

Österreichweite Abschätzung der Prädisposition von Standorten und Beständen für Buchdrucker-Befall

TILL HALLAS^{1,2}, GERNOT HOCH², TOBIAS SCHADAUER³, SUSANNE KAREL³, SIGRID NETHERER¹

¹ BOKU University, Department für Ökosystemmanagement, Klima und Biodiversität, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz, Peter-Jordan-Straße 82/I, 1190 Wien, Österreich

² BFW - Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Waldschutz, Seckendorff-Gudent-Weg 8, 1131 Wien, Österreich

³ BFW - Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Waldinventur, Seckendorff-Gudent-Weg 8, 1131 Wien, Österreich

✉ Till Hallas: till.hallas@boku.ac.at

Forstschutz Aktuell 71 (2025): 35 – 41

KURZFASSUNG

Massenvermehrungen des Buchdruckers (*Ips typographus*) sind die bedeutendsten biotischen Störungen in mitteleuropäischen Wäldern, die aufgrund des Klimawandels zunehmen. Zur besseren Einschätzung der Gefährdungslage und effizienten Unterstützung des integrierten Borkenkäfermanagements wurden erstmalig für ganz Österreich Karten mit zehn Metern räumlicher Auflösung zur Abschätzung der Prädisposition (Anfälligkeit) des Bestandes sowie des Standortes gegenüber Buchdrucker-Befall entwickelt. Die Prädispositionskarten basieren auf hochaufgelösten Fernerkundungsdaten und werden jährlich aktualisiert. Für den Standort sind beispielsweise für die vorangegangene Dekade die potenziell mögliche jährliche Anzahl an Buchdrucker-Generationen sowie die klimatische Wasserbilanz während der Vegetationsperiode implementiert. Ferner wird die Geländemorphologie berücksichtigt. Für den Bestand werden unter anderem der Fichtenanteil und die Baumhöhe verwendet. Zudem werden Störungen (Anomalien) der vorangegangenen Jahre und neu entstandene Bestandesränder räumlich explizit erfasst.

Die Prädispositionsabschätzung eignet sich zur Identifizierung von Hotspots mit erhöhter Anfälligkeit gegenüber Buchdrucker-Befall und die Planung des mittel- und längerfristigen Waldumbaus hin zu klimaangepassten Mischwäldern. Eine Überprüfung in der Steiermark und Niederösterreich zeigte eine hohe Übereinstimmung (ca. 75 %) zwischen den modellierten und vor Ort überprüften Prädispositionswerten.

ABSTRACT

Assessment of predisposition of forest sites and stands in Austria to spruce bark beetle infestation

Outbreaks by the European spruce bark beetle (*Ips typographus*) are the most important biotic disturbances in Central European forests with an increasing trend due to climate change. To improve bark beetle risk assessment and to efficiently support integrated bark beetle management, for the first time maps with a spatial resolution of ten metres have been developed for the whole of Austria to estimate the predisposition (susceptibility) of the stand and the site to bark beetle infestation.

The predisposition maps are based on high-resolution remote sensing data and are updated annually. Regarding the site, e.g., the annual number of spruce bark beetle generations and the climatic water balance during the vegetation period of the previous decade are implemented. The terrain morphology is also taken into account. For the stand, among other things, spruce proportion and tree height are included. In addition, disturbances (anomalies) from previous years and newly formed stand edges are spatially explicitly recorded.

The predisposition assessment is suitable for identifying hotspots with increased susceptibility to bark beetle infestation and for planning medium- and long-term forest conversion into more climate-adapted mixed forests. A field study in Styria and Lower Austria showed a high level of agreement (75 %) between the predisposition values modelled and those checked on site.

Insbesondere Reinbestände, Anomalien und neu entstandene Bestandseränder werden im System gut erfasst. Verbesserungsmöglichkeiten gibt es hingegen bei Mischwäldern sowie stark strukturierten und lichten Beständen.

SCHLÜSSELWORTE

Ips typographus, Massenvermehrung, Risikoabschätzung, Borkenkäferschäden, natürliche Störungen

In particular, pure stands, anomalies and newly formed stand edges are well recorded in the system, but there is room for improvement in mixed forests and highly structured and sparse stands.

KEYWORDS

Ips typographus, mass outbreak, risk assessment, bark beetle damage, natural disturbances

Einleitung

Borkenkäfermassenvermehrungen, insbesondere durch den Buchdrucker (*Ips typographus*), sind die bedeutendsten biotischen Störungen in mitteleuropäischen Wäldern mit gravierenden ökologischen und ökonomischen Konsequenzen (Hlásny et al. 2021, Patacca et al. 2023). In den letzten zwei Jahrzehnten haben auch in Österreich Borkenkäferschäden aufgrund des Klimawandels deutlich zugenommen (Hallas et al. 2024c). Die Fichte (*Picea abies*), der Hauptwirt des Buchdruckers, hat immer noch einen Anteil von 46,2 % in den Wäldern Österreichs und ist nach wie vor von hoher wirtschaftlicher und ökologischer Bedeutung, beispielsweise in den alpinen Schutzwäldern oder höher gelegenen Wirtschaftswäldern des Alpenvorlandes (Lackner et al. 2023). Gerade im natürlichen Verbreitungsgebiet der Fichte und insbesondere in den höheren, alpinen Lagen gibt es wenig Alternativen zu dieser heimischen Baumart. Daher sind neue Hilfsmittel zur besseren Einschätzung der Gefährdungslage und der effizienten Unterstützung des integrierten Borkenkäfermanagements allseits gefragt.

Mit dem österreichischen Borkenkäfer-Dashboard wurde im Mai 2024 ein operationales Informations- und Risikoabschätzungs-System für die Forstpraxis veröffentlicht (Hallas et al. 2024a, Hallas et al. 2024b), das unter folgender Adresse aufgerufen werden kann: https://iff-riskanalyses.boku.ac.at/borkenkaefer_dashboard.htm

In diesem Kartenserver werden für das Borkenkäfermanagement nützliche Karten, beispielsweise die tagesaktuelle Käferentwicklung oder die Trockenstress-Situation in Wäldern auf Basis von klimatischen Trockenheitsindizes, bereitgestellt. Darüber hinaus werden erstmalig für ganz Österreich hochaufgelöste Karten mit zehn Metern räumlicher Auflösung zur Abschätzung der Prädisposition (Anfälligkeit) des Bestandes sowie des Standortes dargestellt, die im Rahmen des Waldfonds-Projektes RAWLog entwickelt wurden. In Abbildung 1 wird die im Borkenkäfer-Dashboard implementierte Prädisposition des Standorts gegenüber Buchdrucker-Befall für das Jahr 2025 dargestellt.

Abschätzung der Anfälligkeit für Buchdrucker-Befall

Prädispositionsschätzsysteme (PAS) zeigen die komplexen Zusammenhänge zwischen prädisponierenden (fördernden) Standorts- sowie Bestandeseigenschaften und abiotischen oder biotischen Schadursachen nach aktuellem Stand des Wissens auf (Führer und Nopp 2001, Seidl et al. 2019). Für diese wissensbasierten additiven Expertenmodelle werden wichtige Prädiktoren anhand von Literaturrecherche und Voranalysen gemäß ihres Einflusses auf einen Schadfaktor gutachterlich gewichtet und die Summe der erreichten Prädispositionswerte durch den maximal möglichen Gesamtwert geteilt (Berryman 1986, Speight und Wainhouse 1989). Besonders geeignet sind PAS, wenn die Zielvariable eines Systems, beispielsweise Buchdrucker-Befall, nicht flächendeckend und räumlich genau vertortet ist und die Unsicherheit des Auftretens des Störereignisses in Bezug auf Ort, Zeitpunkt und Ausmaß sehr hoch ist. Diese nicht-statistischen Systeme verdeutlichen basierend auf den verfügbaren Eingangsgrößen, wie stark gefährdet ein Bestand oder Standort für Stehendbefall ist (Pietzsch et al. 2021). Erste PAS-Versionen für Sturm, Schnee und Buchdrucker wurden vor über 20 Jahren an der BOKU University entwickelt und im Nationalpark Hohe Tatra in Polen und der Slowakei getestet und validiert (Führer und Nopp 2001, Netherer und Nopp-Mayr 2005). Seitdem dienen sie als Grundlage für weitere praxisorientierte PAS, beispielsweise in der Schweiz (Jakoby et al. 2016) oder in Schweden (Nordkvist et al. 2023), und wurden in angepassten Versionen in komplexere Modelle implementiert (Seidl et al. 2007, Temperli et al. 2013, Temperli et al. 2020, Pietzsch et al. 2021, Thrippleton et al. 2023, Hallas et al. 2024b).

PAS eignen sich zur Identifizierung von Hotspots mit erhöhter Anfälligkeit gegenüber Buchdrucker-Befall und weiterer biotischer und abiotischer Gefährdungsfaktoren aufgrund der allgemeinen standörtlichen Verhältnisse und der aktuellen Waldbestockung. Dies kann bei der Planung von Maßnahmen des Borkenkäfermanagements insbesondere auf regionaler oder überregionaler Ebene besonders nützlich sein. Des Weiteren dienen PAS als Entscheidungshilfe zur Förderung des mittel- und längerfristigen Waldumbaus hin zu klimaangepassten Mischwäldern durch Veranschaulichung der waldbaulichen Chancen und Gefahren. So kann beispielsweise untersucht werden, inwieweit sich bestimmte Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Prädisposition gegenüber Buchdrucker-Befall aus-

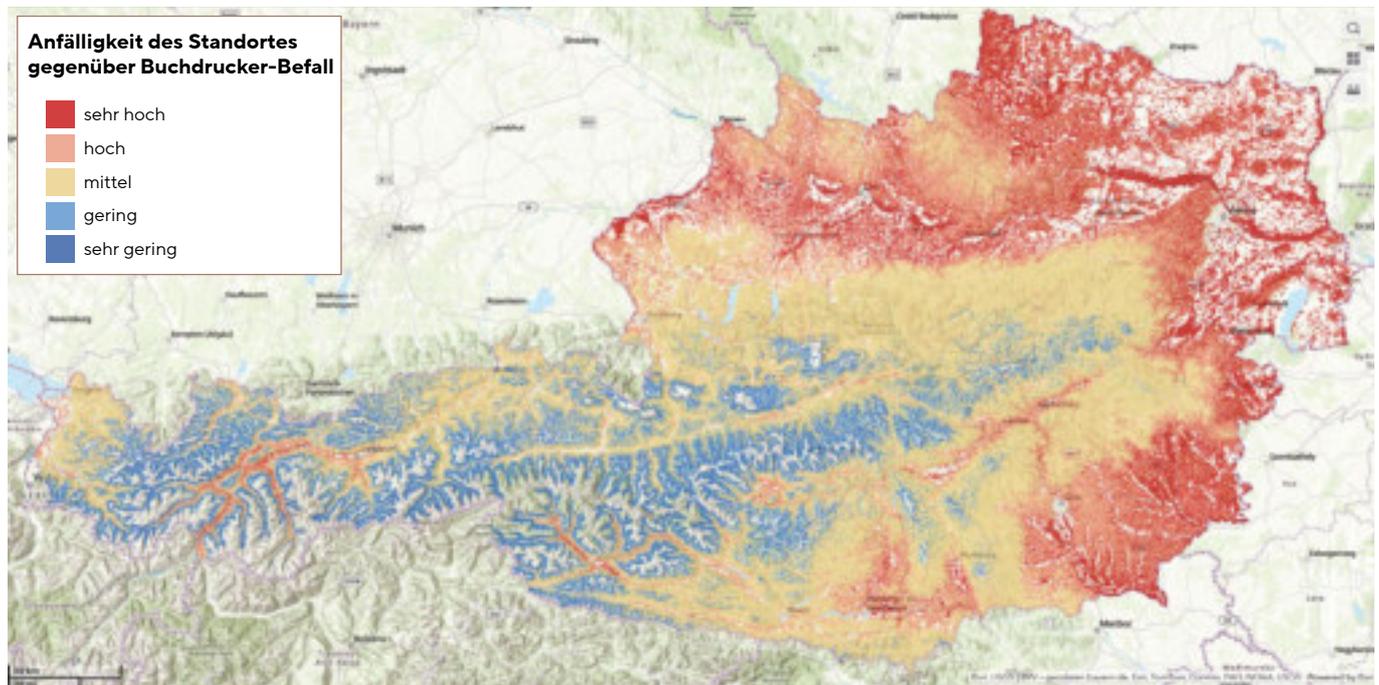


ABBILDUNG 1: Im Borkenkäfer-Dashboard implementierte Prädisposition des Standorts gegenüber Buchdrucker-Befall für das Jahr 2025 (Stand: April 2025).

FIGURE 1: Site predisposition to *Ips typographus* infestation implemented in the bark beetle dashboard for the year 2025 (as of April 2025).

wirken (Thrippleton et al. 2023). Eine genaue räumliche und zeitliche Vorhersage des Auftretens oder des Ausmaßes von Buchdrucker-Befall ist jedoch basierend auf PAS nicht möglich.

Datenbasis

Für die in das Borkenkäfer-Dashboard implementierten Prädispositions-karten österreichischer Wälder gegenüber Buchdrucker-Befall wurde das auf Netherer und Nopp-Mayr (2005) basierende PAS den flächig für ganz Österreich verfügbaren hochaufgelösten Fernerkundungsdaten angepasst (Hallas et al. 2024a). Neben der Einbindung neuer und der Herausnahme nicht flächendeckend verfügbarer Größen wurden auch die Klassifikationen grundlegend überarbeitet (Tabelle 1). Jeder Variable liegt eine eigene Klassifizierung zugrunde, die auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und Diskussionen mit Fachkundigen beruht.

Auf Bestandes-Level beschreibt PAS die Anfälligkeit aufgrund des aktuellen Ist-Zustandes des Baumbestandes. Sie wird unter anderem vom Fichtenanteil, der Baumhöhe oder auch durch vorherige Störungen (Anomalien), wie Windwurf- und Schneebruchereignisse, Borkenkäferschäden und forstliche Nutzungen, welche eine rasche Vermehrung der Populationen des Buchdruckers begünstigen können, beeinflusst (Tabelle 1). Die Bestandesprädisposition für Buchdrucker-Befall ist demnach durch waldbauliche Maßnahmen, beispielsweise zur Änderung der Baumartenzusammensetzung und Bestandesstruktur, aktiv steuerbar. Auf Standorts-Level charakterisiert PAS die generelle Prädisposition eines Standorts, die durch Relief, Boden und Klima geprägt wird. Hierzu zählen

die potenziell mögliche jährliche Anzahl an Buchdrucker-Generationen, die klimatische Wasserbilanz während der Vegetationsperiode (April bis September) der letzten Dekade sowie die Geländemorphologie. Die Standortsprädisposition für Buchdrucker-Befall gibt Aufschluss über die klimatische und topographische Eignung eines Standorts für den Fichtenanbau. Sie kann die Bestandesprädisposition ver- oder entschärfen und ist relevant für die zukünftige Baumartenwahl.

Die Weiterentwicklung des PAS wurde maßgeblich durch innovative Produkte der Fernerkundung des Bundesforschungszentrums für Wald (BFW) ermöglicht. So wurde auf Basis von Sentinel-2-Zeitreihen sowie Gelände- und Vegetationshöhenmodellen mit neuronalen Netzen (eine Methode des maschinellen Lernens bzw. künstlicher Intelligenz) eine Baumartenkarte für den gesamten Wald Österreichs erstellt (Schadauer et al. 2024). Die Baumartenkarte hat eine räumliche Auflösung von zehn Metern und unterscheidet 26 Klassen, die sowohl Rein- als auch Mischklassen umfassen. Auf Basis der Baumartenkarte wurden ebenfalls Baumarten-Anteilsschätzungs-karten erstellt. Diese befinden sich in einem ersten Entwicklungsstadium und wurden noch nicht validiert. Insbesondere der Fichtenanteil ist zentraler Bestandteil der Bestandesprädisposition, bietet dieser doch erstmals eine baumartenspezifische Anteilsschätzung mit einer räumlichen Auflösung von zehn Metern für ganz Österreich.

Die jährlich aktualisierten Anomaliekarten sind ebenfalls Produkt eines satellitenbildgestützten Sentinel-2-Zeitreihenverfahrens, das pixelweise modelliert, ob sich die Vegetation im normalen Phänologieverlauf entwickelt oder davon abweicht

TABELLE 1: Übersicht aller für die Prädisposition gegenüber Buchdrucker-Befall verwendeten Variablen und deren Gewichtung, die flächendeckend für ganz Österreich verfügbar sind (Stand: März 2025); * Anomalien werden, gewichtet nach dem Jahr des Auftretens, als fixer Wert in die Karten implementiert (z.B. 2024: 0.5 oder 2020: 0.1); ** Die Anomalien für das Jahr 2024 waren zum Saisonstart 2025 noch nicht vollständig erfasst.

TABLE 1: Overview of all variables used for predisposition to *Ips typographus* infestation and their weighting, which are available for the whole of Austria (as of March 2025); *: Anomalies are weighted according to the year of occurrence and implemented as a fixed value in the maps (e.g. 2024: 0.5 or 2020: 0.1); **: The anomalies for the year 2024 were not yet fully recorded at the start of the 2025 season.

Variable	Level	Gewichtung	Beschreibung
Fichtenanteil	Bestand	1.0	Fichtenanteil (5 Anteilsklassen)
Baumhöhe	Bestand	1.0	Höhe der dominanten Bäume (m)
Kronenschlussgrad	Bestand	0.4	Anteil der überschirmten Fläche (%)
Frischer Bestandesrand	Bestand	1.0	Anomalieränder bis in 100 m Entfernung (1-3 Jahre alt)
Anomalie	Bestand	-*	Detektierte Anomalien (2019-2024)**
PAS-Sturm-Bestand	Bestand	1.0	Bestandesprädisposition gegenüber Sturmschäden
PAS-Schnee-Bestand	Bestand	0.2	Bestandesprädisposition gegenüber Schneeschäden
Buchdrucker-Entwicklung	Standort	1.0	Mittlere jährliche Generationenzahl von <i>Ips typographus</i> (2015-2024)
Geländemorphologie	Standort	0.4	Geländemorphologie basierend auf den topographischen Positionsindex (TPI)
Klimatische Wasserbilanz	Standort	1.0	Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (2015-2024)
PAS-Sturm-Standort	Standort	1.0	Standortsprädisposition gegenüber Sturmschäden
PAS-Schnee-Standort	Standort	0.2	Standortsprädisposition gegenüber Schneeschäden

(Löw und Koukal 2020). Das Verfahren wurde speziell zur Erkennung von abrupten Ereignissen entwickelt. Darunter fallen Störungen, wie Borkenkäferbefall oder Windwürfe, aber auch geplante Nutzungen, Durchforstungen und Wegebaumaßnahmen. Dies bedeutet, dass bestandesersetzende Störungen detektiert werden können, eine ursachenspezifische Zuordnung derzeit aber noch nicht möglich ist. Nichtsdestotrotz bieten die Anomalien bereits in der jetzigen Version einen deutlichen Mehrwert, da durch sie Störungen flächenscharf und jahresgenau identifiziert und daraus neu entstandene Bestandesänder mit erhöhter Anfälligkeit abgeleitet werden können.

Eine weitere Dynamisierung der Prädispositionsabschätzung wird auch auf Standorts-Level durch die Berücksichtigung der jeweils vergangenen zehn Jahre für aus Klimaparametern abgeleiteten Größen realisiert. Beispielsweise wird das Zehnjahresmittel der klimatischen Wasserbilanz während der Vegetationsperiode (April bis September) stets zu Beginn eines Jahres vor Start der Buchdrucker-Saison neu berechnet. Für das Jahr 2025 bezieht sie sich demnach auf die Jahre 2015 bis 2024. Die kürzere Periode von zehn Jahren wurde anstatt der zuvor üblichen Klimareferenzperiode (30 Jahre) gewählt, um die deutlich beschleunigten klimawandelbedingten Änderungen der vergangenen Jahre stärker zu berücksichtigen.

Verfahren der Prädispositionsberechnung

Für die Prädispositionsberechnung werden alle Daten auf ein einheitliches 10m-Referenzraster übertragen. Gröber aufgelöste Variablen, beispielsweise die klimatische Wasserbilanz oder die

Buchdrucker-Entwicklung der vergangenen Dekade (mit 1000 Metern räumlicher Auflösung) werden mittels geographisch gewichteter Regression über die Seehöhe in das Referenzraster überführt. Variablen können Prädispositionswerte zwischen 0 (sehr gering) und 1 (sehr hoch) bzw. dem Maximalwert der Gewichtung der Variable annehmen (siehe Tabelle 1). Mit 1 gewichtete Variablen haben den größten Einfluss auf eine Prädisposition, der mit abnehmender Gewichtung kontinuierlich zurückgeht. Kategoriale Eingangsgrößen, wie beispielsweise der Fichtenanteil (fünf Anteilsklassen) oder die Buchdrucker-Entwicklung (sechs Entwicklungsstufen), wurden direkt in die entsprechenden PAS-Werte umklassifiziert. Kontinuierliche Größen, wie die Baumhöhe oder die klimatische Wasserbilanz, wurden hingegen mithilfe kontinuierlicher Funktionen in einen PAS-Wert umgerechnet, wodurch größere Sprünge in den Werten vermieden werden konnten. In die Berechnung der Prädisposition des Standorts sowie des Bestandes gegenüber Buchdrucker-Befall gehen zusätzlich zu den einzelnen Variablen die gesondert berechneten Prädispositionen gegenüber Sturm- und Schneeschäden ein (Tabelle 1). Nach Berechnung der einzelnen Prädispositionswerte je Variable wird jeweils für den Bestand und Standort gesondert die resultierende Summe durch den maximal möglichen Gesamtwert (Bestand: 4,6, Standort: 3,6) geteilt. Der sich ergebende Wert wird in folgende fünf Klassen übersetzt: „sehr gering“ ($\leq 0,2$), „gering“ ($> 0,2$ bis $\leq 0,4$), „mittel“ ($> 0,4$ bis $\leq 0,6$), „hoch“ ($> 0,6$ bis $\leq 0,8$) und „sehr hoch“ ($> 0,8$).

Für die Anfälligkeit des Bestandes gegenüber Buchdrucker-Befall sind zusätzlich folgende drei Ausschlusskriterien

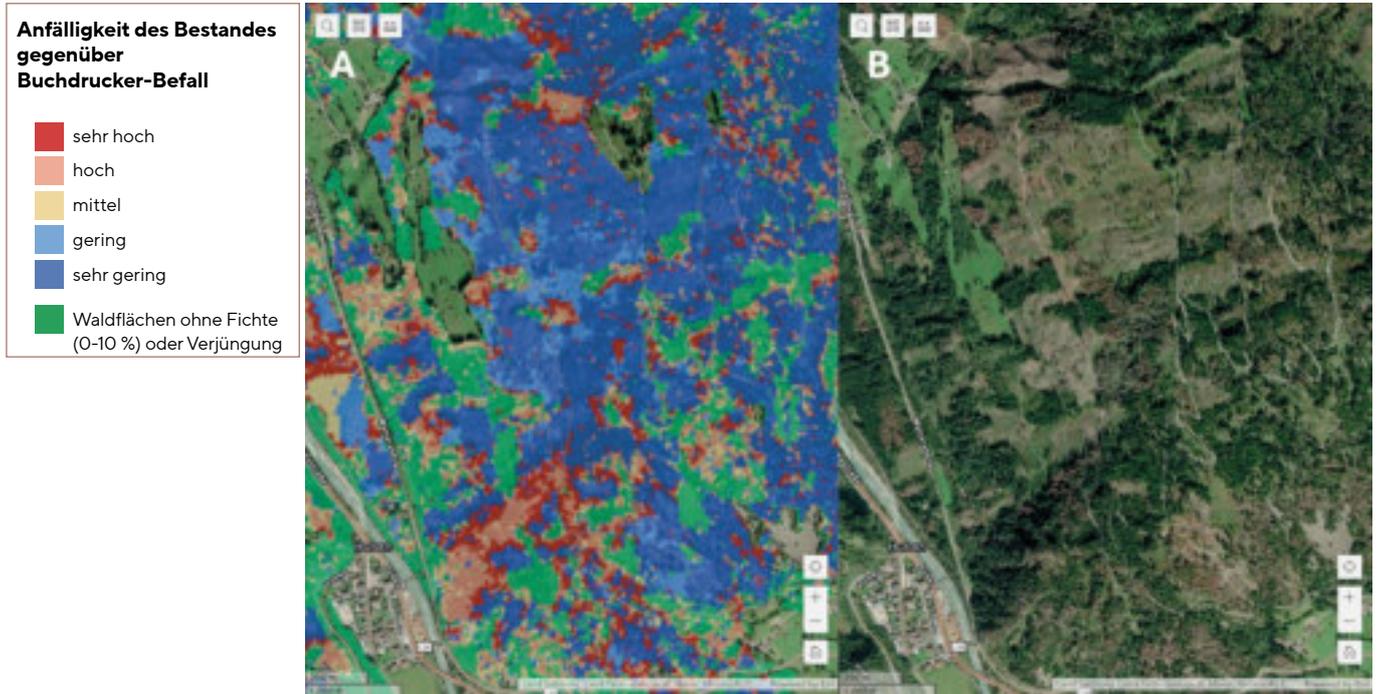


ABBILDUNG 2: Gegenüberstellung der A) Prädisposition des Bestandes gegenüber Buchdrucker-Befall und B) Luftbildaufnahme einer Schadholzfläche in Osttirol anhand der Zweikarten-Ansicht im Borkenkäfer-Dashboard (Stand: April 2025).

FIGURE 2: Comparison of the A) stand predisposition to *Ips typographus* infestation and B) aerial photograph of a disturbed forest area in Eastern Tyrol based on the two-map view in the bark beetle dashboard (as of April 2025).

integriert: Fichtenanteil Klasse 0 (0-10 %), Baumhöhe < 6 m und Kronenschlussgrad < 1 %. Ist eine dieser drei Bedingungen erfüllt, besteht keine Prädisposition der Bestände gegenüber Buchdrucker-Befall. Hier gilt allerdings zu beachten, dass es sich um Momentaufnahmen handelt und Bäume wieder in den Gefährdungsbereich hineinwachsen oder der Fichtenanteil wieder zunehmen könnte. In den aktuellen Prädispositionskarten wurden diese drei Ausschlusskriterien als Extrakategorie „Waldfläche ohne Fichte (0-10 %) oder Verjüngung“ zusammengefasst. Auch die implementierten Anomalien (Analysezeitraum 2019-2024) geben den PAS-Wert vor (Tabelle 1). So wurden für detektierte Anomalien folgende Werte für die vorangegangenen sechs Jahre angenommen: 2019-2022 0,1 (sehr geringe Gefährdung), 2023 0,3 (geringe Gefährdung) und 2024 0,5 (mittlere Gefährdung). Erfasste Anomalien sind bestandesersetzend, d.h. auf den Flächen befinden sich keine potenziellen Wirtsbäume mehr oder allenfalls abgestorbene Individuen. Dadurch sinkt direkt auf der Fläche die Prädisposition stark ab. Für die ersten Jahre nach detektierter Anomalie wird allerdings noch ein Restrisiko angenommen, da gegebenenfalls noch befallsfähiges Brutmaterial auf der Fläche vorhanden sein könnte. Allerdings steigt in den neu entstandenen Bestandesrändern rund um die Anomalien die Anfälligkeit gegenüber Buchdrucker-Befall (und Sturmschäden) deutlich an. Daher wird für die Anomalieränder eine temporär erhöhte Anfälligkeit gegenüber Buchdrucker-Befall bis zu drei Jahre nach der Anomalie angenommen, die mit zunehmender Entfernung bis 100 Meter kontinuierlich abnimmt

(Wermelinger 2004). In Abbildung 2 wird anhand der Zweikarten-Ansicht im Borkenkäfer-Dashboard beispielhaft für eine Schadfläche in Osttirol veranschaulicht, wie sich die erfassten Anomalien auf die Anfälligkeit des Bestandes gegenüber Buchdrucker-Befall auswirken.

Überprüfung der Prädispositionskarten

Die Prädisposition des Bestandes gegenüber Buchdrucker-Befall wurde mithilfe des Borkenkäfer-Dashboards direkt im Wald auf Plausibilität überprüft. Die 28 Aufnahmepunkte in den Bezirken Neunkirchen, Weiz und Bruck-Mürzzuschlag wurden zufällig mit ausreichend Abstand zu Verkehrs- und Forststraßen gewählt. Danach wurde ein Zentralbaum ausgewählt und von diesem ausgehend im 20m-Radius die Prädisposition des Bestandes von den Projektbeteiligten gutachterlich in die sechs Prädispositionsklassen „keine Fichten im befallsfähigen Alter oder Verjüngung“, „sehr gering“, „gering“, „mittel“, „hoch“, „sehr hoch“ eingeschätzt. Bei abweichenden Abschätzungen innerhalb des Teams wurden diese diskutiert und schließlich eine Konsensbewertung ermittelt. Erst danach wurde das Borkenkäfer-Dashboard aufgerufen, mithilfe der Standortfunktion der Aufnahmepunkt genau lokalisiert und die auf Geodaten beruhende Bestandesprädisposition abgefragt. Dadurch konnten beide Ergebnisse direkt im Wald auf den Aufnahmepunkten miteinander verglichen werden. Hierbei gilt zu beachten, dass die Dashboard-Karte einen 10m-Raster aufweist und sich nicht auf eine waldbauliche Einheit (z.B. Abteilung) bezieht. Dadurch war es möglich, dass

Bestandesteile mit „hoher“ und „geringer“ Prädisposition kleinräumig direkt nebeneinander liegen, beispielsweise aufgrund von inhomogener Baumartenmischung oder hoher Strukturvielfalt. Bei sehr heterogenen Beständen wurde daher gutachterlich eine mittlere Prädisposition geschätzt. Neben der Ansprache wurden die Aufnahmepunkte ebenfalls durch Fotos dokumentiert und die Koordinaten genau erfasst.

Nach dem Test wurden zur weiteren Überprüfung die genauen Werte für PAS-Bestand und die Eingangsgrößen für das zentrale 10m-Pixel und umliegende Bereiche abgefragt. Bei dem Test konnte eine hohe Übereinstimmung (75 % richtig klassifiziert) zwischen der berechneten und vor Ort bestimmten Bestandesprädisposition gegenüber Buchdrucker-Befall nachgewiesen werden. Von den nicht exakt richtig klassifizierten Aufnahmepunkten waren 18 % ausreichend klassifiziert, d.h. die Abweichungen waren maximal eine Prädispositions-kategorie groß und ließen sich durch örtliche Gegebenheiten und Nachbarschaftsbeziehungen erklären. Insbesondere Anomalien, frische Bestandesränder und Reinbestände wurden sehr gut im System erfasst und eingeordnet. Schwächen zeigten sich hingegen bei Mischwäldern sowie stark strukturierten und lichten Beständen, beispielsweise Fichten-Jungwuchs gemischt mit Lärchen-Altholz. Dies ist teils unmittelbar auf die fernerkundungs-basierten Verfahren zur Bestimmung von Bestandsgrößen zurückzuführen.

Schlussfolgerung und Ausblick

Mithilfe hochauflösender Eingangsdaten konnten erstmalig für das gesamte österreichische Bundesgebiet Prädispositionskarten mit zehn Metern räumlicher Auflösung erstellt werden, in denen Störungen der vorangegangenen Jahre räumlich explizit erfasst und die erhöhte Gefährdung durch neu entstandene Bestandesränder berücksichtigt sind. Eine wichtige Neuerung ist die insgesamt dynamischere Abschätzung der Prädisposition mit einer jährlich aktualisierten Berechnung der Gefährdung von Standort und Bestand zu Beginn der Borkenkäfersaison.

Das aktuell im PAS verwendete Variablenset kann in Zukunft noch erweitert werden, beispielsweise durch ertragskundliche Parameter, wie die Stammzahl oder der jährliche Holzzuwachs, oder Bodenparameter, wie die nutzbare Feldkapazität oder der Grobbodenanteil. So wurden bereits testweise (nicht in der Onlineversion) für die Steiermark regionalisierte Bodenparameter (aus dem Projekt FORSITE) in die Berechnung der standörtlichen Prädisposition miteinbezogen. Sobald diese Größen für ganz Österreich verfügbar wären, könnten sie in das System implementiert werden.

Eine Überprüfung in der Steiermark und Niederösterreich zeigte eine hohe Übereinstimmung (ca. 75 %) zwischen den modellierten und vor Ort überprüften Prädispositionswerten. Das Ergebnis verdeutlicht das Potenzial der Prädispositionsabschätzung gegenüber Buchdrucker-Befall, weist aber auch auf Verbesserungsmöglichkeiten hin. Insgesamt sollte bei Begutachtung und Interpretation der Prädispositionskarten stets ein größerer Bereich inkludiert und nicht nur Bezug auf ein-

zelne Pixelwerte genommen werden. Nach jeder Neuberechnung zu Beginn der Buchdrucker-Saison sollten die neu entstandenen Prädispositionskarten anhand aktueller Luftbilder sowie direkt im Wald auf Plausibilität überprüft werden.

Eine Kombination von proaktiver und reaktiver Waldbewirtschaftung auf Grundlage einer umfassenden und operationalen Bewertung von Störungsrisiken, wie beispielsweise Buchdrucker-Befall, ist der Schlüssel zum Erhalt der vielfältigen Ökosystemleistungen von Fichtenwäldern in Zeiten gravierender klimatischer Veränderungen. Gerade im natürlichen Verbreitungsgebiet der Fichte und insbesondere in den höheren, alpinen Lagen gibt es wenig Alternativen zu dieser nach wie vor wirtschaftlich sehr relevanten Baumart. Eine gute Kenntnis der Anfälligkeit von Wäldern gegenüber Buchdrucker-Befall und weiteren Schadfaktoren, wie Sturm und Schnee, unterstützt maßgeblich die Planung von vorbeugenden und bekämpfenden Maßnahmen. Mit den weiterentwickelten jahresaktuellen und hochaufgelösten Prädispositionskarten für den Bestand (unter Einbeziehung aktueller Störungen der Vorjahre und frischer Bestandesränder) und für den Standort (unter Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen der vergangenen Dekade) stehen der österreichischen Forstpraxis neue wertvolle Entscheidungshilfen zu Beginn einer jeden Borkenkäfersaison zur Verfügung, die über das Borkenkäfer-Dashboard kostenfrei angeboten werden.

Danksagung

Für die synergistische Zusammenarbeit gebührt Benjamin Schumacher, Christoph Bauerhansl und David Keßler vom BFW ein herzliches Dankeschön. Des Weiteren bedanken wir uns für den fachlichen Austausch bei den Projektbeteiligten von PHENIPS plus Peter Baier, Josef Pennerstorfer und Thomas Kirisits sowie für die Datenbereitstellung bei den Projektbeteiligten aus FORSITE1, FORSITE2 und DECIDE. Die Forschungsarbeiten wurden im Auftrag und mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft realisiert: Vorhaben RAWLog – Waldfonds WF M4 / Antragsnr. BMLRT/III-2021-M4/2 (FAI.2).

Literatur

- Berryman, A.A., 1986: Forest insects: principles and practice of population management. New York, Plenum Press, 279 S. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-5080-4>
- Führer, E, Nopp, U., 2001: Ursachen, Vorbeugung und Sanierung von Waldschäden Wien, Facultas Universitätsverlag, 524 S.
- Hallas, T., Netherer, S., Kirisits, T., Baier, P., Pennerstorfer, J., Schadauer, T., Schadauer, K., Hoch, G., 2024a: Tagesaktuelle Borkenkäfer-Trends. Forstzeitung, Wien, 135(7), 22-24. <https://www.forstzeitung.at/markt/2024/07/borkenkaefer-dashboard.html>
- Hallas, T., Netherer, S., Pennerstorfer, J., Karel, S., Schadauer, T., Löw, M., Baier, P., Bauerhansl, C., Kessler, D., Englisch, M.,

- Huber, C., Nemesthoty, N., Kirisits, T., Schadauer, K., Hoch, G., 2024b: The Bark Beetle Dashboard – towards a holistic risk assessment of *Ips typographus*. In: IUFRO (editor.) Forests & Society towards 2050 – Book of abstracts 26, IUFRO World Congress, Stockholm 2024.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11420.09603>
- Hallas, T., Steyrer, G., Laaha, G., Hoch, G., 2024c: Two unprecedented outbreaks of the European spruce bark beetle, *Ips typographus* L. (Col., Scolytinae) in Austria since 2015: Different causes and different impacts on forests. Central European Forestry Journal, 70, 263–274.
<https://doi.org/10.2478/forj-2024-0014>
- Hlásny, T., König, L., Krokene, P., Lindner, M., Montagné-Huck, C., Müller, J., Qin, H., Raffa, K.F., Schelhaas, M.-J., Svoboda, M., Viiri, H., Seidl, R., 2021: Bark beetle outbreaks in Europe: State of knowledge and ways forward for management. Current Forestry Reports, 7(3), 138–165.
<https://doi.org/10.1007/s40725-021-00142-x>
- Jakoby, O., Stadelmann, G., Lischke, H., Wermelinger, B., 2016: 3.9 Borkenkäfer und Befallsdisposition der Fichte im Klimawandel. In: Pluess, A.R., Augustin, S., Brang, P. (Eds.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidg. Forschungsanstalt WSL, 247–264. https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:10620/datastream/PDF/Jakoby-2016-Borkenk%C3%A4fer_und_Befallsdisposition_der_Fichte.pdf
- Lackner, C., Schreck, M., Walli, A.-M., 2023: Österreichischer Waldbericht 2023. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML) & Bundesforschungszentrum für Wald (BFW), 64 S.
<https://www.bmluk.gv.at/themen/wald/wald-in-oesterreich/oesterreichischer-waldbericht-2023.html>
- Löw, M., Koukal, T., 2020: Phenology modelling and forest disturbance mapping with Sentinel-2 time series in Austria. Remote Sensing 12(24), 1–26. <https://doi.org/10.3390/rs12244191>
- Netherer, S., Nopp-Mayr, U., 2005: Predisposition assessment systems (PAS) as supportive tools in forest management—rating of site and stand-related hazards of bark beetle infestation in the High Tatra Mountains as an example for system application and verification. Forest Ecology and Management, 207(1–2), 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.020>
- Nordkvist, M., Eggers, J., López-Andújar Fustel, T., Klapwijk, M.J., 2023: Development and implementation of a spruce bark beetle susceptibility index: A framework to compare bark beetle susceptibility on stand level. Trees, Forests and People, 11, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100364>
- Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M.E., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., Hauf, Y., Jasinevicius, G., Labonne, S., Linkevicius, E., Mahnken, M., Milanovic, S., Nabuurs, G.J., Nagel, T.A., Nikinmaa, L., Panyatov, M., Bercak, R., Seidl, R., Ostrogovic Sever, M.Z., Socha, J., et al., 2023: Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. Global Change Biology, 29(5), 1359–1376.
<https://doi.org/10.1111/gcb.16531>
- Pietzsch, B.W., Peter, F.J., Berger, U., 2021: The effect of sanitation felling on the spread of the European spruce bark beetle—an individual-based modeling approach. Frontiers in Forests and Global Change, 4.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.704930>
- Schadauer, T., Karel, S., Loew, M., Knieling, U., Kopecky, K., Bauerhansl, C., Berger, A., Graeber, S., Winiwarter, L., 2024: Evaluating tree species mapping: probability sampling validation of pure and mixed species classes using convolutional neural networks and Sentinel-2 time series. Remote Sensing, 16(16), 1–32. <https://doi.org/10.3390/rs16162887>
- Seidl, R., Baier, P., Rammer, W., Schopf, A., Lexer, M.J., 2007: Modelling tree mortality by bark beetle infestation in Norway spruce forests. Ecological Modelling, 206(3–4): 383–399.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.04.002>
- Seidl, R., Netherer, S., Thaler, T., 2019: 8.1 Risikomanagement im Kontext von Störungen. In: Wohlgemuth, T., Jentsch, A., Seidl, R. (Eds.): Störungsökologie. Bern, Haupt Verlag, 1st, 337–354.
- Speight, M.R., Wainhouse, D., 1989: Ecology and management of forest insects. Oxford, Clarendon Press, 374 S.
- Temperli, C., Bugmann, H., Elkin, C., 2013: Cross-scale interactions among bark beetles, climate change, and wind disturbances: a landscape modeling approach. Ecological Monographs, 83(3), 383–402. <https://doi.org/10.1890/12-1503.1>
- Temperli, C., Blattert, C., Stadelmann, G., Brändli, U.-B., Thürig, E., 2020: Trade-offs between ecosystem service provision and the predisposition to disturbances: a NFI-based scenario analysis. Forest Ecosystems, 7(27), 1–17.
<https://doi.org/10.1186/s40663-020-00236-1>
- Thrippleton, T., Temperli, C., Krumm, F., Mey, R., Zell, J., Stroheker, S., Gossner, M.M., Bebi, P., Thürig, E., Schweier, J., 2023: Balancing disturbance risk and ecosystem service provisioning in Swiss mountain forests: an increasing challenge under climate change. Regional Environmental Change, 23(29), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-02015-w>
- Wermelinger, B., 2004. Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus*—a review of recent research. Forest Ecology and Management, 202(1–3), 67–82.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.018>