



Forstliche Versuchs-  
und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg

# WALDZUSTANDSBERICHT

# 2022



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LÄNDLICHEN RAUM  
UND VERBRAUCHERSCHUTZ

# IMPRESSUM

**Herausgeberin:**

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)

**Autor/-innen:**

Kapitel 1:

Stefan Meining (Büro für Umweltüberwachung), Dr. Heike Puhlmann, Dr. Horst Delb, Martin Burger (alle FVA)

Kapitel 2:

Stefan Meining (Büro für Umweltüberwachung), Marina Roth, Dr. Heike Puhlmann, Marvin Lorff (alle FVA)

Kapitel 3:

Raphael Habel (FVA), Stefan Meining (Büro für Umweltüberwachung)

Kapitel 4:

Dr. Dominik Florian Stangler, Dr. Elena Larysch, Tobias Walter Miller, Harald Honer (alle Professur für Waldwachstum und Dendroökologie, Universität Freiburg), Dr. Heike Puhlmann (FVA), Prof. Dr. Thomas Seifert, Prof. Dr. Hans-Peter Kahle (alle Professur für Waldwachstum und Dendroökologie, Universität Freiburg)

Kapitel 5:

Dr. Lisa Thomas, Dr. Horst Delb (alle FVA)

Kapitel 6:

Stefan Meining (Büro für Umweltüberwachung), Dr. Heike Puhlmann, Arnim Kessler, Dr. Peter Hartmann, Simon Schmidt (alle FVA)

Kapitel 7:

Dr. Heike Puhlmann (FVA)

**Titelfoto:**

Finn Meining

Motiv: Blick auf den Belchen, Südschwarzwald

**Bestellung an:**

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg  
Wonnhaldestraße 4  
79100 Freiburg

Tel.: (0761) 40 18 - 0

fva-bw@forst.bwl.de

www.fva-bw.de

**ISSN: 1862-863X**

**Download:**

Hier können Sie den Waldzustandsbericht herunterladen:

**[www.fva-bw.de/waldzustandserhebung](http://www.fva-bw.de/waldzustandserhebung)**

Alternativ können Sie den folgenden QR-Code scannen:



Mit diesem Druckprodukt unterstützen wir die Aufforstung und den Umbau deutscher Wälder durch die Schutzgemeinschaft Deutscher Wald e.V.

## VORWORT



Liebe Leserinnen und Leser,

wir hatten uns nach den trockenen und heißen Jahren 2018 bis 2020 eine längere Verschnaufpause für unsere Wälder erhofft. Leider mussten wir, nach nur einem Jahr feuchter und kühlerer Witterung, in diesem Jahr wieder einen extrem heißen und trockenen Sommer erleben.

Die Auswirkungen des Klimawandels mit immer häufiger auftretenden Extremwetterereignissen sind deutlich sichtbar in unseren Wäldern. Der Nadel- und Blattverlust dient dabei als ein wichtiger Weiser für den Gesundheitszustand der Waldbäume.

Die Situation in unseren Wäldern ist sehr besorgniserregend. Bäume sind als langlebige Organismen sehr anpassungsfähig. Jedoch übersteigen die Klimaveränderungen vielfach die Anpassungsfähigkeit der Bäume. Der mittlere Nadel- und Blattverlust liegt bei 28,4 Prozent und ist gegenüber dem Vorjahr um 1,8 Prozentpunkte angestiegen. Damit liegt er in etwa auf dem Niveau von 2020, dem bisherigen Negativrekord seit Beginn der Erhebungen im Jahr 1985.

Auch der Anteil an deutlich geschädigter Waldfläche liegt mit 46 Prozent auf dem Rekordniveau des Jahres 2020. Besonders erschreckend ist die Tatsache, dass der Anteil der ungeschädigten Waldfläche auf einem Allzeittief bei nur noch 17 Prozent liegt.

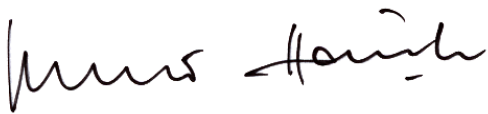
Diese dramatische Entwicklung führt uns unmittelbar vor Augen, wie wichtig eine konsequente Klimapolitik ist, um den Temperaturanstieg wirksam zu begrenzen. Gleichzeitig müssen wir weiterhin alle Hebel in Bewegung setzen, um die Anpassung der Wälder an den Klimawandel zu bewerkstelligen. Das ist gegenwärtig die zentrale Aufgabe für die Landesforstverwaltung und für alle Waldbesitzerinnen und Waldbesitzer.

Bäume mit einem Alter von unter 60 Jahren weisen aktuell einen deutlich geringeren Anteil an Nadel- und Blattverlusten auf als ältere Bäume. Das Potential zur Klimaanpassung steckt in den jüngeren Wäldern und deren pfleglicher Behandlung. Wir haben es in

der Hand diese Waldgeneration durch gezielte Waldpflege fit für den Klimawandel zu machen. Unsere Forstleute arbeiten tagtäglich mit viel Engagement daran den Kronenausbau der Waldbäume und eine lebendige Mischung der Wälder zu fördern.

Den eingeschlagenen Weg der aktiven Entwicklung unserer Wälder, der in der Waldstrategie Baden-Württemberg aufgezeigt wird, werden wir konsequent weiterverfolgen. Nur so können wir gesunde Wälder und deren Leistungen für uns Menschen erhalten.

Stuttgart, im Dezember 2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Peter Hauk'.

Peter Hauk MdL

Minister für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz

# INHALT

|          |                                                                                                     |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Ergebnisse der Waldzustandserhebung</b>                                                          | <b>5</b>  |
|          | Nadel-/Blattverlust                                                                                 | 6         |
|          | Vergilbung                                                                                          | 7         |
|          | Schadstufen                                                                                         | 8         |
|          | Abgestorbene und ausgefallene Bäume                                                                 | 9         |
|          | Fruktifikation                                                                                      | 10        |
|          | Fichte                                                                                              | 12        |
|          | Tanne                                                                                               | 12        |
|          | Kiefer                                                                                              | 14        |
|          | Lärche                                                                                              | 15        |
|          | Douglasie                                                                                           | 15        |
|          | Buche                                                                                               | 16        |
|          | Eiche                                                                                               | 18        |
|          | Bergahorn                                                                                           | 19        |
|          | Esche                                                                                               | 19        |
| <b>2</b> | <b>Stoffeinträge und Bodenversauerung</b>                                                           | <b>20</b> |
|          | Entwicklung der Stickstoffeinträge                                                                  | 21        |
|          | Erhöhte Stickstoffversorgung verändert die Waldvegetation                                           | 22        |
| <b>3</b> | <b>Witterung</b>                                                                                    | <b>25</b> |
|          | Temperatur und Niederschlag                                                                         | 25        |
|          | Wasserhaushalt im Klimawandel                                                                       | 27        |
|          | Waldklima                                                                                           | 29        |
| <b>4</b> | <b>Jahringbildung verschiedener Waldbaumarten entlang ökologischer Gradienten im Südschwarzwald</b> | <b>30</b> |
|          | Bedeutung von Studien zur Jahringbildung                                                            | 30        |
|          | Monitoring der Jahringbildung entlang ökologischer Gradienten                                       | 30        |
|          | Präparation der Mikrokerne und Ablauf der Zellbildung                                               | 31        |
|          | Jahringphänologie in den Trockenjahren 2018 und 2019                                                | 32        |
|          | Intra-annuelle Dynamik des täglichen Zuwachses                                                      | 34        |
|          | Schlussfolgerungen                                                                                  | 35        |
| <b>5</b> | <b>Quarantäneschadorganismen im Wald</b>                                                            | <b>36</b> |
|          | Was gilt für Quarantäneschadorganismen in der EU?                                                   | 36        |
|          | Prioritäre Schadorganismen (PSO) im Wald                                                            | 37        |
|          | Erhebungen von PSO im Wald                                                                          | 38        |
|          | Vorgehen beim Fund von Quarantäneschadorganismen                                                    | 39        |
|          | Der Asiatische Laubholzbockkäfer – Beispiel für ein erfolgreiches Zurückdrängen                     | 39        |
|          | Und warum das Ganze?                                                                                | 40        |

|          |                                                                                          |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6</b> | <b>Das Forstliche Umweltmonitoring</b>                                                   | <b>41</b> |
|          | Methodischer Aufbau                                                                      | 42        |
|          | Internationale Einbindung                                                                | 42        |
|          | Waldzustandserhebung                                                                     | 43        |
|          | Qualitätssicherung                                                                       | 45        |
|          | Auswertungsmethoden                                                                      | 45        |
|          | Aktuelle Bodenzustandsinventuren                                                         | 45        |
|          | Dritte Bodenzustandserhebung im Wald: BZE III                                            | 45        |
|          | Ergebnisse der ersten beiden Inventuren als Grundlage für die Untersuchungen der BZE III | 46        |
|          | Neue Aufnahmepunkte bei der BZE III                                                      | 47        |
|          | Erweiterung der flächenhaften Bodeninformationen durch die BWI 4                         | 47        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Fazit</b>                                                         | <b>49</b> |
|          | Dürre und Hitze belasten erneut die Wälder                                               | 49        |
|          | Quarantäneschadorganismen                                                                | 50        |
|          | Jahrringbildung verschiedener Baumarten                                                  | 50        |
|          | Fazit                                                                                    | 51        |
| <b>8</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>                                                              | <b>53</b> |
|          | <b>Anlagen</b>                                                                           | <b>55</b> |

# 1 ERGEBNISSE DER WALDZUSTANDSERHEBUNG

Die Wälder Baden-Württembergs stehen seit mehreren Jahren stark unter dem Einfluss immer wiederkehrender extremer Witterungsbedingungen. Die auftretenden sommerlichen Hitze- und Trockenperioden, die geringe Auffüllung der Bodenwasserspeicher im Winter sowie sinkende Grundwasserstände gefährden die Waldvitalität und machen die Vulnerabilität der heimischen Wälder gegenüber auftretenden Klimaextremen deutlich. Insbesondere in Folge der sehr heißen und trockenen Jahre 2018 bis 2020 sind die Schäden in den Wäldern extrem angestiegen. Nach einem meteorologisch eher durchschnittlichen Jahr 2021 mit ausreichend Niederschlägen in der Vegetationszeit führte die heiße Sommerwitterung 2022 mit langanhaltenden Trockenperioden wiederum zu einer Verstärkung der Waldschäden (Abb. 1).

Besonders stark werden Wälder belastet, wenn Stressereignisse mit kurzem zeitlichen Abstand auftreten, ohne dass Erholungsphasen eine spürbare Revitalisierung des Ökosystems ermöglichen. Dabei werden die Wälder erst durch hohe Temperaturen und langanhaltende Dürre massiv geschwächt und anschließend oftmals von Schadorganismen wie Pilzen und Insekten

geschädigt. Auch im Sommer 2022 führten hohe Ausgangspopulationen verschiedener Borkenkäferarten aus den vorangegangenen Jahren, in Kombination mit überdurchschnittlichen Temperaturen und Trockenstress, zu einem starken Käferbefall besonders von Fichten und Tannen; aber auch andere Nadelbaumarten und Buchen waren zum Teil betroffen. Besonders hohe Schäden traten dabei im Südschwarzwald auf.

In den Wäldern Baden-Württembergs bestand aufgrund der langanhaltenden Hitze- und Trockenperiode in diesem Jahr ein außergewöhnlich hohes Waldbrandrisiko. Während der Sommermonate wurde in weiten Teilen des Landes die höchste Waldbrandgefahrenstufe ausgerufen. Kleinere Waldbrände, die z. B. im Landkreis Karlsruhe oder am Kandel im Südschwarzwald ausbrachen, konnten zeitnah kontrolliert und gelöscht werden, so dass größere Schäden ausblieben. Es zeigt sich jedoch, dass auch in einem vergleichsweise wasserreichen Land wie Baden-Württemberg unter den sich ändernden Klimabedingungen mit einer zunehmenden Waldbrandgefahr zu rechnen ist.



**Abb. 1:** Stark entlaubte Eichen am Oberrhein südlich von Breisach im August 2022 (Foto: S. Meining).

Die Waldzustandserhebung untersucht den Kronenzustand der Waldbäume. Dazu werden auf einem systematisch angelegten Stichprobennetz Probestämme ausgewählt und dauerhaft markiert. Im Jahr 2022 wurden so 317 Stichprobenpunkte mit insgesamt 7.550 Bäumen in Baden-Württemberg untersucht (zur Methodik siehe Kapitel „Forstliches Umweltmonitoring“ S. 41).

Neben der enormen Belastung der Wälder durch zunehmend auftretende sommerliche Hitze- und Dürreperioden werden die Wälder und ihre Nährstoffversorgung weiterhin durch zu hohe Stickstoffeinträge aus Industrie, Verkehr und Landwirtschaft beeinträchtigt. Die Doppelbelastung aus Klimaextremen und ungünstigem Ernährungszustand verstärkt die Anfälligkeit der Bäume, da beispielsweise das Wurzelwachstum in versauertem Bodenmilieu eingeschränkt ist und die Regulierungsmechanismen gegenüber Trockenheit bei Nährstoffungleichgewichten gestört sind.

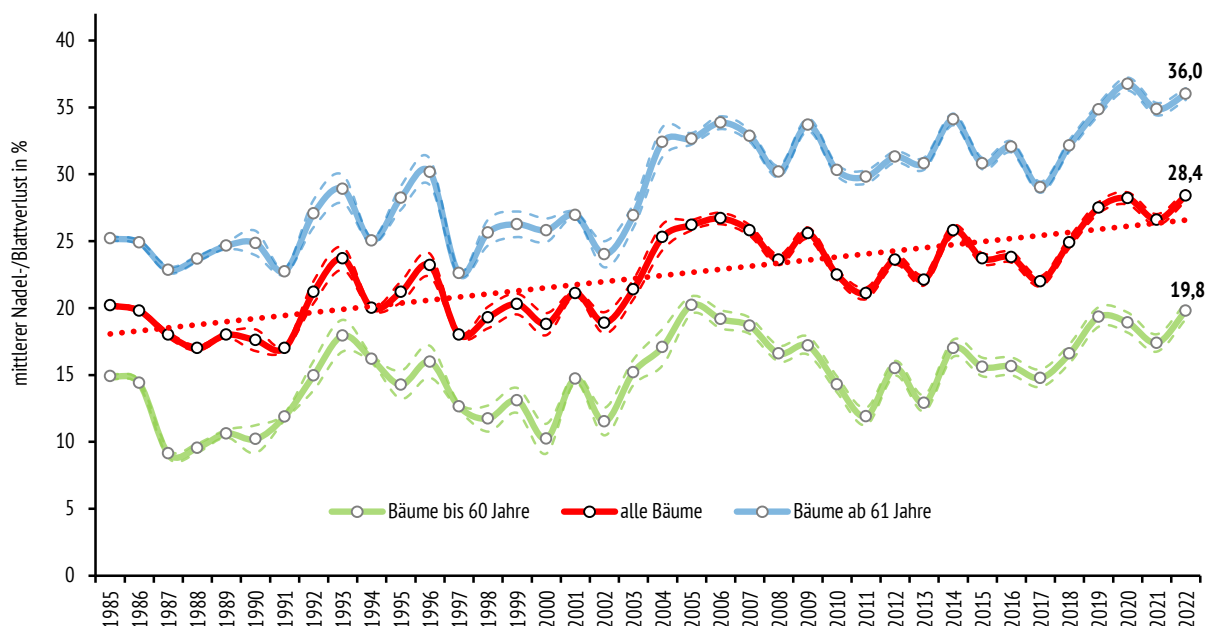
Außerordentlich große Waldschäden mit hohen Ausfallraten sind seit einigen Jahren in der Oberrheinebene festzustellen, wo die Wälder besonders unter dem auftretenden Hitze- und Trockenstress leiden. Insbesondere in Kiefernbeständen ist hier eine hohe Ausfallrate zu verzeichnen. Zudem kommt es vor allem im nördlichen Teil der Oberrheinebene regelmäßig zu

starkem Wurzelfraß durch Engerlinge des Maikäfers. Insbesondere junge Bäume mit wenig Wurzelmasse sterben infolgedessen häufig ab. In länger anhaltenden Trockenperioden kann der Wurzelfraß der Engerlinge aber auch für Altbäume eine zusätzliche Belastung darstellen.

### Nadel-/Blattverlust

Der mittlere Nadel-/Blattverlust der Wälder in Baden-Württemberg liegt im Jahr 2022 so hoch wie noch nie seit Beginn der systematischen Waldzustandserhebungen im Jahr 1985. Nach einer leichten Erholung im vergangenen Jahr erhöht sich das Verlustprozent aktuell um 1,8 Prozentpunkte auf 28,4 Prozent und liegt damit knapp über dem bisherigen Höchststand aus dem Jahr 2020 (Abb. 2).

Im langjährigen Trend zeigt sich eine deutliche Zunahme der Waldschäden innerhalb des Aufnahmezeitraums. Neben Schädereignissen in einzelnen Jahren, die maßgeblich auf singuläre Ereignisse wie einzelne Extremwetterereignisse in Kombination mit Insektenkalamitäten zurückzuführen sind, zeigen sich insbesondere in den letzten Jahrzehnten zusätzlich langanhaltende Vitalitätsverluste der Wälder aufgrund von klimatischen Änderungen. Hohe Sommertemperaturen, eine verlängerte Vegetationszeit, anhaltende Dürreperioden und milde Winter verstärken die Belastung der heimischen Wälder zunehmend. Nach dem „Jahrhundertsommer“ 2003 ist eine massive



**Abb. 2:** Entwicklung des mittleren Nadel-/Blattverlusts aller Bäume sowie der Altersgruppen „bis 60 Jahre“ und „ab 61 Jahre“. Die gepunktete Linie stellt den linearen Trend des Nadel-/Blattverlusts aller Bäume dar. Die gestrichelten Linien geben den jeweiligen Vertrauensbereich von 95 Prozent an.

Zunahme der Waldschäden vor allem infolge der Trockenjahre 2018 bis 2020 zu erkennen. Seit dem Jahr 2017 ist der mittlere Nadel-/Blattverlust der Wälder Baden-Württembergs mit Ausnahme des Jahres 2021 kontinuierlich angestiegen und hat sich somit innerhalb der letzten fünf Jahre um mehr als sechs Prozentpunkte erhöht.

Ein besonders hoher Schädigungsgrad der Wälder wird in den letzten Jahren vermehrt auf eher warm-trockenen, süd- oder süd-westexponierten Standorten der unteren bzw. mittleren Lagen beobachtet. Aber auch in höheren Lagen geraten Wälder auf Standorten mit geringem Wasserspeichervermögen unter langanhaltender Dürre wie im Jahr 2022 zunehmend unter Trockenstress. Neben einer erhöhten Mortalität und Vitalitätsverlusten, die oftmals auf die Beteiligung verschiedener Schadorganismen zurückzuführen sind, wurden in den Baumkronen häufig Trockenstresssymptome wie ein hoher Anteil abgestorbener Äste, eine verfrühte Welke und Verfärbung, ein vorzeitiger Abwurf von Nadeln bzw. Blättern sowie eine reduzierte Verzweigung festgestellt.

## Vergilbung

Die Vergilbung von Nadeln oder Blättern ist ein charakteristisches Zeichen für einen akuten Nährstoffmangel der Bäume. Insbesondere ein Mangel an dem Makronährelement Magnesium kann zu einer typischen Gelbverfärbung der Blattorgane führen (Abb. 3). In den vergangenen Jahren wurde die Vergilbung der Bäume häufig durch sommerliche Trockenphasen verstärkt, da oftmals nicht genügend Wasser und darin gelöste Nährstoffe aufgenommen werden konnten.



Abb. 3: Vergilbte Nadeln einer Fichte (Foto: S. Meining).

Klassische Vergilbungssymptome, wie sie in den 1980er und 1990er Jahren als unmittelbare Reaktion der Bäume auf hohe Säureeinträge besonders in immissionsbelasteten Nadelwäldern zu beobachten waren, sind heute nur noch von untergeordneter Bedeutung. Der deutliche Rückgang der Schadstoffbelastung und die durchgeführten Regenerationskalkungen auf stark belasteten Standorten führten mittlerweile vielerorts zu einer Verbesserung der Nährstoffversorgung. Nichtsdestotrotz sind viele Waldböden in Baden-Württemberg nach wie vor weit über das natürliche Maß hinaus versauert und die Verfügbarkeit von essentiellen Pflanzennährstoffen ist für viele Waldbestände weiterhin stark eingeschränkt.

Aktuell liegt der Anteil der Waldfläche mit Vergilbungserscheinungen in Baden-Württemberg im Vergleich zu den Vorjahren leicht erhöht bei 2,6 Prozent (Abb. 4). Aufgrund des trockenen Sommers kam es dieses Jahr wiederholt zu einer verfrühten

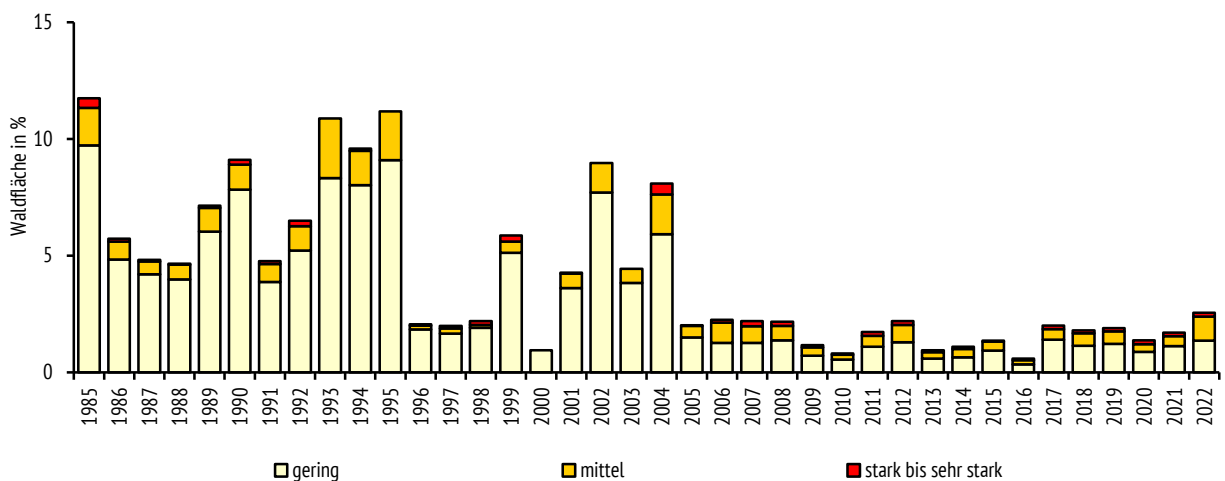


Abb. 4: Anteil der vergilbten Waldfläche in Baden-Württemberg getrennt nach den Erhebungsstufen gering, mittel und stark bis sehr stark vergilbt.

Verfärbung einiger Laubbaumarten. Besonders betroffen waren neben Buchen vor allem Hainbuchen, Linden und Birken, die bereits im August auf zumeist flachgründigen Standorten ihr Laub verfärbten.

## Schadstufen

Insgesamt 46 Prozent der Waldfläche Baden-Württembergs sind aktuell deutlich geschädigt (Schadstufen 2 bis 4). Gegenüber dem Vorjahr erhöht sich damit der Anteil um vier Prozentpunkte und liegt gleich auf mit dem bisherigen Höchststand der Aufnahmeperiode aus dem Jahr 2020 (Abb. 5). Innerhalb der deutlich geschädigten Waldfläche hat sich seit einigen Jahren der Anteil an stark geschädigten bzw. abgestorbenen Bäumen erhöht. Derzeit gelten fünf Prozent der Waldfläche als stark geschädigt und ein Prozent als abgestorben. Der Anteil der schwach geschädigten Waldfläche (Schadstufe 1) bleibt mit 37 Prozent gegenüber dem Vorjahr konstant. Dagegen verringert sich der Anteil an ungeschädigter Waldfläche (Schadstufe 0) auf nur noch 17 Prozent – ein derart geringer Wert wurde im gesamten Aufnahmezeitraum seit 1985 noch nicht festgestellt.

In Abbildung 6 wird der Anteil der deutlich geschädigten Bäume in den einzelnen Landkreisen Baden-Württembergs getrennt nach den Altersgruppen „bis 60 Jahre“ (links) und „ab 61 Jahre“ (rechts) dargestellt. Um den statistischen Fehler möglichst gering zu halten, werden nur Landkreise dargestellt, in denen bei der Waldzustandserhebung mindestens 50 Probebäume aufgenommen wurden. Insbesondere bei der jüngeren Altersgruppe können die Ergebnisse aufgrund der geringen Stichprobe für viele Landkreise nicht gesondert ausgewertet werden. Die Anzahl der aufgenommenen Bäume je Landkreis, der mittlere Nadel-/Blattverlust mit Fehlerrahmen sowie das Baumarten- und Altersverhältnis sind zur näheren Erläuterung der dargestellten Ergebnisse in Anlage 4 aufgelistet.

Für Bäume der älteren Altersstufe lässt sich ein Schadensschwerpunkt in den nordöstlichen Landesteilen von Baden-Württemberg identifizieren. In vier zusammenhängenden Landkreisen liegt hier der Anteil an deutlich geschädigten Bäumen über 80 Prozent. Zudem sind einzelne Landkreise im südlichen Neckarland, auf der Schwäbischen Alb, im Bodensee-raum sowie im Schwarzwald mit einem hohen Schädigungsgrad gekennzeichnet. Aber auch in den weniger betroffenen Landkreisen liegt der Anteil deutlich geschädigter Bäume in dieser

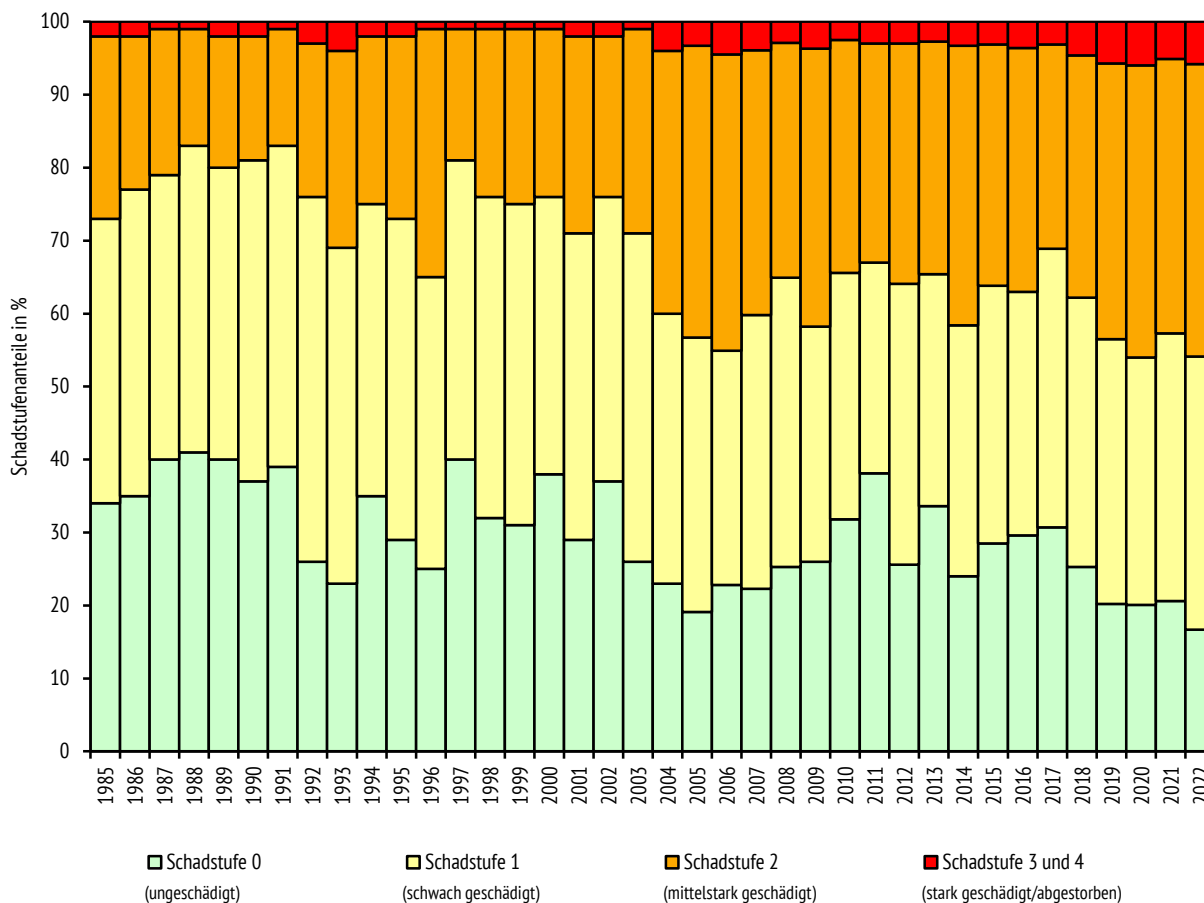
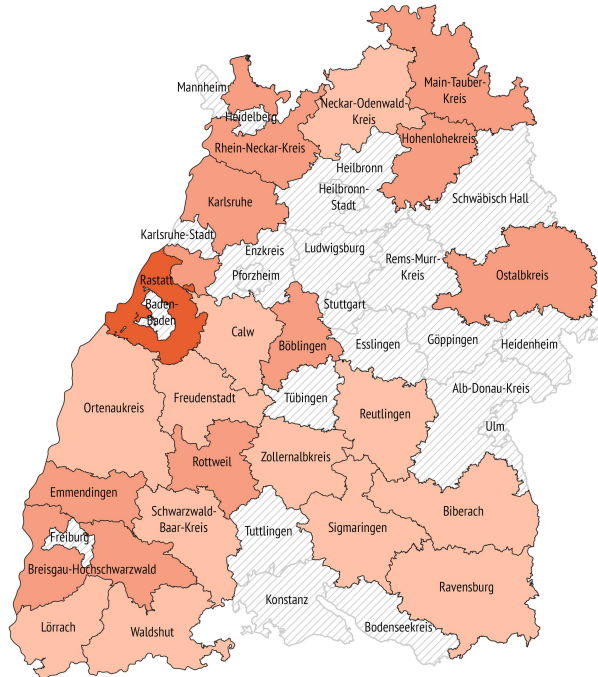
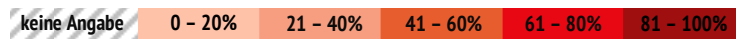
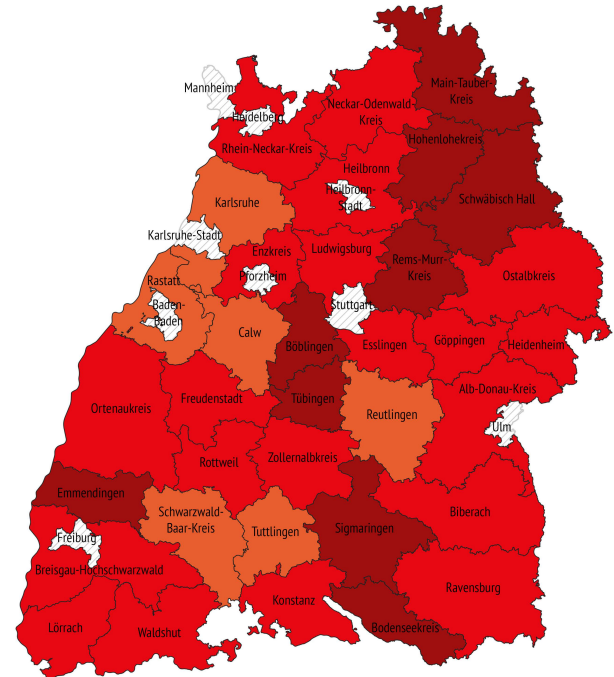


Abb. 5: Schadstufenverteilung der Waldzustandserhebung von 1985 bis 2022.

## bis 60 Jahre



## ab 61 Jahre

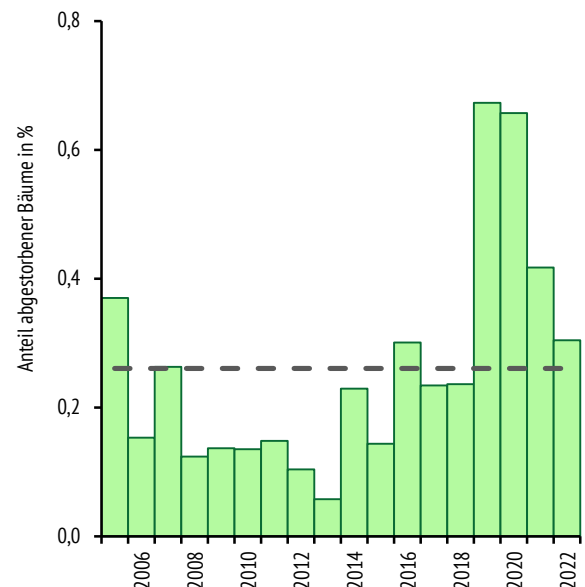


**Abb. 6:** Prozentualer Anteil deutlich geschädigter Bäume je Landkreis nach den Altersstufen „bis 60 Jahre“ (links) und „ab 61 Jahre“ (rechts). Grau gestreifte Markierung: keine Angabe für Landkreise mit weniger als 50 Bäumen in der Stichprobe der Waldzustandserhebung.

Altersstufe bei über 21 Prozent. Somit ist auch dort mehr als jeder fünfte Baum deutlich geschädigt. In der jüngeren Altersgruppe ist der Anteil deutlich geschädigter Bäume hingegen vergleichsweise gering. Lediglich im Landkreis Rastatt sind über 40 Prozent der Probebäume bis 60 Jahre deutlich geschädigt.

### Abgestorbene und ausgefallene Bäume

Aus der Anzahl der Bäume, die seit der letzten Erhebung abgestorben sind, jedoch weiterhin am Stichprobenpunkt der Waldzustandserhebung stehen, errechnet sich die sogenannte Mortalitätsrate. Diese stehend toten Bäume verbleiben mit 100 Prozent Nadel-/Blattverlust in der Stichprobe und werden als abgestorben (Schadstufe 4) klassifiziert. Sie repräsentieren zusammen mit den bereits länger abgestorbenen Bäumen das gesamte stehende Totholz.



**Abb. 7:** Entwicklung der Mortalitätsrate im Vergleich zum langjährigen Mittel (berechnet auf dem einheitlichen 8x8 km-Netz seit 2005).



**Abb. 8:** Schadensfläche nach starkem Borkenkäferbefall im Südschwarzwald (Foto: S. Meining).

Im aktuellen Jahr liegt die Mortalitätsrate mit 0,3 Prozent leicht über dem langjährigen mittleren Niveau (Abb. 7), nachdem sie in den Jahren 2019 und 2020 infolge von Trockenheit und verbreitetem Käferbefall erheblich angestiegen war. Der gesamte Anteil an stehendem Totholz in der herrschenden Bestandesschicht beträgt derzeit 1,2 Prozent.

Die Waldzustandserhebung erfasst ebenfalls alle Bäume, die seit der letzten Erhebung aus dem Waldbestand entfernt wurden (planmäßige und zufällige Nutzung) oder aus anderen Gründen wie Sturmwurf oder geänderte Konkurrenzsituation nicht mehr für eine Kronenzustandsaufnahme zur Verfügung stehen. Die Ausfallrate liegt in diesem Jahr leicht erhöht bei 3,1 Prozent, gegenüber 2,7 Prozent im Vorjahr.

Neben einer planmäßigen Holznutzung mussten auch dieses Jahr wieder zahlreiche unplanmäßige Kalamitätshiebe durchgeführt werden, um weitere Gefahren für den bestehenden Wald abzuwenden. So dient das frühzeitige Entfernen frisch befallener Fichten und Tannen als wichtigste Maßnahme, um eine weitere Ausbreitung und Vermehrung des Borkenkäfers zu verhindern (Abb. 8). Zudem mussten im Rahmen der Verkehrssicherheitspflicht vielerorts stärker geschädigte Bäume aufgrund hoher Bruchgefahr entnommen werden.

Mitte Februar 2022 zogen die Orkanstürme „Ylenia“ und „Zeynep“ über Deutschland und hinterließen zum Teil erhebliche Zerstörungen. Auch in vielen Regionen Baden-Württembergs kam es zu Sturmwürfen, wenngleich die Windgeschwindigkeiten nicht so hoch wie andernorts waren und die Sturmholzmenge im Vergleich zu anderen Stürmen der Vergangenheit vergleichsweise gering blieb.

### Fruktifikation

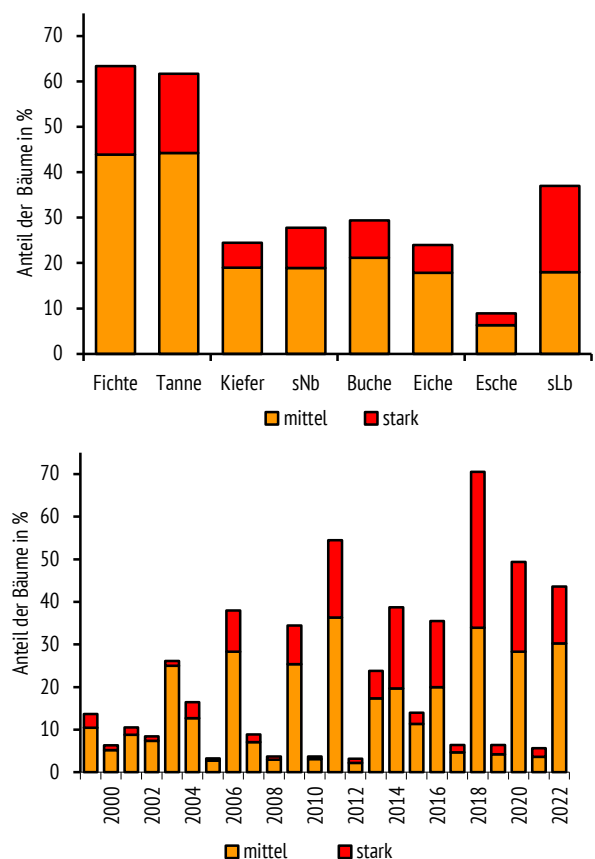
Das Jahr 2022 war geprägt von einer starken Blüte und Fruktifikation der Waldbäume (Abb. 9). Im Frühjahr war verbreitet ein erheblicher Pollenflug zu beobachten, der sich vielerorts im Land als gelb-braune Schicht auffällig z. B. an Fenstern, Autos oder Gartenmöbeln absetzte. Besonders stark fruktifizierten Fichten und Tannen. Jeweils über 60 Prozent aller aufgenommenen Bäume dieser beiden Baumarten wiesen im Sommer eine hohe Anzahl an Zapfen in den Baumkronen auf (Abb. 10). Entgegen der Vollmast bei Fichte und Tanne fruktifizierten die Laubbaumarten deutlich weniger, wenngleich auch hier ein Anstieg gegenüber dem Vorjahr zu beobachten war.



**Abb. 9:** Starke Ausbildung von männlichen Blütenständen an einer Fichte im Frühjahr 2022 (Foto: S. Meining).

Eine starke Fruchtbildung stellt für die Waldbäume regelmäßig eine hohe Belastung dar. Das Ausbilden insbesondere von schweren Samen wie Eicheln oder Bucheckern benötigt große Energie- und Nährstoffreserven. In Jahren starker Fruktifikation ist deshalb das vegetative Wachstum zugunsten der Fruchtbildung häufig reduziert, was sich oftmals auch in einem schlechteren Kronenzustand äußert.

Bei den meisten Bäumen ist aufgrund der hohen physiologischen Belastung eine stärkere Fruchtbildung nur in Abständen von einigen Jahren möglich. Literaturstudien zur Buche gehen von einem durchschnittlichen Abstand zwischen starken Fruktifikationsjahren von vier bis fünf Jahren aus (PAAR et al., 2011). Die Ergebnisse der Waldzustandserhebung in Baden-Württemberg zeigen für die vergangenen 15 Jahre eine auffallend hohe Intensität der Fruchtbildung und eine Häufung stärkerer Fruktifikationsjahre, was maßgeblich durch eine zunehmend häufiger auftretende trocken-warme Frühjahrswitterung und eine hohe Stickstoffverfügbarkeit im Wurzelraum begünstigt wird.



**Abb. 10:** Fruktifikationsintensität der Hauptbaumarten sowie der sonstigen Nadelbäume (sNb) und sonstigen Laubbäume (sLb) im Jahr 2022 (oben). Zeitliche Entwicklung aller Bäume im blühfähigen Alter (>49 Jahre) seit 1999 (unten).

## Fichte

Der Kronenzustand der Fichte hat sich gegenüber dem Vorjahr kaum verändert. Der mittlere Nadelverlust erhöht sich leicht um 0,4 Prozentpunkte auf 25,1 Prozent (Abb. 12). Insgesamt sind 38 Prozent der Fichtenfläche in Baden-Württemberg deutlich geschädigt. 39 Prozent wurden als schwach geschädigt und lediglich 23 Prozent als ungeschädigt eingestuft (Abb. 13).

Als Baumart der borealen Klimazone und Höhenlagen ist die Fichte an die steigenden Temperaturen und die ausgeprägten sommerlichen Dürrephasen der letzten Jahre nicht angepasst. Aufgrund ihres flachgründigen Wurzelwerks gerät die Fichte in den Sommermonaten schnell unter Trockenstress, der sich häufig in Kurztriebigkeit, vorzeitigem Nadelabwurf und einem erhöhten Anteil an Trockenästen zeigt. Zudem steigt bei Trockenheit die Anfälligkeit gegenüber Borkenkäferbefall stark an. Unterhalb von 600 Höhenmetern erscheint eine Fichtenbewirtschaftung bei den mittlerweile vorherrschenden klimatischen Bedingungen nur schwerlich möglich.

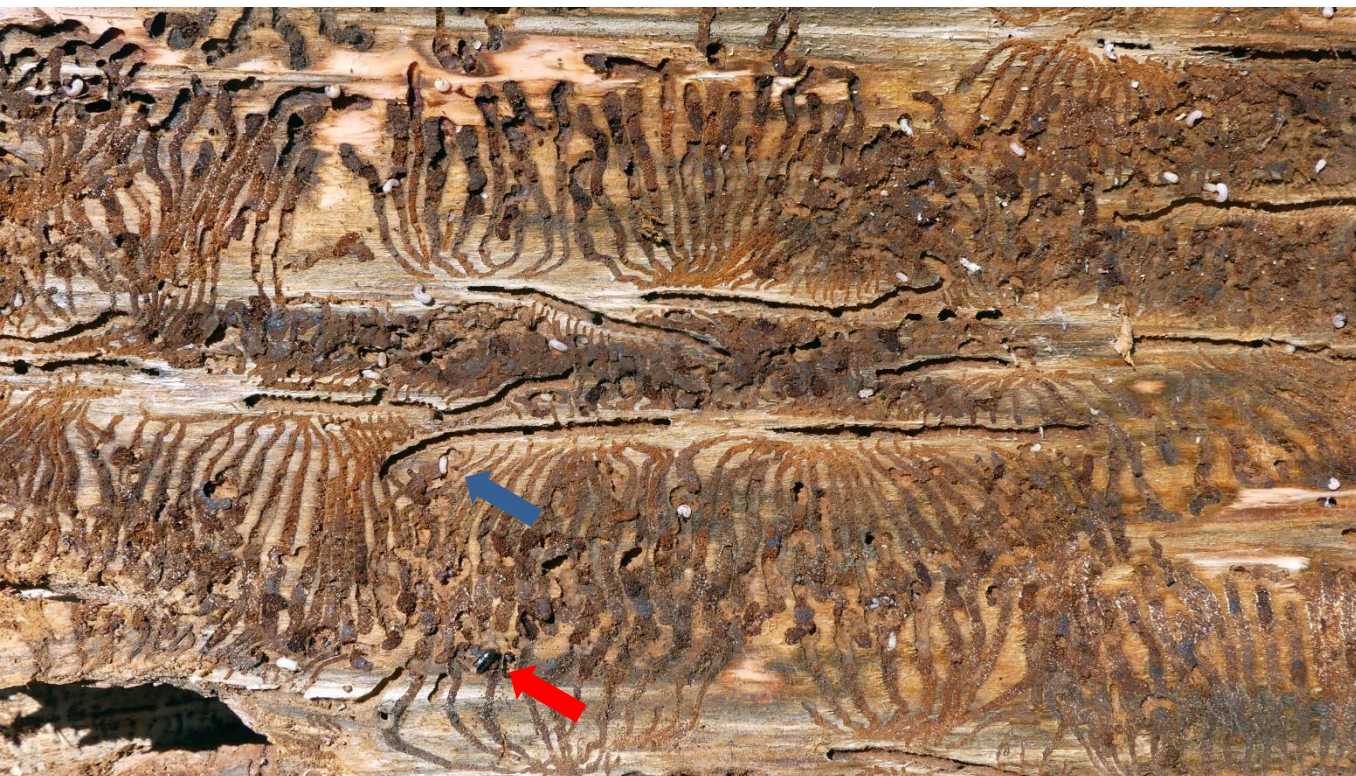
In diesem Jahr verlief die Entwicklung der Fichtenborkenkäfer, dem Buchdrucker (*Ips typographus*) und dem Kupferstecher (*Pityogenes chalcographus*), infolge der vergleichsweisen kühlen und nassen Witterung im April zunächst etwas zögerlich. Anhaltend hohe Temperaturen und geringe Niederschläge

von Mai bis einschließlich August führten dann jedoch nahezu landesweit zu sehr käferfreundlichen Bedingungen. In tieferen und mittleren Lagen wurde dieses Jahr teilweise sogar die Anlage einer dritten Käfergeneration beobachtet (Abb. 11). Gleichzeitig waren viele Fichten aufgrund langanhaltender Trockenphasen zunehmend geschwächt. Wie bereits in den Vorjahren war in diesem Jahr vor allem der Südschwarzwald von starkem Borkenkäferbefall betroffen.

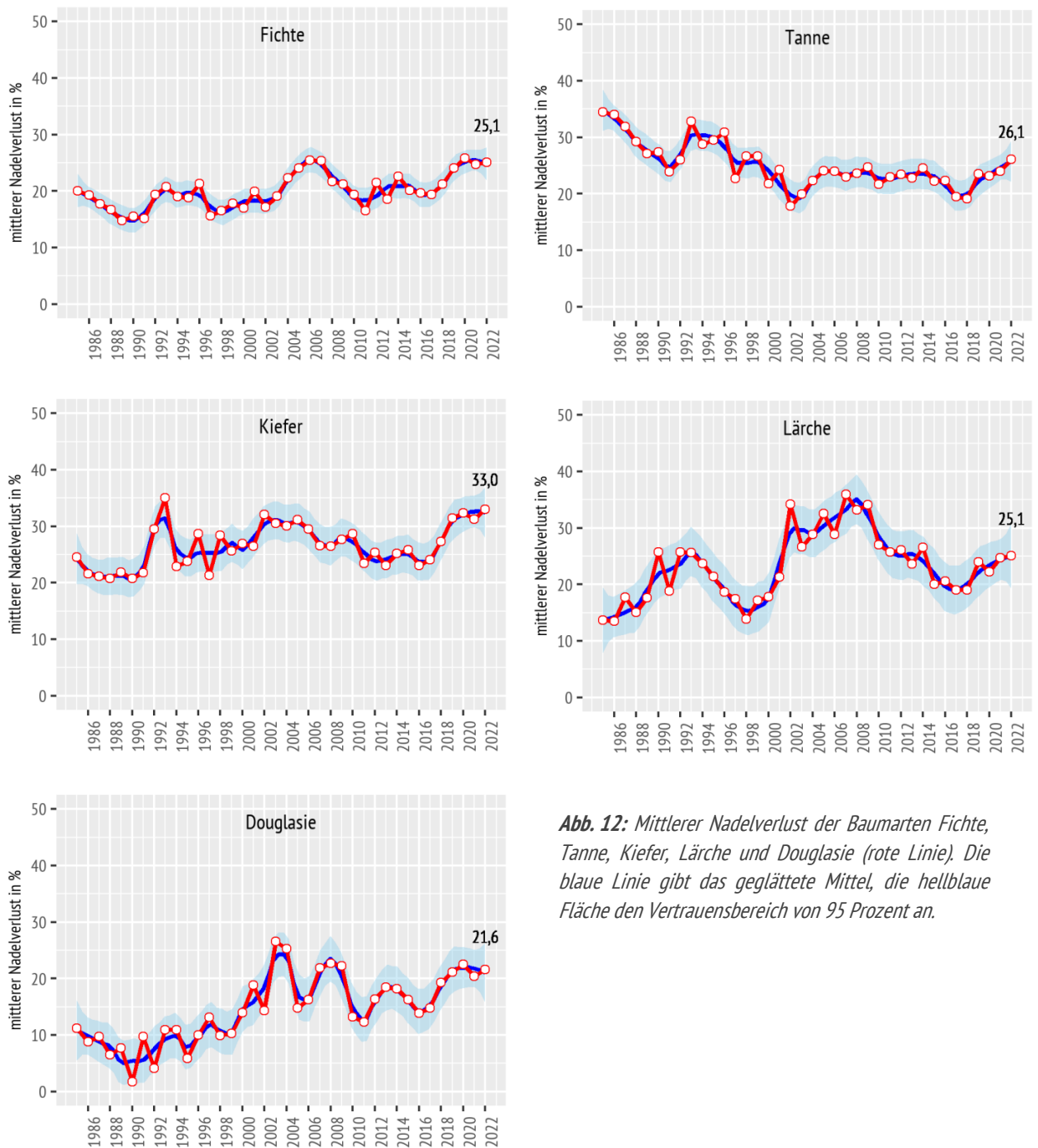
## Tanne

Der mittlere Nadelverlust der Tanne erhöht sich um 2,1 Prozentpunkte auf 26,1 Prozent (Abb. 12). Damit verschlechtert sich der Kronenzustand der Tanne erstmalig wieder auf einen Schädigungsgrad, welcher zuletzt im Jahr 1999 übertroffen wurde. Insgesamt gelten 44 Prozent der Tannenfläche in Baden-Württemberg als deutlich geschädigt. 34 Prozent sind schwach geschädigt und lediglich 22 Prozent ungeschädigt (Abb. 13).

Die deutliche Verschlechterung des Kronenzustandes der Tanne ist im Wesentlichen auf jüngere Tannenbestände zurückzuführen. Während ältere Tannen im Vergleich zum Vorjahr kaum Änderungen im Kronenzustand aufweisen, zeigt sich bei jüngeren Tannen im Alter bis zu 60 Jahren ein deutlicher



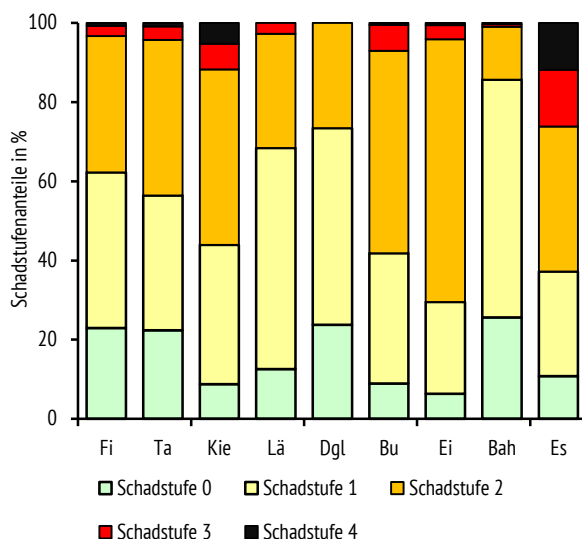
**Abb. 11:** Fraßbild des Buchdruckers an Fichte unter der Rinde. Roter Pfeil: adulter Käfer, blauer Pfeil: Käferlarve (Foto: S. Meining).



**Abb. 12:** Mittlerer Nadelverlust der Baumarten Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche und Douglasie (rote Linie). Die blaue Linie gibt das geglättete Mittel, die hellblaue Fläche den Vertrauensbereich von 95 Prozent an.

Anstieg der Kronenverlichtung. Junge Bäume reagieren meist schneller und sensibler auf langanhaltende Trockenphasen, da ihr Wurzelwerk flacher ausgeprägt ist, als dies bei älteren Bäumen der Fall ist. Zudem wurde in den letzten Jahren in einigen Tannenbeständen ein zunehmender Befall durch die Tannentrieblaus (*Dreyfusia* spp.) beobachtet, die vorwiegend jüngere Bäume auf besonnten Standorten befällt. Die Schadwirkung wird häufig durch eine Auflichtung der Bestände verstärkt, etwa wenn der schützende Altbestand nach Kalamitäten fehlt.

Ähnlich wie bei der Fichte waren auch die Tannenbestände dieses Jahr wieder von starkem Borkenkäferbefall betroffen. Besonders in Erscheinung traten dabei der Krummzähne (*Pityokteines curvidens*) und der Kleine Tannenborkenkäfer (*Cryphalus piceae*), die nach guten Entwicklungsbedingungen im Verlauf des Sommers zahlreiche Tannen befielen.



**Abb. 13:** Anteile der Schadstufen für die Baumarten Fichte (Fi), Tanne (Ta), Kiefer (Kie), Lärche (Lä), Douglasie (Dgl), Buche (Bu), Eiche (Ei), Bergahorn (Bah) und Esche (Es).

Die diesjährige Waldzustandserhebung zeigt einen hohen Anteil an Tannen, die eine Verbraunung älterer Nadeljahrgänge aufweisen. Dies kann zum einen als direkte Reaktion des Baumes auf die anhaltende Trockenheit gedeutet werden, andererseits weisen derartige Verfärbungen in der Regel auf einen akuten Kaliummangel der Bäume hin. Es liegt nahe, dass durch die verminderte Wasserverfügbarkeit während des Sommers eine ausreichende Nährstoffversorgung der Bäume, vor allem auf nährstoffarmen Standorten, nur eingeschränkt möglich war. Zudem erhöht die nach wie vor hohe Parasitierungsrate der Tanne durch die Tannenmiste (*Viscum album ssp. abietis*) den Wasser- und Nährstoffbedarf der Bäume, der bei angespanntem standörtlichen Wasser- und Nährstoffhaushalt nicht ausreichend gedeckt werden kann.

## Kiefer

Auch der Kronenzustand der Kiefer hat sich dieses Jahr verschlechtert. Der mittlere Nadelverlust erhöht sich um 1,7 Prozentpunkte auf 33,0 Prozent (Abb. 12). Insgesamt gelten 56 Prozent der Kiefernflächen im Land als deutlich geschädigt und damit so viel wie bei keiner anderen Nadelbaumart (Abb. 13). Auffällig sind die hohen Anteile an stark geschädigten bzw. abgestorbenen Bäumen mit jeweils sieben bzw. fünf Prozent. Etwas mehr als ein Drittel (35 Prozent) sind nur schwach geschädigt und lediglich neun Prozent ungeschädigt.

Besonders dramatisch zeichnet sich der hohe Vitalitätsverlust der Kiefern auf den warm-trockenen Standorten der Oberrheinebene ab. Auf den meist kiesig-sandigen Böden mit sehr geringer Wasserspeicherkapazität kommt die Kiefer zunehmend unter Trockenstress und stirbt zum Teil innerhalb kürzester Zeit ab. Erste Anzeichen einer Vitalitätsschwäche äußern sich bei der Kiefer oftmals in einer Verfärbung letztjähriger Triebe, die mittlerweile auch außerhalb der Rheinebene immer häufiger auf Standorten mit geringer Wasserspeicherkapazität festzustellen ist (Abb. 14).

Schadensverstärkend wirkt sich zudem der Befall durch die Kiefernmitse (*Viscum album ssp. austriacum*) aus, die dem Baum mit ihren Senkerwurzeln Wasser und darin gelöste Nährstoffe entzieht. Zudem sind geschwächte Kiefern sehr anfällig gegenüber dem pilzlichen Erreger des Diplodia-Triebsterbens, der eine Schädigung junger Kieferntriebe verursacht. Daneben führt ein Befall von rindenbrütenden Schadinsekten wie Borken- oder Prachtkäfern meist zum Absterben der Kiefern.



**Abb. 14:** Nadelverfärbung an einer Kiefer (Foto: S. Meinung).

## Lärche

Der Kronenzustand der Lärche (Europäische und Japanische Lärche) hat sich gegenüber dem Vorjahr nur geringfügig verschlechtert. Der mittlere Nadelverlust erhöht sich leicht um 0,4 Prozentpunkte auf 25,1 Prozent (Abb. 12). Insgesamt sind 32 Prozent der Lärchenflächen deutlich geschädigt (Abb. 13). Dagegen sind 56 Prozent schwach geschädigt und 12 Prozent ungeschädigt.

Die sommergrüne Lichtbaumart kommt von Natur aus hauptsächlich in höheren Lagen der Mittelgebirge und Alpen vor und ist daher schlecht an warm-trockene Standorte angepasst. Längere Hitze- und Dürrephasen während des Sommers führen oftmals zu schlecht ausgebildeten Baumkronen. Zunächst werden einzelne Knospen nicht zum Austrieb gebracht und im späteren Verlauf sterben ganze Äste bzw. Kronenpartien ab. In den letzten Jahren sind geschwächte Lärchen zudem vermehrt dem Lärchenborkenkäfer (*Ips cembrae*) zum Opfer gefallen.

## Douglasie

Nachdem sich der Kronenzustand der Douglasie im letzten Jahr deutlich verbessert hatte, ist in diesem Jahr wieder eine Verschlechterung erkennbar. Der mittlere Nadelverlust erhöht sich

um 1,2 Prozentpunkte auf 21,6 Prozent (Abb. 12). Im Vergleich zu den anderen Nadelbaumarten ist der Anteil an deutlich geschädigter Waldfläche bei der Douglasie mit 26 Prozent vergleichsweise gering (Abb. 13), was auf das deutlich niedrigere Baumalter der Douglasien in den Wäldern Baden-Württembergs zurückzuführen ist. 50 Prozent der Douglasienflächen sind als schwach geschädigt eingestuft, 24 Prozent als ungeschädigt.

An zahlreichen, vor allem jungen Douglasien in offenen Lagen wurde dieses Jahr eine auffällige Nadelröte beobachtet, die nahezu in allen Landesteilen und Höhenlagen auftrat (Abb. 15). Im weiteren Schadensverlauf starben betroffene Jungpflanzen häufig ab. Als Ursache ließ sich eine physiologische Nadelrötung durch Frosttrocknis ermitteln, die im Frühjahr bei ungünstigen Witterungsabfolgen, wie sie im März 2022 herrschten, auftreten kann. Dabei beginnen die jungen Bäume bei warmer, sonniger Witterung mit erhöhter Transpiration, ohne dass dabei eine Wasseraufnahme aufgrund des noch gefrorenen Bodens stattfinden kann. Trotz ausreichender Bodenwasserreserven gerieten die Bäume in diesem Frühjahr dadurch oft unter erheblichen Trockenstress. Zudem wurde aufgrund erhöhter Sonneneinstrahlung in strahlungsexponierten Kronenbereichen die kritische Frosttoleranz oft herabgesetzt, sodass es durch direkte Kälteeinwirkung dort an Nadeln und Trieben auch zu akuten Frostschäden kam (FVA, 2022).



**Abb. 15:** Physiologische Nadelrötung durch Frosttrocknis an Douglasien (Foto: J. Grüner).

## Buche

Der Kronenzustand der Buche hat sich gegenüber dem Vorjahr leicht verschlechtert. Der mittlere Blattverlust erhöht sich um 0,7 Prozentpunkte auf 32,1 Prozent (Abb. 18). Insgesamt sind 58 Prozent der Buchenflächen in Baden-Württemberg deutlich geschädigt (Abb. 13). Der Anteil an stark geschädigten Bäumen ist dabei mit sieben Prozent im Vergleich zu anderen Laubbaumarten wie Eiche oder Bergahorn vergleichsweise hoch. 33 Prozent sind als schwach geschädigt klassifiziert und lediglich neun Prozent der Buchenwälder als ungeschädigt.

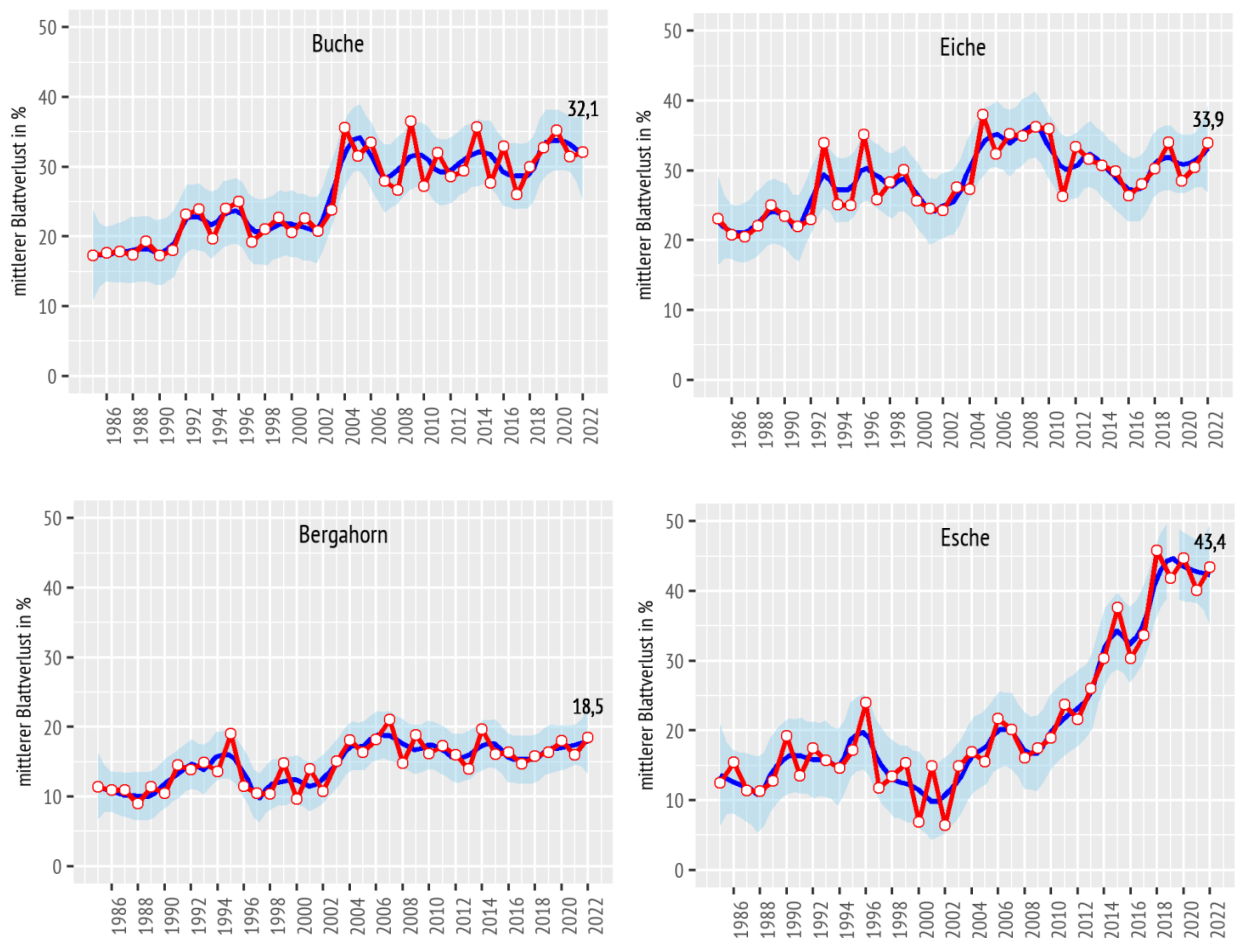
Die Auswirkungen der zunehmenden Hitze- und Dürreperioden der letzten Jahre sind auch im Kronenzustand der am häufigsten vorkommenden Laubbaumart in Baden-Württemberg vielerorts sichtbar. Infolge der extremen Trockenjahre sind seit 2018 besonders auf warm-trockenen Standorten vermehrt Buchen mit absterbender Oberkrone zu beobachten (Abb. 17). Der erhöhte Totastanteil ist oftmals eine Eintrittspforte für holzersetzende Pilzarten, wodurch in stark geschädigten Buchenwäldern sowohl für Waldbesuchende als auch für Beschäftigte noch immer eine erhöhte Gefahr durch herunterbrechende Äste besteht.



**Abb. 16:** Trocknisschäden an jungen Buchen (Foto: S. Meining).



**Abb. 17:** Stark geschädigte Buchen mit deutlichen Trockenästen in der Oberkrone (Foto: S. Meining).



**Abb. 18:** Mittlerer Blattverlust der Baumarten Buche, Eiche, Bergahorn und Esche (rote Linie). Die blaue Linie gibt das geglättete Mittel, die hellblaue Fläche den Vertrauensbereich von 95 Prozent an.

In diesem Sommer wurden an zahlreichen Buchen auch weitere typische Trockenstresssymptome festgestellt. Hierzu zählen insbesondere das Zusammenklappen der Lichtblätter in der Kronenperipherie, der Abwurf grüner Blätter sowie eine vorzeitige herbstliche Blattverfärbung bereits im Hochsommer. Damit ist zu befürchten, dass die betroffenen Bäume noch einmal deutlich an Vitalität verloren haben. Zusätzlich war nicht selten bei stark freigestellten Buchen ein Aufplatzen der Rinde durch extreme Sonneneinstrahlung zu beobachten. Zudem wurde im Verlauf des Spätsommers örtlich starker Befall durch den rindenbrütenden Kleinen Buchenborkenkäfer (*Taphrorychus bicolor*) und den Buchenprachtkäfer (*Agrilus viridis*) festgestellt. Schadensmindernd wirkte sich in diesem Jahr die vergleichsweise geringe Ausbildung von Bucheckern aus, so dass für die Mehrzahl der Buchen keine physiologische Belastung durch eine stärkere Fruktifikation bestand.

Durch die Austrocknung des Oberbodens und die vergleichsweise geringe Durchwurzelungstiefe wiesen junge Buchen im Sommer regional auffällige Trocknisschäden wie Blattwelke und Triebsterben auf (Abb. 16). Besonders betroffen waren trockene Standorte der Oberrheinebene und des Neckarlandes. Zudem wurden dieses Jahr bei der Waldzustandserhebung vor allem in frostgefährdeten Muldenlagen häufiger Spätfrostschäden an jungen Buchen festgestellt.

## Eiche

Der mittlere Blattverlust der Eichen erhöht sich aktuell stark um 3,5 Prozentpunkte auf 33,9 Prozent (Abb. 18). Damit verschlechtert sich der Kronenzustand der Eichen im zweiten Jahr in Folge. Insgesamt gelten 71 Prozent der Eichenfläche in Baden-Württemberg als deutlich geschädigt – so viel wie bei keiner anderen Baumart (Abb. 13). 23 Prozent sind schwach geschädigt und lediglich sechs Prozent der Eichenflächen gelten als ungeschädigt.

Die Eiche, die bei der Waldzustandserhebung als gemeinsame Gruppe von Stiel- und Traubeneiche zusammengefasst wird, gilt aufgrund ihres sehr tiefreichenden Wurzelsystems als eher trockenheitstolerante Baumart. Die letzten Jahre haben gezeigt, dass sich langanhaltende Trockenperioden nicht nur auf die Traubeneiche, die bevorzugt auf wärmeren Lagen des Hügellandes vorkommt, belastend auf den Kronenzustand auswirken können. Auch die Stieleiche, die häufig auf frischen und nährstoffreichen Auenstandorten zu finden ist, gerät zunehmend unter Trockenstress, da sie aufgrund stark gesunkener Grund-

wasserspiegel schlechter tieferliegende Wasserreserven erschließen kann.

Neben den Belastungen durch Trockenheit und Hitze werden Eichenbestände regelmäßig durch verschiedene blattfressende Schadinsekten geschädigt (Abb. 19). Auch im Jahr 2022 traten regional verschiedene Schmetterlingsraupen, vor allem des Kleinen Frostspanners, des Eichenwicklers und des Schwammspinners, auf und sorgten bei knapp 20 Prozent der untersuchten Eichen für sichtbaren Blattfraß. In vielen Eichenbeständen wurden in diesem Jahr zudem wiederholt Raupen des Eichenprozessionsspinners festgestellt, deren Brennhaare allergische Reaktionen auslösen können.

Wie bereits in den Jahren 2018 und 2020 wiesen einige Eichen in diesem Jahr erneut eine erhöhte Fruktifikationsrate auf. Eine in kurzen Abständen wiederholte starke Fruktifikation kann bei der Eiche zu einer Vitalitätsschwäche führen. In diesem Jahr wurde eine auffallend schnelle Fruchtentwicklung beobachtet, wobei es vielerorts bereits ab Mitte Juli zu einem frühen Abwurf der Eicheln kam.



**Abb. 19:** Eiche mit erheblichem Blattfraß in der Oberkrone (Foto: M. Burger).

### Regulierung des Eichenprozessionsspinners im Raum Langenau

Die Region um Langenau, nordöstlich von Ulm, stellte in den letzten Jahren einen Befallsschwerpunkt des Eichenprozessionsspinners in Baden-Württemberg dar. Infolge mehrjährigen Kahlfraßes der Blätter durch Raupen dieses Nachtfalters kam es hier zu einer akuten Schädigung und zu einem verstärkten Absterben der Eichen. Gleichzeitig stieg die Gefährdung der Waldbesuchenden und im Wald beschäftigten Personen durch die allergenwirkenden Brennhaare der Raupen des Eichenprozessionsspinners stark an. Um die Eichenbestände und die damit assoziierten Tier- und Pflanzenarten zu schützen, wurde deshalb ein Pflanzenschutzmitteleinsatz in Erwägung gezogen. Mithilfe von Nesterzählungen wurde der Befallsdruck prognostiziert und zudem die Vitalität der Eichen bestimmt, um die Notwendigkeit individuell für jeden betroffenen Waldbestand beurteilen zu können. Die Waldbesitzenden (Staats- und Kommunalwald) haben sich auf Grundlage der daraus resultierenden Risikoeinschätzung zur Hubschrauberbehandlung auf rund 168 Hektar entschieden. Die Applikation des Pflanzenschutzmittels fand Mitte Mai 2022 statt. Anschließend wurden noch rund 31 Hektar, überwiegend entlang der Autobahn A7 und des betroffenen Autobahnrastplatzes, mit einem Biozid befliegen, um in stark frequentierten Bereichen die für Mensch und Tier gegebene Gesundheitsgefährdung durch die Brennhaare des Eichenprozessionsspinners künftig zu reduzieren. Die im Zuge der Regulierung durchgeführte Erfolgskontrolle (Kotfallanalysen und Fraßbonituren) belegte die Wirksamkeit dieser Maßnahme.

### Bergahorn

Wie bei allen anderen Baumarten hat sich auch der Kronenzustand des Bergahorns gegenüber dem Vorjahr verschlechtert, er liegt aber weiterhin auf einem geringen Schadniveau. Der mittlere Blattverlust erhöht sich um 2,1 Prozentpunkte auf 18,5 Prozent (Abb. 18). Insgesamt werden lediglich 14 Prozent der Bergahornfläche in Baden-Württemberg als deutlich geschädigt eingestuft (Abb. 13). 60 Prozent sind schwach geschädigt und 26 Prozent ungeschädigt.

Der geringe Schädigungsgrad des Bergahorns gegenüber anderen Laubbaumarten ist auf das niedrige Durchschnittsalter der Probestämme zurückzuführen. Im jungen Alter ist der Bergahorn vergleichsweise schnellwüchsig und konkurrenzstark, wird aber häufig ab einem Alter zwischen 30 bis 40 Jahren von anderen Baumarten überwachsen. In Altbeständen bildet er als typische Baumart des Bergmischwaldes zusammen mit zahlreichen anderen Baumarten wie z. B. Buche, Tanne, Fichte und Lärche ökologisch wertvolle Bestände der mittleren und höheren Lagen.

Nach den außerordentlich hohen Belastungen der Trockenjahre 2018 bis 2020 trat in diesem Jahr die Ahorn-Rußrindenkrankheit verstärkt in Erscheinung. Dabei handelt es sich um einen aus Nordamerika stammenden pilzlichen Erreger, *Cryptostroma corticale*, der als Sekundärpathogen vorwiegend an geschwächten Bäumen auftritt und diese zum Absterben bringt.

### Esche

Der Kronenzustand der Eschen ist seit Jahren durch das Eschentriebsterben stark belastet. In diesem Jahr erhöht sich der mittlere Blattverlust merklich um 3,3 Prozentpunkte auf 43,4 Prozent (Abb. 18). Insgesamt sind 63 Prozent der Eschenflächen des Landes deutlich geschädigt (Abb. 13). Allein 14 Prozent sind stark geschädigt und 12 Prozent stehend abgestorben. Nur etwa ein Viertel der Eschenflächen (26 Prozent) werden als schwach geschädigt und nur 11 Prozent als ungeschädigt eingestuft.

Infolge der sehr heißen und trockenen Witterung 2018 bis 2020 war die Verbreitung des pilzlichen Erregers des Eschentriebsterbens merklich gedrosselt, wenngleich die Symptome der Erkrankung an befallenen Bäumen weiterhin sichtbar blieben. Durch das feuchtere Jahr 2021 haben die Neuinfektionen der Eschen wieder zugenommen, so dass das Triebsterben weiter fortschreitet. Die Sporen des pilzlichen Erregers Falsches Weißes Stängelbecherchen (*Hymenoscyphus fraxineus*) gelangen über die Blätter in den Baum und schädigen dort die verholzten Triebe. Zusätzlich können sich nekrotische Stellen am Stammfuß der Eschen bilden, die zu einer akuten Bruchgefahr der Bäume führen. Die Mortalitätsrate der Eschen ist seit mehr als zehn Jahren sehr hoch, so dass der Eschenanteil in den Wäldern Baden-Württembergs bereits stark abgenommen hat.

## 2 STOFFEINTRÄGE UND BODENVERSAUERUNG

Wälder leisten einen wichtigen Beitrag zur Luftreinhaltung, indem sie mit der hohen spezifischen Oberfläche ihres Kronendaches ein Vielfaches mehr an Schadstoffen und Feinstäuben aus der Luft filtern, als dies andere Landnutzungsformen wie z. B. Felder oder Wiesen vermögen. Aufgrund ihrer Filterfunktion sind Wälder durch Luftverunreinigungen aber auch besonders stark belastet und können bei anhaltendem Schadstoffeintrag dauerhaft geschädigt werden.

Bereits zu Beginn der Industrialisierung wurden Schäden an Waldbäumen in unmittelbarer Nähe von Industrieanlagen beobachtet. Seit den 1970er Jahren weiteten sich die Waldschäden in ganz Europa aus. Diese „neuartigen Waldschäden“ traten nun aufgrund einer weitreichenden Verbreitung von Luftschadstoffen auch in sogenannten Reinluftgebieten wie beispielsweise dem Schwarzwald auf. Durch den Einbau von Filteranlagen in der Großindustrie, die Einführung des Katalysators, den schrittweisen Einsatz effizienterer Heiz- und Rauchgastechnik, die Vermeidung schwefelhaltiger Brennstoffe sowie weitere technische Maßnahmen wurde in den letzten 40 bis 50

Jahren eine deutliche Abnahme der Emissionswerte erreicht. Die Schadstoffeinträge in die Wälder, insbesondere die versauernden Schwefeleinträge, gingen infolgedessen kontinuierlich zurück.

Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung zeigen jedoch auf, dass viele Waldböden in Baden-Württemberg durch die jahrzehntelang eingetragenen Schadstoffe beeinträchtigt und weiterhin über ihr natürliches Maß hinaus versauert sind. Zudem tragen hohe Stickstoffeinträge in vielen Regionen Baden-Württembergs auch aktuell zu einer fortschreitenden Versauerung der Waldböden bei (HARTMANN et al., 2016). Um die Regeneration der Waldböden zu unterstützen, werden in Baden-Württemberg regenerationsorientierte Bodenschutzkalkungen durchgeführt, welche den aktuellen Säureeintrag kompensieren und das durch die Versauerung entstandene Basendefizit im Boden ausgleichen sollen (PUHLMANN et al., 2021). Mit Hilfe der Bodenschutzkalkungen werden die Filter- und Puffereigenschaften der Waldböden auf anthropogen versauerten Standorten verbessert und gleichzeitig die Nähr-



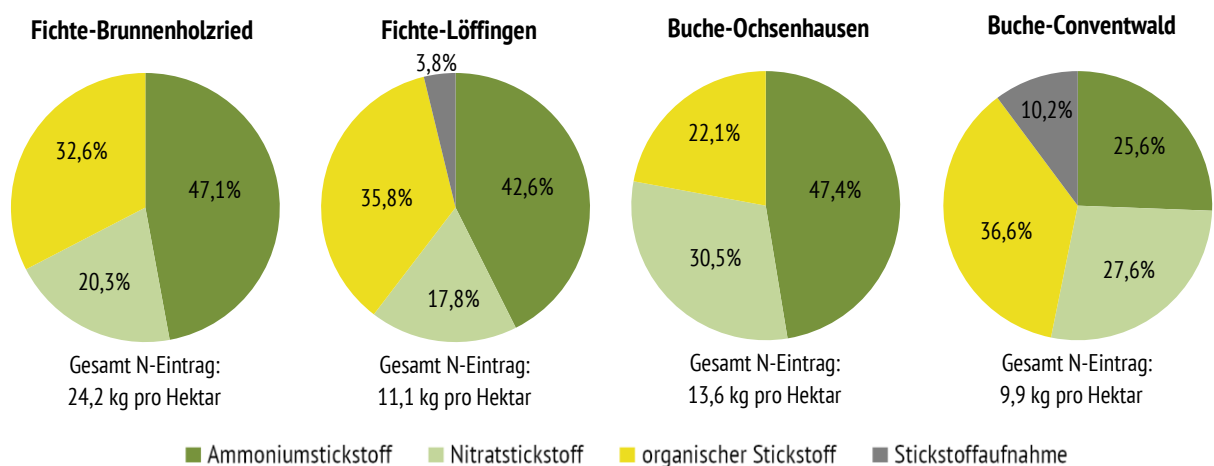
**Abb. 20:** Messung des Bestandesniederschlags auf der Douglasien-Versuchsfläche in Hockenheim (Foto: S. Meining).

stoffversorgung der Waldbäume und die Lebensbedingungen für die Bodenfauna positiv beeinflusst. Durch das sehr aufwendige, kleinstandörtlich differenzierte Verfahren wird sichergestellt, dass nur kalkungswürdige Standorte in eine Kalkungsmaßnahme einbezogen werden und beispielsweise Moorflächen, Trockenrasen oder kalkungssensible Waldbiotope von vornherein von der Kalkung ausgeschlossen bleiben.

Neben der Kalkung sind weitere boden- und nährstoffschonende Maßnahmen erforderlich, um die Funktionsfähigkeit der Waldböden wiederherzustellen bzw. zu erhalten. So wird die Humus- und Bodenentwicklung durch eine naturnahe Bewirtschaftung der Wälder mit einer Förderung standortgerechter Mischwälder langfristig verbessert. Dabei steht vor allem der weitere Umbau strukturarmer und nicht standortgerechter Fichtenbestände im Fokus, deren Nadelstreu langfristig zu einer zusätzlichen Versauerung und Nährstoffverarmung der Waldböden beiträgt. Zudem ist auch bei der Holzernte ein nachhaltiges Vorgehen im Hinblick auf den Nährstoffentzug zu beachten. Mit jeder Entnahme von Biomasse werden darin gebundene Nährstoffe dem Wald entzogen. Besonders auf ärmeren Standorten, die – natürlicherweise oder versauerungsbedingt – geringe Nährstoffvorräte im Boden aufweisen, kann ein fortwährender Nährstoffentzug durch regelmäßige Holznutzung langfristig zu einem Mangel an wichtigen Nährelementen wie Magnesium, Calcium oder Kalium führen. Die Intensität der Holzentnahme sollte daher immer auch an die Standorteigenschaften der Waldböden angepasst werden. Grundsätzlich sollte möglichst viel Kronenmaterial und Rinde im Bestand belassen werden, da darin im Vergleich zum Stammholz überproportional viele Nährstoffe enthalten sind (FVA, 2018).

## Entwicklung der Stickstoffeinträge

Langjährig erhöhte Stickstoffeinträge wirken sich auf viele Prozesse im Ökosystem Wald negativ aus. Auch die Vitalität der Waldbäume kann davon beeinträchtigt werden. Während ein höheres Stickstoffangebot in der Regel zunächst wachstumsstimulierend wirkt, beeinflusst es langfristig unter anderem die Resistenz der Waldbäume gegenüber Trockenis und Frost negativ. Auch die Mykorrhizierung der Baumwurzeln und damit deren Möglichkeit, Nährstoffe aus der Bodenlösung aufzunehmen, wird bei zu hohen Stickstoffgehalten der Böden geschädigt. Um die langfristige Entwicklung der Stickstoffeinträge und die damit verbundenen Risiken für die Wälder zu beobachten, werden in Baden-Württemberg in 19 verschiedenen Fichten-, Douglasien- und Buchenbeständen die Stoffeinträge mit dem Niederschlag untersucht (Abb. 20). Die Ergebnisse des Jahres 2021 zeigen, dass in vielen Teilen des Landes die Stickstoffeinträge weiterhin über der ökologischen Belastungsgrenze der Wälder liegen. Auf der Fichtenversuchsfläche in Brunnenholzried/Oberschwaben wurden die höchsten Eintragswerte mit 24,2 kg pro Hektar gemessen (Abb. 21). Dagegen finden sich auf der im Windschatten des Schwarzwalds gelegenen Versuchsfläche Löffingen/Baar mit 11,1 kg pro Hektar die geringsten Eintragswerte unter Fichte. Im Vergleich zu den Fichten- und Douglasienflächen ist der Stickstoffeintrag in den Buchenbeständen aufgrund der geringeren Filterwirkung der Baumkronen, vor allem im laubfreien Winterzustand, geringer. Die Stickstoffeinträge auf den Buchenversuchsflächen bewegen sich für das Jahr 2021 zwischen 9,9 kg pro Hektar (Versuchsfläche Conventwald/Südschwarzwald) und 13,6 kg pro Hektar (Ochsenhausen/Oberschwaben). Auf den Flächen des intensiven



**Abb. 21:** Stickstoffeinträge der Fichtenversuchsflächen Brunnenholzried und Löffingen sowie der Buchenversuchsflächen Ochsenhausen und Conventwald (von links nach rechts) im Jahr 2021. Dargestellt sind der Gesamtstickstoffeintrag in kg pro Hektar sowie der Anteil der einzelnen Stickstoffkomponenten in Prozent.

Ökosystemmonitorings, an denen der Stickstoffeintrag vergleichend in Fichten- und in Buchenbeständen gemessen wird, sind die Eintragswerte auf den Buchenflächen im Durchschnitt um den Faktor 0,7 kleiner als auf den Fichtenflächen.

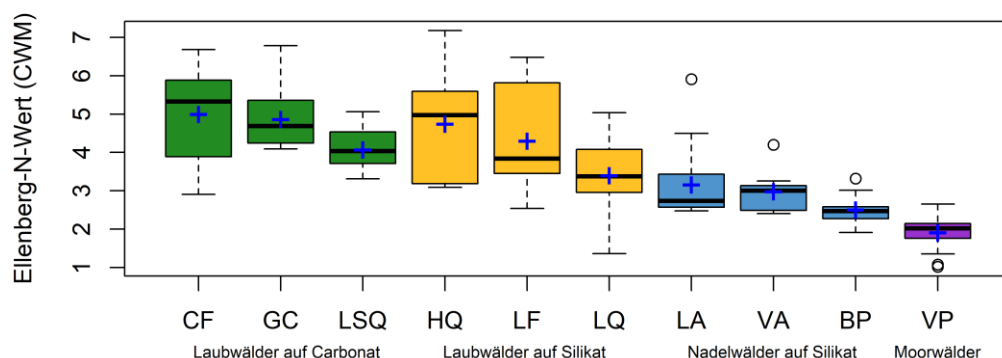
Die Gesamtstickstoffeinträge mit dem Niederschlag setzen sich aus den beiden anorganischen Komponenten Nitrat und Ammonium sowie gelöstem organischen Stickstoff zusammen. Neben dem Eintrag mit dem Niederschlag gelangt auch Stickstoff in die Waldökosysteme, der von den Bäumen über die Nadeln bzw. Blätter direkt aus der Luft aufgenommen wird. In dichten oder starkkronigen Beständen kann dieser Eintragspfad über ein Viertel des gesamten Stickstoffeintrags in den Wald ausmachen („Stickstoffaufnahme“ in Abb. 21).

Der Stickstoffeintrag weist zwischen den verschiedenen Regionen Badens-Württembergs teils deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung auf (Abb. 21). In stark landwirtschaftlich geprägten Gegenden überwiegt meist der Ammoniumanteil, der überwiegend aus intensiver Tierhaltung und Düngung in die Luft gelangt. Mit über 45 Prozent ist der Ammoniumanteil auf den stark belasteten Versuchsflächen in Oberschwaben (Brunnenholzried, Ochsenhausen) besonders hoch. Dagegen ist in urbanen Regionen und auf exponierten Lagen der Eintrag von Stickoxiden aus Verkehrs- bzw. Industrieabgasen meist erhöht, was sich in hohen Nitratanteilen im Bestandesniederschlag widerspiegelt (z. B. Versuchsfläche Conventwald/Südschwarzwald).

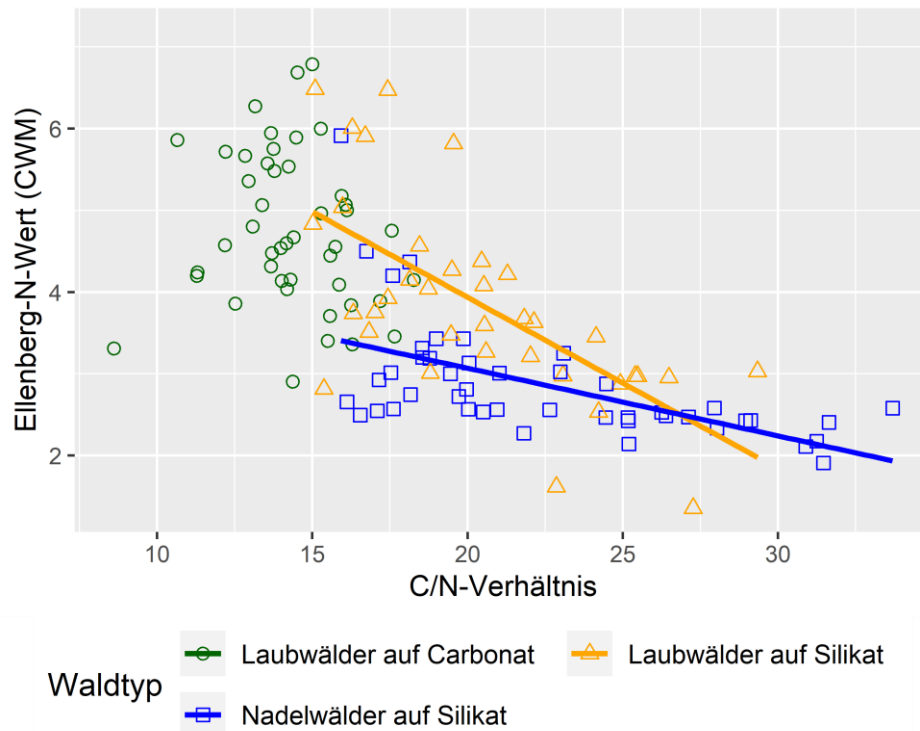
## Erhöhte Stickstoffversorgung verändert die Waldvegetation

Über die Atmosphäre eingetragene Stickstoffverbindungen können die Nährstoffzusammensetzung im Waldboden verändern und die Stickstoffverfügbarkeit für Pflanzen verbessern. Erhöhte Stickstoffeinträge führen deshalb langfristig zu einer Eutrophierung der Waldvegetation, wobei Waldgesellschaften, welche auf natürlich nährstoffarmen Böden vorkommen, besonders empfindlich reagieren (Abb. 24). In diesen Waldgesellschaften kommen vermehrt oligotrophe (d. h. an Nährstoffarmut angepasste) Pflanzenarten wie die Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*) oder das Heidekraut (*Calluna vulgaris*) vor, die bei zunehmender Stickstoffverfügbarkeit verdrängt werden.

Das hohe Vorkommen an oligotrophen Arten spiegelt sich in den sogenannten Ellenberg-N-Zeigerwerten der entsprechenden Waldgesellschaften wider (Abb. 22). Niedrige Ellenberg-N-Zeigerwerte belegen, dass eine bestimmte Waldgesellschaft an eine geringe Nährstoffverfügbarkeit angepasst ist. So zeigen sowohl Moorbücher als auch Nadelwälder auf saurem Boden wie beispielsweise der Geißelmoos-Fichten-Wald die geringsten Ellenberg-N-Zeigerwerte und somit ein hohes Vorkommen an oligotrophen Pflanzenarten. Dagegen finden sich in Laubwäldern auf Kalkstandorten wie beispielsweise dem Seggen-Buchen-Wald höhere Zeigerwerte.



**Abb. 22:** Boxplot der nach Deckungsgrad gewichteten Ellenberg-N-Zeigerwerte zehn oligo-mesotropher Waldgesellschaften in Baden-Württemberg. CF: Seggen-Buchen-Wald, GC: Waldlabkraut-Hainbuchen-Traubeneichen-Wald, LSQ: Steinsamen-Eichen-Wald, HQ: Traubeneichen-Buchen-Wald, LF: Hainsimsen-Buchen-Wald, LQ: Hainsimsen-Traubeneichen-Wald, LA: Hainsimsen-Fichten-Tannen-Wald, VA: Beerstrauch-Tannen-Wald, BP: Geißelmoos-Fichten-Wald, VP: Rauschbeeren-Fichten-/Kiefern-Moorwald. Das blaue Kreuz entspricht dem Mittelwert.



**Abb. 23:** Zusammenhang zwischen dem C/N-Verhältnis im Oberboden (0-10 cm) und dem nach Deckungsgrad gewichteten Ellenberg-N-Weizerwert der Kraut-, Moos- und Strauchschicht in drei verschiedenen Waldtypen. Bei signifikanten Zusammenhängen ( $p \leq 0,05$ ) wurde eine Regressionsgerade eingezeichnet.

Die Ellenberg-N-Weizerwerte bewerten die Standortpräferenzen einzelner Pflanzenarten auf einer Ordinalskala von 1 bis 9 auf der Grundlage von Experteneinschätzungen (ELLENBERG et al., 2001). Ellenberg-N-Weizerwerte beziehen sich auf den Nährstoffbedarf einer Pflanzenart unter Berücksichtigung ihrer ökologischen Nische. Hierbei charakterisiert der Wert 1 die stickstoffempfindlichsten Arten und der Wert 9 die Pflanzenarten mit einer Vorliebe für stark stickstoffangereicherte Lebensräume.

Eine Erhöhung der Stickstoffverfügbarkeit im Waldboden führt dazu, dass auch nährstoffliebende Pflanzen günstige Wachstumsbedingungen vorfinden. Typische Vertreter von stickstoffanzeigenden Pflanzenarten sind z. B. die Brennnessel (*Urtica dioica*) oder der Ruprechts-Storchenschnabel (*Geranium robertianum*). Da nährstoffliebende Pflanzenarten meist konkurrenzstärker sind als oligotrophe Arten, kommt es zu einer Verschiebung des Artenspektrums und zu einer Verdrängung der oftmals gefährdeten, charakteristischen Arten nährstoffarmer Wälder.

Deutlich sichtbar wird dies in den engen Zusammenhängen der mittleren Ellenberg-N-Weizerwerte mit dem C/N-Verhältnis des Oberbodens, das als zuverlässiger Indikator für die Stickstoffversorgung im Boden gilt. Für Nadel- und Laubwälder auf Silikatböden kann gezeigt werden, dass ein Anstieg der Stickstoffversorgung im Oberboden eine Erhöhung der Ellenberg-N-Weizerwerte zur Folge hat und sich die Artenzusammensetzung der betroffenen Wälder in Richtung nährstoffliebender Pflanzengesellschaften verschiebt (Abb. 23).

Die FVA untersucht in dem Projekt „Validierung kritischer Stickstoffeintragsraten für stickstoffsensitive Waldgesellschaften“ Zusammenhänge zwischen der Stickstoffdeposition, dem Stickstoffgehalt im Boden und Veränderungen in der Waldbodenvegetation potenziell eutrophierungsempfindlicher Wälder. Grundlage ist die zeitgleiche empirische Erhebung von Vegetations- und Bodendaten in insgesamt zehn an Nährstoffarmut angepassten Waldgesellschaften. Das Projekt verfolgt das Ziel, neue Erkenntnisse über die standortsabhängige Reaktion der bisher wenig untersuchten Wälder auf Stickstoffeinträge zu gewinnen und so potentielle Auswirkungen besser abschätzen zu können.



**Abb. 24:** Beispiele von eutrophierungsempfindlichen Waldgesellschaften und ihren Arten: a) Geißelmoos-Fichten-Wald mit typischer oligotropher Artenzusammensetzung, b) Dreilappiges Geißelmoos (*Bazzania trilobata*), c) oligotropher Hainsimsen-Traubeneichen-Wald mit Heidelbeere und Heidekraut, d) Auftreten der Brennnessel als Eutrophierungszeiger zwischen Heidelbeere (Fotos: M. Roth).

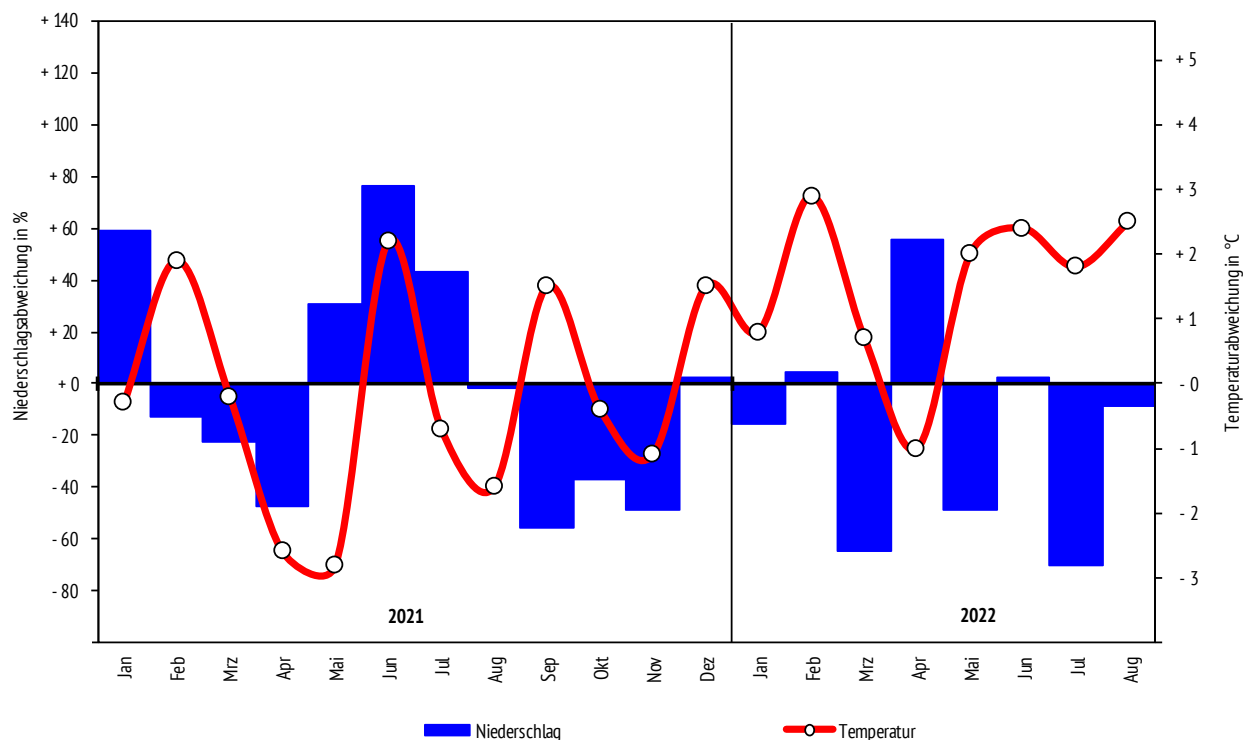
### 3 WITTERUNG

Nachdem das Jahr 2021 von einer phasenweise sehr feuchten und eher kühlen Witterung geprägt war, schließt das Jahr 2022 an die trocken-warmen Jahre 2018 bis 2020 an. Langanhaltende Hitze- und Trockenperioden führten im Verlauf der Sommermonate erneut zu einer außergewöhnlichen Belastung der Wälder. Der Sommer 2022 war mit durchschnittlich 20,1 Grad Celsius der Zweitwärmste in Baden-Württemberg seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881 und wurde nur vom Hitzesommer 2003 übertroffen (DWD, 2022).

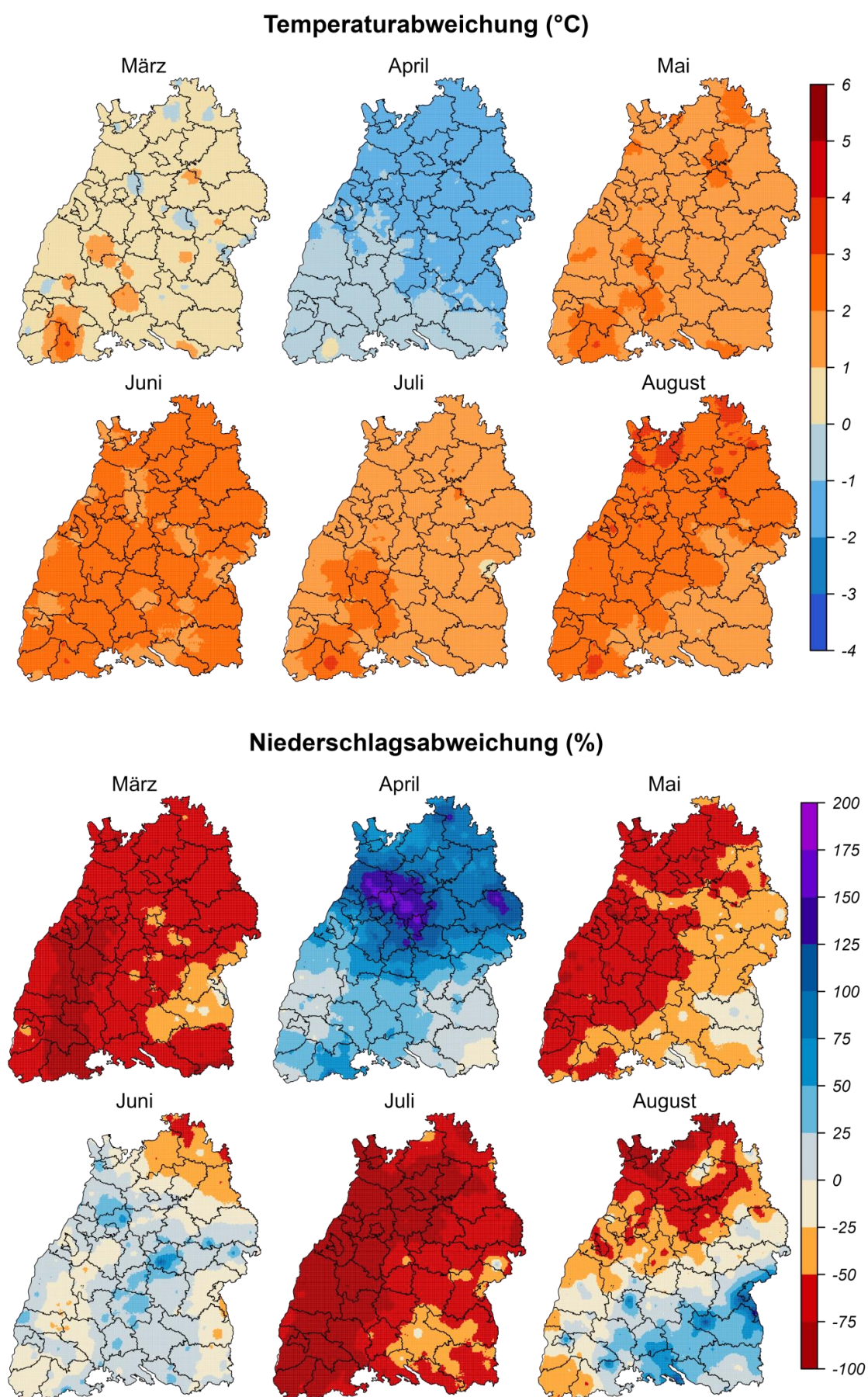
Viele Flüsse und Bäche fielen im Verlauf des Sommers trocken oder hatten mit extremen Niedrigwasserständen zu kämpfen. Zudem sank vielerorts der Grundwasserspiegel deutlich unter das übliche Niveau, auch weil sich die Bodenwasservorräte nach den Trockenjahren 2018 bis 2020 noch nicht überall vollständig erholt hatten. In Normaljahren füllen sich die Bodenwasserspeicher im Winter auf und bilden somit einen Puffer für mögliche Trockenphasen im Sommer. Im Winter 2021/22 fand jedoch nur eine unzureichende Auffüllung des Bodenwassers statt. Da zudem das Frühjahr phasenweise sehr trocken ausfiel und bereits ab Mai sommerliche Temperaturen vorherrschten, gerieten die Wälder Baden-Württembergs dieses Jahr wiederholt unter starken Trockenstress.

#### Temperatur und Niederschlag

Nach einem insgesamt sehr trockenen zweiten Halbjahr 2021 startete das Jahr 2022 sonnenreich und ausgesprochen mild. Vor allem im Februar herrschten vielerorts sehr milde, vorfrühlingshafte Temperaturen. Im Monatsmittel lag die Temperaturabweichung um 2,8 Grad Celsius über der Referenzperiode von 1991 bis 2020 (Abb. 25). Auch der März war sehr sonnenreich und gleichzeitig außergewöhnlich niederschlagsarm. Erst im April führten kurze und intensive Regengüsse zu einem deutlichen Anstieg der monatlichen Niederschlagsmenge. Dabei wurden in einigen Regionen des südlichen Neckarlands bis zu 200 Prozent der üblichen monatlichen Niederschlagsmenge erreicht (Abb. 26). Da die Böden derart hohe Wassermassen in so kurzer Zeit nicht vollständig aufnehmen konnten, floss das Wasser zumeist oberirdisch ab, so dass eine nachhaltige Befüllung der leeren Bodenwasserspeicher weitgehend ausblieb. Die kühlen Apriltemperaturen setzten sich auch noch Anfang Mai fort und führten bei oft klarem Himmel und damit verbundener nächtlicher Ausstrahlung mancherorts zu Spätfrostschäden an frisch ausgetriebenen Bäumen. Der Zustrom subtropischer Luftmassen aus Nordafrika sorgte im Mai jedoch relativ schnell für verbreitet sommerliche Temperaturen.



**Abb. 25:** Niederschlags- und Temperaturabweichung vom Mittel der Referenzperiode (1991–2020) für Baden-Württemberg (Daten: Deutscher Wetterdienst, DWD).



**Abb. 26:** Regionale Temperatur- (oben) und Niederschlagsabweichung (unten) der Monate März bis August 2022 vom Mittel der Referenzperiode (1991-2020) in Baden-Württemberg (Daten: Deutscher Wetterdienst, DWD).

Eine besondere Gefahr für die Vitalität der Wälder geht von extremen Witterungsereignissen wie langanhaltenden Trockenperioden, übermäßiger Hitze oder stark ausgeprägtem Spätfrost aus. Zur Charakterisierung der Witterungsbedingungen werden die Abweichungen von Niederschlag und Temperatur zum Mittelwert der Klimareferenzperiode dargestellt. Klimatologische Referenzperioden umfassen in der Regel einen Zeitraum von 30 Jahren. Ab dem Jahr 2021 gilt international die neue Referenzperiode 1991 bis 2020.

In der Gemeinde Ohlsbach, südöstlich von Offenburg, wurde am 20. Mai mit 33,7 Grad Celsius die deutschlandweit höchste Lufttemperatur des Monats gemessen (DWD, 2022). Der Mai war insgesamt auch sehr trocken, wobei im westlichen Teil Baden-Württembergs das Niederschlagsdefizit besonders hoch ausfiel. Der Juni brachte dann verbreitet Niederschlag, zum Teil mit zahlreichen Sommergewittern, die oftmals von Hagel, Sturm und Platzregen begleitet waren. Gleichzeitig waren die Temperaturen wie im gesamten Sommer außergewöhnlich hoch, so dass auch die Verdunstungsrate der Pflanzen stark anstieg. Im Juli gelangten warme Luftmassen dauerhaft in den Südwesten. In der Oberrheinebene gab es bis zu 29 Sommer- und 14 Hitzetage. Mit 25 Litern pro Quadratmeter war die Niederschlagsmenge im Juli sehr gering, verglichen mit dem langjährigen Mittel von 91 Litern pro Quadratmeter (DWD, 2022). Die trocken-heiße Sommerwitterung setzte sich auch im August weiter fort. Zwar verringerte sich das landesweite Niederschlagsdefizit, jedoch profitierten davon hauptsächlich die südlichen Landesteile. Dagegen blieben weite Teile nördlich der Schwäbischen Alb auch im August weiterhin von der ausgedehnten Dürre betroffen. Die Temperatur blieb auch im August landesweit deutlich über dem Mittelwert. Somit waren die Monate Mai bis August im Mittel für Baden-Württemberg durchgehend 1,7 bis 2,4 Grad Celsius wärmer als der jeweilige monatliche Referenzwert.

## Wasserhaushalt im Klimawandel

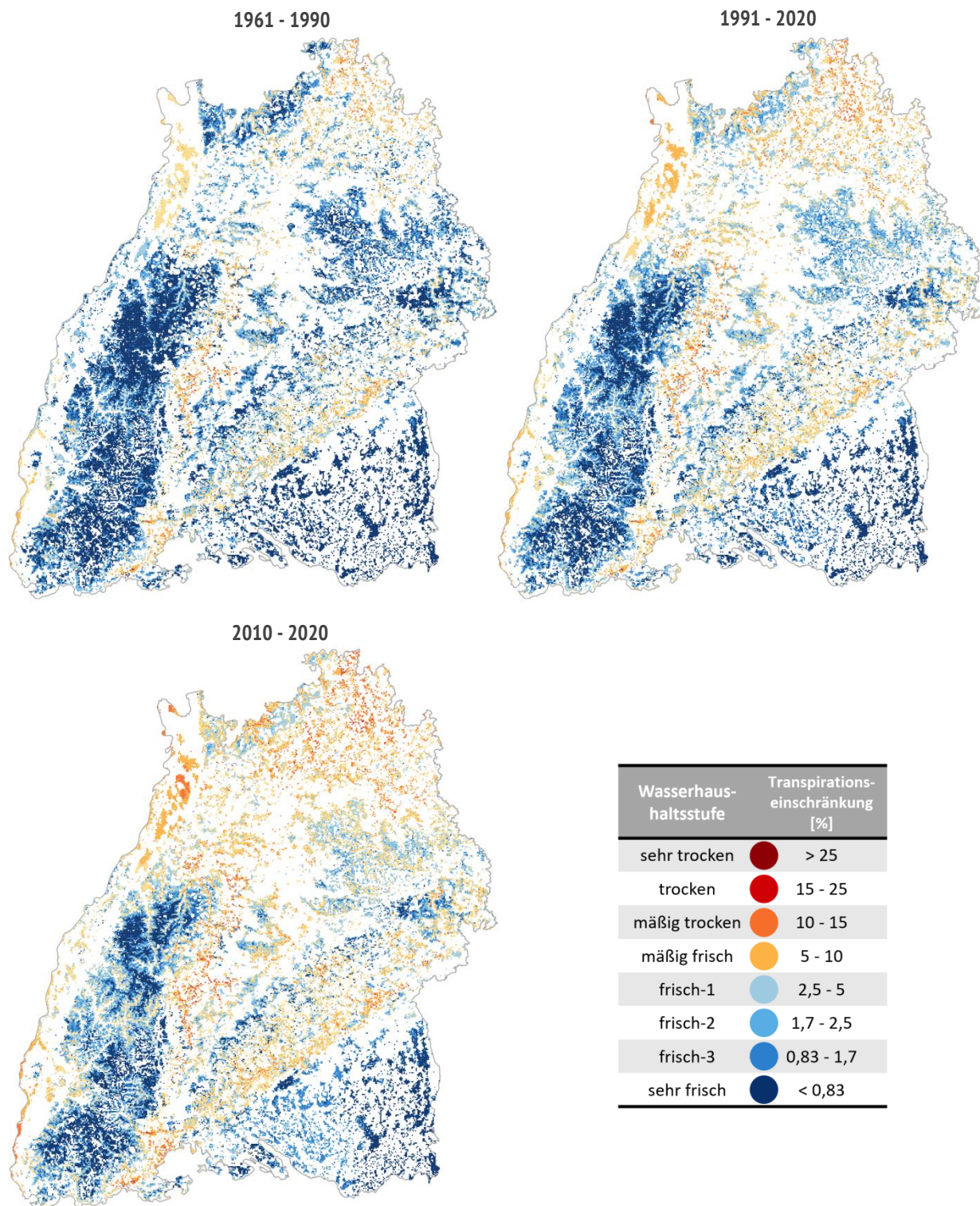
In den vergangenen drei Jahren wurde an der FVA eine Modellumgebung entwickelt, mit der sich die Wasserhaushaltsansprache in der forstlichen Standortkartierung räumlich hochaufgelöst und dynamisch in Bezug auf den Klimawandel abbilden lässt. Basierend auf dem forsthydrologischen Modell LWF-Brook90 ist so eine detaillierte Abschätzung des Standortfaktors Wasserhaushalt auf der gesamten Waldfläche Baden-Württembergs möglich. Regionalisierte Boden- und Klimadaten wurden für die Landesfläche zusammengestellt und bilden mit Reliefparametern die Eingangsdaten der Modellierung. Dabei wurden Sonderstandorte mit Stau- und Grundwassereinfluss sowie reliefbeeinflusste Sonderstandorte, wie Kuppen und Senken, explizit untersucht und abgebildet. Die Einteilung der Wasserhaushaltsstufen erfolgt auf Grundlage der langjährig gemittelten Transpirationseinschränkung über das Verhältnis von aktueller zu potentieller Transpiration.

Dass sich der Wasserhaushalt bereits jetzt klimatisch bedingt als dynamische Größe zeigt, lässt sich schon innerhalb des historischen Klimadatensatzes am Vergleich der beiden Klimanormalperioden 1961 bis 1990 und 1991 bis 2020 ablesen (Abb. 27). Der Trend hin zu trockeneren Standorten ist in den letzten 30 Jahren deutlich erkennbar. Waren für die Fichtenmodelle im Zeitraum 1961 bis 1990 lediglich 4,8 Prozent aller Waldstandorte als mäßig trocken bis sehr trocken klassifiziert, erhöht sich der Anteil für den Zeitraum 1991 bis 2020 auf insgesamt 9,8 Prozent. In den Jahren seit 2010 hat sich dieser Effekt durch die Häufung von Trockenjahren nochmals verschärft, so dass in einzelnen Wuchsbezirken, wie dem Oberrheinischen Tiefland oder dem Neckarland, trockene Standorte mittlerweile flächig auftreten. Im Bezugszeitraum 2010 bis 2020 werden 16,2 Prozent der baden-württembergischen Waldstandorte als mäßig trocken bis sehr trocken eingestuft.

Neben den dominanten klimatischen Faktoren Lufttemperatur und Niederschlagsmenge sind die Geländetopographie (Exposition, Hangneigung) und die bodenphysikalischen Faktoren (Bodenentwicklungstiefe, nutzbare Feldkapazität sowie, in den Extrembereichen, Skelett- und Sandgehalt) die treibenden Einflussgrößen des Wasserhaushalts. Für Baden-Württemberg bedeutet dies besondere waldbauliche Herausforderungen für die Oberrheinebene und die tonigen und flachgründigen Böden der Gäulandschaften, wo sich die signifikanten Einflussfaktoren für die Wasserverfügbarkeit ungünstig kombinieren. In beiden Gebieten, die zudem durch eine eingeschränkte Durchwurzelungsmöglichkeit der Bäume aufgrund von örtlich hohen

Kies- bzw. Skelettgehalten gekennzeichnet sind, nahm in den zurückliegenden Dekaden zum einen die Lufttemperatur stark zu und zum anderen ging die Niederschlagsmenge deutlich

zurück. Handlungsbedarf wegen trockenheitsinduzierter Wasserhaushaltsänderungen zeigt sich jedoch in fast allen Teilen des Landes.



**Abb. 27:** Modellierungsergebnisse der transpirationsbasierten Wasserhaushaltsstufen mit Parametern eines Fichtenoptimalbestandes im 500 m-Raster für die zwei Klimanormalperioden 1961-1990 (oben links) und 1991-2020 (oben rechts) und den Zeitraum 2010-2020 (unten links). Unten rechts: Farblegende mit Klassengrenzen der Wasserhaushaltsstufen.

Neben historischen und aktuellen Klimadaten lassen sich durch die Nutzung von Daten aus Klimaszenarien auch Abschätzungen für die Zukunft ableiten. Um die Vielfalt der verfügbaren Klimamodelle in ein gemeinsames Ergebnis zu überführen, werden Ensemblesimulationen gerechnet. Die für den 5. IPCC-Sachstandsbericht entwickelten RCP-Szenarios, die die unterschiedlichen Ausprägungen des Klimawandels abbilden, treiben Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen an, welche in bestimmten Kombinationen ein Ensemble darstellen.

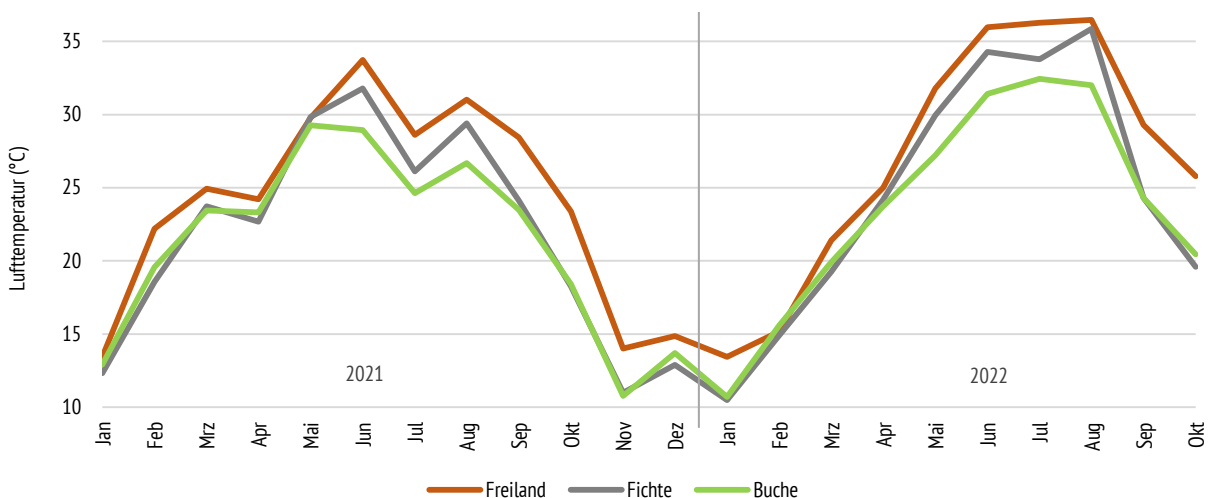
Bisher erfolgte Auswertungen einzelner Klimaszenarien zeigen die Fortführung der in Abbildung 27 erkennbaren Trends, welche in RCP4.5-Szenarien deutlich schwächer ablaufen als unter RCP8.5-Szenarien. Das Trockenheitsrisiko nimmt in der Fläche jedoch in jedem bislang untersuchten Klimaszenario zu. Dass sich die Intensität der erwarteten Verschiebung hin zu trockeneren Wasserhaushaltsklassen je nach genutztem Klimamodell deutlich unterscheidet, unterstreicht die Notwendigkeit ausführlicher Ensemblebetrachtungen, um die Unsicherheit der Ergebnisse in der Zukunft besser abschätzen zu können.

## Waldklima

Im Inneren von Waldbeständen herrscht im Allgemeinen ein besonders angenehmes Klima mit höherer Luftfeuchtigkeit und zumeist milderem Temperaturen als im Offenland. Abbildung 28 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der monatlichen

Maximalwerte der Tagesmitteltemperaturen auf der Versuchsfläche Esslingen für die Jahre 2021 und 2022. Für das Jahr 2022 fallen auch hier die vergleichsweise hohen sommerlichen Lufttemperaturen auf. Zwischen Fichten- und Buchenbestand und der benachbarten Freifläche ergeben sich allerdings Unterschiede im Temperaturniveau. Insbesondere im Buchenbestand liegen die Maximaltemperaturen zum Teil deutlich unter denen der Freilandfläche. Aber auch der Fichtenbestand weist gedämpfte Temperaturmaxima auf. Auf der Freifläche wird in den meisten Monaten die höchste Temperatur gemessen, wobei die Unterschiede zwischen Bestandesinnenklima und Freilandklima in der Vegetationsperiode besonders groß sind. Während sich der Buchen- und der Fichtenbestand im Winter und im zeitigen Frühjahr kaum unterscheiden, ist mit dem Blattaustrieb der Buchen eine deutliche Abmilderung der Höchsttemperaturen zu erkennen. Mit beginnender Laubverfärbung und Laubfall nähern sich die Temperaturverläufe von Buchen- und Fichtenbestand wieder an. In den Sommermonaten ist die Differenz zwischen dem Freiland und dem kühleren Buchenbestand mit über vier Grad Celsius Höchsttemperatur am größten.

Das gezeigte Beispiel belegt die deutliche Abmilderung der Lufttemperatur innerhalb von Waldbeständen. Dabei wirken sich Wälder nicht nur in ihrer unmittelbaren Umgebung positiv auf das Klima aus, sondern sorgen auch für ein angenehmeres Regionalklima, da vorbeiziehende Luftmassen durch die Wälder positiv beeinflusst werden. Auch aufgrund dieser ausgleichenden Wirkung auf die Lufttemperatur und andere klimatische Größen sind Wälder für die menschliche Gesundheit und die Erholung von großer Bedeutung.



**Abb. 28:** Monatliche Maximalwerte der Tagesmitteltemperaturen auf der Versuchsfläche Esslingen für die Jahre 2021 und 2022

## 4 JAHRRINGBILDUNG VERSCHIEDENER WALDBAUMARTEN ENTLANG ÖKOLOGISCHER GRADIENTEN IM SÜDSCHWARZWALD

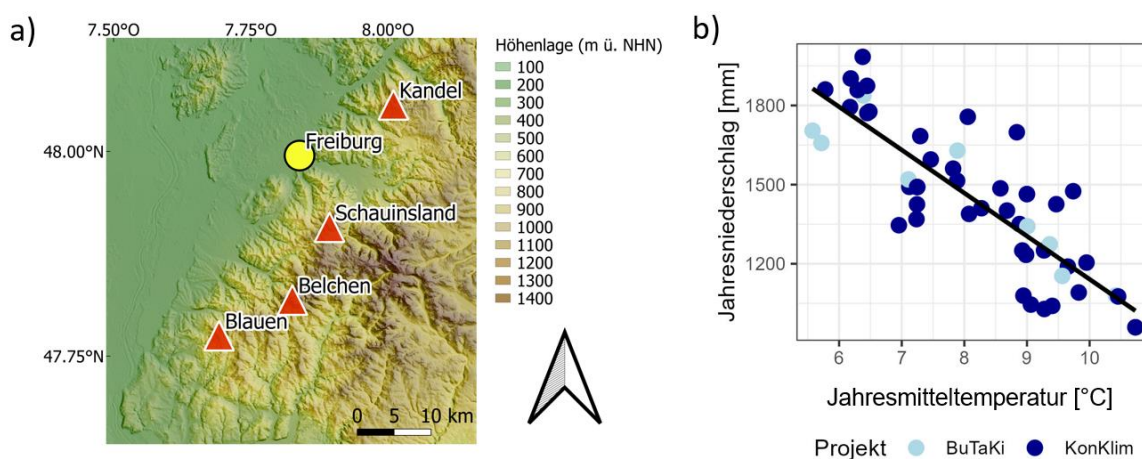
### Bedeutung von Studien zur Jahrringbildung

Phänologischen Beobachtungen wie z.B. zum Beginn der Blühtzeit bzw. des Maitriebs oder zum Zeitpunkt der herbstlichen Blattverfärbung und des Blattfalls von Bäumen kommen im Zusammenhang mit den aktuellen klimatischen Veränderungen und einem besseren Verständnis von deren Auswirkung auf Waldökosysteme eine besondere Aufmerksamkeit zu (MENZEL und FABIAN, 1999). Allerdings ist bekannt, dass die anhand äußerlich erkennbarer Merkmale definierte Vegetationsperiode nicht notwendigerweise mit dem Ablauf des sekundären Dickenwachstums der Bäume vollständig synchronisiert sein muss (PRISLAN et al., 2019). Studien zur Jahrringbildung nutzen speziell entwickelte Feld- und Labormethoden, um feinskalige Prozesse der Bildung von Holzzellen unter dem Mikroskop hochaufgelöst sichtbar zu machen. Somit können detaillierte Informationen über Beginn, Dauer und Ende der Jahrringbildung gewonnen sowie die Rate und Dauer von Zellbildungsprozessen modelliert werden (RATHGEBER et al., 2016). Auf diese Weise können detaillierte Rückschlüsse über die Auswirkungen von Umweltveränderungen und klimatischen Extremereignissen auf die Phänologie des sekundären Dickenwachstums, die Jahrringstruktur und Holzeigenschaften sowie Einblicke in die saisonale Dynamik der Biomasseproduktion und Kohlenstoffspeicherung in Jahrringen gewonnen werden (LARYSCH et al., 2022).

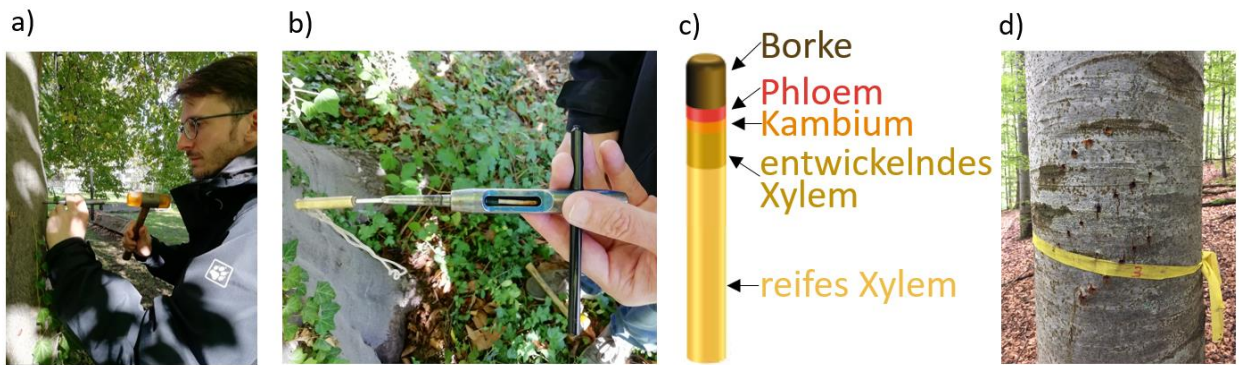
### Monitoring der Jahrringbildung entlang ökologischer Gradienten

Um die Effekte von Witterung und Klima auf die Jahrringbildung quantifizieren zu können, wurden von der Professur für Waldwachstum und Dendroökologie der Universität Freiburg im Rahmen der beiden kürzlich abgeschlossenen Projekte „BuTaKi“ und „KonKlim“ Untersuchungsflächen entlang ausgewählter Höhengradienten im südlichen Schwarzwald eingerichtet. Das von der deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projekt BuTaKi legte bei der Auswahl der untersuchten Baumarten Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.), Weißtanne (*Abies alba* Mill.) und Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.) den Fokus auf Mischbestände mit naturnaher Waldbewirtschaftung. Für die insgesamt 66 Untersuchungsbäume (24 Buchen, 24 Tannen und 18 Kiefern in mittlerem bis starkem Baumholz) wurden jeweils bis zu vier Mischbestände entlang von zwei Höhengradienten an den Bergen Schauinsland und Belchen ausgewählt (Abb. 29a).

Das vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und Bundesministerium für Umwelt (BMUV) geförderte und in Kooperation mit der FVA durchgeführte Waldklimafonds-Projekt KonKlim legte seinen Fokus auf Koniferen in Reinbeständen und wählte als Untersuchungsbaumarten Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), Weißtanne (*Abies alba* Mill.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) aus. Für die insgesamt



**Abb. 29:** a) Geographische Lage der eingerichteten Höhengradienten zur Untersuchung der Jahrringbildung an den Bergen Kandel, Schauinsland, Belchen und Blauen. b) Die ausgewählten Untersuchungsbestände reichen von 440-1240 m ü. NHN (Projekt BuTaKi, FKZ: 20017/501) bzw. 370-1120 m ü. NHN (Projekt KonKlim, FKZ: 22WK4148) und bilden dadurch ökologische Gradienten von trockenwarmen Tieflagen zu kühlfeuchten Hochlagen des südlichen Schwarzwaldes ab. Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlagssumme der Untersuchungsstandorte für den Zeitraum 1991-2020 wurden in einem 250 m x 250 m-Raster modelliert nach DIETRICH et al. (2019).



**Abb. 30:** a) Beispiel der Entnahme eines Mikrokerns an einer Buche mit dem Entnahmegerät „Trephor“. b) Einführung eines dünnen Stäbchens zur Freilegung des Mikrokerns aus dem Schneidkegel des Trephors. c) Schematischer Aufbau eines Mikrokerns mit unterschiedlichen Gewebetypen. d) Benachbarte Entnahmestellen der wöchentlichen Beprobungen am Stamm einer Buche.

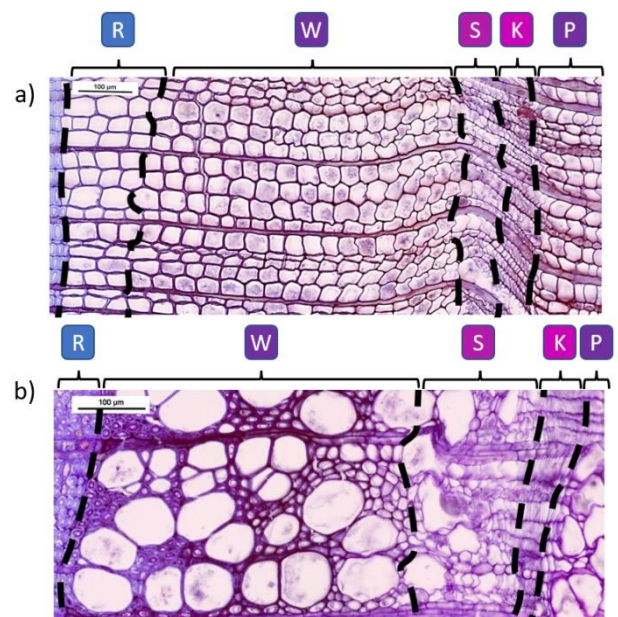
132 Untersuchungsbäume (45 Fichten, 45 Tannen und 42 Douglasien in mittlerem bis starkem Baumholz) wurden pro Baumart jeweils bis zu fünf Reinbestände entlang von drei Höhengradienten an den Bergen Kandel, Schauinsland und Blauen ausgewählt (Abb. 29a). Der Versuchsaufbau beider Projekte hatte dabei das Ziel, große Spannweiten der Jahresmitteltemperatur und des Jahresniederschlags abzudecken und die graduellen klimatischen Veränderungen von trockenwarmen Tieflagen zu kühlfeuchten Hochlagen des südlichen Schwarzwaldes möglichst repräsentativ abzubilden (Abb. 29b).

Zur Untersuchung der Jahrringbildung wurden in den Jahren 2018 (BuTaKi) und 2019 (KonKlim) während der gesamten Wachstumsperiode in wöchentlichen Abständen von den Untersuchungsbäumen Mikrokerns entnommen. Der speziell zur Mikrokernentnahme von ROSSI et al. (2006) entwickelte „Trephor“ ist ein Stanzgerät, welches im Brusthöhenbereich mit einem Gummihammer in den Stamm geschlagen wird (Abb. 30a, b). Die so gewonnenen Mikrokerns sind bis zu 3,5 cm lang, haben einen Durchmesser von 2 mm und enthalten dabei die Borke, den Bast (Phloem), das Kambium sowie die zuletzt gebildeten Jahrringe des Holzes (Xylem) (Abb. 30c). Damit sich benachbarte Entnahmestellen in der Wundreaktion nicht gegenseitig beeinflussen, werden die Mikrokerns am Stamm in der Regel entlang von aufsteigenden Spiralen mit einem Abstand von 3,5 cm zueinander entnommen (Abb. 30d).

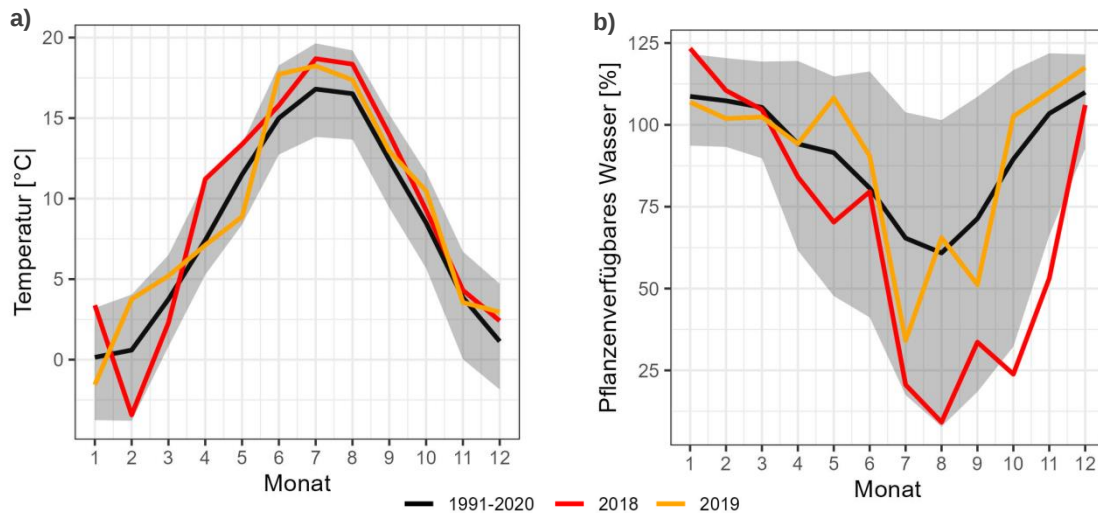
### Präparation der Mikrokerns und Ablauf der Zellbildung

Im Jahrringlabor werden die Mikrokerns in Paraffin eingebettet und anschließend 5 µm dicke Dünnschnitte der Querschnittsflächen mit einem Rotationsmikrotom angefertigt. Die Dünnschnitte werden mit einem Farbstoff (Cresyl Violett) eingefärbt und mikroskopische Dauerpräparate angefertigt, welche an-

schließend mit einer auf einem Durchlichtmikroskop montierten Farbkamera hochauflösend gescannt werden. Die Kambialzone liegt zwischen dem Xylem und Phloem und besteht aus teilungsfähigen Zellen, welche im Laufe der Wachstumsperiode in Richtung des Marks neue Xylemzellen und in Richtung der Rinde neue Phloemzellen produzieren. Die Kambialzellen sind erkennbar als Zellen mit einem sehr schmalen radialen Zelldurchmesser und violett gefärbten, dünnen Primärwänden (Abb. 31a, b). Nach der Zellteilung gehen die Zellen in die Streckungsphase über, in der über Turgordruck die finale axiale und radiale Dimension der Zelle durch Ausdehnung der elastischen Primärwand festgelegt wird. Es folgt die Bildung der Sekundärwand der Zellen durch Ablagerung einer Zellulosematrix, welche anschließend verholzt wird. Unter dem Mikroskop ist



**Abb. 31:** Momentaufnahme der Jahrringbildung einer a) Tanne und b) Buche vom 16.05.2018. R = Reife Xylemzellen, W = Xylemzellen in der Sekundärwandbildung, S = Xylemzellen in der Streckungsphase, K = Kambialzellen, P = Phloemzellen (links Mark, rechts Rinde).



**Abb. 32:** Monatliche Mittelwerte a) der Lufttemperatur und b) des pflanzenverfügbaren Wassers (% nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum) in den Untersuchungsjahren 2018 und 2019 im Vergleich zu Mittelwert und 2,5 und 97,5%-Perzentilen (grau schattierte Bereiche) des Zeitraums 1991-2020. Temperatur- und Bodenwasserhaushaltsdaten wurden für alle Untersuchungsstandorte in einem 250 x 250 m-Raster nach DIETRICH et al. (2019) bzw. mit LWF-Brook90 (nach HAMMEL und KENNEL, 2001) modelliert und anschließend für die gesamte Untersuchungsregion gemittelt.

der Prozess der Verholzung (Lignifizierung) der Zellwand durch Blaufärbung erkennbar. Sekundärwandverdickung und Lignifizierung tragen nicht mehr zur Volumenzunahme der Zellen und der Bäume bei, sind aber hauptverantwortlich für die Biomasseproduktion und Kohlenstoffspeicherung. Nach vollständiger Verholzung der Zellwand sterben die axial gerichteten Zellen durch Selbstauflösung des Protoplasten ab, wobei die Zellen aber weiterhin funktional bleiben. Während bei den Nadelhölzern der Zelltyp der Tracheiden Wassertransport und Stützfunktion parallel übernimmt, sind beim Laubholz die weitlumigen Gefäße auf den Wassertransport und die englumigen und dickwandigen Holzfasern auf die Sicherstellung der mechanischen Stabilität spezialisiert.

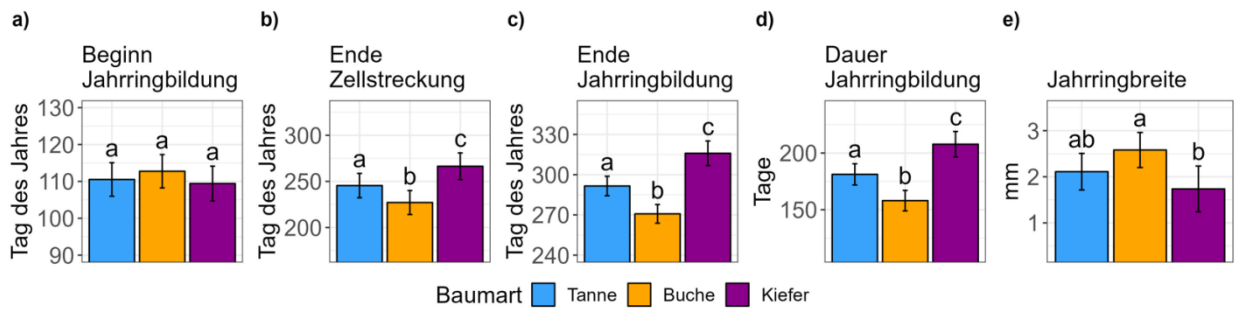
### Jahrringphänologie in den Trockenjahren 2018 und 2019

Die Vegetationsperiode des Jahres 2018 war durch dauerhaft erhöhte Temperaturen und mehrere Monate mit extrem geringer Wasserverfügbarkeit charakterisiert (Abb. 32a, b). Auch das Jahr 2019 zeigte erhöhte Sommertemperaturen und im Vergleich zum langjährigen Mittel auch eine deutlich reduzierte Wasserverfügbarkeit im Juli.

Der Beginn der Jahrringbildung (d. h. Streckung der ersten Frühholzzelle) im Jahr 2018 erfolgte bei Buche (22.04.), Tanne (21.04.) und Kiefer (19.04.) nahezu synchron und unterschied sich nicht signifikant zwischen den Baumarten (LARYSCH et al.,

2021) (Abb. 33a). Beim Ende der Zellstreckung (Buche: 15.08., Tanne: 03.09., Kiefer: 24.09.) und beim Ende der Jahrringbildung (Buche: 30.09., Tanne: 18.10., Kiefer: 13.11.) unterschieden sich die drei Baumarten im Jahr 2018 jeweils signifikant (Abb. 33b, c). Das vergleichsweise frühe Ende der Jahrringbildung vor allem bei der Buche, aber auch bei der Tanne ist vermutlich auf geringe Wasserverfügbarkeit, Stomatenschluss und einen daraus folgenden Mangel an Kohlenhydraten für die Holzbildung als Konsequenz der Sommerdürre des Jahres 2018 zurückzuführen. Im Gegensatz dazu zeigte die Kiefer die mit Abstand längste Dauer der Holzbildung (Abb. 33d), allerdings auch die geringste Jahrringbreite im Untersuchungsjahr (Abb. 33e).

Bei Tanne und Kiefer bestand zwischen der Höhenlage und dem Zuwachsbeginn ein signifikant positiver Zusammenhang (Abb. 34a), was den bekanntermaßen stark positiven Effekt der Lufttemperatur für den Beginn der kambialen Aktivität im Frühjahr unterstreicht (MOSER et al., 2010). Bei der Buche konnte dagegen ein parabolischer Zusammenhang nachgewiesen werden. Der im Vergleich zu den mittleren Höhenlagen verspätete Zuwachsbeginn auf den trockenwarmen unteren Höhenlagen könnte mit der dort geringeren Anzahl an Frosttagen im vorangegangenen Winter zusammenhängen. Neben Temperatursummen ist auch eine ausreichende Anzahl von Frosttagen während der Knospenruhe für den Zuwachsbeginn vieler Baumarten förderlich (DELPPIERRE et al., 2019), wodurch es zu ambivalenten Effekten der globalen Erwärmung auf die Phänologie der Jahrringbildung kommen kann.

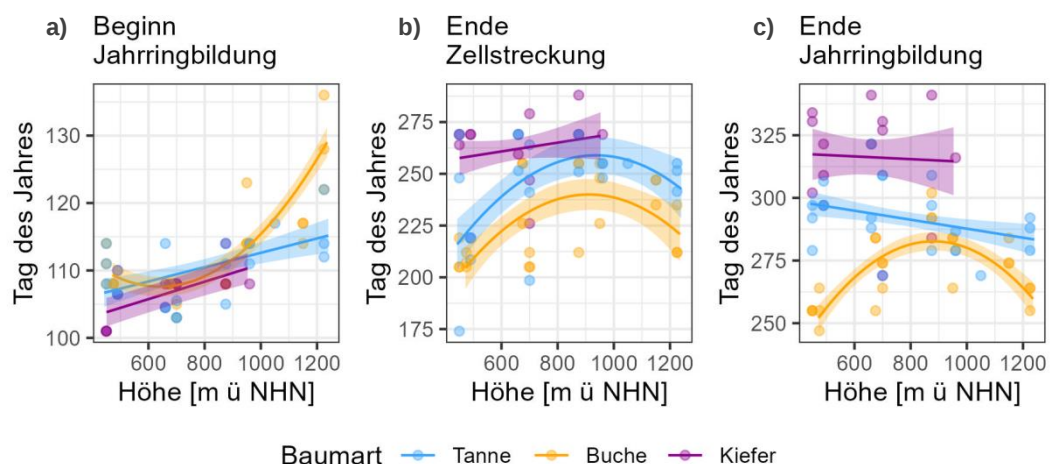


**Abb. 33:** a) Beginn der Jahringbildung bzw. Zellstreckung, b) Ende der Zellstreckung, c) Ende der Jahringbildung bzw. Sekundärwandbildung, d) Dauer der Jahringbildung, e) Jahringbreite von Tanne, Buche und Kiefer im Untersuchungsjahr 2018. Dargestellt sind jeweils Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den jeweiligen Mittelwerten der Baumarten an ( $p < 0,05$ ).

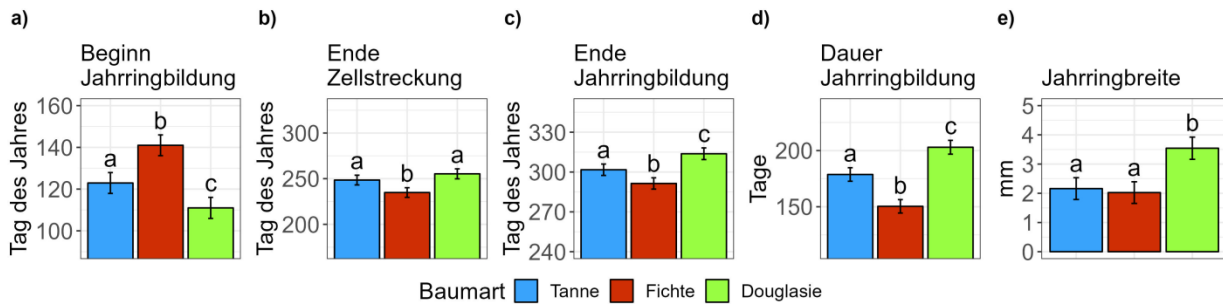
Bei Buche und Tanne konnten auch für das Ende der Zellstreckung parabolische Zusammenhänge mit der Höhenlage festgestellt werden (Abb. 34b). Allerdings zeigen Studien im Regelfall keinen Zusammenhang zwischen dem Ende der Zellstreckung bzw. Zellwandverdickung und der Höhenlage, weshalb oftmals ein starker Einfluss der Tageslänge (Photoperiode) vermutet wird (MOSEER et al., 2010). Das vergleichsweise frühe Ende der Zellstreckung, welches im Jahr 2018 vor allem die trockenwarmen Standorte in den Tieflagen betraf, deutet dabei auf eine vergleichsweise hohe Sensitivität der Jahringbildung von Buche und Tanne auf Trockenheit hin (SADERI et al., 2019). Während bei der Buche der parabolische Zusammenhang auch beim Ende der Jahringbildung nachgewiesen werden konnte, zeigte die Kiefer keine nachweisbaren Trends entlang der Höhengradienten (Abb. 34b, c). Das verfrühte Ende der Zellstreckung (Buche und Tanne) bzw. der Jahringbildung (Buche) in den Hochlagen könnte wiederum durch geringere Baumdimensionen (Höhe und Durchmesser) und höheres Alter dieser Untersuchungsbäume verursacht worden

sein. Aus früheren Studien ist bekannt, dass diese Faktoren ebenfalls zu einem früheren Ende von Zelldifferenzierungsprozessen führen können (ROSSI et al. 2008, RATHGEBER et al. 2011).

Im Vergleich der Koniferenarten im Projekt KonKlim zeigten sich im Jahr 2019 beim Zuwachsbeginn signifikante Unterschiede zwischen Fichte (24.05.), Tanne (03.05.) und Douglasie (20.04.) (Abb. 35a). Bei der trockenheitssensitiven Fichte konnte im Vergleich zur Literatur ein verspäteter Zuwachsbeginn festgestellt werden (MILLER et al., 2022b). Dies könnte auf einen verzögerten Effekt des extrem trockenen Sommers des Vorjahres 2018 hindeuten, welcher zu einer Leerung der Kohlenstoffreserven der Bäume geführt haben könnte. Diese Reserven werden überwiegend für die Reaktivierung des Kambiums im kommenden Frühjahr benötigt (DESLAURIERS et al., 2016), wodurch es durch eine notwendige vorherige Wiederauffüllung der entleerten Speicher zu einem verspäteten Zuwachsbeginn gekommen sein könnte (MILLER et al., 2022a).



**Abb. 34:** Zusammenhang zwischen Höhenlage und a) Beginn der Jahringbildung bzw. Zellstreckung, b) Ende der Zellstreckung und c) Ende der Jahringbildung bzw. Sekundärwandbildung für Tanne, Buche und Kiefer im Untersuchungsjahr 2018. Transparente Bänder zeigen den jeweiligen Standardfehler der Regressionsmodelle an.



**Abb. 35:** a) Beginn der Jahringbildung bzw. Zellstreckung, b) Ende der Zellstreckung, c) Ende der Jahringbildung bzw. Sekundärwandbildung, d) Dauer der Jahringbildung und e) Jahringbreite von Fichte, Tanne und Douglasie im Untersuchungsjahr 2019. Dargestellt sind jeweils Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den jeweiligen Mittelwerten der Baumarten an ( $p < 0,05$ ).

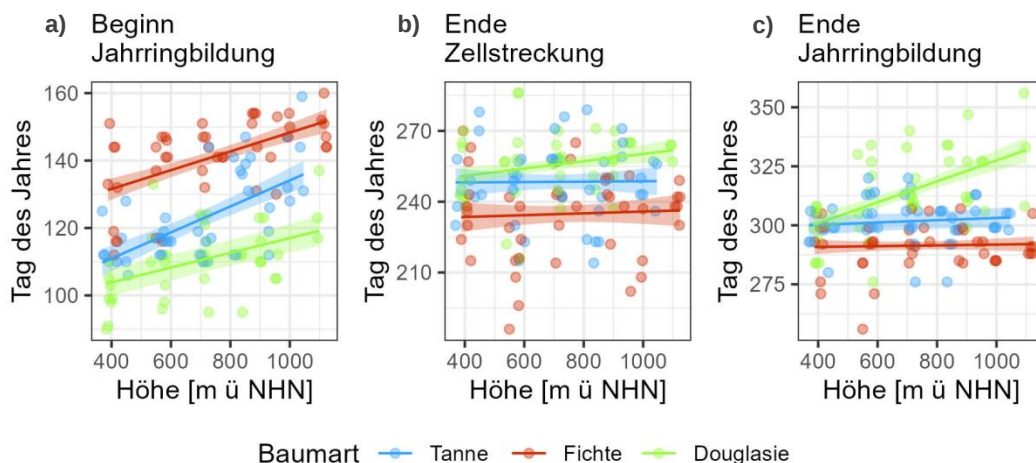
Während Douglasie (13.09.) und Tanne (05.09.) ein signifikant späteres Ende der Zellstreckung im Vergleich zur Fichte (23.08.) zeigten (Abb. 35b), unterschieden sich alle Koniferen signifikant beim Ende der Jahringbildung (Fichte: 18.10., Tanne: 29.10., Douglasie: 10.11.) (Abb. 35c). Die Douglasie, bei der die Phase der Holzbildung am längsten dauerte, wies auch die breitesten Jahringe auf (Abb. 35d, e). Demgegenüber führte die längere Dauer der Jahringbildung bei der Tanne im Vergleich zur Fichte nicht zu Unterschieden in der Jahringbreite.

Alle drei untersuchten Koniferen zeigten im Jahr 2019 straffe lineare Zusammenhänge zwischen der Höhenlage und dem Zuwachsbeginn (Abb. 36a). Während beim Ende der Zellstreckung bei keiner Baumart ein Zusammenhang mit der Höhenlage nachgewiesen werden konnte (Abb. 36b), zeigte sich beim Ende der Jahringbildung nur bei der Douglasie eine signifikante Verspätung mit zunehmender Höhenlage (Abb. 36c). Das verfrühte Ende der Jahringbildung in den unteren Höhenlagen weist auf eine potenzielle Wasserlimitierung der Douglasie im Spätsommer auf trockenwarmen Standorten hin. Auf den kühl-

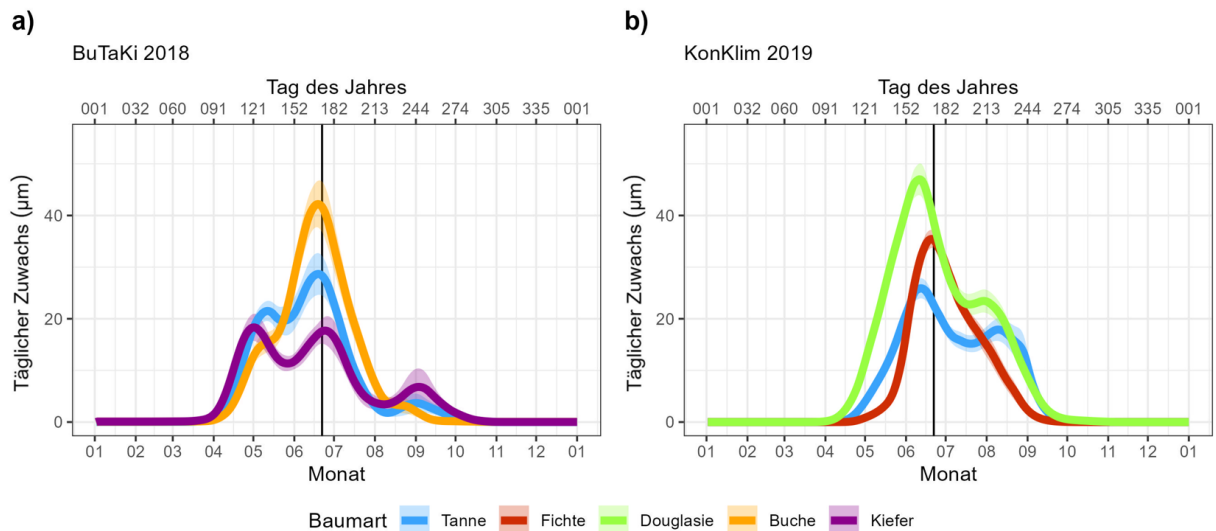
feuchten Standorten der Hochlagen zeigt das Ende der Jahringbildung erst Anfang Dezember eine bemerkenswert geringe Limitierung des Wachstums der Douglasie durch verkürzte Tageslängen und verringerte Temperaturen.

### Intra-annuelle Dynamik des täglichen Zuwachses

Bei allen untersuchten Baumarten konnte die Kulmination des täglichen Zuwachses nahe dem Zeitpunkt der Sommersonnenwende festgestellt werden (Abb. 37a, b), was in Übereinstimmung mit einer Vielzahl von früheren Studien ist (RATHGEBER et al., 2016). Generell wird angenommen, dass Klimaxbaumarten wie Buche und Tanne zu „intensiven Lebensstrategien“ tendieren, bei welchen eine kürzere Dauer der Holzbildung durch hohe tägliche Zuwächse kompensiert wird (CUNY et al., 2012). Entsprechend dieses Konzepts verfolgen Pionierbaumarten wie die Kiefer „extensive Lebensstrategien“ mit einer längeren Dauer der Holzbildung, welche geringe tägliche Zuwächse kompensieren sollen.



**Abb. 36:** Zusammenhang zwischen Höhenlage und a) Beginn der Jahringbildung bzw. Zellstreckung, b) Ende der Zellstreckung und c) Ende der Jahringbildung bzw. Sekundärwandbildung für Fichte, Tanne und Douglasie im Untersuchungsjahr 2019. Transparente Bänder zeigen den jeweiligen Standardfehler der Regressionsmodelle an.



**Abb. 37:** Intra-annuelle Dynamik des täglichen Zuwachses von a) Buche, Tanne und Kiefer im Untersuchungsjahr 2018 und b) Fichte, Tanne und Douglasie im Untersuchungsjahr 2019. Der Zeitpunkt der Sommersonnenwende wird durch eine vertikale schwarze Linie angezeigt. Transparente Bänder zeigen den jeweiligen Standardfehler der generalisierten additiven Modelle an.

Auch die Fichte kompensierte ihre vergleichsweise kurze Dauer der Jahrringbildung in 2019 durch die im Vergleich zur Tanne erhöhten täglichen Zuwächse während der Sommermonate. Die saisonale Dynamik des täglichen Zuwachses der Douglasie zeigt dagegen, dass das Konzept der zwei beschriebenen Lebensstrategien in ihrem Fall nicht anwendbar ist. Die Douglasie zeigte sowohl eine längere Dauer der Jahrringbildung als auch konstant höhere tägliche Zuwächse. Die Ergebnisse dieser Untersuchung bieten somit neue Einblicke in die Mechanismen, welche der hohen Produktivität der Douglasie zu Grunde liegen (MILLER et al., 2022b).

Trotz dieser vorteilhaften Wachstumseigenschaften sollte die zukünftige Rolle der Douglasie in der deutschen Waldwirtschaft natürlich unter Berücksichtigung aller für die nachhaltige Bewirtschaftung relevanten Aspekte bewertet werden. Das vergleichsweise geringe invasive Potenzial der Douglasie (LANGE et al., 2022) kommt dieser Forderung zugute. Den Beimischungsanteil der Douglasie in Mischwäldern auf maximal 30 Prozent zu begrenzen (THOMAS et al., 2022), ist Ausdruck einer vorsorgenden waldbaulichen Planung.

## Schlussfolgerungen

Die hier gezeigten Ergebnisse zur Phänologie der Jahrringbildung und des intra-annuellen Zuwachses basieren jeweils nur auf Daten einer Vegetationsperiode. Sie sollten daher mit Vorsicht interpretiert werden. Es ist geplant, diese durch eine Verlängerung der Zeitreihe zu validieren. Die gewonnenen Daten deuten allerdings darauf hin, dass im Vergleich zur Kiefer die Dauer der Jahrringbildung von Rotbuche und Weißtanne durch die extreme Dürre des Jahres 2018 stark reduziert wurde. Dies konnte vor allem durch ein frühes Ende der Zellstreckung auf Standorten der unteren Höhenlagen nachgewiesen werden, welche als besonders disponiert für Trockenstress gelten. Die Douglasie offenbarte mit dem frühen Zuwachsbeginn und spätem Zuwachsende ihr Potenzial, durch sommerliche Trockenheit verursachte ungünstige Wachstumsbedingungen besser als die anderen Baumarten kompensieren zu können.

### Professur für Waldwachstum und Dendroökologie – Universität Freiburg

Die Professur für Waldwachstum und Dendroökologie untersucht Wachstumsprozesse von Wäldern und erforscht grundlegende Prinzipien zur nachhaltigen Produktion nachwachsender Rohstoffe in verschiedenen Landnutzungsformen. Dabei werden Methoden zur quantitativen Erfassung, Analyse und Prognose des Wachstums von Bäumen und Waldbeständen entwickelt.



[www.iww.uni-freiburg.de](http://www.iww.uni-freiburg.de)

## 5 QUARANTÄNESCHADORGANISMEN IM WALD

Die Wälder Baden-Württembergs leiden seit Jahren an den Folgen des Klimawandels. Derartig geschwächte Wälder sind besonders anfällig für Schadorganismen, welche, wie die Fichtenborkenkäfer oder der Verursacher des Eschentriebsterbens, ganze Waldbestände zum Absterben bringen können. Eine zunehmende Gefahr stellen nicht-heimische Schadorganismen dar, deren Anzahl und Verbreitung in ganz Europa ständig zunehmen. Zum einen wird es vor allem wärmeliebenden Arten durch den Temperaturanstieg erleichtert, sich durch Migration aktiv bei uns zu etablieren. Zum anderen ist durch die Globalisierung und den weltweiten Handel das Risiko einer passiven Verschleppung von Organismen stark gestiegen. Insbesondere der Handel mit Pflanzen und Pflanzenerzeugnissen birgt ein hohes Risiko, da er nur schwer zu kontrollieren ist.

Nicht-heimische Schadorganismen, durch deren Einschleppung hohe ökologische und ökonomische Schäden zu erwarten wären, können als „Quarantäneschadorganismen“ klassifiziert werden. Für sie gilt eine „Nulltoleranz“, mit der ihre Etablierung durch systematische Gegenmaßnahmen verhindert werden soll. „Quarantäneschadorganismus“ (kurz QSO) ist ein Fachbegriff der Pflanzengesundheit. Jeder QSO ist eine invasive Art. Wird ein QSO unbemerkt eingeschleppt und breitet sich aus, ist ein Zurückdrängen oft schwierig. Entscheidend für den Erfolg von Tilgungsmaßnahmen ist, wie schnell vor allem auf lokaler Ebene eingegriffen wird. Deshalb sind eine frühzeitige Erkennung, das Monitoring auf sogenannten Risikostandorten und die Meldung von Verdachtsfällen von entscheidender Bedeutung.

### Was gilt für Quarantäneschadorganismen in der EU?

Zum Schutz vor nicht-heimischen Pflanzenschädlingen wurden mit der Pflanzenschutzverordnung (EU) 2016/31 (EU, 2016) verpflichtende EU-Regelungen zur Überwachung und Eindämmung von Quarantäneschädlingen erlassen.

Es sind folgende Schädlingskategorien definiert:

- Unionsquarantäneschadorganismen (UQSO): Sie sind für das gesamte Gebiet der EU von Bedeutung, treten aber bisher nicht oder nur in geringem Umfang auf (Anhang II der Durchführungsverordnung (EU) 2019/2072) (EU, 2019a). Derzeit sind auf EU-Ebene ca. 200 Arten als Unionsquarantäneschadorganismen gelistet, darunter Insekten, Nematoden, Pilze, Bakterien, Phytoplasmen, Viren und Viroide.

Für sie gilt:

- Ihre Einfuhr in die EU ist grundsätzlich verboten.
- Ein Monitoring ist für EU-Mitglieder verpflichtend.
- Ihr Auftreten oder der Verdacht ihres Auftretens muss der zuständigen Behörde gemeldet werden.
- Beim Auftreten müssen grundsätzlich Tilgungsmaßnahmen erfolgen. In der Regel wird dazu ein abgegrenztes Gebiet (Quarantänezone) eingerichtet, in dem bestimmte Schutzvorschriften gelten.

- Prioritäre Schadorganismen (PSO): Unionsquarantäneschadorganismen, die in der EU als besonders schädlich gelten, werden als PSO bezeichnet. Derzeit sind in der Delegierten Verordnung (EU) 2019/1702 (EU, 2019b) zwanzig PSO gelistet. Für diese 20 Schädlinge sind jährlich stattfindende Erhebungen verpflichtend.
- Neue Schädlinge: Auch für neue Schädlinge, die bisher nicht als UQSO gelten, können nach einer Risikobewertung durch einen Mitgliedsstaat oder die EU-Kommission nationale oder EU-weite Notmaßnahmen erlassen werden. Erlässt die EU-Kommission Notmaßnahmen, gilt eine Meldepflicht wie für Unionsquarantäneschadorganismen und die entsprechende Art kann in die Liste der UQSO aufgenommen werden.
- Unionsgeregelter Nicht-Quarantäneschädlinge (Regulated Non-Quarantine Pests - RNQP): Sie kommen in der EU bereits vor. Da aber ein Befall erhebliche Schäden bei Saat- und Pflanzgut verursachen kann, müssen relevante Pflanzen bei der Einfuhr frei von RNQPs sein. Unionsgeregelter Nicht-Quarantäneschädlinge sind im Anhang IV der Verordnung (EU) 2019/2072 aufgeführt.
- Schutzgebietsquarantäneschädlinge: Diese Schadorganismen sind nur in ausgewiesenen pflanzengesundheitlichen Schutzgebieten innerhalb der EU noch nicht verbreitet. Ihre Einschleppung in diese Schutzgebiete soll durch einschlägige Maßnahmen verhindert werden.

Nicht alle nicht-heimischen Arten, die große Schäden verursachen, werden jedoch als Quarantäneschadorganismen klassifiziert, meist aus dem Grund, weil sich ihre Ausbreitung nicht mehr durch phytosanitäre Maßnahmen verhindern lässt. Beispielsweise hat das Falsche weiße Stengelbecherchen (*Hymenoscyphus fraxineus*), ein invasiver Pilz, der seit etwa 20 Jahren das bestandsbedrohende Eschentriebsterben verursacht, keinen Quarantänestatus, da seine Verbreitung zu rasch voranschritt.

und seine Ausrottung nicht mehr möglich war. Auch die Japanische Ulmenblattwespe (*Aproceros leucopoda*) ist nicht als UQSO gelistet. Sie tritt seit 2011 in Deutschland auf und kann erhebliche Schäden an Ulmen verursachen, ist aber bereits zu weit verbreitet und lässt sich nicht mehr zurückdrängen. Es wird erwartet, dass sie sich aufgrund geeigneter Klimabedingungen weiter ansiedeln kann.

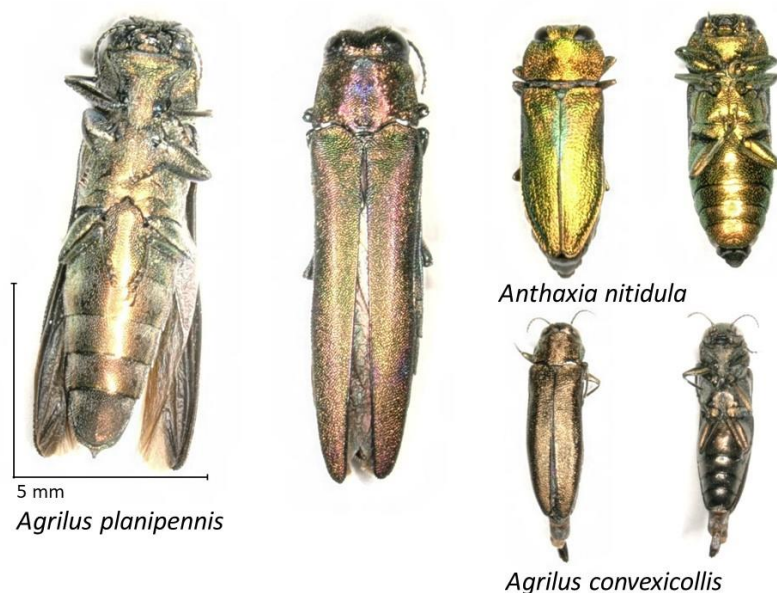
Es gibt auch Beispiele, dass Schädlinge ihren Status verändern:

- Die 2021 erstmals in Baden-Württemberg nachgewiesene Eichennetzwanze (*Corythucha arcuata*) gilt seit 2007 nicht mehr als QSO. Sie trat erstmals in Italien 2002 auf und breitet sich seitdem invasiv aus. Laut einer Risikoanalyse des Julius-Kühn-Instituts lässt sich eine nationale Ausbreitung in Deutschland nicht mehr aufhalten.
- Die Dothistroma-Nadelbräune der Kiefer (*Dothistroma septosporum*) galt in der EU als QSO, wird aber seit 2019 als „Unions geregelter Nicht-Quarantäneschädling“ bezeichnet. In Baden-Württemberg wurde sie erstmals 2014 nachgewiesen. Da sie sich hauptsächlich durch Saat- und Pflanzgut verbreitet, sind Bekämpfungsmaßnahmen nur in Vermehrungsbeständen vorgeschrieben.
- Der Kastanienrindenkrebs (*Cryphonectria parasitica*) gilt seit 2019 nur noch als Schutzgebiets-Quarantäneschädling. Der Fokus liegt auf der Vermeidung der Einschleppung in pflanzengesundheitliche Schutzgebiete, in denen er noch nicht auftritt.

## Prioritäre Schadorganismen (PSO) im Wald

Nachfolgend sind die für den Wald bedeutenden PSO beschrieben. Für alle gilt, dass ihre Einschleppung vor allem durch die Einfuhr von lebenden Pflanzen oder Holzserzeugnissen erfolgen kann. Bei den Käfern entstehen die größten Schäden durch die Larvenfraßgänge, was zu absterbenden Ästen, Kronenbereichen und Bäumen führen kann.

- Der Asiatische Laubholzbockkäfer (*Anoplophora glabripennis*) (Abb. 39) gilt als einer der gefährlichsten Schaderreger an verschiedenen Laubgehölzen, insbesondere Ahorn, Rosskastanie, Pappel, Weide und Birke. Er wird vorwiegend durch Verpackungsholz verschleppt. Für ihn wurden in Deutschland und auch in Baden-Württemberg schon mehrere Einschleppungsfälle gemeldet, die auf Verpackungsholz für chinesische Granitsteine zurückzuführen waren. Aktuell sind bei Ausbrüchen in Bayern, Sachsen-Anhalt und im benachbarten Frankreich intensive Maßnahmen umzusetzen.
- Dem Asiatischen Eschenprachtkäfer (*Agrilus planipennis*) (Abb. 38) wird ein hohes Ausbreitungspotenzial zugesprochen, was besonders für Eschen, die durch das Eschentriebsterben bereits geschwächt sind, fatal wäre. Er kommt bereits in Russland und in der Ukraine vor, eine Einschleppung aus dieser Richtung erscheint als wahrscheinlich.
- Der Kiefernholznematode (*Bursaphelenchus xylophilus*), ein Fadenwurm aus Nordamerika, ist ein gefürchteter Kiefern-schädling. Wie viele andere Krankheitserreger ist er auf



**Abb. 38:** Asiatischer Eschenprachtkäfer (*Agrilus planipennis*) im Vergleich zu zwei heimischen Prachtkäfern, dem Glänzenden Blütenprachtkäfer (*Anthaxia nitidula*) und dem Schmalen Eschenprachtkäfer (*Agrilus convexicollis*) (Foto: Felix Peter/FVA).

Vektoren angewiesen: Er wird durch Bockkäfer der Gattung *Monochamus* übertragen. Die Voraussetzungen für diesen Schädling werden durch steigende Temperaturen begünstigt: Erst ab durchschnittlichen Sommertemperaturen über 20 Grad Celsius kann es zur Massenvermehrung der Nematoden im Leitgewebe mit letalen Folgen für die Kiefer kommen. Er kommt bereits in Portugal und Spanien vor. In Portugal sind seit der Einschleppung des Nematoden große Schäden an Kiefern entstanden.

- Das Feuerbakterium (*Xylella fastidiosa*) (nicht zu verwechseln mit dem Feuerbrand), ist ursprünglich in Nord- und Südamerika verbreitet und kann ein breites Spektrum an Pflanzen befallen. Für den Wald von Bedeutung ist der Befall von Eichen. Da es z. B. durch xylemsaugende Zikaden übertragen wird, hat es ein hohes Ausbreitungspotenzial. Es ruft unspezifische Welkeerscheinungen an zahlreichen Laubgehölzen hervor und kommt bereits in Italien, Frankreich, Spanien und Portugal vor.
- Der Asiatische Moschusbock (*Aromia bungii*) ist ein weiterer Bockkäfer, der als PSO gelistet ist. Er befällt geschwächte, aber auch gesunde Kirschen. Es gibt bereits einzelne Befallsgebiete in Italien und in Bayern.
- Der Citrusbockkäfer (*Anoplophora chinensis*), ein aus Ostasien stammender Schädling an Ahorn und Birke, aber auch anderen Laubhölzern, wurde in Deutschland bisher nicht im Freiland nachgewiesen, jedoch gibt es ein etabliertes Vorkommen in Norditalien, wo er sich seit 2000 ausbreitet.
- Der in Nordamerika heimische Birkenprachtkäfer (*Agrilus anxius*) kommt bisher nicht in der EU vor. Da die europäischen Birken als wesentlich anfälliger als die nordamerikanischen Arten gelten, wird mit hohen ökonomischen Konsequenzen gerechnet, sollte sich der Käfer in der EU etablieren.
- Auch der Sibirische Arvenspinner (*Dendrolimus sibiricus*) wurde bisher noch nicht in der EU nachgewiesen. Durch den Nadelfraß der Raupen dieses Schädlings können verschiedene Nadelholzarten schwer geschädigt werden.

Für den Wald von Bedeutung sind zwei weitere UQSO, die jedoch nicht als PSO gelistet sind, da sie in anderen Teilen von Europa schon vorkommen:

- Der Kiefernpeckkrebs (*Fusarium circinatum*) ist eine Pilzerkrankung an Kiefer und Douglasie aus Nordamerika, die vor allem für Baumschulen problematisch werden kann. Der Pilz kann z. B. über Wind, Vektoren und Böden verbreitet werden; eine Einführung ist über kontaminiertes Saatgut am wahrscheinlichsten. Er kommt bereits in Spanien und Portugal vor.

- Die Tausend-Canker-Krankheit ist ebenfalls eine aus Nordamerika stammende Pilzerkrankung. Sie wird durch den Pilz *Geosmithia morbida* verursacht, der auf den Walnuss-Borkenkäfer (*Pityophthorus juglandis*) als Vektor angewiesen ist. In Italien ist sie bereits weit verbreitet und kann bei uns vor allem Walnuss und Schwarznuss befallen.

## Erhebungen von PSO im Wald

Aufgrund europäischer und nationaler Rechtsvorschriften müssen PSO in Wäldern, wie auch in der Landwirtschaft, jährlich durch umfangreiche amtliche Erhebungen überwacht werden. Die anderen Unionsquarantäneschadorganismen (nicht PSO) müssen innerhalb von sieben Jahren einmalig erhoben werden. Sukzessive wird die Liste der zu erhebenden Schadorganismen erweitert. Die Erhebungen von UQSO sind nicht nur durch rechtliche Vorgaben verpflichtend, sondern sollten auch im Interesse jedes Waldschützenden liegen, da sie zunehmend unsere Wälder bedrohen. Denn auch trotz strenger phytosanitärer Kontrollen bei der Einfuhr in die EU gibt es keine hundertprozentige Sicherheit, dass nicht doch ein Schädling unbemerkt eingeführt wird.

Bei den amtlichen Erhebungen in Baden-Württemberg arbeiten Experten des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums Augustenberg (LTZ), der Regierungspräsidien und der FVA eng zusammen. Insbesondere für die Überwachung der Waldbestände ist die FVA zuständig. Die Erhebungen erfolgen durch visuelle Bonituren, Fallenkontrollen und Laboruntersuchungen von Stichproben. Neben den oben genannten prioritären Schadorganismen gehören auch die UQSO *Fusarium circinatum* und *Geosmithia morbida* zu den jährlich zu kontrollierenden Schadorganismen.

Dabei konzentriert man sich vor allem auf Risikostandorte entlang des Rheingrabens (z. B. in der Nähe von Hafengebieten, Verkehrswegen, Raststätten, Lager- und Umschlagplätzen mit Verpackungsholz), an denen die Gefahr einer Einschleppung und Etablierung am höchsten ist. Besondere Aufmerksamkeit erhält in Deutschland seit 2009 der Kiefernholz-nematode, da er durch sein Auftreten in Portugal und Spanien schon nahe etablierte Vorkommen hat und massive Maßnahmen zur Eindämmung erfordert. Im Gegensatz zu den anderen PSO, die auch auf landwirtschaftlichen Flächen und im öffentlichen Grün überwacht werden, werden hier die amtlichen Erhebungen nur im Wald durchgeführt. Die Stichproben sind über die Landesfläche verteilt mit Schwerpunkten in der Rheinebene, im Neckar-

land und am Bodensee. Am LTZ werden molekulargenetische Laboranalysen durchgeführt, für welche repräsentativ aus dem Stammbereich eingeschlagener Kiefern gewonnene Sägespanproben verwendet werden. Die Auswertung der Laborergebnisse erbrachte für Baden-Württemberg bislang ausschließlich negative Befunde.

Zusätzlich sind die PSO in das Waldschutz-Meldewesen integriert: Sie werden im Rahmen der jährlichen Berichtspflicht bei den Landratsämtern abgefragt (Waldschutz-Meldungen). Wird so ein Verdacht gemeldet, geht die Meldung umgehend bei der FVA ein.

### Vorgehen beim Fund von Quarantäneschadorganismen

Maßnahmen, die einen Schadorganismus beseitigen und sein Ausbreiten verhindern sollen, sind dann sinnvoll, wenn ein Zurückdrängen tatsächlich möglich erscheint und eine neue Einschleppung verhindert werden kann. Sie können funktionieren, wenn alle Beteiligten konsequent mitwirken. Die Maßnahmen sind in sogenannten Notfallplänen festgelegt und sind abhängig von der Biologie des Erregers.

Für Schadorganismen, die als Unionsquarantäneschadorganismen gelistet sind, besteht grundsätzlich eine Meldepflicht. Dieser Meldepflicht ist zunächst gegenüber dem zuständigen Pflanzenschutzdienst des jeweiligen Bundeslandes (in Baden-Württemberg: LTZ) nachzukommen, welcher die Anzeigen amtlich bestätigt und der zuständigen Bundesbehörde am Julius-Kühn-Institut Bericht erstattet. Bei walddtypischen Schadorganismen ist in Baden-Württemberg die FVA dazwischengeschaltet. Tritt ein Quarantäneschadorganismus auf, wird ein Gebiet abgegrenzt (die Quarantänezone), das aus der eigentlichen Befallszone sowie einer mehrere Kilometer breiten Pufferzone besteht. Bis der Schädling in diesem Gebiet wieder als ausgerottet gilt (mehrere Jahre ohne Fund), müssen folgende Maßnahmen durchgeführt werden: Vernichtung von befallenen Bäumen, präventive Fällung von Wirtsbäumen (nur in der Befallszone) und umfangreiche Kontrollen (durch Fallen und visuell).

Je nach Schadorganismus und dessen Biologie und Ausbreitungsfähigkeit haben die einzurichtenden Befalls- und Pufferzonen unterschiedliche Ausdehnungen. Besonders groß sind die Gebiete bei einem Befall mit Kiefernholznmatothen. Falls der Nematode festgestellt wird, muss eine Befallszone und eine 20 km breite Pufferzone ausgewiesen werden, in denen Fällun-

gen und Vernichtung der befallenen Bäume sowie vorsorgliche Fällung aller Wirtsbäume im Radius von mindestens 500 m um befallene Bäume herum erfolgen müssen. Handelt es sich um einen Befall mit dem Asiatischen Laubholzbockkäfer, sind die Ausdehnungen des abgegrenzten Gebietes deutlich geringer: Hier müsste eine Befallszone mit 100 m und eine Pufferzone mit 2 km Radius eingerichtet werden.

### Der Asiatische Laubholzbockkäfer – Beispiel für ein erfolgreiches Zurückdrängen

Seit dem 01. Januar 2021 kommt der Asiatische Laubholzbockkäfer (Abb. 39) in Baden-Württemberg offiziell nicht mehr vor und das Bundesland gilt damit wieder als befallsfrei. Dem vorangegangen waren mehrere Jahre umfangreicher Maßnahmen an drei Orten: 1. auf der deutschen Rheinseite bei Kehl, nachdem im Hafengebiet von Straßburg 2008 ein Befall festgestellt worden war, 2. in Weil am Rhein, wo der Schädling erstmals 2012 und erneut 2015 gefunden wurde, 3. in Hildritzau-



**Abb. 39:** Asiatischer Laubholzbockkäfer (oben), Ausbohrlöcher des Asiatischen Laubholzbockkäfers (unten) (Fotos: Olaf Zimmermann/LTZ).

sen, wo 2016 20 befallene Bäume festgestellt worden waren. Zusätzlich gab es noch zwei Orte (Grenzach-Wyhlen und Altdorf bei Hildritzhäusern), an denen nur Überwachungsmaßnahmen nötig waren, da der Asiatische Laubholzbockkäfer hier zwar nachgewiesen wurde, aber sich nicht etablieren konnte. Auch diese Gebiete sind inzwischen wieder überwachungsfrei. Das Beispiel des Asiatischen Laubholzbockkäfers zeigt die Bedeutung eines umfangreichen risikoorientierten Monitorings, um ein frühzeitiges Zurückdrängen einzuleiten und so die weitere Verbreitung von Quarantäneschädlingen verhindern zu können.

### Und warum das Ganze?

Für die Erhebungen von Unionsquarantäneschädlingen wird ein großer Aufwand betrieben, und manch eine\*r mag sich nach dem Sinn des Ganzen fragen. Andererseits stellt sich aber die Frage, ob unser Wald, der schon jetzt sichtbar leidet noch weitere schwer kontrollierbare Schädlinge verkraften kann. Deshalb gilt: Lieber öfter nachschauen und sich bei der FVA melden, wenn unbekannte Symptome oder Schaderreger auftauchen, um darauf rechtzeitig reagieren zu können. Wenn das Ergebnis der Untersuchungen dann einen negativen Befund aufweist, bedeutet dies nur Gutes.

Für Baden-Württemberg kann aktuell Positives berichtet werden: 2021 und 2022 blieben alle Kontrollen bezüglich der Unionsquarantäneschadorganismen im Wald negativ.

### Weitere Informationen zu Quarantäneschadorganismen:

#### *Baden-Württemberg:*



FVA Abteilung Waldschutz:  
<https://www.fva-bw.de/top-meta-navigation/fachabteilungen/waldschutz>



LTZ-Augustenberg:  
[https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/Len/Arbeitsfelder/Pflanzengesundheit\\_Quarantaene](https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/Len/Arbeitsfelder/Pflanzengesundheit_Quarantaene)

#### *Zuständige Bundesbehörde für*

#### *Pflanzenschutz:*



Julius Kühn-Institut:  
<https://www.julius-kuehn.de/>

#### *Auf europäischer Ebene:*



Pflanzenschutzorganisation EPPO  
(European and Mediterranean  
Plant Protection Organization):  
<https://www.eppo.int/>

## 6 DAS FORSTLICHE UMWELTMONITORING

Im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings wird der Zustand der Wälder in Baden-Württemberg seit über 30 Jahren kontinuierlich erfasst. Dabei werden eine Vielzahl einwirkender Umwelteinflüsse sowie die Reaktion des Waldökosystems auf sich ändernde Umweltbedingungen gemessen. Eingeführt wurde das Messprogramm zunächst als Konsequenz der hohen Säureeinträge, die ab Mitte der 1970er Jahre große Schäden in den Wäldern Baden-Württembergs verursachten. Mittlerweile ist das Forstliche Umweltmonitoring zu einem umfassenden Untersuchungsprogramm weiterentwickelt worden, welches eine Vielzahl von Umweltparametern in unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung misst und damit eine wichtige Datengrundlage im Hinblick auf die Herausforderungen des Klimawandels und die zukünftige Entwicklung der Wälder liefert (Abb. 40).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wälder Baden-Württembergs wurden in den vergangenen Jahren unübersehbar. Infolge häufig auftretender Sommerdürren und lang anhaltender Hitzeperioden sowie einer hohen Belastung durch Insekten und Pilze stiegen die Waldschäden stark an. Aktuelle

Untersuchungen auf den Versuchsflächen des intensiven Ökosystemmonitorings zielen darauf ab, Witterungsextreme wie langanhaltende Hitze- und Trockenstressperioden zu messen und die Auswirkung auf die Bäume und das gesamte Waldökosystem näher zu untersuchen. Ziel ist es, detaillierte Informationen über Veränderungen der Waldökosysteme zu erhalten, um daraus geeignete Maßnahmen zur Stärkung der Widerstandsfähigkeit der Wälder abzuleiten.

Die langen Zeitreihen des Forstlichen Umweltmonitorings stellen einen einzigartigen Datenfundus dar, der mittlerweile von vielen Wissenschaftlern unterschiedlicher Forschungseinrichtungen genutzt wird, um weiterführende Analysen durchzuführen und daraus mögliche Anpassungsstrategien für eine zukünftige Waldbewirtschaftung zu gewinnen. Im Fokus stehen dabei die aktuellen klimatischen Änderungen und die Entwicklung klimaangepasster Wälder. Mit Hilfe des kontinuierlichen Umweltmonitorings können die Entwicklungen und Anpassungsprogramme begleitend beobachtet und die Wirksamkeit eingeleiteter Maßnahmen beurteilt werden.

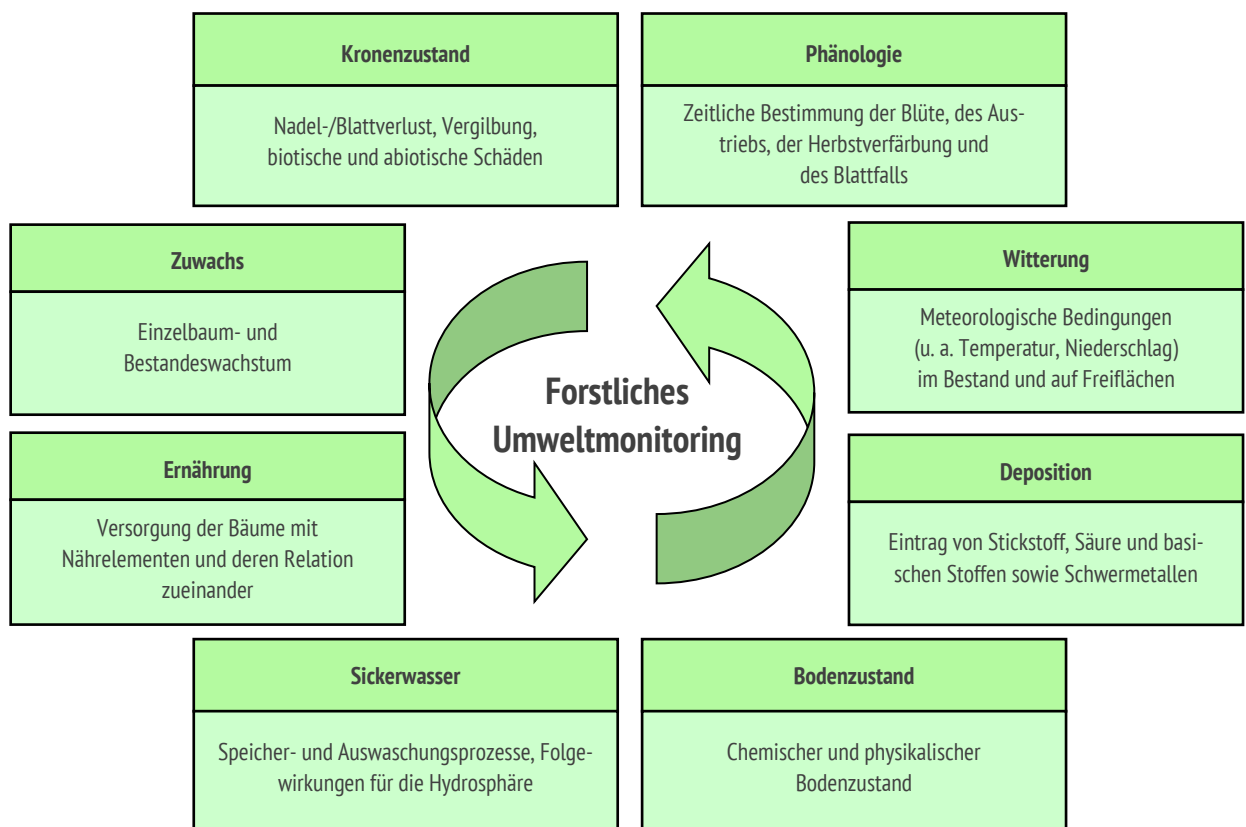


Abb. 40: Themen und Messgrößen des Forstlichen Umweltmonitorings.

## Methodischer Aufbau

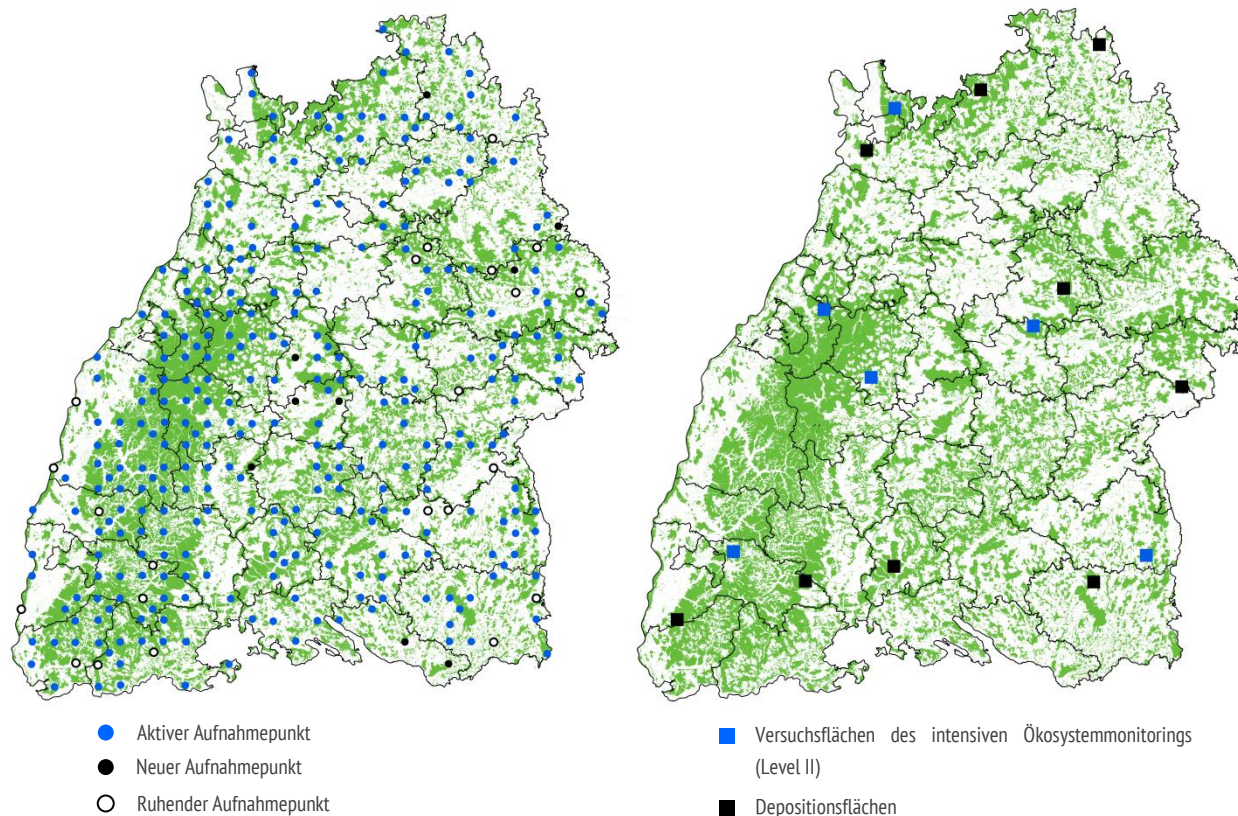
Das Forstliche Umweltmonitoring gliedert sich methodisch in zwei unterschiedliche Untersuchungsebenen. Zum einen werden Daten auf Rasterstichproben erhoben, welche als systematische Stichprobenpunkte angelegt sind und repräsentative Ergebnisse für das Land Baden-Württemberg liefern. Zum anderen finden prozessorientierte Untersuchungen auf speziell ausgewählten Versuchsflächen statt, die kausalanalytische Auswertungen für bestimmte Standorte ermöglichen.

Zu den Rasterstichproben zählt die Waldzustandserhebung (WZE), die Bodenzustandserhebung (BZE) und die Immissionsökologische Waldernährungsinventur (IWE). Die Lage der Stichprobenpunkte wird allein durch den Abstand des Aufnahmernetzes bestimmt (Abb. 41, links). Jeder Rasterschnittpunkt im Wald wird dabei als Aufnahmepunkt angelegt, unabhängig von Standort, Baumartenzusammensetzung oder sonstigen Kriterien. Seit dem Jahr 2005 werden alle Erhebungen der Rasterstichproben einheitlich auf dem 8x8 km-Netz sowie dem europäischen 16x16 km-Netz durchgeführt. Vor 2005 fand die Waldzustandserhebung auf periodisch wechselnden Aufnahmegerastern mit stark schwankender Anzahl an Aufnahmepunkten statt (Anlage 2).

Auf den Versuchsflächen werden viele verschiedene Umweltparameter mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung untersucht. Die geografische Lage der 50x50 m großen Versuchsflächen wird im Gegensatz zu den Rasterstichproben entsprechend dem jeweiligen Untersuchungsziel ausgewählt. Hierbei können der Standort, die Baumartenzusammensetzung oder die Verteilung der Versuchsflächen im Land ausschlaggebend sein (Abb. 41, rechts). Zu den Versuchsflächen gehören die Flächen des intensiven Ökosystemmonitorings, die Waldklimastationen, die Depositionsflächen sowie andere Versuchsstandorte, die zusätzliche fachspezifische Informationen über die Waldentwicklung erfassen.

## Internationale Einbindung

Das Forstliche Umweltmonitoring Baden-Württembergs ist sowohl in nationale als auch in internationale Umweltprogramme eingebunden. Von den Rasterstichproben gehören 52 Punkte des 16x16 km-Netzes zum europäischen Aufnahmernetz „Level I“, dessen Ergebnisse in das europäische Umweltmonitoring-Programm ICP-Forests einfließen. Von den Versuchsflächen Baden-Württembergs sind insgesamt fünf Buchen- und sechs Fichtenflächen des intensiven Ökosystemmonitorings



**Abb. 41:** Räumliche Lage der Rasterstichproben des 8x8 bzw. 16x16 km-Netzes (links) und der Versuchsflächen des intensiven Ökosystemmonitorings sowie des Depositionsmessnetzes (rechts).

Bestandteil des europäischen Umweltmonitoring-Programms „Level II“. Somit gehen die Ergebnisse der Erhebungen in Baden-Württemberg auch in übergreifende Auswertungen auf nationaler und internationaler Ebene ein.

### Waldzustandserhebung

Die Waldzustandserhebung untersucht den Vitalitätszustand der Wälder in Baden-Württemberg. Dafür werden an jedem Stichprobenpunkt 24 Bäume nach einem festgelegten systematischen Verfahren ausgewählt und für eine jährliche Ansprache dauerhaft markiert. Die Bewertung der Baumkronen erfolgt terrestrisch mit Hilfe von Ferngläsern im Zwei-Personen-Verfahren. Bäume, die zum Zeitpunkt der Aufnahmen nicht mehr stehend am Stichprobenpunkt vorhanden sind, werden nach Möglichkeit durch nächststehende Nachbarbäume ersetzt. Sind nicht mehr genügend Bäume vorhanden, ruht die Aufnahme solange, bis sich wieder eine gesicherte Verjüngung mit ausreichender Baumanzahl am Stichprobenpunkt eingestellt hat.

**Tab. 1:** Klassifikation der Schadstufen.

| Klasse | Nadel-/Blattverlust<br>in % | Vergilbung<br>in % |
|--------|-----------------------------|--------------------|
| 0      | 0 - 10                      | 0 - 10             |
| 1      | 11 - 25                     | 11 - 25            |
| 2      | 26 - 60                     | 26 - 60            |
| 3      | 61 - 99                     | > 60               |
| 4      | 100                         |                    |

| Klassifikation der Schadstufen |                   |   |   |   |
|--------------------------------|-------------------|---|---|---|
| Nadel-/Blatt-<br>verlustklasse | Vergilbungsklasse |   |   |   |
|                                | 0                 | 1 | 2 | 3 |
| 0                              | 0                 | 0 | 1 | 2 |
| 1                              | 1                 | 1 | 2 | 2 |
| 2                              | 2                 | 2 | 3 | 3 |
| 3                              | 3                 | 3 | 3 | 3 |
| 4                              | 4                 |   |   |   |

|               |                        |                            |
|---------------|------------------------|----------------------------|
| Schadstufe 0: | ungeschädigt           |                            |
| Schadstufe 1: | schwach geschädigt     | <b>Warnstufe</b>           |
| Schadstufe 2: | mittelstark geschädigt |                            |
| Schadstufe 3: | stark geschädigt       | <b>deutlich geschädigt</b> |
| Schadstufe 4: | abgestorben            |                            |

Hauptkriterium zur Beurteilung des Kronenzustandes sind der Nadel-/Blattverlust (NBV) und die Vergilbung. Beide Merkmale werden in Fünf-Prozentstufen erhoben und anschließend zu Schadstufen zusammengefasst (Tab. 1). Zusätzlich werden alle weiteren Baummerkmale aufgenommen, die den Vitalitätszustand beeinflussen können. Hierunter fallen insbesondere Schäden in der Baumkrone oder am Stamm, die durch Pilze oder Insekten verursacht wurden, auf Witterungsereignisse wie Trockenstress oder auf mangelnde Nährstoffversorgung zurückzuführen sind.

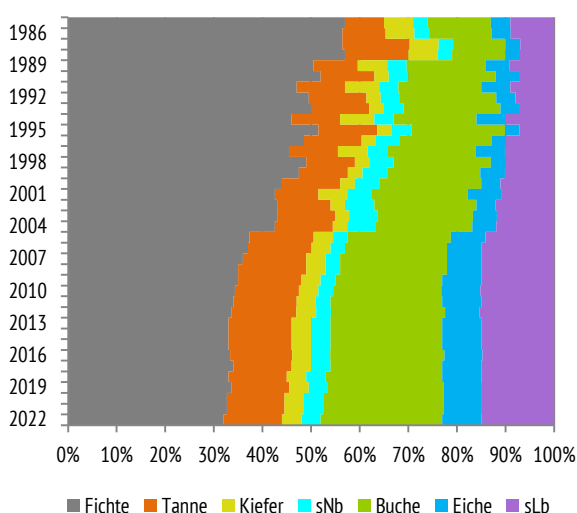
Die diesjährigen Außenaufnahmen zur Waldzustandserhebung fanden im Zeitraum vom 15. Juli bis 25. August an insgesamt 317 Stichprobenpunkten statt. Im Rahmen der Bodenzustandserhebung wurden im Vorfeld der Erhebung neun Stichprobenpunkte neu angelegt und sieben bereits bestehende Punkte reaktiviert. An insgesamt 22 Stichprobenpunkten ruht derzeit die Aufnahme, da nicht mehr genügend Bäume in ausreichender Höhe zur Verfügung stehen.

Für die Waldzustandserhebung 2022 wurde der Kronenzustand von insgesamt 7.550 Bäumen untersucht (Tab. 2). Den landesweiten Baumartenanteilen entsprechend sind Fichte und Buche am häufigsten in der Stichprobe vertreten. Dahinter folgen mit größerem Abstand die Baumarten Tanne, Eiche (Stiel- und Traubeneiche), Kiefer, Bergahorn, Esche und Lärche (Europäische und Japanische Lärche). Alle anderen vorkommenden Baumarten werden für die Darstellung des Kronenzustandes in die Gruppen „sonstige Nadelbäume“ und „sonstige Laubbäume“ zusammengefasst.

Seit Beginn der Waldzustandserhebungen im Jahr 1985 ist in der Stichprobe eine deutliche Abnahme an Nadelbäumen zugunsten von Laubbäumen zu erkennen (Abb. 42). Während zu Beginn noch über 70 Prozent der Stichprobenbäume Nadelbäume waren, ist ihr Anteil mittlerweile auf unter 55 Prozent gesunken. Maßgeblich hierfür ist vor allem die drastische Verringerung des Fichtenanteils in den Wäldern Baden-Württembergs innerhalb der letzten Jahrzehnte. Demgegenüber hat sich der Anteil der Buchen, Eichen und sonstigen Laubbäume seit Beginn der Erhebung deutlich erhöht. Die Aufnahme auf unterschiedlichen Rasterdichten führt zu methodisch bedingten Veränderungen der Baumartenzusammensetzung, die sich in jährlichen Schwankungen zeigt. Seit der einheitlichen Aufnahme des 8x8 km-Netzes ab dem Jahr 2005 ist dagegen ein kontinuierlicher Trend der Erhöhung des Laubholzanteiles zu erkennen.

Da das Baumalter einen großen Einfluss auf den Kronenzustand der Bäume hat, werden die Ergebnisse der Waldzustandserhebung getrennt nach den Altersgruppen „bis 60 Jahre“ und „ab 61 Jahre“ ausgewertet. Bei der Waldzustandserhebung 2022 entfallen etwa ein Drittel aller Bäume auf die Altersgruppe „bis 60 Jahre“ und etwa zwei Drittel auf die Altersgruppe „ab 61 Jahre“ (Tab. 2). Lediglich bei den Baumarten Douglasie, Bergahorn und den sonstigen Laubbäumen überwiegt der Anteil der jüngeren Altersstufe; dagegen ist bei den Baumarten Lärche und Tanne der Anteil älterer Bäume besonders hoch.

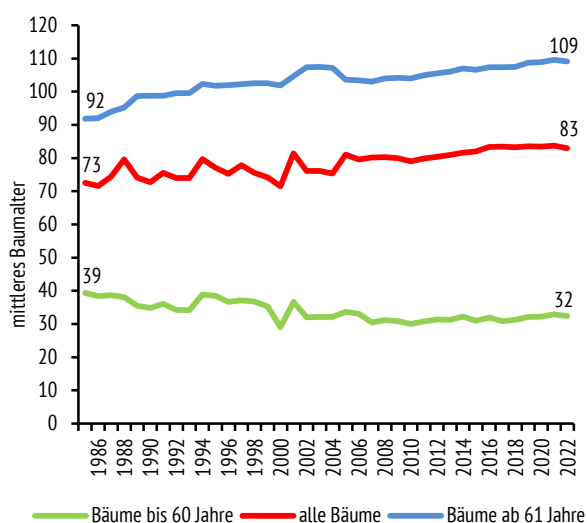
In der mittlerweile 37-jährigen Zeitreihe der Waldzustandserhebung seit 1985 hat sich das mittlere Baumalter aller Stichprobenbäume um 10 Jahre von durchschnittlich 73 Jahren im Jahr 1985 auf 83 Jahren im Jahr 2022 erhöht (Abb. 43). Der Ausfall von Probestämmen und die anschließende Ersatzbaumauswahl von oftmals jüngeren Bäumen führen in der zeitlichen Entwicklung zu einem verlangsamten Anstieg des Durchschnittsalters im Datenkollektiv der Waldzustandserhebung. In der Altersgruppe „bis 60 Jahre“ verringert sich das mittlere Baumalter seit Beginn der Erhebungen sogar, von ehemals 39 auf 32 Jahre. Bei der Altersgruppe „über 60 Jahre“ ist eine Zunahme von 92 auf 109 Jahre zu verzeichnen. Die in Abbildung 43 erkennbaren Schwankungen sind methodisch bedingt und durch die wechselnden Netzdichten der Erhebungspunkte verursacht. Seit dem Jahr 2005 erfolgt die Aufnahme einheitlich auf dem 8x8 km-Raster und die Entwicklung des Baumalters verläuft, ähnlich wie die der Baumartenanteile, seitdem gleichförmiger.



**Abb. 42:** Baumartenanteile in der Stichprobe der Waldzustandserhebung seit 1985.

**Tab. 2:** Anzahl untersuchter Probestämme der Waldzustandserhebung 2022 und prozentuale Anteile nach Baumarten.

| Baumart             | bis 60 Jahre | ab 61 Jahre | Gesamt | Gesamt % |
|---------------------|--------------|-------------|--------|----------|
| Fichte              | 851          | 1.593       | 2.444  | 32,4%    |
| Tanne               | 176          | 715         | 891    | 11,8%    |
| Kiefer              | 73           | 244         | 317    | 4,2%     |
| Douglasie           | 94           | 42          | 136    | 1,8%     |
| Lärche              | 17           | 113         | 130    | 1,7%     |
| sonstige Nadelbäume | 2            | 3           | 5      | 0,1%     |
| Buche               | 516          | 1.392       | 1.908  | 25,3%    |
| Eiche               | 175          | 429         | 604    | 8,0%     |
| Bergahorn           | 171          | 110         | 281    | 3,7%     |
| Esche               | 101          | 178         | 279    | 3,7%     |
| sonstige Laubbäume  | 402          | 153         | 555    | 7,4%     |
| Gesamt              | 2.578        | 4.972       | 7.550  | 100,0%   |



**Abb. 43:** Entwicklung des mittleren Baumalters aller Bäume sowie der Altersgruppen „bis 60 Jahre“ und „ab 61 Jahre“.

## Qualitätssicherung

Seit Beginn der Waldzustandserhebung in Baden-Württemberg gewährleisten zahlreiche Maßnahmen zur Qualitätssicherung eine hohe Datenqualität der Erhebungen. Vor den Außenaufnahmen der Waldzustandserhebung findet jährlich auf Bundesebene ein Abstimmungskurs der Länder-Inventurleitungen statt, um eine einheitliche Ansprache des Kronenzustandes in Deutschland sicherzustellen. Im Anschluss werden die Aufnahmeteams in Baden-Württemberg intensiv auf eigens hierfür eingerichteten Schulungspfaden durch die FVA vorbereitet. Eine intensive fachliche Begleitung der Außenaufnahmen und eine stichprobenartige Kontrolle der Aufnahmepunkte tragen zusätzlich zur Qualitätssicherung der Waldzustandserhebung bei.

Auf internationaler Ebene finden ebenfalls regelmäßig Abstimmungskurse der Erhebungen statt. Zudem wurde im Jahr 2021 wiederholt ein Foto-Vergleichstest zur Waldzustandserhebung für Deutschland und Europa durchgeführt, dessen Ergebnisse die hohe Übereinstimmung in der Bewertung der Kronenansprache innerhalb Baden-Württembergs und im gesamten Bundesgebiet bestätigen.

## Auswertungsmethoden

Die Waldzustandserhebung ist ein landesweit angelegtes Stichprobenverfahren mit zufällig ausgewählten Probestämmen. Um die Ergebnisse auf die tatsächliche Waldflächenverteilung in Baden-Württemberg übertragen zu können, werden die Ergebnisse mit den Baumartenflächen gewichtet und waldfächenbezogen dargestellt. Für die Gewichtung dienen die jeweils aktuellen Daten der Bundeswaldinventur. Damit werden die Ergebnisse der einzelnen Probestämme der Waldschadensinventur gemäß ihrem tatsächlichen Vorkommen in Baden-Württemberg berücksichtigt. Die Berechnung des mittleren Nadel-/Blattverlusts wird mit einem Vertrauensbereich von 95 Prozent dargestellt. Das bedeutet, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 Prozent der wahre Wert innerhalb dieses Bereiches liegt. Da der Vertrauensbereich stark von der Anzahl der Beobachtungen abhängt, ist dieser umso enger, je mehr Bäume untersucht wurden.

## Aktuelle Bodenzustandsinventuren

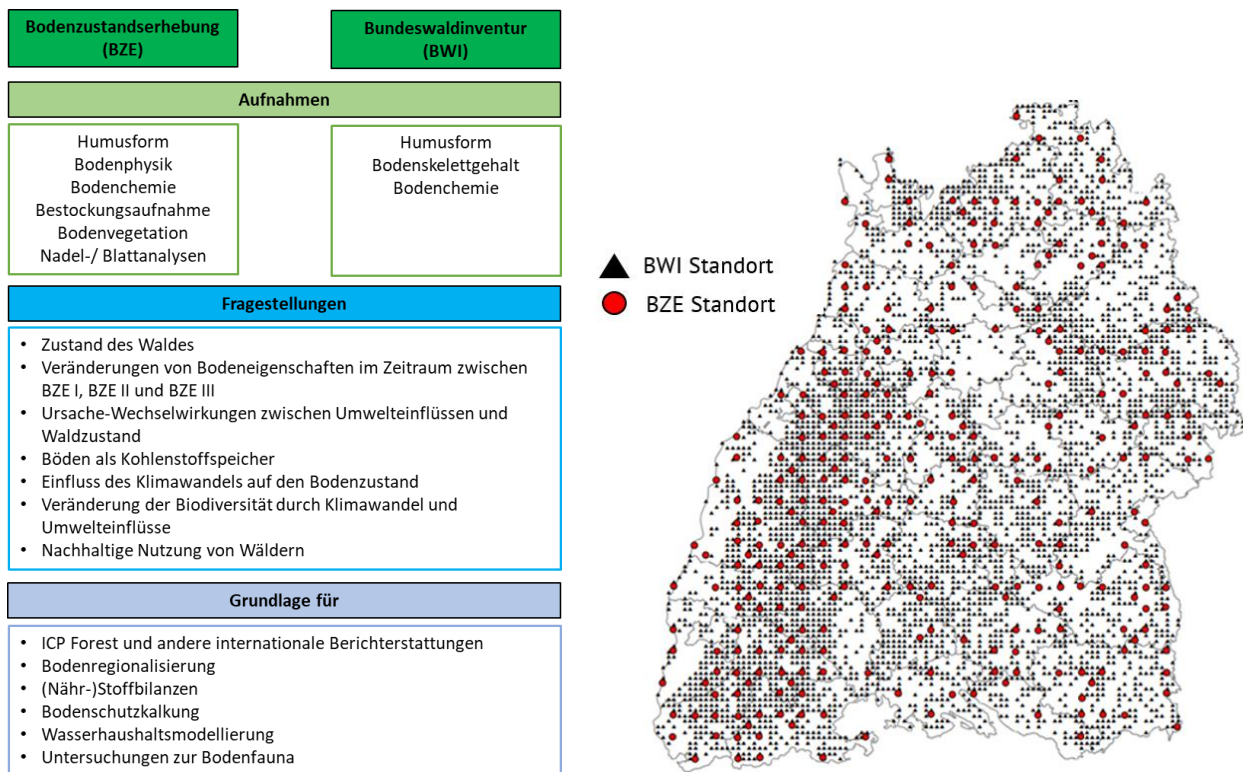
Waldböden erfüllen mit ihrer Filter- und Pufferfunktion gegenüber Schadstoffeinträgen und der Speicherung von Nährstoffen sowie Niederschlägen wichtige Funktionen in Waldökosystemen. Um fundierte Erkenntnisse zum Zustand und zur Entwicklung der Waldböden in Baden-Württemberg zu erhalten, koordiniert die Abteilung Boden und Umwelt der FVA derzeit gleich zwei intensive Bodeninventuren: Im Jahr 2022 begannen die Aufnahmen zur dritten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE III) und bereits seit Frühjahr 2021 werden im Rahmen der vierten Bundeswaldinventur (BWI 4) bodenkundliche Parameter erhoben sowie Bodenproben für Laboranalysen gewonnen.

### Dritte Bodenzustandserhebung im Wald: BZE III

Bei der Bodenzustandserhebung (BZE) werden die Eigenschaften der Waldböden beobachtet, um Veränderungstendenzen und mögliche Risiken für die Erfüllung der vielfältigen Bodenfunktionen zu erkennen. Hierfür werden zusätzlich zu den Bodenaufnahmen auch Informationen zum Waldbestand, zur Begleitvegetation und zur Waldernährung erhoben (Abb. 44).

Die Bodenzustandserhebung wurde erstmals in den Jahren 1989-1992 (BZE I) durchgeführt und in den Jahren 2006-2008 (BZE II) wiederholt. Im Jahr 2022 wurde mit der dritten BZE (BZE III) begonnen, deren Außenaufnahmen bis zum Jahr 2025 abgeschlossen sein werden. Alle drei Bodenzustandserhebungen erfolgten bzw. erfolgen landesweit auf dem einheitlichen 8x8 km-Aufnahmeraster im Wald, welches durch Standorte der Europäischen Bodenzustandserhebung (BioSoil) ergänzt wird.

Die Bodenzustandserhebung ist Teil des Forstlichen Umweltmonitorings und als solches ein Gemeinschaftsvorhaben von Bund und Ländern. In Baden-Württemberg wird die BZE von der FVA durchgeführt und ausgewertet. Das Institut für Waldökologie und Waldinventuren des Thünen-Instituts (TI) koordiniert die Ländererhebungen auf Bundesebene. Somit sind ein hoher Qualitätsstandard und eine überregionale Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.



**Abb. 44:** Übersicht zum Umfang der Aufnahmen bei der Bodenzustandserhebung (BZE) und beim bodenkundlichen Monitoring der Bundeswaldinventur (BWI) mit den zugrundeliegenden Fragestellungen und Auswertungen sowie die Lage der Aufnahmepunkte von BZE III und BWI 4.

### Ergebnisse der ersten beiden Inventuren als Grundlage für die Untersuchungen der BZE III

Bei der BZE I stand, vor dem Hintergrund der starken Luftverschmutzung, die Bodenversauerung, die Stickstoffeutrophierung und die Kohlenstoffspeicherung im Fokus der Erhebung. Bei der BZE II wurde erstmals die Entwicklung der Waldböden unter sich verändernden Umweltfaktoren aufgezeigt und die Erhebung zu einem wichtigen Steuerungsinstrument zum Erhalt und zur Wiederherstellung einer natürlichen Bodenvielfalt im Wald ausgebaut.

Die Ergebnisse aus BZE I und BZE II zeigen, dass die natürliche Bodenversauerung durch atmosphärische Säureeinträge (vor allem Schwefel-, aber auch Stickstoffverbindungen) verstärkt wurde, wodurch die Waldböden an essentiellen Pflanzennährstoffen verarmten und die Qualität des Bodenwassers negativ beeinflusst wurde (HARTMANN et al., 2016; WELLBROCK et al., 2016). Die Ergebnisse belegen zudem, dass neben der Bodenschutzkalkung auch der Umbau der Wälder in laubholzreichere Mischwälder zu einer Erholung säuregeschädigter Waldböden beiträgt. Des Weiteren haben BZE I und BZE II Erkenntnisse zur

baumartenspezifischen Nährelementversorgung und deren regionaltypischen Mustern in Baden-Württemberg geliefert.

Die Kohlenstoffvorräte im Boden machen gemäß BZE II etwa 43 Prozent der gesamten Kohlenstoffvorräte baden-württembergischer Wälder aus. Zwischen BZE I und BZE II nahmen die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus in Folge eines vermehrten Humusabbaus ab, während sie im Mineralboden zunahmen. Im Mittel sanken die Kohlenstoffvorräte im Gesamtboden um 0,7 Tonnen pro Hektar und Jahr, ein Hinweis auf die Gefährdung der Kohlenstoffspeicherkapazität der Waldböden infolge des Klimawandels und damit verbundener Änderungen im Waldbestand.

Bei der aktuell stattfindenden BZE III ist die zeitliche Entwicklung im Vergleich zur BZE I und BZE II von besonderem Interesse. Neben der Veränderung des Stickstoffhaushalts und der Kohlenstoffspeicherung stehen die Bestandes- und Vegetationsaufnahmen im Vordergrund, da diese bislang nur bei der BZE II aufgenommen wurden und nun die erstmalige Wiederholung ansteht. Ein weiterer Schwerpunkt der BZE III soll auf den Wasserhaushalt des Bodens in Bezug auf veränderte Klima-

bedingungen gelegt werden. Die Ergebnisse der BZE III liefern somit eine umfangreiche Wissensgrundlage zur Anpassung der Wälder Baden-Württembergs an veränderte klimatische und hydrologische Verhältnisse, zur Sicherung der Nährstoffversorgung der Waldbäume sowie zur Erhaltung und Stärkung der Biodiversität.

### Neue Aufnahmepunkte bei der BZE III

Zusätzlich zu den bisherigen 304 BZE-Standorten wurden für die BZE III 20 neue Standorte ausgewählt, um das Flächennetz zu ergänzen und bislang unterrepräsentierte Standorte (Bodenausprägungen, Waldgesellschaften) besser zu erfassen. In Abbildung 45 sind exemplarisch drei Bodenprofile neu aufgenommener Standorte dargestellt.

Durch die neu ausgewählten Standorte wird das BZE-Netz auch dahingehend erweitert, dass Fragen zum Wasser- und Lufthaushalt sowie zur Nährstoffversorgung auch für extremere Standortsausprägungen und seltenere Waldgesellschaften untersucht werden können.

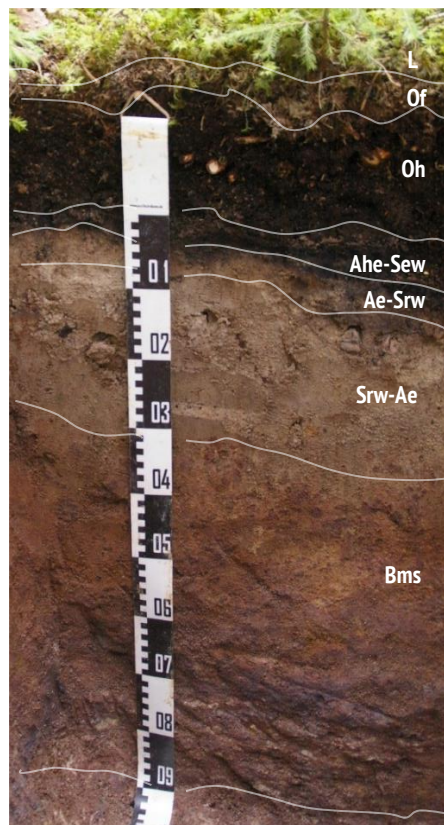
### Erweiterung der flächenhaften Bodeninformationen durch die BWI 4

Neben der BZE III fand seit dem Frühjahr 2021 bis in den Herbst 2022 die vierte Bundeswaldinventur (BWI 4) statt. Dabei wird, wie bereits bei der BWI 3, die Erhebung des Waldbestandes in Baden-Württemberg durch ein bodenkundliches Monitoring ergänzt, bei welchem ausgewählte bodenkundliche Kenngrößen erfasst werden (Abb. 44). Mit dem wesentlich dichteren Aufnahmeraster der BWI (2x2 km-Raster mit ca. 4.200 Standorten in Baden-Württemberg) werden die bei der BZE (8x8 km-Raster mit ca. 320 Standorten) gewonnenen Bodeninformationen ergänzt, wodurch regionale Aussagen auf der Basis einer deutlich verbesserten Datengrundlage getroffen und Wechselwirkungen zwischen der zeitlichen Entwicklung des oberirdischen Bestandes und der Bodeneigenschaften ausgewertet werden können. So zeigen die Ergebnisse der letzten Erhebung (BWI 3) deutlich unterschiedliche Humusformen in Abhängigkeit von der vorherrschenden Baumartenzusammensetzung (HALLAS et al., 2017). Außerdem weisen Nadelwälder im Vergleich zu Laub- und Mischwäldern geringere pH-Werte und ein ungünstigeres Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff im Boden auf.

a) Braunerde-Terra fusca



b) Stagnogley-Podsol



c) Stagnogley-Pelosol



**Abb. 45:** Bodenprofil einer Braunerde-Terra fusca (a), eines Stagnogley-Podsols (b) und eines Stagnogley-Pelosols (c) mit den entsprechenden Horizonten aus der bodenkundlichen Klassifikation (Fotos: H. Buberl).

Mit dem erneuten bodenkundlichen Monitoring bei der BWI können die erfassten Bodenparameter mit der aktuellen Bodenzustandserhebung verknüpft werden, um Zusammenhänge zwischen dem Boden und dem Baumbestand in Bezug auf zeitliche Trends und regionale Effekte, wie z. B. des Klimawandels, zu untersuchen und regional angepasste Handlungsempfehlungen für die forstliche Praxis abzuleiten.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die Wälder Baden-Württembergs sind durch die auftretenden sommerlichen Hitze- und Trockenperioden der letzten Jahre stark belastet. Nach den sehr heißen und trockenen Jahren 2018 bis 2020 sind die Waldschäden sprunghaft angestiegen. Und auch die heiße Sommerwitterung 2022 mit regional langanhaltenden Dürreperioden führte in Kombination mit einem hohem Aufkommen verschiedener Schaderreger wie z. B. dem Borkenkäfer wiederum zu einer Verstärkung der Waldschäden.

### Dürre und Hitze belasten erneut die Wälder

Nachdem sich der Waldzustand in Baden-Württemberg im vergangenen Jahr unter dem Einfluss einer vergleichsweise kühl-feuchten Witterung leicht erholen konnte, nahmen dieses Jahr die Waldschäden erneut zu. Die mittlere Kronenverlichtung der Wälder erhöhte sich im Jahr 2022 um 1,8 Prozentpunkte auf 28,4 Prozent. Aktuell gelten 46 Prozent der Waldfläche Baden-Württembergs als deutlich geschädigt. Ein derart hoher Wert wurde in der bisherigen Aufnahmeperiode nur im Jahr 2020 erreicht.

Die Fichte leidet seit Jahren stark unter langanhaltenden Trockenphasen. Als flachwurzeln Baumart gelangt sie kaum an tieferliegende, länger wasserführende Bodenschichten, wodurch sie schnell unter Trockenstress gerät. Zudem sind geschwächte Fichten besonders anfällig gegenüber Borkenkäferbefall, zumal wie im Sommer 2022 die Verbreitung der Käfer schnell voranschreitet. Im Vergleich zum Vorjahr erhöhte sich der mittlere Nadelverlust der Fichten leicht um 0,4 Prozentpunkte auf 25,1 Prozent.

Ein etwas stärkerer Anstieg der Kronenschäden wurde dieses Jahr bei der Tanne verzeichnet. Der mittlere Nadelverlust erhöhte sich um 2,1 Prozentpunkte auf 26,1 Prozent. Dies ist im Wesentlichen auf eine höhere Belastung jüngerer Tannenbestände infolge der Trockenheit zurückzuführen. Zudem trat in den letzten Jahren ein verstärkter Befall durch die Tannentrieblaus auf, der oftmals zu akuten Schäden an jungen Tannen führte. Wie die Fichte war auch die Tanne im Verlauf des Sommers wieder von starkem Borkenkäferbefall betroffen.

Bei der Kiefer wurde im Verlauf des Sommers auf Standorten mit geringer Wasserspeicherkapazität oftmals eine vorzeitige Verbraunung älterer Nadeljahrgänge festgestellt, die zu einer

erhöhten Kronenverlichtung führte. Der mittlere Nadelverlust der Kiefern erhöhte sich auch dadurch um 1,7 Prozentpunkte auf 33,0 Prozent. Besonders dramatisch stellt sich die Situation der Kiefern auf den warm-trockenen Standorten der Oberrheinebene dar. Hier führt Trockenstress in Kombination mit starkem Mistel- und Pilzbefall nicht selten zu einem großflächigen Ausfall ganzer Kiefernbestände.

Bei den Baumarten Lärche und Douglasie ist im Vergleich zum Vorjahr ebenfalls eine Zunahme der Kronenschäden zu beobachten. Während sich der mittlere Nadelverlust der Lärchen leicht um 0,4 Prozentpunkte auf 25,1 Prozent erhöhte, ist bei der Douglasie eine Zunahme von 1,2 Prozentpunkten auf 21,6 Prozent zu verzeichnen. Neben den Auswirkungen von Hitze- und Trockenstress wurden dieses Jahr vor allem junge Douglasienbestände durch lokal auftretende Frosttrocknisschäden geschwächt.

Der mittlere Blattverlust der Buchen erhöhte sich dieses Jahr um 0,7 Prozentpunkte auf 32,1 Prozent. An vielen Buchen sind nach wie vor die Auswirkungen der vergangenen Hitze- und Trockenperioden in Form eines erhöhten Totastanteils in den Baumkronen zu erkennen. Durch die heiße und trockene Sommerwitterung 2022 kam es erneut zu akuten Trockenstresssymptomen, die sich bei der Buche oftmals in einem Zusammenklappen der äußeren Lichtblätter, einem Abwurf grüner Blätter sowie einer vorzeitigen Verfärbung äußerte. Der Schädigungsgrad junger Buchen war dabei besonders hoch.

Der Kronenzustand der Eichen verschlechterte sich im zweiten Jahr in Folge. Der mittlere Blattverlust erhöhte sich dieses Jahr um 3,5 Prozentpunkte auf 33,9 Prozent. Die Folgen der Trockenjahre sind auch bei der Eiche im Kronenzustand zu erkennen. Zudem wurde regional wieder ein hoher Befall durch verschiedene blattfressende Schmetterlingsraupen in den Eichenkronen festgestellt. Eine erhöhte Fruktifikation der Eichen sorgte für eine zusätzliche Belastung.

Der Schädigungsgrad des Bergahorns liegt mit 18,5 Prozent mittleren Blattverlusts auf vergleichsweise geringem Niveau, was auf das niedrige Durchschnittsalter der Probestämme dieser Baumart zurückzuführen ist. Gegenüber dem Vorjahr erhöhte sich der Blattverlust allerdings um 2,1 Prozentpunkte. An geschwächten Bäumen trat dieses Jahr verstärkt die Ahorn-Rußrindenkrankheit auf, deren pilzliche Erreger am Stamm eine

rußartige Verfärbung verursachen und die Bäume zum Absterben bringen.

Der Zustand der Eschen wird seit über einem Jahrzehnt massiv durch die Ausbreitung des Eschentriebsterbens belastet. Zahlreiche Eschenbestände sind mittlerweile abgestorben, so dass das Vorkommen der Esche in Baden-Württemberg seit Jahren rückläufig ist. Durch das eher feuchte Jahr 2021 konnte sich der pilzliche Erreger des Eschentriebsterbens zudem wieder stärker ausbreiten. Im Vergleich zum Vorjahr erhöhte sich der mittlere Blattverlust der Eschen um 3,3 Prozentpunkte auf 43,3 Prozent.

### Quarantäneschadorganismen

Die Wälder Baden-Württembergs werden neben zunehmendem Hitze- und Dürrestress und heimischen Insekten- und Pilzpathogenen auch von nicht-heimischen Schadorganismen gefährdet, deren Verbreitung in ganz Europa ständig zunimmt. Zum einen können sich wärmeliebende gebietsfremde Arten infolge höherer Temperaturen in den Wäldern Baden-Württembergs leichter ansiedeln. Zum anderen ist durch die Globalisierung und den weltweiten Handel das Risiko einer passiven Verschleppung von nicht-heimischen Organismen stark angestiegen.

Sind durch eine Einschleppung nicht-heimischer Schadorganismen hohe ökologische und ökonomische Schäden zu erwarten, können sie als „Quarantäneschadorganismen“ klassifiziert werden. Eine Etablierung dieser Arten in den heimischen Wäldern soll dabei durch systematische Gegenmaßnahmen verhindert werden. Von entscheidender Bedeutung sind dafür das frühzeitige Erkennen, das Monitoring auf sogenannten Risikostandorten und die Meldung von Verdachtsfällen.

Schadorganismen, die in der EU als besonders gefährlich gelten, werden als Prioritäre Schadorganismen bezeichnet. Zu ihnen zählt unter anderem der Asiatische Laubholzbockkäfer, der als einer der gefährlichsten Schaderreger an verschiedenen Laubgehölzen gilt. Er wird vorwiegend durch Verpackungsholz wie z. B. Holzpaletten verschleppt. In Baden-Württemberg wurde der Käfer erstmals 2012 in einem Waldgebiet in Weil am Rhein festgestellt, bevor er auch in Hildritzhäusern und Grenzach-Wyhlen nachgewiesen wurde. Es folgten umfangreiche Maßnahmen, um einer Etablierung des Asiatischen Laubholzbockkäfers entgegen zu wirken. In den ausgewiesenen Befalls- bzw. Pufferzonen wurden hierfür intensive Kontrollen durchgeführt und über mehrere Jahre befallene Bäume vernichtet. Eine

Etablierung des Käfers und damit eine weitere Gefährdung der Wälder konnte mit den durchgeführten Maßnahmen erfolgreich verhindert werden. Seit dem 01. Januar 2021 kommt der Asiatische Laubholzbockkäfer in Baden-Württemberg offiziell nicht mehr vor. Das Beispiel des Asiatischen Laubholzbockkäfers zeigt die Bedeutung eines umfangreichen risikoorientierten Monitorings, um ein frühzeitiges Zurückdrängen einzuleiten und so die weitere Verbreitung von Quarantäneschädlingen verhindern zu können.

Für Baden-Württemberg kann aktuell Positives berichtet werden: 2021 und 2022 blieben alle Kontrollen bezüglich der Unionsquarantäneschadorganismen im Wald negativ.

### Jahrringbildung verschiedener Baumarten

Im Rahmen zweier unterschiedlicher Forschungsprojekte wurden von der Professur für Waldwachstum und Dendroökologie der Universität Freiburg Untersuchungsflächen entlang ausgewählter Höhengradienten im südlichen Schwarzwald eingerichtet, um die Effekte von Witterung und Klima auf die Jahrringbildung zu quantifizieren. Dabei wurde die Jahrringbildung im Projekt „BuTaKi“ für die Baumarten Buche, Tanne und Kiefer und im Projekt „KonKlim“ für Fichte, Tanne und Douglasie untersucht. Der Untersuchungszeitraum der jeweiligen Projekte erstreckte sich über die gesamte Wachstumsphase des Jahres 2018 bzw. 2019. Durch eine wöchentliche Entnahme von Mikrokernen aus dem Stamm konnte neben der Jahrringbreite auch der Beginn und das Ende der Zelldifferenzierungsphasen innerhalb der untersuchten Wachstumsperioden für die einzelnen Baumarten festgestellt werden.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass im Vergleich zur Kiefer die Dauer der Jahrringbildung von Buche und Tanne durch die extreme Dürre des Jahres 2018 stark reduziert wurde. Dies konnte vor allem durch ein frühes Ende der Zellstreckung auf Standorten der unteren Höhenlagen nachgewiesen werden, welche als besonders disponiert für Trockenstress gelten. Die Douglasie offenbarte mit dem frühen Zuwachsbeginn und späten Zuwachsende ihr Potenzial, durch sommerliche Trockenheit verursachte ungünstige Wachstumsbedingungen besser als die anderen Baumarten kompensieren zu können. Dagegen war für die Tanne und im besonderen Maße für die trockenheitssensitive Fichte eine deutlich geringere Dauer der Jahrringbildung im Jahr 2019 festzustellen.

## Fazit

Auch in diesem Jahr haben uns die anhaltende Hitzeperiode und Trockenheit die Anfälligkeit unserer Wälder eindrücklich vor Augen geführt. Nach der kurzen Erholungsphase im phasenweise kühl-feuchten Jahr 2021 hat sich der Kronenzustand bei allen untersuchten Baumarten in diesem Jahr wieder verschlechtert. Lediglich 17 Prozent der Waldfläche Baden-Württembergs gelten derzeit noch als ungeschädigt, so wenig wie noch nie seit Beginn der Waldzustandserhebungen im Jahr 1985. Nahezu die Hälfte der Waldfläche (46 Prozent) ist als deutlich geschädigt einzustufen. Sorge bereitet in diesem Jahr auch der Zustand der zukünftigen Waldgenerationen: In der Naturverjüngung, vor allem von Buchen, Tannen und Douglasien, wurden überdurchschnittlich starke Kronenschäden beobachtet.

Nicht nur der Klimawandel gefährdet zunehmend die Vitalität unserer Wälder. Auf großer Fläche sind die Waldböden immer noch von der Altlast des sauren Regens in den 1980er und 90er Jahren geprägt. Vielerorts sind die Waldböden unnatürlich stark versauert und an essentiellen Pflanzennährstoffen verarmt. Zudem verzeichnet ein großer Teil der baden-württembergischen Waldfläche zu hohe Stickstoffeinträge aus Verkehr, Industrie und Landwirtschaft, die langfristig zu einer Stickstoffanreicherung in den Wäldern führen. Ein Zuviel an Stickstoff und ein Zuwenig an anderen wichtigen Nährstoffen erhöht die Anfälligkeit der Waldbäume für biotische und abiotische Risiken. So nimmt die Dürre- und Frosttoleranz verschiedener Baumarten mit steigendem Stickstoffangebot ab.

Wälder, die aufgrund von auftretenden Witterungsextremen wie Dürre- und Hitzeperioden sowie durch akuten Nährstoffmangel zunehmend geschwächt sind, zeigen sich auch besonders anfällig für Schadorganismen wie die Fichten- und Tannenborckenkäfer. Eine ernstzunehmende Gefahr stellen außerdem nicht-heimische Schadorganismen dar, deren Anzahl und Verbreitung infolge von Klimawandel und Globalisierung auch in Baden-Württemberg zunehmen werden.

Aufgrund des langsamen Baumwachstums ist in der Waldbewirtschaftung eine vorsorgende Anpassung an zukünftige Klimabedingungen von besonderer Bedeutung. Mit dem stetig steigenden Wissen um die Hitze- und Dürretoleranz heimischer und nicht-heimischer Baumarten kann die Wissenschaft zunehmend verlässlichere Empfehlungen für die Anpassung der Wälder an den Klimawandel geben. Im Rahmen der Waldstrategie 2050 des Landes Baden-Württemberg werden für den

nötigen Waldumbau wichtige Impulse gegeben und in einem vielstufigen Beteiligungsprozess notwendige Maßnahmen zur Klimaanpassung der Wälder in Angriff genommen. Sowohl die Waldbewirtschaftenden als auch die breite Bevölkerung müssen frühzeitig in Planungen einbezogen werden, um für den erforderlichen Transformationsprozess das nötige Verständnis aufbauen und Klimaanpassungsmaßnahmen wirksam umsetzen zu können. Neben Maßnahmen zur Bewältigung der akuten Schadsituation sind im Sinne einer effektiven Risikovorsorge auch mittelfristig und langfristig wirkende Maßnahmen von großer Bedeutung. Ein wichtiger Baustein hierbei ist die derzeitige Überarbeitung der Waldentwicklungstypen, welche die Grundsätze einer naturnahen, klimaangepassten Waldbewirtschaftung in konkrete Handlungsempfehlungen überführt, mit Hilfe derer klimalabile Waldbestände mittel- bis langfristig stabilisiert werden können.

Neben der Holz- und Biomasseproduktion erfüllen intakte Wälder eine Vielzahl weiterer wichtiger Funktionen. So wirken Wälder ausgleichend auf das lokale und regionale Klima und den Landschaftswasserhaushalt. Wenn Wälder und ihre Böden intakt sind, können sie die Wasserführung in Quellen und Fließgewässern in sommerlichen Niedrigwasserphasen erhöhen und auch zur Dämpfung und Verlangsamung von Hochwasserspitzen beitragen. Eine trockenstress- und hitzetolerante Waldbedeckung ist zudem die notwendige Voraussetzung, um großflächige Waldschäden und dadurch verursachte Nitratausträge in das Grund- und Trinkwasser zu vermeiden. Die Bedeutung der Wälder und ihre notwendige Stabilisierung im Hinblick auf ein zukünftiges Klima werden deshalb auch in der Wassermangelstrategie und der Strategie zum Umgang mit Hochwasser der Landesregierung berücksichtigt. Beide Strategien betonen die Bedeutung einer klimaangepassten, bodenschonenden Waldbewirtschaftung und die ausgleichende Wirkung von Wäldern im Landschaftswasserhaushalt.

Vor dem Hintergrund der vielschichtigen Einflussfaktoren, die unsere Wälder schwächen und regional großflächig Waldbestände zum Absterben bringen, sind größte Anstrengungen zum Walderhalt notwendig, damit die Wälder auch in Zukunft ihre vielfältigen Ökosystemleistungen erbringen können. Die hohe Dynamik, mit welcher sich derzeit Umwelt- und Standortbedingungen für unsere Wälder verändern, erfordern mehr denn je adaptive Managementsysteme, die regelmäßig auf ihre Eignung hin geprüft und gegebenenfalls an neue Rahmenbedingungen angepasst werden müssen. Hierbei kommt dem forstlichen Umweltmonitoring und der jährlichen Waldzustandserhebung eine besondere Bedeutung zu, liefern sie doch die empirische

Datengrundlage, um Gefährdungen für die Waldgesundheit erkennen und den Erfolg von Anpassungsmaßnahmen bewerten zu können.

## 8 LITERATURVERZEICHNIS

CUNY, H. E., C. B. K. RATHGEBER, F. LEBOURGEOIS, M. FORTIN und M. FOURNIER (2012): Life strategies in intra-annual dynamics of wood formation: example of three conifer species in a temperate forest in north-east France. *Tree Physiology* 32, S. 612–625, doi: 10.1093/treephys/tps039.

DELPPIERRE, N., S. LIREUX, F. HARTIG, J. J. CAMARERO, A. CHEAIB, K. ČUFAR, H. E. CUNY, A. DESLAURIERS, P. FONTI, J. GRIČAR, J.-G. HUANG, C. KRAUSE, G. LIU, M. de LUIS, H. MÄKINEN, E. M. DEL CASTILLO, H. MORIN, P. NÖJD, W. OBERHUBER, P. PRISLAN, S. ROSSI, S. M. SADERI, V. TREML, H. VAVRICK und C. B. K. RATHGEBER (2019): Chilling and forcing temperatures interact to predict the onset of wood formation in Northern Hemisphere conifers. *Global Change Biology* 25, S. 1089–1105, doi: 10.1111/gcb.14539.

DESLAURIERS, A., J.-G. HUANG, L. BALDUCCI, M. BEAULIEU und S. ROSSI (2016): The contribution of carbon and water in modulating wood formation in black spruce saplings. *Plant Physiology* 170, S. 2072–2084, doi: 10.1104/pp.15.01525.

DIETRICH, H., T. WOLF, T. KAWOHL, J. WEHBERG, G. KÄNDLER, T. METTE, A. RÖDER und J. BÖHNER (2019): Temporal and spatial high-resolution climate data from 1961 to 2100 for the German National Forest Inventory (NFI). *Annals of Forest Science* 76, 171 S., doi: 10.1007/s13595-018-0788-5.

DWD (2022): [https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/pressemitteilungen\\_archiv\\_2022\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/pressemitteilungen_archiv_2022_node.html) (Stand: 01.11.2022).

ELLENBERG, H., H.E. WEBER, R. DÜLL, V. WIRTH, W. WERNER, D. PAULIßEN (2001): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 3rd edition, Verlag Erich Goltze, Göttingen, 262 S.

EU (2016): Verordnung (EU) 2016/2031 des Europäischen Parlaments und des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02016R2031-20191214&qid=1669805925324&from=de> (Stand: 01.11.2022)

EU (2019a): Durchführungsverordnung (EU) 2019/2072 der Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R2072&from=EN> (Stand: 01.11.2022)

EU (2019b): Delegierte Verordnung (EU) 2019/1702 der Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1702&qid=1669806093590&from=en>. (Stand: 01.11.2022)

FVA (2018): Holznutzung und Nährstoffnachhaltigkeit – Abschlussbericht zum Projekt „Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland (EnNa)“. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 101, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 375 S.

FVA (2022): Physiologische Nadelröte der Douglasie: Frosttrocknis. Waldschutz-Info 02/2022, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 6 S.

HAMMEL, K. und M. KENNEL (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90, Frank, München, 148 S.

HALLAS, T., H. PUHLMANN, G. KÄNDLER, P. HARTMANN (2017): So viel erzählen bodenkundliche Schlüsselgrößen über den Wald, *AFZ-DerWald*, 19, S. 45-47.

HARTMANN, P., H. BUBERL, H. PUHLMANN, J. SCHÄFFER, G. TREFZ-MALCHER, D. ZIRLEWAGEN, K. VON WILPERT (2016): Waldböden Südwestdeutschlands, Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald von 1989-1992 und 2006-2008, Verlag Kessel, Remagen-Oberwinter, 328 S.

LANGE, F., C. AMMER, G. LEITINGER, A. SELIGER und S. ZERBE (2022): Is Douglas Fir [*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco] Invasive in Central Europe? A Case Study From South-West Germany. *Frontiers in Forests and Global Change* 5, doi: 10.3389/ffgc.2022.844580.

- LARYSCH, E., D. F. STANGLER, M. NAZARI, T. SEIFERT und H.-P. KAHLE (2021): Xylem phenology and growth response of European beech, silver fir and Scots pine along an elevational gradient during the extreme drought year 2018. *Forests* 12, 75 S., doi: 10.3390/f12010075.
- LARYSCH, E., D. F. STANGLER, H. PUHLMANN, C. B. K. RATHGEBER, T. SEIFERT und H.-P. KAHLE (2022): The 2018 hot drought pushed conifer wood formation to the limit of its plasticity: Consequences for woody biomass production and tree ring structure. *Plant Biology*, doi: 10.1111/plb.13399.
- MENZEL, A. und P. FABIAN (1999): Growing season extended in Europe. *Nature (London)* 397, 659 S., doi: 10.1038/17709.
- MILLER, T. W., D. F. STANGLER, E. LARYSCH, H. HONER, H. PUHLMANN, D. SCHINDLER, C. JUNG, T. SEIFERT, A. RIGLING und H.-P. KAHLE (2022a): Later growth onsets or reduced growth rates: What characterises legacy effects at the tree-ring level in conifers after the severe 2018 drought? *Science of the total environment*, 158703, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158703.
- MILLER, T. W., D. F. STANGLER, E. LARYSCH, H. HONER, T. SEIFERT, H. PUHLMANN, G. VON ARX, P. FONTI, M. V. FONTI, C. B. RATHGEBER und H.-P. KAHLE (2022b): Longer and faster: Intra-annual growth dynamics of Douglas fir outperform Norway spruce and silver fir over wide climatic gradients. *Agricultural and Forest Meteorology* 321, 108970, doi: 10.1016/j.agrformet.2022.108970.
- MOSER, L., P. FONTI, U. BÜNTGEN, J. ESPER, J. LUTERBACHER, J. FRANZEN und D. C. FRANK (2010): Timing and duration of European larch growing season along altitudinal gradients in the Swiss Alps. *Tree Physiology* 30, S. 225–233, doi: 10.1093/treephys/tpp108.
- PAAR, U., A. GUCKLAND, I. DAMMANN, M. ALBRECHT & J. EICHHORN (2011): Häufigkeit und Intensität der Fruktifikation der Buche. *AFZ-DerWald*, 6, S. 26–29.
- PUHLMANN, H., P. HARTMANN, L. MAHLAU, K. VON WILPERT, A. HUBER, J. H. MOOS, L. JANSONE, L. DREWS (2021): Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung in den Wäldern Baden-Württembergs – Evaluierung der Umsetzung und der Wirksamkeit des Kalkungsprogramms in den Jahren 2010 bis 2019. *Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.). Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 104*, 274 S.
- PRISLAN, P., J. GRİČAR, K. ČUFAR, M. de LUIS, M. MERELA und S. ROSSI (2019): Growing season and radial growth predicted for *Fagus sylvatica* under climate change. *Climate Change* 153, S. 181–197, doi: 10.1007/s10584-019-02374-0.
- RATHGEBER, C. B. K., S. ROSSI und J.-D. BONTEMPS (2011): Cambial activity related to tree size in a mature silver-fir plantation. *Annals of Botany* 108, S. 429–438, doi: 10.1093/aob/mcr168
- RATHGEBER, C. B. K., H. E. CUNY und P. FONTI (2016): Biological basis of tree-ring formation: A crash course. *Frontiers in Plant Science* 7, 734 S., doi: 10.3389/fpls.2016.00734.
- ROSSI, S., T. ANFODILLO und R. MENARDI (2006): Trephor: a new tool for sampling microcores from tree stems. *IAWA Journal* 27, S. 89–97, doi: 10.1163/22941932-90000139
- ROSSI, S., A. DESLAURIERS, T. ANFODILLO und M. CARRER (2008): Age-dependent xylogenesis in timberline conifers. *New Phytologist* 177, S. 199–208, doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02235.x
- SADERI, S., C. B. K. RATHGEBER, P. ROZENBERG und M. FOURNIER (2019): Phenology of wood formation in larch (*Larix decidua* Mill.) trees growing along a 1000-m elevation gradient in the French Southern Alps. *Annals of Forest Science* 76, 214 S., doi: 10.1007/s13595-019-0866-3.
- THOMAS, F. M., A. RZEPECKI und W. WERNER (2022): Non-native Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in Central Europe: Ecology, performance and nature conservation. *Forest Ecology and Management* 506, 119956, doi: 10.1016/j.foreco.2021.119956.
- WELLBROCK N., A. BOLTE, H. FLESSA (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 200, *Thünen Berichte* 43, Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut. 550 S.

## ANLAGEN

### Anlage 1:

Baumarten nach Altersgruppen der Waldzustandserhebung 2022

| Baumart            | Bäume <61 Jahre | Bäume >60 Jahre | Bäume insgesamt |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Fichte             | 851             | 1.593           | 2.444           |
| Tanne              | 176             | 715             | 891             |
| Kiefer             | 73              | 244             | 317             |
| Douglasie          | 94              | 42              | 136             |
| Lärche             | 17              | 113             | 130             |
| Schwarzkiefer      | 0               | 3               | 3               |
| Thuja              | 2               | 0               | 2               |
| Buche              | 516             | 1.392           | 1.908           |
| Eiche              | 175             | 429             | 604             |
| Bergahorn          | 171             | 110             | 281             |
| Esche              | 101             | 178             | 279             |
| Hainbuche          | 67              | 40              | 107             |
| Roteiche           | 71              | 8               | 79              |
| Linde              | 30              | 27              | 57              |
| Spitzahorn         | 49              | 6               | 55              |
| Kirsche            | 31              | 16              | 47              |
| Rot-Erle           | 28              | 16              | 44              |
| Birke              | 26              | 8               | 34              |
| Vogelbeere         | 28              | 5               | 33              |
| Robinie            | 12              | 8               | 20              |
| Edelkastanie       | 10              | 4               | 14              |
| Ulme               | 7               | 6               | 13              |
| Pappel             | 12              | 0               | 12              |
| Feldahorn          | 6               | 5               | 11              |
| Weide              | 9               | 0               | 9               |
| Weiß-Erle          | 7               | 0               | 7               |
| Nuss               | 4               | 1               | 5               |
| Aspe               | 2               | 1               | 3               |
| sonstige Laubbäume | 2               | 0               | 2               |
| Elsbeere           | 0               | 2               | 2               |
| Tulpenbaum         | 1               | 0               | 1               |
| <b>Gesamt</b>      | <b>2.578</b>    | <b>4.972</b>    | <b>7.550</b>    |

**Anlage 2:**

Aufnahmedichte der Waldzustandserhebung von 1985 bis 2022

| <b>Jahr</b> | <b>Rasternetz</b>    | <b>Anzahl<br/>Aufnahmepunkte</b> | <b>Anzahl<br/>Probeebäume</b> |
|-------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 1985        | 4x4 km <sup>*1</sup> | 1.874                            | 41.102                        |
| 1986        | 4x4 km <sup>*1</sup> | 1.923                            | 42.166                        |
| 1987        | 8x8 km <sup>*2</sup> | 784                              | 17.025                        |
| 1988        | 8x8 km <sup>*2</sup> | 792                              | 17.183                        |
| 1989        | 4x4 km               | 703                              | 15.572                        |
| 1990        | 16x16 km             | 49                               | 1.088                         |
| 1991        | 4x4 km               | 799                              | 19.112                        |
| 1992        | 16x16 km             | 48                               | 1.152                         |
| 1993        | 16x16 km             | 48                               | 1.152                         |
| 1994        | 4x4 km               | 778                              | 18.515                        |
| 1995        | 16x16 km             | 47                               | 1.128                         |
| 1996        | 16x16 km             | 47                               | 1.128                         |
| 1997        | 4x4 km               | 796                              | 18.882                        |
| 1998        | 16x16 km             | 46                               | 1.104                         |
| 1999        | 16x16 km             | 47                               | 1.128                         |
| 2000        | 16x16 km             | 48                               | 1.145                         |
| 2001        | 4x4 km               | 727                              | 17.297                        |
| 2002        | 16x16 km             | 49                               | 1.170                         |
| 2003        | 16x16 km             | 49                               | 1.170                         |
| 2004        | 16x16 km             | 48                               | 1.146                         |
| 2005        | 8x8 km               | 275                              | 6.524                         |
| 2006        | 8x8 km               | 272                              | 6.463                         |
| 2007        | 8x8 km               | 272                              | 6.454                         |
| 2008        | 8x8 km               | 277                              | 6.590                         |
| 2009        | 8x8 km               | 279                              | 6.641                         |
| 2010        | 8x8 km               | 283                              | 6.743                         |
| 2011        | 8x8 km               | 283                              | 6.739                         |
| 2012        | 8x8 km               | 292                              | 6.951                         |
| 2013        | 8x8 km               | 294                              | 6.978                         |
| 2014        | 8x8 km               | 293                              | 6.964                         |
| 2015        | 8x8 km               | 294                              | 6.978                         |
| 2016        | 8x8 km               | 306                              | 7.256                         |
| 2017        | 8x8 km               | 304                              | 7.202                         |
| 2018        | 8x8 km               | 301                              | 7.130                         |
| 2019        | 8x8 km               | 309                              | 7.306                         |
| 2020        | 8x8 km               | 306                              | 7.191                         |
| 2021        | 8x8 km               | 305                              | 7.226                         |
| 2022        | 8x8 km               | 317                              | 7.550                         |

<sup>\*1</sup> Flächen-/ Punkt- und Traufaufnahme<sup>\*2</sup> Schwarzwald verdichtet auf 4x4 km

**Anlage 3:**

Schadstufenverteilung in Prozent von 1985 bis 2022

| Jahr | Schadstufe             |                            |                                |                          |                  |                                   |
|------|------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------------------|
|      | 0<br>un-<br>geschädigt | 1<br>schwach<br>geschädigt | 2<br>mittelstark<br>geschädigt | 3<br>stark<br>geschädigt | 4<br>abgestorben | 2 bis 4<br>deutlich<br>geschädigt |
| 1985 | 34                     | 39                         | 25                             | 2                        | 0                | 27                                |
| 1986 | 35                     | 42                         | 21                             | 2                        | 0                | 23                                |
| 1987 | 40                     | 39                         | 20                             | 2                        | 0                | 21                                |
| 1988 | 41                     | 42                         | 16                             | 1                        | 0                | 17                                |
| 1989 | 40                     | 40                         | 18                             | 2                        | 0                | 20                                |
| 1990 | 37                     | 44                         | 17                             | 2                        | 0                | 19                                |
| 1991 | 39                     | 44                         | 16                             | 1                        | 0                | 17                                |
| 1992 | 26                     | 50                         | 21                             | 2                        | 1                | 24                                |
| 1993 | 23                     | 46                         | 27                             | 3                        | 1                | 31                                |
| 1994 | 35                     | 40                         | 23                             | 2                        | 0                | 25                                |
| 1995 | 29                     | 44                         | 25                             | 2                        | 0                | 27                                |
| 1996 | 25                     | 40                         | 34                             | 1                        | 0                | 35                                |
| 1997 | 40                     | 41                         | 18                             | 1                        | 0                | 19                                |
| 1998 | 32                     | 44                         | 23                             | 1                        | 0                | 24                                |
| 1999 | 31                     | 44                         | 24                             | 1                        | 0                | 25                                |
| 2000 | 38                     | 38                         | 23                             | 1                        | 0                | 24                                |
| 2001 | 29                     | 42                         | 27                             | 2                        | 0                | 29                                |
| 2002 | 37                     | 39                         | 22                             | 2                        | 0                | 24                                |
| 2003 | 26                     | 45                         | 28                             | 1                        | 0                | 29                                |
| 2004 | 23                     | 37                         | 36                             | 4                        | 0                | 40                                |
| 2005 | 19                     | 38                         | 40                             | 3                        | 0                | 43                                |
| 2006 | 23                     | 32                         | 40                             | 5                        | 0                | 45                                |
| 2007 | 22                     | 38                         | 36                             | 4                        | 0                | 40                                |
| 2008 | 25                     | 40                         | 32                             | 3                        | 0                | 35                                |
| 2009 | 26                     | 32                         | 38                             | 4                        | 0                | 42                                |
| 2010 | 32                     | 33                         | 32                             | 3                        | 0                | 35                                |
| 2011 | 38                     | 29                         | 30                             | 3                        | 0                | 33                                |
| 2012 | 26                     | 38                         | 33                             | 3                        | 0                | 36                                |
| 2013 | 33                     | 32                         | 32                             | 3                        | 0                | 35                                |
| 2014 | 24                     | 34                         | 39                             | 3                        | 0                | 42                                |
| 2015 | 29                     | 35                         | 33                             | 3                        | 0                | 36                                |
| 2016 | 30                     | 33                         | 33                             | 3                        | 1                | 37                                |
| 2017 | 31                     | 38                         | 28                             | 3                        | 0                | 31                                |
| 2018 | 25                     | 37                         | 33                             | 4                        | 1                | 38                                |
| 2019 | 20                     | 37                         | 38                             | 4                        | 1                | 43                                |
| 2020 | 20                     | 34                         | 40                             | 4                        | 2                | 46                                |
| 2021 | 21                     | 37                         | 37                             | 4                        | 1                | 42                                |
| 2022 | 17                     | 37                         | 40                             | 5                        | 1                | 46                                |

**Anlage 4:**

Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2022 in den Landkreisen

| Landkreis                         | Anzahl aufgenommener<br>Bäume | bis 60 Jahre Anteil<br>Schadstufe 2-4 [%] | ab 61 Jahre Anteil<br>Schadstufe 2-4 [%] | mittl. Nadel-/<br>Blattverlust gesamt [%] | 95%-Konfidenz-<br>intervall (+/-) | Verhältnis<br>Nadelholz:Laubholz [%] | Verhältnis<br>bis 60 : ab 61 Jahre [%] | mittleres Probebaum-<br>alter |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|
| Alb-Donau-Kreis                   | 192                           | k.A.                                      | 68                                       | 31,5                                      | 1,50                              | 36:64                                | 17:83                                  | 95                            |
| Baden-Baden                       | 48                            | k.A.                                      | k.A.                                     | 30,0                                      | 3,88                              | k.A.                                 | k.A.                                   | k.A.                          |
| Biberach                          | 264                           | 8                                         | 63                                       | 23,9                                      | 1,99                              | 69:31                                | 56:44                                  | 60                            |
| Bodenseekreis                     | 96                            | k.A.                                      | 88                                       | 31,9                                      | 3,52                              | 26:74                                | 31:69                                  | 76                            |
| Böblingen                         | 168                           | 27                                        | 89                                       | 36,8                                      | 3,07                              | 20:80                                | 40:60                                  | 99                            |
| Breisgau Hochschwarzwald/Freiburg | 306                           | 25                                        | 66                                       | 30,7                                      | 2,05                              | 68:32                                | 31:69                                  | 93                            |
| Calw                              | 264                           | 5                                         | 52                                       | 21,9                                      | 1,80                              | 59:41                                | 46:54                                  | 74                            |
| Emmendingen                       | 162                           | 24                                        | 82                                       | 31,5                                      | 2,25                              | 60:40                                | 33:67                                  | 80                            |
| Enzkreis                          | 192                           | k.A.                                      | 76                                       | 43,2                                      | 3,30                              | 7:93                                 | 0:100                                  | 109                           |
| Esslingen                         | 120                           | k.A.                                      | 78                                       | 33,9                                      | 2,59                              | 34:66                                | 16:84                                  | 90                            |
| Freiburg im Breisgau              | 24                            | k.A.                                      | k.A.                                     | 23,1                                      | 7,87                              | k.A.                                 | k.A.                                   | k.A.                          |
| Freudenstadt                      | 378                           | 4                                         | 62                                       | 30,3                                      | 1,71                              | 82:18                                | 20:80                                  | 105                           |
| Göppingen                         | 120                           | k.A.                                      | 78                                       | 32,8                                      | 2,21                              | 64:36                                | 20:80                                  | 78                            |
| Heidelberg                        | -                             | -                                         | -                                        | -                                         | -                                 | -                                    | -                                      | -                             |
| Heidenheim                        | 120                           | k.A.                                      | 79                                       | 28,3                                      | 3,15                              | 45:55                                | 40:60                                  | 81                            |
| Heilbronn                         | 96                            | k.A.                                      | 75                                       | 29,5                                      | 2,89                              | 2:98                                 | 25:75                                  | 85                            |
| Heilbronn-Stadt                   | 24                            | k.A.                                      | k.A.                                     | 45,8                                      | 6,29                              | k.A.                                 | k.A.                                   | k.A.                          |
| Hohenlohekreis                    | 168                           | 37                                        | 91                                       | 32,8                                      | 3,39                              | 8:92                                 | 68:32                                  | 57                            |
| Karlsruhe                         | 264                           | 32                                        | 54                                       | 26,3                                      | 1,70                              | 33:67                                | 52:48                                  | 66                            |
| Karlsruhe-Stadt                   | 24                            | k.A.                                      | k.A.                                     | 31,0                                      | 5,37                              | k.A.                                 | k.A.                                   | k.A.                          |
| Konstanz                          | 114                           | k.A.                                      | 77                                       | 34,3                                      | 2,42                              | 27:73                                | 16:84                                  | 101                           |
| Lörrach                           | 235                           | 8                                         | 68                                       | 27,1                                      | 1,88                              | 31:69                                | 34:66                                  | 84                            |
| Ludwigsburg                       | 66                            | k.A.                                      | 70                                       | 35,7                                      | 4,19                              | 26:74                                | 0:100                                  | 87                            |
| Main-Tauber-Kreis                 | 240                           | 23                                        | 86                                       | 29,6                                      | 1,86                              | 18:82                                | 38:62                                  | 81                            |
| Mannheim                          | -                             | -                                         | -                                        | -                                         | -                                 | -                                    | -                                      | -                             |
| Neckar-Odenwald-Kreis             | 288                           | 19                                        | 81                                       | 35,3                                      | 2,15                              | 28:72                                | 22:78                                  | 92                            |
| Ortenaukreis                      | 574                           | 13                                        | 74                                       | 29,6                                      | 1,54                              | 71:29                                | 44:56                                  | 74                            |
| Ostalbkreis                       | 264                           | 29                                        | 80                                       | 34,9                                      | 2,24                              | 64:36                                | 21:79                                  | 86                            |
| Pforzheim                         | 24                            | k.A.                                      | k.A.                                     | 19,2                                      | 8,02                              | k.A.                                 | k.A.                                   | k.A.                          |
| Rastatt                           | 192                           | 45                                        | 56                                       | 32,8                                      | 2,74                              | 69:31                                | 31:69                                  | 101                           |
| Ravensburg                        | 288                           | 13                                        | 76                                       | 22,7                                      | 1,85                              | 72:28                                | 65:35                                  | 52                            |
| Rems-Murr-Kreis                   | 120                           | k.A.                                      | 90                                       | 34,8                                      | 3,96                              | 61:39                                | 20:80                                  | 91                            |
| Reutlingen                        | 192                           | 0                                         | 53                                       | 24,7                                      | 1,86                              | 36:64                                | 31:69                                  | 81                            |
| Rhein-Neckar-Kreis                | 216                           | 38                                        | 75                                       | 32,2                                      | 1,89                              | 29:71                                | 28:72                                  | 95                            |
| Rottweil                          | 216                           | 26                                        | 68                                       | 31,3                                      | 2,44                              | 83:17                                | 32:68                                  | 83                            |
| Schwäbisch Hall                   | 168                           | k.A.                                      | 91                                       | 34,1                                      | 2,45                              | 35:65                                | 29:71                                  | 87                            |
| Schwarzwald-Baar-Kreis            | 259                           | 4                                         | 61                                       | 29,7                                      | 2,04                              | 94:6                                 | 22:78                                  | 98                            |
| Sigmaringen                       | 288                           | 15                                        | 86                                       | 27,2                                      | 1,73                              | 91:9                                 | 56:44                                  | 62                            |
| Stuttgart                         | -                             | -                                         | -                                        | -                                         | -                                 | -                                    | -                                      | -                             |
| Tübingen                          | 144                           | k.A.                                      | 87                                       | 37,6                                      | 3,12                              | 45:55                                | 34:66                                  | 86                            |
| Tuttlingen                        | 168                           | k.A.                                      | 52                                       | 25,6                                      | 1,88                              | 80:20                                | 25:75                                  | 84                            |
| Ulm                               | 24                            | k.A.                                      | k.A.                                     | 29,4                                      | 7,38                              | k.A.                                 | k.A.                                   | k.A.                          |
| Waldshut                          | 257                           | 15                                        | 64                                       | 35,0                                      | 2,93                              | 54:46                                | 30:70                                  | 94                            |
| Zollernalbkreis                   | 183                           | 10                                        | 73                                       | 28,2                                      | 1,77                              | 36:64                                | 48:52                                  | 69                            |

k.A.: keine Angabe für Landkreise mit weniger als 50 Bäumen in der Stichprobe der Waldzustandserhebung