



**NW-FVA**

Nordwestdeutsche  
Forstliche Versuchsanstalt

# Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

**Entwicklung und Integration von Fernerkundungs- und GIS-Komponenten zur Optimierung der Überwachungs- und Prognoseverfahren für Kieferngrößschädlinge (KGS-SAT)**

Datum der Veröffentlichung:

**31. Dezember 2024**

Autor:innen:

**Jonathan Wolf, Philip Beckschäfer, Pavel Plašil**

Zuwendungsempfänger:

**Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt,  
Abteilung Waldschutz**

Projektlaufzeit:

**01.07.2022 – 30.04.2024**

Förderung:

**Durch das Land Niedersachsen im Rahmen  
des Sondervermögens „Wirtschaftsförder-  
fonds – Ökologischer Bereich“ (Maßnah-  
menpaket Stadt.Land.Zukunft-SLZ),  
Maßnahme: Forschung zur Anpassung  
klimaresilienter Wälder**



GESELLSCHAFTSVERTRAG  
Stadt.Land.Zukunft.

## Zusammenfassung

Massenvermehrungen von Kieferngrößschädlingen (KGS) können zu intensivem Fraß an Kiefernadeln führen und massive Bestandesschäden bzw. -absterbeerscheinungen in Kiefernwäldern bedingen. KGS wie Forleule (*Panolis flammea*), Kiefernspinner (*Dendrolimus pini*), Kiefernspanner (*Bupalus piniaria*), Kiefernbuschhornblattwespen (*Diprion* spp.) und Nonne (*Lymantria monacha*) durchlaufen in unregelmäßigen Abständen Massenvermehrungen. Die Grundüberwachung dieser Schaderreger beruht in der Regel auf terrestrischen Stichprobenverfahren unter Verwendung von Pheromonfallen oder mittels Winterbodensuchen. Dieses Überwachungsverfahren stößt jedoch bei großräumig verteilten Gradationen an seine Grenzen, sodass Schadflächen zum Teil nicht oder zu spät erkannt werden.

In dem Projekt KGS-SAT wurde ein fernerkundungsgestütztes Verfahren entwickelt, um Flächen, auf denen Fraß an Kiefern in unterschiedlichen Stadien akut ist, rechtzeitig zu identifizieren. Hierzu wurden optische Bilddaten des Satelliten Sentinel-2 und daraus abgeleitete Vegetationsindizes verwendet. Basierend auf einem Vergleich von 50 Sentinel-2-basierten Spektralvariablen (spektrale Bänder und Vegetationsindizes) wurde der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) als geeignet für die KGS-Überwachung ermittelt. Für die Identifizierung von Kieferngebieten bzw. Kiefernbeständen mit unterschiedlich starkem Nadelverlust ist die NDVI-Differenz zwischen dem aktuellen Zeitpunkt und dem in der Vergangenheit beobachteten Normalzustand (charakterisiert durch den NDVI-Median) von zentraler Bedeutung. Der NDVI-Median wird hierfür anhand mehrerer wolkenfreier Bilder der vergangenen 2-3 Jahre der Zeiträume Mai-Juni bzw. August-September berechnet. Durch Setzung eines Schwellenwertes für die NDVI-Differenz ist eine automatisierte Erkennung gravierender KGS-Fraßereignisse über große Flächen hinweg möglich. Fälschlicherweise können hierbei jedoch auch Veränderungen des Waldes, die nicht durch KGS-Fraß bedingt sind, sondern z. B. durch Durchforstungen, erfasst werden, da diese ebenfalls mit einer Verringerung der Nadelmasse einhergehen.

Die Identifizierung von leichtem bzw. Initialbefall mit KGS konnte daher noch nicht automatisiert werden, ist jedoch durch eine nicht automatisierte visuelle Analyse der NDVI-Differenzbilder durch eine qualifizierte Person ebenfalls möglich. Bei der visuellen Identifikation potenzieller KGS-Fraßereignisse liefert insbesondere das räumliche Muster der NDVI-Differenzen wichtige Anhaltspunkte zur Erkennung. Das Muster zeichnet sich durch einen graduellen Übergang vom Rand des Fraßgebietes hin zu seinem Zentrum aus.

Erste praktische Anwendungstests der Methodik haben gezeigt, dass Waldbesitzende und Behörden durch die so gewonnenen Informationen wirksamer auf Nadelfraßereignisse in Kiefernbeständen reagieren können. Die flächendeckenden Informationen aus Fernerkundungsdaten schaffen einen Überblick über Fraßereignisse, können bei Bekämpfungsmaßnahmen helfen und ergänzen das terrestrische Monitoring. Eine weitere Automatisierung des Verfahrens in Bezug auf die Aufbereitung der Satellitenbilddaten und die anschließende Identifikation der KGS-Fraßgebiete ist nötig, um die erarbeitete Methodik in den Praxisbetrieb zu überführen.

# Inhalt

1.	Einleitung.....	1
1.1.	Motivation und Ziele .....	1
1.2.	Monitoring von Kieferngrößschädlingen mit Methoden der Fernerkundung .....	1
2.	Material & Methoden.....	4
2.1.	Material .....	4
2.1.1.	Untersuchungsgebiete .....	4
2.1.2.	Daten .....	5
2.2.	Methodik .....	6
2.2.1.	Sentinel-2 Vorprozessierung .....	6
2.2.2.	Auswahl eines geeigneten Vegetationsindexes .....	6
2.2.3.	Methodik zur Detektion von stark geschädigten Kiefernflächen.....	8
2.2.4.	Methodik zur Detektion von leichtem / initialem Befall .....	9
2.2.5.	Anwendung der Methodik auf Kieferngebiete Niedersachsens .....	10
3.	Ergebnisse und Erfahrungen der Anwendungen in der Praxis.....	12
4.	Diskussion.....	14
4.1.	Möglichkeiten & Grenzen der Detektion von Fraßschäden in Kiefernbeständen durch fernerkundungsgestützte Verfahren.....	14
4.2.	Verbesserungsmöglichkeiten der Methodik .....	14
4.3.	Entwicklung eines Modells für die Einstufung von Entlaubungsklassen.....	16
5.	Fazit .....	18
6.	Literatur .....	19

# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation und Ziele

Periodische Massenvermehrungen von Kieferngrößschädlingen können zu großflächigem Kahlfraß und damit einhergehenden massiven Bestandesschäden bzw. Absterbeerscheinungen in Kiefernwäldern führen. Die Forleule (*Panolis flammea*), der Kiefernspinner (*Dendrolimus pini*), der Kiefernspanner (*Bupalus piniaria*), die Kiefernbuschhornblattwespen (*Diprion* spp.) und die Nonne (*Lymantria monacha*) durchlaufen in unregelmäßigen Abständen Massenvermehrungen (Kätzel et al., 2008). Aufgrund des Klimawandels und der damit verbundenen höheren Wahrscheinlichkeit von Trockenphasen ist in Zukunft mit einem größeren Risiko für Massenvermehrungen zu rechnen (Fleck et al., 2015). Bisher beruht die Grundüberwachung dieser Schaderreger auf terrestrischen Stichprobenverfahren unter Verwendung von Pheromonfallen oder mittels der Winterbodensuche. Dieses Verfahren stößt allerdings bei großräumig verteilten Gradationen an seine Grenzen, sodass Schadflächen nicht oder erst zu spät erkannt werden. Um einen besseren Überblick über das Auftreten von Kieferngrößschädlingen zu erhalten, sollen flächendeckende Informationen aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden, um die bestehende terrestrische Überwachung der Kiefernbestände zu unterstützen.

Das Projekt KGS-SAT zielt darauf, ein fernerkundungsgestütztes Verfahren zu entwickeln, um Flächen frühzeitig zu identifizieren, auf denen Kiefern Nadelfraß in unterschiedlichen Stadien akut ist und der Beginn einer Massenvermehrung vermutet wird. Zur Erstellung von Übersichtskarten dienen Aufnahmen frei verfügbarer, optischer Satellitensysteme mittlerer Auflösung (Sentinel-2), die in Veränderungsanalysen genutzt werden, um auf Schädigungen durch Kieferngrößschädlinge in den Kiefernwäldern Niedersachsens hinzuweisen. Methodentests zur Verfahrensentwicklung und zur Bewertung des Verfahrens werden anhand vergangener und aktueller Gradationen der oben genannten Arten durchgeführt. Um die zeitliche und räumliche Konsistenz der Methode zu überprüfen, wurden verschiedene Gebiete und Zeitpunkte in die Methodenprüfung einbezogen.

## 1.2. Monitoring von Kieferngrößschädlingen mit Methoden der Fernerkundung

Senf et al. (2017) stellten in ihrem Überblick über die Forschung zu Fernerkundung und insektenbedingten Waldschäden fest, dass ein Großteil der Studien, zur Erfassung insektenbedingter Waldschäden per Fernerkundung, in Nordamerika und Europa durchgeführt wurde. In Europa sind diese Studien hauptsächlich in borealen und einigen montanen Regionen angesiedelt. Es existieren nur relativ wenige Methoden, die speziell für die Überwachung von Kieferngrößschädlingen (KGS) entwickelt wurden. Senf et al. (2017) nennen in ihrer Arbeit lediglich zwei Studien, die sich auf die Gemeine Kiefernbuschhornblattwespe (*Diprion pini*) beziehen. Beide Studien befassen sich jedoch mit der Verwendung von Fernerkundungsdaten mit einer sehr groben räumlichen Auflösung zur Erfassung großflächiger Ereignisse. Eingesetzt werden MODIS (500 m Pixelgröße) (Kharuk et al., 2007) und NOAA/AVHRR (Pixelgröße von 1,1 km) Daten (Kharuk et al., 2004). Generell ist der Einsatz von optischen Fernerkundungsdaten mit mittlerer räumlicher Auflösung von 10 bis 30 m zur Erfassung insektenbedingter Schäden in Nadelwäldern verbreiteter (Senf et al., 2015; König et al., 2023; Hawrylo et al., 2018). Die erfassten Waldschäden werden häufig in Schadensstufen eingeteilt, die die Nadelverluste in Kategorien wie „schwach“, „mittel“ und „stark“ einteilen. Für diese Kategorisierung wird der

statistische Zusammenhang zwischen den spektralen Eigenschaften der Bäume und ihrer Nadelverluste verwendet (Marx & Kleinschmit, 2017). Um Schadensereignisse räumlich einzugrenzen und die Intensität des Schadensereignisses abzuschätzen, werden verschiedene Regressions- & Klassifikationsalgorithmen verwendet. Felddaten sind die primäre Datengrundlage für die Kalibrierung und Validierung der statistischen Modelle. Einige neuere Studien wenden Change-Detection-Verfahren an, die einen oder mehrere Vegetationsindizes zwischen zwei oder mehreren Zeitpunkten miteinander vergleichen, um spektrale Veränderungen zu erfassen, die auf Vegetationsveränderungen schließen lassen (Olsson et al., 2016; Grabska et al., 2020). Die für Change-Detection-Verfahren häufig verwendeten optischen Fernerkundungsdaten stammen von den Landsat-Satelliten. Ein häufiges Problem im Zusammenhang mit optischen Satellitendaten ist jedoch die Verfügbarkeit wolkenfreier Aufnahmen (Kennedy et al., 2009). Insbesondere aufgrund der temporären und teilweise sehr dynamischen Fraßereignisse von Insekten ist es nicht immer möglich, geeignete Aufnahmen zu den benötigten Zeitpunkten zu gewinnen. Um dieses Problem zu umgehen, wurden teilweise MODIS-Daten mit einer höheren zeitlichen Auflösung ausgewählt. Beispielsweise haben Eklundh et al. (2009) von der Roten Kiefernbuschhornblattwespe (*Neodiprion sertifer*) befallene Kiefernwälder in Norwegen räumlich abgebildet. Dazu wurden MODIS-basierte Verläufe des Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) zur der Vegetationsperiode analysiert. Die vergleichsweise grobe räumliche Auflösung von 250 m der MODIS-Aufnahmen ist jedoch von Nachteil, da die Schadereignisse nur grob verortet werden können und kleinflächige Fraßereignisse nicht erfasst werden (Thayn, 2013).

Mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Tagen und einer räumlichen Auflösung von bis zu 10 Metern erscheinen Sentinel-2-Satellitendaten für die Erfassung dynamischer und kleinflächiger Fraßereignisse gut geeignet. Unter Verwendung von Sentinel-2 Daten waren Hawrylo et al. (2018) in der Lage, verschiedene Machine-Learning-Algorithmen zu trainieren, die den Nadelverlust von durch Kiefernspinner befallenen Kiefern in Polen in einem 10.000 km<sup>2</sup> großem Untersuchungsgebiet mit moderater Genauigkeit abzuschätzen. Regressions- und Klassifikationsmodelle wurden mithilfe von 50 Testflächen generiert und zeigten ein R<sup>2</sup> von 0,53 – 0,57 und Gesamtgenauigkeiten von 75 % - 78 %. Ein Vergleich verschiedener Vegetationsindizes ergab, dass sich der GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) und der MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) am besten eigneten, um den Nadelverlust abzuschätzen.

In Brandenburg werden einzelne KGS-Gebiete mit einem auf RapidEye-Satellitenbilddaten basierenden Verfahren in Anlehnung an Marx & Kleinschmit (2017) betrachtet, wobei es sich hierbei weniger um ein flächendeckendes Monitoring als vielmehr um eine auf die spezifischen Eigenschaften ausgewählter Gebiete angepasste Methodik geht, um Waldschäden und deren Abstufungen zu analysieren. Die Auswahl der betrachteten Flächen erfolgt anhand verschiedener Kriterien (z. B. Fraß im Vorjahr oder erhöhte Befallswerte im terrestrischen Monitoring). Marx & Kleinschmit (2017) analysierten den statistischen Zusammenhang zwischen RapidEye-Satellitendaten und Nadelverlust von Kiefern in Brandenburg während eines Nonnenbefalls. Die befallenen Gebiete wurden anschließend mit einer Gesamtgenauigkeit von 71 % - 81 % in Schadensintensitäten eingeteilt. Es stellte sich heraus, dass der NDVI eher für stärker befallene Gebiete und der NDRE (Normalized Difference Red-Edge Index) für weniger stark befallene Gebiete geeignet war.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zur Überwachung geschädigter Kieferngebiete und anderer bewaldeter Flächen mittels Fernerkundung üblicherweise optische Satellitendaten mittlerer Auflösung, wie z. B. Landsat oder Sentinel-2, und daraus abgeleitete Vegetationsindizes, wie der NDVI verwendet werden (Gao et al., 2020). Der Fraß an den Kiefernadeln führt

zu einer graduellen Veränderung der spektralen Eigenschaften der Kiefernkronen. Allerdings sind diese Veränderungen zu Beginn des Befalls nur schwer zu detektieren, wohingegen es bei Massenvermehrungen zu großflächigem Kahlfraß kommen kann, was in der Regel eine erhebliche Veränderung der Nadelmasse und daher auch der spektralen Eigenschaften mit sich bringt. Um Massenvermehrungen erfolgreich eindämmen zu können, wäre es vorteilhaft, die Schäden früh zu erkennen (Möller, 2009). Dies ist aber aufgrund häufiger Bewölkung mittels optischer Fernerkundungsdaten nicht immer möglich. Aber auch die zeitverzögerte Erfassung von Fraßereignissen per Fernerkundung kann wertvolle Informationen liefern, um einen Überblick über die räumliche Ausdehnung des Befalls zu erhalten und damit die notwendigen Gegenmaßnahmen zu unterstützen. Außerdem können so ebenfalls Gradationen entdeckt werden, die andernfalls übersehen werden.

## 2. Material & Methoden

### 2.1. Material

#### 2.1.1. Untersuchungsgebiete

Um eine auf Fernerkundung basierende Methodik für das regelmäßige Monitoring von Fraßereignissen an Kiefern in Niedersachsen zu entwickeln, wurden verschiedene Ansätze in Gebieten getestet, in denen Kieferngrößschädlinge (KGS) in der Vergangenheit aktiv waren. Die Untersuchung konzentriert sich auf Ereignisse ab Sommer 2015, da seit diesem Zeitpunkt optische Sentinel-2-Satellitendaten verfügbar sind. Zur Identifizierung der KGS-Gebiete wurde unter anderem das Waldschutz-Meldeportal (WSMP) der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) genutzt, um Kiefernflächen zu lokalisieren, auf denen im angegebenen Zeitraum KGS in nennenswerter Dichte auftraten und z. T. auch bekämpft wurden. Zusätzlich wurden diverse Quellen wie Fachliteratur und Online-Artikel in die Recherche einbezogen.

Insgesamt wurden sechs verschiedene KGS-Gebiete in die Entwicklung und Erprobung der Methodik einbezogen (siehe Abb. 1).

1. Sachsen-Anhalt, südlich von Gardelegen (Landeszentrum Wald (LZW) Forstamt Letzlingen): Im Spätsommer 2016 (und erneut 2019) kam es hier zu einer Massenvermehrung der Kiefernbuschhornblattwespe (*Diprion pini*), die in mehreren Gebieten großflächigen Kahlfraß verursachte.
2. Niedersachsen, westlich von Lüchow (Landwirtschaftskammer Forstamt Südostheide): Ähnliche Ereignisse wie in Sachsen-Anhalt traten hier im Jahr 2016 auf.
3. Niedersachsen, nordwestlich von Tülau (Niedersächsische Landesforsten (NLF) Forstamt Unterlüß): Auch in diesem Gebiet wurden 2016 Fraßschäden durch KGS beobachtet.
4. Sachsen-Anhalt, nahe Arendsee (LZW Forstamt Nordöstliche Altmark): Im Mai 2019 wurde hier die Nonne (*Lymantria monacha*) mit Pflanzenschutzmitteln bekämpft. Dank rechtzeitiger Erfassung war der Fraß noch nicht stark ausgeprägt.
5. Brandenburg, südöstlich von Herzberg (Elster): Im Spätsommer 2016 kam es zu einer Massenvermehrung der Kiefernbuschhornblattwespe mit deutlichem Nadelfraß (Waldschutzbericht Brandenburg 2016).
6. Brandenburg, Lieberoser Heide: Über mehrere Jahre hinweg traten hier Fraßschäden durch verschiedene Insekten auf. Laut Brandenburger Waldschutzbericht 2017 kam es 2013 zu einem Befall der Nonne, 2014 zu einem Befall des Kiefernspinners und im Juli 2015 zu Schäden durch den Zwölffährigen Kiefernborckenkäfer (*Ips sexdentatus*).

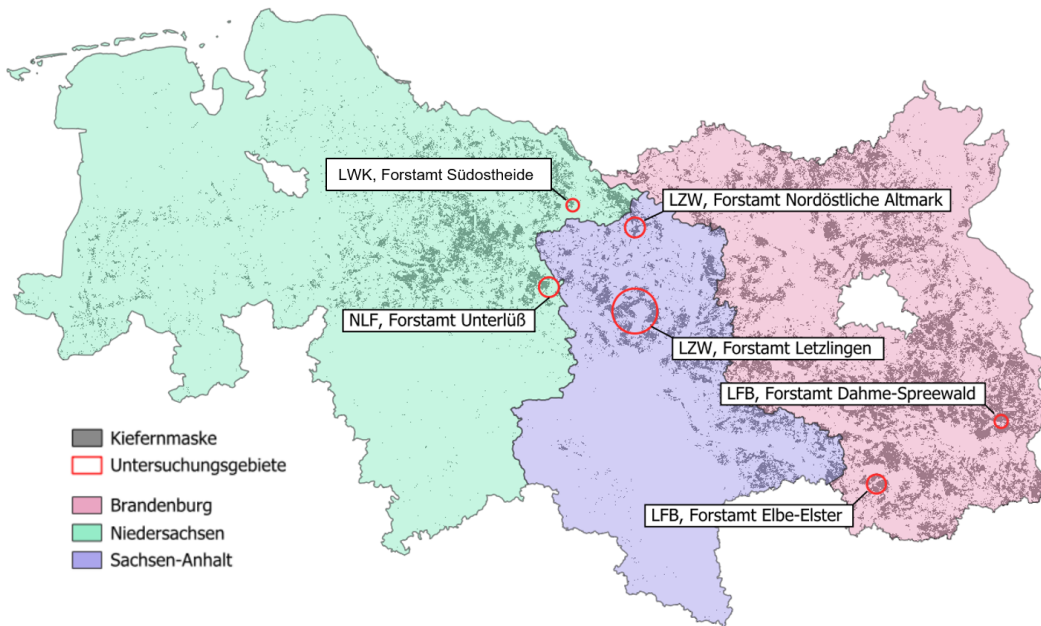


Abbildung 1: Verortung der Untersuchungsgebiete. Kiefernmaske basierend auf Blickensdörfer et al., 2024.

## 2.1.2. Daten

Für die KGS-Detektion wurden hauptsächlich Sentinel-2-Satellitendaten verwendet, da sie frei verfügbar sind und eine geeignete räumliche sowie zeitliche Auflösung bieten. Die optischen Satellitenbilder haben eine maximale räumliche Auflösung von 10 x 10 Metern und eine Wiederholungsrate von 5 Tagen. Ein Großteil der Aufnahmen ist jedoch aufgrund von Wolkenbedeckung nicht nutzbar. Weitere technische Details zum Sensor des Sentinel-2-Satelliten sind in Abbildung 2 dargestellt.

Eine weitere wichtige Datengrundlage ist die sogenannte Kiefernmaske, die die Verteilung der Kiefernwälder anzeigt. Hierfür wurde die bundesweite Baumartenkarte des Thünen-Instituts aus dem Jahr 2018 verwendet (Blickensdörfer et al., 2024).

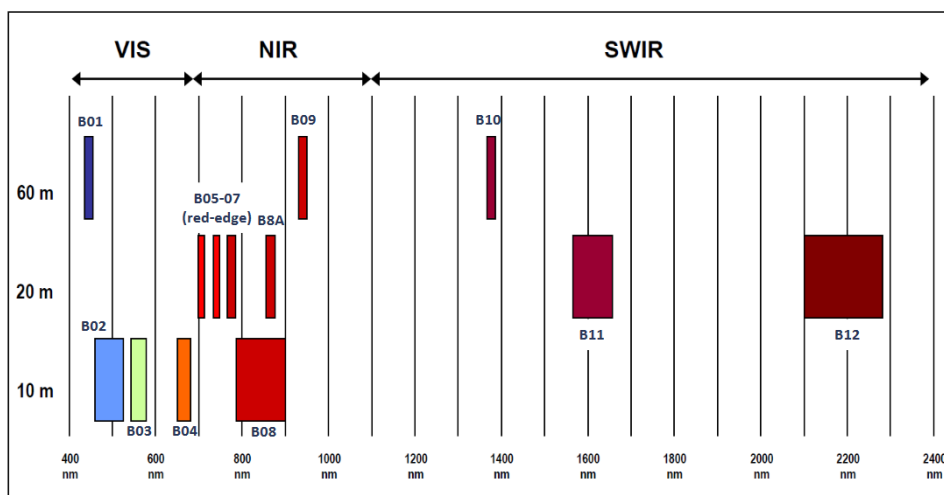


Abbildung 2: Räumliche Auflösung, Wellenlängen und Bandbreiten des Sentinel-2 MSI Sensors. (Quelle: ESA)



## 2.2. Methodik

### 2.2.1. Sentinel-2 Vorprozessierung

Sentinel-2-Aufnahmen, die vor dem 25. Januar 2022 aufgenommen wurden, wurden als L1C-Produkt vom Copernicus SciHub bzw. Copernicus Browser heruntergeladen und mithilfe der Sen2cor-Software in die L2A-Produktebene (Bottom of the atmosphere reflectance) konvertiert. Aufnahmen, die nach dem 25. Januar 2022 erstellt wurden, wurden direkt als L2A-Produkt heruntergeladen. Um die NDVI-Werte vor und nach diesem Datum vergleichbar zu machen, wurden die neueren Aufnahmen durch Subtraktion des Werts 1000 an den Wertebereich der älteren Aufnahmen angeglichen.

Für alle verwendeten Sentinel-2-Szenen wurden Wolkenmasken mit der von Zhe et al. (2015) entwickelten Software Fmask (Version 4.5) erstellt. Die Wolkenwahrscheinlichkeitsgrenze wurde auf 7,5 % und die Puffergröße auf 20 Pixel (200 m) gesetzt. Die niedrige Wolkenwahrscheinlichkeitsgrenze soll sicherstellen, dass auch kleine Wolken erfasst werden. Die Puffergröße von 200 m verhindert, dass diffuse Wolkenränder die Spektralwerte beeinflussen.

Zusätzlich zu den 10 Sentinel-2-Bändern (Bänder: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8a, 11, 12) wurden verschiedene Vegetationsindizes (VI) berechnet.

### 2.2.2. Auswahl eines geeigneten Vegetationsindexes

Nach Identifizierung der Gebiete, in denen in der Vergangenheit KGS-Fraß gemeldet wurde, wurden verschiedene Methoden entwickelt und getestet, um KGS-Flächen anhand von Sentinel-2-Aufnahmen zu detektieren. Die Auswertungen wurden mit dem Statistikprogramm R durchgeführt (R Core Team, 2023).

Zunächst wurden explorativ die mittleren spektralen Eigenschaften befallener Kiefernbestände mit denen nicht befallener Kiefernbestände verglichen (siehe Abbildung 3). Hierfür wurden 20 Gebiete ausgewählt, jeweils 10 innerhalb und außerhalb befallener Bestände, um zu visualisieren, wie sich die Reflexionseigenschaften geschädigter und ungeschädigter Kronen je nach Spektralbereich voneinander unterscheiden (Abbildung 3).

Um festzustellen, welcher Spektralbereich bzw. Vegetationsindex (im Folgenden zusammengefasst als Spektralvariablen bezeichnet) am besten für die Differenzierung zwischen gesunden und geschädigten Kiefern geeignet ist, wurde für jede Spektralvariable berechnet, wie weit die Mittelwerte der beiden Klassen auseinander liegen (x-Achse in Abb. 4) und wie groß die Streuung der Werte der Spektralvariable innerhalb der beiden Klassen ist (y-Achse in Abb. 4). In der daraus resultierenden Grafik (Abbildung 4) sind die Spektralvariablen, die sich nicht zur Unterscheidung der Klassen eignen links oben eingezeichnet, während zur Unterscheidung geeignete Spektralvariable rechts unten verortet sind. Ziel war es, diejenige Spektralvariable zu identifizieren, deren Mittelwerte zwischen den Klassen möglichst weit auseinanderliegen, während die Standardabweichungen innerhalb der Klassen möglichst gering sind.

Der Vergleich der verschiedenen Spektralvariablen ergab, dass neben einigen red-edge-VIs (z. B. NDRE) insbesondere der NBR (Normalized Burn Ratio) und der NDVI gut zur Detektion von Fraßereignissen geeignet sind (Abb. 4 und 5). Da der NDVI einer der wenigen VIs ist, der aus Sentinel-2-Daten mit einer Auflösung von 10 m berechnet werden kann, während andere VIs lediglich mit einer Auflösung von 20 m berechnet werden können, ist er potentiell besser geeignet, auch kleinerer Fraßereignisse exakt zu verorten. Auch zeigt Abb. 3, dass insbesondere in den für den NDVI verwendeten Spektralbereichen des Rots und Nahinfrarots (NIR1

bzw. Band 8) ein deutlicher Unterschied im Reflexionsverhalten zwischen geschädigter und ungeschädigter Vegetation besteht. Daher wurde der NDVI für die weitere Verfahrensentwicklung gewählt.

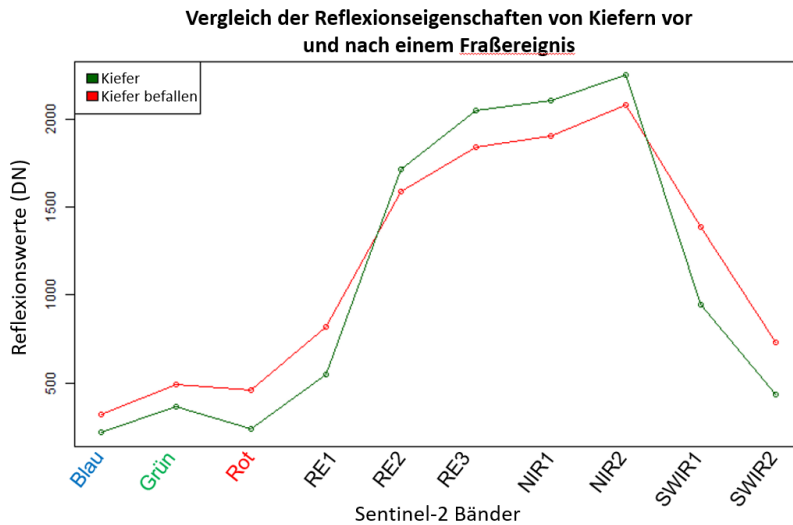


Abbildung 3: Vergleich der spektralen Eigenschaften von ungeschädigten Kiefernkrönen und von Kiefernkrönen, die durch Raupenfraß an Nadeln geschädigt wurden. Abgebildet sind Mittelwerte mehrerer Testgebiete. Zur Info: Der NDVI berechnet sich aus den Bändern Rot und NIR1 ( $NDVI = (NIR1 - Rot) / (NIR1 + Rot)$ ). In der Abbildung ist zu sehen, dass sich in diesen Spektralbereichen die Reflexionseigenschaften geschädigter und ungeschädigter Krönen vergleichsweise deutlich unterscheiden.

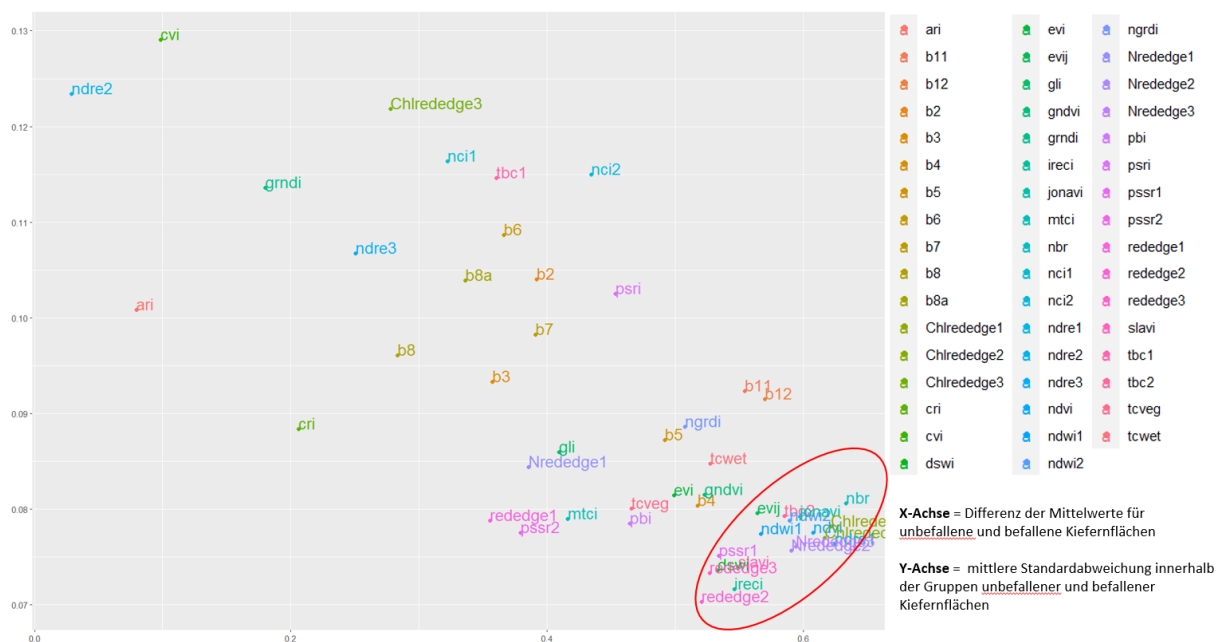


Abbildung 4: Vergleich der auf Sentinel-2 basierenden Spektralvariablen hinsichtlich ihrer Fähigkeit, zwischen durch Raupenfraß geschädigten und nicht geschädigten Kiefernkrönen zu unterscheiden. Geeignete Variablen (rote Ellipse – Ausschnittvergrößerung siehe Abb. 5) weisen eine möglichst große Differenz zwischen den Mittelwerten der beiden Klassen und eine möglichst kleine Standardabweichung innerhalb der Klassen auf.

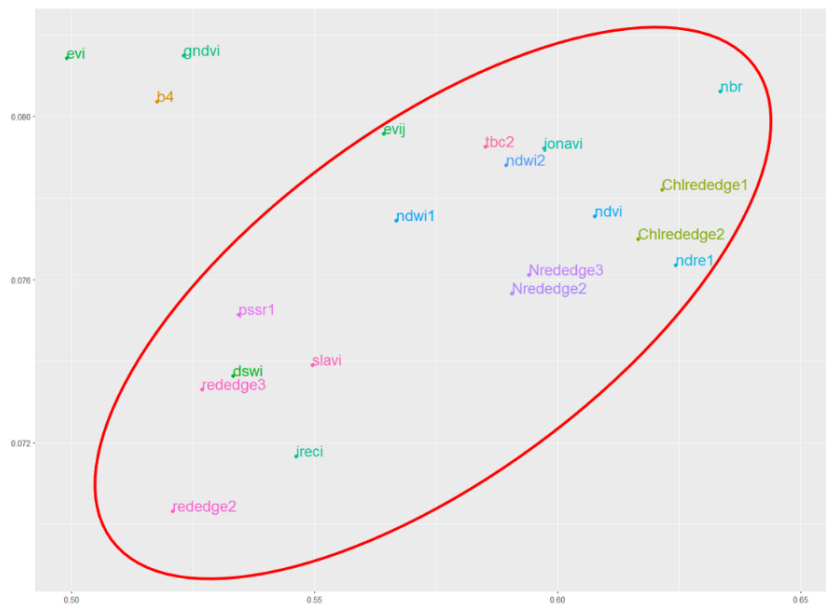


Abbildung 5: Vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 4. Die Spektralvariablen innerhalb der roten Ellipse sind generell geeignet, um zwischen geschädigten und ungeschädigten Kiefernkrönen zu unterscheiden.

### 2.2.3. Methodik zur Detektion von stark geschädigten Kiefernflächen

Für die in Abschnitt 2.1.1. beschriebenen Untersuchungsgebiete wurde der NDVI (Normalzustand) vor und während des KGS-Befalls berechnet. Anschließend wurde aus den beiden NDVI-Rastern eine NDVI-Differenz berechnet ( $NDVI_{normal} - NDVI_{befall}$ ). Der Vergleich der NDVI-Differenzen (Abb. 6) ergab, dass ab einer Differenz von -0,2 mit hoher Sicherheit von schweren Kronenschäden ausgegangen werden kann, die in den betrachteten Gebieten auf KGS-Befall zurückzuführen waren. Basierend auf der NDVI-Differenz und dem festgelegten Grenzwert ist es möglich, die von KGS befallenen Gebiete zu klassifizieren (Abb. 7).

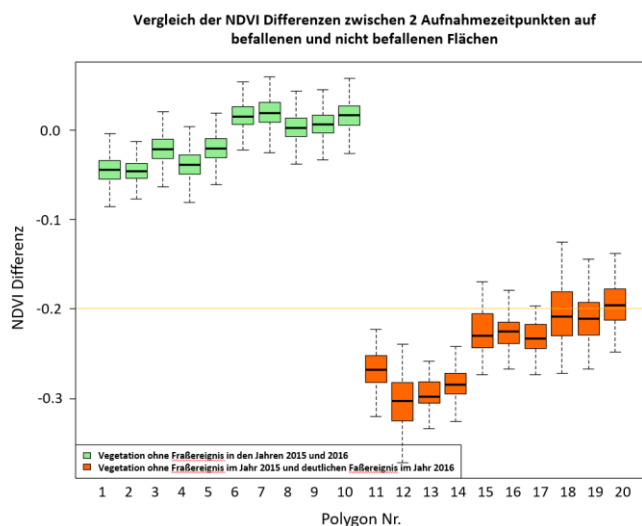


Abbildung 6: Boxplots von insgesamt 20 Testflächen in Sachsen-Anhalt im Forstamt Letzlingen (Flächengröße 1-10 ha). Anhand der grünen Boxplots zeigt sich, dass die NDVI-Differenzen zwischen den Werten zweier Zeitpunkte (wenn jeweils kein Fraßereignis passiert) kaum unterscheiden. Die roten Boxplots zeigen die deutliche Abnahme des NDVI bei Nadelfraßereignissen. Auch in den anderen Untersuchungsgebieten war diese Abnahme meist unter dem Wert -0,2.

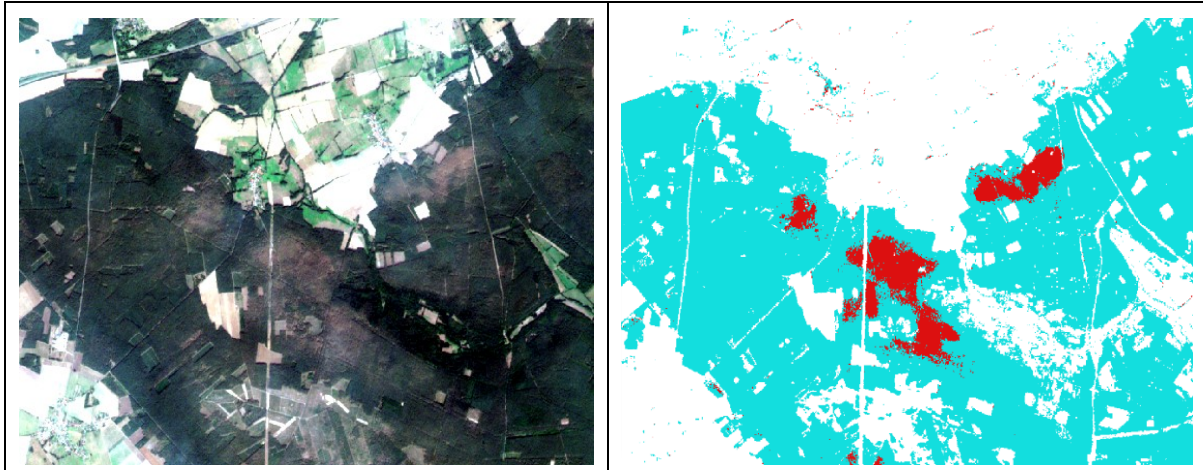


Abbildung 7: Links: Echtfarben Sentinel-2 Aufnahme von einem von Kiefernbuschhornblattwespen befallenen Kieferngelände nahe Gardelegen, Sachsen-Anhalt (Aufnahmedatum: 09.09.2016) und (rechts) die klassifizierte Karte (blau = ungeschädigte Kiefer, rot = durch Nadelfraß geschädigte Kiefer).

#### 2.2.4. Methodik zur Detektion von leichtem / initialem Befall

Die NDVI-Differenz, berechnet aus dem NDVI vor einem Fraßereignis ( $NDVI_{normal}$ ) und dem NDVI während bzw. nach einem Fraßereignis ( $NDVI_{befall}$ ) ist auch die wichtigste Datengrundlage für die Detektion eines initialen Befalls durch KGS. Allerdings wird in diesem Fall das NDVI-Differenzraster nicht durch die Setzung eines Schwellenwerts zu einem klassifizierten Raster weiterverarbeitet, sondern muss von einem Menschen visuell interpretiert werden, um betroffene Gebiete zu identifizieren. Dabei ist vor allem auf die räumliche Struktur der NDVI-Differenzen und weniger auf die absoluten Pixelwerte zu achten. Bei einem initialen Befall sind die NDVI-Differenzen oft nicht sehr groß und liegen im Bereich der ansonsten natürlichen Variation des NDVI, was eine automatisierte Erfassung des Befalls erschwert. Bei der Betrachtung mehrerer von KGS betroffener Gebiete fiel jedoch auf, dass der anfängliche Befall häufig mit einem radialen, graduellen Anstieg der NDVI-Differenz zum Befallszentrum hin einherging (Abb. 8). Um diese Bereiche mithilfe von Algorithmen automatisiert zu erfassen, wurden bereits ein Ansatz aus dem Bereich Objekt basierter Klassifikation (mittels Orfeo ToolBox) und ein Ansatz basierend auf Rasterstatistiken getestet, beides führte jedoch nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Verfahren der künstlichen Intelligenz konnten während der Laufzeit des Projekts nicht auf ihre Tauglichkeit getestet werden, bieten aber eine vielversprechende Option, das Verfahren weitergehend zu automatisieren. Der derzeit akkurateste Ansatz zur Erkennung eines anfänglichen Befalls mit KGS ist daher die vergleichsweise aufwändige visuelle Auswertung durch einen Menschen, wobei der Suchraum auf Gebiete, in denen KGS in der Vergangenheit bereits aktiv waren, eingegrenzt werden sollte.



Sentinel-2 Aufnahme vom 09.05.2023

NDVI Differenz

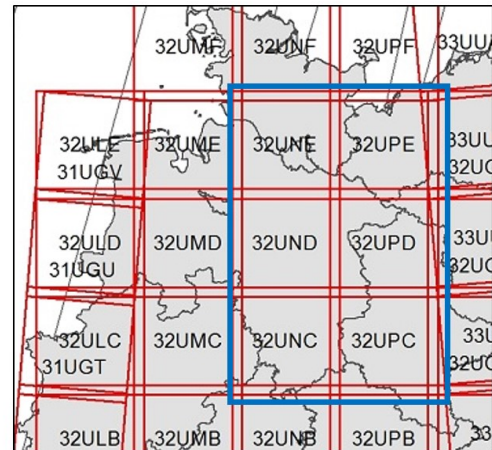
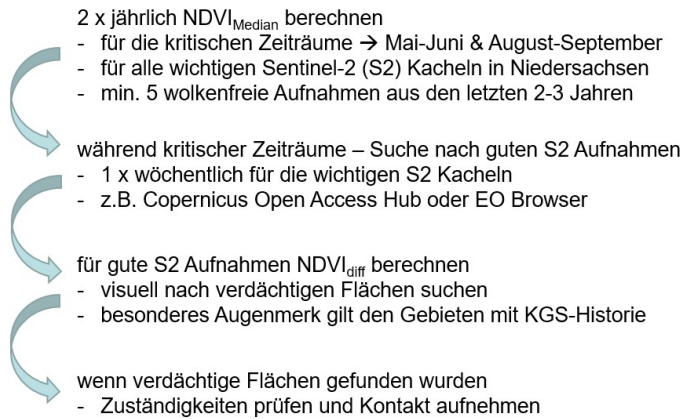
Abbildung 8: Ein von KGS befallenes Gebiet in Mecklenburg-Vorpommern. Da der Befall zu diesem Zeitpunkt nicht deutlich ausgeprägt war (siehe Abb. 8) sieht man in der Sentinel-2-Aufnahme keinen Unterschied zwischen befallenen und nicht befallenen Kiefernbeständen. Die Darstellung der NDVI-Differenz zeigt im Zentrum des Bildes jedoch ein Gebiet (blauer Kreis), in dem die Differenzwerte graduell vom Rand zum Zentrum hin ansteigen. Dieses Muster ist typisch für KGS bedingte Fraßereignisse. Das Differenzbild enthält außerdem einige deutlich rot eingefärbte Flächen, die anhand ihrer klareren Außengrenzen und vergleichsweise eckigen Form als forstwirtschaftliche Eingriffe, z. B. Holzernte, Durchforstung identifiziert werden können.

#### 2.2.5. Anwendung der Methodik auf Kieferngebiete Niedersachsens

Zur Anwendung der entwickelten Methodik im Jahr 2023 auf Kiefernwälder in Niedersachsen wurde zunächst der zu betrachtende Gebietsausschnitt anhand des Hauptverbreitungsgebiets der Kiefer in Niedersachsen in Kombination mit der Kachelung der Sentinel-2-Aufnahmen bestimmt und auf 6 Sentinel-2 Kacheln begrenzt (siehe Abb. 9). Anschließend wurde der NDVI-Normalzustand der zu betrachtenden Kiefernbestände berechnet. Hierzu wurde für jedes Pixel der Median des NDVI für die beiden kritischen Zeiträume, in denen KGS besonders aktiv sind (Mai-Juni und August-September), berechnet. Hierzu wurden aus den genannten kritischen Zeiträumen jeweils fünf wolkenfreie Sentinel-2 Aufnahmen aus den vorhergehenden drei Jahren verwendet.

In den kritischen Zeiträumen wurden wöchentlich aktuelle Sentinel-2-Szenen mit möglichst geringer Wolkenbedeckung gesucht, wozu die Plattformen EO Browser oder Copernicus Browser verwendet werden können. Bei Verfügbarkeit wolkenfreier Aufnahmen wurden die Aufnahmen heruntergeladen, der NDVI berechnet und anschließend die Differenz zwischen dem aktuellen NDVI und dem NDVI-Median berechnet. Anschließend wurde das hieraus resultierende Differenzraster nach den in Abschnitt 2.2.4. beschriebenen Strukturen abgesucht, wobei besonderes Augenmerk auf Bereiche gelegt wurde, in denen bereits in der Vergangenheit KGS-Fraßereignisse beobachtet wurden. Wurden verdächtige Flächen gefunden, erfolgten im nächsten Schritt die Prüfung der Zuständigkeiten und die Kontaktaufnahme mit dem Forstamt. Eine Zusammenfassung des hier beschriebenen Workflows ist in Abb. 9. zu sehen.





Sentinel-2 Kacheln Niedersachsen

Abbildung 9: Links: Möglicher Workflow für die Auswertung von Sentinel-2 Aufnahmen, zur Erfassung von KGS-Fraßereignissen. Rechts: Übersicht der Sentinel-2 Kacheln für Niedersachsen. Ein Großteil der Kiefernwälder Niedersachsens befindet sich innerhalb des blauen Rechtecks.

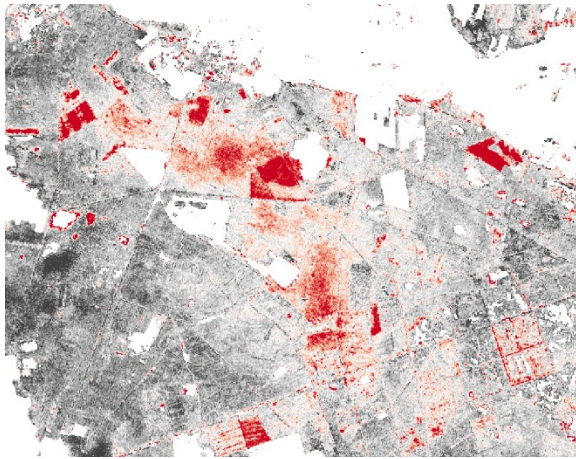
### 3. Ergebnisse und Erfahrungen der Anwendungen in der Praxis

Insgesamt konnten mehrere KGS-Fraßereignisse mittels des oben beschriebenen Verfahrens erfolgreich erfasst werden und die Information in Form von Karten an die zuständigen Forstbetriebe weitergeleitet werden. Im Folgenden wird das Vorgehen an einem Beispiel erläutert:

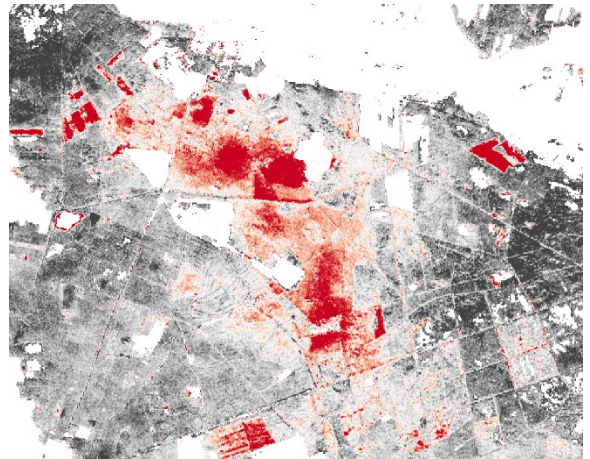
Die in Abschnitt 2.2.5. beschriebene Methodik wurde im Frühsommer 2023 angewandt, um den großflächigen Fraß in Kiefernbeständen durch Larven der Kleinen Dunklen Kiefernbuschhornblattwespe (*Gilpinia frutetorum*) in den ostniedersächsischen Landkreisen Lüneburg und Lüchow-Dannenberg räumlich sichtbar zu machen. Somit konnte, nachdem die fraßverdächtige Fläche durch die Abt. Waldschutz der NW-FVA an das zuständige Forstamt gemeldet wurde, eine schnelle Verifizierung sowie qualitative und quantitative Einschätzung der Situation erreicht und die weitere Maßnahmenplanung unterstützt werden. Ortsbegehungen zeigten, dass an den geschädigten Kiefernbeständen mehrheitlich nur noch der Maitrieb vorhanden war. Darüber hinaus war es möglich, die zeitliche Dynamik des Zustandes der Benadelung der Kiefernkronen anhand der NDVI-Differenzen zu visualisieren (Abb. 10). Die erstellten Karten dienten dem zuständigen Forstpersonal als Orientierungshilfe bei der Suche nach weiteren bzw. neuen Befallsgebieten. Durch die verstärkte Aktivität verschiedener Parasitoiden und weitere Witterungseinflüsse wie starke Regenfälle wurde die Massenvermehrung der Kleinen Dunklen Kiefernbuschhornblattwespe gestoppt und die Kiefernkronen wurden revitalisiert (siehe Abb. 10).

Teilweise führte die Methodik zur Identifizierung von Schadflächen auch dazu, dass Flächen erfasst wurden, auf denen die Abnahme der Nadelmasse nicht durch KGS bedingt war, sondern andere Ursachen (Windwurf, Befall durch Borkenkäfer bzw. Kiefernprachtkäfer, Pilzpathogen Kiefern Nadelschütte, Durchforstungen und Kahlschläge) verantwortlich waren.

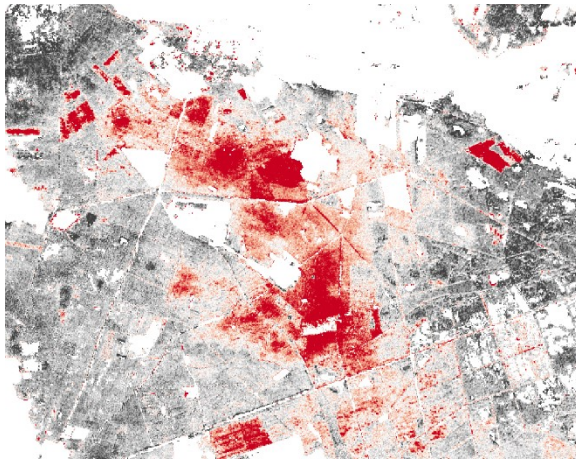
09.05.2023



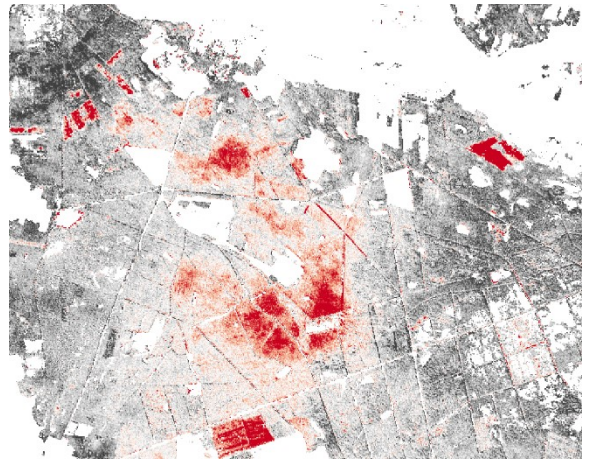
03.06.2023



18.06.2023



08.07.2023



06.09.2023

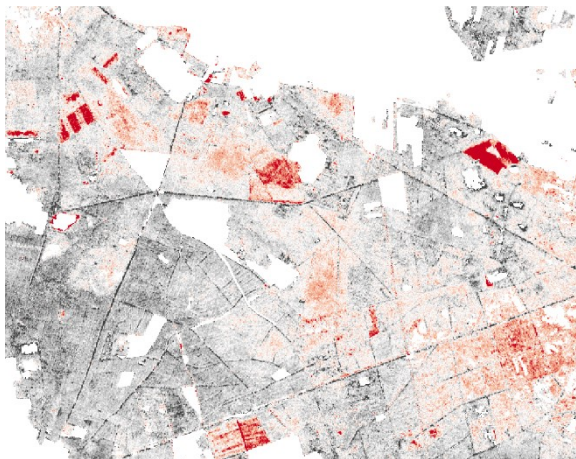


Abbildung 10: Zeitreihe der NDVI Differenz zur Visualisierung der räumlichen und zeitlichen Entwicklung des Befalls durch die Kleine Dunkle Kiefernbuschhornblattwespe in einem Kiefernwald nahe Gartow (Niedersachsen).



## 4. Diskussion

### 4.1. Möglichkeiten & Grenzen der Detektion von Fraßschäden auf Kiefernwaldflächen durch fernerkundungsgestützte Verfahren

Die Vorteile der hier beschriebenen Methode bestehen darin, dass eine flächendeckende Untersuchung der Kiefernwaldflächen durchgeführt werden kann, um mit den gewonnenen Informationen die terrestrische Überwachung von Kiefernwäldern zu ergänzen. Die erstellten Karten können beispielsweise als Grundlage für terrestrische Untersuchungen der Schadflächen durch KGS dienen und tragen zur besseren Identifizierung bzw. Abgrenzung von Gradationsflächen, z. B. zur Vorbereitung von Bekämpfungsmaßnahmen, bei. Die Methode eignet sich auch, um sich einen schnellen Überblick über aktuelle Fraßschäden durch Larven der KGS zu verschaffen und Neubefall rechtzeitig zu entdecken.

Die bisherigen Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass die Methode noch nicht geeignet ist, einen leichten Initialbefall durch KGS verlässlich zu erfassen. Der NDVI-Differenzgrenzwert von -0,2, der zur Erfassung gravierender KGS-Schäden verwendet werden kann, basiert auf Erkenntnissen einer nur geringen Anzahl von Testflächen. Eine Erweiterung der Datenbasis wäre daher empfehlenswert. Auch wurde der Wert auf einen niedrigen Wert festgelegt, um zu verhindern, dass atmosphärische Störungen, z. B. aufgrund von Schleierwolken oder Dunst, zu Fehlklassifikationen führen. Der niedrige Schwellenwert verringert im Gegenzug die Möglichkeit leichten KGS-Fraß zu erfassen.

Auch muss berücksichtigt werden, dass die Methode nicht den expliziten Grund für das Absinken des NDVI bzw. der Vitalität bestimmen kann. Neben Nadelfraß durch KGS existieren weitere Gründe, die eine NDVI-Abnahme bedingen können. Dazu gehören z. B. Trockenstress (Peters et al., 2002), Windwurf (Olmo et al., 2021), Borkenkäfer (Meng et al., 2022) oder Pilzkrankheiten wie *Diplodia*-Triebsterben bei Kiefern.

Auch eine vom Menschen durchgeführte waldbauliche Maßnahme, wie z. B. Holzeinschlag, führt zur Abnahme des NDVI. Bei starken Durchforstungen oder Holzerntemaßnahmen unterscheiden sich die NDVI-Differenzbilder jedoch in der Regel deutlich vom KGS-Befall, da hier die erfassten Flächen scharf abgegrenzt sind und i.d.R. den Bestandesgrenzen folgen.

Fehlklassifikationen durch Wolken oder Wolkenschatten können ebenfalls vorkommen, können aber durch einen Abgleich mit der als Echtfarbenkomposite dargestellten Sentinel-2-Bildern mittels GIS-Software als solche identifiziert werden.

### 4.2. Verbesserungsmöglichkeiten der Methodik

Um die Methodik zu verbessern, sollte eine weitere Automatisierung der Erkennung verdächtiger KGS-Bereiche in den NDVI-Differenzbildern erreicht werden. Verschiedene Ansätze, z. B. objektbasierte Klassifizierung, wurden bereits getestet, es wurden jedoch noch keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt. Klassifikationsalgorithmen aus dem Bereich Deep Learnings könnten nützlich sein, die radialen, graduellen Übergänge im NDVI-Differenzraster zu detektieren. Für das erfolgreiche Training von Deep Learning Modellen wäre jedoch eine größere Anzahl an Referenzdaten nötig, die zuvor anhand verschiedener Quellen, z.B. dem Waldschutz-Meldeportal der NW-FVA, generiert werden müssten. Zudem könnten Methoden der generativen KI zur künstlichen Erstellung von Trainingsdaten genutzt werden.

Bei der Erkennung intensiver Fraßereignisse hat sich gezeigt, dass Kahlflächen und kleine Wolken häufig als KGS-Schäden klassifiziert werden. Um dies zu vermeiden, wäre ein zusätzlicher Schritt denkbar, bei dem spektrale Unterschiede (Abb. 11) zwischen KGS-Schadflächen, Wolken und Kahlflächen zur Unterscheidung herangezogen werden. Für mehrere Vegetationsindizes wurden bereits spektrale Unterschiede für einzelne Testflächen untersucht, wobei der Chlorophyll Red-Edge Index (Gitelson et al., 2006) einer der vielversprechendsten Indizes zu sein scheint (Abb. 12).

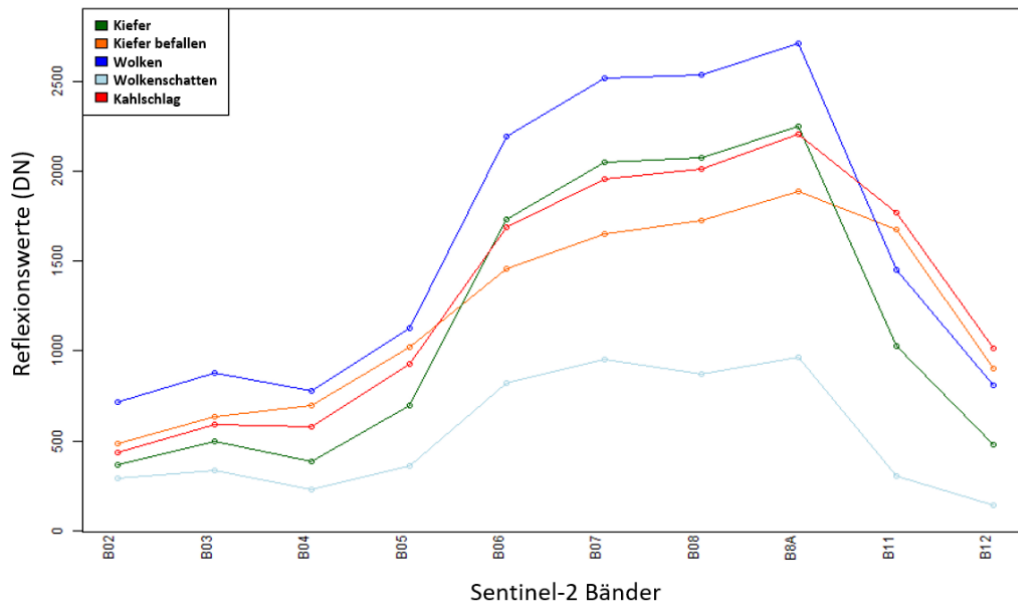


Abbildung 11: Spektrale Unterschiede zwischen gesunden Kiefern, befallenen Kiefern, Wolken, Wolkenschatten und Kahlflächen. Die Werte basieren auf Testflächen in Sachsen-Anhalt im LZW Forstamt Letzlingen.

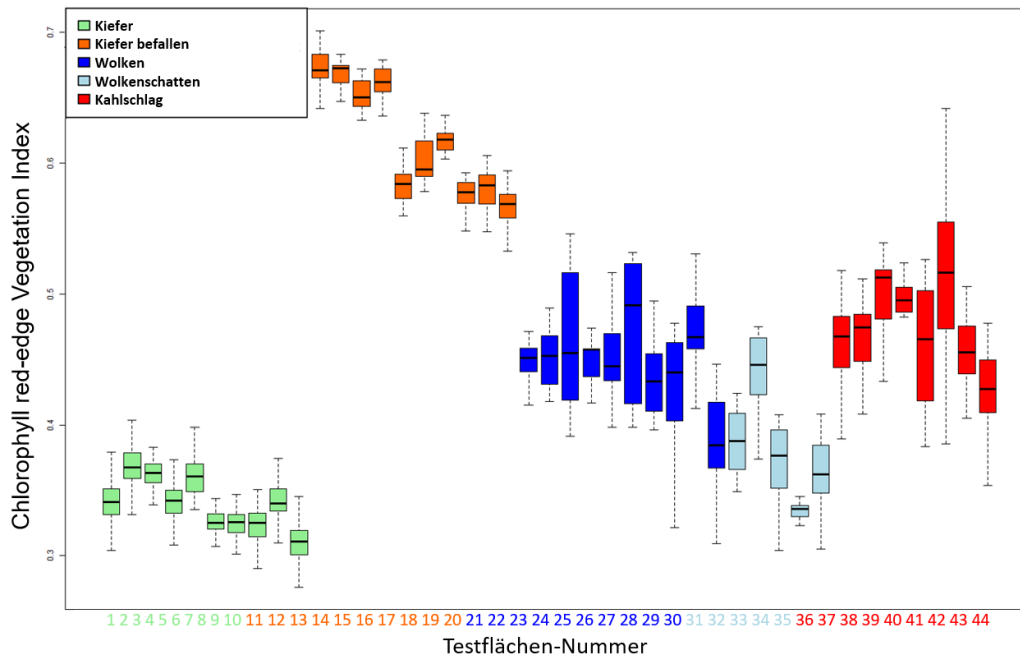


Abbildung 12: Chlorophyll red-edge Vegetation Index  $((B7/B5)-1)$  für die Unterscheidung zwischen befallenen KGS-Flächen und Wolken, Wolkenschatten und Kahlflächen.

Wie oben bereits beschrieben, führen atmosphärische Bedingungen, insb. Bewölkung, häufig dazu, dass Sentinel-2-Aufnahmen nicht ausgewertet werden können. Zu diesem Zweck könnte es hilfreich sein, auch andere Datenquellen hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Erkennung von KGS-Fraßereignissen zu untersuchen. Das harmonisierte Produkt Landsat/Sentinel-2 bietet sich hierbei an. Dies würde eine noch höhere zeitliche Auflösung von 2-3 Tagen für die überwachten Gebiete ermöglichen, mit dem Nachteil, dass teilweise eine räumliche Auflösung von nur 30 m anstelle von 10 m verfügbar wäre.

Eine weitere Datenquelle, die noch überprüft werden sollte, sind RADAR-Daten. Beispielsweise wäre ein möglicher Ansatz, die Modellierung des NDVI auf Basis von RADAR Daten, wie es Mazza et al. (2018) mit einem Sentinel-1 basierten Deep Learning Ansatz demonstrieren. Im Rahmen des KGS-SAT Projekts wurde die Nützlichkeit von Sentinel-1 Daten bisher nur für ein Gebiet mit relativ schwachem (initialem) Befall getestet. Dabei waren auf Basis des Radar Vegetation Indexes (RVI) die befallenen Flächen nur geringfügig von nicht befallenen zu unterscheiden. Eine abschließende Beurteilung der Nützlichkeit von RADAR Daten in diesem Kontext konnte bisher nicht vorgenommen werden.

Eine weitere Möglichkeit, die fernerkundungsbasierte KGS-Überwachung zu verbessern und zu einer weiteren Automatisierung zu führen, wäre die Betrachtung eines Zeitreihenmodells (Pasquarella et al., 2022; Decuyper et al., 2022). Einzelne Pixel und ihre phänologische Entwicklung würden hierbei bzgl. ihrer spektralen Entwicklung betrachtet. Kommt es zu einer deutlichen Abweichung von der erwarteten Entwicklung, kann daraus auf einen Schaden geschlossen werden. Genaue Ursachen der spektralen Veränderungen bleiben hierbei allerdings ebenfalls unklar und müssen vor Ort beurteilt werden.

Neben der Verbesserung der Erfassungsqualität, sollte auch die Aufbereitung der Ergebniskarten weiterentwickelt und standardisiert werden, um deren Verständlichkeit für verschiedene Nutzendengruppen zu erhöhen. Beispielsweise wäre es hilfreich, die NDVI-Differenz in einen Wert für die Vitalitätsänderung (Zunahme und Abnahme) zu übersetzen. Auch sollte die Farbskala der Kartendarstellung standardisiert werden. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass die Försterinnen und Förster die NDVI-Differenzbilder grundsätzlich gut interpretieren können.

#### 4.3. Entwicklung eines Modells für die Einstufung von Entlaubungsklassen

Eine weitere Verarbeitung der generierten Produkte (NDVI-Differenz & klassifizierte KGS-Karten) zu einer Darstellung von Entlaubungsklassen wie von Marx & Kleinschmidt (2017) demonstriert, wäre wünschenswert. Dafür wäre eine große Anzahl Referenzdaten aus vielfältigen Kiefernwäldern nötig, um entsprechende Modelle trainieren zu können. Bezüglich der Reflexionseigenschaften von Kiefernwäldern haben Grabska & Socha (2021) bereits verschiedene Faktoren wie Kronenschluss, Bestandesdichte oder Unterholz identifiziert, die berücksichtigt werden müssten. Auch phänologische Prozesse und die Fruktifikation der Kiefer können zu schwankenden Spektralwerten führen und sollten berücksichtigt werden (vgl. Abb. 13).

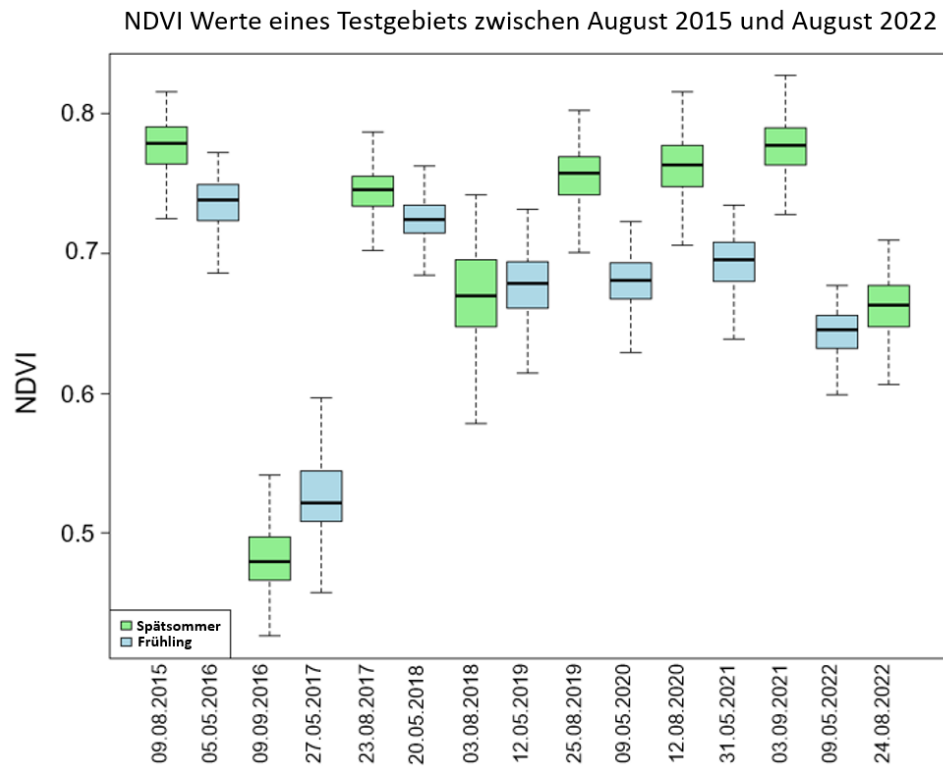


Abbildung 13: Variation des NDVIs auf einer 1 ha Kiefernfläche im Zeitraum 2015 – 2022 (Zeitpunkt KGS Befall September 2016). Auch die natürliche Variation der Vegetationsindizes kann zu Fehlinterpretationen führen. Vergleicht man die Boxplots vom 03.08.2018 und 03.09.2021, zeigen sich deutliche Unterschiede bei den NDVI-Werten innerhalb des Testgebiets.

## 5. Fazit

Das entwickelte Verfahren zur Erfassung von Flächen, auf denen Fraß an Kiefern in unterschiedlichen Stadien akut ist, hat in den durchgeführten Tests gute Ergebnisse geliefert. Die Rückmeldungen der Forstbetriebe waren sehr positiv und die bereitgestellten Informationen über Ort und Ausmaß geschädigter Bereiche in Kiefernwäldern wurden von den für Waldschutz zuständigen Personen als hilfreich angesehen, da Befallsherde i.d.R. unentdeckt geblieben wären.

Die Prozessierung der Sentinel-2-Satellitendaten ist zum jetzigen Zeitpunkt noch vergleichsweise arbeitsaufwändig. Die regelmäßige Auswahl wolkenfreier Sentinel-2-Aufnahmen und die visuelle Interpretation der aus den Daten erzeugten NDVI-Differenzbilder erfordern einen erheblichen personellen Einsatz. Es wurden jedoch diverse Optionen identifiziert, um das Verfahren weitergehend zu automatisieren und dadurch zur Praxisreife zu entwickeln. Ein Konzept zur Integration des fernerkundungsgestützten Verfahrens in das bestehende terrestrische KGS-Monitoring der niedersächsischen Forstbetriebe sollte in einem Folgeprojekt bearbeitet werden.

## 6. Literatur

- Blickensdörfer, L., Oehmichen, K., Pflugmacher, D., Kleinschmit, B., Hostert, P. (2024). Large-area tree species mapping across environmental gradients: Combining Sentinel-2 and Sentinel-1 time series with German National Forest Inventory data.
- Decuyper, M., Ch´avez, R.O., Lohbeck, M., Lastra, J.A., Tsendbazar, N., Hackl´ander, J., Herold, M., Vågen, T.G., 2022. Continuous monitoring of forest change dynamics with satellite time series. *Remote Sens. Environ.* 26.
- Eklundh, L., Johansson, T., Solberg, S. (2009): Mapping insect defoliation in Scots pine with MODIS time-series data. *Remote Sensing of Environment*, 113/2009, 1566-1573
- Fleck S, Albert M, Plasil P, Nagel R-V, Suttmöller J, Ahrends B, Schmidt M, Evers J, Hansen J, Overbeck M, Schmidt W, Spellmann H, Meesenburg H (2015) Pilotstudie zu den lokalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft in ausgewählten Regionen Sachsen-Anhalts. Beiträge aus der NW-FVA, Band 13, Göttingen
- Gao, Y., Skutsch, M., Paneque-Gálvez, J. and Ghilardi, A. 2020 Remote sensing of forest degradation: a review. *Environ. Res. Lett.* 15(10), 103001.
- Gitelson, Anatoly A.; Keydan, Galina P.; Merzlyak, Mark N. (2006): Three-band model for non-invasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves
- Grabska, E.; Hawryło, P.; Socha, J. Continuous detection of small-scale changes in scots pine dominated stands using dense sentinel-2 time series. *Remote Sens.* 2020, 12, 1298.
- Grabska, E., Socha, J. (2021): Evaluating the effect of stand properties and site conditions on the forest reflectance from Sentinel-2 time series. *PLoS ONE* 16(3): e0248459.
- Hawryło, P., Bednarz, B., Wężyk, P. & Szostak, M. (2018): Estimating defoliation of Scots pine stands using machine learning methods and vegetation indices of Sentinel-2. *European Journal of Remote Sensing*, 51/2018, 194-204
- Kätzel R, Löffler S, Möller K (2008) Zur physiologischen Anpassungsfähigkeit der Waldkiefer. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (ed) Die Waldkiefer – Fachtagung zum Baum des Jahres 2007. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, vol. 2. Universitätsverlag Göttingen, Göttingen.
- R.E. Kennedy, P.A. Townsend, J.E. Gross, W.B. Cohen, P. Bolstad, Y. Wang, P. Adams Remote sensing change detection tools for natural resource managers: understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects *Remote Sens. Environ.*, 113 (2009), pp. 1382-1396
- Kharuk VI, Ranson KJ, Fedotova EV. Spatial pattern of Siberian silkmoth outbreak and taiga mortality. *Scand J For Res.* 2007;22:531–536.
- Kharuk VI, Ranson KJ, Kozuhovskaya AG, Kondakov YP, Pestunov IA. NOAA/AVHRR satellite detection of Siberian silkmoth outbreaks in eastern Siberia. *Int J Remote Sens.* 2004;25:5543–5555.
- Marx, A., Kleinschmit, B. (2017): Sensitivity analysis of RapidEye spectral bands and derived vegetation indices for insect defoliation detection in pure Scots pine stands. *iForest*, 10/2017, 659-668

- Mazza, A.; Gargiulo, M.; Scarpa, G.; Gaetano, R. Estimating the NDVI from SAR by Convolutional Neural Networks. In Proceedings of the IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 22–27 July 2018; pp. 1954–1957.
- Meng, R.; Gao, R.; Zhao, F.; Huang, C.; Sun, R.; Lv, Z.; Huang, Z. Landsat-based monitoring of southern pine beetle infestation severity and severity change in a temperate mixed forest. *Remote Sens. Environ.* 2022, 269, 112847.
- Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (2017): Waldschutzbericht 2016
- Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (2018): Waldschutzbericht 2017.
- Möller K (2009) Aktuelle Waldschutzprobleme und Risikomanagement in Brandenburgs Wäldern. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 42:63–72
- Olmo, V.; Tordoni, E.; Petruzzellis, F.; Bacaro, G.; Altobelli, A. Use of Sentinel-2 Satellite Data for Windthrows Monitoring and Delimiting: The Case of “Vaia” Storm in Friuli Venezia Giulia Region (North-Eastern Italy). *Remote Sens.* 2021, 13, 1530.
- Olsson, P.-O., Kantola, T., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Jönsson, A. M. and Eklundh, L. 2016 Development of a method for monitoring of insect induced forest defoliation – limitation of MODIS data in Fennoscandian forest landscapes. *Silva Fenn.* 50(2), 1495.
- Peters, A. J., E. A. Walter-Shea, L. Ji, A. Vina, M. Hayes, and M. D. Svoboda (2002), Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 68(1), 71–75.
- R Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Senf, C., Pflugmacher, D., Wulder, M. A. & Hostert, P. Characterizing spectral–temporal patterns of defoliator and bark beetle disturbances using Landsat time series. *Remote. Sens. Environ.* 170, 166–177 (2015)
- Senf, C., Seidl, R., Hostert, P. (2017): Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions. *Int J Appl Earth Obs Geoinf.*, 60/2017, 49-60
- Simon König, Frank Thonfeld, Michael Förster, Olena Dubovyk & Marco Heurich (2023) Assessing Combinations of Landsat, Sentinel-2 and Sentinel-1 Time series for Detecting Bark Beetle Infestations, *GIScience & Remote Sensing*, 60:1, 2226515.
- Thayn JB. Using a remotely sensed optimized Disturbance Index to detect insect defoliation in the Apostle Islands, Wisconsin, USA. *Remote Sens Environ.* 2013;136:210–217.
- V.J. Pasquarella, P. Arevalo, K.H. Bratley, E.L. Bullock, N. Gorelick, Z. Yang, R.E. Kennedy Demystifying LandTrendr and CCDC temporal segmentation *Int. J. Appl. Earth Obs.*, 110 (2022), Article 102806.
- Zhe, Z., S. Wang, and C. E. Woodcock. 2015. “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 (March): 269–277.