

Möglichkeiten der satellitenbasierten Forstlichen Fernerkundung zur Unterstützung der bundesweiten Waldzustandserfassung (WZE)

Arbeitsgruppe Forstliche Fernerkundung der Länder AFFEL

Februar 2023

Inhalt

1. Einleitung.....	1
2. Gesetzliche Grundlagen und Methodik der Waldzustandserfassung (WZE)	2
3. Bisherige Fernerkundungsanwendungen für die Schaderfassung im Wald.....	3
4. Möglicher Beitrag der satellitengestützten Fernerkundung zur WZE - Chancen und Risiken.....	8
5. Fazit	9
6. Literatur	10
7. Vegetationsindizes und Farbkanäle.....	11

1. Einleitung

Die für viele Regionen Deutschlands außergewöhnlichen Trockenjahre 2018/19 führten zu bundesweit flächigen Absterben von Fichtenbeständen, sowie zu regional unterschiedlich ausgeprägten Schäden an Rotbuchen-, Eichen-, Kiefern- und Tannenbeständen.

Diese flächigen Absterberscheinungen können mit Fernerkundungsmethoden kartiert werden, da

- Satellitendaten (Sentinel-2) digital und georeferenziert mit hoher zeitlicher, räumlicher und spektraler Auflösung zur Verfügung stehen
- Geoinformationssysteme und Auswertungsverfahren weiterentwickelt sowie
- die seit etwa Mitte der 90er Jahre begonnene Digitalisierung des Forstkartenwerkes und der Waldinformationssysteme umgesetzt wurden.

Eine Vielzahl an regionalen Studien mit teilweise unterschiedlicher Untersuchungsmethodik und/oder Fernerkundungsdatengrundlage liegt hierzu vor (siehe Abschnitt 3). Diese wurden auch von Forstverwaltungen initiiert und finanziert. Ermutigt durch die Erfolgsgeschichte der satellitenbasierten Erfassung großflächig abgestorbener bzw. stark geschädigter Waldbestände wird die Forderung nach der Ausdehnung dieser Methodik auf die flächige Einschätzung der Vitalität der Wälder erhoben und als „zeitgemäßes“ Verfahren der Waldzustandserhebung bezeichnet. Gleichzeitig wird den Forstleuten vorgeworfen, diese neuen technischen Möglichkeiten der Fernerkundung nicht zu nutzen und an den alten Verfahren festzuhalten (Schreiben von Prof. Ibisch HNEE 2021 an Minister Vogel (MLUK) Brandenburg). Die terrestrische Waldzustandserhebung wurde im Jahre 1983 als ein Teil eines integrierten Konzeptes des Forstlichen Umweltmonitorings entwickelt. Die Waldzustandserhebung im engeren Sinne (WZE) hatte dabei die Aufgabe, mit einfachen Methoden sehr schnell, in einem engen Zeitfenster zum Höhepunkt der Vegetationsentwicklung, belastbare Daten zu erheben, wissenschaftlich fundiert auszuwerten und noch im selben Jahr einen Ergebnisbericht vorzulegen. Das Ziel hierbei war und ist eine flächenrepräsentative Aussage zu den neuartigen Waldschäden und die Aufdeckung von Schadschwerpunkten. 1984 wurde die erste Erhebung nach damals für Westdeutschland einheitlicher und damit vergleichbarer Methode durchgeführt, ausgewertet und neben den Länderberichten auch ein Bundesbericht erstellt. Ebenfalls 1984 ist mit der Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK) in der ehemaligen DDR ein vergleichbares Verfahren eingeführt worden. Die WZE wurde seitdem kontinuierlich weiterentwickelt und an neue Fragestellungen angepasst (z.B. ICP Forests 1987, Integration der neuen Bundesländer 1990, Empfehlungen der Bundesländer Expertengruppe 1997, zuordenbare Schadsymptome nach Roskams 2008) im Verfahren aber

konsequent konsistent gehalten. Es handelt sich damit mittlerweile um die langfristige deutschlandweite Zeitreihe zum Waldzustand.

2. Gesetzliche Grundlagen und Methodik der Waldzustandserfassung (WZE)

Durch die Mitarbeit im International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests), welches 1985 unter der Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention, formerly CLRTAP) der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) eingerichtet wurde, ist die Bundesrepublik Deutschland zu einer Waldzustandserhebung verpflichtet und hat dies auch im § 41a des Bundeswaldgesetzes festgeschrieben. Die Durchführung des forstlichen Umweltmonitorings liegt in der Verantwortung der Länder. Die Daten zur WZE werden jährlich an das Thünen-Institut für Waldökosysteme geliefert und auf Bundesebene (<https://www.bmel.de/DE/Wald-Fischerei/Waelder/texte/Waldzustandserhebung.html>) und europaweit (ICP Forests Technical Report) ausgewertet.

Die terrestrische WZE basiert auf einer von Fachwissenschaftlern entwickelten mathematisch-statistischen Stichprobeninventur (Schöpfer und Hradetzky 1983). Die Stichprobe wurde im Jahr 1984 eingerichtet und dauerhaft markiert, sie ist als permanente Stichprobe mit partiellem Replacement angelegt. Die Punkte der Stichprobe liegen streng systematisch auf einem an Gauß-Krüger Koordinaten orientierten Gitternetz. An jedem in eine Waldfläche fallenden Gitternetzpunkt ist ein Aufnahmepunkt mit 24 Probestämmen aus dem herrschenden Bestand eingerichtet.

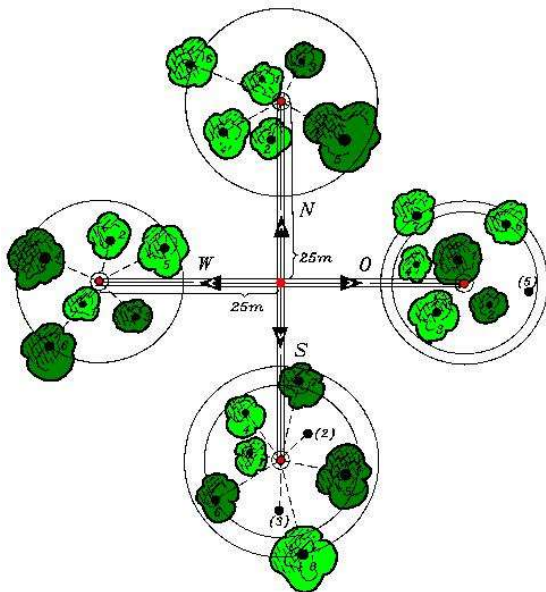


Abb.1: Stichprobenpunkt als Kreuztrakt mit vier 6-Baum-Stichproben, drei Probestämme wurden ersetzt

Die Erhebung an diesen Probestämmen erlaubt jeweils nur eine Punktinformation, die allenfalls für den in Baumarten- und Alterszusammensetzung vergleichbaren, umgebenden Waldbestand repräsentativ ist. Erst die Zusammenfassung und statistische Massenauswertung einer gewissen Anzahl an Aufnahmepunkten erlaubt den flächenrepräsentativen Rückschluss auf das jeweilige Bezugsgebiet. Die terrestrisch erhobenen Punktinformationen werden mit geostatistischen Methoden ausgewertet, um flächenhafte ökologische Basisdaten zur Bewertung von Wald- und Bodenzuständen zu regionalisieren (<https://www.waldwissen.net/de/technik-und-planung/waldinventur/vom-punkt-zur-flaeche>).

3. Bisherige Fernerkundungsanwendungen für die Schaderfassung im Wald

Die Nutzung von Fernerkundungsdaten stand von Beginn an im Fokus der mit der Waldzustandserhebung betrauten Forstwissenschaftler. Ab 1983 wurde von der Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (AFL, heute Arbeitsgruppe Forstliche Fernerkundung) ein auf Color-Infrarot-Luftbildern basierendes Verfahren entwickelt. Diese Luftbild-Waldschadenserhebung wurde in ihrer Methode erst national, dann international beschrieben (EUROPÄISCHE KOMMISSION (1992)). Mit der Luftbild-Waldschadenserhebung konnte der Waldzustand zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahme dokumentiert werden. Die Auswertung erfolgte zeitlich unabhängig, größere Stichprobenkollektive und damit Detailauswertungen in ausgewählten Regionen oder sogar die Vollerhebung ausgewählter Versuchsflächen und ihrer unmittelbaren Umgebung waren möglich, ebenso Zeitreihenanalysen im direkten Vergleich. Eine flächige Erhebung ganzer Wuchsgebiete war jedoch nicht möglich.

Zum Beispiel wurden in Rheinland-Pfalz bis 1993 im jährlichen Wechsel für die größeren Wuchsgebiete des Landes Luftbild-Waldschadenserhebungen durchgeführt. Anwendung fand ein Stichproben-Verfahren, welches sich an der terrestrischen Waldzustandserhebung orientiert, aber erheblich dichter angelegt ist (Heidingsfeld (1989, 1993)). Ziele waren hierbei die Differenzierung der Waldschäden innerhalb der Wuchsgebiete und Abhängigkeiten zum Standort, Exposition, Höhenlage aufzudecken. Die Luftbild-Waldzustandserhebungen zeigten, dass die Differenzierung der Waldschäden vornehmlich durch Baumart und Baumalter geprägt ist. Der Aufwand gesonderter Luftbild-Waldzustandserhebung war damit nicht mehr zu rechtfertigen.

In den 80er-Jahren wurden hauptsächlich die Verwendung von Luftbildinterpretation zur Waldzustandserhebung eingesetzt und dafür Verfahren und Interpretationsschlüssel entwickelt (Huss 1984). Seit den 90er Jahren gibt es basierend auf den Landsat-Satellitenaufnahmen Ansätze zur großflächigen visuellen Auswertung und automatisierten Erfassung von Schadflächen.

Zum Beispiel untersuchten Winter und Keil (1991) auf der Basis von Landsat MSS und TM die Erfassung von Windwurfflächen, Blößen und Auflichtungen ab 0,5 - 1 ha. Sie verwendeten dabei einen Index aus der Differenz des nahen zum mittleren Infrarot (TM4-TM5). Probleme dabei waren die Aufnahmegeometrie, die Vorprozessierung und Harmonisierung der Satellitenaufnahmen, die Verfügbarkeit von wolkenfreien Aufnahmen und die Vergrasung von Freiflächen.

Die freie Verfügbarkeit von Sentinel-2-Satellitendaten des europäischen Erdbeobachtungsprogrammes Copernicus, die deutlich gestiegenen Rechnerkapazitäten und die Weiterentwicklung von Prozessierungs- und Analyseverfahren führten zu einer aktuell großen Vielfalt an satellitenbasierten Auswertungen für den Forstbereich und zum Waldzustand.

Die Universität Bonn listet in Ihrer Zusammenstellung insgesamt 223 Indizes auf, welche auf der Basis von Sentinel-2-Daten entwickelt wurden und für die Klassifizierung der Landbedeckung zur Verfügung stehen (https://www.indexdatabase.de/db/is.php?sensor_id=96). Die passenden Indizes und Kombinationen für die jeweiligen Auswertungen herauszufiltern, ist Teil einer Vielfalt an Forschungs- und Entwicklungsprojekten.

Beispiele aktueller Anwendungen und Projekte

Aufgrund der seit Herbst 2018 grassierenden Borkenkäfer-Großkalamität entwickelte Wald und Holz NRW zusammen mit EFTAS GmbH 2019 ein fernerkundungsbasiertes, landesweites Borkenkäfer-Monitoring. Die Ergebnisse stehen in drei Schadklassen sowie zusätzlich als aggregierte Kalamitätskarte öffentlich in einem Geoportal (<https://www.waldinfo.nrw.de>) zur Verfügung und ermöglichen ein kontinuierliches Monitoring des Nadelwaldzustandes. Das zu Grunde liegende Prinzip bei der Auswertung der Sentinel-2-Daten sind durch Trockenheit und Kalamitäten induzierte Änderungen von Biomasse, Blattwasser und Blattpigmentierung, die sich in den optischen Eigenschaften des Kronendachs niederschlagen und über die Abbildung mit multispektralen Satellitensensoren eine Einschätzung der Vitalität zulassen.

Der Versuch im Bereich der Hauptschadenszone (ca. 50.000 ha Waldfläche) ein räumlich höher aufgelöstes wöchentliches Borkenkäfer-Monitoring mittels PlanetScope-Satellitendaten aufzusetzen scheiterte 2021 aufgrund fehlender wolkenfreier Szenen.

In Mecklenburg-Vorpommern untersuchte 2018 die Firma Luftbild Umwelt Planung GmbH (LUP Potsdam) mit Sentinel-2-Szenen die Möglichkeit, mit Hilfe von Vegetationsindizes Veränderungen in Waldflächen zu detektieren. Hierfür wurden in Veränderungsanalysen Satellitenszenen aus dem Klimanormaljahr 2017 mit jenen aus dem Trockenjahr 2018 mithilfe von 66 verschiedenen Indizes verglichen. Als „gute“ Veränderungsanzeiger erwiesen sich der NDWI, der DSWI und der NMDI. Im folgenden Jahr wurde nunmehr versucht, die stattfindenden Vitalitätsveränderungen der Wälder (Nachwirkungen des Trockenjahres) mit Hilfe dieser Indizes nachzubilden. Für die Buchenbestände waren die Ergebnisse unbefriedigend.

In Zusammenarbeit mit dem Staatsbetrieb Sachsenforst wurde von LUP Potsdam ein Verfahren entwickelt, welches eine großflächige räumliche Verortung und Bewertung des aktuellen Status der Störungsdynamik für vorrangig Fichten- und Kiefernbestände (*Picea abies* und *Pinus sylvestris*) in Sachsen ermöglicht. Beginnend von Herbst 2017 bis Herbst 2022 wurde eine Zeitreihe aufgebaut, die jeweils für Frühling und Herbst die Klassen Freifläche (Störungsfläche), Freifläche mit Jungwuchs und/oder Strauchvegetation, Fläche mit Vitalitätsverlust (voraussichtlich absterbend) und Fläche mit mittlerem Vitalitätsverlust differenziert. Die Grundlage für die Auswertung bilden die aus Sentinel-2-Daten abgeleiteten Vegetationsindizes (DSWI, NBR, NDVI, NDWI und SR-SWIR) und ein Random Forest Modell (Maschinelles Lernen). Zur besseren Differenzierung von Freiflächen und Freiflächen mit Jungwuchs / Strauchvegetation wurden Daten der RadarSatelliten Sentinel-1 verwendet. Für die Verifizierung der Daten wurden die im Gelände mittels Borkenkäfer-App erfassten Borkenkäferbefallsherde sowie die von unteren Forstbehörden bereitgestellten terrestrischen Referenzdaten verwendet. Die visuelle Validierung der Daten erfolgt stichprobenartig (Bundeswaldinventurnetz) mit hochauflösenden Satellitendaten oder digitalen Orthophotos.

In Brandenburg wurden im Rahmen von Werkverträgen satellitengestützte (RapidEye - 5m Bodenauflösung) Veränderungsanalysen und Index Berechnungen (RED Edge NDVI) zur flächigen Schaderfassung in Kiefernforsten unter Nutzung terrestrischer Kontroll- und Vorauswahlverfahren (Marx 2010, Marx et al. 2014) seit dem Jahr 2012 angewendet. Tests in Eichenbeständen ergaben aufgrund von Beimischung anderer Baumarten und Johannistriebbildungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Kostenneutrale und mehrkanalige Sentinel-2-Satellitenszenen, teilweise in Kombination mit höherauflösenden Sensoren (PlanetScope mit 3m Bodenauflösung), ersetzen in den letzten Jahren die RapidEye Ausgangsdaten (BeakConsultants 2021).

In Baden-Württemberg wird in dem Projekt fernerkundungsbasierte Waldschadenskarten ein Verfahren zur Erfassung von flächigen Borkenkäferschäden und daraus folgenden Freiflächen auf der Basis von Sentinel-2-Daten entwickelt. Hierbei zeigte sich ein großer Einfluss der Vorprozessierung der Satellitendaten auf das Auswertungsergebnis. Die Vorprozessierung umfasst die atmosphärische Korrektur, die Erfassung von Wolken und Wolkenschatten, Dunst und die topographische sowie geometrische Korrektur der Satellitendaten. Für die Erfassung von kleinteiligen Schäden von Buche

und Kiefer in strukturierten Beständen werden sehr hochauflösende Satellitendaten eingesetzt (Worldview - 50 cm Bodenauflösung).

Im Projekt „Sentinels für Thüringer Informationssysteme (SenTHIS)“ wurden vom Forstlichen Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha (FFK Gotha) – die Forschungseinrichtung von Thüringenforst AÖR – Verfahren zur Erfassung von Bestandesparametern (Hauptbaumart, Kronenschlussgrad usw.) und Schäden (Hagelschäden, Sturm) getestet. Daneben unterstützte das FFK Gotha Partner aus Industrie und Forschung in der Entwicklung von Verfahren zur Erfassung von Kalamitätsflächen (Kahlflächen, abgestorbene Bestände) und der Vitalität von Beständen (vor allem Vitalitätseinschränkungen infolge von Trockenstress). Seit 2018 werden zweimal jährlich die Kalamitätsflächen – im immergrünen Nadelwald (im unbelaubten Zustand) und im Gesamtwald – erfasst.

In Niedersachsen arbeitet die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) in einem vom Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz finanzierten Projekt an der Entwicklung eines landesweiten, satellitenbasierten Systems zur weitgehend automatisierten Erfassung von flächig auftretenden Bestockungsveränderungen. Zielobjekte der Erfassung sind die im jeweils zurückliegenden Jahr entstandenen (a) Kahlflächen, (b) Flächen mit stehendem oder liegendem Totholz und (c) Flächen mit geworfenen, noch lebenden Bäumen ab einer Mindestgröße von 0,25 ha. Die Erfassung findet jährlich anhand von Sentinel-2-Aufnahmen aus dem Monat August statt und erfolgt mittels einer Veränderungsanalyse, in der die Spektralwerte der aktuellen Aufnahme mit denen der Aufnahme aus dem Vorjahr verglichen werden. Flächen auf denen die Abweichungen einen bestimmten Schwellenwert übersteigen, werden als „Flächen mit erheblicher Bestockungsabnahme“ klassifiziert. Eine auf Luftbilddauswertungen basierte Validierungsstudie ergab für das satellitenbasierte Verfahren einen Übererfassungsfehler von ca. 20% sowie einen Untererfassungsfehler von ca. 20-30%. Weiterhin wurde beobachtet, dass die Erfassungsfehler mit abnehmender Flächengröße zunehmen („Kleinflächenproblematik“).

An der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) wurde im Projekt "BeechSAT" die Eignung von Luftbilddaufnahmen und satellitengestützten Sensoren (WorldView-3, SkySat, PlanetScope Dove, RapidEye und Sentinel-2) unterschiedlicher Auflösung zur einzelbaumweisen bis bestandesbezogenen Schaddetektion von Buchen getestet.

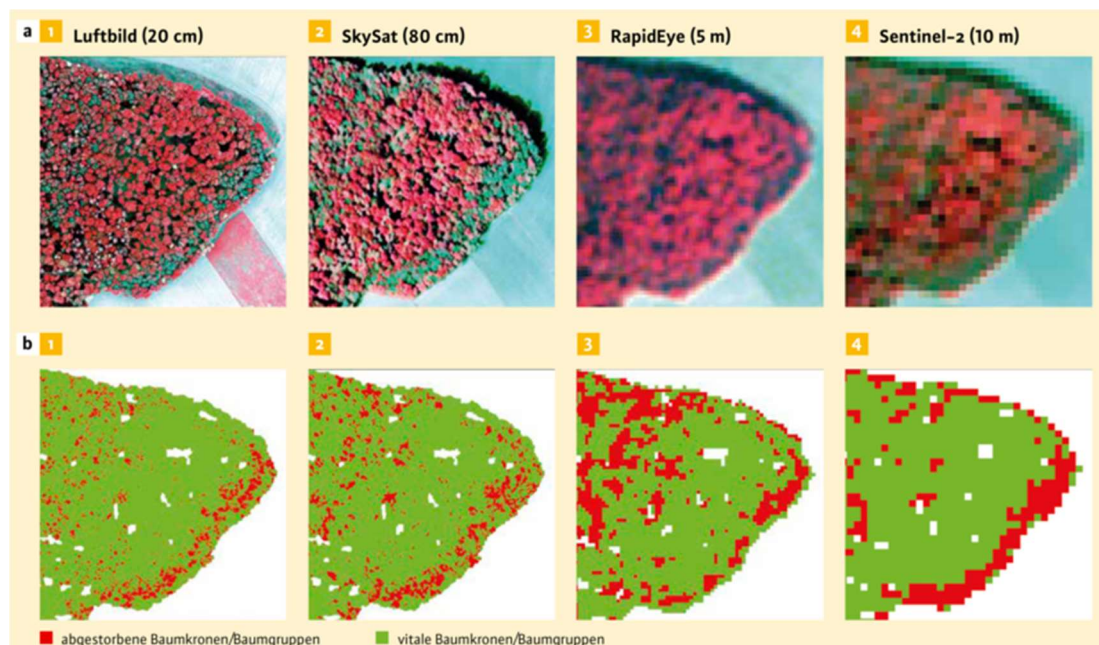


Abb.: 2 zeigt in der unteren Abbildungsreihe beispielhaft das Klassifizierungsergebnis basierend auf Luftbilddaten und verschiedenen Satellitenbilddaten (SkySat, RapidEye und Sentinel-2). In roter Farbe sind die identifizierten abgestorbenen Baumkronen bzw. Baumgruppen dargestellt. Die oberen Abbildungen zeigen Color-Infrarot (CIR)-Darstellungen.

Bezogen auf die Satellitenbilddaten konnten mit den hochaufgelösten Sensoren WorldView-3 und SkySat die besten Ergebnisse erzielt werden. Die sehr hohe räumliche Auflösung des panchromatischen Kanals (0,3 m) von WorldView-3 kommt der Auflösung der Luftbilddaten (0,2 m) sehr nahe. Die Ergebnisse des Projektes IpsSAT zur Detektion von Borkenkäferschäden weisen in eine gleiche Richtung.

In dem Projekt ForDroughtDet (2021) der TU München, dem DLR und der Universität Trier standen die physiologisch-morphologischen Veränderungen des Zustands von Waldbeständen im Mittelpunkt, um Trockenstress mittels Fernerkundungsdaten flächendeckend und automatisiert zu detektieren. Für die Implementierung eines Sentinel-2 gestützten Vitalitäts- und Kalamitätsmonitorings auf Landesebene wird ein kombinierter Vitalitäts-Änderungs-Index (CVCI) empfohlen. Dieser baut auf folgenden Indizes auf, welche jeweils ergänzende Informationen enthalten:

- Biomasse (NDVI),
- Bestandeschlorophyll (RCHLI, NDRE2) und
- Wassergehalt (NDWI, MSI).

Speziell für die satellitengestützten Fernerkundungsmethoden (Sentinel-2) wurde betont, dass eine Einstufung unterschiedlich stark gestresster Baumbestände anhand absoluter Spektralwerte nicht zielführend ist. Vitalitätsveränderungen müssen anhand eines Vergleichs der Spektralwerte von Satellitenszenen aus Zeiträumen ohne Trockenheits- und Insektenschäden identifiziert werden.

Zu dieser Fragestellung werden in dem Projekt First 2.0 neben der Indizesänderung die jahreszeitlichen und regional unterschiedlichen Änderungen der Phänologie ausgewählter Buchen- und Kiefernflächen der Jahre 2016 bis 2022 berücksichtigt. Mit Hilfe der KDE(Kernel-Densität-Estimation)- Funktion wird die in den DSWI-Werten angezeigte Vitalitätsveränderung in jedem Pixel über die Abweichung zur mittleren baumartenspezifischen Phänologiekurve je Pixel bestimmt. Damit kann nunmehr bereits Ende August zwischen geschädigten und ungeschädigten Buchenbeständen unterschieden werden. Bei der Kiefer, mit anderem jahreszeitlichen Phänologieverlauf, spiegelt sich Ende August der Nadelabfall des letzten Nadeljahrgangs am Astende in den DSWI Werten wider. Das Verfahren erwies sich für Detektion von „vitalitätsauffälligen“ Buchen- und Kiefernbeständen durch die Berücksichtigung der regionaltypischen und baumartenspezifischen Phänologiekurven innerhalb der betrachteten Zeitschnitte als robust, kann aber keine Aussage über die Art der Schädigung treffen.

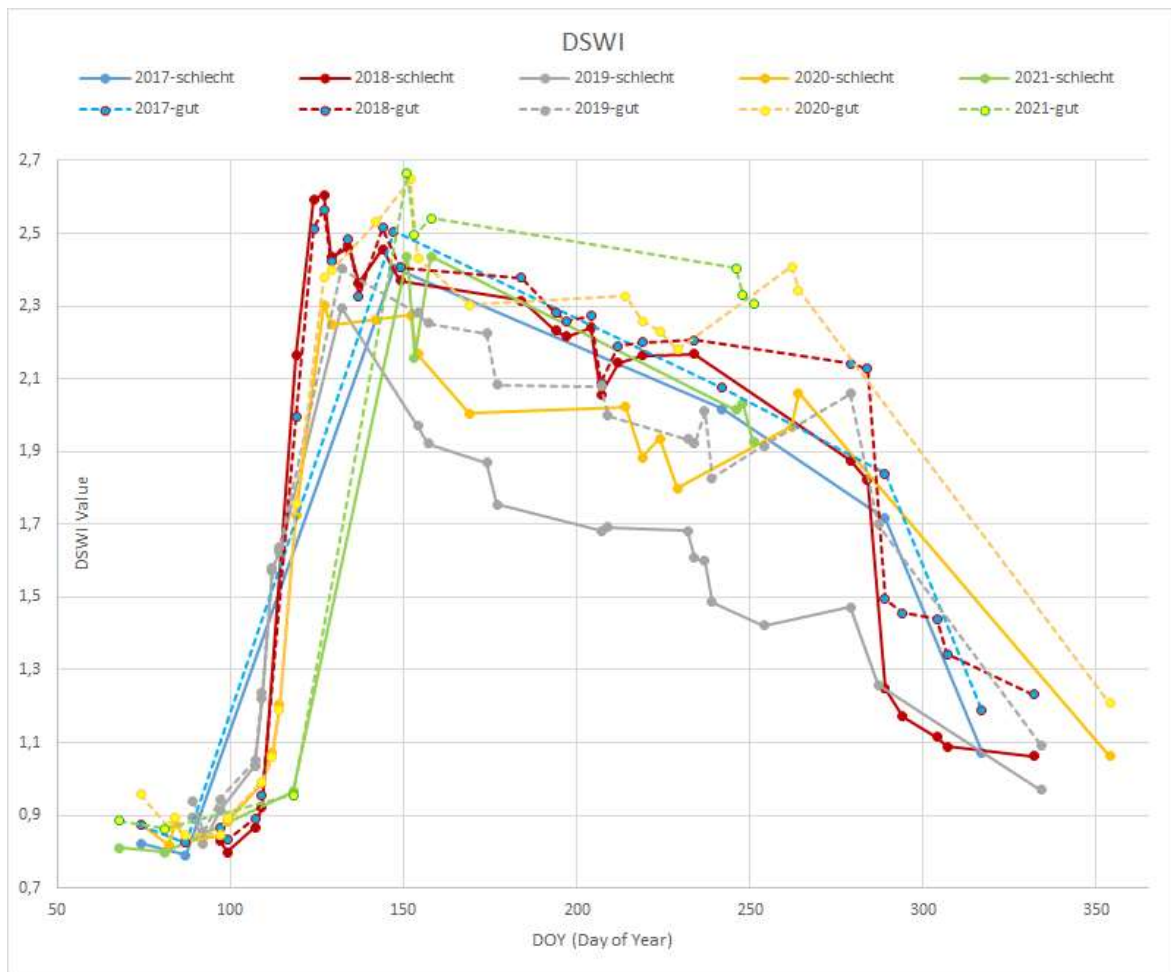


Abb. 3: Darstellung des Jahresverlaufs des DSWI (Mittelwert, berechnet aus Sentinel-2-Daten) von insgesamt 82 Buchenbeständen im Forstamt Lüttenhagen, Mecklenburg-Vorpommern. Es wurden 34 infolge von Sommertrockenheit geschädigte und 49 ungeschädigte Buchenbestände beobachtet (LFoA MV – First 2.0 Projekt).

Zugeschnitten auf die Baumart Esche und deren Monitoring wird innerhalb des länderübergreifenden Projektes FraxMon ein Monitoringverfahren zur Erfassung des Eschenzustandes entwickelt. Hierfür werden Luftbildinterpretationsschlüssel für die Differenzierung der Baumart Esche von anderen Baumarten und zur Erfassung des Eschenzustandes in 5 Schadklassen erarbeitet. Die Interpretationsverfahren werden auf den Intensivbeobachtungsflächen eingesetzt und den Ergebnissen der terrestrischen Bonitur gegenübergestellt. Für die Automatisierung der Erfassung des Eschenzustandes werden Befliegungen mit Hyperspektralkameras getestet. (<https://www.fraxforfuture.de/verbuende/fraxmon>)

Im Projekt FNEWS wird vom Thünen-Institut in Zusammenarbeit mit den Technologiepartnern Joanneum Research und WSL sowie den Praxispartnern FVA Freiburg, LWF Freising, NW-FVA Göttingen und Staatsbetrieb Sachsenforst ein automatisiertes nationales fernerkundungsbasiertes Erfassungssystem für Waldschäden entwickelt. Ziel ist die Entwicklung von Services, welche Informationen direkt nach Schadereignissen (z.B. Sturmwurf) bei Verfügbarkeit wolkenfreier Sentinel-2-Daten (Near Real Time Produkt) und jährliche Waldschadenskarten basierend auf Zeitreihenanalysen bereitstellen. Die Veränderungsdetektion erfolgt mittels spezieller Filterverfahren. Das Monitoringsystem soll eine automatisierte und bundesweit einheitliche Erkennung von Schäden ermöglichen. (<https://www.fnews-wald.de>)

4. Möglicher Beitrag der satellitengestützten Fernerkundung zur WZE - Chancen und Risiken

Bisherige Projekte und Ansätze zur Vitalitätserfassung von Wäldern mittels Fernerkundungsdaten zeigen eine große Vielfalt an unterschiedlichen Methoden, sowie einen weiteren Entwicklungsbedarf für flächige Umsetzungen. Sie verdeutlichen den hohen Bedarf an Standardisierung der Fernerkundungsverfahren, einschließlich der Kombination verschiedener Sensoren (Luftbilder, LiDAR, verschiedene Satellitendaten), bevor sie für ein bundesweites Monitoring verwendet werden können.

Allgemeine Voraussetzung für die Umsetzung von großflächigen Monitoringverfahren mit Fernerkundungsdaten sind

1. der Aufbau entsprechender Daten- und Prozessierungsinfrastrukturen,
2. die rechtliche Nutzungsregelung wie Open Data und Informationssicherheit sowie
3. die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Sensordaten.

Um eine räumliche und zeitliche Übertragbarkeit von Verfahren zu ermöglichen sind radiometrisch stabile und standardisierte Sensordaten Voraussetzung.

Für die standardisierte und großflächige Anwendung sind wolkenfreie, radiometrisch optimierte und zur Bewertung von Zustandsveränderungen geeignete Spektraldaten mit Korrektur der Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrien erforderlich. Dies muss durch entsprechende Vorprozessierung der Satellitendaten gewährleistet werden.

Zudem beeinflusst die Bewölkung die Verwendbarkeit der optischen Satellitendaten erheblich, deshalb sind für ein dauerhaftes Monitoring und Zeitreihenauswertungen hohe Wiederholungsraten der Datenaufnahme: z. B. täglich (PlanetScope), alle 3 - 5 Tage (Sentinel-2) notwendig, um wolkenfreie Aufnahmen zu gewährleisten.

Zur Weiterentwicklung des WZE-basierten Vitalitätsmonitorings von Wäldern mittels Fernerkundungsverfahren sind folgende Aspekte zu berücksichtigen.

4. Eine Grundvoraussetzung ist eine definierte Wald-/Nichtwaldmaske.
5. Ergänzend sind Informationen über die bestockte Fläche, Wuchsklassen und Bestandesstruktur notwendig, welche aus Oberflächenmodellen gewonnen werden können. Die Struktureigenschaften (Kronenschluss, Bodenvegetation, Waldinnen- und Waldaussenränder, Straßen und Wege) und der Schattenwurf beeinflussen die Spektralinformation. Sie sind daher für die Einstufung der Vitalität und die Unterscheidung von Baumarten relevant. Für die bundesweite, regelmäßige und aktuelle Erfassung der Bestandesstrukturen und deren Veränderungen, welche für ein bundesweites Monitoring Voraussetzung sind, wären regelmäßige großflächige LiDAR-Abdeckungen, wie sie für den „digitalen Zwilling“ des Bundesamts für Geodäsie und Kartographie (2023-2026) geplant sind, hilfreich.
6. Als Schlüsselinformation gilt die flächendeckende (pixelbezogene) Kenntnis über die Baumart. Ein fernerkundungsbasierter Ansatz zur Identifikation von Baumarten ist die Analyse multisaisonaler Daten unter Berücksichtigung der Spektralinformation der Baumarten, deren regionalspezifisch, jahreszeitlichen Veränderungen aufgrund der phänologischen Entwicklung und der vertikalen Struktur der Baumkronen und Bestände (Wuchsklassen). Solange diese Daten noch nicht flächendeckend verfügbar sind, können ersatzweise entsprechende Laub-/Nadelwaldkartierungen verwendet werden.
7. Voraussetzung für die flächendeckende Auswertung sind Informationen über die Standortseigenschaften, da diese die spektrale Information der Waldbestände mit beeinflussen.
8. Das Verfahren wird in der Regel an Reinbeständen mit den Hauptwirtschaftsbaumarten aufgebaut. Die Ergebnisse sind somit nur für diese Bestandestypen repräsentativ, deren

Flächenanteil durch Waldumbau zukünftig zurückgehen wird. Problematisch ist die Übertragung auf Mischbestände in kleinflächigen Mischungsformen und Beständen mit Nebenbaumarten. Diese sind in den meisten aktuell verwendeten Modellen nicht abgebildet. Alternativ gibt es Ansätze, die sich mit den verschiedenen Mischungssituationen beschäftigen.

9. Aufbauend auf der Baumarten- und Bestandesidentifizierung erfolgt die Detektion von Schäden anhand der spektralen Signatur, durch Auswahl geeigneter Spektralkanäle bzw. Spektralindizes, und der Festlegung geeigneter Vergleichs- und Beobachtungszeiträume entsprechend der Phänologie und des Schadgeschehens. Ob und welche satellitenbasierte Spektralinformationen geeignet sind, den jeweiligen öko-physiologischen Zustand der Waldbestände mit ausreichender Genauigkeit zu beschreiben, ist noch nicht geklärt.
10. Für ein großflächiges und qualitätsgesichertes Monitoring ist die Entwicklung eines standardisierten Verfahrens, welches Qualitätssicherung und Standardisierung in allen Einzelaspekten beinhaltet, notwendig. Dies umfasst Eingangsdaten, Vorprozessierung, robuste Auswertungsmodelle und Validierungsverfahren.
11. Die Verbindungsmöglichkeit und der Zusammenhang der Fernerkundungsauswertungen mit terrestrischen Erhebungen sind noch nicht ausreichend erstellt und validiert. Für die Integration von Fernerkundungsdaten in das WZE-Monitoring ist eine stabile Verknüpfung zwischen den seit 38 Jahren terrestrisch erhobenen WZE-Informationen notwendig. Dies erfordert eine eindeutige Zuordnung der im WZE-Verfahren taxierten Baumkronen zu den Fernerkundungsdaten (s. Abb. 1). Die Lagekoordinaten dieser Baumkronen sind je nach Erhebungsstand in den einzelnen Bundesländern mit einem unterschiedlich großen Fehler erhoben. Die Auflösung der aktuell großflächig zur Verfügung stehenden Sentinel-2-Satellitendaten beträgt im günstigsten Fall 10 m. Die Lagegenauigkeit liegt bei ca. $\frac{1}{2}$ Pixel. Einzelkronen können so nicht identifiziert und zugeordnet werden. Zusätzlich unterscheiden sich beide Verfahren im Blickwinkel auf die Kronen. Vom Boden aus ist die Unterkrone im Vordergrund. Vom Satelliten und aus Luftbildern werden ausschließlich die nicht verdeckten Kronenteile, in der Regel die Oberkrone, erfasst. Die grobe Auflösung erzeugt das Problem von sogenannten Mischpixeln. Das bedeutet, dass bei nicht vollständig geschlossenem Kronendach, die Spektralinformation eine gemischte Information vom herrschenden Bestand, Unterstand, Bodenvegetation und Oberboden darstellt. Das gegenwärtige dem WZE-Verfahren zugrundeliegende Probeflächendesign (s. Abb.1) ist aufgrund der geschilderten Probleme nicht direkt mit Fernerkundungsmethoden verknüpfbar oder zu ersetzen. Dies würde neben einer methodischen Weiterentwicklung unter anderem eine bundesweit repräsentative Verteilung flächiger WZE-Aufnahmeflächen erfordern, die mit der gegenwärtigen Personalkapazität nicht zu stemmen sind.

5. Fazit

Die terrestrische Waldzustandserhebung ist ein bewährtes, laufendes Verfahren bei dem eine jetzt 38-jährige, weitgehend konsistente, deutschlandweite Zeitreihe besteht. Wir halten es zum aktuellen Zeitpunkt für essentiell, diesen wertvollen Datensatz zu erhalten und konsequent fortzuführen.

Eine bundesweite fernerkundungsbasierte Vitalitätseinschätzung kann die WZE in ihrer langjährig entwickelten und durchgeführten Form auf Einzelbaumebene nicht ersetzen. Fernerkundungsverfahren können jedoch ergänzend flächige Waldzustandsanalysen liefern und somit in Kombination mit den flächenrepräsentativen terrestrischen Stichprobenaufnahmen der WZE eine neue Qualität im Monitoring des Waldzustandes ermöglichen. Fernerkundungsverfahren müssten zu diesem Zweck weiterentwickelt werden, Prozessierungsinfrastrukturen, die rechenintensive Datenauswertungen erlauben, müssten ausgebaut werden und räumlich hoch aufgelöste Fernerkundungsdaten, wie LIDAR und Luftbild, regelmäßig erhoben und unkompliziert zugänglich gemacht werden.

6. Literatur

- ACKERMANN, J. ET AL (2022): Fernerkundungsdaten zur Schaderfassung in der forstlichen Praxis, AFZ – Der Wald 2022/2.
- BEAKCONSULTANTS (2021): Waldschutzmonitoring 2021 mit Satelliten-Daten, Vergabe-Nr. SE03 2021-91043-222010 (unv.)
- BMELF BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (HRSG.) (1997): Stellungnahme zur Erhebung des Waldzustandes und Empfehlung zur Weiterentwicklung des Verfahrens, Bonn, September 1997, 33S.
- EFTAS (2021): Fernerkundungsbasiertes Monitoring der Waldflächen NRWs, Projektbericht 06/2021, erstellt von Dr. Nils Wolf.
- ENGELS, F.; BLOCK, J.; WUNN, U. (2013): Methodenbeschreibung Terrestrische Waldzustandserhebung (WZE) in Rheinland-Pfalz. PDF-Download in der Internetpräsentation der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz unter www.fawf.wald-rlp.de ,19 S.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (HRSG.) (1992): Anwendung der Fernerkundung zur Beurteilung des Gesundheitszustandes der Wälder, Verlag Walpot S. A. Belgien.
- FORDROUGHTDET (2021): Gemeinsamer Abschluss-Bericht zu den Verbund-Vorhaben: Einsatz von Fernerkundung zur frühzeitigen Erkennung von Trockenstress auf gefährdeten Waldstandorten. Akronym: ForDroughtDet (Forest Drought Determination) TU München, DLR, TU Trier, FKZ: Waldklimafond FNR 22 WB 410601, 410602, 41603, 151 S. vom 15.4.2021.
- HEIDINGSFELD, N. (1989): Verfahren zur luftbildgestützten Intensiv-Waldschadenserhebung in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 10.
- HEIDINGSFELD, N. (1993): Neue Konzepte zum Luftbildeinsatz für großräumig permanente Waldzustandserhebungen und zur bestandesbezogenen Kartierung flächenhafter Waldschäden. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 23/93.
- HUSS, J. (HRSG) 1984: Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft, Wichmann Verlag Karlsruhe.
- LUP (2018): Untersuchungen zu Vitalitätsveränderungen in Waldgebieten Mecklenburg-Vorpommerns im Zuge der Sommertrockenheit 2018, Dokumentation (unv.).
- MARX, A. (2010): Erkennung von Borkenkäferbefall in Fichtenreinbeständen mit multitemporalen Rapid Eye-Satellitenbildern und Datamining – Techniken, in: Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart (4): 243 -252.
- MARX, A.; KEGEL, K; MÖLLER, K. (2014): Interpretationshilfe zur satellitenbasierten Fraßkartierung. Blackbridge AG Berlin, LFE (unv.).
- SCHÖPFER W. UND HRADECKY J. (1983): Zielsetzung, Methoden und Probleme der terrestrischen Waldschadensinventur Baden-Württemberg 1983. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg i. Brg. Heft 107.
- UN/ECE UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, ICP FORESTS (HRSG.) (2010): Manuals on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>
- UN/ECE UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, ICP FORESTS (HRSG.) (2020): Manuals on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>.
- WINTER UND KEIL (1991): Methodik kleinmaßstäbiger Wald- und Waldschadensinventuren mit Satellitenbildern. S. 116 ff; in: Oesten, G. et al: Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Stand und Entwicklungen.

7. Vegetationsindizes und Farbkanäle

Index	Bezeichnung	Formel
CI	Choloration Index	$(RED - BLUE) / RED$
CVCI	Combined Vitality Change Index (NDVI, EVI, NDRE2, CHLI, MSI, NDWI) ¹	$CVCI = \sum_{i=1}^n IDX_i / n$
DSWI	Disease Water Stress Index	$(NIR + GREEN) / (SWIR + NIR)$
EVI	Enhanced Vegetation Index	$2.5 \cdot ((NIR - RED) / ((NIR + 6 \cdot RED - 7.5 \cdot BLUE) + 1))$
MSI	Moisture Stress Index	$SWIR / NIR$
NBR	Normalized Burn Ratio	$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$
NDRE2	Normalized Difference Red Edge 2	$(NIR - RedEdge\ 1) / (NIR + RedEdge\ 1)$
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(MIR - NIR) / (MIR + NIR)$
NDWI	Normalized Difference Water Index	$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$
NMDI	Normalized Multiband Drought Index	$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$
RCHLI	Ratio Chlorophyll Index	$(NIR / Red\ Edge) - 1$
RED Edge NDVI	Red Edge Normalized Difference Vegetation Index	$(NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge)$
SR-SWIR	Simple Ratio SWIR - Red Edge	$RedEdge / (RED - SWIR)$

Kanäle	Beschreibung
BLUE	Wellenlängenbereich vom blauen sichtbaren Licht
GREEN	Wellenlängenbereich vom grünen sichtbaren Licht
RED	Wellenlängenbereich vom roten sichtbaren Licht
MIR	Mittleres Infrarot
NIR	Nahes Infrarot
Red Edge	Red Edge
SWIR	Kurzwelliges Infrarot