

Verdichtung des Stichprobengitters der Waldzustandserhebung ermöglicht robustere Aussagen zu Nebenbaumarten und Schadursachen

**Nikolai Knapp, Viktoria Dietrich, Petra Dühnelt, Judith Bielefeldt,
Nicole Wellbrock**

Thünen Working Paper 286

Dr. Nikolai Knapp, Dr. Viktoria Dietrich, Petra Dühnelt, Judith Bielefeldt, Dr. Nicole Wellbrock
Thünen-Institut für Waldökosysteme
Alfred-Möller-Str. 1, Haus 41/42
16225 Eberswalde

Telefon: +49 3334 3820 387

Fax: +49 3334 3820 354

E-Mail: nikolai.knapp@thuenen.de

Thünen Working Paper 286

©2026 the authors, Thünen Institute. This is an open access publication distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license

Eberswalde/Germany, März 2026

Zusammenfassung

In der Waldzustandserhebung (WZE) wird jedes Jahr die Vitalität der wichtigsten Waldbaumarten erfasst, um deren langjährige Entwicklung zu dokumentieren und mögliche Schäden, welche sich in erhöhter Kronenverlichtung äußern, erkennen zu können. Die Ansprache der Bäume findet hierzu an Stichprobenpunkten statt, die in einem regelmäßigen Gittermuster über Deutschland verteilt angeordnet sind. Für den Waldzustandsbericht der Bundesregierung wurden in der Vergangenheit ausschließlich Daten von Stichprobenpunkten ausgewertet, welche im Abstand von 16 km voneinander entfernt liegen, auf dem sogenannten 16×16-Gitter. Die Bundesländer erheben in der Regel für ihre Waldzustandsberichte Daten von zusätzlichen Flächen auf einem dichteren Stichprobengitter, dem sogenannten 8×8-Gitter. Diese 8×8-Daten liegen dem Bund allerdings für die Vergangenheit nur für ausgewählte Jahre vor, in denen auf diesem Gitter auch die Bodenzustandserhebung (BZE) stattgefunden hat. Zukünftig soll der Waldzustandsbericht des Bundes alle 8×8-Daten berücksichtigen. Durch den größeren Stichprobenumfang sollen die Schätzfehler reduziert werden, um insbesondere robustere Aussagen über die weniger häufig vorkommenden Nebenbaumarten und über die wichtigsten Schadursachen machen zu können.

Wichtigste Schätzgrößen für die einzelnen Baumarten sind die mittlere Kronenverlichtung, der Anteil der Waldfläche mit deutlicher Kronenverlichtung über 25% und der Anteil der Waldfläche, der von einer bestimmten Schadursache betroffen ist. Die Schätzunsicherheiten für diese Größen können jeweils als Standardfehler angegeben werden. Bei der Berechnung der Standardfehler müssen allerdings einige Aspekte des Stichprobendesigns berücksichtigt werden. Zum einen handelt es sich um eine Klumpenstichprobe und zum zweiten müssen die Stichprobenpunkte verschieden stark gewichtet werden, da die räumliche Anordnung der Punkte auf dem 8×8-Gitter in einigen Bundesländern variiert. Hierfür wird ein räumliches Gewichtungsverfahren basierend auf einer Voronoi-Kachelung eingeführt.

Anhand der vorliegenden 8×8-Daten aus den Jahren der BZE, 2006-2008 und 2022-2024, wurde analysiert wie sich die Ergebnisse, abhängig davon, ob nur 16×16-Daten oder ob alle 8×8-Daten in die Auswertung einfließen, unterscheiden. Dabei zeigte sich insbesondere bei den Nebenbaumarten, dass sich die Standardfehler der Schätzungen mit der umfassenderen Datengrundlage des 8×8-Gitters reduzieren. In einzelnen Fällen lagen die 16×16-Werte auch merklich neben den 8×8-Werten. Insgesamt zeigte sich für die überwiegende Mehrheit der Baumarten für den Zeitraum 2022-2024 eine Verschlechterung im Kronenzustand gegenüber 2006-2008. Für welche Baumarten man diese Verschlechterung als statistisch signifikant bezeichnen kann, wurde anhand der Konfidenzintervalle der Schätzwerte bestimmt. Anhand der 8×8-Daten lassen sich für eine größere Anzahl von Baumarten signifikante Verschlechterungen feststellen, als mit den 16×16-Daten. Die wichtigsten Schadursachen unterscheiden sich von Baumart zu Baumart und verschiedene Schadursachen zeigen sehr unterschiedliche zeitliche Verläufe. Auch hier helfen die zusätzlichen Daten des 8×8-Gitters die Standardfehler zu reduzieren und höhere Schätzgenauigkeiten zu erzielen.

Die Studie dokumentiert das Gewichtungs- und Berechnungsverfahren für Schätzwerte und Standardfehler für die Ergebnisse der Waldzustandserhebung. Sie verdeutlicht die Vorteile der Berücksichtigung aller Daten des 8×8-Gitters für bundesweite Aussagen über den Waldzustand. Eine genauere Erfassung von Vitalitätstrends auch für weniger häufige Baumarten ist vor allem angesichts des voranschreitenden Klimawandels und der nötigen Waldanpassung von großem Interesse.

Schlüsselwörter: Waldzustandserhebung, Stichprobengitter, Gewichtungsverfahren, Nebenbaumarten, Schadursachen

Abstract

The Crown Condition Survey (WZE) records the vitality of the most important forest tree species every year in order to document their long-term development and identify potential problems that manifest themselves in increased crown defoliation. The trees are assessed at sampling points arranged in a regular grid pattern across Germany. In the past, the German government's Forest Condition Report exclusively evaluated data from sampling points located 16 km apart on the so-called 16×16 grid. The federal states usually collect additional data for their forest condition reports on a denser sampling grid, the so-called 8×8 grid. However, the federal government only has access to this 8×8 data for selected years in the past, during which the National Forest Soil Inventory (BZE) was also carried out on this grid. In future, the federal government's forest condition report will take all 8×8 data into account. The larger sample size is intended to reduce estimation errors, in particular to enable more robust statements to be made about less abundant tree species and the most important causes of damage.

The most important condition variables for the individual tree species are the average crown defoliation, the proportion of the area with significant crown defoliation of over 25% and the proportion of the area affected by a specific cause of damage. The estimation uncertainties for these condition variables can be specified as standard errors in each case. However, when calculating the standard errors, several aspects of the sample design must be taken into account. Firstly, this is a cluster sample and, secondly, the sample points must be weighted differently because the spatial arrangement of the points on the 8×8 grid varies in some federal states. For this purpose, a spatial weighting method based on Voronoi tessellation is introduced.

Using the available 8×8 data from the BZE years 2006-2008 and 2022-2024, an analysis was conducted to determine how the results differ depending on whether only 16×16 data or all 8×8 data are included in the evaluation. It was found that, particularly for less abundant tree species, the standard errors of the estimates were reduced with the more comprehensive data basis of the 8×8 grid. In individual cases, the 16×16 values also differed noticeably from the 8×8 values. Overall, the vast majority of tree species showed a deterioration in crown condition when the period 2022-2024 was compared to 2006-2008. The tree species for which this deterioration can be described as statistically significant were determined on the basis of the confidence intervals of the estimated values. The 8×8 data reveal significant deterioration for a larger number of tree species than the 16×16 data. The main causes of damage vary from tree species to tree species, and different causes of damage show very different temporal patterns. Here, too, the additional data from the 8×8 grid help to reduce standard errors and achieve higher estimation accuracy.

The study documents the weighting and calculation methods used for estimates and standard errors for the results of the Crown Condition Survey. It highlights the advantages of considering all data from the 8×8 grid for nationwide statements on forest condition. A more accurate recording of vitality trends, particularly for less common tree species, is of great interest, especially in view of advancing climate change and the necessary adaptation of forests.

Keywords: Crown Condition Survey, Sampling Grid, Weighting Approach, Less Common Tree Species, Damage Causes

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Material und Methoden | 2 |
| 2.1 | Aufnahmeverfahren | 2 |
| 2.2 | Gewichtungsverfahren | 3 |
| 2.3 | Schätzgenauigkeit | 6 |
| 3 | Ergebnisse | 8 |
| 3.1 | Kennzahlen der Stichprobengitter | 8 |
| 3.2 | Entwicklung der mittleren Kronenverlichtung | 10 |
| 3.2.1 | Gesamtentwicklung | 10 |
| 3.2.2 | Hauptbaumarten | 10 |
| 3.2.3 | Andere Nadelbäume | 12 |
| 3.2.4 | Andere Laubbäume | 14 |
| 3.3 | Signifikante Verschlechterung des Kronenzustands | 16 |
| 3.4 | Unterschiede in den Ergebnissen der Stichprobengitter | 16 |
| 3.5 | Entwicklung der Schadursachen | 22 |
| 4 | Diskussion | 24 |
| 5 | Fazit | 25 |
| | Literatur | 26 |

1 Einleitung

Die Waldzustandserhebung (WZE) liefert seit 1984 jährlich Informationen über die Entwicklung der Baumvitalität in Deutschlands Wäldern. Ins Leben gerufen wurde sie, um die erheblichen Waldschäden in den 1980er und 1990er Jahren, gemeinhin als Waldsterben bekannt, und um den Erfolg von Gegenmaßnahmen wie Rauchgasentschwefelung und Bodenschutzkalkung zu überwachen und zu dokumentieren. In den folgenden Jahrzehnten hat sich die WZE als fester Bestandteil des forstlichen Umweltmonitorings in Deutschland etabliert und wird in analoger Weise im Rahmen von ICP Forests auch in vielen anderen Europäischen Ländern nach einem harmonisierten Verfahren auf dem sogenannten Level-I-Stichprobennetz durchgeführt. Insbesondere seit den nach 2018 großflächig aufgetretenen klimawandelbedingten Dürreschäden ist die WZE wieder eine vielgefragte Informationsquelle.

Die WZE ist in Deutschland föderal organisiert. Das Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) leitet eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe zur Waldzustandserhebung. Das Thünen-Institut für Waldökosysteme koordiniert die Zusammenarbeit von Bund und Ländern und ist für die Speicherung und Auswertung der WZE-Daten auf Bundesebene zuständig. Die Datenaufnahmen im Feld erfolgen durch die forstlichen Versuchsanstalten der einzelnen Bundesländer, bzw. durch von diesen beauftragte Sachverständige. Basierend auf diesen Daten veröffentlichen die Landwirtschaftsministerien der Länder üblicherweise jedes Jahr eigene Waldzustandsberichte für ihr jeweiliges Bundesland. Anschließend liefern die forstlichen Versuchsanstalten die Daten an das Thünen-Institut wo die Datenauswertung für den bundesweiten Waldzustandsbericht erfolgt, der dann vom BMLEH veröffentlicht wird. Zusätzliche Informationen, insbesondere über die gesamte verfügbare Zeitreihe, sind online auf den Seiten des Thünen-Instituts abrufbar¹. Die nationalen Waldzustandsdaten werden außerdem an das Programme Coordinating Center des UNECE ICP Forests weitergeliefert.

Das europaweite Level-I-Netz besteht aus Stichprobenpunkten, die auf einem regelmäßigen Gitter in Abständen von jeweils 16 km zueinander angeordnet sind, im Folgenden als 16×16-Gitter bezeichnet. Überall wo ein Punkt dieses Gitters im Wald liegt werden Daten erhoben. In der Mehrheit der Bundesländer existieren überdies Stichprobengitter, deren Punkte in Abständen von 8 km zueinander angeordnet sind, im Folgenden 8×8-Gitter genannt. Diese verdichteten Stichprobengitter sind notwendig, um auch auf der Skala einzelner Bundesländer robuste, repräsentative Aussagen treffen zu können, denn dafür reichen die Daten des 16×16-Gitters in der Regel nicht aus. Die Punkte des 16×16-Gitters sind eine Teilmenge des 8×8-Gitters. Allerdings existieren auch abweichende räumliche Anordnungen der verdichteten Stichprobenpunkte in einzelnen Bundesländern. Zum Beispiel hat Rheinland-Pfalz de facto ein 12×4-Gitter und in Baden-Württemberg liegen die 16×16-Punkte nicht auf den 8×8-Punkten, sondern um jeweils 4 km versetzt also an den Mittelpunkten der 8×8-Quadrate. Trotz dieser Abweichungen werden wir im Folgenden das verdichtete Gitter nominell als 8×8-Gitter bezeichnen. Auf dem nominellen 8×8-Gitter findet außerdem im 15-Jahreszyklus die Bodenzustandserhebung im Wald statt.

Die Datenauswertung für den Waldzustandsbericht des Bundes erfolgte bislang ausschließlich auf Grundlage der 16×16-Daten. Entsprechend lieferten viele Bundesländer über lange Jahre auch nur diese Daten an das Thünen-Institut. Lediglich in den Jahren der drei bisherigen Bodenzustandserhebungen (1989-1992, 2006-2008, 2022-2024) wurden auch die Daten der Waldzustandserhebung auf dem 8×8-Gitter geliefert, um Zusammenhänge zwischen Bodeneigenschaften und Kronenzustand der Bäume analysieren zu können. In Anbetracht der aktuellen Herausforderungen vor die der Klimawandel die Wälder stellt wurde 2023 in der Bund-Länder-Arbeitsgruppe WZE beschlossen auf eine Verstetigung der Lieferung von 8×8-Daten an den Bund, auch über den Erhebungszeitraum der dritten Bodenzustandserhebung hinaus, hinzuwirken. Diese Verstetigung wurde von der Forstchefkonferenz bestätigt. Da die Daten von den Ländern ohnehin auf dem 8×8-Netz erhoben werden, ist eine

¹ <https://blumwald.thuenen.de/wze/aktuelle-ergebnisse-der-wze>

bundesweite Auswertung dieser Daten nicht mit Mehrkosten verbunden. Somit werden die Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2025 bundesweit erstmals auf dem wesentlich größeren 8×8-Datensatz beruhen. Allerdings erfordern die unterschiedlichen realen Gitterdichten in den Ländern die Anwendung eines Gewichtungsverfahrens, welches in den folgenden Kapiteln beschrieben wird.

Der größere Datensatz ermöglicht robustere Aussagen über eine Vielzahl von Waldzustandsindikatoren. Im Jahr 2024 umfasste der 16×16-Datensatz 409 Stichprobenpunkte und 9816 Bäume, der 8×8-Datensatz hingegen 1826 Stichprobenpunkte und 43323 Bäume. Diese umfassendere Datengrundlage ermöglicht die Erhöhung der Genauigkeit der Schätzungen von mittlerer Kronenverlichtung, Schadstufenanteilen und Schadursachen für die verschiedenen Baumarten. Dies äußert sich in der Reduktion der Standardfehler der verschiedenen Schätzgrößen. Während für die häufigen Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche (in der WZE Hauptbaumarten genannt) auch auf Grundlage der 16×16-Daten relativ robuste Schätzungen möglich sind, ermöglicht die Auswertung der 8×8-Daten insbesondere für die selteneren Baumarten (Nebenbaumarten) genauere Schätzungen. Im Zuge des Klimawandels und des nötigen Waldumbaus ist das Vitalitätsmonitoring möglichst vieler Baumarten von großer Wichtigkeit. Außerdem werden seit 2009 im Rahmen der WZE auch Schadursachen erhoben. Jede Schadursache betrifft immer nur einen kleinen Teil der Stichprobenbäume, weswegen auch hier das dichtere Erfassungsnetz genauere Aussagen zu den Prävalenzen verschiedener Schadursachen ermöglicht.

In dieser Studie wird anhand der vorliegenden 8×8-Daten von 2006 bis 2008 und 2022 bis 2024 analysiert, wie sich wichtige Indikatoren zwischen den beiden Erhebungszeiträumen entwickelt haben und wie sich ihre Werte und Schätzunsicherheiten zwischen dem 16×16- und dem 8×8-Gitter unterscheiden. Konkret werden folgende Fragen untersucht: 1) Wie hat sich die mittlere Kronenverlichtung der Hauptbaumarten, sowie der häufigeren Nebenbaumarten entwickelt? 2) Für welche Baumarten lassen sich signifikante Veränderungen der Kronenverlichtung und des Anteils der Probebäume mit deutlicher Verlichtung nachweisen? 3) Wie war die zeitliche Entwicklung wichtiger Schadursachen bei den Hauptbaumarten? 4) Wie unterscheiden sich die Zeitreihen und Fehlermargen, je nachdem ob man den 16×16- oder den 8×8-Datensatz als Grundlage heranzieht?

2 Material und Methoden

2.1 Aufnahmeverfahren

Die WZE findet jährlich im Zeitraum von Mitte Juli bis Anfang September statt. An jedem Stichprobenpunkt wird die Kronenverlichtung von 24 Bäumen geschätzt, welche üblicherweise in einem Kreuztraktdesign angeordnet sind (Wellbrock et al., 2018). Ein Kreuztrakt besteht aus vier Satellitenpunkten die im Abstand von 25 m vom Traktmittelpunkt in alle vier Himmelsrichtungen angeordnet sind. An jedem Satellitenpunkt bilden die sechs nächstgelegenen Bäume der herrschenden Kronenschicht die Stichprobe. Die Schätzung der Kronenverlichtung erfolgt jeweils durch mehrere Sachverständige unter Zuhilfenahme von Ferngläsern und einem Referenzfotobuch. Geschätzt wird der Nadel- bzw. Blattverlust, das heißt die Menge an Blattfläche die dem Baum im Vergleich zu einem voll vitalen Exemplar seiner Art fehlt. Dies geschieht innerhalb eines vorher festzulegenden Boniturbereichs, also dem Bereich der Krone, der nicht durch Effekte wie Konkurrenz, Selbstbeschattung oder vergangene mechanische Schädigungen beeinflusst ist. Der Nadel-/Blattverlust wird in 5%-Stufen angegeben, wobei 0% einen dicht belaubten, hochvitalen Baum und 100% einen kahlen, toten Baum beschreibt. Für übersichtliche Zeitreihendarstellungen im Waldzustandsbericht werden die 5%-Stufen unter Berücksichtigung von Blattvergilbung in grobe Schadstufen eingeteilt. Dabei gelten Bäume mit Nadel-/Blattverlusten bis 10% als unverlichtet, bis 25% als leicht verlichtet (Warnstufe) und darüber als deutlich verlichtet.

2.2 Gewichtungsverfahren

Bisher flossen alle 16×16-Punkte mit gleichem Gewicht in die bundesweite WZE-Auswertung ein (Abbildung 1). Zwar sind die 16×16-Gitter der Bundesländer nicht länderübergreifend aufeinander abgestimmt, so dass entlang von Bundesländergrenzen die Abstände von benachbarten Punkten nicht zwangsläufig 16 km betragen, allerdings wurde dieser Umstand in der Vergangenheit nicht weiter beachtet. Bei der Verarbeitung der 8×8-Daten kommt jedoch das Problem hinzu, dass die realen Gitterdichten von 8 km abweichen und dass ein realer 8×8-Punkt theoretisch eine quadratische Fläche von 64 km² repräsentiert, ein 12×4-Punkt (in Rheinland-Pfalz) jedoch eine rechteckige Fläche von 48 km² und ein Punkt von zueinander versetzt liegenden 8×8- und 16×16-Gittern (in Baden-Württemberg) je nach Kontext eine unterschiedlich große Fläche.

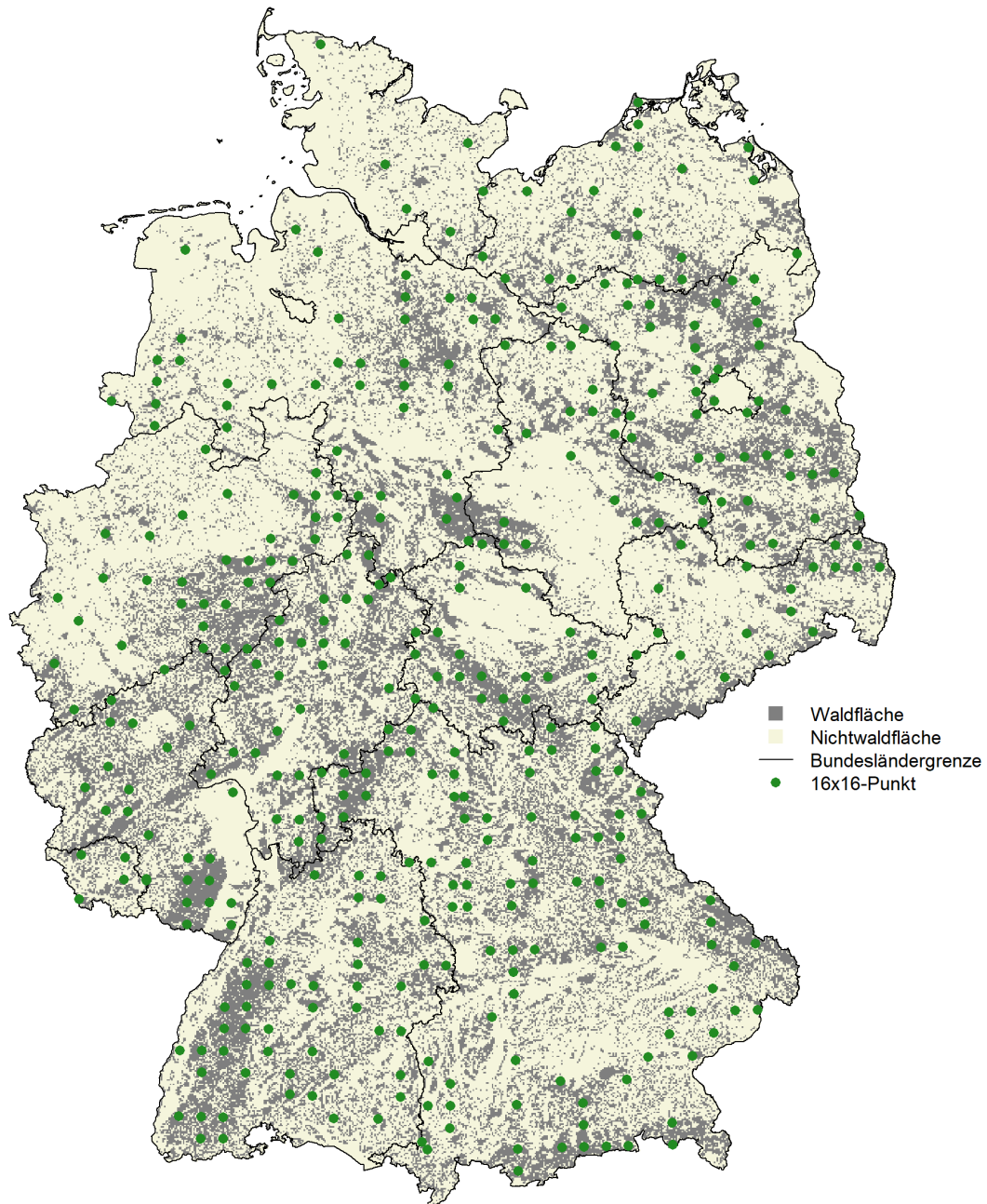
Um diese räumliche Heterogenität der Stichprobendichte zu berücksichtigen wurde folgendes Gewichtungsverfahren angewendet. Für jedes Jahr wurden alle aktiven Stichprobenpunkte für eine Voronoi-Kachelung herangezogen. Anhand der Voronoi-Kacheln lässt sich für jeden beliebigen Ort im Raum eindeutig zuordnen welches der nächstgelegene WZE-Punkt ist. Anschließend wurde anhand einer Wald-Nichtwald-Karte die Waldfläche (WF) in jedem Voronoi-Polygon quantifiziert. Als Wald-Nichtwald-Karte diente die bestockte Holzbodenkarte 2018 (Langner et al., 2022), welche für effizientere Berechnungen vorab von 10 m auf 100 m Auflösung aggregiert wurde. Der Gewichtungsfaktor w für jeden Stichprobenpunkt berechnete sich dann anhand von Gleichung (1).

$$w = \frac{WF_{Polygon}}{WF_{Bund}} \cdot N_{Bund} \quad (1)$$

Die Gewichtungsfaktoren repräsentieren also die Waldfläche, die dem jeweiligen Punkt am nächsten liegt, d.h. innerhalb von dessen Voronoi-Polygon ($WF_{Polygon}$), bezogen auf die Gesamtwaldfläche Deutschlands (WF_{Bund}). Durch die Multiplikation mit der Gesamtanzahl an Stichprobenpunkten in Deutschland (N_{Bund}) wird sichergestellt, dass der Mittelwert aller Gewichtungsfaktoren 1 ist, bzw. deren Summe der Anzahl an Stichprobenpunkten entspricht. Abbildung 2 zeigt alle 2024 aktiven 8×8-Punkte mit ihren Voronoi-Kacheln und Gewichtungsfaktoren.

In vergangenen Bodenzustandserhebungen wurden wegen der unterschiedlichen Gitterdichten bundeslandweit einheitliche Gewichtungsfaktoren anhand der Waldflächen und Punktzahlen pro Bundesland bestimmt (Höhle et al., 2016). Das hier verwendete Voronoi-Kachel-Verfahren hat demgegenüber einige Vorteile: Jeder Punkt repräsentiert die Waldfläche in seiner unmittelbaren Umgebung. Daraus ergeben sich graduelle Übergänge der Punktgewichte beim Übergang von Gebieten mit hoher zu Gebieten mit niedriger Punktdichte. Punkte in waldarmen Regionen haben wenig Gewicht, selbst wenn im weiten Umkreis kein weiterer Punkt liegt. Abweichungen der Punktabstände von den üblichen 8 km, aufgrund von unterschiedlichen Gitteraufhängungspunkten in benachbarten Bundesländern stellen kein Problem dar. Es gibt keine drastischen Gewichtsunterschiede zwischen benachbarten Punkten, nur weil zufällig eine Ländergrenze zwischen ihnen verläuft. Und das Verfahren ist unabhängig von räumlichen Domänen, wie Länderpolygonen oder Verdichtungsregionen. Es kann also flexibel angepasst werden, wenn zusätzliche Stichprobenpunkte an beliebigen Orten hinzukommen oder wegfallen. In Brandenburg wurde das Verfahren für diesen Zweck schon angewendet (Ecker et al., 2023). Dort wurden anhand des 2×2-Gitters der Bundeswaldinventur zusätzliche WZE-Probepunkte in Eichenbeständen angelegt, um trotz der relativen Seltenheit der Eiche in Brandenburg robuste Aussagen über deren Vitalität auf Landesebene machen zu können.

Aus dem Voronoi-Kachel-Verfahren ergibt sich also ein Gewichtungsfaktor für jeden WZE-Punkt in jedem Jahr. Zusätzlich erfolgt noch eine Gewichtung auf der Baumebene. Wenn die Anzahl der Bäume an einem WZE-Punkt vom Sollwert 24 abweicht, werden die Bäume mit dem Faktor $24/N_{Bäume}$ gewichtet. Der Gesamtgewichtsfaktor jedes Baumes ist das Produkt aus Punktgewichtsfaktor aus dem Voronoi-Kachel-Verfahren und Baumgewichtsfaktor $24/N_{Bäume}$.

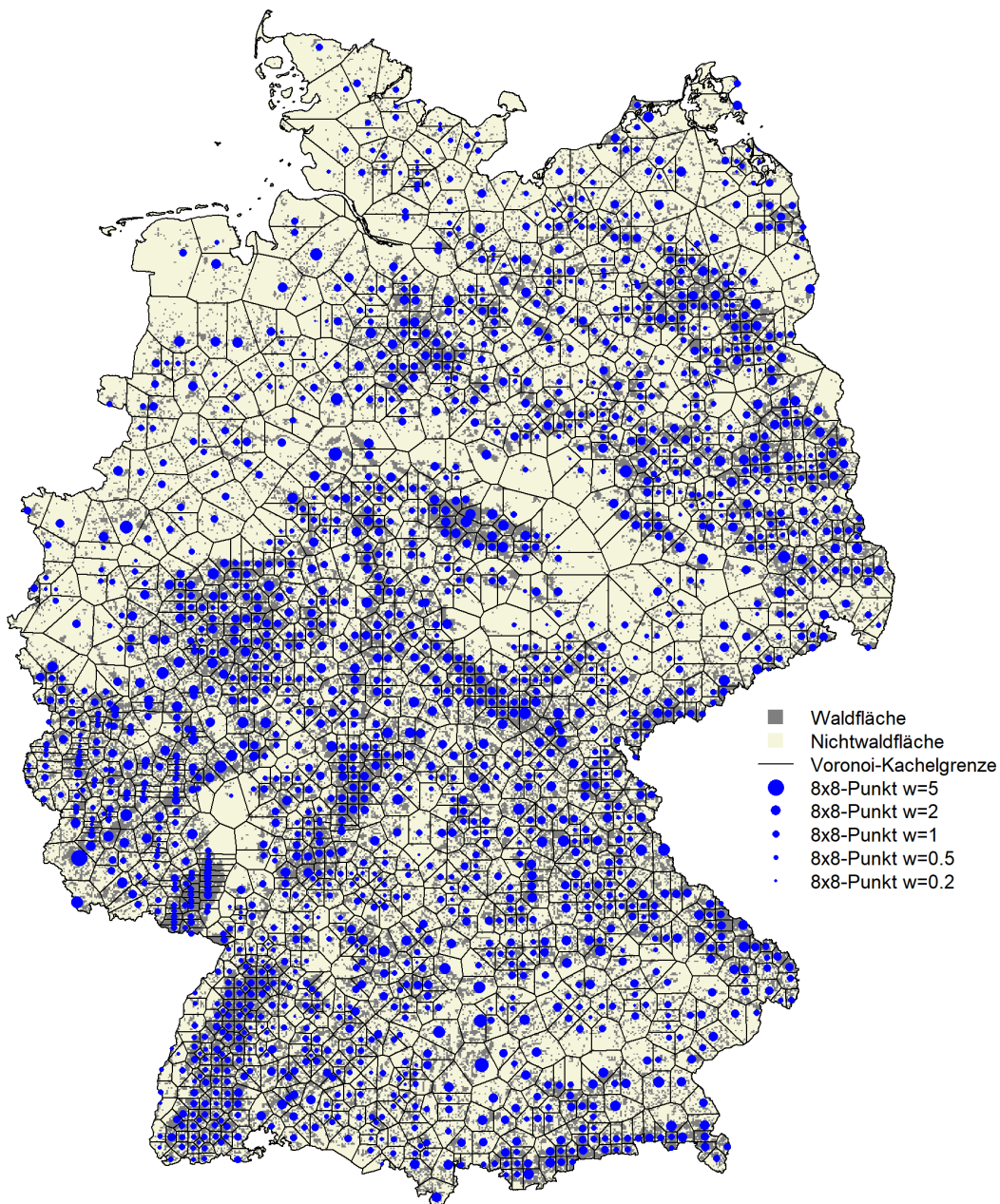
Abbildung 1: Lage aller Stichprobenpunkte des 16×16-Gitters welche 2024 aktiv waren.

Quelle: Eigene Darstellung.

Waldfläche: Bestockte Holzbodenkarte 2018. Verfügbar: https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00084145.

Landesgrenzen: GADM Global Administrative Areas, version 3.4. [Digital geospatial data]. Verfügbar: <https://gadm.org/>.

Abbildung 2: Lage aller Stichprobenpunkte des 8x8-Gitters welche 2024 aktiv waren. Die Größe jedes Punktes veranschaulicht seinen Gewichtungsfaktor, der sich aus der Waldfläche in seinem Voronoi-Polygon bezogen auf die Gesamtwaldfläche Deutschlands ergibt.



Quelle: Eigene Darstellung.

Waldfläche: Bestockte Holzbodenkarte 2018. Verfügbar: https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00084145.

Landesgrenzen: GADM Global Administrative Areas, version 3.4. [Digital geospatial data]. Verfügbar: <https://gadm.org/>.

2.3 Schätzgenauigkeit

Die Schätzgenauigkeiten der verschiedenen Vitalitätsindikatoren wurden anhand von Standardfehlern bestimmt. Standardfehler lassen sich sowohl für Mittelwerte, wie die mittlere Kronenverlichtung pro Baumart, als auch für Anteile der Bäume mit gewissen Merkmalen bestimmen. So wurde untersucht, welcher Anteil der Bäume jeweils deutliche Verlichtungen, d.h. mehr als 25% Nadel-/Blattverlust, aufwies und welcher Anteil der Bäume von spezifischen Schadursachen betroffen war. Die Interpretation des Standardfehlers lautet, dass der wahre Wert der Grundgesamtheit mit etwa 68% Wahrscheinlichkeit im Bereich zwischen ± 1 Standardfehler liegt. Aus den Standardfehlern lassen sich auch Konfidenzintervalle berechnen in denen der wahre Wert mit 90%, 95% oder 99% Wahrscheinlichkeit liegt. Die Größe des Standardfehlers ist abhängig von der Stichprobengröße, weshalb bei Auswertungen der 8x8-Daten gegenüber den 16x16-Daten, aufgrund des durchschnittlich viermal größeren Stichprobenumfangs, eine Reduktion des Standardfehlers zu erwarten ist. Mit der Grundgesamtheit ist in der WZE immer der Anteil, der mit einer bestimmten Baumart bestockten Waldfläche in Deutschland gemeint, nicht der Anteil der Bäume dieser Baumart in Deutschland. Dies hängt mit der Größenverteilung von Bäumen und dem Stichprobendesign der WZE zusammen (Saborowski et al., 1998). Daher beziehen sich die gezeigten Statistiken immer explizit auf den Anteil der Probebäume, welche als Schätzwert für den Anteil der Waldfläche der jeweiligen Baumart in Deutschland dienen. Die Standardfehler wiederum dienen als Maß für die Unsicherheit dieser Schätzung für ganz Deutschland.

Im Falle der WZE verkomplizieren zwei Aspekte die Berechnung von Standardfehlern: 1) Es müssen die bereits beschriebenen Gewichtungsfaktoren berücksichtigt werden. 2) Es handelt sich bei der WZE um eine sogenannte Klumpenstichprobe. Das bedeutet, dass die Zufallsstichprobe nicht auf der Ebene einzelner Bäume erfolgt, sondern auf der Ebene der Punkte (Klumpen von je 24 Bäumen). Dies muss bei der Berechnung der Standardfehler berücksichtigt werden, da eine Behandlung aller Einzelbäume als unabhängige Stichproben zu einer Unterschätzung des Standardfehlers und somit zur Überschätzung der Genauigkeit führen würde.

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte lassen sich die Standardfehler nach den folgenden Gleichungen berechnen. Dabei steht x für die Messgröße (hier Kronenverlichtung), N_P für die Anzahl der WZE-Punkte an denen die Baumart bzw. Artengruppe vorkommt, N_B für die Anzahl der Individuen der Baumart bzw. Artengruppe und $N_{B,M}$ für die Anzahl der Individuen der Baumart bzw. Artengruppe für die das Merkmal M zutrifft (hier Vorkommen einer bestimmten Schadursache). Der Index i steht für einen einzelnen WZE-Punkt, der Index j steht für einen Einzelbaum und w_{ij} für den Gewichtungsfaktor eines Baumes. Zunächst wird nach Gleichung (2) die gewichtete Gesamtanzahl Bäume $N_{B,w}$ berechnet.

$$N_{B,w} = \sum_{i=1}^{N_P} \sum_{j=1}^{N_{B,i}} w_{ij} \quad (2)$$

Die gewichtete mittlere Kronenverlichtung berechnet sich dann gemäß Gleichung (3).

$$\bar{x}_w = \frac{\sum_{i=1}^{N_P} \sum_{j=1}^{N_{B,i}} (w_{ij} \cdot x_{ij})}{\sum_{i=1}^{N_P} \sum_{j=1}^{N_{B,i}} w_{ij}} \quad (3)$$

Der gewichtete Standardfehler der mittleren Kronenverlichtung ergibt sich dann aus Gleichung (4).

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}_w} = \sqrt{\frac{1}{N_{B,w}^2} \cdot \frac{N_P}{N_P - 1} \cdot \sum_{i=1}^{N_P} \left(\sum_{j=1}^{N_{B,i}} (w_{ij} \cdot x_{ij}) - \bar{x}_w \cdot \sum_{j=1}^{N_{B,i}} w_{ij} \right)^2} \quad (4)$$

Gleichung (5) beschreibt die Berechnung eines gewichteten Merkmalsanteils (z.B. Anteil der Bäume mit deutlicher Kronenverlichtung oder Anteil der Bäume bei denen eine bestimmte Schadursache vorkommt), wobei $M_{ij} = 1$ das Vorhandensein des Merkmals und $M_{ij} = 0$ das Nichtvorhandensein des Merkmals bedeutet.

$$\bar{p}_w = \frac{\sum_{i=1}^{N_P} \sum_{j=1}^{N_{B,i}} M_{ij} \cdot w_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_P} \sum_{j=1}^{N_{B,i}} w_{ij}} = \frac{N_{B,M,w}}{N_{B,w}} \quad (5)$$

Der gewichtete Standardfehler des Merkmalsanteils ergibt sich dann aus Gleichung (6).

$$\hat{\sigma}_{\bar{p},w} = \sqrt{\frac{1}{N_{B,w}^2} \cdot \frac{N_P}{N_P - 1} \cdot \sum_{i=1}^{N_P} \left(\sum_{j=1}^{N_{B,i}} M_{ij} \cdot w_{ij} - \bar{p}_w \cdot \sum_{j=1}^{N_{B,i}} w_{ij} \right)^2} \quad (6)$$

Die Gleichungen sind abgeleitet aus der Varianzgleichung des Ratio-Schätzers für eine Stichprobe (Dahm, 2006, Gleichung 2.7; Cochran, 1977, Gleichungen 6.9 und 6.13). Ein guter Überblick über Parameterschätzungen aus Klumpenstichproben findet sich bei Bortz und Döring (2006).

Es wurde untersucht, inwieweit eine höhere Gitterdichte statistisch gesichere Aussagen zu etwaigen Änderungen über die Zeit ermöglicht. Dazu wurden die mittlere Kronenverlichtung und der Anteil der Probebäume mit deutlicher Kronenverlichtung auf beiden Gitterdichten, jeweils für die Perioden 2006-2008 (BZE II) und 2022-2024 (BZE III) verglichen. Die Werte und ihre Standardfehler wurden hierfür jeweils über die drei Jahre gemittelt, um den Einfluss jährlicher Schwankungen zu verringern. Statistisch signifikant sind die Änderungen dann, wenn sich die Konfidenzintervalle für die beiden Perioden nicht überlagern. Dabei wurden folgende Signifikanzniveaus berücksichtigt:

* marginal signifikant: 90%-Konfidenzintervall berechnet als Wert ± 1.645 Standardfehler.

** signifikant: 95%-Konfidenzintervall berechnet als Wert ± 1.96 Standardfehler.

*** hoch signifikant: 99%-Konfidenzintervall berechnet als Wert ± 2.576 Standardfehler.

3 Ergebnisse

3.1 Kennzahlen der Stichprobengitter

Die genaue Anzahl an Stichprobenpunkten schwankt aufgrund von Ausfallflächen und Flächenneuanlagen leicht zwischen den Jahren. So waren in den Jahren 2006, 2007 und 2008 jeweils 428, 427 und 428 Punkte auf dem 16×16-Gitter aktiv und 1755, 1745 und 1757 auf dem 8×8-Gitter. In den Jahren 2022, 2023 und 2024 waren es mit 408, 402 und 409 etwas weniger auf dem 16×16-Gitter, aber mit 1818, 1753 und 1826 sogar etwas mehr auf dem 8×8-Gitter. Aus Sachsen lagen zum Zeitpunkt dieser Studie noch keine 8×8-Daten für 2023 am Thünen-Institut vor, was die geringere Anzahl von 1753 erklärt. Fehlende 8×8-Daten einzelner Bundesländer in einzelnen Jahren werden mit dem Gewichtungungsverfahren abgedeckt, indem es die vorhandenen 16×16-Daten in diesem Land stärker gewichtet. Aufgrund der schwankenden Stichprobengröße variiert auch die Anzahl der Bäume und Baumarten in der WZE von Jahr zu Jahr. Im Jahr 2024 umfasste die 8×8-Stichprobe insgesamt 43323 Individuen aus mindestens 54 Baumarten und die 16×16-Stichprobe 9816 Individuen aus mindestens 37 Baumarten (Tabelle 1).

Tabelle 1: Liste aller im Jahr 2024 in der WZE Stichprobe vertretenen Baumarten, sowie Anzahl der Individuen und der Stichprobenpunkte auf denen sie auf dem 8×8- und 16×16-Gitter jeweils vorkamen.

| Deutscher Artname | Lateinischer Artname | N Bäume 8×8 | N Bäume 16×16 | N Punkte 8×8 | N Punkte 16×16 |
|--------------------|--------------------------------|-------------|---------------|--------------|----------------|
| Gesamt | Gesamt | 43323 | 9816 | 1826 | 409 |
| Gewöhnliche Kiefer | <i>Pinus sylvestris</i> | 11586 | 2752 | 796 | 179 |
| Gewöhnliche Fichte | <i>Picea abies</i> | 8671 | 1915 | 781 | 173 |
| Rotbuche | <i>Fagus sylvatica</i> | 8509 | 2036 | 861 | 188 |
| Traubeneiche | <i>Quercus petraea</i> | 1924 | 393 | 270 | 60 |
| Stieleiche | <i>Quercus robur</i> | 1704 | 418 | 289 | 59 |
| Weißtanne | <i>Abies alba</i> | 1100 | 259 | 165 | 39 |
| Bergahorn | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 1032 | 201 | 238 | 60 |
| Sandbirke | <i>Betula pendula</i> | 1018 | 187 | 261 | 54 |
| Schwarzerle | <i>Alnus glutinosa</i> | 873 | 285 | 92 | 28 |
| Douglasie | <i>Pseudotsuga menziesii</i> | 872 | 201 | 137 | 29 |
| Europäische Lärche | <i>Larix decidua</i> | 865 | 161 | 194 | 42 |
| Gewöhnliche Esche | <i>Fraxinus excelsior</i> | 752 | 177 | 168 | 47 |
| Hainbuche | <i>Carpinus betulus</i> | 512 | 95 | 146 | 24 |
| Eiche | <i>Quercus robur x petraea</i> | 497 | 84 | 88 | 21 |
| Japanische Lärche | <i>Larix kaempferi</i> | 351 | 93 | 44 | 15 |
| Birke | <i>Betula spp.</i> | 327 | 55 | 71 | 12 |
| Roteiche | <i>Quercus rubra</i> | 305 | 35 | 48 | 8 |
| Moorbirke | <i>Betula pubescens</i> | 261 | 38 | 27 | 5 |
| Aspe/Zitterpappel | <i>Populus tremula</i> | 199 | 53 | 64 | 17 |
| Vogelkirsche | <i>Prunus avium</i> | 177 | 37 | 87 | 19 |
| Winterlinde | <i>Tilia cordata</i> | 168 | 66 | 53 | 18 |
| Vogelbeere | <i>Sorbus aucuparia</i> | 162 | 28 | 52 | 12 |
| Robinie | <i>Robinia pseudoacacia</i> | 154 | 5 | 28 | 4 |
| Lärche | <i>Larix spp.</i> | 141 | 41 | 45 | 10 |
| Eiche | <i>Quercus spp.</i> | 135 | 8 | 41 | 6 |
| Spitzahorn | <i>Acer platanooides</i> | 131 | 39 | 41 | 14 |
| Feldahorn | <i>Acer campestre</i> | 83 | 32 | 29 | 6 |
| Pappel | <i>Populus spp.</i> | 75 | 11 | 12 | 3 |

Fortsetzung Tabelle 1.

| Deutscher Artname | Lateinischer Artname | N Bäume 8x8 | N Bäume 16x16 | N Punkte 8x8 | N Punkte 16x16 |
|------------------------|-------------------------------|-------------|---------------|--------------|----------------|
| Sitkafichte | <i>Picea sitchensis</i> | 66 | 9 | 15 | 4 |
| Erle | <i>Alnus spp.</i> | 63 | 0 | 10 | 0 |
| Weide | <i>Salix spp.</i> | 58 | 15 | 30 | 7 |
| Edelkastanie | <i>Castanea sativa</i> | 57 | 9 | 14 | 2 |
| Schwarzkiefer | <i>Pinus nigra</i> | 44 | 3 | 8 | 2 |
| Bergulme | <i>Ulmus glabra</i> | 41 | 9 | 19 | 4 |
| Strobe | <i>Pinus strobus</i> | 40 | 18 | 12 | 1 |
| Edeltanne | <i>Abies procera</i> | 31 | 0 | 3 | 0 |
| Hybridpappel | <i>Populus spp. hybridus</i> | 31 | 12 | 6 | 4 |
| Ahorn | <i>Acer spp.</i> | 29 | 1 | 6 | 1 |
| Grauerle | <i>Alnus incana</i> | 27 | 1 | 8 | 1 |
| Spätbl. Traubenkirsche | <i>Prunus serotina</i> | 26 | 2 | 6 | 1 |
| Küstentanne | <i>Abies grandis</i> | 25 | 1 | 7 | 1 |
| sonstige Nadelbäume | <i>other conifers</i> | 20 | 0 | 2 | 0 |
| Tanne | <i>Abies spp.</i> | 19 | 0 | 1 | 0 |
| Salweide | <i>Salix caprea</i> | 18 | 7 | 9 | 2 |
| Schwarzpappel | <i>Populus nigra</i> | 17 | 2 | 6 | 2 |
| Nordmantanne | <i>Abies nordmanniana</i> | 16 | 0 | 2 | 0 |
| Elsbeere | <i>Sorbus torminalis</i> | 15 | 2 | 14 | 2 |
| Linde | <i>Tilia spp.</i> | 15 | 3 | 9 | 3 |
| Sommerlinde | <i>Tilia platyphyllos</i> | 10 | 6 | 5 | 3 |
| Ulme | <i>Ulmus spp.</i> | 10 | 6 | 4 | 2 |
| Flatterulme | <i>Ulmus effusa</i> | 9 | 0 | 5 | 0 |
| Walnussbaum | <i>Juglans regia</i> | 6 | 0 | 4 | 0 |
| Gemeiner Wacholder | <i>Juniperus communis</i> | 6 | 0 | 2 | 0 |
| Mehlbeere | <i>Sorbus aria</i> | 6 | 3 | 5 | 2 |
| Bergkiefer | <i>Pinus mugo</i> | 5 | 0 | 1 | 0 |
| Eschenahorn | <i>Acer negundo</i> | 4 | 0 | 1 | 0 |
| Hemlocktanne | <i>Tsuga spp.</i> | 4 | 0 | 3 | 0 |
| Frühbl. Traubenkirsche | <i>Prunus padus</i> | 3 | 0 | 1 | 0 |
| Feldulme | <i>Ulmus campestris</i> | 3 | 0 | 1 | 0 |
| sonstige Laubbäume | <i>other broadleaves</i> | 3 | 1 | 3 | 1 |
| Rosskastanie | <i>Aesculus hippocastanum</i> | 2 | 0 | 1 | 0 |
| Wildbirne | <i>Pyrus pyraeaster</i> | 2 | 0 | 1 | 0 |
| Zerreiche | <i>Quercus cerris</i> | 2 | 0 | 1 | 0 |
| Lebensbaum | <i>Thuja spp.</i> | 2 | 0 | 1 | 0 |
| Wildapfel | <i>Malus sylvestris</i> | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Blauglockenbaum | <i>Paulownia tomentosa</i> | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Kulturbirne | <i>Pyrus communis</i> | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Speierling | <i>Sorbus domestica</i> | 1 | 0 | 1 | 0 |

Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme, Datenbank der Waldzustandserhebung

3.2 Entwicklung der mittleren Kronenverlichtung

3.2.1 Gesamtentwicklung

Die mittlere Kronenverlichtung über alle Bäume hat seit 2005 zugenommen. Nach einer leichten Abnahme von 2005 bis 2010 hatte sie sich zwischen 2010 und 2017 auf dem Niveau von etwa 20% bewegt. Zwischen 2017 und 2020 kam es in Folge der massiven Dürre zu einem Anstieg auf 27% und seither verharrt sie bei Werten um 26%. In den Abbildung 3 bis Abbildung 5 werden die Zeitreihen der mittleren Kronenverlichtung für einzelne Baumarten dargestellt. Als Referenz ist jeweils immer die Entwicklung der mittleren Kronenverlichtung aller Bäume als schwarze Linie dargestellt. In grün ist jeweils die lückenlose Zeitreihe des 16×16-Gitters dargestellt. In blau sind die verfügbaren Zeitreihen von 2006 bis 2008 und von 2022 bis 2024 basierend auf dem 8×8-Gitter dargestellt. Für jedes Jahr zeigen die transparenten Flächen den Bereich von \pm einem Standardfehler an, in dem der wahre Wert mit 68% Wahrscheinlichkeit liegt.

3.2.2 Hauptbaumarten

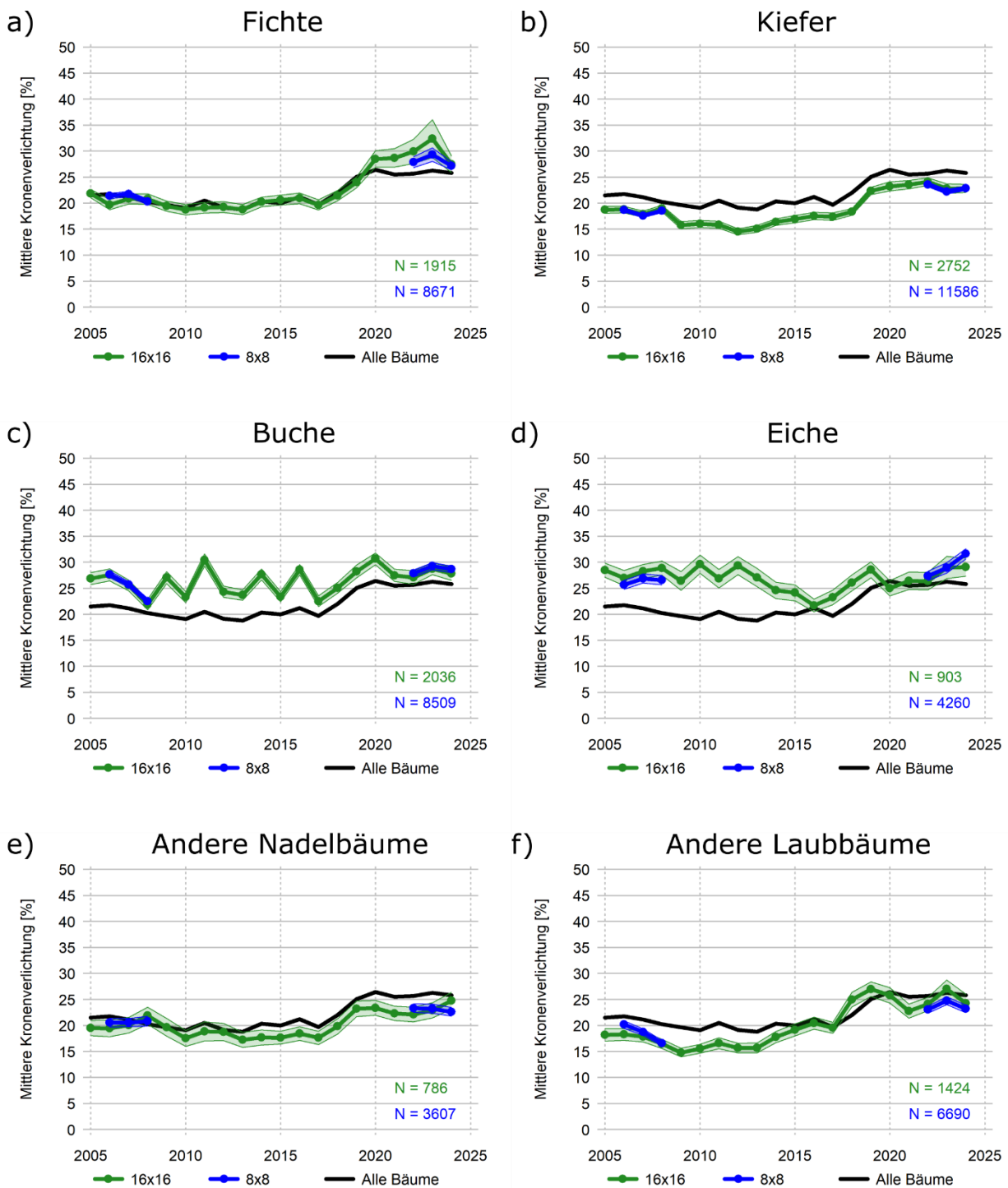
Für die vier Hauptbaumarten der WZE, Fichte, Kiefer, Buche und Eiche (Stiel- und Traubeneiche gemeinsam ausgewertet), ergeben sich aufgrund ihrer Häufigkeit bereits mit den Daten des 16×16-Gitters nur sehr geringe Standardfehler. Die mittlere Verlichtung der Fichte war über lange Jahre nahezu identisch mit der durchschnittlichen Verlichtung über alle Bäume (Abbildung 3a). Erst ab 2020 lag sie merklich darüber und erreichte 2023 einen Höchststand. Interessanterweise wurde der Wert von 30% Kronenverlichtung in 2022 und 2023 nur auf dem 16×16-Gitter überschritten, während er unter Berücksichtigung aller Fichten auf dem 8×8-Gitter darunter blieb. Auffällig sind auch die deutlich erweiterten Fehlermargen für die Fichte in den Jahren ab 2020. Diese lassen sich durch den geringer werdenden Stichprobenumfang aufgrund der vielen Ausfälle und durch die breitere Streuung der Werte mit vielen stark geschädigten oder gar kahlen Fichten erklären. Für das 8×8-Gitter ist der Fehlerbereich in diesen Jahren merklich kleiner. Die mittlere Kronenverlichtung der Kiefer entwickelte sich nahezu parallel zu der aller Bäume (Abbildung 3b). Allerdings waren die Mittelwerte für die Kiefer durchgängig um etwa 3 bis 4 Prozentpunkte geringer als der Durchschnitt aller Bäume. Es bestehen keine sichtbaren Unterschiede zwischen dem 16×16- und dem 8×8-Gitter für die Kiefer.

Die mittlere Verlichtung der Buche lag in der gesamten Zeitreihe immer deutlich über dem Durchschnitt aller Bäume (Abbildung 3c). Sie war bis 2017 von starken Schwankungen geprägt, welche sich durch den Wechsel zwischen Jahren geringer und starker Fruchtbildung (Mastjahre) erklären ließen. Seit 2019 befindet sich die Verlichtung der Buche allerdings auf einem dauerhaft erhöhten Niveau. Auch für die Buche zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede zwischen dem 16×16- und dem 8×8-Gitter. Die Eiche zeigte von 2005 bis 2012 Kronenverlichtungswerte, welche deutlich über dem Durchschnitt aller Bäume lagen (Abbildung 3d). Eine fünf Jahre währende Verbesserungsphase endete 2016 bei 22% Verlichtung mit einer abrupten Trendumkehr, so dass 2019 wieder ein Spitzenwert von 29% Verlichtung erreicht wurde. Seither befindet sich die Eiche wieder in einem Bereich erhöhter Verlichtung, wenngleich sie aufgrund des verschlechterten Gesamtzustandes nicht mehr wesentlich über dem Durchschnitt aller Bäume liegt. Beim Vergleich von 16×16- und 8×8-Gitter zeigen sich z.T. Abweichungen von 2 bis 3 Prozentpunkten für die mittlere Verlichtung der Eiche. Da die Eiche weniger häufig vorkommt als die übrigen Hauptbaumarten, fallen die Fehlermargen etwas höher aus. Durch die Verdichtung auf das 8×8-Gitter soll dies behoben werden, um eine belastbarere Datengrundlage zu haben.

Betrachtet man die anderen Nadelbäume gemeinsam als Gruppe, so lässt sich sagen, dass ihre Verlichtung meist leicht unter dem Durchschnitt aller Bäume lag (Abbildung 3e). Ihre Entwicklung folgt allerdings eng dem Gesamttrend. Die anderen Laubbäume lagen bis 2015 ebenfalls immer unter den Durchschnitt aller Bäume (Abbildung 3f). Seither und insbesondere nach einem plötzlichen Anstieg 2018 lagen sie mal über und mal unter dem Durchschnitt. Für beide Gruppen bestehen leichte Unterschiede zwischen dem 16×16- und dem 8×8-Gitter.

Da sich in beiden Gruppen jeweils Arten mit teils sehr unterschiedlichen Vitalitätstrends befinden, ist es jedoch sinnvoll diese einzeln zu betrachten.

Abbildung 3: Zeitreihen der mittleren Kronenverlichtung für die Hauptbaumarten und Artengruppen der WZE, dargestellt seit 2005 für das 16×16-Gitter (grün) und zusätzlich für die Zeiträume 2006-2008 und 2022-2024 für das 8×8-Gitter (blau). Die transparenten Flächen veranschaulichen die Standardfehler. Die schwarze Linie stellt den Mittelwert über alle Bäume aller Baumarten dar. N gibt die Anzahl der Probestämme auf beiden Gittern für das Jahr 2024 an.



Quelle: Eigene Darstellung

3.2.3 Andere Nadelbäume

Für die Nadelbaumarten Weißtanne, Douglasie, Europäische und Japanische Lärche ergeben sich aufgrund der vergleichsweise geringeren Stichprobenumfänge größere Standardfehler als für die Hauptbaumarten. In einigen Fällen kam es zu Abweichungen von mehr als 5 Prozentpunkten zwischen den Auswertungen des 16×16- und 8×8-Gitters.

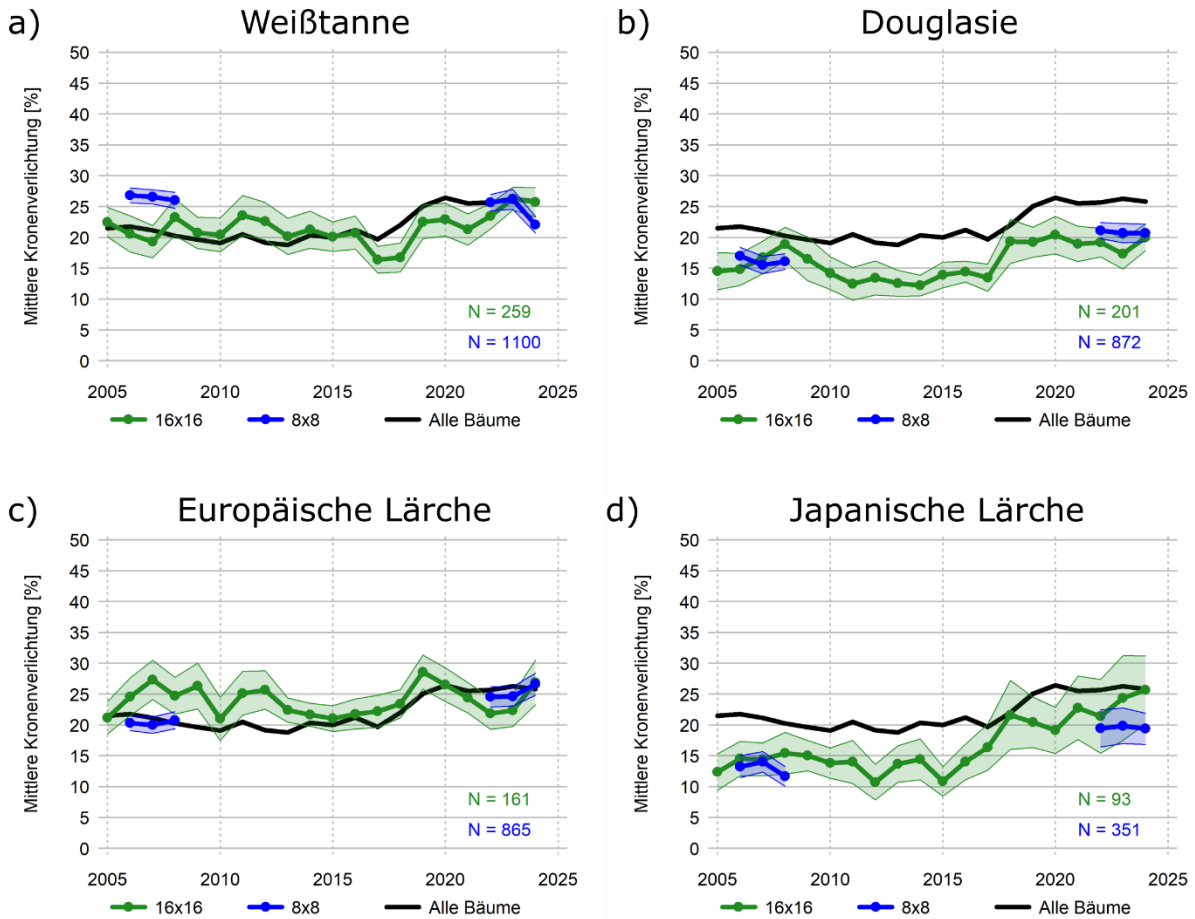
Die Kronenverlichtung der Weißtanne lag bis 2016 etwa im Durchschnitt aller Bäume bzw. ganz leicht darüber (Abbildung 4a). Ab 2017 lag sie leicht darunter. Die Vitalität der Tanne war also weniger stark durch die Dürrejahre beeinträchtigt als die Vitalität anderer Baumarten. Allerdings zeigt die Auswertung der 8×8-Daten, dass die wahre Verlichtung in den Jahren 2006 bis 2008 mutmaßlich deutlich höher lag, als die Zeitreihe der 16×16-Daten suggeriert. Andererseits zeigt sich in den 8×8-Daten für 2024 eine deutliche Reduktion der Verlichtung.

Die Douglasie zeigt, ähnlich wie die Kiefer, einen relativ parallelen Verlauf mit der durchschnittlichen Verlichtung aller Bäume, mit meist um mindestens 5 Prozentpunkte geringeren Verlichtungswerten als der Durchschnitt (Abbildung 4b). Nach einer längeren Phase mit Werten unter 15%, weist die Douglasie seit 2018 recht konstant Werte um 20% auf. Abweichungen zwischen den 16×16- und 8×8-Daten sind erkennbar, aber gering.

Die Verlichtung der Europäischen Lärche lag den 16×16-Daten zufolge bis 2012 mit Werten um 25% meist deutlich über dem Durchschnitt aller Bäume (Abbildung 4c). Von 2013 bis 2018 folgte dann eine Phase geringerer Verlichtung. Nach einem Höchststand 2019 bei 29% kam es in den Folgejahren zu einer Erholung. Die 8×8-Daten deuten an, dass die Verlichtung in den frühen Jahren der Zeitreihe auf dem 16×16-Gitter überschätzt wurde und dass sich die Europäische Lärche generell sehr nahe am Gesamtdurchschnitt aller Bäume bewegt.

Die Japanische Lärche wies über viele Jahre eine deutlich niedrigere Verlichtung auf als ihre europäische Verwandte, mit Werten unter 15% (Abbildung 4d). Seit 2015 stieg der Wert allerdings von 10% auf zuletzt 25% an, wobei hier die relativ große Fehlermarge auf dem 16×16-Gitter zu berücksichtigen ist. Den 8×8-Daten zufolge war in den vergangenen Jahren die mittlere Kronenverlichtung der Japanischen Lärche mit Werten um 20% immer noch um etwa 5 Prozentpunkte geringer als die der Europäischen Lärche mit Werten um 25%.

Abbildung 4: Zeitreihen der mittleren Kronenverlichtung für mittelhäufige Nadelbaumarten, dargestellt seit 2005 für das 16×16-Gitter (grün) und zusätzlich für die Zeiträume 2006-2008 und 2022-2024 für das 8×8-Gitter (blau). Die transparenten Flächen veranschaulichen die Standardfehler. Die schwarze Linie stellt den Mittelwert über alle Bäume aller Baumarten dar. N gibt die Anzahl der Prohebäume auf beiden Gittern für das Jahr 2024 an.



Quelle: Eigene Darstellung

3.2.4 Andere Laubbäume

Aus der Vielzahl der Laubbaumarten werden hier beispielhaft die vergleichsweise häufigen Arten Europäische Esche, Schwarzerle, Sandbirke, Bergahorn, Vogelkirsche und Winterlinde präsentiert, für die der Stichprobenumfang die Darstellung relativ robuster Zeitreihen mit vertretbaren Standardfehlern erlaubt. Bereits ein grober Blick auf die Graphiken verdeutlicht wie unterschiedlich sich der Vitalitätszustand der einzelnen Arten über die letzten beiden Jahrzehnte entwickelt hat (Abbildung 5) und weswegen die aggregierte Betrachtung der „anderen Laubbäume“ als Kollektiv in der WZE nur eingeschränkt von Nutzen ist.

Die Esche ist in Deutschland seit Jahren vom Eschentriebsterben gezeichnet (Abbildung 5a). Bis 2009 hatte sie noch unterdurchschnittliche Verlichtungswerte zwischen 15% und 20%. Über einen Zeitraum von nur 10 Jahren stieg ihre mittlere Verlichtung dann bis auf 45% in 2018 an. Seither ist sie mit Abstand die am stärksten geschädigte Baumart mit jährlichen Verlichtungswerten zwischen 35% und 45%. Die 8×8-Daten deuten allerdings darauf hin, dass der wahre Wert in den letzten Jahren eher zwischen 30% und 40% lag. Da der Absterbeprozess ab dem Überschreiten eines bestimmten Verlichtungswertes schnell voranschreitet, befinden sich generell immer nur vergleichsweise wenige Individuen in den oberen Verlichtungsstufen. Daher ist es erwartbar, dass der Mittelwert der Verlichtung einen bestimmten Wert selbst bei einem gravierenden Infektionsgeschehen des Eschentriebsterbens nicht überschreiten wird. Das seit einigen Jahren zu beobachtende Plateau um Werte von 40% ist also keinesfalls als Signal eines gebremsten Eschentriebsterbens zu werten.

Die Schwarzerle zeichnet sich durch eine überdurchschnittlich gute Vitalität aus (Abbildung 5b). Ihre Verlichtungswerte lagen im Schnitt um 5 bis 10 Prozentpunkte unter dem Durchschnitt aller Bäume. Auch bei der Erle kam es während der Dürrejahre zu einer leichten Zunahme der Verlichtung. Die Werte auf dem 16×16-Gitter unterschätzen die mittlere Verlichtung der Erle im Vergleich zum 8×8-Gitter ganz leicht.

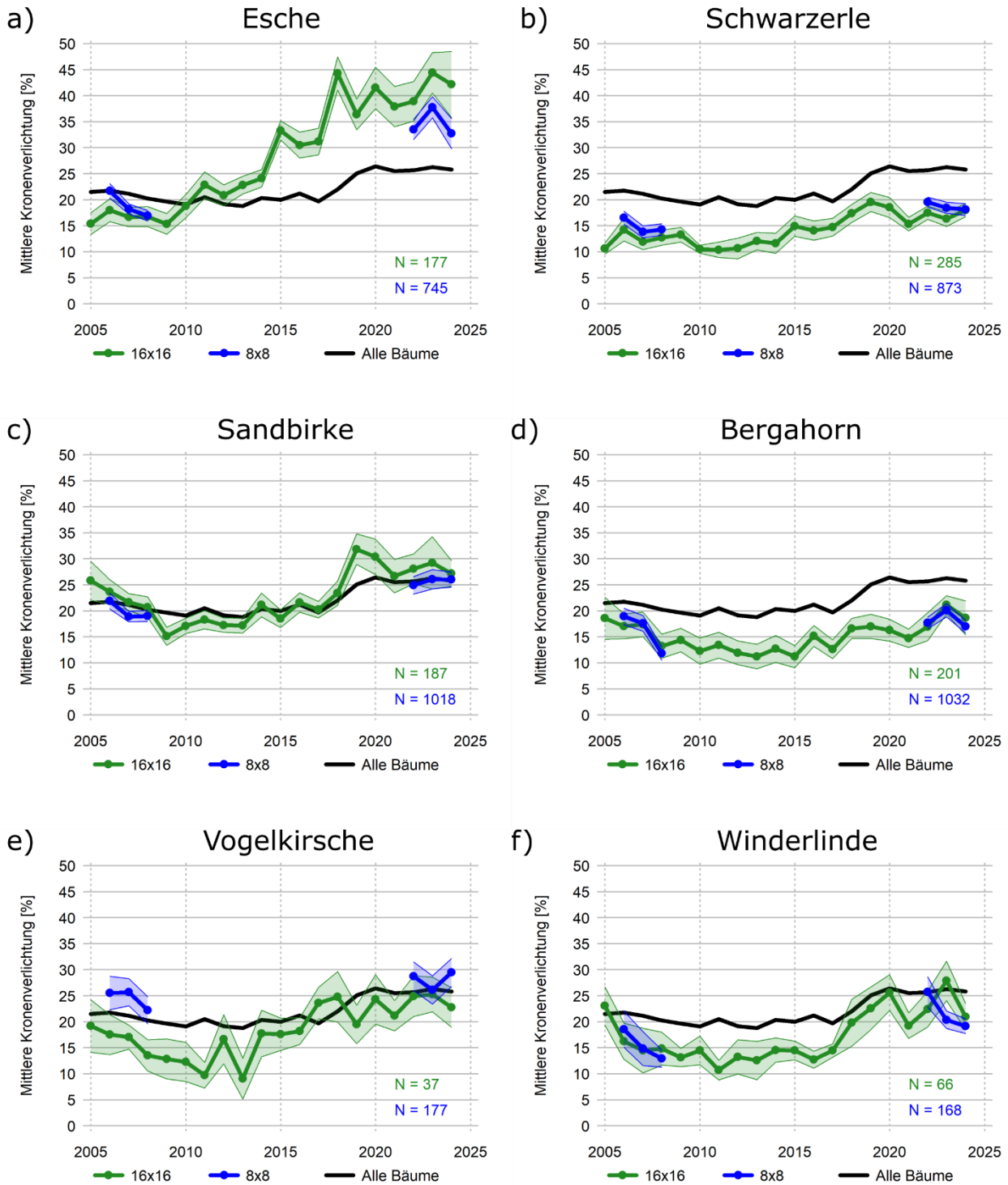
Die Kronenverlichtung der Sandbirke folgte lange relativ eng der durchschnittlichen Verlichtung aller Bäume (Abbildung 5c). In den Dürrejahren 2019 und 2020 zeigte die Birke eine deutlich erhöhte Verlichtung von über 30%. Die Werte für das 8×8-Gitter liegen etwas unter denen des 16×16-Gitters.

Der Bergahorn weist ähnlich wie die Schwarzerle überdurchschnittlich gute Vitalitätswerte auf (Abbildung 5d). Das heißt es herrschten lange Verlichtungswerte zwischen 10% und 15% vor und seit den Dürrejahren bewegen sie sich zwischen 15% und 20%. Die Werte und Verläufe der beiden Stichprobengitter stimmen für den Bergahorn sehr gut überein.

Die Vogelkirsche ist eine Baumart mit relativ kleinem Stichprobenumfang in der WZE. Auch auf dem 8×8-Gitter ergeben sich noch relativ große Standardfehler. Der Verlauf der mittleren Verlichtung anhand des 16×16-Gitters suggeriert eine Zunahme der Verlichtung zwischen 2013 und 2018 (Abbildung 5e). Allerdings deuten die 8×8-Daten an, dass die Verlichtung der Kirsche bereits 2006-2008 deutlich höher lag, als der Schätzwert der 16×16-Stichprobe nahelegt.

Die Winterlinde wies bis 2017 meist eine geringe Verlichtung zwischen 10% und 15% auf (Abbildung 5f). Seither stieg ihre Verlichtung stärker an als beispielsweise die der Schwarzerle oder des Bergahorns, blieb jedoch weiterhin jeweils leicht unter dem Durchschnitt aller Bäume. Zwischen 2020 und 2024 zeigten sich in der Zeitreihe deutliche Schwankungen zwischen den Jahren, wobei sich die Ergebnisse von 8×8- und 16×16-Gitter für 2022 und 2023 gegenläufig verhielten, 2024 jedoch wieder nahe beieinander lagen.

Abbildung 5: Zeitreihen der mittleren Kronenverlichtung für mittelhäufige Laubbaumarten, dargestellt seit 2005 für das 16×16-Gitter (grün) und zusätzlich für die Zeiträume 2006-2008 und 2022-2024 für das 8×8-Gitter (blau). Die transparenten Flächen veranschaulichen die Standardfehler. Die schwarze Linie stellt den Mittelwert über alle Bäume aller Baumarten dar. N gibt die Anzahl der Probestämme auf beiden Gittern für das Jahr 2024 an.



Quelle: Eigene Darstellung

3.3 Signifikante Verschlechterung des Kronenzustands

In den Jahren 2022-2024 wies die Mehrheit der Baumarten einen schlechteren Kronenzustand auf als im Vergleichszeitraum 2006-2008. Dies betraf sowohl die mittlere Kronenverlichtung (Tabelle 2), als auch den Anteil der Probestämme mit deutlicher Kronenverlichtung über 25% (Tabelle 3). Allerdings unterschieden sich die Baumarten bezüglich der Stärke der Änderungen und nicht immer waren die Änderungen statistisch signifikant. In einigen Fällen ermöglichte nur das feinere 8×8-Stichprobengitter statistisch signifikante Aussagen, während das gröbere 16×16-Gitter dazu nicht ausreichte.

Die Zunahme der mittleren Kronenverlichtung gegenüber dem Vergleichszeitraum war für Fichte, Kiefer und Esche, sowie für die Gesamtheit aller Bäume hochsignifikant auf Grundlage beider Stichprobengitter (Tabelle 2). Auch für die meisten anderen Baumarten zeigten sich Zunahmen bei der mittleren Verlichtung, jedoch erwiesen sich diese Änderungen in keinem weiteren Fall als signifikant auf dem 16×16-Gitter. Unter Einbeziehung aller 8×8-Daten konnten auch die Zunahmen der Kronenverlichtung bei Buchen als hoch signifikant, bei Sandbirken als signifikant und bei Douglasien und Schwarzerlen als marginal signifikant eingestuft werden.

Ein ähnliches Bild ergab sich bei der Betrachtung des Anteils der Probestämme mit deutlicher Kronenverlichtung (> 25%) als Schadindikator (Tabelle 3). In diesem Fall waren die Zunahmen nur für Esche und alle Bäume insgesamt hoch signifikant auf dem 16×16-Gitter, für Fichte und Kiefer lediglich signifikant. Auf dem 8×8-Gitter waren die Zunahmen für Fichte und Kiefer hoch signifikant und zusätzlich ergaben sich marginal signifikante Zunahmen bei Buche und Sandbirke. Die Veränderungen der Anteile deutlich geschädigter Probestämme sind in den Abbildung 6 bis Abbildung 8 graphisch dargestellt. Dabei sind vor allem die deutlich schmaleren Konfidenzintervalle und somit geringeren Schätzunsicherheiten der 8×8-Ergebnisse im Vergleich zu den 16×16-Ergebnissen bemerkenswert.

3.4 Unterschiede in den Ergebnissen der Stichprobengitter

Auffällig waren einige Fälle in denen die Schadindikatoren über den Betrachtungszeitraum scheinbar abgenommen haben. Diese Abnahmen waren in keinem Fall signifikant und in all diesen Fällen widersprachen sich jeweils die Resultate der beiden Stichprobengitter. Bei der mittleren Kronenverlichtung betraf dies die Weißtanne, wo auf dem 16×16-Gitter einer Zunahme um 4.1 Prozentpunkte auf dem 8×8-Gitter eine Abnahme um 1.9 Prozentpunkte entgegenstand (Tabelle 2). Umgekehrt zeigte die Europäische Lärche auf dem 16×16-Gitter eine Abnahme um 1.8 Prozentpunkte, wohingegen sich auf dem 8×8-Gitter eine Zunahme um 4.9 Prozentpunkte ergab (Tabelle 2). Eine durchaus drastische Diskrepanz ergab sich beim Anteil der Eichen mit deutlicher Kronenverlichtung: Einer Abnahme um 6.2 Prozentpunkte auf dem 16×16-Gitter stand hier eine Zunahme um 3.7 Prozentpunkte auf dem 8×8-Gitter entgegen (Tabelle 3, Abbildung 6). Bei der Weißtanne wiederum nahm der Anteil der Tannen mit deutlicher Kronenverlichtung auf dem 16×16-Gitter um 5.6 Prozentpunkte zu, aber auf dem 8×8-Gitter um 4.2 Prozentpunkte ab (Tabelle 3, Abbildung 7).

Neben den genannten Fällen mit gegenläufigen Vorzeichen, gab es einige Fälle in denen die Änderungen zwar auf beiden Stichprobengittern in dieselbe Richtung wiesen, jedoch mit deutlich unterschiedlichen Werten. Die Zunahme der mittleren Kronenverlichtung der Esche betrug auf dem 16×16-Gitter beispielsweise 24.7 Prozentpunkte, auf dem 8×8-Gitter jedoch nur noch 15.8 Prozentpunkte (Tabelle 2). Bei der Vogelkirsche wurde die Zunahme des Anteils der Bäume mit deutlicher Verlichtung auf Grundlage des 16×16-Gitters auf 28.6 Prozentpunkte geschätzt, wohingegen diese auf dem 8×8-Gitter nur 4.3 Prozentpunkte betrug (Tabelle 3, Abbildung 8). Dies lag an deutlich verschiedenen Anteilsschätzungen im Zeitraum 2006-2008, wonach auf dem 16×16-Gitter lediglich 13.1% der Kirschbäume deutlich geschädigt waren, auf dem 8×8-Gitter der Wert mit 40.6% jedoch schon annähernd auf dem heutigen Niveau lag.

Tabelle 2: Vergleich der mittleren Kronenverlichtung zwischen 2006-2008 und 2022-2024 für die betrachteten Baumarten anhand des 16x16-Gitters (grün) und des 8x8-Gitters (blau), jeweils mit Standardfehlern (SE). Änderungen wurden hinsichtlich der Signifikanzniveaus 99% (*), 95% (**) und 90% (*) analysiert.**

| Baumart | Gitter | 2006-2008 (BZE II) | | 2022-2024 (BZE III) | | Änderung | Signifikanz |
|--------------------|--------|--------------------|-----|---------------------|-----|----------|-------------|
| | | Mittelwert | SE | Mittelwert | SE | | |
| Fichte | 16x16 | 20.4 | 1 | 29.9 | 2.5 | 9.5 | *** |
| Fichte | 8x8 | 21.1 | 0.5 | 28.1 | 1 | 7 | *** |
| Kiefer | 16x16 | 18.5 | 0.6 | 23.3 | 0.8 | 4.8 | *** |
| Kiefer | 8x8 | 18.3 | 0.4 | 22.9 | 0.4 | 4.6 | *** |
| Buche | 16x16 | 25 | 1.1 | 27.9 | 1.2 | 2.9 | |
| Buche | 8x8 | 25.3 | 0.6 | 28.6 | 0.7 | 3.3 | *** |
| Eiche | 16x16 | 28 | 1.4 | 28.1 | 1.8 | 0.1 | |
| Eiche | 8x8 | 26.4 | 0.9 | 29.3 | 1 | 2.9 | |
| Weißtanne | 16x16 | 21 | 2.8 | 25.1 | 2.1 | 4.1 | |
| Weißtanne | 8x8 | 26.5 | 1.2 | 24.6 | 1.4 | -1.9 | |
| Douglasie | 16x16 | 16.8 | 2.7 | 18.8 | 2.3 | 2 | |
| Douglasie | 8x8 | 16.2 | 1.4 | 20.8 | 1.4 | 4.6 | * |
| Europäische Lärche | 16x16 | 25.5 | 3.1 | 23.7 | 2.9 | -1.8 | |
| Europäische Lärche | 8x8 | 20.3 | 1.3 | 25.2 | 1.7 | 4.9 | |
| Japanische Lärche | 16x16 | 14.8 | 2.9 | 23.8 | 6.1 | 9 | |
| Japanische Lärche | 8x8 | 13 | 1.7 | 19.5 | 2.8 | 6.5 | |
| Esche | 16x16 | 17.1 | 2 | 41.8 | 4.7 | 24.7 | *** |
| Esche | 8x8 | 18.9 | 1.1 | 34.7 | 2.3 | 15.8 | *** |
| Schwarzerle | 16x16 | 12.9 | 1.7 | 17.3 | 1.3 | 4.4 | |
| Schwarzerle | 8x8 | 14.9 | 1.2 | 18.7 | 1 | 3.8 | * |
| Sandbirke | 16x16 | 22 | 2 | 28.1 | 3.5 | 6.1 | |
| Sandbirke | 8x8 | 19.9 | 1.2 | 25.6 | 1.7 | 5.7 | ** |
| Bergahorn | 16x16 | 15.9 | 2.4 | 18.9 | 2.6 | 3 | |
| Bergahorn | 8x8 | 16.1 | 1.5 | 18.3 | 1.2 | 2.2 | |
| Vogelkirsche | 16x16 | 16 | 3.1 | 24.3 | 3.7 | 8.3 | |
| Vogelkirsche | 8x8 | 24.5 | 2.8 | 28.1 | 2.7 | 3.6 | |
| Winterlinde | 16x16 | 15.2 | 3.7 | 23.7 | 3.3 | 8.5 | |
| Winterlinde | 8x8 | 15.4 | 2.8 | 21.7 | 2 | 6.3 | |
| gesamt | 16x16 | 20.7 | 0.5 | 26.3 | 0.8 | 5.6 | *** |
| gesamt | 8x8 | 21 | 0.3 | 25.9 | 0.4 | 4.9 | *** |

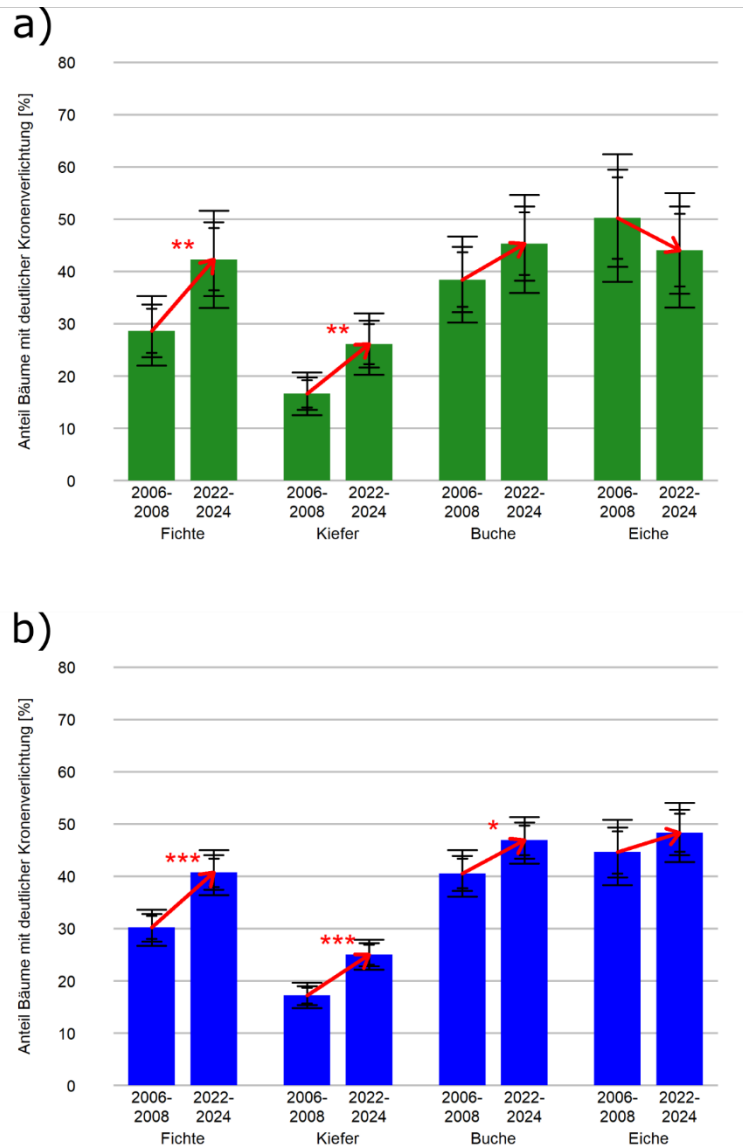
Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 3: Vergleich des Anteils der Probestämme mit deutlicher Kronenverlichtung (> 25%) zwischen 2006-2008 und 2022-2024 für die betrachteten Baumarten anhand des 16x16-Gitters (grün) und des 8x8-Gitters (blau), jeweils mit Standardfehlern (SE). Änderungen wurden hinsichtlich der Signifikanzniveaus 99% (*), 95% (**) und 90% (*) analysiert.**

| Baumart | Gitter | 2006-2008 (BZE II) | | 2022-2024 (BZE III) | | Änderung | Signifikanz |
|--------------------|--------|--------------------|-----|---------------------|------|----------|-------------|
| | | Mittelwert | SE | Mittelwert | SE | | |
| Fichte | 16x16 | 28.6 | 2.6 | 42.3 | 3.6 | 13.7 | ** |
| Fichte | 8x8 | 30.2 | 1.3 | 40.7 | 1.7 | 10.5 | *** |
| Kiefer | 16x16 | 16.6 | 1.6 | 26.1 | 2.3 | 9.5 | ** |
| Kiefer | 8x8 | 17.2 | 0.9 | 25 | 1.1 | 7.8 | *** |
| Buche | 16x16 | 38.4 | 3.2 | 45.3 | 3.6 | 6.9 | |
| Buche | 8x8 | 40.5 | 1.7 | 46.9 | 1.7 | 6.4 | * |
| Eiche | 16x16 | 50.2 | 4.7 | 44 | 4.2 | -6.2 | |
| Eiche | 8x8 | 44.6 | 2.4 | 48.3 | 2.2 | 3.7 | |
| Weißtanne | 16x16 | 31.8 | 6.6 | 37.4 | 6.8 | 5.6 | |
| Weißtanne | 8x8 | 42.9 | 3.6 | 38.7 | 3.7 | -4.2 | |
| Douglasie | 16x16 | 14.1 | 4.3 | 20.5 | 5.8 | 6.4 | |
| Douglasie | 8x8 | 16.8 | 3.2 | 27.2 | 4.2 | 10.4 | |
| Europäische Lärche | 16x16 | 33.8 | 8.6 | 41 | 9.5 | 7.2 | |
| Europäische Lärche | 8x8 | 25.6 | 3.9 | 37.5 | 4 | 11.9 | |
| Japanische Lärche | 16x16 | 12.5 | 6.2 | 26.1 | 13.7 | 13.6 | |
| Japanische Lärche | 8x8 | 8.3 | 3 | 19.8 | 6 | 11.5 | |
| Esche | 16x16 | 20 | 4.8 | 62.5 | 7.3 | 42.5 | *** |
| Esche | 8x8 | 22.2 | 2.8 | 50 | 4.3 | 27.8 | *** |
| Schwarzerle | 16x16 | 7.2 | 2.8 | 9.8 | 2.6 | 2.6 | |
| Schwarzerle | 8x8 | 10.7 | 2.1 | 15.3 | 2.6 | 4.6 | |
| Sandbirke | 16x16 | 24.8 | 5.1 | 38.7 | 8.8 | 13.9 | |
| Sandbirke | 8x8 | 21.9 | 2.9 | 32.9 | 3.5 | 11 | * |
| Bergahorn | 16x16 | 16.8 | 5.5 | 19 | 5.1 | 2.2 | |
| Bergahorn | 8x8 | 15.9 | 3.4 | 16.9 | 2.4 | 1 | |
| Vogelkirsche | 16x16 | 13.1 | 7.1 | 41.7 | 11.6 | 28.6 | |
| Vogelkirsche | 8x8 | 40.6 | 7.6 | 44.9 | 6.6 | 4.3 | |
| Winterlinde | 16x16 | 15.2 | 7.4 | 30.7 | 11.1 | 15.5 | |
| Winterlinde | 8x8 | 12 | 4.7 | 21.6 | 5.4 | 9.6 | |
| gesamt | 16x16 | 26.4 | 1.3 | 36.2 | 1.7 | 9.8 | *** |
| gesamt | 8x8 | 27.9 | 0.7 | 36.1 | 0.8 | 8.2 | *** |

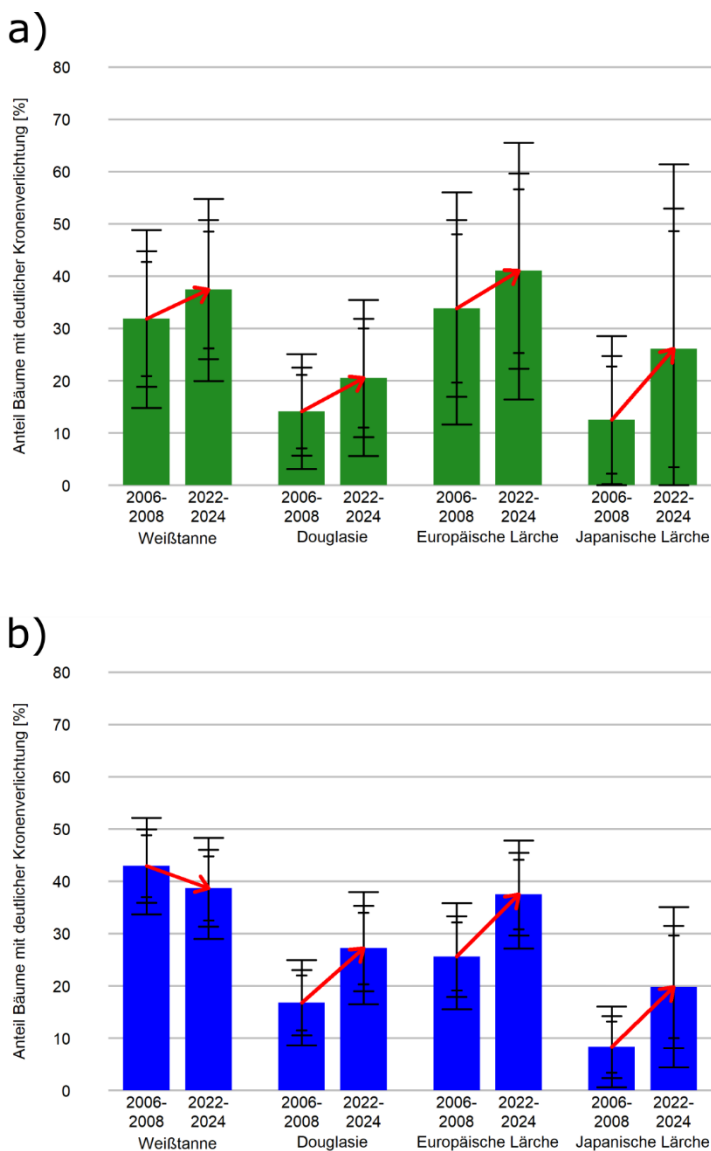
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 6: Anteile der Probestämme mit deutlicher Kronenverlichtung für die Hauptbaumarten in den Aufnahmeperioden 2006-2008 und 2022-2024 auf dem 16×16-Gitter (a, grün) und dem 8×8-Gitter (b, blau). Die roten Pfeile veranschaulichen die Änderung über die Zeit. Signifikante Änderungen sind durch Asteriske gekennzeichnet. Die Fehlerbalken zeigen von schmal nach breit die 90%-, 95%- und 99%-Konfidenzintervalle an.



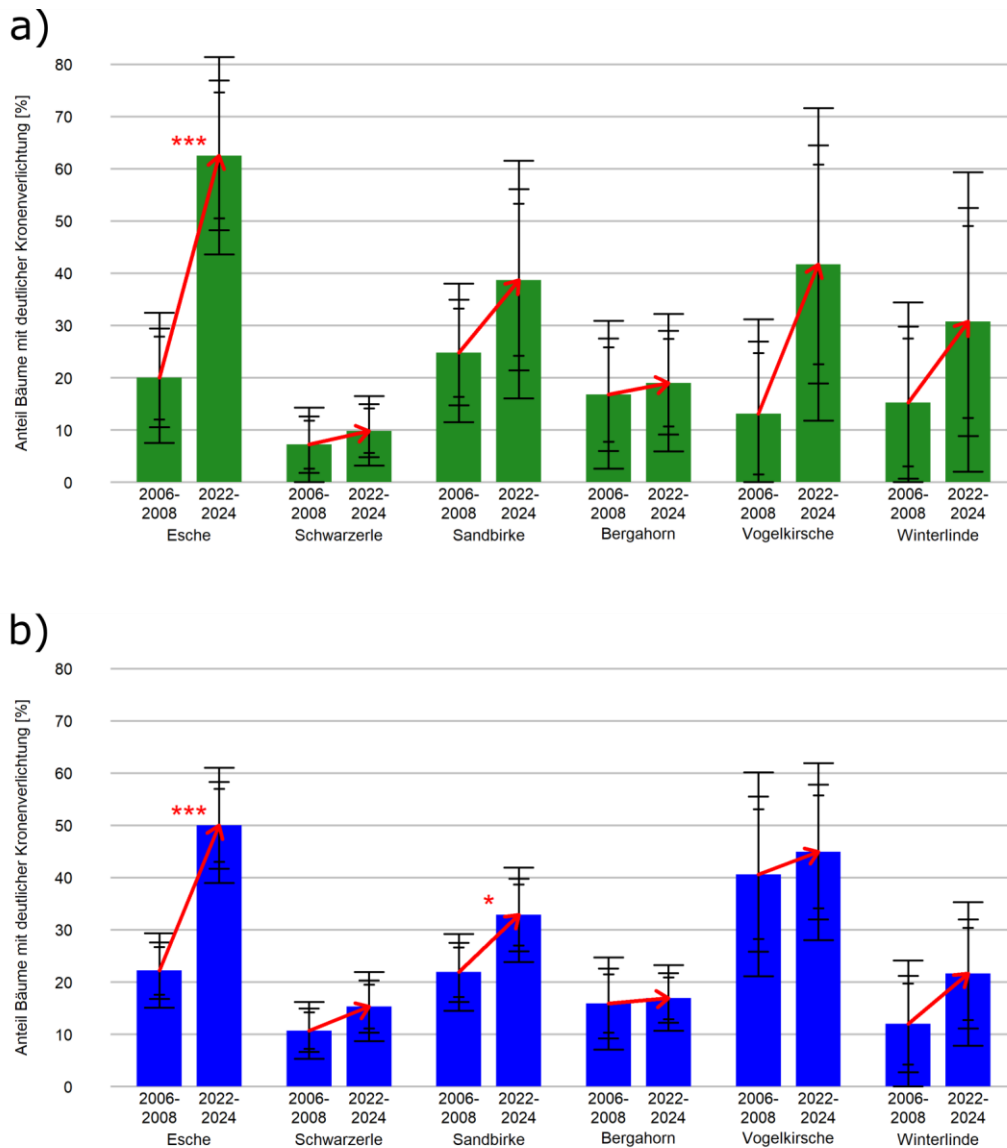
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7: Anteile der Probestämme mit deutlicher Kronenverlichtung für ausgewählte Nadelbaumarten in den Aufnahmeperioden 2006-2008 und 2022-2024 auf dem 16x16-Gitter (a, grün) und dem 8x8-Gitter (b, blau). Die roten Pfeile veranschaulichen die Änderung über die Zeit. Keine der Änderungen war signifikant. Die Fehlerbalken zeigen von schmal nach breit die 90%-, 95%- und 99%-Konfidenzintervalle an.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8: Anteile der Probestämme mit deutlicher Kronenverlichtung für ausgewählte Laubbaumarten in den Aufnahmeperioden 2006-2008 und 2022-2024 auf dem 16×16-Gitter (a, grün) und dem 8×8-Gitter (b, blau). Die roten Pfeile veranschaulichen die Änderung über die Zeit. Signifikante Änderungen sind durch Asteriske gekennzeichnet. Die Fehlerbalken zeigen von schmal nach breit die 90%-, 95%- und 99%-Konfidenzintervalle an.



Quelle: Eigene Darstellung

3.5 Entwicklung der Schadursachen

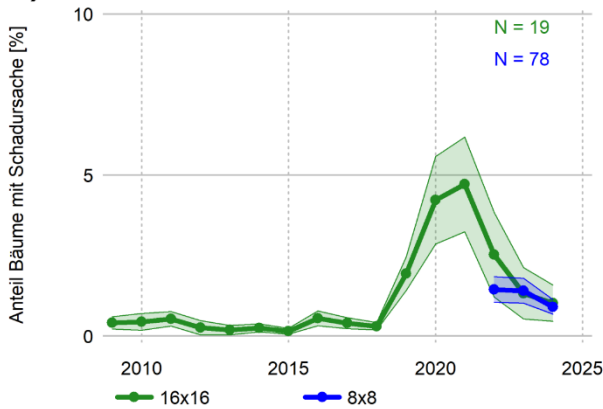
Für die verschiedenen Baumarten spielen jeweils unterschiedliche biotische Schadursachen die wichtigste Rolle. Für Fichten sind Borkenkäfer, wie der Buchdrucker (*Ips typographus*), häufige Schaderreger. Diese fallen in die Kategorie der bohrenden Insekten. Allerdings lag die Befallsrate in der WZE bis einschließlich 2018 jeweils deutlich unter 0,5%. Die Borkenkäferkalamitäten in Folge der Dürrejahre 2018-2022 lassen sich als deutlicher Anstieg des Befalls in der Zeitreihe erkennen (Abbildung 9a). In der WZE 2021 waren 4,7% aller Fichten auf dem 16×16-Gitter betroffen. Der Borkenkäferbefall hatte auch einen massiven Anstieg der Fichtenausfallraten und das Entstehen großer Flächen stehenden Totholzes zur Folge (siehe Ergebnisse der Waldzustandserhebungen 2020-2024). Von allen Fichten, welche sich 2017 noch in der Stichprobe befanden, waren bis 2024 48% ausgefallen. Dies schließt Ausfälle durch Sturmschäden und direkte Dürreschäden mit ein. An einem großen Anteil der Ausfälle ist jedoch der Borkenkäfer beteiligt. Wegen des regional wandernden Ausbreitungsgeschehens und des rapiden Absterbeprozesses der Fichten nach Käferbefall, sind jedoch immer nur vergleichsweise wenige lebende WZE-Bäume gleichzeitig betroffen. Deshalb bewegt sich die Prävalenz selbst in Jahren heftigen Befalls nur in kleinen einstelligen Prozentbereichen. Die Befallsrate auf dem 8×8-Gitter deckt sich relativ gut mit der des 16×16-Gitters, abgesehen von 2022 wo sie deutlich unter letzterer lag. Auch Kiefern sind von Borkenkäfern, wie dem Waldgärtner (*Tomicus piniperda*), betroffen. Der Befall von Kiefern durch bohrende Insekten hat sich in der Vergangenheit wellenförmig entwickelt, wobei die Amplituden der Ausschläge über die Zeit zugenommen haben und 2024 mit 6,8% ein neuer Höchstwert erreicht wurde (Abbildung 9b). Die Werte auf den beiden Stichprobengittern stimmen hier gut überein, wobei der Höchstwert mit 5,9% auf dem 8×8-Gitter etwas geringer ausfällt als auf dem 16×16-Gitter.

Im Gegensatz zu den bohrenden Insekten an Nadelbäumen sind bei den wichtigsten Laubbaumarten Eiche und Buche verschiedene Formen von Blattfraß durch Insekten die häufigste Schadursache. Bei der Eiche ist Laubfraß ein sehr häufig beobachtetes Phänomen, welches eingefressene Blattränder und Lochfraß in den Blättern beinhaltet. Die jährlichen Prävalenzen bewegten sich zwischen 12% und 36%, wobei ab 2020 eher niedrigere Werte auftraten (Abbildung 9c). Der Laubfraß erfolgt durch eine Reihe von Insektenarten, die als Eichenfraßgesellschaft bezeichnet werden und teilweise gemeinsam auftreten. Schmetterlingsarten deren Raupen zur Eichenfraßgesellschaft gerechnet werden sind beispielsweise der Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea*), der Schwammspinner (*Lymantria dispar*), der Kleine und der Große Frostspanner (*Operophtera brumata*, *Erannia defoliaria*), sowie der Eichenwickler (*Tortrix viridana*). Die auf dem 8×8-Gitter basierenden Werte für Laubfraß an Eichen liegen insbesondere für 2023 merklich oberhalb der 16×16-Zeitreihe. An Buchen sind blattminierende Insekten, wie zum Beispiel die Larven des Buchenspringrüsslers (*Rhynchaenus fagi*) oder verschiedener Miniermotten, vorherrschend. Der Befall durch Blattminierer war insbesondere von 2014 bis 2016 sehr verbreitet und erreichte 2015 mit 41% seinen Höchststand (Abbildung 9d). Bis 2020 sank die Befallsrate dann deutlich ab und bewegte sich seither zwischen 7% und 11%. Die 8×8-Werte waren in den letzten Jahren unwesentlich höher als die 16×16-Werte.

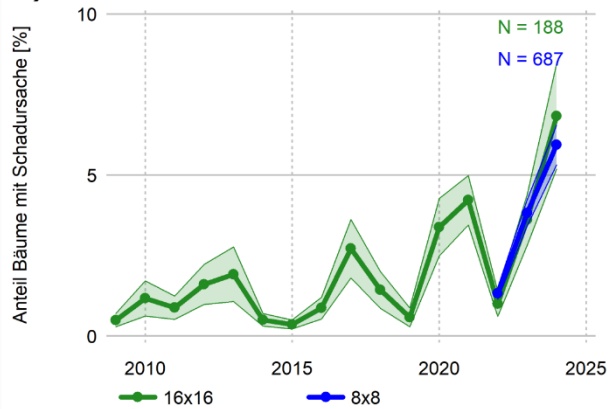
Neben Insekten spielen zum Teil noch andere Schadorganismen eine Rolle. Bei den Eichen ist oft ein erheblicher Anteil der Individuen von Mehltau befallen. Die Befallsrate schwankt stark von Jahr zu Jahr und erreichte 2010 und 2019 Spitzenwerte von jeweils 12% (Abbildung 9e). Ein Trend über die Zeit ist nicht erkennbar. Das Auftreten von Mehltau steht vermutlich vor allem mit dem Witterungsverlauf in der jeweiligen Vegetationsperiode in Zusammenhang. Für 2024 legen die 8×8-Daten einen etwas geringeren Mehлтаubefall nahe, als die 16×16-Daten. Ein sehr klarer zeitlicher Trend zeichnet sich für den Mistelbefall der Kiefer ab (Abbildung 9f). Die Weißbeerige Mistel (*Viscum album*) ist eine hemiparasitäre Pflanze, die zwar selbst Photosynthese betreibt, dem Wirtsbaum allerdings Wasser und Mineralien entzieht sowie zusätzlichen Schatten in der Krone verursacht. Zwischen 2009 und 2019 stieg die Mistelprävalenz in Kiefern kontinuierlich von 2% auf 9% an. Seither lässt sich eine leicht abfallende Tendenz beobachten, wobei zuletzt wieder ein Wert von über 8% festgestellt wurde. Die 8×8-Werte für Mistelbefall unterscheiden sich nur unwesentlich von den 16×16-Werten, sind allerdings mit einem deutlich geringeren Standardfehler behaftet.

Abbildung 9: Zeitreihen der häufigsten Schadensursachen an verschiedenen Baumarten dargestellt seit 2009 für das 16x16-Gitter (grün) und zusätzlich seit 2022 für das 8x8-Gitter (blau). Die transparenten Flächen veranschaulichen die Standardfehler. N gibt die Anzahl der befallenen Probebäume auf beiden Gittern für das Jahr 2024 an.

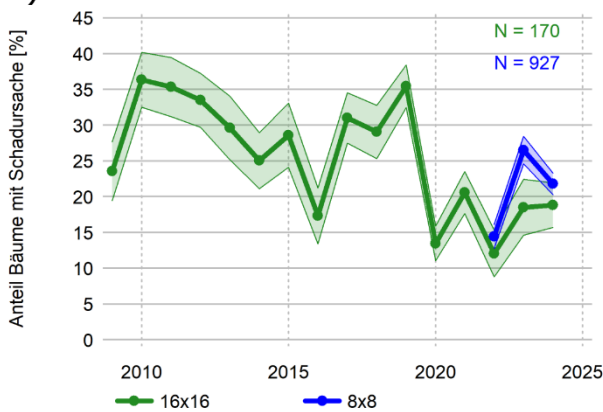
a) Bohrende Insekten auf Fichten



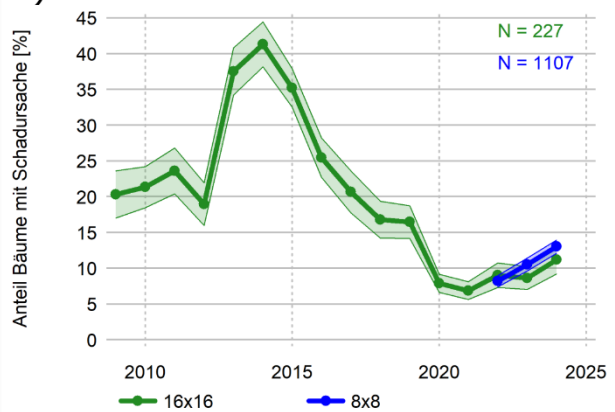
b) Bohrende Insekten auf Kiefern



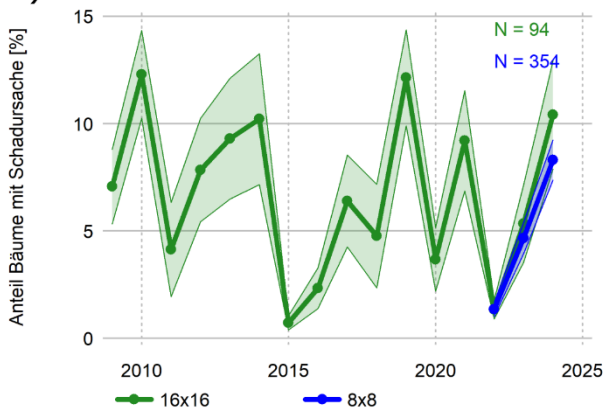
c) Laubfressende Insekten auf Eichen



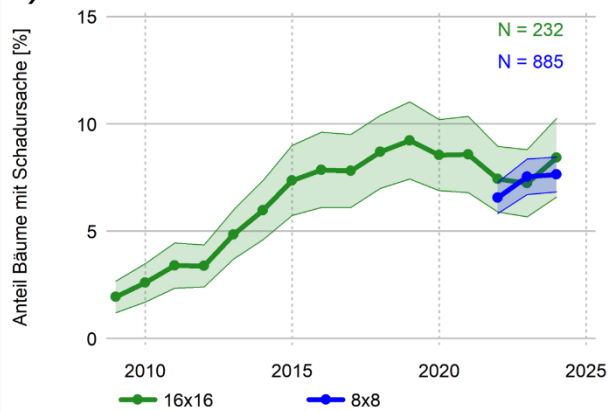
d) Minierende Insekten auf Buchen



e) Mehltaubefall auf Eichen



f) Mistelbefall auf Kiefern



Quelle: Eigene Darstellung

4 Diskussion

In der Studie wurde systematisch untersucht welche Unterschiede sich für verschiedene Indikatoren des Waldzustandes ergeben, je nachdem ob man diese auf Grundlage des groben 16×16-Stichprobengitters der WZE berechnet, oder auf dem feiner aufgelösten 8×8-Gitter. Für die Jahre 2006-2008 und 2022-2024, für die die 8×8-Daten zur Verfügung standen, wurden die Standardfehler und Konfidenzintervalle der Schätzgrößen für beide Gitterdichten bestimmt, um signifikante Veränderungen zu identifizieren.

Die mittlere Kronenverlichtung hat sich über den untersuchten Zeitraum für Fichte, Kiefer und Esche deutlich erhöht (hoch signifikant). Für die Eiche, welche schon in früheren Jahren hohe Verlichtungswerte aufwies, konnte keine signifikante Veränderung nachgewiesen werden. Für Buche, Sandbirke, Schwarzerle und Douglasie zeigten sich ebenfalls Anstiege im Verlichtungsgrad, welche sich allerdings erst bei Auswertung der 8×8-Daten als signifikant erwiesen. Für alle weiteren betrachteten Nebenbaumarten waren die Veränderungen nicht signifikant und hatten, mit Ausnahme der Weißtanne, überwiegend positive Vorzeichen, wobei positiv in diesem Fall einer Verschlechterung des Vitalitätszustandes entspricht. Insgesamt hat also die mittlere Kronenverlichtung der Probestämme für fast alle Baumarten zugenommen, wenngleich in unterschiedlichem Maße. Als statistisch signifikant lassen sich diese Veränderungen auf Grundlage des 16×16-Gitters nur für drei Baumarten bezeichnen, während dies auf Grundlage des 8×8-Gitters für sieben Baumarten der Fall ist. Für einige Nebenbaumarten, nämlich die Weißtanne, die Lärchenarten, die Esche, die Vogelkirsche und die Winterlinde ließen sich merkliche Diskrepanzen zwischen den mittleren Verlichtungswerten der unterschiedlichen Gitterdichten feststellen. Für einige dieser Arten war der Stichprobenumfang auf dem 16×16-Gitter sehr klein, so dass eine Auswertung auf dem 8×8-Gitter dringend geraten ist, um belastbare Schätzungen machen zu können.

Mit dem Anteil der Probestämme mit deutlicher Kronenverlichtung (> 25% Nadel-/Blattverlust) als weiterem wichtigen Indikator der WZE verhielt es sich ähnlich wie mit der mittleren Kronenverlichtung. Signifikante Zunahmen waren auf dem 16×16-Gitter ebenfalls nur für die drei Baumarten Fichte, Kiefer und Esche nachweisbar. Auf dem 8×8-Gitter kamen mit der Buche und Sandbirke zwei weitere hinzu. Ungeachtet dessen ob die Änderungen sich als statistisch signifikant herausstellten oder nicht, zeigten die Konfidenzintervalle, dass die Anteilsschätzungen, insbesondere für die Nebenbaumarten, auf dem 16×16-Gitter mit erheblichen Unsicherheiten behaftet waren und, dass sich diese Unsicherheiten mit den 8×8-Daten maßgeblich reduzieren ließen (Abbildung 7 und Abbildung 8). Selbst für die Hauptbaumarten zeigte das Beispiel der Eiche, dass die höheren Schätzgenauigkeiten der 8×8-Daten Fehlschlüsse, wie die scheinbare Abnahme des Anteils deutlich verlichteter Eichen auf Grundlage des 16×16-Gitters, verhindern können (Abbildung 6).

Von der Vielzahl möglicher Schadursachen wurden hier nur einige wenige, häufige ausgewählt und dargestellt. Die ausgewählten Beispiele geben einen Überblick über die zeitliche Entwicklung des Befalls der wichtigsten Baumarten mit Schadorganismen, welche die Vitalität der Bäume beeinträchtigen. Die Zeitreihen der einzelnen Schadursachen unterscheiden sich deutlich. Während die Kronenverlichtung für viele Baumarten ähnliche zeitliche Verläufe nahm und insbesondere durch die Dürrejahre 2018-2022 geprägt war, ließen sich keine gemeinsamen Trends bei der Entwicklung der Schadursachen erkennen. Die Analyse konnte jedoch demonstrieren, dass sich die Schätzfehler für die Prävalenzen bei Verwendung der 8×8-Daten verringern. Dies ist insbesondere wichtig für seltener vorkommende Schadursachen mit entsprechend geringen Stichprobenumfängen.

Für den Waldzustandsbericht bietet die Verstetigung der Auswertung der 8×8-Daten also die unmittelbaren Vorteile, dass Schätzunsicherheiten reduziert werden und, dass auch robuste Aussagen zu Veränderungen, zum Kronenzustand der im Zuge der Klimawandelanpassung wichtiger werdenden Nebenbaumarten und zur Entwicklung wichtiger Schadursachen getroffen werden können. Darüber hinaus bietet der größere, zeitlich lückenlose Datensatz zukünftig auch eine bessere Datengrundlage für weitere Verwendungszwecke. So dienen die WZE-Daten als Referenzdaten für statistische und prozessbasierte Modelle (Anders et al., 2025; Eickenscheidt et al., 2016; Knapp et al., 2024) und für die Fernerkundung (Lange et al., 2024). Mit diesen Methoden lassen sich flächendeckende Schätzungen zum Waldzustand ableiten, welche wiederum auf regionalen Skalen aggregiert

werden können, für die die Stichprobepunkte alleine keine robusten Aussagen ermöglichen. Ein Gitterdichtenvergleich hat bereits gezeigt, dass Modellvorhersagen, welche nur auf den 16×16-Daten beruhen, selbst für die Hauptbaumarten zu systematischen Über- oder Unterschätzungen auf regionaler Ebene führen können (Eickenscheidt et al., 2016). Dieses Problem trat bei Verwendung der 8×8-Daten für die Modellierung nicht mehr auf. Somit stellt die Nutzung aller 8×8-Daten sicher, dass die WZE den gestiegenen Anforderungen, die an sie gestellt werden, gerecht wird und auch zukünftig, unter sich verändernden Klimabedingungen und in Synergie mit neuen methodischen Ansätzen, wichtige Erkenntnisse zur Entwicklung des Waldzustandes liefern kann.

5 Fazit

Die Studie konnte zeigen, dass die Waldzustandserhebungen auf dem 16×16-Gitter in der Vergangenheit robuste Ergebnisse für die Hauptbaumarten und für die als andere Laub- und Nadelbäume gruppierten Nebenbaumarten liefern konnten. Die Trockenjahre haben jedoch gezeigt, dass ein dynamisches Schädgeschehen zu erhöhten Schätzfehlern führen kann. Die Verdichtung auf das 8×8-Gitter stellt sicher, dass zukünftig auch unter Klimawandelbedingungen präzise Aussagen zur Entwicklung der Kronenverlichtung der Hauptbaumarten möglich sein werden. Darüber hinaus ermöglicht der größere Stichprobenumfang eine artspezifische Auswertung der Nebenbaumarten mit ihren sehr verschiedenen Schadentwicklungen, sowie die Dokumentation der wichtigsten Schadursachen.

Literatur

- Anders, T., Hetzer, J., Knapp, N., Forrest, M., Langan, L., Tölle, M.H., Wellbrock, N., Hickler, T., 2025. Modelling past and future impacts of droughts on tree mortality and carbon storage in Norway spruce stands in Germany. *Ecol. Model.* 501, 110987. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110987>
- Bortz, J., Döring, N., 2006. Populationsbeschreibende Untersuchungen, in: Bortz, J., Döring, N. (Eds.), *Forschungsmethoden und Evaluation: für Human- und Sozialwissenschaftler*, Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 393–487. https://doi.org/10.1007/978-3-540-33306-7_7
- Cochran, W.G., 1977. *Sampling techniques*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Dahm, S., 2006. Auswertungsalgorithmen für die zweite Bundeswaldinventur (Evaluation algorithms for the second National Forest Inventory in Germany). *Arbeitsbericht Inst. Für Waldökologie Waldinventuren Eberswalde*.
- Ecker, J., Branko, E., Hagemann, U., Hentschel, R., Kätzel, R., Lange, A., Möller, K., Peetz, G., Schneck, D., Thieme, C.-J., Doktor, D., Lange, M., Preidl, S., Reichmuth, A., 2023. *Waldzustandsbericht 2023 des Landes Brandenburg*. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (MLUK), Potsdam.
- Eickenscheidt, N., Augustin, N.H., Wellbrock, N., Dühnelt, P., Hilbrig, L., 2016. Kronenzustand – Steuergrößen und Raum-Zeit-Entwicklung von 1989-2015, in: *Dynamik Und Räumliche Muster Forstlicher Standorte in Deutschland : Ergebnisse Der Bodenzustandserhebung Im Wald 2006 Bis 2008*. Johann Heinrich von Thünen-Institut, DE.
- Höhle, J., König, N., Hilbrig, L., Bielefeldt, J., Ziche, D., Grüneberg, E., Eickenscheidt, N., Ahrends, B., Wellbrock, N., 2016. Methodenüberblick und Qualitätssicherung, in: *Dynamik Und Räumliche Muster Forstlicher Standorte in Deutschland : Ergebnisse Der Bodenzustandserhebung Im Wald 2006 Bis 2008*. Johann Heinrich von Thünen-Institut, DE.
- Knapp, N., Wellbrock, N., Bielefeldt, J., Dühnelt, P., Hentschel, R., Bolte, A., 2024. From single trees to country-wide maps: Modeling mortality rates in Germany based on the Crown Condition Survey. *For. Ecol. Manag.* 568, 122081. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122081>
- Lange, M., Preidl, S., Reichmuth, A., Heurich, M., Doktor, D., 2024. A continuous tree species-specific reflectance anomaly index reveals declining forest condition between 2016 and 2022 in Germany. *Remote Sens. Environ.* 312, 114323. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114323>
- Langner, N., Oehmichen, K., Henning, L., Blickensdörfer, L., Riedel, T., 2022. *Bestockte Holzbodenkarte 2018*. <https://doi.org/10.3220/DATA20221205151218>
- Saborowski, J., Dahm, S., Ackermann, J., 1998. Stichprobentheoretische Analyse der Waldschadenserhebung in Niedersachsen [Sampling theory-based analysis of the forest condition survey of Lower Saxony]. *AFJZ* 169, 47–52.
- Wellbrock, N., Eickenscheidt, N., Hilbrig, L., Dühnelt, P., Holzhausen, M., Bauer, A., Dammann, I., Strich, S., Engels, F., Wauer, A., 2018. *Leitfaden und Dokumentation zur Waldzustandserhebung in Deutschland*, Thünen Working Paper. Braunschweig.

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek
verzeichnet diese Publikationen in
der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet unter
www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek
(German National Library) lists this
publication in the German National
Bibliographie; detailed bibliographic
data is available on the Internet at
www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene
Bände finden Sie im Internet unter
www.thuenen.de

Volumes already published in this
series are available on the Internet at
www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:

Knapp, N., Dietrich, V., Dühnelt, P., Bielefeldt, J., Wellbrock, N. (2026)
Verdichtung des Stichprobengitters der Waldzustandserhebung ermöglicht
robustere Aussagen zu Nebenbaumarten und Schadursachen.
Thünen Working Paper 286.
Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
<https://doi.org/10.3220/253-2026-69>

Die Verantwortung für die Inhalte
liegt bei den jeweiligen Verfassern
bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are
responsible for the content of
their publications.



Thünen Working Paper 286

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-working-paper@thuenen.de
www.thuenen.de

DOI: 10.3220/253-2026-69
urn: nbn:de:gbv:253-2026-000044-3