

# 19

## Monitoring von Borkenkäferschäden mit Satellitenbildzeitreihen

Einsatz von Satellitenbildzeitreihen zum echtzeitnahen Monitoring der Vitalität von Fichtenbeständen im Nationalpark Hunsrück-Hochwald



Die Wälder der Region wurden in den letzten Jahren aufgrund langanhaltender Dürreperioden erheblich geschädigt. Besonders betroffen sind die Fichtenbestände, in denen zusätzlich die massive Vermehrung von Borkenkäfern seit 2018 zu katastrophalen Schäden geführt hat. Für das flächendeckende Monitoring von Borkenkäferschäden bieten sich Daten und Methoden der Fernerkundung an. Für den Nationalpark wurde ein neues Verfahren getestet. Die Auswertung von aus Satellitenbildern abgeleiteten zeitlich hochauflösenden Vitalitätsinformationen ermöglicht die Identifizierung von Schäden, den Zeitpunkt des Störungsbeginns und die Stärke der Störung. Das Verfahren nutzt spektrale Indizes, um ökophysiologische Eigenschaften abzuleiten. Das Monitoring zeigt regional unterschiedliche Borkenkäferbefallsmuster und ermöglicht eine präzise Abschätzung der betroffenen Flächen. Der Monitoringansatz ist noch in der Entwicklungs- und Validierungsphase und die Ergebnisse werden vor Ort überprüft. Insgesamt bietet das Echtzeitmonitoring wertvolle Einblicke in die Ausbreitung von Borkenkäferschäden und kann wichtige Daten zur Unterstützung der forstwirtschaftlichen Maßnahmen zur Eindämmung der Kalamität beitragen.

#### Die Autoren

Dr. Johannes Stoffels ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fach Umweltfernerkundung und Geoinformatik an der Universität Trier. Er beschäftigt sich mit der Analyse und Auswertung von Fernerkundungsdaten für forstliche Fragestellungen.



Dr. Alexander Wagner war bis 2023 im Nationalparkamt Hunsrück-Hochwald tätig und ist nun wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft (FAWF) in Trippstadt. Dort beschäftigt er sich mit der Erforschung klimawandelbedingter Störungsflächen.



Prof. Dr. David Frantz ist Fachleiter der Arbeitsgruppe Geoinformatics – Spatial Data Science an der Universität Trier. Er beschäftigt sich mit der Prozessierung und Analyse von großvolumigen Satellitenbildarchiven für umweltwissenschaftliche Fragestellungen.



Jannik Faust B.Sc. ist Student im Masterstudienprogramm Geoinformatics an der Universität Trier und studentischer Mitarbeiter im NLPHH. Im Rahmen seiner Masterarbeit beschäftigt er sich mit satellitenbildzeitreihenbasiertem Monitoring von Fichtenverlusten im Nationalpark Hunsrück-Hochwald.

## Einleitung

Die Wälder der Region wurden in den letzten Jahren erheblich durch extreme Wetterereignisse beeinträchtigt, darunter starke Stürme im Frühjahr 2018 und 2022 sowie langanhaltende Dürreperioden in Verbindung mit hohen bis extremen Sommertemperaturen von 2018 bis 2020, 2022 und 2023 (BMEL, 2023). Besonders betroffen sind derzeit Fichtenbestände, in denen seit 2018 eine massive Vermehrung von Borkenkäfern zu katastrophalen Schäden geführt hat. Schon vor den Extremjahren ab 2018 haben Forschende prognostiziert, dass die globale Erwärmung regional zu einem früheren Ausschwärmen, häufigerem Ausbilden von weiteren Käfergenerationen und damit Massenvermehrungen führen wird (Seidl et al., 2017; Thom & Seidl, 2016). Zudem wird ein weiterer Anstieg von Dürre- und Sturmereignissen erwartet, die erheblichen Einfluss auf den Wald haben werden (Lindner et al., 2014; Schuldt et al., 2020).

Borkenkäfer sind natürlicher Bestandteil eines gesunden, multifunktionalen Waldökosystems. In den heimischen Fichtenwäldern ist der Buchdrucker für die derzeit großflächig zu beobachtenden Schäden verantwortlich. Gesunde Bäume können sich durch Abwehrmechanismen wie gesteigerte Harzproduktion oder veränderten Stoffwechsel schützen. Nationalparkforschung zeigt, dass durch den Buchdrucker geschaffene Totholz- und Offenbereiche einen besonderen ökologischen Wert haben können (Müller et al., 2008). In einer epidemi-

schen Phase mit Massenvermehrungen des Buchdruckers, ausgelöst durch Störungen wie Windwurf, Dürre oder Schneebruch, greifen die massiven Käferpopulationen auch erfolgreich gesunde Bäume an (Hlásny et al., 2021; Wermelinger, 2004), was zu großflächigem, abruptem Absterben von Wäldern führen kann.

## Lebenszyklus des Buchdruckers (*Ips typographus*)

Die Entwicklung des Buchdruckers ist stark temperaturgesteuert. Während des Frühlings, wenn die Lufttemperatur auf ungefähr 16 °C ansteigt, beginnen die überwinternden Käfer zu schwärmen und fliegen zu den für sie geeigneten Wirtsbäumen (Nierhaus-Wunderwald, 2004). Dort bohren sie sich durch die Rinde, um Zugang zu den Kambium- und Phloemschichten zu erhalten, wo sie Gänge anlegen und ihre Eier ablegen. Die Entwicklungsdauer von der Eiablage bis zum Schwärmen der jungen Käfer ist stark von der Temperatur abhängig und erstreckt sich über sechs bis zehn Wochen. Dies ermöglicht in der Regel zwei bis maximal drei Generationen pro Jahr (Hoch et al., 2020). Die durchschnittliche Zahl der Generationen sowie die Zahl der überwinternden Larven kann klimawandelbedingt ansteigen, wodurch sich das Schadpotential vervielfacht. Unter idealen Bedingungen wächst eine Käferpopulation so mit jeder weiteren Generation um den Faktor 25 an (Jakoby et al., 2015).

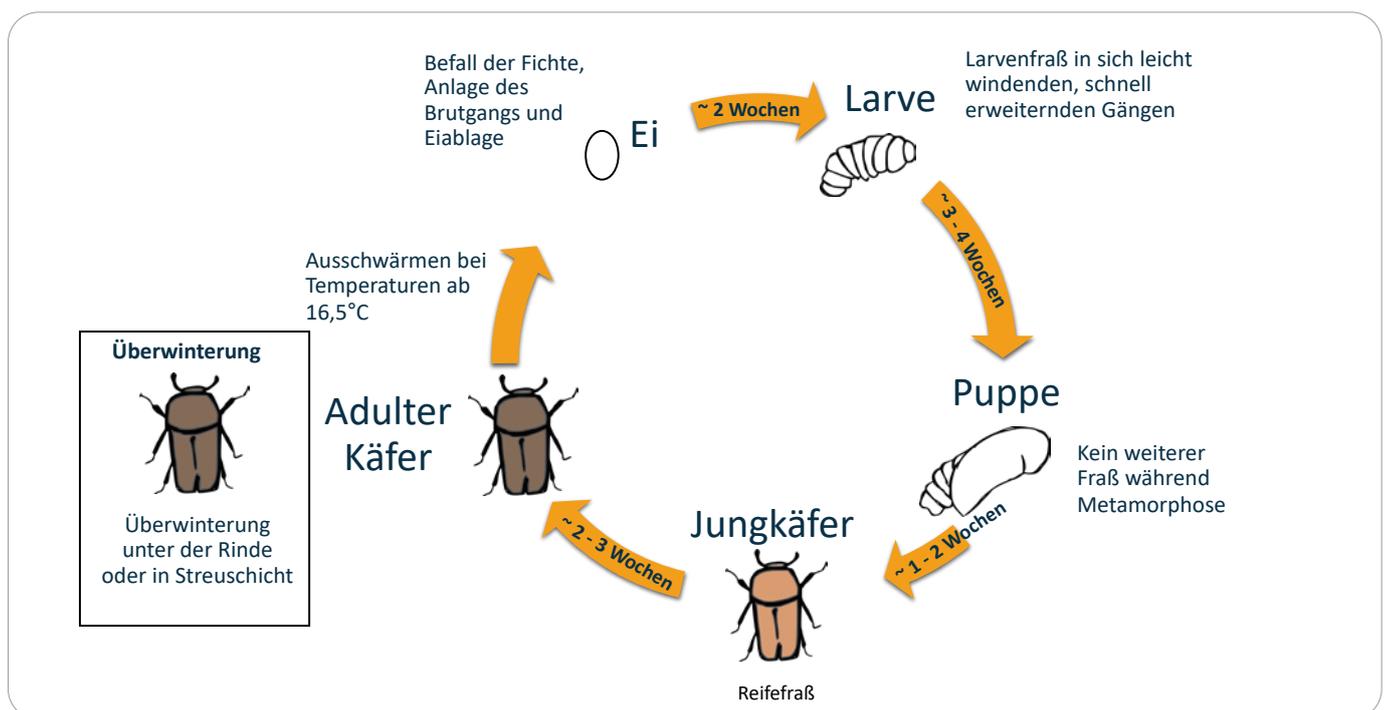


Abb. 1: Lebenszyklus des Buchdruckers (*Ips typographus*). (Zeichnungen: Melanie Brauchler)

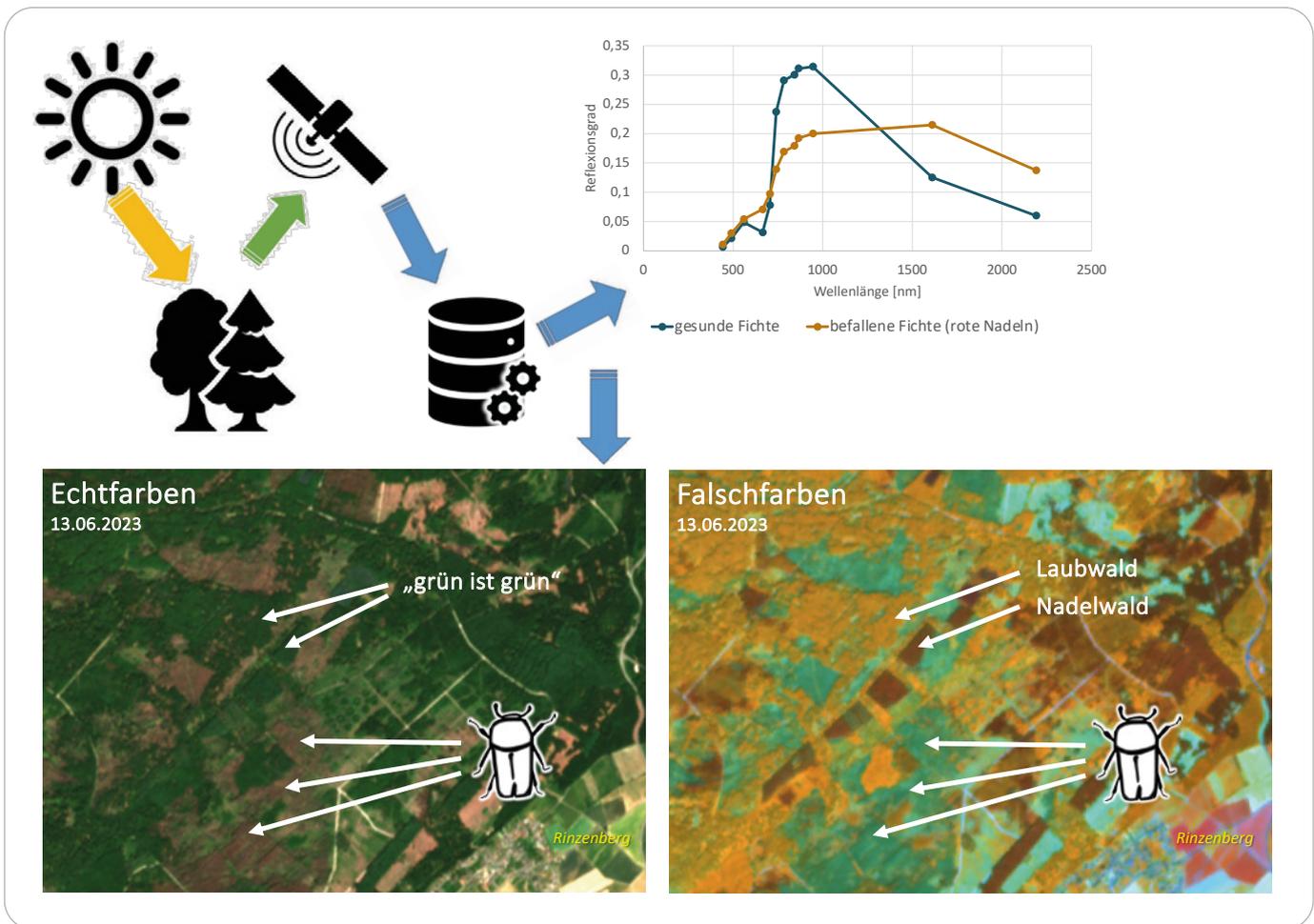


Abb. 2: Aufnahmeprinzip von multispektralen Sensorsystemen.

## Monitoring der Borkenkäferausbreitung

Die Fichte war zum Zeitpunkt der letzten Bundeswaldinventur (BWI 3) die häufigste Baumart und wichtige Wirtschaftsbaumart in den deutschen Wäldern (Thünen-Institut, 2012). Maßnahmen zur Eindämmung von Borkenkäferkalamitäten sind daher von erheblicher Bedeutung für die Forstwirtschaft. Zur Eindämmung ist es notwendig, alle befallenen Bäume möglichst früh zu identifizieren, zu fällen, abzutransportieren oder ihre Rinde zu entfernen, bevor sich die Larven zu Jungkäfern entwickeln können (Fettig et al., 2022). Je später ein Befall erkannt wird, umso umfangreicher ist eine Eindämmungsmaßnahme, was letztlich zu nachteilhaften Kahlflächeneffekten führen kann. Das terrestrische Monitoring erfordert erheblichen Aufwand, da jeder gefährdete Baum inspiziert werden muss, um erste Anzeichen wie Bohrlöcher oder Bohrmehl zu erkennen. Wenn Fichten bereits Nadelverfärbungen, Nadel- oder Rindenverlust zeigen, ist es oft zu spät für eine Eindämmung, da die Käferentwicklung unter der Rinde fortgeschritten ist oder die Käfer den Baum bereits verlassen haben (Zentral-

stelle der Forstverwaltung, 2023). Daher ist die Erforschung innovativer Ansätze für das Monitoring von Borkenkäferschäden und die Früherkennung von besonderem Interesse.

Vor diesem Hintergrund bieten sich fernerkundliche Daten und Methoden an, da sie über satellitengestützte oder flugzeuggetragene Systeme aktuelle Informationen über große Flächen liefern können. Die hohe zeitliche Wiederholungsrate ist entscheidend für ein erfolgreiches Monitoring der Borkenkäferentwicklung über die gesamte Vegetationszeit (Senf et al., 2017).

Passive, optisch-reflektive Systeme, die hauptsächlich für das Monitoring von Borkenkäferschäden genutzt werden, verwenden die Sonnenstrahlung im sichtbaren Lichtspektrum bis zum nahen Infrarot (700 nm bis 1.400 nm) und kurzwelligem Infrarot (1.400 nm bis 3.000 nm). Das vom Sensor gemessene Signal entsteht durch die Wechselwirkung dieser Strahlung mit den Oberflächenbestandteilen, wobei die Strahlung je nach Beschaffenheit der Objekte unterschiedlich absorbiert, transmittiert

oder reflektiert wird. Die Anteile variieren stark und sind zudem von der betrachteten Wellenlänge abhängig. Die gemessene Strahlung liefert multispektrale Bilddaten, wobei für jedes Bildpixel charakteristische Reflexionsspektren für verschiedene Oberflächen entstehen. Durch die Form der Reflexionskurve kann auf spezifische biophysikalische Eigenschaften rückgeschlossen werden, wie zum Beispiel den Chlorophyllgehalt von Blättern, den Gehalt an organischer Substanz in Böden oder die Art und den Gehalt von Mineralien (Udelhoven et al., 2021).

Abbildung 2 zeigt zwei Reflexionsspektren von Fichtenbeständen. Das grüne Spektrum repräsentiert einen gesunden Fichtenbestand im Nationalpark mit typischen Merkmalen vitaler, photosynthetisch aktiver Vegetation. Das orange Spektrum stammt von einem von Borkenkäfern befallenen Bestand, der deutliche Befallsanzeichen zeigt. Ab 550 nm weist das Reflexionssignal klare Unterschiede zur charakteristischen Vegetationssignatur gesunder Bestände auf.

Für das fernerkundliche Monitoring und eine frühzeitige Befallsdetektion durch den Buchdrucker sind messbare Unterschiede im Reflexionssignal der Fichtenbestände entscheidend (Bárta et al., 2021). Die Anlage von Brutgängen im Phloem und Kambium der Fichten und der Larven- sowie Reifefraß der Jungkäfer beeinträchtigen nachhaltig den Transport von Wasser und Nährstoffen (Kautz et al., 2011; Wermelinger, 2004). Durch von Borkenkäfern eingeschleppte Bläupilze kommt es zusätzlich zu einer Infektion und Zerstörung des Phloem- und Xylemgewebes (Furniss et al., 1990). Diese kombinierten Prozesse führen zu einer Abnahme des Wassergehaltes der Fichtennadeln sowie einem Abbau der Nadelpigmente, einer gestörten Photosynthese sowie schließlich dem Auftreten von Embolien in den Leiterbahnen (Netherer and Hammerbacher, 2022). Die fortschreitende Schädigung äußert sich durch Verfärbung der Nadeln, Nadelverlust und Abfallen der Rinde. Befallene Bäume sterben innerhalb weniger Monate.

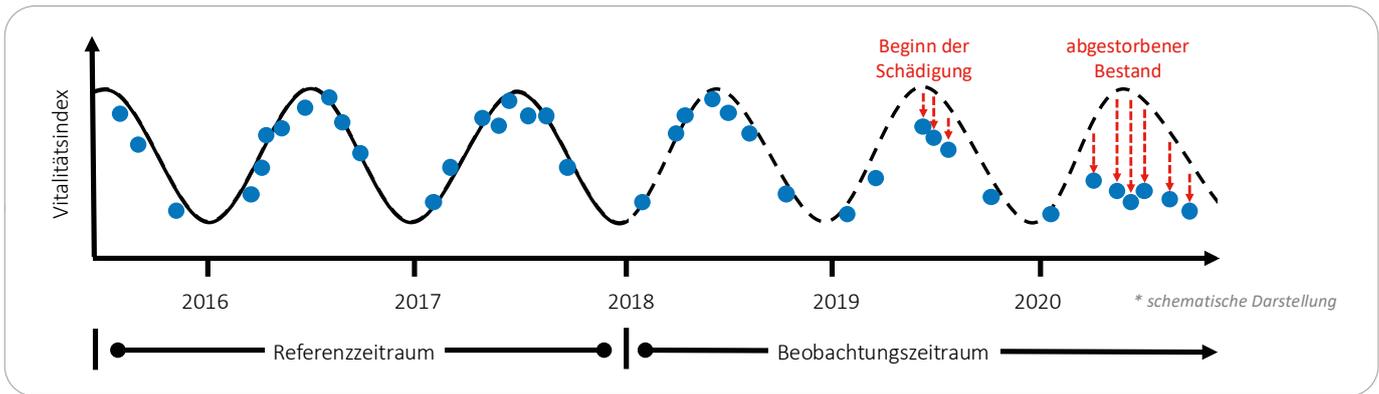
Fernerkundliche Systeme messen die graduellen Änderungen in der charakteristischen Reflexionssignatur der Fichte, die durch Veränderungen im Wassergehalt und den Inhaltsstoffen der Nadeln im sichtbaren Licht sowie im nahen und kurzwelligen Infrarot entstehen (Wulder et al., 2006). Basierend auf diesen Änderungen werden drei Befallsstadien bei den betroffenen Fichten im fernerkundlichen Monitoring unterschieden: Das grüne Stadium umfasst den Zeitraum von der Eiablage bis zur

Jungkäferentwicklung, in dem die Fichtennadeln noch grün sind. Die Fraßaktivität der Larven und Jungkäfer führt jedoch zu einer leichten Degradation der Nadelpigmente und zunehmendem Wasserverlust (Bárta et al., 2022). Die Identifikation befallener Bäume in dieser Phase ist kritisch, da nur bis zur Jungkäferentwicklung durch Fällen, Entrinden oder Abtransport ein Ausschwärmen der neuen Käfergeneration verhindert werden kann (Huo et al., 2023). Die weiter fortschreitende Schädigung führt zu einer Verfärbung der Nadeln zu Rot und Grau sowie zunehmendem Nadelverlust. Diese Merkmalsänderungen unterscheiden das rote und graue Befallsstadium, wobei zu diesem Zeitpunkt die neue Käfergeneration bereits ausgeschwärmt sein kann (Abdullah et al., 2018; Huo et al., 2023). Bei Überwinterung unter der Rinde kann die Identifikation der Bäume im roten Befallsstadium ein Ausschwärmen im folgenden Frühjahr noch verhindern.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche erfolgreiche Studien und Ansätze zum Monitoring von Borkenkäferschäden und zur Früherkennung vorgestellt (z. B. Abdullah et al., 2019; Huo et al., 2023; Latifi et al., 2014; Mandl and Lang, 2023). In Rheinland-Pfalz nutzen die Landesforsten bereits ein satellitenbildbasiertes Monitoring, um präzise Aussagen über das Ausmaß der von der Borkenkäferkalamität betroffenen Flächen über alle Waldbesitzarten hinweg zu treffen und den allgemeinen Vitalitätszustand der Wälder zu bewerten (Hill, 2023; Hill et al., 2023, 2019).

## Echtzeitnahes Monitoring

Für ein erfolgreiches Borkenkäfermonitoring bedarf es einer fernerkundlichen Datenbasis, die eine ausreichende räumliche Auflösung aufweist und zur Früherkennung geeignete Spektralkanäle enthält. Der zeitlichen Wiederholrate kommt jedoch eine übergeordnete Bedeutung zu, um symptomatische Vitalitätsveränderungen auch trotz etwaiger Wolkenbedeckung ausreichend früh erkennen zu können. Als besonders geeignet ist hier die europäische Sentinel-2-Satellitenmission hervorzuheben. Bei Sentinel-2 handelt es sich um zwei baugleiche Satelliten, die die Erde in einer Höhe von 786 km umkreisen und jeweils 290 km breite Satellitenbilder aufnehmen. So können alle drei bis fünf Tage Satellitenbilder mit einer räumlichen Auflösung von 10 m x 10 m im sichtbaren bis kurzwelligen Infrarot-Spektralbereich aufgenommen werden (Drusch et al., 2012).

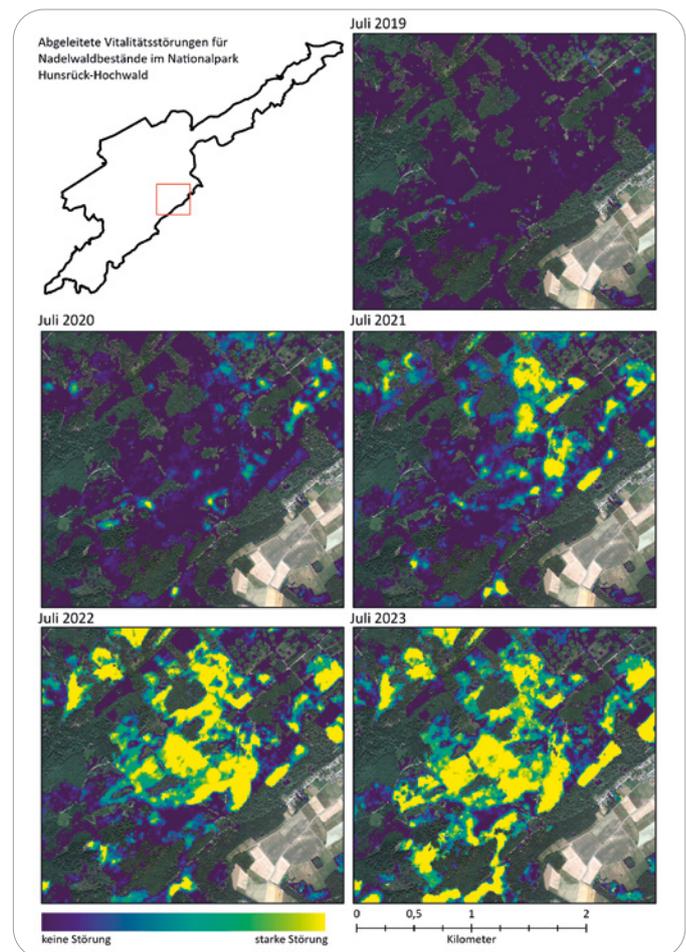


**Abb. 3: Schematische Darstellung des zeitserienbasierten Echtzeitmonitorings.**

Ein Ausschnitt aus einer Sentinel-2-Szene vom 13.06.2023 ist in Abbildung 2 zu sehen. Links ist der Ausschnitt in Echtfarbdarstellung abgebildet. Dies bedeutet, dass die Farbdarstellung so gewählt ist, dass sie der Farbwahrnehmung des menschlichen Auges entspricht. Dadurch ist der dargestellte Spektralbereich aber auch auf den sichtbaren Bereich zwischen 450 nm und 690 nm beschränkt. Trotzdem sind gut die Unterschiede zwischen gesunden, „grünen“ Beständen und den rötlich-braunen Flächen mit abgestorbenen Fichten zu erkennen. Die Teilabbildung rechts zeigt dagegen den Ausschnitt in Falschfarbdarstellung, in der nahes und kurzwelliges Infrarot sichtbar werden, und somit weitere Bestandsunterschiede zu Tage treten, die dem menschlichen Auge entgehen würden. Aus dieser Information lassen sich für jede Beobachtung sogenannte „spektrale Indizes“ ableiten, welche als Proxys für bestimmte ökophysiologische Eigenschaften genutzt werden können, beispielsweise Vitalitätsindizes, die mit dem Blattwassergehalt korrelieren.

Durch eine zielgerichtete Auswertung dieser zeitlich hochaufgelösten Vitalitätsinformationen lassen sich schließlich das Auftreten eines Schadens sowie der Zeitpunkt des Störungsbeginns und die Stärke der Störung identifizieren. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt und basiert auf einem für Nadelwälder in Frankreich entwickelten Verfahren (Dutrieux et al., 2021). Die phänologische Entwicklung von Vegetationsbeständen folgt in der Regel einem regelmäßigen saisonalen Verlauf, der sich aus jahreszeitlichen Temperatur-, Niederschlags- und Einstrahlungsschwankungen ergibt. Dieser „normale“ Verlauf lässt sich in einem Referenzzeitraum durch statistische Modelle nachbilden. Ab einem Zeitpunkt, zu dem Störungen erwartet werden, kann der beobachtete Vitalitätsverlauf mit dem modellierten, zu erwartbaren Verlauf verglichen werden. Treten

anhaltende Unterschiede auf, liegt eine Vitalitätsstörung vor, welche in Fichtenbeständen zu hoher Wahrscheinlichkeit durch den Borkenkäfer bedingt ist. Da dieses Vorgehen für jedes Pixel wiederholt werden kann, lassen sich raumzeitliche Störungsmuster kartieren, wie sie in Abbildung 4 dargestellt sind.



**Abb. 4: Detektierte Störungen zwischen 2019 und 2023.**

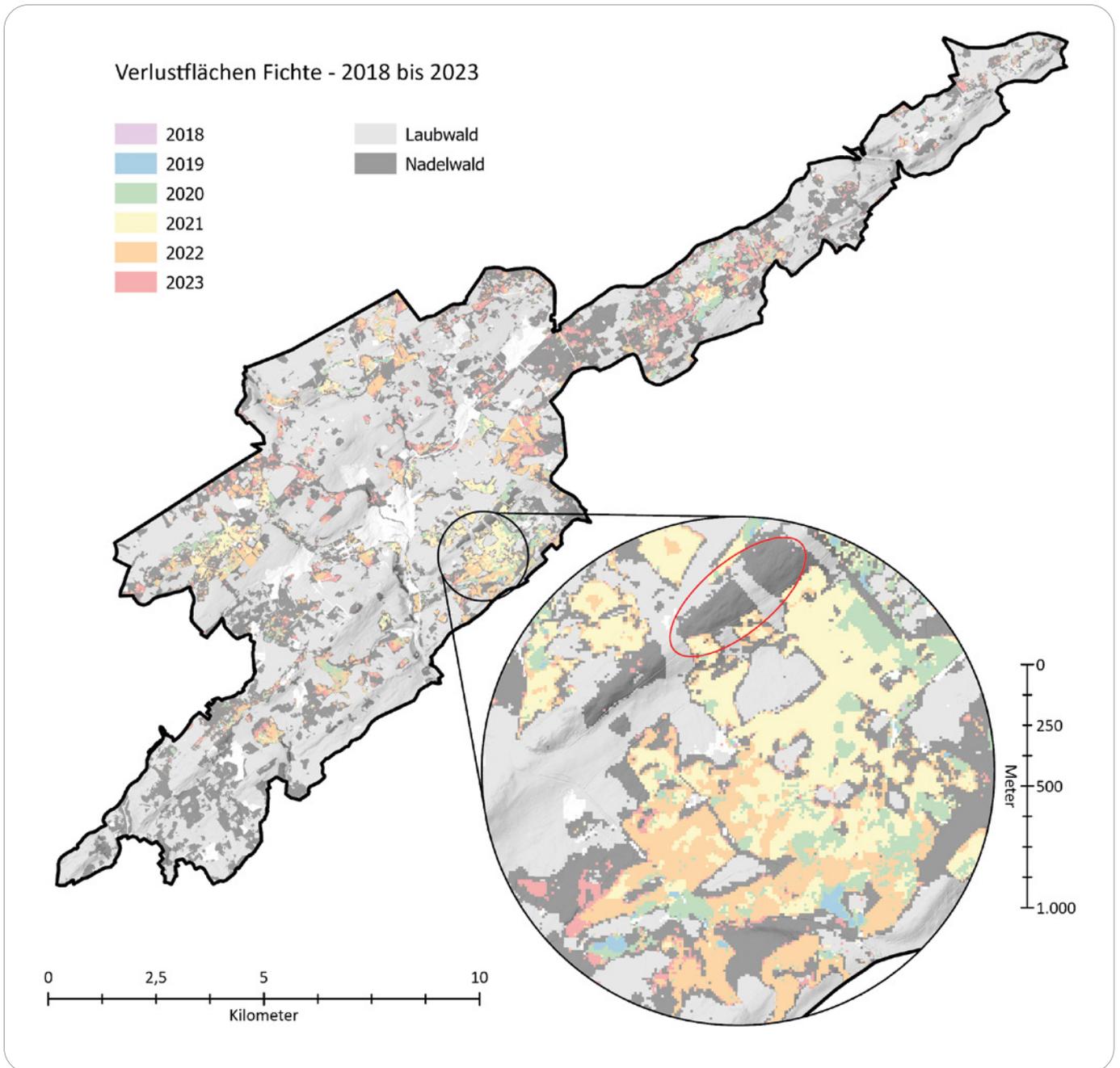


Abb. 5: Jährliche Verlustflächen Fichte (Fichtenreinbestände) im rheinland-pfälzischen Teil des NLP. Stand September 2023.

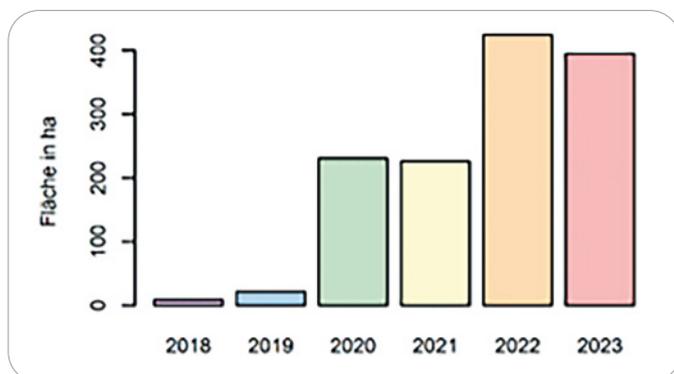
## Ergebnisse und Diskussion

Vorläufige Ergebnisse der noch in Entwicklung befindlichen Satellitenbildzeitreihenanalyse liegen für jeden Aufnahmezeitpunkt für die Gesamtfläche des Nationalparks digital vor. Dieser Datensatz repräsentiert den Vitalitätsverlust innerhalb der Nadelwaldbestände. Abbildung 4 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt aus dem Nationalpark (zwischen Börfink und Rinzenberg) mit einer jährlichen Darstellung der detektierten Störungen im Juli. Die Störungen sind nur in Nadelwaldbeständen kartiert worden, während Laubwälder im Hintergrund

des Luftbilds erscheinen. Im Jahr 2019 sind praktisch keine Störungen in den beobachteten Nadelwaldbeständen erkennbar. Lediglich nahe der Bildmitte und im Nordosten des Ausschnitts sind erste punktuelle Störungen sichtbar. Bis Juli 2020 entwickeln sich aus den initialen punktuellen Störungen lokale flächige Störungen, die sich bis Juli 2021 ausweiten und bis Juli 2022 und 2023 nahezu die gesamte Nadelwaldfläche betreffen. Verbleibende Nadelwaldflächen (z. B. innerhalb der roten Ellipse in Abb. 5) setzen sich meist aus weniger anfälligen Baumarten wie Douglasien, Lärchen oder Weißtannen zusammen.

Die zeitlich hochaufgelösten Ergebnisse ermöglichen die Identifikation des fernerkundlich festgestellten Beginns eines Schadereignisses, wenn ein vordefinierter Schwellwert überschritten wurde und dieser Kandidat von den zwei folgenden Beobachtungen verifiziert wurde. Das Produkt befindet sich derzeit in der Erprobungs- und Validierungsphase und ist vorläufig. Um den Ansatz zu validieren, werden u.a. umfangreiche Daten des Waldschutzmonitorings des Nationalparks genutzt, das in der sog. Waldschutzzone durchgeführt wird. Die Übereinstimmung des fernerkundlich festgestellten Startpunkts der Störung mit Vor-Ort-Aufnahmen des Nationalparks sowie das Befallsstadium, in dem ein Bestand mit diesem Ansatz identifiziert werden kann, werden noch untersucht. Eine jährliche Aggregation der Borkenkäferausbreitung in Fichtenreinbeständen ist in Abbildung 5 dargestellt, wobei regionale Unterschiede in den Befallsmustern sichtbar sind. Die jährlich aggregierte Darstellung ist eine mögliche kartographische Visualisierung der Datenlayer, die für jedes wolkenfreie Satellitenbild im Zeitraum von 2018 bis 2023 (insgesamt 143 Beobachtungen bis September 2023) vorliegen. Aufgrund technischer Gründe fehlen für den saarländischen Teil des Nationalparks die Angaben zu Verlusten.

Für den rheinland-pfälzischen Teil des Nationalparks zeigen sich ab 2020 starke Flächenverluste mit einem Maximum von über 400 ha im Jahr 2022. Bis September 2023 haben sich schon Verluste von rund 400 ha ergeben. Insgesamt summieren sich die Ausfälle von 2018 bis 2023 auf rund 1300 ha. Anzumerken ist hier noch, dass der satellitenbildbasierte Monitoringansatz nicht die Ursache des Verlustes identifizieren kann. Dieser kann durch biotische wie abiotische Faktoren oder durch forstliche Maßnahmen verursacht worden sein.



**Abb. 6: Summe der jährlichen Nadelwaldverluste im rheinland-pfälzischen Teil des NLPFH (Stand September 2023).**

## Im Überblick

- Erdbeobachtungsdaten erlauben ein flächendeckendes und zeitnahes Umweltmonitoring.
- Die durch den Larvenfraß von Borkenkäfern gestörte Wasser- und Nährstoffversorgung in Fichten führt zu Änderungen des durch Erdbeobachtungssysteme messbaren Reflexionssignals.
- Einsatz von Satellitenbildzeitreihen zum echtzeitnahen Monitoring von Wäldern zeigt das räumliche und zeitliche Auftreten von Störungen und Verlusten.
- Die über den Ansatz bereitgestellten Daten können das terrestrische Borkenkäfermonitoring unterstützen.



## Fazit

Erdbeobachtungsdaten erlauben ein flächendeckendes und zeitnahes Umweltmonitoring. Der hier vorgestellte Ansatz zum Einsatz von Satellitenbildzeitreihen zum echtzeitnahen Monitoring von Wäldern befindet sich noch in der Entwicklung. Eine ausführliche Validierung der Ergebnisse wird gerade vorbereitet. Die kartierten Flächen und abgebildeten Ausbreitungsmuster sind aber konsistent zu den Beobachtungen im Gelände. Der Ansatz erlaubt keine Rückschlüsse auf die Ursachen der Störung, so dass auch Windwurf, Trockenschäden und Fichtenentnahmen durch forstliche Eingriffe als Störung oder Verlust erfasst werden. Die Methoden sollen weiterentwickelt werden, um als echtzeitnaher Datendienst das Monitoring der Waldflächen im Nationalpark zu unterstützen.

## Quellen

- Abdullah, H., Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Groen, T.A., Heurich, M., 2018.** European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 64, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.009>
- Abdullah, H., Skidmore, A.K., Darvishzadeh, R., Heurich, M., 2019.** Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 5, 87–106. <https://doi.org/10.1002/rse2.93>
- Bárta, V., Hanuš, J., Dobrovolný, L., Homolová, L., 2022.** Comparison of field survey and remote sensing techniques for detection of bark beetle-infested trees. *For. Ecol. Manag.* 506, 119984. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119984>
- Bárta, V., Lukeš, P., Homolová, L., 2021.** Early detection of bark beetle infestation in Norway spruce forests of Central Europe using Sentinel-2. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 100, 102335. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102335>
- BMEL, B. für E. und L. (BMEL) R. 515 – N.W., Holzmarkt, 2023.** Massive Schäden – Einsatz für die Wälder [WWW Document]. Wald Dtschl. URL [www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html](http://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html) (Aufruf am 22.09.23).
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., Bargellini, P., 2012.** Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens. Environ., The Sentinel Missions – New Opportunities for Science* 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Dutrieux, R., Féret, J.B., Ose, K., 2021.** Mise au point d'une méthode reproductible pour le suivi généralisé des dégâts de scolytes par télédétection satellitaire., *Rendez-vous techniques de l'ONF – n°69-70*. Office National des Forêts, Fontainebleau.
- Fettig, C.J., Egan, J.M., Delb, H., Hilszczański, J., Kautz, M., Munson, A.S., Nowak, J.T., Negrón, J.F., 2022.** 11 – Management tactics to reduce bark beetle impacts in North America and Europe under altered forest and climatic conditions, in: Gandhi, K.J.K., Hofstetter, R.W. (Eds.), *Bark Beetle Management, Ecology, and Climate Change*. Academic Press, pp. 345–394. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822145-7.00006-4>
- Furniss, M.M., Solheim, H., Christiansen, E., 1990.** Transmission of Blue-Stain Fungi by *Ips typographus* (Coleoptera: Scolytidae) in Norway Spruce. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 83, 712–716. <https://doi.org/10.1093/aesa/83.4.712>
- Hill, J., 2023.** Die kontinuierliche Bereitstellung von Waldstruktur- und Waldzustandsinformationen auf der Basis von Sentinel-Daten.
- Hill, J., Buddenbaum, H., Langshausen, J., Hill, A., Rock, G., Schneider, T., Frantz, D., 2023.** Die Entwicklung einer operativen Sentinel-2-basierten Prozesskette zur landesweiten Bewertung von Vitalitätsverlusten sowie biotischer und abiotischer Waldschäden in Rheinland-Pfalz und Luxemburg.
- Hill, J., Stoffels, J., Buddenbaum, H., Schröck, H., Langshausen, J., 2019.** Die Nutzung des Sentinel-2-Datenarchivs zur zeitnahen Bewertung des Vitalitätszustands von Nadel-Holzbeständen im Bundesland Rheinland-Pfalz als Folge des trockenen Spätsommers.
- Hlásny, T., Zimová, S., Merganičová, K., Štěpánek, P., Modlinger, R., & Turčáni, M. (2021).** Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: Drivers, impacts, and management implications. *Forest Ecology and Management*, 490, 119075.
- Hoch, G., Schopf, A., Weizer, G., Netherer, S., Schebeck, M., Kirisits, T., Baier, P., Wegensteiner, R., 2020.** Der Buchdrucker: Biologie, Ökologie, Management, 2. Auflage. ed.

- Huo, L., Lindberg, E., Bohlin, J., Persson, H.J., 2023.** Assessing the detectability of European spruce bark beetle green attack in multispectral drone images with high spatial- and temporal resolutions. *Remote Sens. Environ.* 287, 113484. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113484>
- Jakoby, O., Wermelinger, B., Stadelmann, G., Lischke, H., 2015.** Borkenkäfer im Klimawandel: Modellierung des künftigen Befallsrisikos durch den Buchdrucker (*Ips typographus*) (Report). ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010532135>
- Kautz, M., Dworschak, K., Gruppe, A., Schopf, R., 2011.** Quantifying spatio-temporal dispersion of bark beetle infestations in epidemic and non-epidemic conditions. *For. Ecol. Manag.* 262, 598–608. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.023>
- Latifi, H., Schumann, B., Kautz, M., Dech, S., 2014.** Spatial characterization of bark beetle infestations by a multivariate synergy of SPOT and Landsat imagery. *Environ. Monit. Assess.* 186, 441–456. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3389-7>
- Lindner, M., Fitzgerald, J.B., Zimmermann, N.E., Reyer, C., Delzon, S., van der Maaten, E., Schelhaas, M.-J., Lasch, P., Eggers, J., van der Maaten-Theunissen, M., Suckow, F., Psomas, A., Poulter, B., Hanewinkel, M., 2014.** Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *J. Environ. Manage.* 146, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.030>
- Mandl, L., Lang, S., 2023.** Uncovering Early Traces of Bark Beetle Induced Forest Stress via Semantically Enriched Sentinel-2 Data and Spectral Indices. *PFG – J. Photogramm. Remote Sens. Geoinformation Sci.* 91, 211–231. <https://doi.org/10.1007/s41064-023-00240-4>
- Müller, J., Bußler, H., Goßner, M., Rettelbach, T., Duelli, P., 2008.** The European spruce bark beetle *Ips typographus* in a national park: from pest to keystone species. *Biodivers. Conserv.* 17, 2979–3001. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9409-1>
- Netherer, S., Hammerbacher, A., 2022.** 4 – The Eurasian spruce bark beetle in a warming climate: Phenology, behavior, and biotic interactions, in: Gandhi, K.J.K., Hofstetter, R.W. (Eds.), *Bark Beetle Management, Ecology, and Climate Change*. Academic Press, pp. 89–131. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822145-7.00011-8>
- Nierhaus-Wunderwald, D., 2004.** Biologie der Buchdruckerarten [WWW Document]. URL [www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/tiere-im-wald/insekten-wirbellose/biologie-der-buchdruckerarten](http://www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/tiere-im-wald/insekten-wirbellose/biologie-der-buchdruckerarten)
- Schuldt, B., Buras, A., Arend, M., Vitasse, Y., Beierkuhnlein, C., Damm, A., Gharun, M., Grams, T.E.E., Hauck, M., Hajek, P., Hartmann, H., Hiltbrunner, E., Hoch, G., Holloway-Phillips, M., Körner, C., Larysch, E., Lübbe, T., Nelson, D.B., Rammig, A., Rigling, A., Rose, L., Ruehr, N.K., Schumann, K., Weiser, F., Werner, C., Wohlgemuth, T., Zang, C.S., Kahmen, A., 2020.** A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic Appl. Ecol.* 45, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.04.003>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M.J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T.A., Reyer, C.P.O., 2017.** Forest disturbances under climate change. *Nat. Clim. Change* 7, 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Senf, C., Seidl, R., Hostert, P., 2017.** Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 60, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.004>
- Thom, D., Seidl, R., 2016.** Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biol. Rev.* 91, 760–781. <https://doi.org/10.1111/brv.12193>
- Thünen-Institut, D.B.-E., 2012.** Thünen-Institut, Dritte Bundeswaldinventur – Ergebnisdatenbank. <https://bwi.info> (Aufruf am 10.10.23).
- Udelhoven, T., Röder, A., Stoffels, J., Retzlaff, R., Budenbaum, H., 2021.** Fernerkundung – Grundlagen, Systeme und Anwendungen, in: *Umweltinformationssysteme: Grundlagen einer angewandten Geoinformatik/Geo-IT, Wichmann-Fachmedien – Geoinformatik – GIS*. Wichmann, Berlin Offenbach, p. 518.
- Wermelinger, B., 2004.** Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* – a review of recent research. *For. Ecol. Manag.* 202, 67–82. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.018>
- Wulder, M.A., Dymond, C.C., White, J.C., Leckie, D.G., Carroll, A.L., 2006.** Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities. *For. Ecol. Manag.* 221, 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.09.021>
- Zentralstelle der Forstverwaltung, 2023.** Borkenkäfermonitoring – Hinweise und Informationen für die forstliche Praxis. Zentralstelle der Forstverwaltung Abt. 4 Strategische Planung und Serviceleistung, Emmelshausen.