, 2006). Bei letzterem können sich die Marktteilnehmer besser anpassen (Brecka et al., 2018). Die Schadensart beeinflusst teilweise auch die Möglichkeiten der Aufarbeitung und des Abtransportes. So kann Sturmholz aufgrund von hohen Splitterholzanteilen und Faserbrüchen oft eine schlechtere Holzqualität haben. Daneben ist nach Stürmen die Aufarbeitung häufig erschwert und die Holzlogistik durch versperrte Abfuhrwege im Wald und öffentlichen Straßen behindert (Klepacka et al., 2017; Kinnucan, 2016). Demgegenüber vermindert sich die Holzqualität nach Insektenkalamitäten oft relativ wenig und das Holz kann im Vergleich zur planmäßigen Nutzung ähnlich gut aufgearbeitet werden (Prestemon und Holmes, 2004). Unter bestimmten Umständen kann Schadholz mit Insektenbefall auch „stehend im Wald gelagert“ und erst dann aufgearbeitet werden, wenn eine Marktberuhigung stattgefunden hat oder die erforderlichen Aufarbeitungskapazitäten zur Verfügung stehen (Russell et al., 2017). Treten Borkenkäferkalamitäten aber im Nachgang zu abiotischen Schadereignissen, wie Sturmschäden, auf, verstärken sie deren Markteffekte (Hlásny et al., 2021a).

Schlussendlich ist auch der **Schadenzeitpunkt** für Reaktionen am Holzmarkt von Bedeutung. In Abhängigkeit von der Jahreszeit kann der Schaden Auswirkungen auf die Aufarbeitungsmöglichkeiten und die Logistik haben, da z.B. bestimmte Standorte nicht ganzjährig befahrbar sind (Brown et al., 2010; Pelkki, 2012; Klepacka et al., 2017; Brecka et al., 2018). Zudem unterliegt der Rohholzpreis jahreszeitlichen Schwankungen (Brown et al., 2010; Song et al., 2011; Brown et al., 2012; Kim und Cieszewski, 2015; Klepacka et al., 2017; Gejdoš et al., 2020; Kožuch und Banaš, 2020; Schlosser, 2020). Diese Rohholzpreisschwankungen resultieren aus der nachfrageseitigen Saisonalität des Bausektors sowie möglichen zeitlichen Einschlagsbeschränkungen durch administrative oder natürliche Gegebenheiten (Brown et al., 2010; Song et al., 2011; Brown et al., 2012; Kim und Cieszewski, 2015; Klepacka et al., 2017; Gejdoš et al., 2020; Kožuch und Banaš, 2020; Schlosser, 2020).

10.2.2 Ergebnisse der Experteninterviews

Im Rahmen der Experteninterviews wurden zehn Experten aus der Gruppe der 1.) Rohholzanbieter aus der Forstwirtschaft, dem 2.) Rohholzhandel und den 3.) Rohholznachfragern aus der Holzwirtschaft befragt. Hauptthematik der Befragung waren die Handlungsoptionen der Marktteilnehmer nach einer Kalamität. Weiterhin wurde nach den Einflussfaktoren gefragt, welche

die Wahl der verschiedenen Handlungsoptionen bestimmen. Daneben wurden die größten Hindernisse für den Schadholzabfluss aus dem Wald auf den Rohholzmarkt sowie die Informationsquellen der Marktteilnehmer für die Abschätzung der Marktentwicklung thematisiert.

Alle drei befragten Akteursgruppen betonen die Notwendigkeit zunächst einen Überblick bezüglich des Gesamtschadens zu bekommen, aufgrund dessen die Handlungsoptionen abgewogen werden können. Besonders wichtige Informationen sind die Schadholzmenge, die Schadensart und der Zeitpunkt des Schadeintritts. Bezüglich der Menge unterschieden die Befragten zumeist zwischen regionalen, nationalen und europäischen Schadereignissen. Die Schadensursache bestimmt den Verlauf einer Kalamität und führt jeweils zu spezifischen Herausforderungen. Aus Sicht der Rohholzanbieter aus der Forstwirtschaft und den Rohholznachfragern aus der Holzwirtschaft kommt weiterhin den unterschiedlichen Schadholzqualitäten hohe Bedeutung zu. Nach Einschätzung der befragten Marktteilnehmer führen Stürme generell zu Faserrissen. Wie schnell die weitere Qualitätsentwertung von Schadholz nach Stürmen verläuft, hängt auch davon ab, ob es sich um Windbruch oder Wurf mit Wurzelkontakt handelt. Grundsätzlich ergeben sich nach der Erfahrung der Befragten durch Sturmschäden bezüglich der Verarbeitungsmöglichkeiten des Schadholzes gravierendere Schäden als durch Borkenkäferbefall. Käferholz ist zumeist beil- und nagelfest, lediglich teilweise verfärbt und damit in der Regel ohne Probleme konstruktiv im Bausektor einsetzbar. Der Zeitpunkt der Kalamität spielt eine entscheidende Rolle für die Auswirkungen. Die Rohholzanbieter aus der Forstwirtschaft betonen die saisonalen Schwankungen am Rohholzmarkt und die damit verbundenen offenen Vertragsmengen. Außerdem ist die Geschwindigkeit der Holzqualitätsentwertung abhängig von der Vegetationszeit, da außerhalb der „Saftzeit“ im Winter z. B. Pilzsporen besser in das Holz eindringen können. Auch die freien Lagerkapazitäten in der Holzindustrie sind u.a. abhängig vom Zeitpunkt im Jahr.

Daneben spielen natürlich auch die hauptsächlich durch Schäden betroffene Baumarten eine Rolle. Die Baumart beeinflusst sowohl das Risiko und die Geschwindigkeit von Qualitätsverlusten als auch das Risiko von Folgeschäden in bisher nicht geschädigten Nachbarbeständen. Letzteres ist bei Laubholz in der Regel geringer als bei Nadelholz. Auch der potentielle Kundenkreis wird durch die Baumart bestimmt, da Abnehmer häufig sehr spezifisch sind. Auch das Sortiment ist entscheidend z.B. für die Lagerkapazitäten, da hochqualitatives Holz tendenziell aufwändiger zu lagern ist, als bspw. Industrieholz.

10.2.2.1 Handlungsoptionen nach Kalamitäten

In Abhängigkeit von zentralen Einflussfaktoren für die Handlungsoptionen nach Kalamitäten ergeben sich aus Sicht der befragten Experten unterschiedliche Handlungsoptionen. Zentrale Handlungsmöglichkeiten sind Maßnahmen zur Reduktion des Rohholzvolumens auf den Rohholzmärkten. Entweder durch eine Verminderung des regulären Einschlags von Frischholz oder eine Verzögerung der Aufarbeitung des Schadholzaufkommens.

Die **Minimierung des Frischholzeinschlages** wird insbesondere von den Rohholzanbietern aus der Forstwirtschaft als Mittel gesehen, um den Preisabfall für Schadholz zu bremsen und um Aufarbeitungskapazitäten auf die Schadgebiete zu konzentrieren. Erzwungene Einschlagsstopps werden von den Experten allerdings kontrovers eingeschätzt (s.u.).

Von den Rohholzanbietern aus der Forstwirtschaft wird daneben auch das **Nichtaufarbeiten** von gewissen Schadholzmengen als eine Option gesehen, insbesondere wenn die Rohholzlager der Forst- und Holzwirtschaft voll ausgelastet sind und keine freien Verarbeitungskapazitäten in der Holzindustrie bestehen. Voraussetzung dafür ist jedoch die Beachtung des Waldschutzes, insbesondere um weitere Folgeschäden angrenzender Bestände zu vermeiden. Das Nichtaufarbeiten von Schadholz wird als attraktive Option betrachtet, wenn die Aufarbeitung durch die Topografie teuer ist oder der Preisverfall durch den Angebotsüberhang ein kostendeckendes Aufarbeiten verhindert. Der Rohholzhandel steht dem Verzicht auf Aufarbeitung von Schadholz eher skeptisch gegenüber, während die Rohholznachfrager aus der Holzwirtschaft grundsätzliches Verständnis zeigt, wenn die Aufarbeitungs-, Lager- und Verarbeitungskapazitäten ausgeschöpft

sind. Der Verzicht auf eine zeitnahe Aufarbeitung von Kalamitätsholz ist als Option insbesondere in den letzten Kalamitätsjahren seit 2018 stärker in den Fokus gerückt. Die befragten Experten haben in den Kalamitätsjahren seit 2018 die Erfahrung gemacht, dass schnelles Aufarbeiten und Abverkaufen des Schadholzes nachträglich weniger attraktiv war als die Handlungsoption **verzögerte Aufarbeitung**. Mit Einsetzen der Kalamität waren die Preisabschläge zwar zunächst sehr schnell und stark, aber nach wenigen Monaten erholten sich die Preise durch veränderte Marktverhältnisse wieder. Eine verzögerte Aufarbeitung setzt allerdings die Erwartung voraus, dass der Markt sich relativ schnell beruhigt und das Holz einige Monate bis ein Jahr später mit verhältnismäßig geringem Qualitätsverlust verkauft werden kann.

Eine weitere wichtige Handlungsoption zur Bewältigung großer Schadholzmengen ist die **Erweiterung der Aufarbeitungskapazitäten**. Dies geschieht insbesondere durch verstärkten Einsatz von Lohnunternehmern. Um auf diese im Schadensfall zugreifen zu können, sind ein gutes Netzwerk und lange Partnerschaften mit forstlichen Dienstleistern und Logistikunternehmen wichtig, die in Normalzeiten sicher bedient werden und dann auch im Kalamitätsfall zur Verfügung stehen. Dies wird sowohl von Rohholzanbietern aus der Forstwirtschaft als auch vom Rohholzhandel betont. Die Handlungsoption **Steigerung des Stockverkaufs** wurde von Rohholzanbietern aus der Forstwirtschaft unterschiedlich beurteilt. Zum einen bietet diese Handlungsoption Sicherheiten, da Rohholzpreise im Vorhinein festgelegt werden und das Vermarktungsrisiko beim Rohholzhandel liegt. Andererseits werden Wertschöpfungsmöglichkeiten durch eigene Rohholzsartierung abgegeben.

Um dem Qualitätsverlust des Rohholzes entgegenzuwirken und die Angebotsmenge zeitlich zu strecken, werden **Rohholzlager** als weitere wichtige Handlungsmöglichkeit gesehen. Grundsätzlich wird insbesondere von den Rohholznachfragern aus der Holzwirtschaft der Aufbau von permanenten, zusätzlichen Rohholzlagerkapazitäten als zunehmend wichtiger angesehen. Es wurde betont, dass bei zunehmenden Zwangsnutzungen in Folge von Kalamitäten und saisonalen Einschlagsbeschränkungen nur mit hinreichenden Rohholzlagern eine gleichmäßige Versorgung der Holzindustrie möglich sei. Eingelagert wird üblicherweise auch bei einer Kalamität nur mit einem bestehenden Vorvertrag. Eine Lagerung von Schadholz ist für die Rohholzanbieter aus der Forstwirtschaft nur bei ausreichender Liquidität eine Option, denn die Kosten der Aufarbeitung und Lagerung fallen sofort an, die Erlöse aber erst verspätet.

Bei der Rohholzlagerung besteht die Möglichkeiten der Nass-, Trocken- oder Folienlagerung. Während die Nasslagerung einen langfristigen Qualitätserhalt garantiert, bestehen häufig Probleme bei den Genehmigungsverfahren neuer Nasslagerplätze. Insbesondere in Trockenheitsperioden ist der Betrieb von Nasslagerplätzen problematisch. Zudem erfordern Nasslager hohe Investitionskosten und viel Platz, weshalb sie oft zentral angelegt werden. Eine Möglichkeit die Finanzierung für alle Marktteilnehmer leichter zu machen, ist eine Kooperation von Anbietern und Nachfragern bei der Einrichtung von Lagern. Die Einschätzung zu Folienlagern fiel in den Interviews unterschiedlich aus. Von manchen Rohholzanbietern aus der Forstwirtschaft werden sie als mögliche Ergänzung gesehen, von anderen werden sie abgelehnt. Folienlager haben durch einen erhöhten Personalaufwand ähnlich hohe Kosten wie Nasslager. Sie haben aber den Vorteil, dass sie vor Ort dezentral errichtet werden können. Damit kann die Logistik entlastet werden. Aufgrund geringer Investitions- und Betriebskosten sind Trockenlager die am häufigsten genutzte Lagermöglichkeit. Wenn bereits Qualitätsverluste am Rohholz eingetreten sind, lohnen sich die anderen Lagerarten aufgrund der damit verbundenen Kosten oft nicht.

Als weitere Handlungsoption wird die **Ausweitung der Absatzmöglichkeiten** genannt. Üblicherweise werden zusätzliche Absatzkanäle noch vor oder während der Schadholzaufarbeitung und -einlagerung gesucht, um die Mehrmenge an Schadholz absetzen zu können. Generell ist auch bei der Absatzorganisation ein belastbares Netzwerk im In- und Ausland hilfreich. Zunächst werden im Schadensfall soweit wie möglich bestehende Verträge bedient. Im nächsten Schritt werden mit den bestehenden Abnehmern neue Verträge über zusätzliche Mengen, zu tendenziell niedrigeren Preisen, vereinbart. Eine weitere Option ist die Erweiterung des Abnehmerspektrums, u.U. auch durch Übergang zum Stockverkauf. Als eine Möglichkeit zur

Professionalisierung des Verkaufes und zur entsprechenden Entlastung der Rohholzanbieter aus der Forstwirtschaft werden dauerhafte gemeinsame Vermarktungsorganisationen genannt. Diese bieten auch einen gewissen Schutz der kalamitätsbetroffenen Forstbetriebe vor zufälligen Einflüssen, da das anfallende Holz fair in die bestehenden Verträge aufgeteilt wird.

Um die große Rohholzmenge aus dem Wald zu den Abnehmern zu transportieren, werden deutlich mehr **Logistikkapazitäten** in den Schadregionen als in Normalzeiten benötigt. Alle Experten versuchen im Schadensfall Spediteure über ihr persönliches Netzwerk zu organisieren, wodurch eine große Konkurrenz um Spediteure entsteht. Um den Abfluss des Rohholzes zu sichern werden teilweise zusätzliche Bahn-, Binnenschiffahrts- und Seeschiffahrtstransporte organisiert.

10.2.2.2 Einflussfaktoren auf Wahl von Handlungsoptionen

Welche Handlungsoptionen tatsächlich ergriffen werden können, hängt nach Einschätzung der Befragten von verschiedenen Einflussfaktoren ab.

Die **Eigenschaften des Forstbetriebes** bestimmen maßgeblich die jeweiligen Handlungsmöglichkeiten. Die Betriebsgröße ist neben der Topografie entscheidend für die Verfügbarkeit und die Kosten von Aufarbeitungskapazitäten. Kleine Auftragsflächen sind aufgrund häufigerer Umsetzungsnotwendigkeit unattraktiver für forstliche Dienstleister, ebenso wie schwer befahrbare Flächen. Auch bei der Vermarktung haben größere Rohholzanbieter aus der Forstwirtschaft Vorteile, da große Forstbetriebe nach Einschätzung des Rohholzhandels eine bessere Verhandlungsposition haben. Sie sind für Käufer aufgrund gebündelter Mengen und Lieferpläne auch attraktiver.

Auch die betriebliche Zielstellung der kalamitätsbetroffenen Forstbetriebe beeinflussen deren Handlungen. So erfordert der Vermögenserhalt tendenziell eine schnelle Aufarbeitung, um angrenzende Bestände nicht zu gefährden. Aber auch emotionale Faktoren der Forstbetriebseigentümer, wie das Verlangen nach einem aufgeräumten Wald, können zu einer schnelleren Aufarbeitung führen, selbst wenn diese wirtschaftlich nicht vorteilhaft ist. In den öffentlichen Forstbetrieben besteht neben den einzelbetrieblichen Ertragszielen teilweise auch eine Verantwortung für die gesamte Wertschöpfungskette. So werden öffentliche Forstbetriebe wahrscheinlich eher freiwillig auf den Frischholzeinschlag verzichten, um den Markt zu entlasten. Neben der betrieblichen Zielstellung ist auch die Liquidität des kalamitätsbetroffenen Forstbetriebes für die Wahl der Handlungsmöglichkeiten ursächlich. Können Vorleistungen und laufende Kosten des Forstbetriebes auch ohne Einnahmen aus dem Verkauf von Schadholz gezahlt werden, ergeben sich daraus andere Handlungsoptionen. So kann u.U. mit der Aufarbeitung gewartet werden, bis sich der Markt erholt hat. Reicht die Liquidität hingegen nicht aus, die laufenden betrieblichen Aufwendungen zu begleichen, können Zwangssituationen entstehen. Dadurch ist der Aufarbeitungs- und Verkaufszeitpunkt u.U. nicht frei wählbar.

Die Verfügbarkeit von **Aufarbeitungs-, Transport- und Lagerkapazitäten** kann regional sehr unterschiedlich sein. In „Normalzeiten“ sind diese in Regionen mit hohem Holzaufkommen aus regulärem Einschlag konzentriert. Die regionale Verteilung von Verladebahnhöfen und das Vorhandensein von Lagerplätzen ist ebenfalls unterschiedlich. Auch die Verfügbarkeit von ausreichendem Personal ist für kalamitätsbetroffene Forstbetriebe entscheidend. Für die schnelle Schadholzaufarbeitung benötigt der Forstbetrieb einen partnerschaftlichen Stamm an Lohnunternehmern, die dauerhaft und zuverlässig beschäftigt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, auf Rohholzhändler und deren Netzwerk an Aufarbeitungs- und Logistikunternehmen zurückzugreifen. Auch dort spielen langfristige Partnerschaften und ein zuverlässiger Ruf eine große Rolle, um schnell zusätzliche Unternehmerkapazitäten in die Schadregionen zu organisieren.

Eine Möglichkeit für kleine Forstbetriebe ihre Position bei der Rohholzvermarktung zu stärken und den Verkauf zu professionalisieren sind Vermarktungsgemeinschaften. Auch von den Rohholznachfragern aus der Holzwirtschaft werden Vermarktungsgemeinschaften als positiv

gewertet, da eine gebündelte und professionelle Holzvermarktung ermöglicht wird. Arbeiten Waldbesitzer nur im Kalamitätsfall innerhalb solcher Gemeinschaften zusammen, wurden hingegen von Nachfragern schlechte Erfahrungen gemacht.

Zwischen Verkäufern und Käufern findet ein Verkaufsprozess statt, der über einen **Rohholzkaufervertrag** geregelt wird. Dieser enthält üblicherweise die vereinbarten Rohholzmenge, -sortimente und -preise. Im Normalfall besteht nach Aussage eines Experten ein Interesse daran, möglichst wenige Verträge mit größerem Rohholzvolumen zu schließen, da jeder Einzelvertrag Transaktionskosten verursacht. In unsicheren Zeiten werden jedoch die Planungszeiträume und damit auch die Vertragslaufzeiten kürzer. Bei der Gestaltung von Rohholzverträgen wurden von den Experten die Bedeutung von partnerschaftlichen Beziehungen zwischen Verkäufern und Käufern hervorgehoben. Diese sind im Normalfall geprägt durch vertrauensvolle langfristige Partnerschaften und einer vertraglichen Fixierung von „groben“ Liefermengen zwischen Stammkunden. Grundlage dieser Konstellationen ist, dass die Rohholzkäufer in Normalzeiten sicher versorgt werden und im Gegenzug bei Kalamitäten entsprechend Mehrmengen abnehmen. Dementsprechend werden bei großen Schadholzmengen diejenigen Rohholzverkäufer der Forstwirtschaft priorisiert, mit denen langfristige Vertragsbeziehungen bestehen, anstatt bspw. den Einkaufsradius zu verkleinern. Aus Verkäuferperspektive ist der Käuferkreis abhängig von langfristigen Partnerschaften, die über sogenannte Kontaktmengen gehalten und möglichst diversifiziert werden.

Die Reaktionsfähigkeit der **Nachfragerseite** auf Kalamitätsholz ist stark vom Industriezweig innerhalb der Holzindustrie abhängig. So weisen die Produktionskapazitäten der Papier- und Zellstoffindustrie in Normalzeiten einen hohen Auslastungsgrad auf. Eine deutliche Erhöhung der Produktion mit den bestehenden Verarbeitungskapazitäten ist daher kaum möglich. Lediglich der Holzrohstoff-Mix zwischen Sägenebenprodukten und Rohholzsortiment Industrieholz ist variabel. In einer Kalamität fallen oft erhöhte Produktionsmengen an Sägenebenprodukte aus der Sägeindustrie an, da diese ihre Schnittholzproduktion steigern. Sägenebenprodukte sind im Vergleich schlecht lagerbar und stehen somit sehr günstig zur Verfügung. Daher nimmt die Zellstoff- und Papierindustrie tendenziell in einer Kalamität weniger Industrieholz aus dem Wald auf. Mittlerweile besteht jedoch eine starke Konkurrenz zwischen Zellstoff- und Papierindustrie sowie der Holzenergiebranche um Sägenebenprodukte, wie auch um schwache Industrieholzsortimente. Die energetische Verwendung von Holz wird kontrovers unter den befragten Experten diskutiert. Teilweise wird auf die Rohstoffnutzungskonflikte zwischen energetischen und stofflichen Rohholznutzern hingewiesen, andererseits wurde darauf hingewiesen, dass zusätzliche Sägenebenprodukte in Kalamitätsfällen schnell zu zusätzlichen Holzpellets mit guter Lagerfähigkeit verarbeitet werden können. Durch einen Experten aus der Holzenergieholzbranche wurde die Flexibilität der Branche, auf Angebotsüberhänge reagieren zu können, jedoch relativiert. So ist eine schnelle Umstellung auf andere Energieträger (wie z.B. Kohle auf Holz im Kalamitätsfall) in vielen Kraftwerken nicht möglich.

Grundsätzlich haben auch die anderen Wirtschaftszweige der Holzverarbeitenden Industrie einen hohen Bedarf nach sicherer und kontinuierlicher Rohholzversorgung. Diese Anforderungen sind jedoch aufgrund zufälliger Nutzungen durch Kalamitäten und jahreszeitlicher Einschlagsbeschränkungen mit entsprechender Versorgungsunsicherheit zunehmend schwieriger zu erfüllen. Daraus ergibt sich die Herausforderung flexibel mit unregelmäßigen Holz mengen umzugehen. Neben Lagermöglichkeiten kann auch die Produktionskapazitätsauslastung flexibel angepasst werden, z.B. durch zusätzliche Schichten in der Sägeindustrie. Das Einschnittsvolumen kann in Folge geringerer Rohstoffpreise im Kalamitätsfall zumeist gesteigert werden, da die Produktionskapazitäten der Sägeindustrie in Normalzeiten meist nicht voll ausgelastet sind. Zur Versorgung einer gesteigerten Produktion wird dann auch der Einkaufsradius von Rohholz erweitert. Wenn jedoch der Absatz der produzierten Schnittholz- und Sägenebenprodukte nicht sichergestellt ist, wird auch die Produktion nicht gesteigert. Auch das Austauschen der eingesetzten Baumarten ist, wenn die Produktionsprozesse es überhaupt zulassen, abhängig von den Absatzmöglichkeiten der produzierten Produkte. Wenn bspw. die Schnittholzproduktion von

Fichte auf Kiefer umgestellt werden soll, muss zunächst sichergestellt werden, dass die Schnittholz- und Sägenebenprodukte auch Abnehmer finden. Die Reaktion der Sägewerke auf Kalamitäten in der Forstwirtschaft erscheinen insgesamt sehr von der Nachfrage nach Schnittholzprodukten abhängig zu sein.

Nach Einschätzung der Befragten bestimmt die **Nachfrage nach Holzprodukten** und die konjunkturelle Entwicklung der Volkswirtschaft maßgeblich den Rohholzmarkt. Bei einer starken Konjunktur steigt bspw. die Nachfrage nach Verpackungsmaterial und damit auch nach Schnittholz, Holzwerkstoffen und Papier. Ebenso steigen die Einkommen und in Folge die Baukonjunktur, wodurch auch Bauholz verstärkt nachgefragt wird. In einer schlechten wirtschaftlichen Situation sinkt die Holznachfrage und daher wird auch Schadholz weniger nachgefragt. Die Entwicklung der Rohholzmärkte in Normaljahren und in Kalamitätsfällen wird maßgeblich von der Nachfrage nach holzbasierten Halb- und Fertigwaren sowie der Gesamtkonjunktur determiniert. Die Entwicklung auf diesen Märkten ist sehr volatil und auch durch globale Einflussfaktoren bestimmt.

Daneben sind die Anforderungen der Sägeindustrie an die Rohholzsortierung des Schadholzes davon abhängig, ob diese eine hohe Rohholznachfrage aufweist. Ist dies der Fall werden auch geringerwertige Rohholzsortimente als üblich akzeptiert und besser bezahlt. So führte die Unsicherheit in der Energieversorgung im Winter 2022/2023 zu sehr hohen Brennholzpreisen durch private Nachfrager, wodurch auch minderwertige Kalamitätsholzsortimente sehr gewinnbringend verkauft werden konnten. Gleichzeitig führte die gesetzliche Strompreisbremse zu einer „gedeckelten“ Zahlungsbereitschaft der Holzenergieerzeuger für Holzrohstoffe.

Die Nutzung des **Außenhandels** für die Schadholzvermarktung ist insbesondere von der Lage des Schadensgebiets und entsprechenden Logistikzugängen abhängig. Beim Außenhandel ist zwischen dem Handel mit Anrainerstaaten und relativ kurzem Transportweg sowie Überseehandel vornehmlich nach der Volksrepublik China oder den Vereinigten Staaten von Amerika zu unterscheiden. Auch beim Außenhandel ist ein bestehendes Vertriebsnetzwerk zu Abnehmern wichtig, weshalb auch hier „Kontaktmengen“ eine Rolle spielen, die in Normalzeiten verkauft werden. Neben der Akquise von ausländischen Abnehmern bestehen weitere Herausforderungen. Besonders zu nennen sind hier die Anforderungen an eine Containerverladung des Rohholzes und die Vermeidung von Qualitätsverlusten durch langwierige Transporte.

Die Wirkungen des verstärkten Außenhandels nach einer Kalamität werden von Experten aller Branchen vor allem als preisstabilisierend angesehen. Der Export dient als preisstabilisierendes Ventil, um die Mehrmenge an Schadholz zu verteilen. Der Außenhandel tritt damit als Konkurrenz zu den heimischen Rohholznachfragern der Holzindustrie auf. Darüber hinaus werden im Export teilweise geringere Anforderungen an die Schadholzqualität gestellt.

In den Interviews wurden auch verschiedene **politische Maßnahmen** angesprochen. Nach Einschätzung der befragten Rohholzanbieter der Forstwirtschaft sind Förderprogramme zur Unterstützung der Aufarbeitung oder des Transportes von Schadholz oft nicht sehr attraktiv, da die Einhaltung der Förderbedingungen für die kalamitätsbetroffenen Forstbetriebe häufig mit einem erheblichen Zusatzaufwand verbunden ist. Von den Rohholzanbietern der Forstwirtschaft wurde angeregt in Kalamitätszeiten durch politische Maßnahmen stärker den Absatz an holzbasierten Halb- und Fertigwaren der rohholzaufnehmenden Industrie zu unterstützen. Erwähnt wurden eine Förderung der Holznachfrage, durch z.B. eine Erhöhung der Holzquote im Bau oder den staatlichen Aufkauf von Schadholz mit dem Ziel der langfristigen CO₂-Speicherung. Von den befragten Rohholznachfragern der Holzindustrie wurde eine politische Unterstützung der professionellen Betreuung des Kleinprivatwaldes genannt.

Das Forstschadensausgleichsgesetz wurde von den Experten unterschiedlich bewertet. Die befragten Rohholzanbieter der Forstwirtschaft wünschten sich stärkere gesetzliche Instrumente zur Begrenzung des Frischholzeinschlages. Neben einer Entlastung der Rohholzmärkte sollten die dadurch freiwerdenden Aufarbeitungskapazitäten dann in den Schadensgebieten konzentriert werden können. Von den befragten Rohholznachfragern wird erwartet, dass gesetzliche

Einschlags- und Importbeschränkungen zu spät greifen würden. Mit dem relativ späten Inkrafttreten dieser gesetzlichen Regelungen hätte sich der hohe, Angebotsüberhang beim Rohholz häufig schon wieder reduziert. Zudem wird die Situation auf dem globalen Holzmarkt, wie z.B. die Rohholznachfrage in Anrainerstaaten, durch das Forstschadensausgleichsgesetz nicht berücksichtigt. Betont wurde daneben die Bedeutung von bundeseinheitlichen Ausnahmeregelungen für den Transport von Schadholz.

10.2.2.3 Größte Hemmnisse („Flaschenhalse“) für den Schadholzabfluss aus dem Wald auf den Rohholzmarkt

Als bedeutender „Flaschenhals“ für den Schadholzabfluss aus dem Wald wurde von den Rohholz Anbietern aus der Forstwirtschaft das Fehlen von Nasslagern und deren hoher Genehmigungsaufwand genannt.

Der Rohholzhandel und die Rohholznachfrager aus der Holzwirtschaft weisen zudem auf die teilweise sehr kleinteilige Forstbetriebsstruktur im Privatwald hin, wodurch eine professionelle Aufarbeitung nach Kalamitätsereignissen stark erschwert wird. Allgemein spielen auch die betriebliche Liquidität, z.B. durch Fremdfinanzierung, sowie die Aufarbeitungskapazitäten, insbesondere das fehlende ausgebildete Personal für den motormanuellen Einsatz eine zentrale Rolle als „Flaschenhalse“.

Als weiterer entscheidender Flaschenhals für den Schadholzabfluss aus dem Wald wurden Schwierigkeiten bei der Erhöhung der Schnittholzproduktion der Sägeindustrie genannt. Dabei wurden vor allem personelle Engpässe beim Versuch der Produktionserweiterung betont. Auch vom Rohholzhandel wurde die begrenzten Produktionsmöglichkeiten der Holzindustrie als ein Haupthemmnis genannt, während die Rohholzanbieter aus der Forstwirtschaft die Einschnittskapazität als potentiell ausreichend betrachtet.

Alle befragten Marktteilnehmer betonen die Holzlogistik als den wichtigsten Flaschenhals des Rohholzmarktes nach großen Kalamitäten. Dabei wird insbesondere die Bahn als zentrales Problem genannt. Nach Einschätzung der Experten liegen die Problemfelder der Bahn in der Organisation, der Verwaltung und dem bürokratischen Aufwand, unzureichenden Verlademöglichkeiten und nicht wettbewerbsfähigen Transportpreisen, insbesondere nach der Preisanpassung im Winter 2022/2023. Nach Einschätzung der Experten aus dem Rohholzhandel stellt die Bahn aufgrund ihrer Transportpreise für Rohholz kaum noch eine Alternative zum LKW-Transport dar. Aber durch den Einsatz von LKWs im Ferntransport von Rohholz würden zudem knappe Transportkapazitäten gebunden. Die LKW-Transportmöglichkeiten werden zusätzlich durch Fachkräftemangel und bürokratischen Aufwand eingeschränkt. Die Experten des Rohholzhandels betonen zudem, dass ein persönliches Netzwerk wichtig ist, um Transportkapazitäten zu organisieren. Teilweise würden vom Rohholzhandel sogar Fortbildungen angeboten, um zusätzliches Personal zu akquirieren. Daneben spielen auch Aspekte, wie Kobotage- und Sonntagsfahrverbote und gesonderte Regelungen zum Containertransport durch LKW für den Export eine Rolle. Auch die Infrastruktur an Waldwege und öffentlichen Straßen ist teilweise nicht für die Belastung durch zusätzliche Schadholztransportmengen ausgelegt.

10.2.2.4 Informationsquellen der Marktteilnehmer für die Abschätzung der Marktentwicklung

Die Wahl der Handlungsoptionen nach Kalamitäten hängt auch stark von der Einschätzung zur zukünftigen Marktentwicklung ab. Die befragten Experten nutzen als bedeutendste Informationsquellen für diese Markteinschätzungen ihre persönlichen Netzwerke. Für viele Experten sind Markteinschätzungen für ein Quartal hierbei planungsrelevant. Für die Nachfrager aus der Holzwirtschaft sind die erwarteten Entwicklungen auf den Märkten für holzbasierte Halb- und Fertigwaren entscheidend für Beurteilung der Rohholzmarktentwicklung.

Unabhängig von ihrer Branche, lesen die meisten Experten regelmäßig die Fachpresse, wobei am häufigsten die Zeitschriften des EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH und das Holz-Zentralblatt des DRW-Verlages Weinbrenner GmbH & Co. KG genannt wurden, weniger häufig das Holz Journal des HMI Holzmarktinformatik-Verlages und der Holzkurier des Österreichischen Agrarverlages. Diese Fachzeitschriften werden als Informationsquellen für Markteinschätzungen nie einzeln genutzt, sondern stets miteinander. Als weitere Informationsquelle wurde der Ifo-Geschäftsklimaindex des Ifo-Institut zur konjunkturellen Entwicklung in Deutschland genannt. Beinahe alle Rohholznachfrager und der Rohholzhandel nutzen als Informationsquelle Indizes, die die Baukonjunktur betreffen, z.B. Bauanträge oder Baugenehmigungen. Nach Erfahrungen der Experten wirken sich Veränderungen bei den Bauanträge oder Baugenehmigungen häufig ein halbes Jahr verzögert auf die Schnitt- und Rundholzpreise aus. Zusätzlich finden auch vereinzelt auch Informationsquellen zur Entwicklung des Zinssatzes sowie Entwicklungen in wichtigen Exportmärkten und die Preisentwicklungen bei alternativen Baustoffen Verwendung. Daneben wurde der Wunsch nach einer verbesserten und aktuelleren Informationsgrundlage zum Schadholzaufkommen, sowie über langfristige Trends im Rohholzaufkommen geäußert.

10.2.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Auf Basis der Literaturanalyse konnten zahlreiche Einflussfaktoren für Marktreaktionen der Rohholzmärkte identifiziert und zu sechs Faktorenbereichen zusammengefasst werden. Diese Faktorenbereiche sind 1.) das Rohholzangebot der Forstwirtschaft, 2.) die Rohholznachfrage der Holzindustrie, 3.) die Vertragsgestaltung von Rohholzverträgen, 4.) die Inlandsnachfrage nach Holzprodukten, 5.) der Außenhandel und 6.) die Kalamitätsausprägung.

Die Experteninterviews mit zehn Experten aus der Gruppe der 1.) Rohholzanbieter aus der Forstwirtschaft, 2.) dem Rohholzhandel und 3.) den Rohholznachfragern aus der Holzwirtschaft wurden geführt, um insbesondere Handlungsoptionen der Marktteilnehmer nach einer Kalamität zu erfragen. Weiterhin wurden die Einflussfaktoren für die Wahl der verschiedenen Handlungsoptionen thematisiert. Daneben wurde die größten Hindernisse für den Schadholzabfluss aus dem Wald sowie die Informationsquellen der Marktteilnehmer für die Abschätzung der Marktentwicklung befragt.

Grundsätzlich kann das auf Basis der Literatur entwickelte Faktorensystem durch die Experteninterviews für den deutschen Rohholzmarkt bestätigt werden. Demnach beeinflussen eine Vielzahl von Einflussfaktoren den Rohholzmarkt. Im Kalamitätsfall scheint eine isolierte Betrachtung der angefallenen Schadholzmenge nicht ausreichend, um direkt die Marktreaktionen einschätzen zu können. Insbesondere die konjunkturelle Lage und die damit verbundene Nachfrage nach Holzprodukten im In- und Ausland haben einen entscheidenden Einfluss auf den Rohholzmarkt nach Kalamitäten. Eine Grundvoraussetzung das angefallenes Schadholz aus den Forstbetrieben auf den Rohholzmarkt kommen kann, ist dessen Aufarbeitung und Transport. Als einer der bedeutenden „Flaschenhälse“ für den Schadholzabfluss aus dem Wald konnten Engpässe bei den verfügbaren Aufarbeitungs- und Logistikkapazitäten identifiziert werden.

10.3 Ansätze zur Implementierung in ein kontinuierliches Monitoring- und Berichtssystem

10.3.1 Bewertungsmethoden und deren Eingangsdaten

Für die Schadenskomponenten für die unter 10.1 Bewertungsmethoden identifiziert wurden, wurden diese für eine mögliche Implementierung in einem nationalen kontinuierlichen Monitoring- und Berichtssystem weiter spezifiziert.

Die naturalen Eingangsgrößen Schadensfläche und Schadensvolumen kommen aus der fernerkundungsbasierten FNEWs-Schadensdetektion und sind nach Hauptbaumartengruppen differenziert. Als ökonomischer Schaden werden nur Kalamitätsholzmengen auf Waldflächen

bewertet, welche für die wirtschaftliche Nutzung vorgesehen sind. Bei einem Kalamitätsholzanfall in Naturschutzgebieten mit dem Ziel Prozessschutz ist dies nicht der Fall. Da es auf Bundesebene keine differenzierten Geoinformationen für diese nutzungsfreien Waldflächen gibt, wird dies vereinfachend für die Nationalparke und Naturschutzgebiete unterstellt.

Die Berechnung der Mehraufwendungen für die Schadholaufarbeitung und für die Wiederbewaldung sowie der Mindererlöse des Schadholaverkaufs erfolgen über die Differenz zu den Normalkosten und -erlösen ohne Schäden. Dazu werden zunächst die Normalkosten und -erlöse kalkuliert. Anschließend werden unter Nutzung von literaturbasierten Annahmen Zuschläge für die Schadholaufarbeitung sowie Abschläge auf die Schadholaerlöse kalkuliert. Die Holzerntekosten und baumartengruppenspezifischen Holzerlöse werden auf Basis des Testbetriebsnetzes Forst des BMEL ermittelt. Für die Schadensberechnung wird jeweils das 10-jährige Mittel der dem Bewertungsjahr vorausgehenden Jahre verwendet. Durch die Verwendung eines 10-jährigen Mittels soll die Langfristigkeit der forstlichen Produktion berücksichtigt und vermieden werden, dass sich extreme Schwankungen des Holzmarktes direkt auf die Bewertung auswirken. Da Schadereignisse in der Zukunft zunehmen werden, wird das 10-jährige Mittel sowohl Schadjahre als auch Jahre mit weniger großen Schäden enthalten. Die Mehraufwendungen der Wiederbewaldung ergeben sich durch die Subtraktion der Wiederbewaldungskosten unter Normalbedingungen und denen unter erschwerten Bedingungen auf Kalamitätsflächen. Die Kostensätze werden aus den Waldbewertungsrichtlinien von Bund und Ländern abgeleitet. Als Wiederbewaldungsfläche wird die gesamte Schadensfläche angenommen. Naturverjüngungsanteile werden über die Verhältnisse aus der Bundeswaldinventur abgeleitet und in der Berechnung berücksichtigt.

Die Berechnung der Hiebsunreife erfolgt analog zur Waldbewertungsrichtlinie des Bundes mit dem Alterswertfaktorverfahren. Zur Anwendung dieses Verfahrens sind Informationen zum durchschnittlichen Alter der ausgefallenen Bestände nötig. Diese Informationen sind über die Fernerkundung nicht ableitbar, deshalb muss mit pauschalen Annahmen gerechnet werden. Über die Fernerkundung werden v.a. Sturm- und Borkenkäferschäden erfasst. Für diese Schadensarten sind ältere Bestände besonders anfällig. Dies wird in den Annahmen zum Schadensalter berücksichtigt.

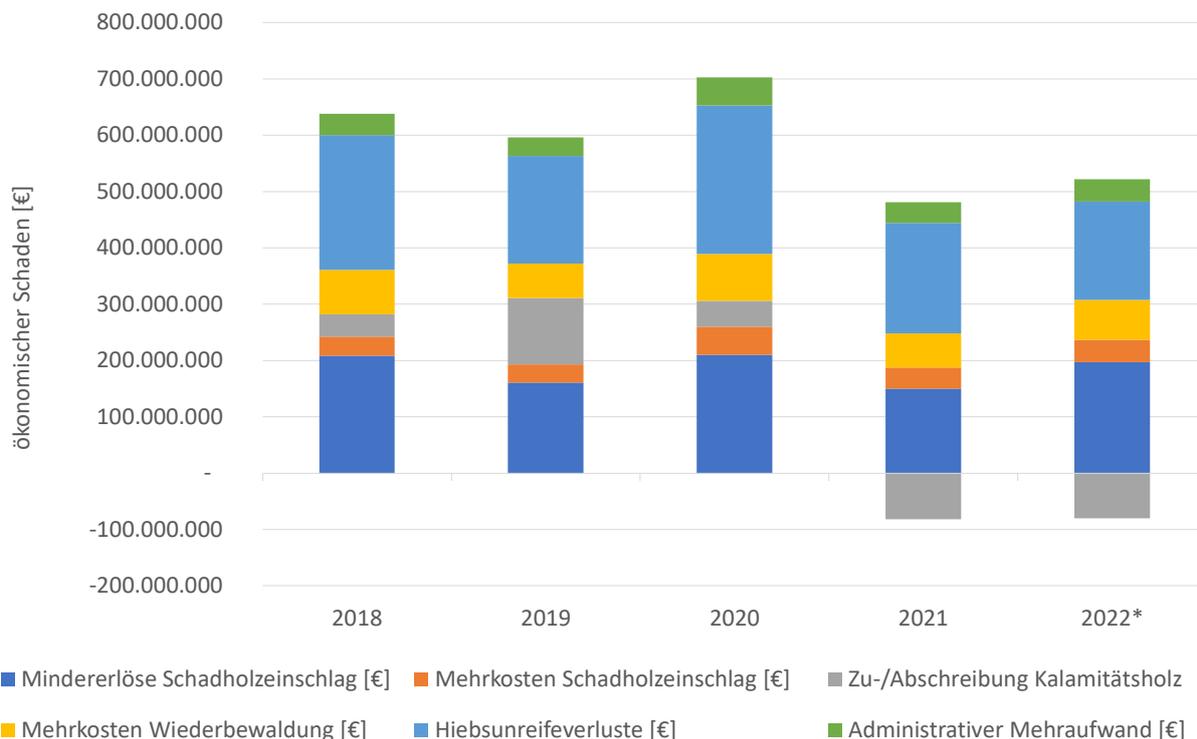
Für die administrativen Mehrkosten folgt der Bewertungsansatz den Annahmen von Möhring et al. (2021). Es wird ein pauschaler Mehraufwand je aufgearbeitetem Kubikmeter Schadholz und ein Zuschlag für die Wiederbewaldungskosten aufgrund eines unterstellten erhöhten Planungsaufwands berücksichtigt.

Für die Zu- bzw. Abschreibung des verbleibenden Schadenholzes wird die Holzeinschlagsstatistik des Statistischen Bundesamtes genutzt. Darin wird der durch Schäden verursachte Holzeinschlag ausgewiesen. Dieser wird vom durch die FNEWs-Schadensdetektion abgeleiteten Schadholaolumen abgezogen. Die Differenz wird als wirtschaftlich abzuschreibendes Schadholz interpretiert und mit dem Durchschnittserlös der letzten 10 Jahre des TBN-Forsts bewertet. Die Differenz kann positiv aber auch negativ ausfallen. Positiv bedeutet, dass mehr Schadholz angefallen ist, als aufgearbeitet wurde. Das im Wald verbliebene Holz wird abgeschrieben. Negativ bedeutet, dass mehr Schadholz aufgearbeitet wurde, als in dem jeweiligen Jahr angefallen ist. Es wurde also Schadholz aus den vergangenen Jahren aufgearbeitet, dieses wird zugeschrieben und vermindert damit den Gesamtschaden des jeweiligen Jahres.

10.3.2 Bewertungsergebnisse für die FNEWs-Untersuchungsgebiete

Mit den skizzierten Bewertungsmethoden können die jährlich im Rahmen der Fernerkundung identifizierten Waldschäden bewertet werden. Dies ist im Rahmen des FNEWs-Projektes für die FNEWs-Untersuchungsgebiete für die Jahre 2018 bis 2022 durchgeführt wurden. Für die Untersuchungsgebiete wurde in Summe eine Schadensfläche von ca. 194 Tsd. ha detektiert. Davon liegen ca. 19 Tsd. ha in Naturschutzgebieten oder Nationalparks und werden deshalb nicht bewertet. Auf der bewerteten Fläche fallen ca. 58 Mio. m³ Schadholz an.

Abbildung 25 zeigt den ermittelten Gesamtschaden differenziert nach Schadenskomponenten. Die bedeutsamsten Schadenskomponenten sind der Hiebsunreifeverlust und die Mindererlöse des Schadholzeinschlags. Den anderen Schadenskomponenten kommt demgegenüber eine deutlich geringere Bedeutung zu. Die Höhe der Hiebsunreifeverluste ist stark von den Annahmen zum Alter der ausgefallenen Bestände und der geplanten Umtriebszeit abhängig. Es wurde unterstellt, dass die geschädigten Bestände 90 % des Standardnutzungsalters gemäß der Waldbewertungsrichtlinie des Bundes (WaldR2000) erreicht haben. Verglichen mit Möhring et al (2021), die 75 % des Standardnutzungsalters angesetzt haben, ist dies eine konservative Annahme. In den ersten 3 Jahren wurde ein höherer Schadholzanfall detektiert, als verwendet wurde. Die Differenzmengen wurden abgeschrieben. In den letzten beiden betrachteten Jahren wurde demgegenüber mehr Schadholz verwendet als detektiert. Es kommt zur Zuschreibung und damit einer Reduzierung des Gesamtschadens.



* ökonomische Grunddaten aus 2021

Abbildung 25: Gesamtschaden differenziert nach Schadenskomponenten

Rund die Hälfte der berechneten Schäden entfällt auf die kurzfristigen Schadenskomponenten und wird somit direkt im Jahr des Schadenseintritts „kassenwirksam“ (Abbildung 26). Die erhöhten Mehraufwendungen für die Wiederbewaldung werden mittelfristig in den Folgejahren nach dem Kalamitätseignis kassenwirksam. Demgegenüber fallen Hiebsunreifeverluste kalkulatorisch bis zum Ende der planmäßigen Umtriebszeit an und haben damit je nach Alter der geschädigten Bestände noch mehrere Jahrzehnte nach dem Schadereignis Auswirkungen auf die betroffenen Forstbetriebe.

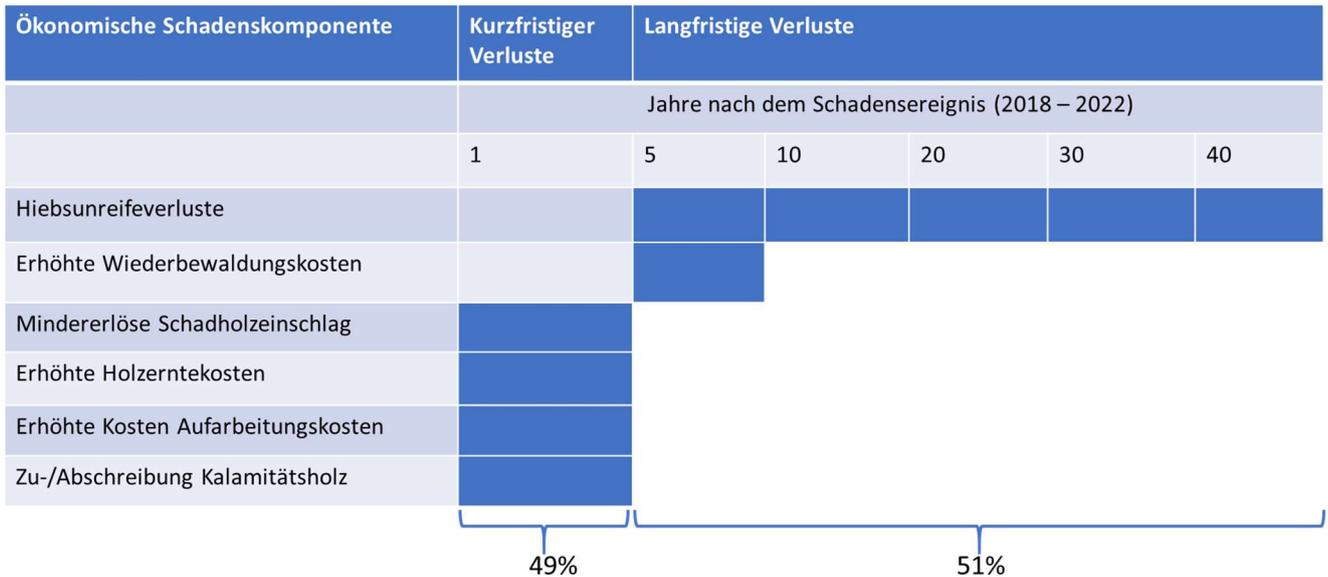


Abbildung 26: Zeitlicher Anfall der Schadenskomponenten

10.3.3 Schlussfolgerungen

Im FNEWs-Projekt wurden die Grundlagen für ein kontinuierliches bundesweites Monitoring der ökonomischen Auswirkungen von Waldschäden gelegt. Auf Basis einer breit angelegten Literaturanalyse konnte ein Bewertungsrahmen entwickelt werden, der die wichtigsten Schadenskomponenten umfasst. Für die meisten dieser Schadenkomponenten konnten Bewertungsverfahren identifiziert werden, mit denen die jährlich über die fernerkundungsbasierte Schadensdetektion ermittelten naturalen Schäden ökonomisch bewertet werden können. Damit wird ein Vergleich der ökonomischen Auswirkungen der Waldschäden zwischen unterschiedlichen Berichtsjahren ermöglicht.

Der aktuelle Bewertungsrahmen umfasst nur ökonomische Auswirkungen auf die forstliche Rohholzerzeugung. Eine Erweiterung des Bewertungsrahmens um weitere Schadenkomponenten, wie z. B. die Auswirkungen auf die nachgelagerte Holzindustrie ist aber grundsätzlich möglich. Durch die Berechnung der einzelnen Schadenskomponenten, welche in Summe den Gesamtschaden ergeben, wären trotz Erweiterung des Rahmens Zeitreihenbetrachtungen der ökonomischen Schadentwicklung möglich.

Eine bundesweite ökonomische Schadensbewertung bedingt Vereinfachungen und Annahmen. Eine große Herausforderung der ökonomischen Bewertung ist die limitierte Verfügbarkeit von konkreten Bestandsinformationen über die Fernerkundung. Hinzu kommen Unsicherheiten zu den Reaktionen des Holzmarktes auf Schadensereignisse. Die den Kalkulationen zugrunde liegenden Annahmen müssen daher transparent sein und regelmäßig aktualisiert werden.

Die langfristigen ökonomischen Auswirkungen machen einen Großteil der wirtschaftlichen Verluste für die Forstwirtschaft aus. Diese Verluste scheinen in der Regel nicht unmittelbar im betrieblichen Rechnungswesen auf.

11 Synthese und Ausblick

Im Projekt FNEWs wurde erfolgreich ein nationales fernerkundungsbasiertes Erfassungssystem für Waldschäden aufgebaut. In enger Zusammenarbeit des Projektkonsortiums, welches in den Bereichen der Technologie, der Fernerkundung, der Ökonomie und der forstlichen Forschung mit Anwendungsbezug fest verankert ist, wurden sowohl die Methodik des Monitoringsystems entwickelt als auch die technische Infrastruktur aufgebaut. Damit steht ein weitgehend automatisiertes System bereit, welches durch biotische und abiotische Schadereignisse abgestorbene Waldflächen erkennt und ausweist. Entgegen der Zielstellung ist es gelungen, die minimal erfasste Schadflächengröße des Jahresproduktes von 0,25 ha auf 0,1 ha zu verbessern und damit deutlich genauer zu werden. Ebenso konnte die Flächenvorgabe für die Schnellerkennung von 0,5 ha auf 0,25 ha verbessert werden.

Mit dem im Projekt entwickelten Modell der Zeitreihenanalyse der Sentinel 2-Daten werden die verschiedenen Fernerkundungsprodukte erstellt. Das Jahresprodukt weist Schadflächen zusammen mit einer Flächenstatistik für jährliche Waldänderungen aus. Der Stichtag ist jeweils der 31. August. In diesem Produkt werden neben der Schadfläche das Schaddatum und die wahrscheinlichste Schadursache angegeben. Die räumliche Auflösung beträgt 10x10 m und die Mindestkartiereinheit 0,1 ha. Die Genauigkeit des Jahresproduktes liegt bei $\geq 95\%$ und zeigt damit gute bis sehr gute Genauigkeiten. Mit der Validierung wird dem Jahresprodukt eine hohe Aussagekraft bestätigt. Damit ist eine gute Anwendbarkeit für die Praxis gegeben. Die Jahresprodukte wurden für die Untersuchungsgebiete für den Zeitraum 2018 – 2022 berechnet. Die Gesamtergebnisse entsprechen in absoluten, aber auch in relativen Zahlen dem Trend der nationalen Waldschadensentwicklung.

Das Monatsprodukt weist Schadflächen pro Monat aus. Es ist ein aggregiertes Produkt aus den einzelnen NRT's innerhalb eines Monats. Zusätzlich zu den Flächen wird die wahrscheinlichste Schadursache und die Anzahl der Aufnahmen je Monat angegeben. Die räumliche Auflösung beträgt 10x10 m und die Mindestkartiereinheit 0,25 ha. Die Monatsprodukte wurden für die Untersuchungsgebiete berechnet. Bei Idealbedingungen können ähnliche Genauigkeiten wie beim Jahresprodukt erreicht werden. Die Validierung hat gezeigt, dass das Monatsprodukt meist deutlich niedrigere Genauigkeiten als das Jahresprodukt aufweist. Zudem wurde festgestellt, dass die Genauigkeit der Schadursachenerkennung ungenügend ist. Die Produkte wurden noch nicht systematisch ausgewertet. Hier sind einerseits methodische Weiterentwicklungen als auch weiterführende Validierungsarbeiten erforderlich.

Neben diesen genannten Produkten sind weitere Ergebnisse in Form von Geodaten im Zusammenhang mit den Projektarbeiten entstanden. Eine Datenbasis für die Auswertungen des Projektes ist die Holzbodenmaske 2018, welche die bestockten Holzbodenflächen ausweist. Diese Karte ist deutschlandweit verfügbar (Langner et al. 2022). Für die Ableitung der Baumartengruppen, als Parameter zur Volumenberechnung und für weitere Zusatzinformationen wurde die deutschlandweite Baumartenkarte des Thünen-Instituts genutzt, die parallel zum Projekt entstanden ist (Blickensdörfer et al. 2024, Blickensdörfer et al. 2022). Eine weitere Voraussetzung für ökonomische Berechnungen ist die Holzvorratskarte, die auf Basis der BWI die Holzvorräte für ganz Deutschland zur Verfügung stellt.

Aus der Machbarkeitsstudie zur Schnellerkennung von Sturmschäden mittels Sentinel-1-Daten in Deutschland geht hervor, dass die Anwendung der Methodik grundsätzlich möglich ist. Dieses Verfahren funktioniert auch im unbelaubten Zustand und ohne Verfügbarkeit eines Vegetationshöhenmodells für die Ausweisung geschädigter Waldflächen. Allerdings wurde aufgezeigt, dass es für eine operationelle Anwendung noch zu viele Unsicherheiten gibt, die vertiefter untersucht werden müssen. Dabei handelt es sich um sowohl meteorologische als auch

Einflüsse des Waldtyps auf die SAR-Rückstreuung. So wurde bei Winterstürmen beobachtet, dass nasser Schnee einen starken Einfluss auf die Verlässlichkeit der Methode hat. Ebenso wurde in einem Sommersturmgebiet beobachtet, dass Windwürfe in Kiefernbeständen nicht erkannt werden können.

Im Projekt wurden die Grundlagen für ein kontinuierliches bundesweites Monitoring der ökonomischen Auswirkungen von Waldschäden gelegt. Auf Basis einer breit angelegten Literaturanalyse konnte ein Bewertungsrahmen entwickelt werden, der die wichtigsten Schadenskomponenten umfasst. Für die meisten dieser Schadenskomponenten konnten Bewertungsverfahren identifiziert werden, mit denen die jährlich über die fernerkundungsbasierte Schadensdetektion ermittelten naturalen Schäden ökonomisch bewertet werden können. Damit wird ein Vergleich der ökonomischen Auswirkungen der Waldschäden zwischen unterschiedlichen Berichtsjahren ermöglicht.

Der aktuelle Bewertungsrahmen umfasst nur ökonomische Auswirkungen auf die forstliche Rohholzerzeugung. Eine Erweiterung des Bewertungsrahmens um weitere Schadenskomponenten, wie z. B. die Auswirkungen auf die nachgelagerte Holzindustrie ist aber grundsätzlich möglich. Durch die Berechnung der einzelnen Schadkomponenten, welche in Summe den Gesamtschaden ergeben, wären trotz Erweiterung des Rahmens Zeitreihenbetrachtungen der ökonomischen Schadentwicklung möglich.

Eine bundesweite ökonomische Schadensbewertung bedingt Vereinfachungen und Annahmen. Eine große Herausforderung der ökonomischen Bewertung ist die limitierte Verfügbarkeit von konkreten Bestandsinformationen über die Fernerkundung. Hinzu kommen Unsicherheiten zu den Reaktionen des Holzmarktes auf Schadensereignisse. Die den Kalkulationen zugrunde liegenden Annahmen müssen daher transparent sein und regelmäßig aktualisiert werden. Die langfristigen ökonomischen Auswirkungen machen einen Großteil der wirtschaftlichen Verluste für die Forstwirtschaft aus. Diese Verluste scheinen in der Regel nicht unmittelbar im betrieblichen Rechnungswesen auf.

11.1 Ausblick

Das erfolgreiche Erreichen der Projektziele ist insbesondere vom Auftraggeber des Projektes, dem BMEL, mit großem Interesse begrüßt worden. Aufgrund der Notwendigkeit der Erkennung und Erfassung von Waldschäden als auch eines fortlaufenden Monitorings von Waldschäden sollen die methodischen und technischen Entwicklungen und Ergebnisse des Projektes zukünftig in ein operationelles Monitoringsystem implementiert werden. Damit wird ab Ende des Projektes 2023 der Übergang aus der Projektphase in die Implementierungsphase am Thünen-Institut für Waldökosysteme vollzogen werden. Während im Projekt auf Untersuchungsgebietsebene gearbeitet wurde, sollen nunmehr die entwickelten Prozesse und Algorithmen aus den einzelnen Gebieten auf die Fläche Deutschlands ausgerollt werden. Gerade dieser Schritt ist ein nicht zu unterschätzender Schritt, der sowohl Zeit, technische Expertise als auch entsprechende Ressourcen erfordert.

Von Seiten der Bundesländer, forstlichen Forschungseinrichtungen und forstlicher Nutzer zeigt sich Interesse und Bedarf an den vorliegenden Ergebnissen, insbesondere auch an bundesweiten Ergebnissen. Der Austausch mit potenziellen Nutzern hat gezeigt, dass Daten über einen Geoserver, am besten über einen WMS-Dienst, bereitgestellt werden sollen. Voraussetzung dafür sind eine regelmäßige Aktualisierung der Daten, die kontinuierliche Datenbereitstellung und eine transparente Dokumentation.

11.2 Präsentationen, Veröffentlichungen & Öffentlichkeitsarbeit

Während der Projektlaufzeit wurde ein aktiver Austausch auf wissenschaftlicher und forstpraktischer Ebene durchgeführt. Bedingt durch die Einschränkungen der Corona-Pandemie konnten in der Anfangsphase des Projektes zahlreiche Aktivitäten und die Beteiligung an Veranstaltungen nur online durchgeführt werden. Aufgrund der zeitlichen Verzögerungen im Projektablauf konnte in der Projektlaufzeit kein Ergebnisworkshop mit Stakeholdern durchgeführt werden.

11.2.1 Vorträge

- 13.01.2021: Projektpräsentation an der TU Berlin (Vortrag, Online)
- 28.04.2021: Projektpräsentation auf dem Tag der Fernerkundung und Geoinformation im BMEL (Vortrag, Online)
- 17.05.2021: Präsentation des Projektes AFL Tagung (Vortrag, Online)
- 18.05.2021: Vorstellung und Diskussion des Projektes auf dem Seminar zur Nutzung von Drohnen und Fernerkundung im forstlichen Umweltmonitoring (Vortrag, Online)
- 29.06.2021: Präsentation der technischen Entwicklungen aus FNEWs beim Digital Dialog des Silicon Alps Clusters: Thema: „Digital Forest Twin“. „Vom Weltall bis zum Tablet: Welche Möglichkeiten bieten Erdbeobachtungsdaten für den Digitalen Wald?“ (Vortrag, Online)
- 14.09.2021: Vortrag und Diskussion an FoWiTa: „FNEWS - Erste Einblicke in die Waldschadenserfassung“ (Vortrag, Online)
- 04.10.21: Präsentation von FNEWs, der Methoden und erster Ergebnisse auf den Photonics Days Berlin/Brandenburg (Vortrag, Online)
- 23.11.2021 Projektvorstellung beim Waldworkshop des Digital Innovation Hub zum Thema „Waldwirtschaft im Klimawandel – digitale Lösungen für die Zukunft“ (Vortrag, Online)
- 02.05.2022: FNEWs: Erste Einblicke in die Waldschadenserfassung. Projektvorstellung und Diskussion beim UFZ-Workshop Waldzustandsmonitor, Leipzig. (Vortrag, Online)
- 07.07.2022: Vortrag beim Forest@Photonics Workshop auf der W3+ Fair Wetzlar 2022
- 29.08.-03.09.2022: 3 oral presentations ForestSAT 2022, Berlin: 1. „A remote sensing-based national forest damage monitoring system for Germany“ (Langner et al.); 2. „Mapping and monitoring bark beetle infestation in Central Europe with Sentinel-2 time series“ (Deutscher et al.); 3. „Improved handling of artefacts and noise in structural time series modelling of forest dynamics“ (Puhm et al.)
- 13.-16.10.2022: 2 oral presentations EARSeL Symposium, Paphos: 1. „Mapping Forest Change Areas and Assessing Forest Disturbance Agents from Sentinel-2 Time Series“ (Deutscher et al.); 2. Improved Handling of Artefacts in Sentinel-2 Time Series Modelling and Detection of Vegetation Disturbances (Puhm et al.)
- 2022: Kurzvorstellung des FNEWs-Projektes im Rahmen der Joanneum Research Zukunftskonferenz 2022: „Der Beitrag des Waldes zum Klimaschutz und seine Gefährdung durch die Erderwärmung“ (Vortrag)
- 09.11.2022: FNEWS Vortrag FNR Statusseminar „Digitalisierung Forst und Holz“
- 15.11.2022: Präsentation von FNEWs Projektergebnissen beim Copernicus Netzbüro Wald Online-Seminar: "Den Borkenkäfer mit Fernerkundungsdaten früher finden - was ist heute schon möglich?" (Vortrag, Online)
- 22.11.2022: Präsentation der FNEWs Methodik beim Bark Beetle Special Session Workshop des JRC
- 29.03.2023: FNEWs: Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem für Waldschäden – System und Ergebnisse. Projektvorstellung auf der Nutzerkonferenz des Copernicus – Netzbüros Walds, Braunschweig (Vortrag)
- 11.05.2023: Vorstellung FNEWs auf WinMol Abschlusskonferenz (Vortrag, Online)
- 03.07.2023: Fernerkundung im Wald - Neue Herausforderungen. Fernerkundung und der Digitale Zwilling Deutschland - Status Quo und Potentiale für Aufgaben des BMEL: Tag der Fernerkundung 2 im BMEL, Bonn (Vortrag, Online)

- 06.09.2023: Präsentation von Ergebnissen aus AP6 auf der Silvilar 2023-Konferenz in London (Vortrag)
- 12.09.2023: Präsentation der Projektergebnisse auf der Forstwissenschaftlichen Tagung in Dresden (Vortrag)
- 13.09.2023: Vorstellung Bewertungskonzept und Implementierung in kontinuierliches Monitoringssystem auf der Forstwissenschaftlichen Tagung in Dresden (Vortrag)
- 13.09.2023: Präsentation von Ergebnissen aus AP6 auf der FOWITA 2023 in Dresden (Vortrag)
- 14.09.2023: Vorstellung des Konzepts und aktuellen Arbeitsstands zu den Einflussfaktoren auf Marktreaktionen am deutschen Rohholzmarkt nach Kalamitäten auf dem Forstökonomischen Kolloquium in Dresden (Vortrag)
- 13.12.2023: Vorstellung der Bundeswaldinventur und des digitalen Waldmonitorings (FNEWs). BMEL-BMUV-Thünen. (Online-Vortrag)
- 15.01.2024: FNEWs: Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem für Waldschäden & Fernerkundungsprodukte. Campuskolloquium des Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Vortrag)

11.2.2 Poster

- 13.09.2021: Posterpräsentation FoWiTa: Eine ökonomische Bewertungskonzeption für ein dauerhaftes fernerkundungsbasiertes Erfassungssystem für Waldschäden in Deutschland
- 26.05.2022: Living Planet Symposium: Poster-Präsentation der verbesserten Pre-processing Workflows mit Beispielen aus FNEWs
- 08.07.2022: FNEWs-Poster bei der Langen Nacht der Wissenschaft in Sachsen, Dresden
- 27.08.2022: FNEWs-Poster bei dem Tag der offenen Tür der NW-FVA
- 24.06.2023: Vorstellung FNEWs beim DLR-Symposium in Bonn
- 11.9.2023: Vorstellung der Validierungsergebnisse auf der FoWiTa in Dresden

11.2.3 Publikationen

- Reinosch E, Backa J, Adler P, Deutscher J, Eisnecker P, Hoffmann K, Langner N, Puhm M, Rüetschi M, Straub C, Waser LT, Wieseahn J, Oehmichen K (2024), Detailed validation of large-scale Sentinel-2-based forest disturbance maps across Germany, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2024,; cpae038, <https://doi.org/10.1093/forestry/cpae038>
- Fleckenstein S, Franz K, Seintsch B, Dieter M., Möhring B. (2023) Economic damage assessment of forest disturbances on forestry: State of knowledge and challenges for a continuous economic loss monitoring in Germany. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*. 193. 41-64. 10.23765/afjz00092.
- Oehmichen K, Ackermann J, Adler P, Backa J, Deutscher J, Fleckenstein S, Franz K, Ginzler C, Henning L, Hoffmann K, Langner N, Puhm M, Reinosch E, Rüetschi M, Seitz R, Straub C, Uhl A, Waser LT, Wieseahn J, Wimmer A (2022) Einblicke in das Fernerkundungsbasierte Nationale Erfassungssystem Waldschäden (FNEWs). Eberswalde: Thünen-Institut für Waldökosysteme, 2 p, Project Brief Thünen Inst 2022/14, DOI:10.3220/PB1649076458000
- Hoffmann K, Backa J (2024): Satelliten detektieren Schadereignisse, Fernerkundungsgestütztes Nationales Erfassungssystem Waldschäden, *Forstjournal* 1|24 Staatsbetrieb Sachsenforst
- Oehmichen K, Ackermann J, Adler P, Backa J, Beckschäfer P, Deutscher J, Eisnecker P, Fleckenstein S, Franz K, Ginzler C, Henning L, Hoffmann K, Langner N, Puhm M, Reinosch E, Rüetschi M, Schicketanz D, Seitz R, Straub C, Uhl A, Waser L, Wieseahn J, Wimmer A (2024) Ergebnisse des Fernerkundungsbasierten Nationalen Erfassungssystems Waldschäden (FNEWs). Eberswalde: Thünen-Institut für Waldökosysteme, 2 p, Project Brief Thünen Inst 2024/12, DOI:10.3220/PB1712056632000

11.2.4 Datenveröffentlichungen

- Langner N, Oehmichen K, Backa J, Eisenecker P, Reinosch E, Wieseahn J, Hoffmann K, Adler P, Beckschäfer P (2024) Referenzdaten aus dem Projekt FNEWS [Datenpublikation] [online]. 1 GeoPackage, 2 PDF-Dateien. Göttingen: OpenAgrar Repository, zu finden in <https://atlas.thuenen.de/layers/geonode:referenzdaten_fnews_3_0> [zitiert am 12.01.2024], DOI:10.3220/DATA20240111153336-0
- Langner N, Puhm M, Deutscher J, Wimmer A, Adler P, Backa J, Eisenecker P, Reinosch E, Wieseahn J, Hoffmann K, Oehmichen K (2023) FNEWS-Jahresprodukte 2018 bis 2022 [Datenpublikation] [online]. Braunschweig: Thünen-Atlas, zu finden in <https://atlas.thuenen.de/layers/geonode_data:geonode:fnews_jp_18_22> [zitiert am 19.12.2023], DOI:10.3220/DATA20230907171359-0
- Langner N, Oehmichen K, Henning L, Blickensdörfer L, Riedel T (2022) Bestockte Holzbodenkarte 2018 [Datenpublikation] [online]. Braunschweig: Thünen-Atlas, zu finden in <https://atlas.thuenen.de/layers/geonode:fnews_holzbodenmaske_2018_32632> [zitiert am 19.12.2023], DOI:10.3220/DATA20221205151218

11.2.5 Projektwebpage

Mit Beginn des Projektes wurde vom Thünen-Institut für Waldökosysteme eine Webpage zum Projekt erstellt. Diese ist unter dem nachfolgend aufgeführten link verfügbar und frei zugänglich:

www.fnews-wald.de

11.3 Erkenntnisse von Dritten

Während der Durchführung des Projektes waren auch andere Forschungsgruppen, Wissenschaftler und Unternehmen im Bereich der Waldschadenserkenkung und -erfassung aktiv. Im Anhang ist eine Übersicht zu laufenden und abgeschlossenen Projekten zum Themenbereich Waldschadenserfassung mit Fernerkundung zu finden (Tabelle 11).

Literatur

- Abbott B, Stennes B, van Cornelis Kooten G (2009) Mountain pine beetle, global markets, and the British Columbia forest economy. *Can. J. For. Res.* 39(7):1313-1321. doi: 10.1139/X09-049
- Abt RC, Abt KL, Cabbage FW, Henderson JD (2010) Effect of policy-based bioenergy demand on southern timber markets: A case study of North Carolina. *Biomass and Bioenergy* 34(12):1679-1686. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.05.007
- Alig RJ (2010) Chapter 3: Modeling Land-Use Changes as Mitigation Options Involving the Forestry and Agricultural Sectors. In: Alig RJ (ed) *Economic Modeling of Effects of Climate Change on the Forest Sector and Mitigation Options: A Compendium of Briefing Papers*. Pacific Northwest Research Station: pp 67-85
- Alig RJ, Adams DM, McCarl BA (2002) Projecting impacts of global climate change on the US forest and agriculture sectors and carbon budgets. *Forest Ecology and Management* 169(1-2):3-14. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00290-6
- Álvarez-Díaz M, González-Gómez M, Otero Giráldez M (2015) Analyzing the effects of salvage on timber price in a reforested region with plantations in the Iberian Peninsula: Auswirkungen von Schadholzanfall auf den Holzpreis in wiederbewaldeten Plantagen auf der iberischen Halbinsel. *Austrian Journal of Forest Science* 132(1):47-60
- Baek J (2011) Dynamics of the U.S.-Canada Softwood Lumber Trade: Market and Welfare Effects of the 2006 Softwood Lumber Agreement. *The Estey Centre Journal of International Law and Trade Policy* 12(2):69-81
- Baek J (2012) The long-run determinants of U.S. lumber imported from Canada revisited. *Forest Policy and Economics* 14(1):69-73. doi: 10.1016/j.forpol.2011.07.007
- Barkaoui A, Dragicevic AZ (2016) Nash bargaining and renegotiation with social preferences: case of the roundwood log supply contracts in the French timber market. *Forest Policy and Economics* 69:90-100. doi: 10.1016/j.forpol.2016.04.007
- Bernetti I, Ciampi C, Fagarazzi C, Sacchelli S (2011) The evaluation of forest crop damages due to climate change. An application of Dempster–Shafer method *Journal of Forest Economics* 17 (2011): 285– 297
- Blickensdörfer, L., Oehmichen, K., Pflugmacher, D., Kleinschmit, B., Hostert, P. (2024) National tree species mapping using Sentinel-1/2 time series and German National Forest Inventory data. *Remote Sensing of Environment*. 304, 114069. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114069.
- Blickensdörfer, L., Oehmichen, K., Pflugmacher, D., Kleinschmit, B., Hostert, P., 2022. Dominant Tree Species for Germany (2017/2018). <https://doi.org/10.3220/DATA20221214084846>
- Bogdanski BEC (2011) Markets for forest products following a large disturbance: Opportunities and challenges from the mountain pine beetle outbreak in western Canada. Victoria B.C.: Pacific Forestry Centre, vi, 68. Information report BC-X-429
- Bogle T, van Kooten GC (2015) Protecting Timber Supply on Public Land in Response to Catastrophic Natural Disturbance: A Principal-Agent Problem. *Forest Science* 61(1):83-92. doi: 10.5849/forsci.13-058

- Bogle TN (2012) Timber supply on public land in response to catastrophic natural disturbance: a principal-agent problem, University of Victoria, zu finden in <<http://dspace.library.uvic.ca/handle/1828/4333>>
- Bolkesjø TF, Solberg B, Wangen KR (2007) Heterogeneity in nonindustrial private roundwood supply: Lessons from a large panel of forest owners. *JFE* 13(1):7-28. doi: 10.1016/j.jfe.2006.08.003
- Brecka AF, Shahi C, Chen HY (2018) Climate change impacts on boreal forest timber supply. *Forest Policy and Economics* 92:11-21. doi: 10.1016/j.forpol.2018.03.010
- Brodrechtova Y (2015) Economic valuation of long-term timber contracts: Empirical evidence from Germany. *Forest Policy and Economics* 55:1-9. doi: 10.1016/j.forpol.2015.03.003
- Brooks, E.B.; Wynne, R.H.; Thomas, V.A.; Blinn, C.E.; Coulston, J.W. On-the-fly massively multitemporal change detection using statistical quality control charts and Landsat data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2014, 52, 3316–3332
- Brown RN, Kilgore MA, Blinn CR, Coggins J, Pfender C (2010) Assessing State Timber Sale Policies, Programs and Stumpage Price Drivers, University of Minnesota, zu finden in <<https://conservancy.umn.edu/handle/11299/107777>>
- Brown RN, Kilgore MA, Coggins JS, Blinn CR (2012) The impact of timber-sale tract, policy, and administrative characteristics on state stumpage prices: An econometric analysis. *Forest Policy and Economics* 21:71-80. doi: 10.1016/j.forpol.2011.10.001
- Buongiorno J, Raunihar R, Zhu S (2011) Consequences of increasing bioenergy demand on wood and forests: An application of the Global Forest Products Model. *JFE* 17(2):214-229. doi: 10.1016/j.jfe.2011.02.008
- Caurla S, Garcia S, Niedzwiedz A (2015) Store or export? An economic evaluation of financial compensation to forest sector after windstorm. The case of Hurricane Klaus. *For Pol Econ* 61 (2015): 30–38
- Chang W-Y, Gaston C (2016) A trade flow analysis of the global softwood log market: implications of Russian log export tax reduction and New Zealand log production restriction. *Forestry* 89(1):20-35. doi: 10.1093/forestry/cpv038
- Corbett LJ, Withey P, Lantz VA, Ochuodho TO (2016) The economic impact of the mountain pine beetle infestation in British Columbia: provincial estimates from a CGE analysis. *Forestry* 89(1):100-105. doi: 10.1093/forestry/cpv042
- Crist, Eric P. A TM Tasseled Cap Equivalent Transformation for Reflectance Factor Data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, no. 3, June 1985, pp. 301–06, doi:10.1016/0034-4257(85)90102-6
- Da Kanieski Silva B, Schons SZ, Cubbage FW, Parajuli R (2020) Spatial and cross-product price linkages in the Brazilian pine timber markets. *Forest Policy and Economics* 117:102186. doi: 10.1016/j.forpol.2020.102186
- Daigneault AJ, Sohngen B, Kim SJ (2016) Estimating welfare effects from supply shocks with dynamic factor demand models. *Forest Policy and Economics* 73:41-51. doi: 10.1016/j.forpol.2016.08.003
- destatis (2023) Konjunkturindikatoren Preise: Erzeugerpreisindex der Produkte des Holzeinschlags, zu finden in <<https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Landwirtschaftspreisindex-Forstwirtschaftspreisindex/Tabellen/Erzeugerpreise-Holzeinschlag.html#241826>>

- Dieter M, Englert H (2007) Competitiveness in the global forest industry sector: an empirical study with special emphasis on Germany. *Eur J Forest Res* 126(3):401-412. doi: 10.1007/s10342-006-0159-x
- Dieter M, Englert H (2009) Zur Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Holzwirtschaft – eine Constant-Market-Share-Analyse | Competitiveness in the European forest industry sector – a constant market share analysis. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 160(12):375-383. doi: 10.3188/szf.2009.0375
- Ebner G (2021a) Warum steigen Preise derart stark?: Versuch einer Erklärung. *Holzkurier* 2021, zu finden in <<https://www.holzkurier.com/schnittholz/2021/03/warum-steigen-preise-derart-stark-.html>>
- Ebner G (2021b) Zuerst zu viel, jetzt zu wenig Nachfrage?: DeSH-Holzkongress 2021: „Nachhaltiges Wachstum vs. volatile Märkte“. *Holzkurier* 2021, zu finden in <https://www.holzkurier.com/schnittholz/2021/09/zuerst_zu_viel_jetztzuwenignachfrage.html>
- Elm E von, Schreiber G, Haupt CC (2019) Methodische Anleitung für Scoping Reviews (JBI-Methodologie) (Not Available). *Z Evid Fortbild Qual Gesundhwes* 143:1-7. doi: 10.1016/j.zefq.2019.05.004
- Eriksson LEB, Fransson JES, Soja MJ, Santoro M (2012) Backscatter signatures of wind-thrown forest in satellite SAR images. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012*, pp. 6435-6438, doi: 10.1109/IGARSS.2012.6352732
- Eriksson LO, Gustavsson L, Hänninen R, Kallio M, Lyhykäinen H, Pingoud K, Pohjola J, Sathre R, Solberg B, Svanaes J, Valsta L (2012) Climate change mitigation through increased wood use in the European construction sector—towards an integrated modelling framework. *Eur J Forest Res* 131(1):131-144. doi: 10.1007/s10342-010-0463-3
- Eriksson V, Lundmark R (2020) A Cointegration Analysis of the Nordic Roundwood Markets. *Forests* 11(9):1007. doi: 10.3390/f11091007
- Essmann HF, Andrian G, Pattenella D, Vantomme P (2007) Influence of globalization on forests and forestry. *Allg. Forst- u. J.-Ztg* 178(4):59-67, zu finden in <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=75a756f50c6757fe980b37eb169dac4634ea94ff#page=5>>
- Favero A, Mendelsohn R (2017) The Land-Use Consequences of Woody Biomass with More Stringent Climate Mitigation Scenarios. *JEP* 08(01):61-73. doi: 10.4236/jep.2017.81006
- Favero A, Mendelsohn R, Sohngen B, Stocker B (2021) Assessing the long-term interactions of climate change and timber markets on forest land and carbon storage. *Environ. Res. Lett.* 16(1):14051. doi: 10.1088/1748-9326/abd589
- Favero A, Sohngen B, Hamilton WP (2022) Climate change and timber in Latin America: Will the forestry sector flourish under climate change? *Forest Policy and Economics* 135:102657. doi: 10.1016/j.forpol.2021.102657
- Fleckenstein S, Franz K, Seintsch B, Dieter M., Möhring B. (2023) Economic damage assessment of forest disturbances on forestry: State of knowledge and challenges for a continuous economic loss monitoring in Germany. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*. 193. 41-64. 10.23765/afjz00092.

- Fleischman F, Schmitz M, Poljacik K (2022) Laws, Markets, and Local Politics Drive Outcomes of Minnesota's County Managed Forests. *Journal of Forestry* 120(1):51-63. doi: 10.1093/jofore/fvab040
- Fuchs JM, Bodelschwingh H von, Lange A, Paul C, Husmann K (2022) Quantifying the Consequences of Disturbances on Wood Revenues with Time Series Analyses. *SSRN Journal*. doi: 10.2139/ssrn.4011837
- Frantz, D., Haß, E., Uhl, A., Stoffels, J., & Hill, J. (2018). Improvement of the Fmask algorithm for Sentinel-2 images: Separating clouds from bright surfaces based on parallax effects. *Remote Sensing of Environment*, 215, 471-481
- Galik CS, Abt RC (2016) Sustainability guidelines and forest market response: an assessment of European Union pellet demand in the southeastern United States. *GCB Bioenergy* 8(3):658-669. doi: 10.1111/gcbb.12273
- Gallaun, Heinz, Mathias Schardt, and Stefanie Linser. "Remote sensing based forest map of Austria and derived environmental indicators." *Proceedings of the ForestSat Conference, Montpellier, France*. 2007
- Gejdos M, Potkány M (2017) Prediction and analysis of Slovakian timber trade on global market conditions. *Serb J Management* 12(2):281-289. doi: 10.5937/sjm12-11228
- Gejdoš M, Danihelová Z (2015) Valuation and Timber Market in the Slovak Republic. *Procedia Economics and Finance* 34:697-703. doi: 10.1016/S2212-5671(15)01688-3
- Gejdoš M, Lieskovský M, Giertliová B, Němec M, Danihelová Z (2019) Prices of Raw-wood Assortments in Selected Markets of Central Europe and their Development in the Future. *BioResources* 14(2):2995-3011, zu finden in <https://jstatm.textiles.ncsu.edu/index.php/biores/article/view/biores_14_2_2995_gejdos_raw_wood_selected_markets>
- Gejdoš M, Trenčiansky M, Giertliová B, Lieskovský M, Danihelová Z (2020) An Empirical Model for the Raw Wood Assortment Price Predicting – Case Study in Slovakia. *BioResources* 15(3):5913-5925, zu finden in https://jstatm.textiles.ncsu.edu/index.php/biores/article/view/biores_15_3_5913_gejdos_empirical_model_raw_wood_assortment
- Gibbs, B.P. *Advanced Kalman Filtering, Least-Squares and Modeling*; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2011; ISBN 9780470890042.
- Gong P, Boman M, Mattsson L (2005) Non-timber benefits, price uncertainty and optimal harvest of an even-aged stand. *Forest Policy and Economics* 7(3):283-295. doi: 10.1016/S1389-9341(03)00073-X
- Gong P, Löfgren KG (2007) Market and welfare implications of the reservation price strategy for forest harvest decisions. *JFE* 13(4):217-243. doi: 10.1016/j.jfe.2007.06.001
- Gonzalez-Gomez M, Bergen V (2014) Berücksichtigung der Nichtstationarität von Zeitreihen bei empirischen Untersuchungen des deutschen Rohholzmarktes. *Allg. Forst- u. J.-Ztg* 186(3/4):53-62
- Gömann H, Bender A, Bolte A, Dirksmeyer W, Englert H, Feil J-H, Frühauf C, Hauschild M, Kregel S, Lilienthal H, Löpmeier F-J, Müller J, Mußhoff O, Natkhin M, Offermann F, Seidel P, Schmidt M, Seintsch B, Steidl J, Strohm K, Zimmer Y (2015) *Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)*. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 312 p, Thünen Rep 30, DOI:10.3220/REP1434012425000

- Grushecky ST, Buehlmann U, Schuler A, Luppold W, Cesa E (2006) Decline in the U.S. furniture industry: A Case study of the impacts to the hardwood lumber supply chain. *Wood and Fiber Science* 32(2):365-376
- Guo J, Gong P (2019) Assessing the impacts of rising fuelwood demand on Swedish forest sector: An intertemporal optimization approach. *Forest Policy and Economics* 105:91-98. doi: 10.1016/j.forpol.2019.05.020
- Harvey, A.C. *Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalman Filter*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1989; ISBN 0-521-40573-4.
- Hänninen R (1998) Exchange rate changes and the Finnish sawnwood demand and price in the UK market. *Silva Fenn.* 32(1):61-73. doi: 10.14214/sf.700
- Hänninen R, Kallio AM (2007) Economic Impacts on the Forest Sector of Increasing Forest Biodiversity Conservation in Finland. *Silva Fennica* 41(3):507-523
- Hänninen R, Toppinen A, Toivonen R (2006) Transmission of price changes in sawnwood and sawlog markets of the new and old EU member countries. *Eur J Forest Res* 126(1):111-120. doi: 10.1007/s10342-006-0135-5
- Hartebrodt C (2004). The impact of storm damage on small-scale forest enterprises in the south-west of Germany. *Small-scale Forest Economics, Management and Policy*, 3, 203-222.
- Hartebrodt C, Stenzel F (2013) Alternative Preisbildungsmodelle – eine realitätsnahe Option? *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 164(7):181-189. doi: 10.3188/szf.2013.0181
- Härtl F, Knoke T (2014) The influence of the oil price on timber supply. *Forest Policy and Economics* 39:32-42. doi: 10.1016/j.forpol.2013.11.001
- Hautamäki S, Mutanen A, Viitanen J (2012) Substitution in the Finnish forest industry's roundwood procurement. *Silva Fennica* 46(3):425-440, zu finden in <<https://jukuri.luke.fi/handle/10024/532740>>
- He H, Xu J (2011) Projection of Timber Supply and Demand Trends in China Based on an Econometric Model. *Forest Products Journal* 61(7):543-551. doi: 10.13073/0015-7473-61.7.543
- Henderson JD, Parajuli R, Abt RC (2020) Biological and market responses of pine forests in the US Southeast to carbon fertilization. *Ecological Economics* 169:106491. doi: 10.1016/j.ecolecon.2019.106491
- Hirschmugl, M., Gallaun, H., Dees, M., Datta, P., Deutscher, J., Koutsias, N., & Schardt, M. (2017). Methods for mapping forest disturbance and degradation from optical earth observation data: A review. *Current Forestry Reports*, 3, 32-45
- Hlásny T, König L, Krokene P, Lindner M, Montagné-Huck C, Müller J, Qin H, Raffa KF, Schelhaas M-J, Svoboda M, Viiri H, Seidl R (2021a) Bark Beetle Outbreaks in Europe: State of Knowledge and Ways Forward for Management. *Curr Forestry Rep* 7(3):138-165. doi: 10.1007/s40725-021-00142-x
- Hlásny T, Zimová S, Merganičová K, Štěpánek P, Modlinger R, Turčáni M (2021b) Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: Drivers, impacts, and management implications. *Forest Ecology and Management* 490:119075. doi: 10.1016/j.foreco.2021.119075
- Hodges DG, Hartsell AJ, Brandeis C, Brandeis TJ, Bentley JW (2011) Recession Effects on the Forests and Forest Products Industries of the South. *Forest Products Journal* 61(8):614-624. doi: 10.13073/0015-7473-61.8.614

- Houghton K, Naughton H (2017) Trade and sustainability: the impact of the International Tropical Timber Agreements on exports. *Int Environ Agreements* 17(6):755-778. doi: 10.1007/s10784-017-9373-x
- Hu Y, Perez-Garcia J, Robbins A, Liu Y, Liu F (2015) China's role in the global forest sector: how will the US recovery and a diminished Chinese demand influence global wood markets? *Scandinavian Journal of Forest Research* 30(1):13-29. doi: 10.1080/02827581.2014.967288
- Huang, C.; Goward, S.N.; Masek, J.G.; Thomas, N.; Zhu, Z.; Vogelmann, J.E. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 183–198
- J. Riis (1998) Forecasting Danish Timber Prices with an Error Correction Model. *J For Econ* 2(3):257-271
- Johnston CM, Parajuli R (2017) What's next in the U.S.-Canada softwood lumber dispute? An economic analysis of restrictive trade policy measures. *Forest Policy and Economics* 85:135-146. doi: 10.1016/j.forpol.2017.09.011
- Johnston CM, van Kooten GC (2015) Global trade impacts of increasing Europe's bioenergy demand. *JFE* 23:27-44. doi: 10.1016/j.jfe.2015.11.001
- Jonsson R (2013) How to cope with changing demand conditions - The Swedish forest sector as a case study: an analysis of major drivers of change in the use of wood resources. *Can. J. For. Res.* 43(4):405-418. doi: 10.1139/cjfr-2012-0139
- Juutinen A, Kurttila M, Pohjanmies T, Tolvanen A, Kuhlmeij K, Skudnik M, Triplat M, Westin K, Mäkipää R (2021) Forest owners' preferences for contract-based management to enhance environmental values versus timber production. *Forest Policy and Economics* 132:102587. doi: 10.1016/j.forpol.2021.102587
- Kalman, R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *J. Basic Eng.* 1960, 82, 35–45.
- Karali B (2011) What Drives Daily Volatility in Lumber Futures Markets? *for sci* 57(5):379-392. doi: 10.1093/forestscience/57.5.379
- Karvinen S, Mutanen A, Petrov V (2019) Effects of the export restrictions on birch log market in Northwest Russia. *Balt For* 25(1). doi: 10.46490/vol25iss1pp105
- Kennedy, R.E.; Yang, Z.; Cohen, W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr—Temporal segmentation algorithms. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 2897–2910
- Kim H, Cieszewski C (2015) The Analysis of Pine Stumpage Prices Based on Timber Sale Characteristics of the Southern United States. *Journal of Forest and Environmental Science* 31(1):38-46. doi: 10.7747/JFES.2015.31.1.38
- Kinnucan HW (2016) Timber price dynamics after a natural disaster: Hurricane Hugo revisited. *JFE* 25:115-129. doi: 10.1016/j.jfe.2016.09.002
- Klepacka AM, Siry JP, Bettinger P (2017) Stumpage prices: a review of influential factors Prix du bois sur pied coupés: examen des facteurs influents Precios de la madera en pie: Una revisión de factores influyentes. *Commonwealth Forestry Association* 19, zu finden in <<https://www.ingentaconnect.com/content/cfa/ifr/2017/00000019/00000002/art00003>>
- Kolis K, Hiironen J, Ärölä E, Vitikainen A (2014) Effects of sale-specific factors on stumpage prices in Finland. *Silva Fenn.* 48(3). doi: 10.14214/sf.1054

- Konkin D, Hopkins K (2009) Learning to deal with climate change and catastrophic forest disturbances. *Unasylva* 60(231/232):17-23
- Köthke M, Dieter M (2010) Effects of carbon sequestration rewards on forest management—An empirical application of adjusted Faustmann Formulae. *Forest Policy and Economics* 12(8):589-597. doi: 10.1016/j.forpol.2010.08.001
- Kožuch A, Banaś J (2020) The Dynamics of Beech Roundwood Prices in Selected Central European Markets. *Forests* 11(9):902. doi: 10.3390/f11090902
- Kuckartz U, Rädiker S (2022) *Qualitative Inhaltsanalyse Methoden, Praxis, Computerunterstützung*, 5. [überarbeitete] Auflage. Weinheim: Beltz Juventa. Grundlagentexte Methoden
- Kuusela O-P, Lintunen J (2020) Modeling market-level effects of disturbance risks in age structured forests. *Forest Policy and Economics* 118:102254. doi: 10.1016/j.forpol.2020.102254
- Langner, N., Oehmichen, K., Henning, L., Blickensdörfer, L., Riedel, T., 2022. Bestockte Holzbodenkarte 2018. <https://doi.org/10.3220/DATA20221205151218>
- Langner, N., Oehmichen, K., Backa, J., Eisenecker, P., Reinosch, E., Wieseahn, J., Hoffmann, K., Adler, P., Beckschäfer, P., 2023. Referenzdaten aus dem Projekt FNEWS. <https://doi.org/10.3220/DATA20231025183526-0>
- Langner, N., Puhm, M., Deutscher, J., Wimmer, A., Adler, P., Backa, J., Eisenecker, P., Reinosch, E., Wieseahn, J., Hoffmann, K., Oehmichen, K., 2024. FNEWS-Jahresprodukte 2018 bis 2022. <https://doi.org/10.3220/DATA20240307175924-0>
- Latta GS, Adams DM (2000) An econometric analysis of output supply and input demand in the Canadian softwood lumber industry. *Can. J. For. Res.* 30(9):1419-1428. doi: 10.1139/x00-069
- Lauri P, Kallio M, Schneider UA (2013) The future development of the use of wood in Russia and its potential impacts on the EU forest sector. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28(3):291-302. doi: 10.1080/02827581.2012.735695
- Lee DM, Lyon KS (2004) A Dynamic Analysis of the Global Timber Market under Global Warming: An Integrated Modeling Approach. *Southern Economic Journal* 70(3):467-489. doi: 10.1002/j.2325-8012.2004.tb00584.x
- Leppänen J, Linden M, Uusivuori J, Pajujoja H (2005) The private cost and timber market implications of increasing strict forest conservation in Finland. *Forest Policy and Economics* 7(1):71-83. doi: 10.1016/S1389-9341(03)00012-1
- Louis, Jérôme, et al. Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users. *Proceedings Living Planet Symposium 2016*. Spacebooks Online, 2016
- Luppold WG (2019) *The oak timber base and market: Past, present and future*. Asheville, NC, USA: US Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station, zu finden in <<https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/download/61099.pdf>>
- Luppold WG, Sendak PE (2004) Analysis of the interaction between timber markets and the forest resources of Maine. *Northern Journal of Applied Forestry* 21(3):135-143, zu finden in <<https://academic.oup.com/njaf/article/21/3/135/4779944>>
- Mutanen A, Toppinen A (2005) Finnish sawlog market under forest taxation reform. *Silva Fennica* 39(1)

Möhring B, Bitter A, Bub G, Dieter M, Dög M, Hanewinkel M, Hatzfeldt NGraf 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 [https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn063403.pdf]

MUNLV [Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW] (2010) Abschlussbericht der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen zu den Folgen des Sturmereignisses "Kyrill" vom 18./19.Januar 2007

Negro F, Espinoza O, Brunori A, Cremonini C, Zanuttini R (2021) Professionals' Feedback on the PEFC Fair Supply Chain Project Activated in Italy after the "Vaia" Windstorm. *Forests* 12(7):946. doi: 10.3390/f12070946

Nepal P, Abt KL, Skog KE, Prestemon JP, Abt RC (2019) Projected Market Competition for Wood Biomass between Traditional Products and Energy: A Simulated Interaction of US Regional, National, and Global Forest Product Markets. *for sci* 65(1):14-26. doi: 10.1093/forsci/fxy031

Nepal P, Ince PJ, Skog KE, Chang SJ (2013) Projected US timber and primary forest product market impacts of climate change mitigation through timber set-asides. *Can. J. For. Res.* 43(3):245-255. doi: 10.1139/cjfr-2012-0331

Nepal P, Johnston CMT, Ganguly I (2021) Effects on Global Forests and Wood Product Markets of Increased Demand for Mass Timber. *Sustainability* 13(24):13943. doi: 10.3390/su132413943

Niskanen A, Lunnan A, Ota I, Blatner K, Herbohn J, Bull L, Ferguson I, Hickey GM (2007) Policies Affecting Forestry Entrepreneurship. *Small-scale Forestry* 6(3):233-255. doi: 10.1007/s11842-007-9025-z

Nordström E-M, Forsell N, Lundström A, Korosuo A, Bergh J, Havlík P, Kraxner F, Frank S, Fricko O, Lundmark T, Nordin A (2016) Impacts of global climate change mitigation scenarios on forests and harvesting in Sweden. *Can. J. For. Res.* 46(12):1427-1438. doi: 10.1139/cjfr-2016-0122

O'Brien M, Bringezu S (2017) Assessing the Sustainability of EU Timber Consumption Trends: Comparing Consumption Scenarios with a Safe Operating Space Scenario for Global and EU Timber Supply. *Land* 6(4):84. doi: 10.3390/land6040084

Olofsson, P., Foody, G.M., Herold, M., Stehman, S.V., Woodcock, C.E. and Wulder, M.A. 2014 Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sens. Environ.* 148, 42–57

Parhizkar O, Miller CR, Smith RL (2010) Private sector development implications of the export performance determinants of U.S. small–medium forest enterprises to Mexico, Europe, and Asia. *Forest Policy and Economics* 12(5):387-396. doi: 10.1016/j.forpol.2010.02.010

Pelkki MH (2012) The Financial Health and Response of Arkansas's Loggers to Depressed Timber Markets and Severe Operating Conditions of 2009. *Southern Journal of Applied Forestry* 36(2):92-97. doi: 10.5849/sjaf.10-033

Peters MD, Godfrey C, McInerney P, Munn Z, Tricco A, Khalil H (2020) Chapter 11: Scoping reviews. In: Aromataris E, Munn Z (eds) *JBIManual for Evidence Synthesis*. JBI

Prestemon JP (2009) Statistical Power of Intervention Analyses: Simulation and Empirical Application to Treated Lumber Prices. *for sci* 55(1):48-63. doi: 10.1093/forestscience/55.1.48

Prestemon JP, Abt KL, Potter KM, Koch FH (2013) An Economic Assessment of Mountain Pine Beetle Timber Salvage in the West. *Western Journal of Applied Forestry* 28(4):143-153. doi: 10.5849/wjaf.12-032

- Prestemon JP, Holmes TP (2000) Timber Price Dynamics Following a Natural Catastrophe. *American Journal of Agricultural Economics* 82(1):145-160. doi: 10.1111/0002-9092.00012
- Prestemon JP, Holmes TP (2004) Market Dynamics and Optimal Timber Salvage After a Natural Catastrophe. *for sci* 50(4):495-511. doi: 10.1093/forestscience/50.4.495
- Prestemon JP, Holmes TP (2010) Economic Impacts of Hurricanes on Forest Owners, hg. v. John M Pye, H. Michael Rauscher, Yasmeen Sands, Danny C. Lee, United States Department of Agriculture, 15 p
- Puhm, M. Analysis of Landsat time series using state space models and Kalman filtering. Master's Thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria, 2018. Available online: <https://permalink.obvsg.at/tug/AC15229314>
- Puhm, M.; Deutscher, J.; Hirschmugl, M.; Wimmer, A.; Schmitt, U.; Schardt, M. A Near Real- Time Method for Forest Change Detection Based on a Structural Time Series Model and the Kalman Filter. *Remote Sens.* 2020, 12, 3135.
- Pye JM, Holmes TP, Prestemon JP, Wear DN (2011) Economic Impacts of the Southern Pine Beetle. *Southern pine beetle II*:213-222
- Qin H, Dong L, Huang Y (2017) Evaluating the Effects of Carbon Prices on Trade-Offs between Carbon and Timber Management Objectives in Forest Spatial Harvest Scheduling Problems: A Case Study from Northeast China. *Forests* 8(2):43. doi: 10.3390/f8020043
- Rahman MM, Munn IA, Changyou S (2016) Welfare implications of timberland ownership changes in th U.S. timber. *International Journal of Food and Agricultural Economics* 4(3):33-48
- Reinosch E, Backa J, Adler P, Deutscher J, Eisnecker P, Hoffmann K, Langner N, Puhm M, Rüetschi M, Straub C, Waser LT, Wieseahn J, Oehmichen K (2024), Detailed validation of large-scale Sentinel-2-based forest disturbance maps across Germany, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2024;, cpae038, <https://doi.org/10.1093/forestry/cpae038>
- Rong Z, Ma K, Gang D, Chen S (2019) Study on the short-term and long-term Granger causality relationship between China's domestic and imported timber prices. *Journal of Forest Research* 24(3):131-136. doi: 10.1080/13416979.2019.1609743
- Rørstad P, Solberg B, Trømborg E (2022) Can we detect regional differences in econometric analyses of the Norwegian timber supply? *Silva Fenn.* 56(1). doi: 10.14214/sf.10326
- Russell MB, Kilgore MA, Blinn CR (2017) Characterizing timber salvage operations on public forests in Minnesota and Wisconsin, USA. *International Journal of Forest Engineering* 28(1):66-72. doi: 10.1080/14942119.2017.1291064
- Rüetschi M, Small D, Waser LT, Ginzler C (2019) Lokalisierung von Windwürfen mit Sentinel-1A/B-Daten: ein Versuch nach «Burglind», *Schweiz Z Forstwes* 170 (2019) 2: 106–109. doi: 10.3188/szf.2019.0094
- Rousseeuw, P. J. Least median of squares regression. *J. Am Stat Ass*, 79:871, 1984
- Rousseeuw, P. J. A Fast Algorithm for the Minimum Covariance Determinant Estimator, 1999, American Statistical Association and the American Society for Quality, TECHNOMETRICS
- Roy, D.P, Zhang, H.K., Gomez-Dans, J.L., Lewis, P.E., Schaaf, C.B., Sun, Q., Li, J., Huang, H., Kovalsky, V. (2016). A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 176, 255-271.

- Roy, D.P, Li, J., Zhang, H.K., Yan, L., Huang, H., Li, Z. (2017). Examination of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) reflectance anisotropy and the suitability of a general method to normalize MSI reflectance to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sensing of Environment* 199, 25-38.
- Roy, D.P. Li, Z., Zhang, H.K. (2017b). Adjustment of Sentinel-2 Multi-Spectral Instrument (MSI) Red-Edge Band Reflectance to Nadir BRDF Adjusted Reflectance (NBAR) and Quantification of Red-Edge Band BRDF Effects. *Remote Sensing* 9 (12), 1325.
- Schier F, Morland C, Janzen N, Weimar H (2018) Impacts of changing coniferous and non-coniferous wood supply on forest product markets: a German scenario case study. *Eur J Forest Res* 137(3):279-300. doi: 10.1007/s10342-018-1111-6
- Schlosser WE (2020) Real price appreciation forecast tool: Two delivered log market price cycles in the Puget Sound markets of western Washington, USA, from 1992 through 2019. *Forest Policy and Economics* 113:102114. doi: 10.1016/j.forpol.2020.102114
- Schwab O, Maness T, Bull G, Roberts D (2009) Modeling the effect of changing market conditions on mountain pine beetle salvage harvesting and structural changes in the British Columbia forest products industry. *Can. J. For. Res.* 39(10):1806-1820. doi: 10.1139/X09-099
- Schwarzbauer P (2006) Einflüsse von Schadh Holz mengen auf Rohholzpreise. Eine quantitativ-statistische Analyse am Beispiel Österreichs. *Allg. Forst- u. J.-Ztg* 178.
- Shahi CK, Kant S (2009) Cointegrating relationship and the degree of market integration among the North American softwood lumber product markets. *Can. J. For. Res.* 39(11):2129-2137. doi: 10.1139/X09-110
- Sikora A T, Ukalska J (2014) Timber prices after natural disasters in the Forest District of Węgierska Górka. *Forest Research Papers* 75 (2): 201–212, DOI: 10.2478/frp-2014-0019
- Sikora A T (2017) The effect of natural disasters on the timber market. *Forest Research Papers* 78 (4): 277–284, DOI: 10.1515/frp-2017-0031
- Small, D., Rohner, C., Miranda, N., Rüetschi, M., Schaepman, M.E., 2022. Wide-Area Analysis-Ready Radar Backscatter Composites. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 0, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3055562>
- Song N, Chang SJ, Aguilar FX (2011) U.S. softwood lumber demand and supply estimation using cointegration in dynamic equations. *JFE* 17(1):19-33. doi: 10.1016/j.jfe.2010.07.002
- Stehman, S.V. 2014 Estimating area and map accuracy for stratified random sampling when the strata are different from the map classes. *Int. J. Remote Sens.* 35(13), 4923–4939
- Stone M (2009) The importance of markets in the allocation of differentiated timber. *The Forestry Chronicle* 85(3):355-360, zu finden in <pubs.cif-ifc.org> [zitiert am 3.3.2022]
- Suchomel J, Gejdoš M, Ambrušová L, Šulek R (2012) Analysis of price changes of selected roundwood assortments in some Central Europe countries. *J. For. Sci.* 58(No. 11):483-491. doi: 10.17221/98/2011-JFS
- Sun C (2016) Timber Market Recovery after a Hurricane. *Forest Science* 62(6):600-612. doi: 10.5849/forsci.15-123
- Sun C, Daniels JM, Marcille KC (2020) Common integrating factor in softwood log exports from the United States. *Can. J. For. Res.* 50(5):447-456. doi: 10.1139/cjfr-2019-0321
- Tanase MA, Aponte C, Mermoz S, Bouvet A, Toan TL, Heurich M (2018) Detection of windthrows and insect outbreaks by L-band SAR: A case study in the Bavarian Forest National Park, *Remote*

Sensing of Environment, Volume 209, 2018, Pages 700-711, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.009>.

Tao C, Diao G, Cheng B (2021) The Dynamic Impacts of the COVID-19 Pandemic on Log Prices in China: An Analysis Based on the TVP-VAR Model. *Forests* 12(4):449. doi: 10.3390/f12040449

Thiele A, Boldt M, Hinz S (2012) Automated detection of storm damage in forest areas by analyzing TerraSAR-X data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012*, pp. 1672-1675, doi: 10.1109/IGARSS.2012.6351205

Thompson JR, Canham CD, Morreale L, Kittredge DB, Butler B (2017) Social and biophysical variation in regional timber harvest regimes. *Ecological applications: a publication of the Ecological Society of America* 27(3):942-955. doi: 10.1002/eap.1497/

Tian N, Poudyal NC, Augé RM, Hodges DG, Young TM (2017) Meta-Analysis of Price Responsiveness of Timber Supply. *Forest Products Journal* 67(3-4):152-163. doi: 10.13073/FPJ-D-16-00017

Tomppo E, Antropov O, Praks J. (2019) Boreal Forest Snow Damage Mapping Using Multi-Temporal Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*. 2019; 11(4):384. <https://doi.org/10.3390/rs11040384>

Toth D, Maitah M, Maitah K, Jarolínová V (2020) The Impacts of Calamity Logging on the Development of Spruce Wood Prices in Czech Forestry. *Forests* 11(3):283. doi: 10.3390/f11030283

Turner JA, Buongiorno J, Zhu S, Prestemon JP (2005) The U.S. forest sector in 2030: Markets and competitors. *Forest Products Journal* 55(5):27-36

Udali A, Andrighetto N, Grigolato S, Gatto P (2021) Economic Impacts of Forest Storms—Taking Stock of After-Vaia Situation of Local Roundwood Markets in Northeastern Italy. *Forests* 12(4):414. doi: 10.3390/f12040414

Ulander LMH et al. (2005) Mapping of wind-thrown forests in Southern Sweden using space- and airborne SAR," *Proceedings. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005.Seoul, Korea (South), 2005*, pp. 3619-3622, doi: 10.1109/IGARSS.2005.1526631

van Kooten GC, Johnston C (2014) Global impacts of Russian log export restrictions and the Canada–U.S. lumber dispute: Modeling trade in logs and lumber. *Forest Policy and Economics* 39:54-66. doi: 10.1016/j.forpol.2013.11.003

Verbesselt, J.; Hyndman, R.; Zeileis, A.; Culvenor, D. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 2970–2980.

Verbesselt, J.; Herold, M.; Zeileis, A. Near real-time disturbance detection using satellite image time series. *Remote Sens. Environ.* 2012, 123, 98–108

Vu TTH, Tian G, Zhang B, van Nguyen T (2020) Determinants of Vietnam's wood products trade: application of the gravity model. *Journal of Sustainable Forestry* 39(5):445-460. doi: 10.1080/10549811.2019.1682011

Wang F, Yin Z, Gan J (2017) Exchange-rate fluctuation and pricing behavior in China's wood-based panel exporters: evidence from panel data. *Can. J. For. Res.* 47(10):1392-1404. doi: 10.1139/cjfr-2017-0085

Wear DN, Carter DR, Prestemon J (2007) The U.S. South's Timber Sector in 2005: A Prospective Analysis of Recent Change, *Southern Research Station*, 44 p

- Wear DN, Murray BC (2004) Federal timber restrictions, interregional spillovers, and the impact on US softwood markets. *Journal of Environmental Economics and Management* 47(2):307-330. doi: 10.1016/S0095-0696(03)00081-0
- Wear DN, Prestemon JP, Foster MO (2016) US Forest Products in the Global Economy. *Journal of Forestry* 114(4):483-493. doi: 10.5849/jof.15-091
- White EM, Alig RJ, Haight RG (2010) Chapter 1: The Forest Sector in a Climate-Changed Environment. In: Alig RJ (ed) *Economic Modeling of Effects of Climate Change on the Forest Sector and Mitigation Options: A Compendium of Briefing Papers*. Pacific Northwest Research Station: pp 3-35
- White EM, Carver AD (2004) Modeling timber mill procurement influence effects on interstate sawlog exportation. *Forest Policy and Economics* 6(6):529-537. doi: 10.1016/S1389-9341(03)00002-9
- Wunder S (2005) Macroeconomic Change, Competitiveness and Timber Production: A Five-Country Comparison. *World Development* 33(1):65-86. doi: 10.1016/j.worlddev.2004.06.015
- Xiang Q, Yin R (2006) Impact of Globalization and Policy Change on United States Softwood Lumber Trade. *for sci* 52(4):381-389. doi: 10.1093/forestscience/52.4.381
- Yin R, Xu J (2003) Identifying the inter-market relationships of forest products in the Pacific Northwest with cointegration and causality tests. *Forest Policy and Economics* 5(3):305-315. doi: 10.1016/S1389-9341(02)00064-3
- Zastocki D, Oktaba J, Lachowicz H (2021) Changes in the Market of Precious Wood: A Case Study of Submission System in Poland. *Forests* 12(4):421. doi: 10.3390/f12040421
- Zhai J, Kuusela O-P (2020) Estimating Price Dynamics in the Aftermath of Forest Disturbances: The Biscuit Fire in Southwest Oregon. *Forest Science* 66(5):556-567. doi: 10.1093/forsci/fxaa004
- Zhai J, Kuusela O-P (2022) Incidence of domestic subsidies vs. export taxes: An equilibrium displacement model of log and lumber markets in Oregon. *Forest Policy and Economics* 135:102647. doi: 10.1016/j.forpol.2021.102647
- Zhang X, Stottlemeyer A (2021) Lumber and timber price trends analysis during the COVID-19 pandemic. Forest Analytics Department, Texas A&M Forest Service, zu finden in <[https://tfswb.tamu.edu/uploadedfiles/tfsmain/data_and_analysis/forest_economics_and_resource_analysis/contact_us\(1\)/lumber%20and%20timber%20price-covid-19.pdf](https://tfswb.tamu.edu/uploadedfiles/tfsmain/data_and_analysis/forest_economics_and_resource_analysis/contact_us(1)/lumber%20and%20timber%20price-covid-19.pdf)>
- Zhang, Han, Joseph Buongiorno (2012) Markets, government policy, and China's timber supply. *Silva Fenn.* 46:595-608
- Zhao J, Daigneault A, Weiskittel A (2020) Forest landowner harvest decisions in a new era of conservation stewardship and changing markets in Maine, USA. *Forest Policy and Economics* 118:102251. doi: 10.1016/j.forpol.2020.102251
- Zhao R, Diao G, Chen S (2019) Study on the Price Fluctuation and Dynamic Relationship between Log and Sawn Timber. *Forest Products Journal* 69(1):34-41. doi: 10.13073/FPJ-D-17-00048
- Zhou M (2021) Input substitution and relative input price variability in timber markets. *Can. J. For. Res.* 51(2):339-347. doi: 10.1139/cjfr-2020-0338
- Zhou M, Buongiorno J (2005) Price transmission between products at different stages of manufacturing in forest industries. *JFE* 11(1):5-19. doi: 10.1016/j.jfe.2005.02.002

Zhou M, Buongiorno J (2006) Space-Time Modeling of Timber Prices. *Western Journal of Agricultural Economics* 31(1):40-56. doi: 10.22004/AG.ECON.10147

Zhu, Z.; Woodcock, C.E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 2012, 118, 83–94.

Zhu, Z.; Woodcock, C.E.; Olofsson, P. Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 2012b, 122, 75–91

Zhu, Z.; Woodcock, C.E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sens. Environ.* 2014, 144, 152–171

Zhu, Z. Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2017, 130, 370–384.

Zhu, Zhe, Shixiong Wang, and Curtis E. Woodcock. "Improvement and expansion of the Fmask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images." *Remote Sensing of Environment* 159 (2015): 269-277.

Zimmermann K, Schuetz T, Weimar H (2018) Analysis and modeling of timber storage accumulation after severe storm events in Germany. *Eur J Forest Res* 137(4):463-475, DOI:10.1007/s10342-018-1116-1

Anhang

Tabelle 11: Übersicht laufender und abgeschlossener Projekte mit Bezug zum Thema Waldschadenserfassung mit Fernerkundung

Akronym	Name	Projektträger/ Förderung	Akteure	Beginn	Ende	Link
WINMOL	Verbundvorhaben (TVH-1): Erfassung und Vorhersagemöglichkeiten von Sturmschäden im Forst; Teilvorhaben 1: Entwicklung semi-automatischer Algorithmen zur quantitativen Erfassung von Sturmkalamitäten aus multiskaligen Fernerkundungsdaten. Verbundvorhaben (TVH-2): Erfassung und Vorhersagemöglichkeiten von Sturmschäden im Forst; Teilvorhaben 2: Entwicklung, Validierung und Einbindung eines Sturmschadenmoduls in die Waldwachstumsmodellierung	FNR	HNEE, Thünen-Institut für Waldökosysteme	01.07.2020	30.06.2023	https://winmol.thuenen.de/
FIRST 2.0	SaaS-Produktentwicklung zur skalenübergreifenden kontinuierlichen Vitalitäts- und Waldschadensanalyse mittels multisensoraler Fernerkundungsdaten und künstlicher Intelligenz	BMVI	LUP, TU Berlin, Thünen-Institut WO, LFoA MV, LWH NRW, NP BW, WBV Nds	01.07.2020	31.12.2022	https://www.lup-umwelt.de/waldschadensanalysen-fue-projekt-first-2-0/
FCU	Forest condition monitor - Waldzustandsmonitor		Helmholtz knowledge transfer project	01.04.2021	31.07.2024	https://waldzustandsmonitor.de/en/forest-condition-monitor/
WSF-SAT	Satellitenbasierte Erfassung von Waldschadensflächen in Niedersachsen	Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML)	NW-FVA	01.04.2020	01.03.2024	https://www.nw-fva.de/forschen/projekte/wsf-sat

Anhang

ForestCare	Forstwirtschaftlicher Copernicus-basierter Assistenzdienst -Reduktion des Referenzdatenbedarfs		Leibnitz Uni Hannover, Wald und Holz NRW, EFTAS, INPE, Puc-Rio, UERJ	2021	2023	
FutueForest	Künstliche Intelligenz (KI) für den Wald	BMEL/ ZUG	WE transform, FU-Berlin, TUM, M.O.S.S.			https://future-forest.eu/ueber-ff-ai/
FORSTPrax	Implementierung eines drohnengestützten Borkenkäferfrühdetektionsverfahrens in die FORSTliche PRAXis	FNR	Uni Göttingen, Uni Freiburg, CADMIC			https://www.uni-goettingen.de/de/647750.html
VTMFOREST	Vitality and Dryness Monitoring of Forests		LWF, DLR	2020	2021	
InnoExpert	Entwicklung einer automatisierten Herleitung von Bestandesinformationen aus Fernerkundungsdaten und deren Verwendung zur Detektion von Waldschäden		OGF	2020	2022	
BeechSat/ IpsSAT	Geschädigte Buchen mit Fernerkundungsdaten kartieren/Detektion von Borkenkäferschäden mit optischen Satellitendaten		LWF, BaySF, Uni Würzburg, IAGmbH	2019	2023	https://www.lwf.bayern.de/informations-technologie/fernerkundung/270077/index.php
ForDroughtDet	Einsatz von Fernerkundung zur frühzeitigen Erkennung von Trockenstress auf gefährdeten Waldstandorten.		TUM, DLR, Uni Trier	2016	2020	https://webarchiv.it.lis.tum.de/ifm.wzw.tum.de/projects/completed/fordroughtdet.html
TreeSatAI	Künstliche Intelligenz mit Erdbeobachtungs- und Multi-Source Geodaten für das Infrastruktur-, Naturschutz- und Waldmonitoring	BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung	TU Berlin, DFKI, LUP GmbH, LiveEO GmbH, Vision Impulse GmbH	2020	2022	https://www.dfki.de/web/forschung/projekte-publikationen/projekt/treesatai/

Anhang

GreenRisk4ALPs	Entwicklung von ökosystembasierten Ansätzen zur Unterstützung von Risikomanagementaktivitäten im Zusammenhang mit Naturgefahren und Klimawandel	EU	WSL, BFW (relevantes Arbeitspaket)	2018	2021	https://www.alpine-space.eu/project/greenrisk4alps/
Digital Forest	Ein Echtzeit-Erfassungssystem für Klimawirkungen im Wald	Volkswagen Stiftung	Göttingen University, Leipzig University, CBL, Forum Wissen	2021	2024	https://www.uni-goettingen.de/de/635968.html https://leuris.uni-leipzig.de/portal/details/forschungsprojekt/5879
AlpMon	Dienst zur kontinuierlichen Überwachung alpiner Wälder mit Hilfe von Sentinel-2 / Landsat 8 -Daten		EODC, Cloudflight Austria, Joanneum	2017	2019	https://www.joanneum.at/digital/referenzprojekte/alpmon
KI4Forest	KI4Forst - Mit Satellitendaten und KI den Wald monitoren		SHLF, MELUND, LLUR, (NW-FVA)	2021	2022(?)	
ForExD	Anfälligkeit der Wälder gegenüber extremen Bedingungen und Störungen in einem sich verändernden Klima	ERC starting grant	Max-Planck-Institut für Biogeochemie	2022	2027	https://www.bgc-jena.mpg.de/en/bgi/forexd
Tree Canopy Cover Loss	Tree Canopy Cover Loss		DLR	2018	2021	
ForstEO	Einsatz der Erdbeobachtung zur Erfassung von klimabedingten Schädigungen des Waldes in Deutschland	FNR	DLR, LWF, FFK Gotha	01.03.2023	28.02.2026	https://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-11882/20871_read-81530/
ROOT	Real-time earth Observation of fOrest dynamics and biodiversiTy		Uni Würzburg	2023	2026	

IpsPro-SBS	Verbundvorhaben: Verbesserte Abschätzung des Risikos für Buchdruckerbefall - Grundlagen für ein Prognosewerkzeug als Bestandteil des integrierten Waldschutzes; Teilvorhaben 2: Altdatenauswertung und Nutzung der Fernerkundung für das Borkenkäfermonitoring	FNR	Staatsbetrieb Sachsenforst	01.11.2017	31.10.2021	https://www.kiwuh.de/projektfoerderung/projekt Datenbank/projekte-details?fkz=22004317&cHash=f02b3b37c73ceb5007f9b0c6ef2a4c15
FraxMon	Demonstrationsprojekt Erhalt der Gemeinen Esche (FraxForFuture); Verbundvorhaben 2: Monitoring (FraxMon); verschiedene Teilvorhaben mit unterschiedlichen Schwerpunkten: Fernerkundungsbasiertes Monitoringsystem zur Erfassung des Eschentriebsterbens	FNR		01.07.2020	30.12.2023	https://www.fraxforfuture.de/verbuede/fraxmon
FEMOPHYS	Verbundvorhaben: Entwicklung eines fernerkundungsbasierten Monitoringverfahrens auf Grundlage einer physiologisch fundierten Vitalitätsbewertung von Hauptbaumarten in Mischbeständen; verschiedene Teilvorhaben: Satellitendatenauswertung, Spektralanalyse, Vitalitätsdiagnostik mittels Biomarker	FNR		01.09.2022	30.04.2027	https://www.wald-mv.de/landesforst-mv/projekte/forschungsprojekte/FeMoPhyS/
BrandSat	Verbundvorhaben: Kartierung der Waldbrandgefahr mit fernerkundlichen und meteorologischen Daten; Teilvorhaben 1: Erfassung von Waldstruktur und Trockenheit. Teilvorhaben 2: Satellitengestützte Erfassung und Charakterisierung historischer und aktueller Waldbrände für die Modellierung der Waldbrandgefahr	FNR/ WKF	Uni Trier, HU-Berlin, Forst Brandenburg, DWD	01.07.2020	31.12.2022	https://www.uni-trier.de/universitaet/fachbereiche-faecher/fachbereich-vi/faecher/erdbeobachtung-und-klimaprozesse/umweltfernerkundung-und-geoinformatik/forschungsprojekte/brandsat