



Forstliche Versuchs-  
und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg

# WALDZUSTANDSBERICHT

# 2023



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LÄNDLICHEN RAUM  
UND VERBRAUCHERSCHUTZ



## VORWORT



Liebe Leserinnen und Leser,

die intensive Beobachtung des Gesundheitszustands unserer Wälder erlangt vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels eine immer höhere Bedeutung. Die Entwicklung der Nadel- und Blattverluste der Waldbäume, der Mortalitätsrate und der Fruchtbildung sind wichtige Symptome, deren Ursachen zwar vielfältig sind, aber direkt von den Auswirkungen des Klimawandels abhängen.

So hat der Klima-Sachverständigenrat des Landes einen durchschnittlichen 10-jährigen Anstieg der Lufttemperatur von 0,4 °C bei einer gleichzeitigen Abnahme der jährlichen Niederschläge um 40 mm in Baden-Württemberg festgestellt. Dies sind nur zwei Beispiele für die wachsende Dynamik des Klimawandels, die eine direkte Auswirkung auf die Wälder haben.

Der Sommer 2023 gehörte zu den wärmsten seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Die Niederschläge im Frühjahr und vergleichsweise häufige Regenereignisse im Sommer haben jedoch zu einer Regeneration der Wälder beigetragen. Dies zeigt der Rückgang des mittleren Nadel- und Blattverlustes um 1,5 Prozentpunkte gegenüber dem Vorjahr auf aktuell 26,9 Prozent. Auch der Anteil an deutlich geschädigter Waldfläche hat sich um 2 Prozentpunkte auf 44 Prozent leicht verbessert.

Diese leichte Regeneration der Wälder darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Nadel- und Blattverluste der Bäume in Bezug auf den Langzeittrend seit dem Jahr 1985 weiterhin auf einem sehr hohen Niveau liegen.

Erfreulich ist der Rückgang der Kronenverlichtung bei den jüngeren Bäumen mit einem Alter unter 60 Jahren von 2,5 Prozentpunkten auf nun 17,3 Prozent.

Unter den häufigsten Baumarten zeigen die Eiche (4,5 Prozentpunkte), die Tanne (2,6 Prozentpunkte), die Douglasie (2,4 Prozentpunkte), die Kiefer (1,6 Prozentpunkte) und der Bergahorn (1,3 Prozentpunkte) eine deutliche Verbesserung des Kronenzustands.

Hingegen hat sich der Zustand der Buche, der Fichte und der Esche kaum verändert.

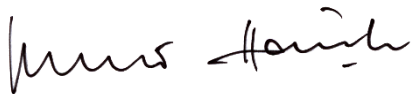
Wir wissen, was zu tun ist, um den Waldzustand zu verbessern:

Der Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase muss deutlich zurückgefahren und gleichzeitig müssen die vorhandenen Kohlenstoffsenken gefördert werden. Einer unserer wichtigsten Senken sind die Wälder, die über ihre „Sonnenkollektoren“ die Sonnenenergie zur Bildung von Biomasse nutzen und dabei Kohlenstoff langfristig im Holz speichern. Wird das Holz aus den baden-württembergischen Wäldern später zum Beispiel in Häusern verbaut, wird der Kohlenstoff noch langfristiger gespeichert.

Jedoch können nur gesunde Wälder, die bestmöglich an die Folgen des Klimawandels angepasst sind, als Klimaschützer wirken. Die Entwicklung vielfältiger und strukturreicher Wälder mit vitalen Einzelbäumen muss aktiv gefördert werden. Die Mammutaufgabe des Waldumbaus können wir nur mit einer Pflege und Bewirtschaftung der Wälder bewältigen.

Die Landesregierung hat für die Bewältigung dieser vielfältigen kurz- und mittelfristigen Aufgaben im Jahr 2020 den Prozess der Waldstrategie gestartet. Die Ziele der Waldstrategie müssen weiter mit Hochdruck verfolgt werden, damit wir unsere Wälder und deren vielfältige Leistungen für uns als Gesellschaft und für die Forstbetriebe erhalten.

Stuttgart, im Oktober 2023



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
	Regionale Verteilung	7
	Abgestorbene und ausgefallene Bäume	8
	Vergilbung	10
	Schadstufen	10
	Fruktifikation	11
	Fichte	13
	Tanne	15
	Kiefer	16
	Douglasie	17
	Sonstige Nadelbäume	18
	Buche	18
	Eiche	19
	Bergahorn	21
	Esche	22
	Sonstige Laubbäume	23
<b>2</b>	<b>VITALITÄT DER BUCHE – AKTUELLE ENTWICKLUNGEN UND AUSBLICK</b>	<b>24</b>
	Warum ist die Buche zum Sorgenkind geworden?	24
	Tut sich die Buche schwerer mit einer Anpassung als andere Baumarten?	24
	Was beobachten wir?	25
	Wie ist die Buchenverjüngung betroffen?	26
	Wie reagieren Buchen nach Sommertrockenheit auf ausgiebige Niederschläge?	26
	Wird das Absterben durch pilzbedingte Holzzersetzung beschleunigt?	27
	Wie schnell schreitet die Pilzfäule voran?	27
	Wie geht es weiter?	28
<b>3</b>	<b>WITTERUNG</b>	<b>29</b>
	Jahr 2022	29
	Jahr 2023	31
<b>4</b>	<b>STOFFEINTRÄGE UND BODENZUSTAND</b>	<b>33</b>
	Schwefeleintrag	33
	Stickstoffeintrag	34
	Erholung vom sauren Regen	34
	Bodenversauerung und Stickstoffeutrophierung	35
<b>5</b>	<b>WALDBÖDEN ALS METHANSENKE – BAKTERIEN ALS SCHLÜSSEL ZUM KLIMASCHUTZ</b>	<b>36</b>
	Versuchsflächen	36
	Bodengasmonitoring	37
	Steuergrößen des Methanabbaus	38
	Langfristige Trends des Methanabbaus	38
	Einflussfaktoren auf die Methansenkenfunktion	39
	Fazit und Ausblick	40



<b>6</b>	<b>FORSTLICHES UMWELTMONITORING</b>	<b>41</b>
	Methodischer Aufbau	42
	Internationale Einbindung	43
	Neues Bodenfaunamonitoring	43
	Waldzustandserhebung	44
	Durchführung der Waldzustandserhebung 2023	45
	Qualitätssicherung	45
	Auswertungsmethoden	46
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT</b>	<b>47</b>
	Leichte Erholung – jedoch weiterhin starke Schäden	47
	Vitalität der Buche	48
	Methansenke Waldboden	48
	Fazit	49
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>51</b>
	<b>ANLAGEN</b>	<b>53</b>

## 1 ERGEBNISSE DER WALDZUSTANDSERHEBUNG

Die Auswirkungen des Klimawandels sind am Zustand der Wälder mittlerweile deutlich zu erkennen. Seit mehreren Jahren wird die Vitalität der Wälder Baden-Württembergs in hohem Maße von extremen Witterungsbedingungen bestimmt. Langanhaltende und häufig wiederkehrende sommerliche Hitze- und Trockenphasen, eine verlängerte Vegetationszeit mit einhergehendem Spätfrostisiko, eine unvollständige Auffüllung der Bodenwasserspeicher im Winterhalbjahr sowie sinkende Grundwasserpegel führen zu erheblichen Vitalitätsverlusten der heimischen Wälder. Aus heutiger Sicht kann der „Jahrhundertsommer“ 2003 als ein Vorbote für klimabedingte Veränderungen im Wald angesehen werden. Spätestens nach den ausgesprochen trockenen und heißen Jahren 2018 bis 2020 und der erneut heißen Sommerwitterung 2022 sind die Folgen des fortschreitenden Klimawandels in den Wäldern vieler Regionen des Landes unübersehbar (Abb. 1).

Durch regelmäßige Niederschläge im Juli und vor allem im August blieben im Sommer 2023 lange Trockenperioden weitgehend aus, so dass in diesem Jahr vergleichsweise wenig akute

Trockenstresssymptome in den Wäldern auftraten. Zudem begünstigten ausreichende Niederschläge zu Beginn der Vegetationszeit die Regeneration der Bäume nach dem sehr trockenen Vorjahr, so dass sich teils sehr große und vitale Blätter ausbilden konnten. Profitieren konnte davon besonders die Baumart Eiche, die vielerorts eine gute Belaubung der Baumkronen entwickelte.

Auch wenn das Jahr 2023 von vergleichsweise günstigen Witterungsbedingungen geprägt ist, bleibt die Vitalitätsschwäche der Wälder in weiten Teilen Baden-Württembergs dennoch weiterhin im Kronenzustand erkennbar. Besonders gravierend ist das anhaltend hohe Schadholzaufkommen beim Nadelholz, welches seit einigen Jahren vor allem durch die massive Verbreitung verschiedener Borkenkäferarten in den Wäldern Baden-Württembergs zu verzeichnen ist. Die Käferpopulationen befinden sich nach wie vor auf einem sehr hohen Niveau. Auch im laufenden Jahr kam es zu einer starken Vermehrung der Borkenkäfer an Fichte und Tanne und zu entsprechend hohen Schadholzmengen.



**Abb. 1:** Aufnahme mit einer Drohne im Karlsruher Hardwald, August 2023 (Foto: S. Meinung).





*Abb. 2: Probebäume der Waldzustandserhebung der Baumart Fichte mit unterschiedlicher Kronenverlichtung (Foto: S. Meining).*

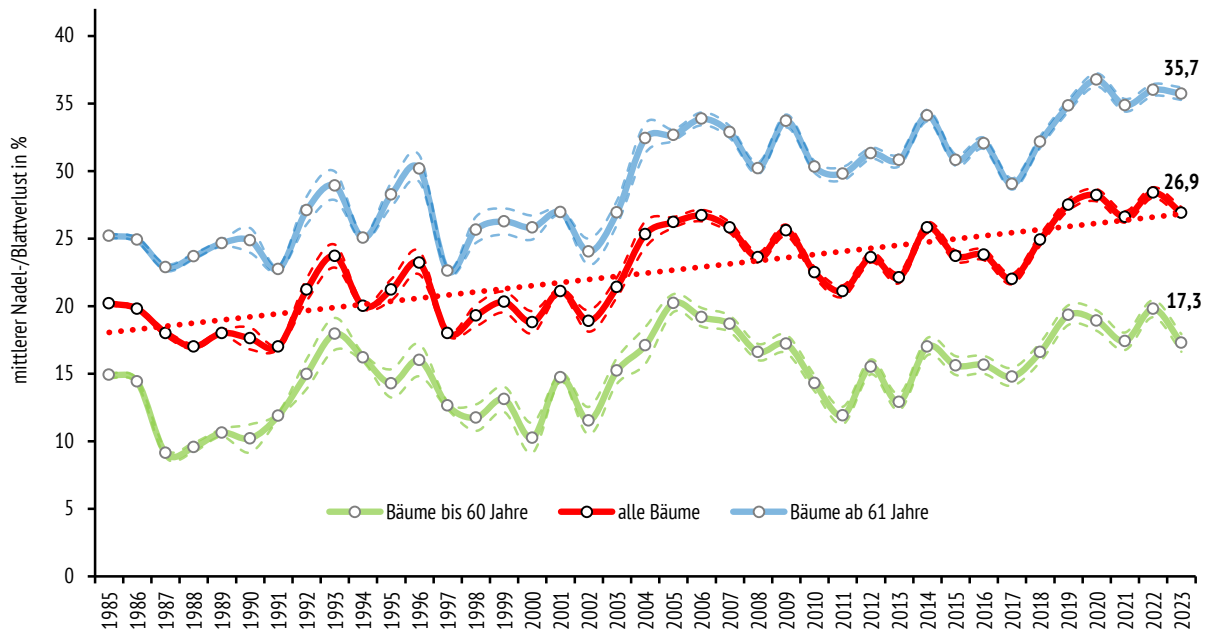
## Nadel-/Blattverlust

Die Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2023 zeigen eine leichte Verbesserung des Kronenzustandes im Vergleich zum Vorjahr, jedoch bleibt der Schädigungsgrad der Wälder weiterhin sehr hoch. Die mittlere Kronenverlichtung verringert sich zwar um 1,5 Prozentpunkte auf 26,9 Prozent (Abb. 3). Seit Beginn der Waldzustandserhebung wurde aber lediglich in den Jahren 2019, 2020 und 2022 eine höhere Kronenverlichtung der Wälder Baden-Württembergs festgestellt. Die Auswirkungen der vergangenen Trockenjahre, wie beispielsweise ein hoher Anteil von Trockenästen, verkürzte Jahrestriebe und eine gestörte Verzweigungsstruktur, sind nach wie vor in den Baumkronen zu erkennen (Abb. 2). Zusätzlich wirken verschiedene Schadorganismen wie rinden- und holzbrütende Insekten, blattfressende Raupen- und Käferarten sowie verschiedene Pilze schadensverstärkend auf den Kronenzustand der Bäume.

Erfreulich ist in diesem Jahr besonders der vergleichsweise gute Vitalitätszustand der jüngeren Bäume, deren mittlere Kronenverlichtung um 2,5 Prozentpunkte auf 17,3 Prozent zurückge-

gangen ist. Dagegen bleibt die Kronenverlichtung der älteren Bäume mit 35,7 Prozent im Vergleich zum Vorjahr nahezu konstant. Die jüngeren Bäume profitierten im besonderen Maße von der ausreichenden Feuchtigkeit des Oberbodens, während tiefere Bodenschichten und der Hauptwurzelraum älterer Bäume auch in diesem Sommer noch länger trocken blieben. Der Kronenzustand älterer Buchen wird dieses Jahr zudem durch die wiederholte starke Fruchtausbildung beeinträchtigt.

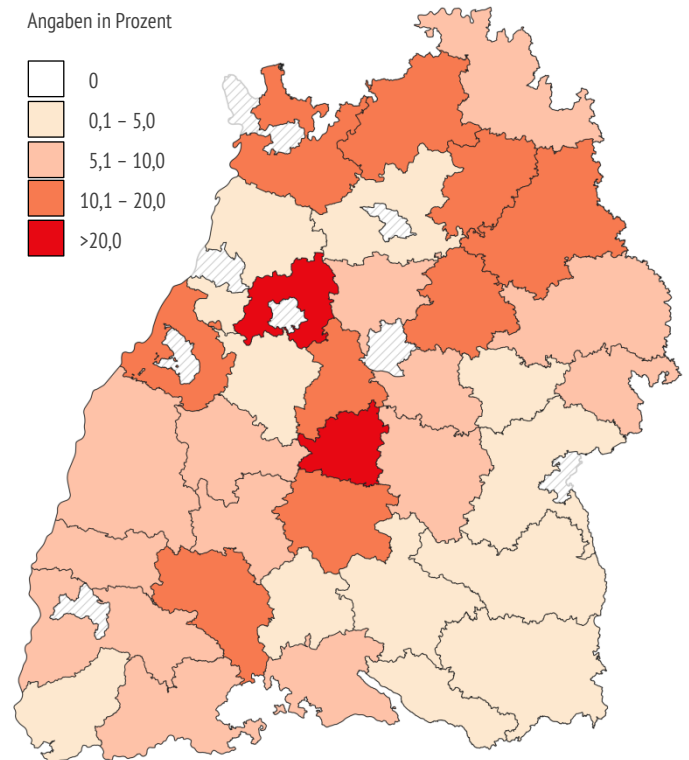
Die Waldzustandserhebung untersucht den Kronenzustand der Waldbäume. Dazu werden auf einem systematisch angelegten Stichprobennetz Probebäume ausgewählt und dauerhaft markiert. Im Jahr 2023 wurden in Baden-Württemberg 320 Stichprobenpunkte mit insgesamt 7.661 Bäumen untersucht (zur Methodik siehe Kapitel „Forstliches Umweltmonitoring“ ab Seite 41).



**Abb. 3:** Entwicklung des mittleren Nadel-/Blattverlustes aller Bäume sowie der Altersgruppen „bis 60 Jahre“ und „ab 61 Jahre“. Die gepunktete Linie stellt den linearen Trend des Nadel-/Blattverlustes aller Bäume dar. Die gestrichelten Linien geben den jeweiligen Vertrauensbereich von 95 Prozent an.

### Regionale Verteilung

Diesjährige Schadensschwerpunkte sind in Abbildung 4 zu erkennen, welche die Anteile der Bäume ab einer Kronenverlichtung von 50 Prozent für jeden Landkreis dargestellt. Besonders betroffen sind der Enzkreis und der Kreis Tübingen, in denen 27,1 bzw. 20,1 Prozent der Bäume eine derart hohe Kronenverlichtung aufweisen. In beiden Landkreisen wird das Ergebnis maßgeblich vom Zustand der untersuchten Buchen und Eichen geprägt. Ein hoher Schädigungsgrad der Bäume findet sich auch in Teilen des von Laubholz geprägten Neckarlandes sowie weiteren Teilen der Schwäbischen Alb und des Odenwaldes. Während der hohe Schädigungsgrad der Wälder im Landkreis Rastatt im Wesentlichen auf die starke Belastung der Bäume in der Oberrheinebene zurückzuführen ist, geht der hohe Schädigungsgrad im Schwarzwald-Baar-Kreis vor allem auf den schlechten Kronenzustand der dort aufgenommenen Fichten und Tannen zurück.



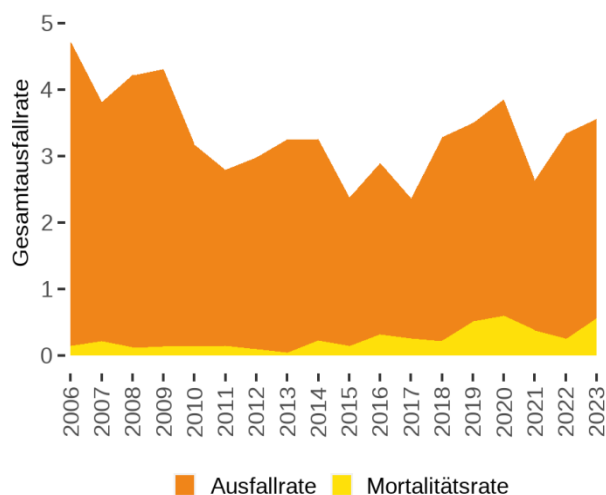
**Abb. 4:** Anteil an Bäumen mit einer Kronenverlichtung von mindestens 50 Prozent für jeden Landkreis in Baden-Württemberg. Landkreise mit weniger als 50 Bäumen in der Stichprobe wurden nicht berücksichtigt (grau gestreift).



## Abgestorbene und ausgefallene Bäume

Im Jahr 2023 ist der Anteil abgestorbener und aus der Stichprobe der Waldzustandserhebung ausgefallener Bäume im Vergleich zum Vorjahr deutlich angestiegen. Mit einer Mortalitätsrate von 0,6 Prozent liegt dieser Wert doppelt so hoch wie das langjährige Mittel von 0,3 Prozent, das ab 2006 für das einheitliche 8x8 km-Aufnahmeraster berechnet wurde (Abb. 5). Die Mortalitätsrate gibt den Prozentsatz der Bäume an, die seit der letzten Erhebung abgestorben sind, aber noch immer auf den Stichprobenpunkten der Waldzustandserhebung stehen.

Neben der Mortalitätsrate werden bei der Waldzustandserhebung als Ausfallrate auch alle Bäume erfasst, die seit der letzten Erhebung aus dem Wald entfernt wurden (planmäßige und zufällige Nutzung) oder aus anderen Gründen wie Windwurf oder Kronenbruch nicht mehr aufgenommen werden können. Zusammen mit der Mortalitätsrate beträgt die Gesamtausfallrate dieses Jahr 4,1 Prozent. Besonders hoch ist die Ausfallrate mit 13,4 Prozent bei der Baumart Esche, die seit einigen Jahren landesweit von dem pilzlichen Erreger des Eschentriebsterbens zum Absterben gebracht wird. Auch die von Borkenkäfern stark



**Abb. 5:** Anteil der Gesamtausfallrate unterteilt in Mortalitätsrate und Ausfallrate (berechnet auf dem einheitlichen 8x8 km-Netz ab 2006).

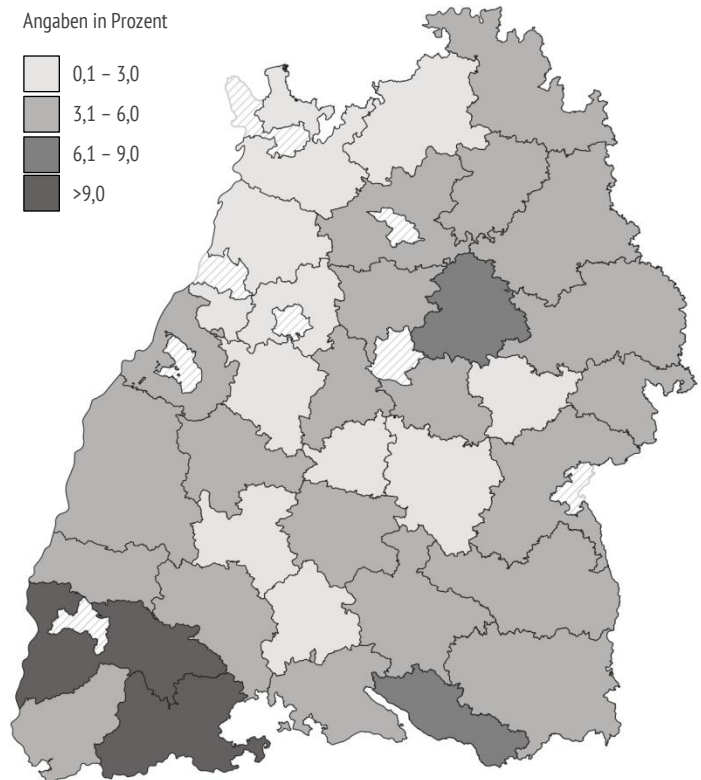
geschädigten Fichten und Tannen weisen mit 5,2 bzw. 5,0 Prozent überdurchschnittliche Ausfallraten auf (Abb. 6), während diese für Buchen (3,0 Prozent), Eichen (2,5 Prozent) und Kiefern (2,0 Prozent) vergleichsweise gering sind.



**Abb. 6:** Von Borkenkäfern befallene Fichten im Südschwarzwald, Landkreis Waldshut (Foto: M. Kautz).

In den letzten Jahren ist der Anteil an stehendem Totholz in den Wäldern Baden-Württembergs deutlich angestiegen. Insgesamt 1,6 Prozent aller Probestämme der diesjährigen Waldzustandserhebung sind stehend tote Bäume mit Trockenreisig in der Baumkrone. Diese Bäume gehen mit 100 Prozent Nadel-/Blattverlust in die Bewertung des Waldzustandes ein.

In der regionalen Analyse fällt auf, dass im Mittel der letzten fünf Jahre vor allem im Südschwarzwald überdurchschnittlich hohe Ausfallraten zu verzeichnen waren (Abb. 7). Dies wurde hauptsächlich durch massiven Borkenkäferbefall ausgelöst, der infolge der extrem heißen und trockenen Witterungsbedingungen zu erheblichen Schäden in Fichten- und Tannenbeständen führte. Im Betrachtungszeitraum 2018 bis 2023 finden sich die höchsten Ausfallraten mit durchschnittlich 10,6 bzw. 11,3 Prozent in den Landkreisen Breisgau-Hochschwarzwald und Waldshut. Auch in Teilen des Schwäbisch-Fränkischen Waldes ist aufgrund von Käferbefall eine erhöhte Ausfallrate festzustellen. Regionen mit einem hohen Anteil an Laubhölzern, wie sie beispielsweise auf der Schwäbischen Alb und im Odenwald vorkommen, verzeichnen hingegen in den letzten fünf Jahren vergleichsweise geringe Ausfälle. Eine Ausnahme bildet der Bodenseekreis, wo insbesondere im Jahr 2023 die Ausfallrate aufgrund des Eschentriebsterbens stark erhöht war.



**Abb. 7:** Mittlere Ausfallrate je Landkreis für den Zeitraum 2018 bis 2023. Landkreise mit weniger als 50 Bäumen in der Stichprobe wurden nicht berücksichtigt (grau getreift).

### Waldstrategie Baden-Württemberg 2050: Holzkonservierung als Baustein des Krisenmanagements

Durch den Klimawandel steigen die Jahresdurchschnittstemperaturen bereits heute erkennbar an, Trockenheits- und Dürreperioden werden zukünftig länger und intensiver. Es ist deswegen davon auszugehen, dass Waldschäden aufgrund von Borkenkäferbefall oder Trockenstress weiter zunehmen werden.

Vor diesem Hintergrund erarbeitet das Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz derzeit eine **Konzeption zur Holzkonservierung**, um den Umgang mit höheren Schadholzaufkommen optimieren zu können. Das Projekt, welches unter dem Dach der Waldstrategie 2050 durchgeführt wird, richtet den Blick dabei insbesondere auf eine verbesserte Trocken- und Nasslagerung von Holz. Durch diese Maßnahmen ist es möglich, das anfallende Schadholz für einen längeren Zeitraum konservierend zu lagern und die wertvolle Ressource Holz zu erhalten.

Unter Beteiligung verschiedener Akteure aus Wissenschaft, Politik und Praxis wurde der aktuelle Stand der Holzkonservierung bewertet und eine Bestandsanalyse erstellt, um die bereits bestehenden Kapazitäten zu erfassen. Demnach stehen bei den unteren Forstbehörden im Land derzeit Kapazitäten zur Nasslagerung in Höhe von rund 520.000 Festmetern auf 51 Lagerplätzen zur Verfügung. In einem nächsten Schritt sollen eine Potentialanalyse sowie eine kartenmäßige Erfassung geeigneter Flächen für die Holzkonservierung erfolgen. Dadurch können Waldbesitzende und Forstbetriebe konkret und praxisnah beim Krisenmanagement im Wald unterstützt werden.



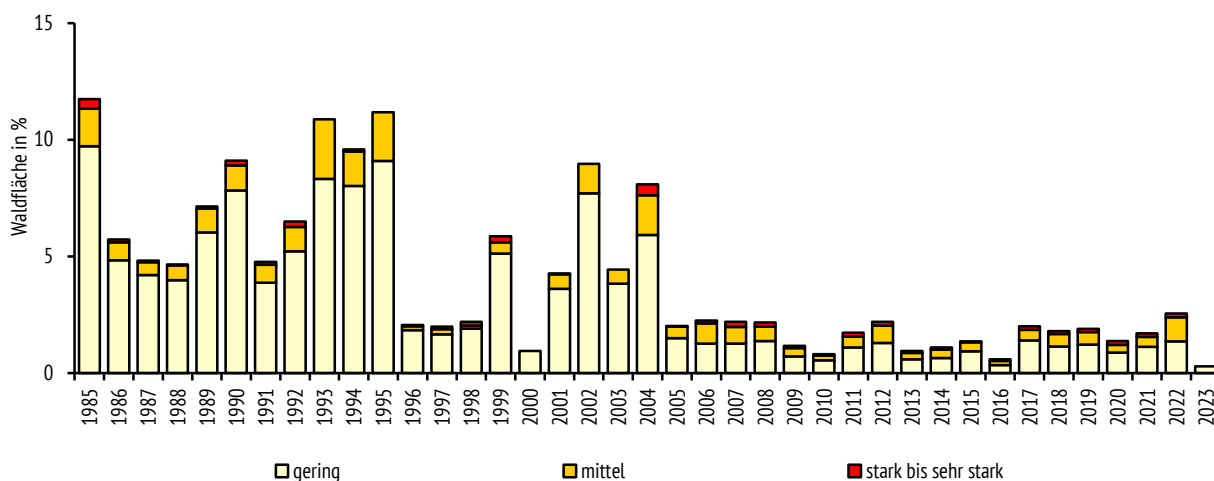
## Vergilbung

Vergilbte Nadeln und Blättern sind häufig auf eine Störung des Nährstoffhaushaltes der Bäume zurückzuführen. Insbesondere auf basenarmen Standorten des Schwarzwaldes und des Odenwaldes kam es bis in die 2000er Jahre zu einer typischen Nadelvergilbung von Fichten und Tannen, die meist durch einen Mangel an Magnesium hervorgerufen wurde. Dabei zeigen sich in der Regel zunächst Verfärbungen an den Spitzen der älteren Nadeljahrgänge. Im späteren Verlauf verfärben sich auch die jüngeren Nadeln, während die älteren Nadeln absterben und vom Baum abfallen. Vergilbungsercheinungen können auch in und nach sommerlichen Trockenphasen verstärkt auftreten, wenn die Bäume nicht genügend Wasser und darin gelöste Nährstoffe aufnehmen können.

In den letzten Jahrzehnten hat die Vergilbung in den Wäldern Baden-Württembergs stark abgenommen, was auf eine bessere Verfügbarkeit des Nährelementes Magnesium hindeutet. Dazu beigetragen haben im Wesentlichen deutlich verringerte Säureeinträge aus der Luft sowie durchgeführte Bodenschutzkalkungen im Wald. Im Jahr 2023 sind lediglich 0,5 Prozent der Waldfläche Baden-Württembergs, und damit so wenig wie noch nie seit Beginn der Waldzustandserhebung, von meist geringen Vergilbungsercheinungen betroffen (Abb. 8).

## Schadstufen

Klassifiziert man die beobachteten Kronenschäden in Schadstufen (Abb. 9), so zeigt sich für das Jahr 2023 im Vergleich zum Vorjahr eine leichte Abnahme der Schäden. Der Schädigungsgrad der Wälder ist jedoch weiterhin außerordentlich hoch. Insgesamt sind aktuell 44 Prozent der Waldfläche Baden-Württembergs deutlich geschädigt (Schadstufen 2 bis 4), was einem Rückgang um zwei Prozentpunkte im Vergleich zum Vorjahr entspricht. Gleichzeitig ist der Anteil an ungeschädigter Waldfläche (Schadstufe 0) von 17 auf 22 Prozent angestiegen. Der Anteil an schwach geschädigter Waldfläche (Schadstufe 1) ist im Vergleich zum Vorjahr um drei Prozentpunkte auf 34 Prozent gesunken. In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich der Zustand der Wälder in Baden-Württemberg erheblich verschlechtert, wie die zeitliche Entwicklung der Schadstufenverteilung seit Beginn der Waldzustandserhebung zeigt. In den Jahren nach 2003 erhöhte sich der Anteil der deutlich geschädigten Waldfläche (Schadstufen 2 bis 4). Seither liegt insbesondere der Anteil an stark geschädigter Waldfläche (Schadstufe 3) auf bisher unbekanntem, hohem Niveau. Infolge der Trockenjahre 2018 bis 2020 verschärfte sich die Situation der Wälder zunehmend, mit Höchstwerten der bisher festgestellten geschädigten Waldfläche. Trotz der diesjährigen leichten Erholung hält der kritische Zustand der Wälder Baden-Württembergs weiterhin an.



**Abb. 8:** Anteil der vergilbten Waldfläche in Baden-Württemberg getrennt nach den Erhebungsstufen gering, mittel und stark bis sehr stark vergilbt.

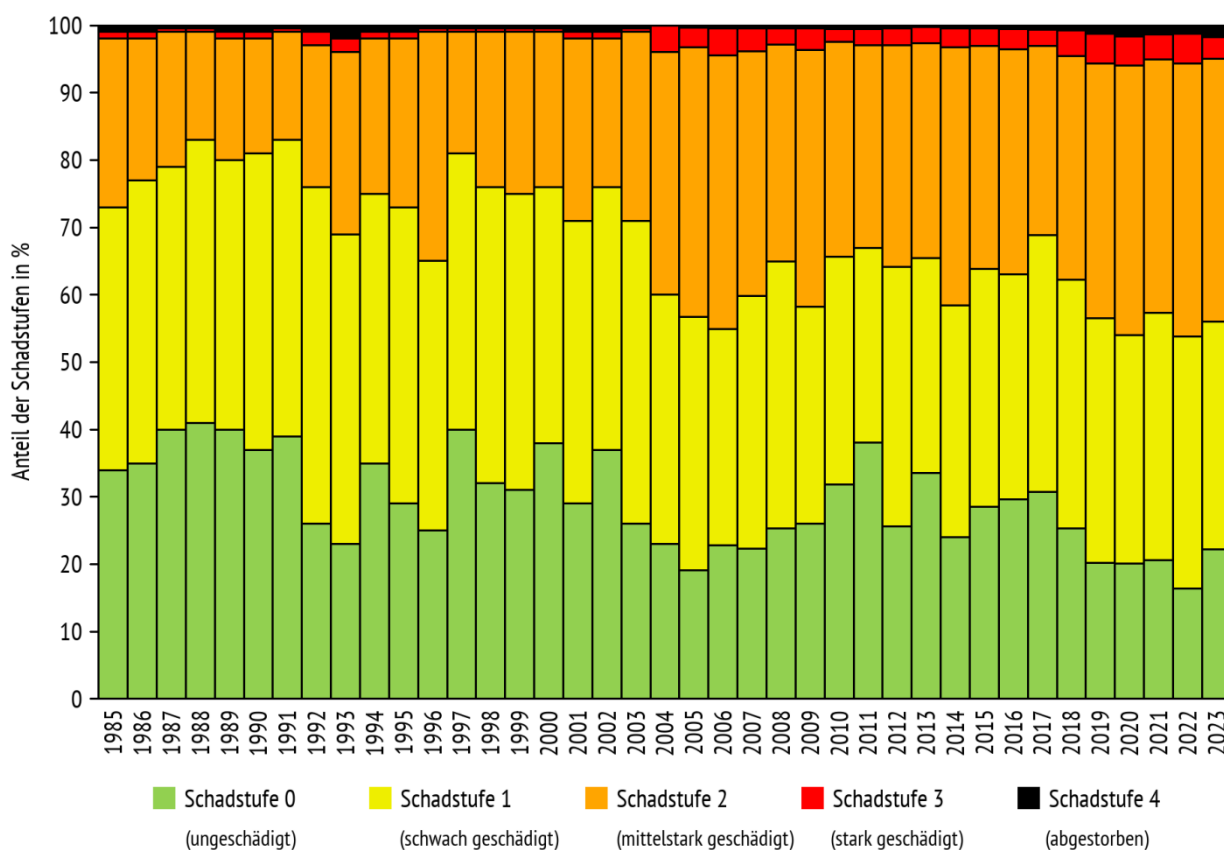


Abb. 9: Schadstufenverteilung der Waldzustandserhebung von 1985 bis 2023.

### Waldstrategie Baden-Württemberg 2050: Wasserrückhalt im Wald stärken

Seit Anfang Mai untersucht die FVA Baden-Württemberg im Rahmen der Waldstrategie 2050, mit welchen Maßnahmen Niederschlags- und Wegewasser verstärkt im Wald zurückgehalten werden können, um damit Hochwässer abzumildern und zugleich die Bodenwasserverhältnisse in Trockenzeiten zu verbessern. Mit Planungshilfen in Form eines Methodenleitfadens, detaillierter Planungskarten und konkreter Anschauungsobjekte werden praxisnahe Instrumente erarbeitet, die bei der Umsetzung von **Maßnahmen zum Wasserrückhalt** unterstützen.



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

### Fruktifikation

Besonders auffällig ist dieses Jahr die außergewöhnlich starke Fruchtbildung bei Buchen. Etwa 60 Prozent aller blühfähigen Buchen zeigen in diesem Sommer eine große Anzahl an Bucheckern in den Baumkronen (Abb. 11, oben). Auch andere Laubbaumarten wie Hainbuche, Bergahorn und Linde weisen in diesem Jahr einen starken Fruchtbehang auf. Dagegen ist der Fruchtbehang bei Eschen insgesamt eher gering und bei Eichen konnten nur wenige Bäume mit einem ausgeprägten Fruchtbehang festgestellt werden. Auch bei den Nadelbaumarten zeigt sich in diesem Jahr, nach dem außergewöhnlich starken Zapfenaufkommen im letzten Jahr, eine merklich schwächere Fruchtbildung. Eine Ausnahme stellt die Kiefer dar, die an etwa einem Drittel aller aufgenommenen Bäume eine stärkere Fruchtbildung aufwies.

Mit der Ausbildung von Fruchtständen ist ein erheblicher Energieaufwand verbunden. Insbesondere bei der Produktion schwerer Samen wie Bucheckern und Eicheln müssen die Bäume beträchtliche Mengen an Energie und Nährstoffen mobilisieren. Dies geschieht oft auf Kosten des vegetativen Wachstums der Bäume. Bei starker Fruktifikation bilden die Bäume

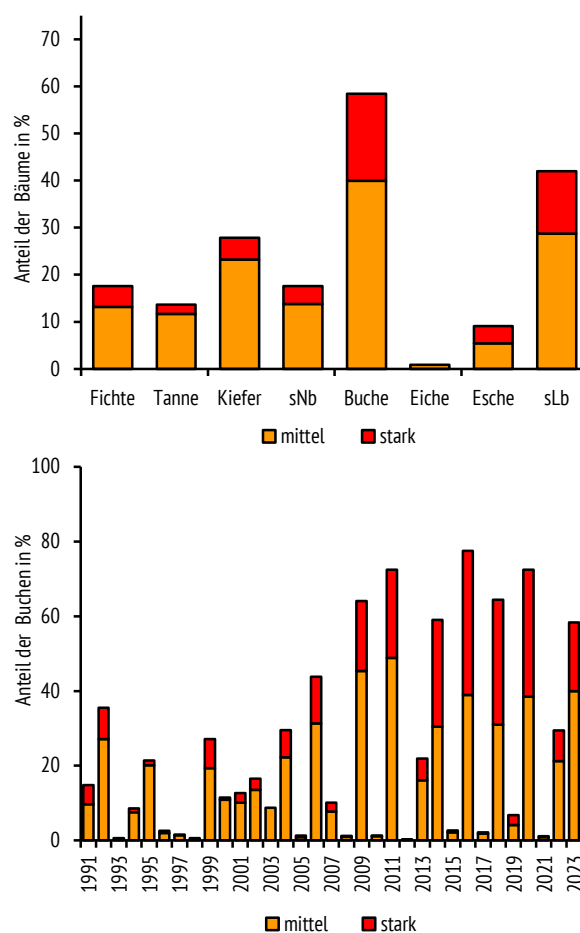




**Abb. 10:** So wie dieser Buchenzweig mit zahlreichen Bucheckern wiesen in diesem Jahr viele Buchen eine stärkere Fruktifikation auf (Foto: S. Meining).

deswegen häufig kleinere und weniger Blätter aus und reduzieren den jährlichen Triebblängenzuwachs, was sich meist unmittelbar auf den Kronenzustand auswirkt (Abb. 10).

Für die letzten Jahre zeigen die Ergebnisse der Waldzustandserhebung in Baden-Württemberg vor allem bei der Baumart Buche eine deutliche Zunahme der Fruktifikationsintensität (Abb. 11, unten). Seit Ende der 2000er Jahre ist eine klare Tendenz zu häufigeren Jahren mit einer starken Fruchtbildung zu erkennen, was mit einer zunehmenden physiologischen Belastung der Buchen einhergeht. Ursächlich für den beobachteten Trend sind die häufigeren warm-trockenen Sommer, die eine Blütenbildung der Buche im Folgejahr begünstigen (BUSGEN und MÜNCH, 1927, NUSSBAUMER et al., 2018). Auch die hohen Stickstoffeinträge in die Wälder tragen zur verstärkten Fruchtbildung bei (MATSCHKE, 1982).



**Abb. 11:** Fruktifikationsintensität der Hauptbaumarten sowie der sonstigen Nadelbäume (sNb) und sonstigen Laubbäume (sLb) im Jahr 2023 (oben), Zeitliche Entwicklung der Fruktifikationsintensität der Buchen von 1991 bis 2023 (unten). Jeweils nur Bäume im blühfähigen Alter (>49 Jahre).

## Fichte

Der Zustand der Fichte hat sich gegenüber dem Vorjahr kaum verändert. Der mittlere Nadelverlust verringert sich im Durchschnitt geringfügig um 0,2 Prozentpunkte auf 24,9 Prozent. Bei den meisten Fichten wurde der Nadelverlust mit 15 bis 35 Prozent bewertet (Abb. 13). Insgesamt gelten 38 Prozent der Fichtenfläche in Baden-Württemberg als deutlich geschädigt. 37 Prozent sind schwach geschädigt und 25 Prozent ungeschädigt (Abb. 14).

Die Fichte ist mit Abstand die am weitesten verbreitete Baumart in den Wäldern Baden-Württembergs. Als Baumart der nördlichen Nadelwaldzone und der höheren Gebirgslagen ist sie an kühle Witterungsbedingungen angepasst. In Mitteleuropa gerät sie seit mehreren Jahren durch steigende Temperaturen und ausgeprägte sommerliche Dürrephasen zunehmend unter Trockenstress. Besonders auf Standorten mit geringer Wasserspeicherfähigkeit zeigen sich in den Baumkronen der Fichten häufig akute Trockenstresssymptome wie verkürzte Nadeln und Jahrestriebe, vorzeitiger Abwurf älterer Nadeljahrgänge sowie abgetrocknete Bereiche an Zweigen und Ästen.

Obwohl die Wälder im Jahr 2023 insgesamt ausreichend mit Wasser versorgt waren und nur im Juli kurzzeitig eine Phase kritischer Wasserversorgung in den Wäldern auftrat, ist bisher keine wesentliche Regeneration der Fichten zu erkennen. Die Schädigungen der vergangenen Trockenjahre sind weiterhin in den Baumkronen sichtbar. Zudem sind die Fichten auch dieses Jahr wieder einem hohen Borkenkäferdruck ausgesetzt.

Infolge der vergangenen Hitze- und Dürrejahre konnte seit 2018 in den Wäldern Baden-Württembergs eine bis heute andauernde gravierende Massenvermehrung der Borkenkäferarten Buchdrucker (*Ips typographus*) und Kupferstecher (*Pityogenes chalcographus*) entstehen. Dies steht auch in Zusammenhang mit angefallenem Sturm- und Schneebruchholz, das ideale Bruträume zum Aufbau von hohen Käferdichten bieten kann. Insbesondere haben aber hohe Temperatursummen bei ausbleibenden Niederschlägen in den letzten Jahren zu erheblich kürzeren Entwicklungszeiten der Käfer geführt. So erhöht sich die Anzahl der innerhalb eines Jahres entwickelten Generationen und Geschwisterbruten, womit die Menge der Käfer innerhalb eines Jahres exponentiell wächst und damit auch die Angriffsstärke der Käferpopulationen (Abb. 12).

In Verbindung mit teils extremem Trockenstress verringert sich zeitgleich die Abwehrkraft der Fichten erheblich, so dass in den letzten Jahren in weiten Teilen des Landes ausgesprochen viele Fichten, häufig auch flächige Bestände zum Opfer gefallen sind. Zwar verzögerte das kühl-feuchte Frühjahr 2023 bei sehr hohen Ausgangspopulationen den Schwärmstart der Käfer, doch kam es im weiteren trocken-warmen Verlauf des Sommers dennoch wieder zu hohen Schadholzmengen. Besonders betroffen waren hierbei der südliche und mittlere Schwarzwald sowie der östliche Odenwald bis zum Taubergrund. Ende Juli brachte das regnerische Wetter jedoch eine vorübergehende Erleichterung, da die Schwärmaktivität der Käfer eingeschränkt wurde und die Feuchtigkeit in den liegenden Baumstämmen zu einer höheren Sterblichkeit der Brut führte. Allerdings musste ab Mitte August bei wieder trocken-warmen Bedingungen erneut eine Zunahme der Käferaktivität registriert werden (FVA, 2023).



**Abb. 12:** Jungkäfer und Larven des Borkenkäfers Buchdrucker (*Ips typographus*) unter der Rinde einer Fichte (Foto: F. Sander).



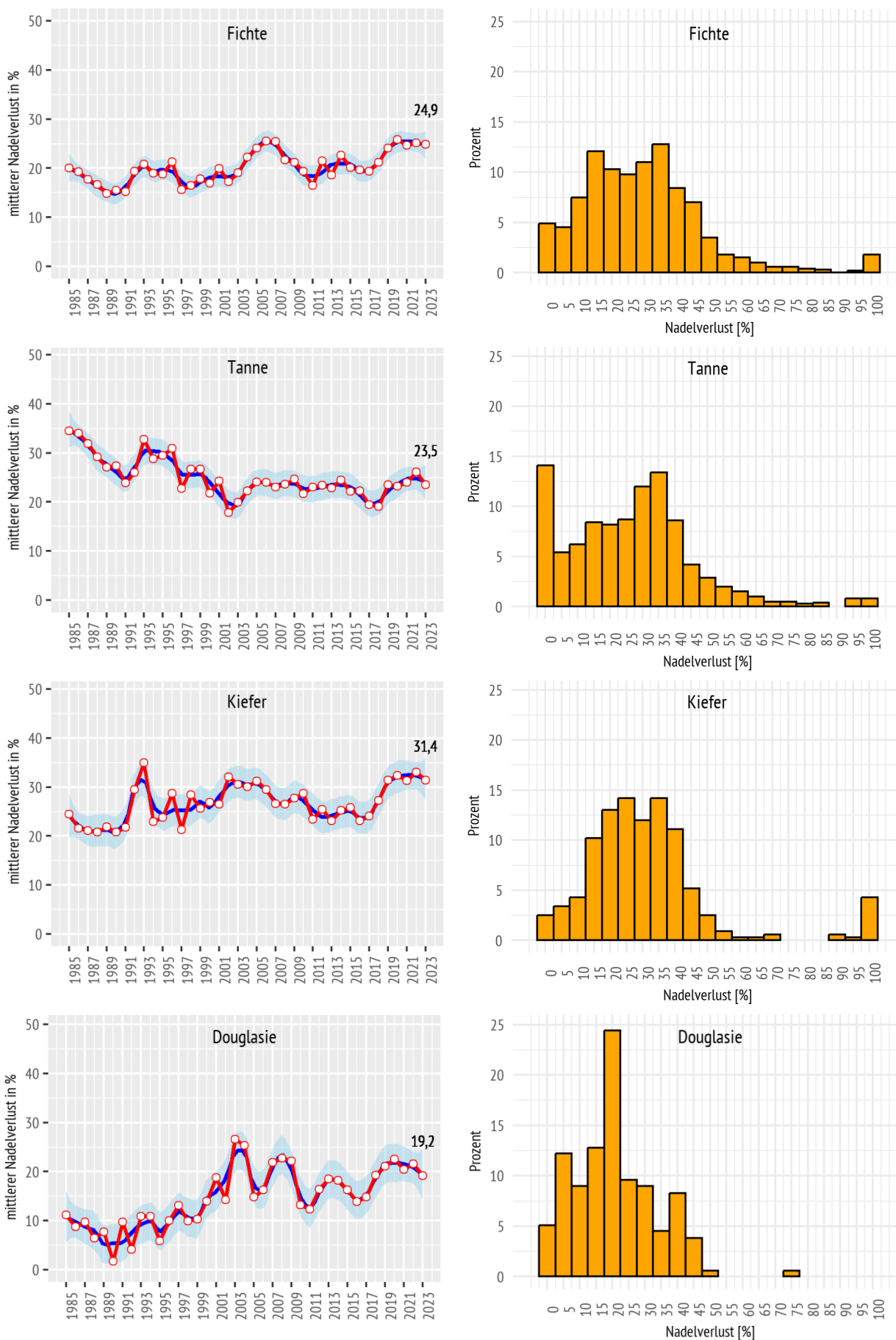
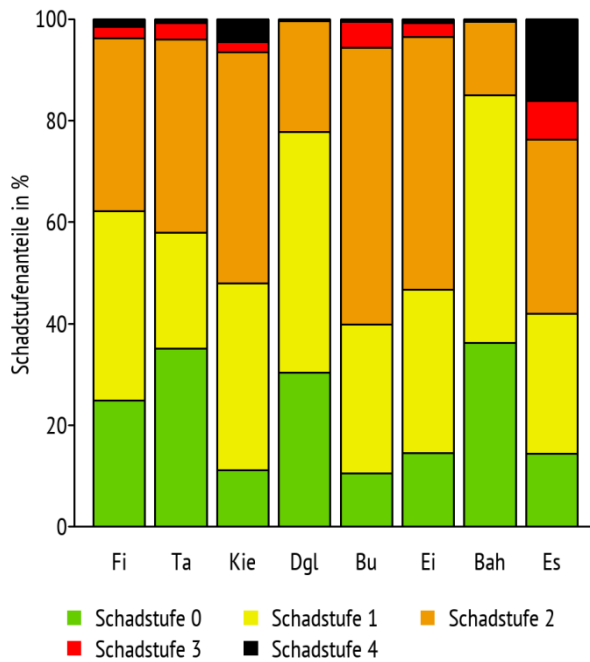


Abb. 13: Mittlerer Nadelverlust der Jahre 1985 bis 2023 (links) und Häufigkeitsverteilung der Nadelverlustwerte 2023 (rechts) der Baumarten Fichte, Tanne, Kiefer und Douglasie. Die rote Linie gibt den Mittelwert, die blaue Linie das geglättete Mittel an. Die hellblaue Fläche kennzeichnet den Vertrauensbereich von 95 Prozent.



**Abb. 14:** Anteile der Schadstufen für die Baumarten Fichte (Fi), Tanne (Ta), Kiefer (Kie), Douglasie (Dgl), Buche (Bu), Eiche (Ei), Bergahorn (Bah) und Esche (Es).

## Tanne

Der mittlere Nadelverlust der Tannen verringert sich dieses Jahr um 2,6 Prozentpunkte auf 23,5 Prozent. Insbesondere junge Tannen erwiesen sich als sehr vital. Die Verteilung der Nadelverluste zeigt mit Ausschlägen bei 0 und 35 Prozent eine zweipolige Verteilung (Abb. 13). Insgesamt gelten 42 Prozent der Tannenfläche in Baden-Württemberg als deutlich geschädigt und 23 Prozent als schwach geschädigt. Der Anteil an ungeschädigter Tannenfläche hat sich in diesem Jahr merklich auf 35 Prozent erhöht (Abb. 14).

Grund hierfür ist der deutlich verbesserte Kronenzustand junger Tannen. Während diese im letzten Jahr unter der langanhaltenden sommerlichen Trockenphase zu leiden hatten, konnten sich junge Tannen dank ausreichender Wasserversorgung in diesem Jahr gut erholen.

Die Tanne erweist sich anhand ihres Kronenzustandes auf niederschlagsreichen, submontanen bis montanen Standorten im Allgemeinen weiterhin als eine recht stabile Baumart, die sich durch eine hohe Regenerationsfähigkeit auszeichnet. Sie bildet ein tiefreichendes Pfahlwurzelsystem aus, was ihr ermöglicht, im Boden gespeichertes Wasser sehr effizient aufzunehmen. Die vergangenen Trockenjahre haben allerdings gezeigt, dass auch die Tanne auf ungünstigeren Standorten, etwa auf flach-

gründigen und sonnenexponierten Lagen, schnell unter Trockenstress gerät und akut gefährdet ist. So wurden vor allem im mittleren und südlichen Schwarzwald, im Neckarland und in Teilen der Schwäbischen Alb häufig sich rot verfärbende Tannen beobachtet (Abb. 15). Dabei sind oftmals verschiedene Borkenkäferarten wie der Krummzähne (*Pityokteines curvidens*), Westliche (*P. spinidens*) und Kleine Tannenborkenkäfer (*P. vorontzovi*) bis in submontane Höhenstufen am Schadensgeschehen beteiligt (KAUTZ et al., 2023).

Belastend wirkt sich auch der hohe Befall durch die Tannenmistel (*Viscum album ssp. abietis*) aus, die halbparasitisch auf den Tannenkronen wächst und dem Baum Wasser und darin gelöste Nährstoffe entzieht. Annähernd jede fünfte Tanne in Baden-Württemberg weist Mistelbefall auf, wobei der Befall auch ganze Bestände betreffen kann. In den vergangenen Jahren ist bei älteren Bäumen zudem eine auffallende Verfärbung der innenliegenden Tannennadeln zu beobachten, was im Wesentlichen auf den auftretenden Stress durch Hitze und Dürre zurückzuführen ist.



**Abb. 15:** Rotverfärbte Tanne im Schwarzwald nach Borkenkäferbefall (Foto: F. Sander).



## Kiefer

Die mittlere Kronenverlichtung der Kiefern verringert sich dieses Jahr um 1,6 Prozentpunkte auf 31,4 Prozent. Besonders auffällig ist seit einigen Jahren der hohe Anteil an stehend toten Kiefern mit 100 Prozent Nadelverlust (Abb. 13). Insgesamt gelten 52 Prozent der Kiefernflächen im Land als deutlich geschädigt. Während noch 37 Prozent nur schwach geschädigt sind, ist der Anteil an ungeschädigter Kiefernfläche mit elf Prozent sehr gering (Abb. 14).

Besonderer Schadensschwerpunkt sind die trocken-heißen Standorte der Oberrheinebene, auf denen die Kiefer seit einigen Jahren deutliche Vitalitätseinbußen aufweist und auf großer Fläche abstirbt (Abb. 16). Die Kiefern in der Oberrheinebene sind stark durch die Kiefernmistel befallen, die mit ihren Senkerwurzeln dem Baum Wasser entzieht und so den sommerlichen Trockenstress zusätzlich verstärkt. Zudem ist davon auszugehen, dass milde Wintertemperaturen und das Ausbleiben

einer winterlichen Ruhephase bei der immergrünen Baumart Kiefer zu einer dauerhaften Belastung führten. Oftmals verfärbten sich Teile der Kiefernkrone auffällig rotbraun, wobei häufig auch der pilzliche Erreger des Diplodia-Triebsterbens beteiligt ist, der gezielt geschwächte Kiefern befällt. An einzelnen vorgeschädigten Kiefern treten außerdem verschiedene rinden- und holzbrütende Schadinsekten wie Borken-, Pracht- oder Bockkäfer auf.

Während zunächst nahezu ausschließlich der Oberrheingraben von größeren Schäden betroffen war, weiten sich seit wenigen Jahren die Kiefernbeschädigungen auch auf andere Gebiete in Baden-Württemberg aus. So wurden in einzelnen Beständen in der Region Stromberg/Heuchelberg sowie im Neckarland ähnliche Schadenssymptome wie in der Oberrheinebene beobachtet.

Dieses Jahr wieder auffälliger war der Befall der Kiefern durch den Kleinen Waldgärtner (*Tomicus minor*). Bei dieser Borkenkäferart führen die entwickelten Käfer ihren Regenerations- bzw.



**Abb. 16:** Abgestorbene und stark mit Mistel befallene Kiefern in der Oberrheinebene bei Waghäusel (Landkreis Karlsruhe), August 2023 (Foto: S. Meining).



Reifungsfraß in jungen Trieben der Kiefer aus, die daraufhin zu Boden fallen. Die Kiefernkronen sehen danach häufig gärtnerisch beschnitten aus, wodurch sich der Name dieses Rindenbrüters ableitet.

## Douglasie

Der Kronenzustand der Douglasien hat sich im Jahr 2023 ebenfalls verbessert. Der mittlere Nadelverlust verringert sich um 2,4 Prozentpunkte auf 19,2 Prozent. Aufgrund der hohen Anzahl an jüngeren Douglasien in den Wäldern Baden-Württembergs fällt die Kronenverlichtung im Vergleich zu den anderen Nadelbaumarten bei der Douglasie im Durchschnitt geringer aus. Mit Abstand die meisten Douglasien sind mit 20 Prozent Nadelverlust bewertet (Abb. 13). Als deutlich geschädigt gelten 22 Prozent. Dagegen sind 48 Prozent schwach und 30 Prozent der Douglasienfläche ungeschädigt (Abb. 14).

Nachdem im letzten Jahr bei zahlreichen jungen Douglasien eine auffällige Nadelröte durch Frosttrocknis beobachtet wurde, ist dieses Jahr eine deutliche Verbesserung des Kronenzustandes junger Douglasien zu erkennen.

### FVA-Projekt:

#### Eine optimale Vitalität von Douglasien für die Zukunft multifunktionaler Wälder (VitaDou)

Mit Hilfe des Verbundprojektes „VitaDou“ sollen waldbauliche Maßnahmen entwickelt werden, um eine sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvolle Waldbewirtschaftung mit der Douglasie in Deutschland zu sichern. Neben allgemeinen walddesundheitlichen Aspekten liegt ein besonderer Fokus dabei auf der Untersuchung verschiedener Douglasien-Herkünfte und deren Bedeutung für die Baumvitalität.

Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit mit der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinlandpfalz (FAWF) sowie der Nordwestdeutschen Versuchsanstalt (NW-FVA) durchgeführt und durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) finanziert.



**Abb. 17:** Schädigung der Nadeln durch Douglasien-Gallmücken (*Contarinia* spp.) (Foto: S. Meining).

Bei älteren Douglasien ist eine Erhöhung der mittleren Kronenverlichtung festzustellen. Hier zeigt sich auch für die Baumart Douglasie insbesondere die Oberrheinebene als besonders geschädigte Region, in der zahlreiche Douglasien eine hohe Verlichtung der inneren Kronenpartien aufweisen. Auf den trockenen Standorten ist sie besonders anfällig und die Baumkronen zeigen oft markante Vitalitätsverluste bis hin zur Mortalität auf (DELB et al., 2023). In diesem Zusammenhang sind oft die aus der Heimat der Douglasie in Nordamerika stammenden Schadorganismen wie der Rußige Schüttepilz (*Pheocryptopus gaeumannii*) oder Gallmücken (*Contarinia* spp.) beteiligt (Abb. 17).

Außerdem werden an der vor mehr als 100 Jahren aus Nordamerika eingeführten Douglasie in den letzten trockenwarmen Jahren zunehmend häufiger europäische Borkenkäferarten vorgefunden, die zu rotverfärbten Kronen führen. Bisher sind daran im Wesentlichen der Kupferstecher (*Pityogenes chalcographus*), der Furchenflügelige Fichtenborkenkäfer (*Pityophthorus pityographus*) und der Westliche Tannenborkenkäfer (*Pityokteines spinidens*) beteiligt.

## Sonstige Nadelbäume

Die Baumartengruppe der sonstigen Nadelbäume wird zum überwiegenden Teil von der Lärche bestimmt, die sich aus den Arten Europäische und Japanische Lärche zusammensetzt. Daneben finden sich in der Stichprobe wenige Individuen von Schwarzkiefer und Thuja.

Der Kronenzustand der Lärchen hat sich im aktuellen Jahr verbessert. Die günstigen Witterungsbedingungen sorgten für einen guten Austrieb der winterkahlen Nadelbaumart, so dass sich im Verlauf des Sommers teils wieder dichte Lärchenkronen ausbilden konnten. Dennoch sind landesweit einzelne Lärchenbestände weiterhin durch den Lärchenborkenkäfer (*Ips cembrae*) gefährdet, der bei hohem Populationsdruck die Lärchen rasch zum Absterben bringen kann.

## Buche

Der Belaubungszustand der Buche hat sich gegenüber dem Vorjahr im Durchschnitt kaum verändert und weist damit weiter einen hohen Schädigungsgrad auf. Der mittlere Blattverlust erhöht sich geringfügig um 0,2 Prozentpunkte auf 32,3 Prozent.

Die meisten Buchen sind mit einem Blattverlust von 35 Prozent bewertet (Abb. 20). Insgesamt sind 60 Prozent der Buchenflächen deutlich geschädigt. 29 Prozent gelten als schwach geschädigt, während lediglich elf Prozent der Buchenflächen als ungeschädigt eingestuft werden (Abb. 14).

Die Buche ist nach der Fichte die zweithäufigste Baumart in Baden-Württemberg. In Mitteleuropa befindet sich die Buche in ihrem ökologischen Optimum, in dem sie auf vielen verschiedenen Standorten unterschiedlicher Höhenlagen vorkommt. Allerdings zeigen sich seit einigen Jahren infolge langanhaltender Dürrephasen und Hitzestress auch bei der eigentlich gut angepassten Baumart Buche deutliche Schädigungen in den Baumkronen. Durch den hohen Totastanteil zahlreicher Buchenkronen hat sich vielerorts das Erscheinungsbild der Buchenwälder erheblich gewandelt (Abb. 18).

Im aktuellen Jahr wurden weniger akute Trockenstresssymptome an den Buchen beobachtet und in einigen Baumkronen konnte sogar eine vitale Regenerationsbelaubung festgestellt werden. Allerdings wird dieser positive Effekt durch die erneut hohe Fruchtbildung der Buchen und einen verstärkten Befall durch den Buchenspringrüssler (*Orchestes fagi*) zum Teil kompensiert. Ältere Buchen weisen daher dieses Jahr im Mittel kei-



**Abb. 18:** Verlichtete Buchenkrone mit vielen Bucheckern und einzelnen Trockenästen (Foto: S. Meining).



ne Verbesserung des Kronenzustandes auf. Dagegen hat sich der Vitalitätszustand jüngerer Buchen im Vergleich zum Vorjahr durch die bessere Wasserversorgung auf vielen Standorten erholt. Eine vorzeitige Verfärbung der Buchenbestände, wie sie in den vergangenen Trockenjahren im Verlauf des Sommers in vielen Regionen beobachtet wurde und insbesondere in Jahren stärkerer Fruktifikation vermehrt auftritt, wurde dieses Jahr kaum beobachtet.

Der kritische Vitalitätszustand der Buche ist mittlerweile Schwerpunkt zahlreicher Forschungsvorhaben. Auch die FVA Baden-Württemberg beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit den Auswirkungen sich verändernder Witterungsbedingungen auf den Zustand von Buchenwäldern. Aktuelle Ergebnisse hierzu sind im Kapitel „Vitalität der Buche“ ab Seite 24 zusammengetragen.

## Eiche

Im Gegensatz zur Buche hat sich der Kronenzustand der Eiche infolge der feuchteren Frühjahrs- und Sommerwitterung in diesem Jahr deutlich verbessert. Der mittlere Blattverlust verringert sich merklich um 4,5 Prozentpunkte auf 29,4 Prozent. Die Blattverluste zeigen für die Eichen eine zweigipflige Verteilung mit den meisten Bäumen bei 35 und 25 Prozent (Abb. 20). Insgesamt sind 53 Prozent der Eichenflächen deutlich geschädigt. 32 Prozent gelten als schwach geschädigt und 15 Prozent als ungeschädigt (Abb. 14).

Im Vergleich zum Vorjahr zeigen sowohl ältere als auch jüngere Eichen eine deutliche Verbesserung im Kronenzustand, wobei dieses Jahr insbesondere bei den älteren Bäumen eine starke Regeneration stattgefunden hat. Die gute Wasserversorgung zu Beginn der Vegetationszeit führte besonders bei der Eiche zu einem guten Austrieb mit teilweise sehr großen und vitalen Blättern, so dass sich vielerorts gut belaubte Eichenkronen ausbilden konnten (Abb. 19). Das Ausbleiben einer stärkeren Fruktifikation sorgte dieses Jahr zusätzlich für eine Entlastung älterer Eichen.

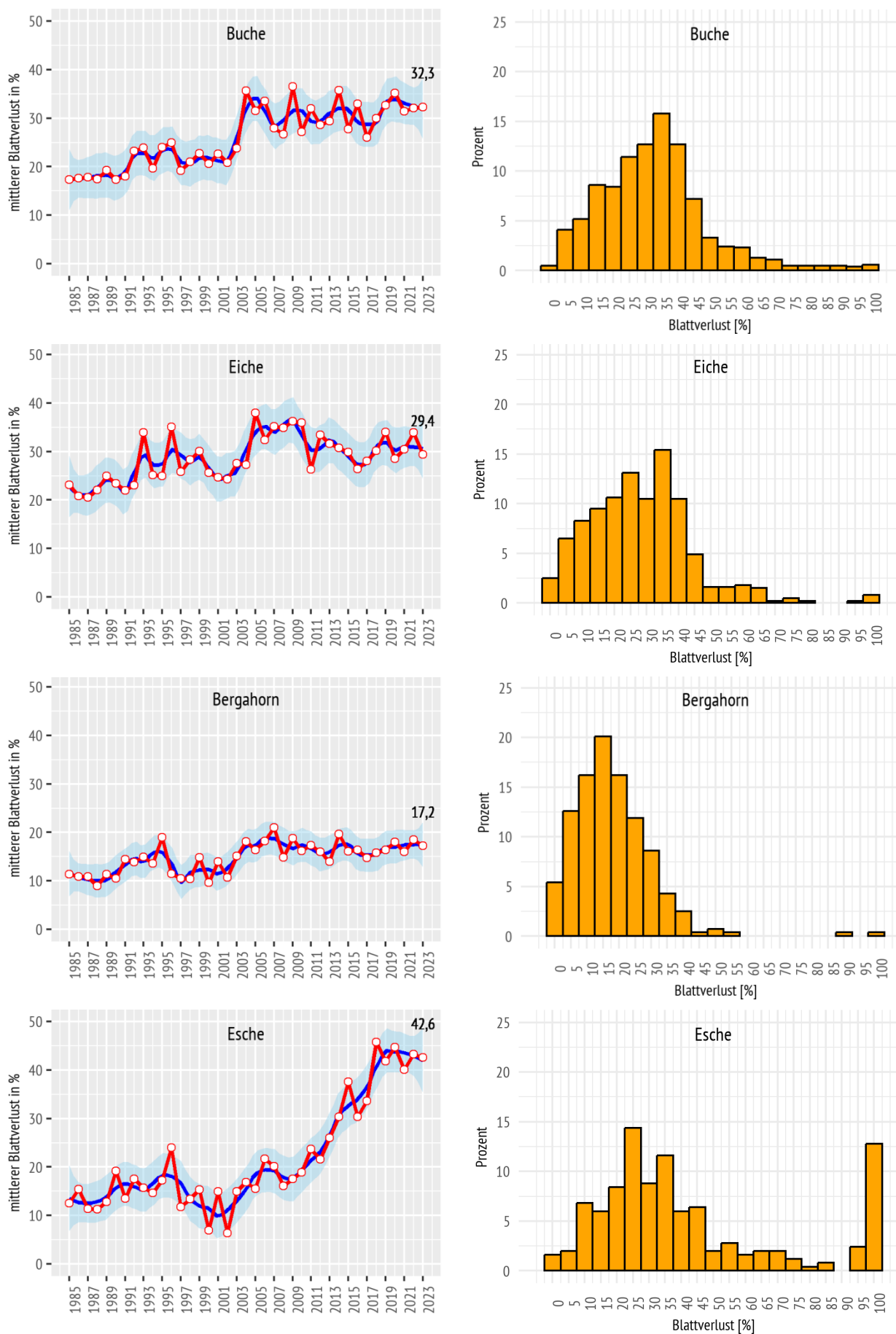
Regional kam es in diesem Frühjahr allerdings auch wieder zu stärkeren Blattverlusten durch den Raupenfraß verschiedener Schmetterlingsarten der sogenannten Eichenfraßgesellschaft, allen voran durch Frostspanner (*Operophtera bumata*, *Erannia defoliaria*). Schwerpunkte bildeten dabei die Landkreise Emmendingen und der Stadtkreis Freiburg, in denen großflächig



**Abb. 19:** Vitale Eichenkrone (Foto: S. Meining).

Eichenbestände licht und kahl gefressen wurden. Zwar können Eichen den Blattverlust im Frühsommer durch einen erneuten Austrieb ausgleichen, jedoch wird diese Regenerationsbelastung oftmals durch den Mehltaupilz befallen, der auch in diesem Jahr wieder stärkere Blattschäden verursachte. Dies kann insgesamt zu einer deutlichen Schwächung und Anfälligkeit der Eichen insbesondere für Prachtkäfer oder Hallimasch führen. Der Befall durch diese Schadorganismen hat, in Kombination mit Trockenstress, sehr oft das Absterben der Eichen zur Folge.

Infolge der vergangenen Trockenjahre treten deutliche Schäden bei der Eiche vorwiegend auf flachgründigen Böden in Hang- oder Kuppenlagen auf. Stark geschädigte Baumkronen trocknen von oben her ab und weisen lange Zeit große Totastbereiche auf, die bevorzugte Eintrittspforten für verschiedene holzerzetzende Pilze darstellen. Geschwächte Eichen sind zudem durch den Eichenprachtkäfer (*Agrilus biguttatus*) gefährdet, der seit einigen Jahren regional wieder häufiger in den Wäldern Baden-Württembergs anzutreffen ist.



**Abb. 20:** Mittlerer Blattverlust der Jahre 1985 bis 2023 (links) und Häufigkeitsverteilung der Blattverlustwerte 2023 (rechts) der Baumarten Buche, Eiche, Bergahorn und Esche. Die rote Linie gibt den Mittelwert, die blaue Linie das geglättete Mittel an. Die hellblaue Fläche kennzeichnet den Vertrauensbereich von 95 Prozent.



### Waldstrategie Baden-Württemberg 2050: Adaptiver Werkzeugkasten zur Waldbehandlung – Weiterentwicklung der Waldbauprogramme in Baden-Württemberg

Eine konsequente und an die standörtlichen Verhältnisse angepasste Waldpflege spielt eine Schlüsselrolle zur Erhöhung der Anpassungsfähigkeit der Wälder an den Klimawandel. **Die neue Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen (WET-RL)** versteht sich als ein Werkzeugkasten, der für die häufigsten waldbaulichen Ausgangssituationen und Zielsetzungen Handlungspfade aufzeigen soll. Die Waldbauprogramme bauen dabei auf die bewährten Grundsätze des Konzeptes „Naturnahe Waldwirtschaft“ auf.

In die Behandlungsprogramme sind zwei wichtige Strategien zum Umgang mit Unsicherheiten integriert:

1. Adaptives Waldmanagement: Aktuelle Erkenntnisse aus Wissenschaft und Praxis zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald fließen laufend in die waldbauliche Behandlung und Zielsetzung ein.
2. Dynamische Behandlungsprogramme: Die langfristigen Ziele für die Waldbestände sind offener formuliert und mittelfristige Ziele sollten laufend neu austariert werden.

Ein zentrales Element der neuen WET-RL sind die Hilfsmittel zur Einschätzung des Risikos von klimabedingten Waldschäden am einzelnen Waldbestand. So kann die Waldpflege vor Ort an die lokale Risikobewertung angepasst werden.

In diesem Waldstrategie-Projekt arbeiten Expertinnen und Experten aus Forschung und Praxis der Landesforstverwaltung, der FVA Baden-Württemberg, der AÖR ForstBW und der Naturschutzverwaltung zusammen. Die neue WET-RL wird im Jahr 2024 veröffentlicht.

## Bergahorn

Der Kronenzustand des Bergahorns hat sich gegenüber dem Vorjahr verbessert. Der mittlere Blattverlust verringert sich um 1,3 Prozentpunkte auf 17,2 Prozent (Abb. 20). Verglichen mit den anderen Baumarten ist der Schädigungsgrad des Bergahorns geringer, was auf den hohen Anteil an jungen Bäumen zurückgeführt werden kann. Der Bergahorn ist auf vielen Standorten in jungen Jahren konkurrenzstärker gegenüber anderen Baumarten, die ihn allerdings ab einem Alter von 30 bis 40 Jahren häufig überwachsen. Lediglich 14 Prozent der Bergahornfläche in Baden-Württemberg werden als deutlich geschädigt eingestuft. Dagegen sind 50 Prozent schwach geschädigt und 36 Prozent ungeschädigt (Abb. 14).

Aufgrund der vergangenen Trockenjahre tritt an geschwächten Bäumen vermehrt die Ahorn-Rußrindenkrankheit auf. Dessen pilzlicher Erreger (*Cryptostroma corticale*) stammt ursprünglich aus Nordamerika und kann als Sekundärpathogen geschwächte Ahornbäume zum Absterben bringen. Darüber hinaus tritt sowohl bei Bergahorn als auch Spitzahorn häufig die sogenannte Teerfleckenkrankheit auf. Dabei handelt es sich um eine Pilzinfektion, die kreisrunde, schwarze Flecken auf den Ahornblättern verursacht, welche jedoch für den Baum weitgehend ungefährlich sind.

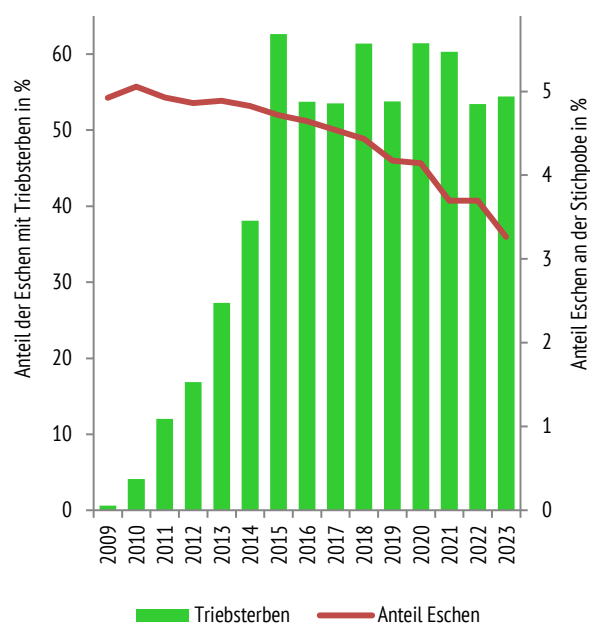


**Abb. 21:** Eschenkrone mit guter Belaubung (links) und mit starker Schädigung der Krone durch das Eschentriebsterben (rechts) (Fotos: S. Meining).

## Esche

Die mittlere Kronenverlichtung der Eschen hat sich dieses Jahr leicht verringert, wenngleich die Ausfall- und Mortalitätsrate der Eschen aufgrund des Eschentriebsterbens weiterhin ausgesprochen hoch ist. Aktuell liegt der mittlere Blattverlust der Eschen bei 42,6 Prozent, so hoch wie bei keiner anderen Baumart. In der Verteilung der Verlichtungsprozente sticht der hohe Anteil an stehend toten Eschen mit 100 Prozent Blattverlust hervor (Abb. 20). Insgesamt sind 58 Prozent der Eschenfläche deutlich geschädigt. 28 Prozent sind schwach geschädigt und lediglich 14 Prozent ungeschädigt (Abb. 14).

Im Jahr 2009 wurde der pilzliche Erreger des Eschentriebsterbens erstmals in Baden-Württemberg festgestellt. Seither hat er sich landesweit sehr rasch ausgebreitet und bereits zahlreiche Eschen zum Absterben gebracht (Abb. 21). Die Sporen des Falschen Weißen Stängelbecherchens (*Hymenoscyphus fraxineus*) gelangen über die Blätter in den Baum. Die heranwachsenden Hyphen des Pilzes schädigen die verholzten Triebe und bringen



**Abb. 22:** Anteil der Eschen mit Eschentriebsterben (grüne Säulen) und Anteil der Eschen an der Stichprobe der Waldzustandserhebung (rote Linie).



diese zum Absterben. Im weiteren Verlauf der Infektion bilden sich nicht selten Stammfußnekrosen, die zu einer großen Bruchgefahr der Eschen führen. Während sich das Eschentriebsterben den letzten 15 Jahren massiv ausgebreitet hat, geht der Eschenanteil in Baden-Württemberg seit einigen Jahren drastisch zurück (Abb. 22). Es wird davon ausgegangen, dass nur ein geringer Prozentsatz der Eschen gegenüber dem Eschentriebsterben tolerant ist, was bedeutet, dass sich die erhebliche Schädigung auch in den nächsten Jahren fortsetzen und der Eschenanteil in den Wäldern Baden-Württembergs noch weiter zurückgehen wird.

### Sonstige Laubbäume

Die Gruppe der sonstigen Laubbäume besteht aus einer Vielzahl verschiedener Baumarten. Dabei ist die Hainbuche mit deutlichem Abstand die am häufigsten vorkommende Baumart, gefolgt von der Roteiche und der Linde. Diese drei Baumarten machen knapp die Hälfte der sonstigen Laubbäume in der Stichprobe der Waldzustandserhebung aus.

Während sich dieses Jahr der Belaubungszustand der Hainbuche aufgrund der vielerorts sehr auffälligen starken Fruktifikation verschlechtert (Abb. 23), ist bei Roteiche und Linde eine Verbesserung zu erkennen. Im Trend ist bei der überwiegenden Mehrzahl der sonstigen Laubbaumarten eine Erholung des Kronenzustandes zu erkennen. Die geringe Anzahl der aufgenommenen Individuen erlaubt jedoch keine detailliertere Auswertung der Einzelbaumarten.



**Abb. 23:** Hainbuche mit auffallend vielen Fruchtständen (Foto: S. Meining).



## 2 VITALITÄT DER BUCHE – AKTUELLE ENTWICKLUNGEN UND AUSBLICK

In den vergangenen fünf Jahren lagen die Waldschäden in Baden-Württemberg bei der Buche auf einem außerordentlich hohen Niveau. So ist der seit 2019 aufgrund von Dürre und Insekten verbuchte Holzeinschlag sprunghaft auf ein bisher nicht gekanntes Ausmaß angestiegen (Abb. 24). Seit 2021 liegen diese Holzmengen jährlich bei über 300.000 Festmetern. Der Einschlag geschädigter Buchen steht oft in Zusammenhang mit einer aufgrund von Pilzbefall zu erwartenden schnellen Holzzersetzung. Neben einer raschen Entwertung des Holzes gehen damit hohe Risiken besonders für Astbrüche und damit für die Arbeitssicherheit und die Verkehrssicherung einher. Eine Entnahme der Buchen erfolgt deswegen, wo aus Gründen der Arbeitssicherheit überhaupt noch möglich, vielfach bereits, bevor die Bäume gänzlich abgestorben sind. Schwerpunktregionen hoher Schadholzaufkommen liegen im Oberrheinischen Tiefland und im Schwarzwald, flankierend aber auch im Odenwald, dem Neckarland und im Bodenseeraum.

### Warum ist die Buche zum Sorgenkind geworden?

Ganz entscheidend für den vielerorts besorgniserregenden Schadensverlauf sind die außerordentlichen Dürren der letzten Jahre in Verbindung mit Hitze. Vertrocknete und abgestorbene Kronenanteile, lichte Kronen bei Altbäumen infolge eines reduzierten Austriebs- und Wuchsverhaltens sowie eine auffällig

erhöhte Abfolge an Fruktifikationen tragen dazu bei, die Bestände in eine Gesamtschwächung und damit kritische Anfälligkeit gegenüber Schaderregern zu versetzen (TROPF et al., 2021). Die geschwächten Bäume erkranken dadurch weitaus häufiger auch an bisher zwar stets latent präsenten, aber bis dato unscheinbaren Rindenpilzen wie die in den letzten Jahren sehr prominent auftretende „Pfennig-Kohlenkruste“ (*Biscogniauxia nummularia*) (Abb. 25). Überdies zeigen sie sich zusätzlich deutlich anfälliger gegenüber Attacken durch rindenbrütende Käfer wie den Kleinen Buchenborkenkäfer (*Taphrorychus bicolor*) oder den Prachtkäfer (*Agrilus viridis*), die den Krankheitsverlauf beschleunigen und betroffene Buchen rasch irreversibel schädigen können.

### Tut sich die Buche schwerer mit einer Anpassung als andere Baumarten?

Wie landesweit auch viele andere Baumarten hat die Buche in den letzten Jahren durch Wetterextreme einige Belastungsproben einstecken müssen. Verglichen mit der Fichte oder der Tanne, bei denen mit Borkenkäfern befallene Bäume in der Regel unmittelbar absterben, reagiert die Buche meist mit einem verzögerten, länger andauernden Siechtum auf ihre Belastungssituation. Daher hält sich die unmittelbar auftretende Mortalität bei der Buche zunächst in Grenzen. Diese eher langsamen

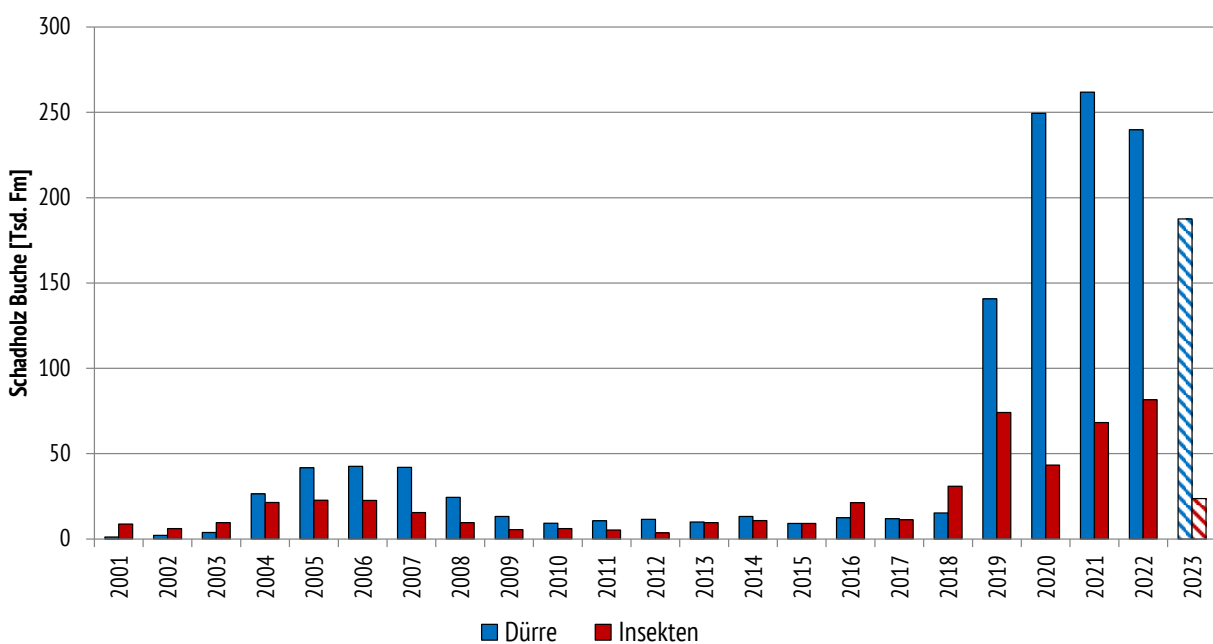


Abb. 24: Entwicklung der durch Dürre und Insekten bedingten Buchenschadholzmengen in Baden-Württemberg, Stand 11.09.2023.



**Abb. 25:** Durch holzzeretzende Pilze entwertetes Stammholz (links). Die „Pfeffrig-Kohlenkruste“, ein Holzfäuleerreger, bildet seine schwarzen Fruchtkörperanlagen auf der Oberfläche eines befallenen Buchenstammes aus (rechts). (Fotos: J. Grüner).

Krankheitsverläufe können deshalb durchaus auch als Chance auf Resilienz bzw. Erholung für betroffene Buchen angesehen werden. Wenn saisonal günstigere Umstände zum Blattaustrieb und innerhalb der Vegetationsperiode bestehen, beispielsweise durch eine Erhöhung der Wasserverfügbarkeit, können selbst ältere Buchen Merkmale einer Erholung zeigen (Abb. 26). Doch wird anhand der Schadholzmengen der letzten Jahre deutlich, dass die Buche auf die anhaltende Belastung mit einer zunehmenden Verschlechterung des Gesamtzustandes reagiert. Dies kann regional bestandesbedrohende Ausmaße annehmen. So haben viele Buchen auch die Jahre mit einer verbesserten Wasserversorgung nicht überall für eine Erholung nutzen können, weil die Schädigungen bereits zu groß geworden waren.

### Was beobachten wir?

Betroffene Buchen zeigen oftmals zunächst in den oberen Kronenpartien stärkere Schädigungen auf, die sich im Verlauf der

Belastung ausweiten. Eine signifikante Reduktion der Buchen vitalität ist durch schütterere Belaubung, Kleinblättrigkeit und Vergilbung erkennbar. Es folgen hohe Verluste an Feinreisig in der Oberkronen- und Absterbeerscheinungen mit Totästen in der oberen Kronenperipherie. Zudem ist eine Zunahme in der Stärke und Häufigkeit der Fruktifikation feststellbar, die zusätzlich viele Reserven aufzehrt (JOHN et al., 2019). Letztlich findet eine massiv voranschreitende Holzzersetzung und -entwertung durch Pilze und Käfer statt. Auch diese beginnen zunächst in der Regel im oberen Kronenbereich, dem Teil des Baumes, der dem größten Wasserstress ausgesetzt ist.

Stressgeprägte Verzweigungsmuster und Triebreaktionen, ausgedorrte Astpartien sowie herausbrechende Kronen sind eine für die Waldarbeit und den Waldbesuch gefährliche Situation. Die Stamm- und Wurzelanlaufbereiche entnommener Buchen bleiben hingegen symptomatisch vergleichsweise unauffällig. Der Anteil an dunklen Verfärbungen im Holz macht sich jedoch in der Wertstellung negativ bemerkbar.





**Abb. 26:** Beispiel für eine Verbesserung des Belaubungszustandes einer stark geschädigten Buchenlichtkrone: 2021 (links) und 2023 (rechts) bei Kandern, Landkreis Lörrach (Fotos: links: J. Tropf, rechts: S. Remmele).

### Wie ist die Buchenverjüngung betroffen?

Besonders im Spätsommer 2022 waren aufgrund der anhaltenden Trockenheit und Hitze auch in Buchenjungbeständen in einem ungewohnten Ausmaß auffällige Schäden zu beobachten. Eine daraufhin von der Forstdirektion des Regierungspräsidiums Freiburg bei den Unteren Forstbehörden durchgeführte Umfrage ergab für den Kommunal- und Privatwald, dass sich die Schäden landesweit auf rund 1.000 Hektar erstreckten und sich regional auf die Wuchsgebiete Oberrheinisches Tiefland und Neckarland meist kleinflächig auf ohnehin trockenen Standorten konzentrierten.

Im Rahmen eingehenderer Untersuchungen der FVA wurde exemplarisch in einem besonders betroffenen kollinen Buchen-Mischwald noch vor dem Blattaustrieb 2023 eine Ausfallrate von 22 Prozent festgestellt, während 35 Prozent der jungen Pflanzen in Teilen geschädigt waren. Im weiteren Verlauf des Jahres wurde bei später auf verschiedenen Untersuchungsflächen stattfindenden Sommerbonituren jedoch keine weitere außergewöhnlich erhöhte Mortalität der Buchenverjüngung festgestellt. Dies war auch auf Verjüngungsflächen, die im Vor-

jahr 2022 noch eine starke Vergilbung oder einen vorzeitigen Laubabfall aufwiesen, der Fall. Somit hat sich diese in der Buchenverjüngung besorgniserregende Entwicklung in diesem Jahr mit der etwas besseren Wasserversorgung offenbar beruhigt.

### Wie reagieren Buchen nach Sommertrockenheit auf ausgiebige Niederschläge?

Nach einer langen Sommertrockenheit erfolgte ab Mitte August 2022 eine Phase mit ausgiebigen Niederschlägen. Dies hat in der Buchennaturverjüngung bisher selten beschriebene Wuchsreaktionen eines spät erfolgten, zweiten Laubaustriebs ausgelöst (Abb. 27).

Dieses Phänomen stellt sich anhand eines Standortes im Ortenaukreis exemplarisch wie folgt dar: In der zweiten Augusthälfte wurden nach einer langen sommerlichen Trockenheits- und Hitzeperiode sowohl bei Altbuchen als auch in der Naturverjüngung noch ausgeprägte Blattvergilbungen und vorzeitiger Laubfall in teilweise grünem Zustand beobachtet. Doch bot diese Verjüngungsfläche im September plötzlich ein völlig anderes

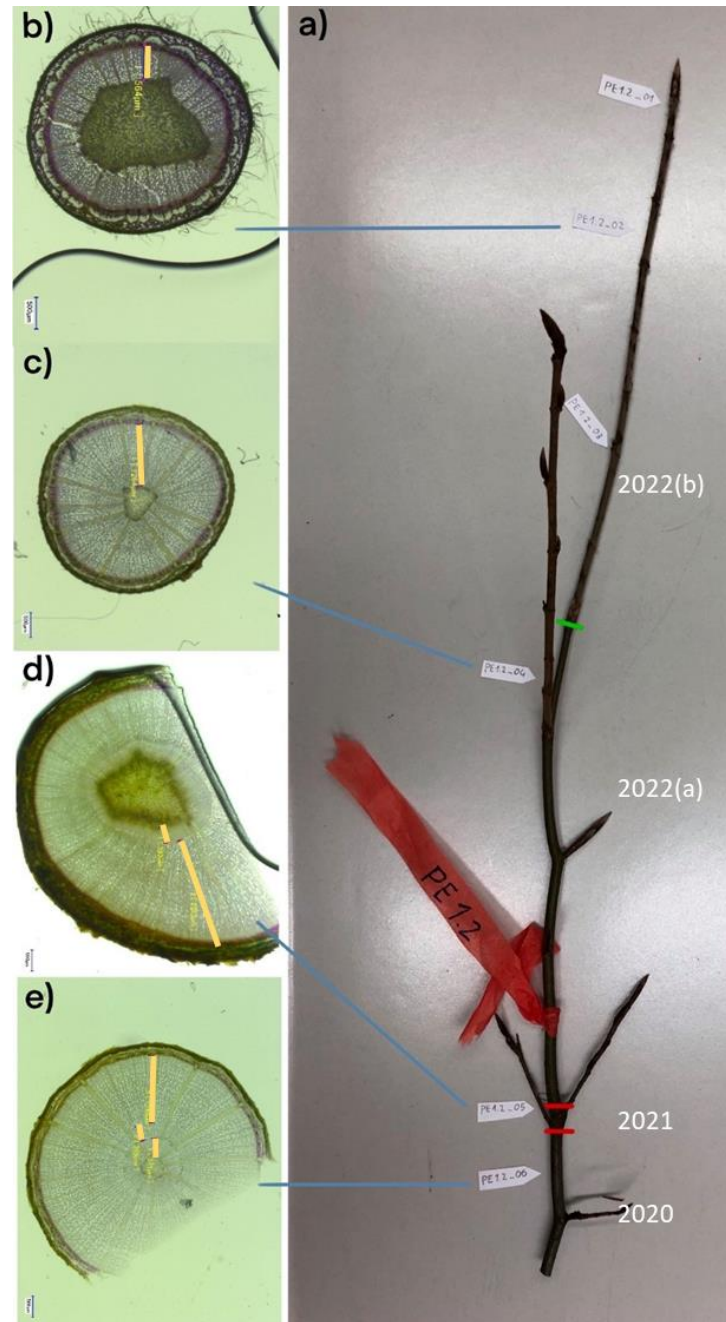
Bild, da flächig Neuaustriebe mit frischem grünem Laub erfolgt waren. Diese bildeten sich aus nahezu fertig entwickelten Winterknospen, die eigentlich erst in der nächsten Vegetationsperiode austreiben sollten. Diese sogenannten proleptischen Triebteile sind im Jahr ihrer Entstehung gut an ihrer starken Behaarung zu erkennen. Auf ausgewählten Teilflächen wurden die Längen dieser neu gebildeten Triebe am Haupttrieb gemessen. Diese betragen bis zu 30 cm und hatten eine maximale Anzahl von sechs Knospen. Einige erfasste Buchen wiesen proleptischen Austrieb nicht nur aus dem Terminaltrieb auf, sondern auch aus Seitentrieben des oberen Drittels der Pflanzen. Ein solch verspäteter Neuaustrieb zum Ende der Vegetationsperiode birgt die Gefahr, dass diese Triebe im Winter bei hohen Minusgraden zurückfrieren, weil hier keine vollständige Verholzung mehr erfolgt. Zudem verbrauchen diese Pflanzen ihre vorhaltenden Ressourcen schon früh zur Produktion der Biomasse für den Zweitaustrieb, die ursprünglich jedoch für den nächsten Frühjahrsaustrieb vorgesehen sind. Doch sind diese Triebe über den vergleichsweise milden Winter 2022/23 entgegen ersten Befürchtungen nicht komplett abgestorben. Außerdem konnten im Frühjahr 2023 reguläre Neuaustriebe beobachtet werden, auch wenn diese in der Länge und im Umfang reduziert waren.

### Wird das Absterben durch pilzbedingte Holzersetzung beschleunigt?

Absterbeerscheinungen in der Oberkrone, vor allem bei Altbuchen, stehen meist in Verbindung mit einem Vorkommen der „Pfennig-Kohlenkruste“ (*Biscogniauxia nummularia*). Das Erscheinungsbild des Pilzes äußert sich vor allem in der Ausbildung schwarzer münzförmiger oder auch zusammenfließender Flecken auf der Rinde. Der Pilz dringt mit seinen Hyphen auch in das Holz ein und verursacht dort eine Holzfäule (Abb. 28). Die Pfennig-Kohlenkruste kommt als Holzersetzer in der Regel an totem Holz, vor allem an herabgefallenen Ästen vor. Als Schwächeparasit lebt sie aber auch, ohne Symptome hervorzurufen, in vitalem Buchengewebe und kann bei Schwächung des Wirtes (durch hohe Temperaturen und lange Trockenphasen) in eine parasitische Phase übergehen (LUCHI et al., 2015). Das mit dem Pilz befallene Holz zeigt im fortgeschrittenen Stadium der Fäule eine helle, teils fleckige Verfärbung. Eine Erholung dieser nach Trocken- und Hitzestress pilzbefallenen Bäume ist deutlich erschwert (Abb. 25, links).

### Wie schnell schreitet die Pilzfäule voran?

Um den Fäulefortschritt der Pfennig-Kohlenkruste einordnen zu können, wurden Buchenprüfkörper mit dem Pilz beimpft und die Holzabbaurate nach sechs, neun, zwölf und sechzehn Wochen Inkubationszeit bei 25° Celsius bestimmt. Zum Vergleich der Fäuledynamik wurden auch andere holzzeretzende Pilze wie beispielsweise die Schmetterlings-Tramete (*Trametes versicolor*) in die Untersuchungen mit einbezogen.



**Abb. 27:** Im März 2023 beprobte Buche mit regulärem Austrieb (2022(a)) und spätsommerlichem Zweitaustrieb (rechts, oberhalb des grünen Balkens 2022(b)). Die gelben Balken in den mikroskopischen Aufnahmen markieren Jahrringbreiten (links) (Fotos: T. Karrer).





**Abb. 28:** Löcher in der Zellwand (roter Pfeil) zeigen die starke Zersetzung des Holzgewebes durch den Pilz „Pfennig-Kohlenkruste“ (Foto: J. Grüner).

Die Pfennig-Kohlenkruste zeigte im Schnitt nach sechs Wochen einen relativen Masseverlust der Prüfkörper von 4,5 Prozent, welcher sich kontinuierlich bis zur 16. Woche auf 8,3 Prozent erhöhte. Die Schmetterlings-Tramete wies nach 16 Wochen dagegen bereits eine relative Abbaurate von 29,3 Prozent auf. Mikroskopische Präparate zeigen, dass die Pfennig-Kohlenkruste zunächst hauptsächlich die Zellulose der mittleren Zellwand abbaut und somit eine Moderfäule verursacht (Abb. 28). Nach sechs Wochen Inkubationszeit zeigten sich vereinzelt Hyphen in den Lumen der Gefäße, Tracheiden und Holzstrahlen und nach weiteren 16 Wochen bildeten sich Hohlräume in der Sekundärwand.

Im Vergleich zu anderen an der Buche vorkommenden Weißfäuleerregerpilzen ist die durch die Pfennig-Kohlenkruste verursachte Abbaurate offenbar niedriger (TROPF et al., 2022). Allerdings ist zu vermuten, dass bei den wiederkehrenden trockenheißen Sommerperioden die Aktivität dieser wärmeliebenden Pilzart erhöht ist und eine Holzzerstörung durch die Pfennig-Kohlenkruste künftig sehr viel schneller als bisher bekannt ablaufen wird. Diese Pilzart ist als Profiteur der jüngsten klimatischen Veränderungen anzusehen und es ist zu erwarten, dass der ablaufende Klimawandel zu einer weiteren Ausbreitung des Pilzes und damit zu höheren Absterberscheinungen bei der Buche führt.

## Wie geht es weiter?

Den bekannten Klimaszenarien zufolge muss weiterhin mit Perioden, die sich durch sehr hohe Temperaturen und gleichzeitig knappe Wasserverfügbarkeit auszeichnen, gerechnet werden. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Belastungen für die Baumart Buche in den Wäldern Baden-Württembergs auch in den nächsten Jahren und Jahrzehnten weiter zunehmen wird. Um die Buche in den Wäldern in ihrer Fähigkeit zur Resilienz gegenüber Trockenheit und Hitze zu unterstützen, sind weitere Untersuchungen zur Buchen-Vitalitätsschwächung aus Sicht der Waldgesundheit notwendig, um konkrete Handlungsempfehlungen ableiten zu können. Dabei werden folgende Faktoren aktuell besonders intensiv beforscht und diskutiert (KLEMMT et al., (2023):

- Sind früh einsetzende, wiederholte und konsequent fördernde Eingriffe in jungen und mittelalten Beständen hilfreich?
- Kommt dem Erhalt der Schutzwirkung des Kronendaches in Altbeständen eine besondere Bedeutung zu?
- Können geringere Endbaumhöhen als bisher üblich eine Erleichterung des Wassertransports bewirken?
- Inwieweit sind Baumartenvielfalt und Struktur in allen Bestandesentwicklungsphasen zur Risikostreuung förderlich?
- Ist mit einer frühzeitigen Vorausverjüngung Strukturreichtum und Bodendeckung mit der nächsten Baumgeneration erreichbar?
- Welche Effekte sind durch Einmischung bereits an Trockenstress angepasste Herkünfte auf zu erreichen?
- Inwiefern ist es möglich, die durch Klimawandelfolgen bedingten Verschiebungen der Standortverhältnisse bei der Bewirtschaftung mehr als bisher zu berücksichtigen?

Die Buche stellt auf 22 Prozent der Waldfläche in Baden-Württemberg die mit Abstand häufigste Laubbaumart dar. In Mitteleuropa wäre sie bisher noch ein wesentlicher Bestandteil der Schlusswaldgesellschaften. Aufgrund der zentralen Bedeutung dieser Baumart muss der Krankheitsverlauf, der oft auch chronisch verläuft, in Zukunft genau beobachtet und erforscht werden. Das Zusammenspiel abiotischer und biotischer Schadfaktoren lässt unter der Maßgabe eines sich rasch ändernden Klimas noch sehr viele Fragen offen. Dies reicht von der noch weitgehend unbekanntem Biologie vieler Schadorganismen über die Symptomatik bis hin zu einer hinreichenden Risikoeinschätzung, sodass daraus stabilisierende, präventive und kurative Maßnahmen abgeleitet werden können.

### 3 WITTERUNG

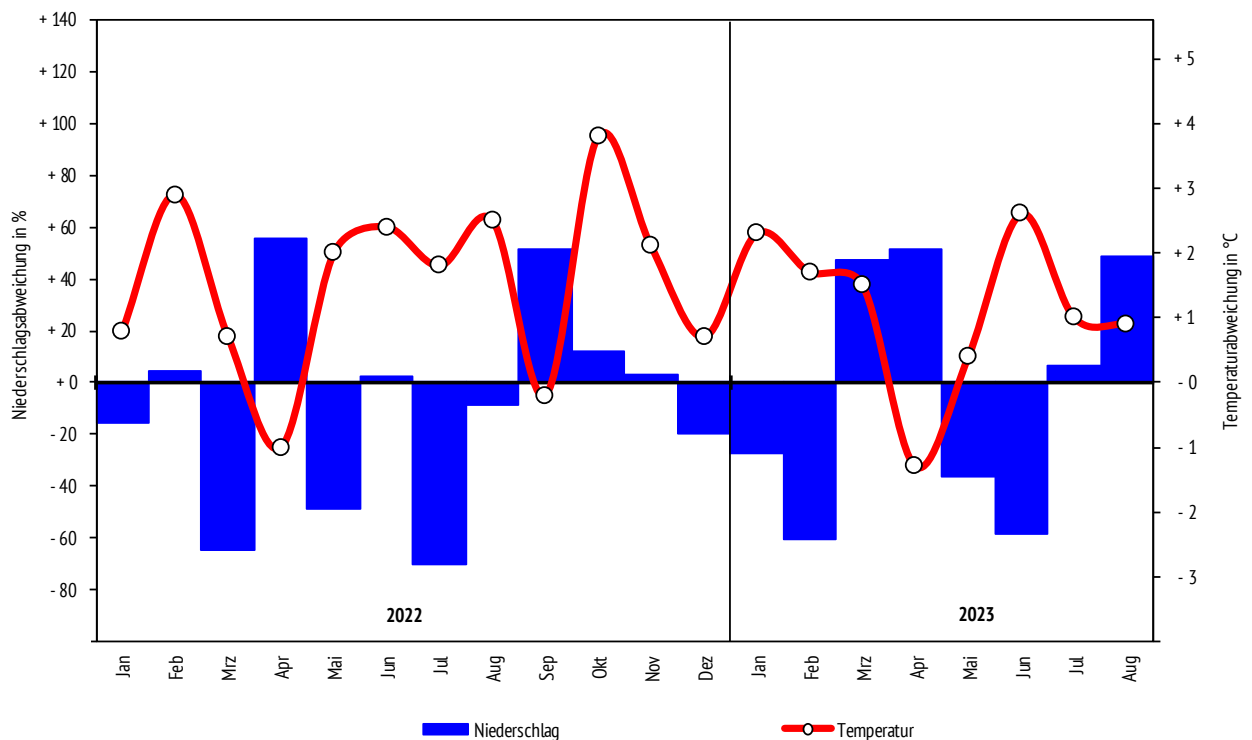
Die Witterung hat einen entscheidenden Einfluss auf den Zustand der Wälder. Extreme Wetterereignisse wie Dürren, Stürme und Hitzeperioden können zu erheblichen Schäden führen und die Anfälligkeit der Wälder gegenüber Schadorganismen erhöhen. Zudem kann es durch Spätfrost im Frühjahr zu einer Schädigung der frisch ausgetriebenen Blätter kommen. Dagegen sind ausreichende Niederschläge und milde Temperaturen während der Vegetationszeit förderlich für die Vitalität des Waldes. Eine ausgewogene Witterung trägt zur Stabilität des Ökosystems bei. Der Klimawandel verschärft jedoch die Herausforderungen. Die vergangenen Trockenjahre haben deutlich aufgezeigt, mit welchen Auswirkungen gerechnet werden muss, wenn extreme Wetterereignisse in Zukunft immer häufiger auftreten.

Da der Vitalitätszustand der Wälder nicht allein durch die Witterung des aktuellen Jahres beeinflusst wird, ist im Waldzustandsbericht jährlich das Witterungsgeschehen des gesamten Zeitraums seit der letzten Erhebung dargestellt.

#### Jahr 2022

Die Witterung im Jahr 2022 war wiederholt außergewöhnlich. Bundesweit war es das zwölfte zu warme Jahr in Folge. Mit 10,9° Celsius war das Jahr 2022 in Baden-Württemberg sogar das wärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881. Und auch die Sonnenscheindauer stellte mit 2.185 Stunden einen neuen Landesrekord auf. Dagegen lag die Jahresniederschlagsmenge mit 810 l/m<sup>2</sup> leicht unter dem langfristigen Mittel von Baden-Württemberg (DWD 2023).

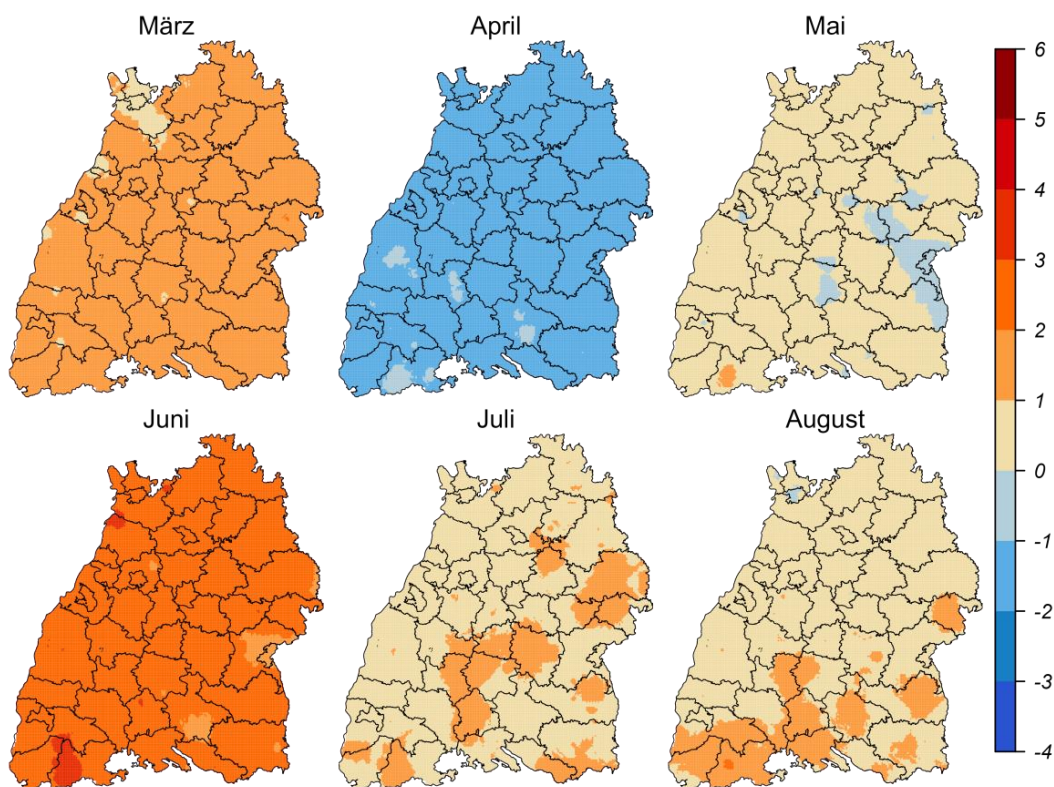
Nach einem sehr heißen Sommer 2022 (lediglich der Sommer 2003 war wärmer) mit überwiegend trockener Witterung wurde es im September mit fallenden Temperaturen und mehr Niederschlag merklich herbstlicher (Abb. 29). Dagegen stiegen die Temperaturen im Oktober wieder auf Rekordniveau. So wurden in Müllheim im Markgräflerland am 28. Oktober sommerliche 28,7° Celsius gemessen. Im November fielen bei zunehmend geringeren Temperaturen häufige und vor allem im Schwarz-



**Abb. 29:** Niederschlags- und Temperaturabweichung vom Mittel der Referenzperiode (1991–2020) für Baden-Württemberg (Daten: Deutscher Wetterdienst, DWD).



### Temperaturabweichung (°C)



### Niederschlagsabweichung (%)

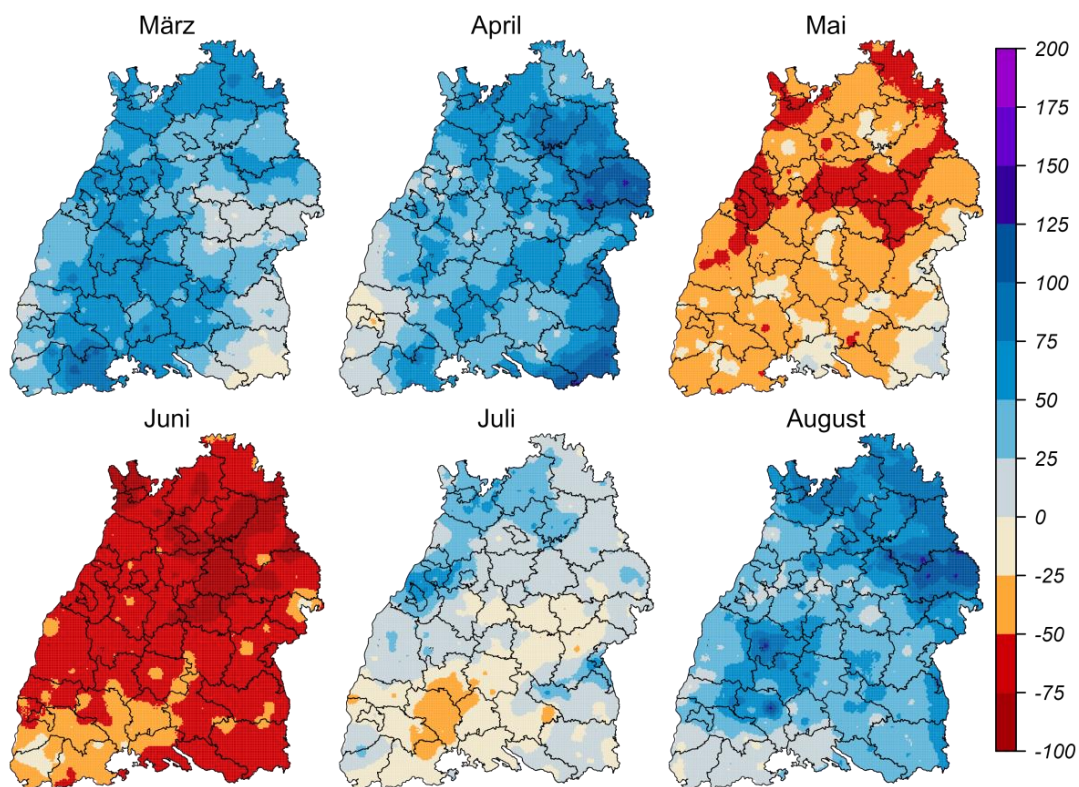


Abb. 30: Regionale Temperatur- (oben) und Niederschlagsabweichung (unten) der Monate März bis August 2023 vom Mittel der Referenzperiode (1991–2020) für Baden-Württemberg (Daten: Deutscher Wetterdienst, DWD).

wald auch ergiebige Niederschläge. Winterlich wurde es in der ersten Hälfte des Dezembers, bevor sich in der zweiten Dezemberhälfte vielerorts erneut milde Temperaturen und verbreitet Regenwetter durchsetzten.

Im Vergleich zum langjährigen Mittel waren im Jahr 2022 lediglich die Monate April und September leicht zu kühl, in allen restlichen Monaten wurden zum Teil deutlich erhöhte Lufttemperaturen gemessen. Bezogen auf die Niederschlagsmengen waren vor allem die Monate März, Mai und Juli deutlich zu trocken, während die Monate April und September 2022 niederschlagsreich ausfielen.

### Jahr 2023

Zum Jahreswechsel 2023 wurden die nächsten Temperaturrekorde gebrochen: Mit 19,5° Celsius war Freiburg im Breisgau am Neujahrstag bundesweiter Spitzenreiter. Erst die zweite Januarhälfte brachte wiederum winterliche Temperaturen und zumindest in höheren Lagen eine teilweise geschlossene Schneedecke. Im Landesdurchschnitt blieben jedoch der Januar und auch der Februar deutlich zu warm und beträchtlich zu trocken (Abb. 29). Während im Januar das Niederschlagsdefizit bei knapp 30 Prozent lag, stieg es im Februar bis auf 60 Prozent an.

Die Monate März und April waren im Vergleich zum trockenen Jahresstart 2023 vergleichsweise niederschlagsreich. Bei schweren Unwettern im Schwarzwald und im Allgäu wurden örtlich sogar Niederschlagsmengen von über 160 l/m<sup>2</sup> registriert. Zu Beginn der Vegetationszeit konnten sich so die Böden mit ausreichend Wasser füllen, wodurch zumindest auf gut wasserspeichernden Böden mit hohem Lehmanteil ein ausreichender Wasservorrat für die nächsten Monate gebildet wurde. Während die Temperaturen im März deutlich über dem Durchschnitt lagen, war der April – als bisher einziger Monat des Jahres – im Vergleich zum langjährigen Mittel deutlich zu kühl. Im Mai stiegen die Temperaturen wieder merklich an, so dass Anfang des Monats im Oberrheingraben die ersten Sommertage mit über 25° Celsius gemessen wurden. Im Landesdurchschnitt war der Mai vergleichsweise trocken. Lokal, etwa am Bodensee und im Allgäu, wurden aber zum Teil erhebliche Niederschlagsmengen verzeichnet, während es in anderen Landesteilen (Neckarland, des Oberrheins, Tauberregion) deutlich zu trocken war (Abb. 30).

Die Klimareferenzperiode ist ein 30-jähriger Zeitraum, der zur Analyse von Klimadaten wie Temperatur und Niederschlag verwendet wird. Sie dient dazu, langfristige Trends zu identifizieren und aktuelle Klimaveränderungen zu bewerten. Seit dem Jahr 2021 gilt die neue Referenzperiode 1991 bis 2020, mit der die Monatsdurchschnittswerte der Temperatur bzw. des Niederschlags des aktuellen Jahres verglichen werden.

Nach 2003 war der Juni 2023 in Baden-Württemberg mit 19,4° Celsius der zweitwärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Die heißen Temperaturen prägten weite Landesteile, wobei im Oberrheingraben die Hitze am größten war: Hier wurden an nahezu allen Junitagen Temperaturen über 25° Celsius gemessen. Dabei blieb es im Juni mit durchschnittlich 37,6 l/m<sup>2</sup> sehr trocken, was gegenüber dem langjährigen Referenzwert einem Niederschlagsdefizit von etwa 60 Prozent entspricht. Die trockene und heiße Sommerwitterung setzte sich zunächst auch im Juli mit örtlichen Spitzenwerten von bis zu 38° Celsius weiter fort. In einigen Landkreisen waren die Pegelstände von Flüssen und Seen bereits so gering, dass die Entnahme von Wasser untersagt werden musste. Erst im letzten Julidrittel wurde es nach teils schweren Gewittern mit Sturm- und Orkanböen von Norden her merklich kühler und nasser. Dadurch entspannte sich auch die phasenweise kritische Wasserversorgung der Waldbestände. Die unruhige Witterung mit viel Regen, örtlichen Unwettern und teils hohen Temperaturen setzte sich auch im August fort. So verursachte ein heftiger Hagelschauer in Reutlingen Anfang des Monats sowie ein schweres Gewitter mit Orkanböen in der Bodenseeregion gegen Ende des Monats starke Schäden. Insgesamt war der August 2023 landesweit im Vergleich zum langjährigen Mittel wie bereits die Monate März und April deutlich zu nass, aber auch zu warm.

Nach dem sehr heißen und eher trockenen Jahr 2022 sorgten die ausgiebigen Niederschläge im März und April für einen guten Start der Waldbäume in die Vegetationsperiode 2023. Im Verlauf des Sommers wurde zwar insbesondere auf flachgründigen und wenig wasserspeichernden Standorten wieder eine kritische Wasserversorgung der Bäume registriert, jedoch endete diese Phase bereits Ende Juli abrupt mit landesweit einsetzenden starken Regenfällen. So erschienen viele Wälder Baden-Württembergs auch noch im späteren Verlauf des Sommers satt grün und gegenüber den letzten Jahren revitalisiert.





*Abb. 31: Klimamessstation der FVA Baden-Württemberg, hier: Freifläche der Level II-Fläche Heidelberg (Foto: S. Meining).*

### **Waldstrategie Baden-Württemberg 2050: Für den Klimawandel gut gerüstet: Integriertes Waldbrandmanagement**

Wassermangel ist ein erheblicher Stressfaktor für die Bäume, der zum aktuell hohen Niveau der Waldschäden maßgeblich beiträgt. Die letzten Jahre haben gezeigt, dass länger anhaltende Dürrephasen im Zuge des Klimawandels zunehmend häufiger werden. Wenn in diesen Dürrephasen – meist aus Fahrlässigkeit, aber auch durch Brandstiftung – Wälder in Brand geraten, werden diese Ökosysteme, vor allem die Tier- und Pflanzenwelt schwer geschädigt.

Durch die gute Zusammenarbeit von Forstverwaltung und Feuerwehren ist es bisher zwar sehr gut gelungen, die Situation in Baden-Württemberg unter Kontrolle zu halten. Die Beteiligten sind sich aber einig, dass in der Zukunft mehr getan werden muss, um die Lage auch weiterhin dauerhaft kontrollieren zu können.

Die gemeinsamen Bemühungen von Feuerwehren und Forstverwaltung werden daher im Projekt **„Integriertes Waldbrandmanagement“** gebündelt, das mit Mitteln der Waldstrategie Baden-Württemberg 2050 finanziert wird.

Ziel des Projektes ist es, Handlungsempfehlungen für die Waldbrandprävention und –bekämpfung zu entwickeln, um Akteure aus den Bereichen Forst und Feuerwehr im Umgang mit Vegetationsbränden zu unterstützen.



[www.fva-bw.de/waldbrand-klima-resilienz](http://www.fva-bw.de/waldbrand-klima-resilienz)

## 4 STOFFEINTRÄGE UND BODENZUSTAND

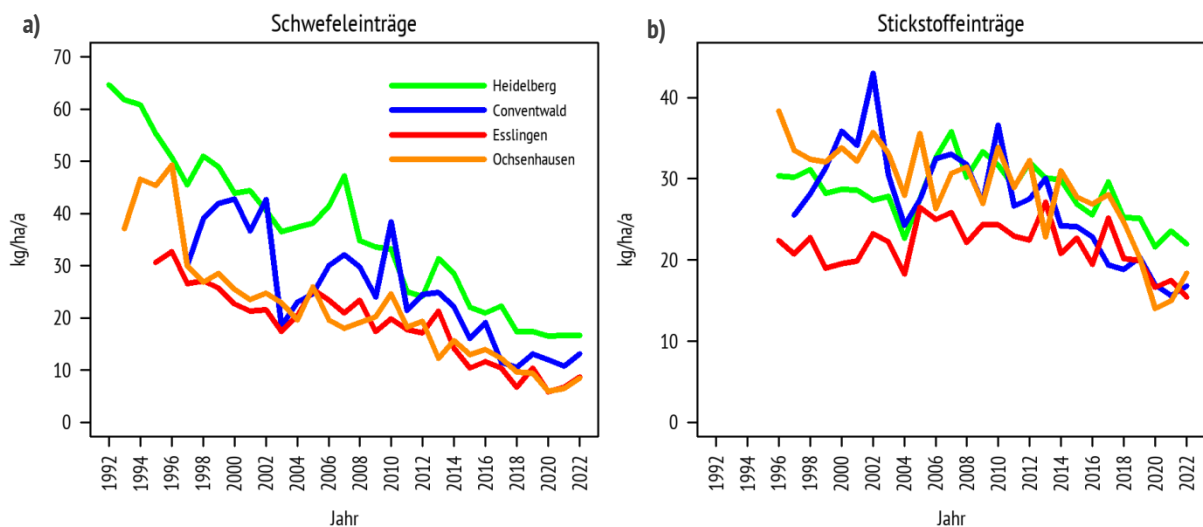
Mit der hohen spezifischen Oberfläche ihres Kronendaches filtern Wälder besonders viele Schadstoffe und Feinstäube aus der Luft, die entweder direkt über die Spaltöffnungen der Nadeln bzw. der Blätter aufgenommen oder mit dem Regen in den Waldboden eingetragen werden. Vergleichende Messungen auf benachbarten Freiflächen zeigen für Wälder einen bis zu dreifach höheren Eintrag von Schadstoffen, wobei der Eintrag in Nadelbaumbestände aufgrund ihrer ganzjährigen Benadelung besonders hoch ist. Damit leisten Wälder einen aktiven Beitrag zur Luftreinhaltung. Durch die hohen Schadstoffeinträge sind sie aber auch deutlich stärker belastet als andere Landnutzungsformen, wodurch das Risiko einer langfristigen Schädigung des Ökosystems und insbesondere der Böden in Wäldern deutlich erhöht ist.

### Schwefeleintrag

Durch gezielte Maßnahmen der Luftreinhaltung konnte die Emission von Schwefel in den letzten Jahrzehnten deutlich gesenkt werden. Bis in die 1990er Jahre wurden in den Wäldern Baden-Württembergs noch sehr hohe Schwefeleinträge gemessen (Abb. 32a). Auf einzelnen Flächen betrug die jährlichen Eintragswerte über 60 kg pro Hektar. Erst nach dem Einbau von Entschwefelungsanlagen in der Großindustrie, der Einführung des Katalysators und der Verwendung schwefelarmer Brennstoffe sowie weiterer technischer Maßnahmen gingen die

Schwefeldepositionen und damit die Säurestärke der Niederschläge spürbar zurück.

Infolgedessen reduzierten sich auch die akuten Waldschäden in den Mittelgebirgen wie Schwarzwald und Odenwald. Insbesondere an der Baumart Tanne, die seinerzeit sehr sensitiv auf hohe Schwefeldepositionen reagierte, wurde ein deutlicher Rückgang der Baumschäden festgestellt. Aufgrund der inzwischen nur noch geringen atmosphärischen Schwefeleinträge, der Auswaschung von Schwefel mit dem Sickerwasser, aber auch der Entnahme von in der Biomasse gebundenem Schwefel mit der Holzernte sind die Schwefelvorräte in den Waldböden seit Jahren rückläufig. Auf vielen Standorten ist heute sogar eine latente Unterversorgung der Waldbäume mit dem für das Baumwachstum wichtigen Nährelement Schwefel zu verzeichnen (GÖTTLEIN et al., 2019). Besonders auf Standorten mit geringen Schwefelvorräten, die verbreitet im Schwarzwald und im Schwäbisch-Fränkischen Wald auftreten, kommt der Nährstoffnachhaltigkeit in der Waldbewirtschaftung deshalb auch in Bezug auf das Nährelement Schwefel eine bedeutende Rolle zu. Untersuchungen zeigen, dass in der Rinde im Vergleich zum Stammholz etwa die 8-fache Menge an Schwefel gebunden ist, in Zweigen und Nadeln sogar etwa die 14- bzw. 20-fache Menge (GÖTTLEIN et al., 2020). Ernteverfahren, die möglichst viel Kronen-, Feinreisig- und Rindenmaterial auf der Fläche belassen, tragen dazu bei, die Bodenvorräte von Schwefel – wie auch anderer Nährelemente – zu schonen.



**Abb. 32:** Schwefel- (links) und Stickstoffeinträge (rechts) auf den Versuchsfächen Heidelberg, Conventwald, Esslingen und Ochsenhausen im Zeitraum von 1992 bis 2022.



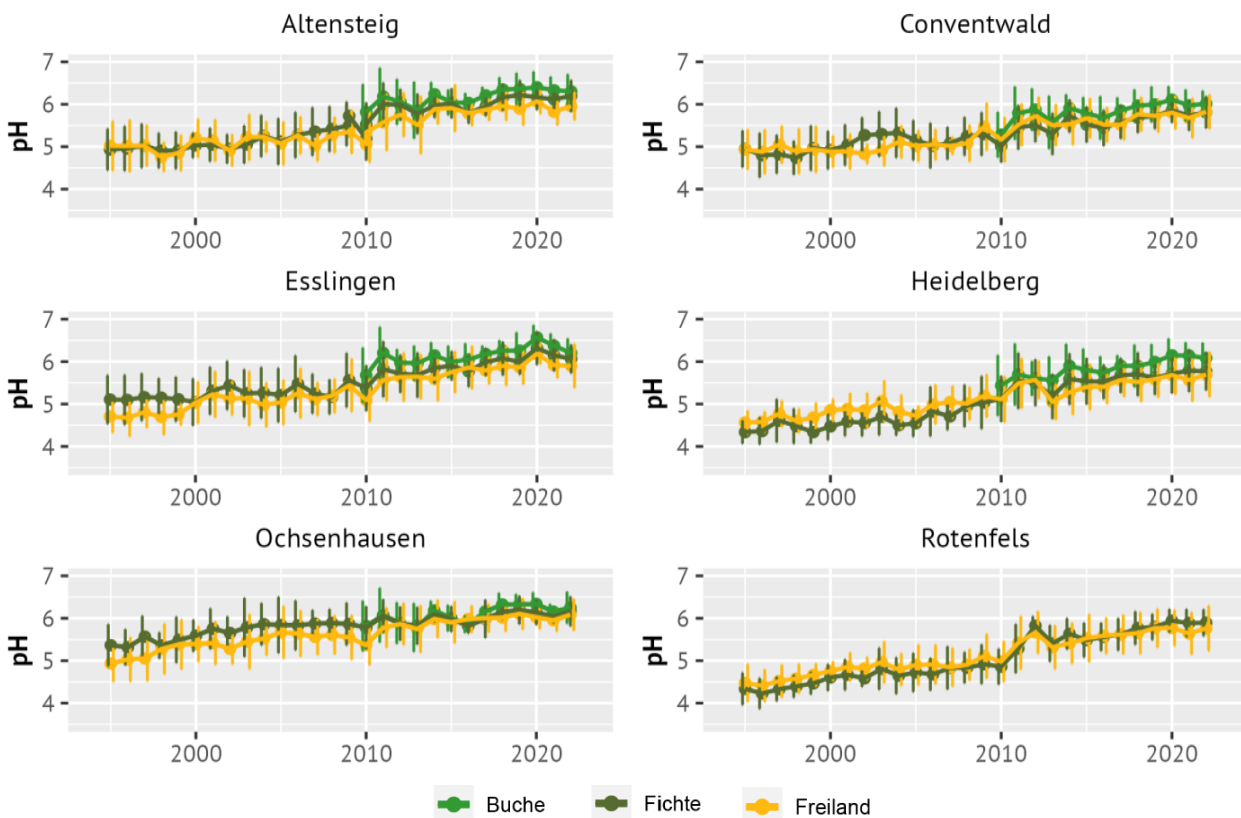
## Stickstoffeintrag

Im Vergleich zum Schwefel sind die Stickstoffeinträge in die Wälder Baden-Württembergs weitaus weniger stark gesunken (Abb. 32b). Sie liegen in vielen Regionen weiterhin deutlich über einem ökosystemverträglichen Niveau (LUBW, 2023). Stickstoff wird im Wesentlichen über zwei unterschiedliche Formen emittiert: Zum einen als Stickoxide, welche vor allem durch Verbrennungsprozesse in der Industrie bzw. durch den Verkehr freigesetzt werden. Zum anderen als Ammonium, welches überwiegend in der landwirtschaftlichen Produktion freigesetzt wird. Regional betrachtet zeichnet sich daher auch ein typisches Verteilungsmuster der Stickstoffeinträge in Baden-Württemberg ab.

Auf exponierten Lagen des Schwarzwaldes und des Odenwaldes ist der Stickstoffeintrag stark von Stickoxiden geprägt, die aus Industrie- und Verkehrsabgasen über lange Strecken transportiert werden. Dagegen findet sich ein erhöhter Ammoniumanteil vor allem in landwirtschaftlich geprägten Regionen mit intensiver Tierhaltung wie in weiten Teilen Oberschwabens, da Ammonium nur über vergleichsweise geringe Distanzen transportiert und schnell mit dem Niederschlag aus der Atmosphäre ausgewaschen wird.

## Erholung vom sauren Regen

Die bis jetzt anhaltend rückläufigen Emissionen von säurebildenden Verbindungen (insbesondere von Schwefel und Stickstoff) spiegeln sich in den kontinuierlich ansteigenden pH-Werten im Niederschlag der Monitoringflächen der FVA Baden-Württemberg wider (Abb. 33). Zu Beginn der Messreihen, in den 1990er Jahren, lagen die pH-Werte sowohl in den Fichtenbeständen als auch auf den Freilandflächen im Jahresmittel in der Regel bei Werten zwischen 4 und 5. Besonders niedrige Werte wurden auf exponierten und stärker durch Industrie, Verkehrswege und Siedlungen beeinflussten Messflächen (Heidelberg, Altensteig, Rotenfels) gemessen, während die Messfläche Ochsenhausen, im eher landwirtschaftlich geprägten Oberschwaben, die höchsten Werte aufwies. Aktuell liegt der pH-Wert auf allen Messflächen im Jahresmittel bei Werten um 6. Die pH-Werte der Bestandesniederschläge auf den Buchenflächen liegen aufgrund von Austauschprozessen im Kronenraum dabei tendenziell über denen der Fichtenflächen. Buchen können somit zusätzlich zu einer Regeneration der Bodenversauerung beitragen.



**Abb. 33:** Ergebnisse der pH-Wert-Messungen im Niederschlag auf den Versuchsflächen Altensteig, Conventwald, Esslingen, Heidelberg, Ochsenhausen und Rotenfels in den Jahren 1995–2022.

## Bodenversauerung und Stickstoffeutrophierung

Der anthropogene Eintrag von Stickstoff- und Schwefelverbindungen führt zu einer Störung des Elementkreislaufs der Waldökosysteme und unter anderem zu einer langfristigen Versauerung und Eutrophierung der Waldböden. So verursachten hohe Schadstoffeinträge in den letzten Jahrzehnten vor allem auf kalkarmen Standorten eine Bodenversauerung, die vielerorts auch heute noch eine hohe Belastung für Wälder darstellt. Bei der Neutralisation eingetragener Säuren werden im Waldboden verschiedene Nährstoffkationen wie Calcium, Magnesium oder Kalium mobilisiert und aus dem Oberboden ausgewaschen.

Die Verlagerung dieser wichtigen Pflanzennährstoffe in tiefere Bodenschichten führt in stark belasteten Beständen häufig zu Nährstoffungleichgewichten bzw. zu akuten Nährstoffmangelsymptomen. Zudem können bei starker Belastung toxische Aluminiumionen freigesetzt werden, die sich schädigend auf das Wurzelwachstum der Bäume auswirken und damit die Wasser- und Nährstoffaufnahme behindern und die Standfestigkeit der Bäume herabsetzen. Mit dem Konzept der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung wird in Baden-Württemberg langfristig den negativen Folgen einer Bodenversauerung im Wald entgegengewirkt. Dabei ist nicht nur das Ziel aktuelle Säureeintrag zu kompensieren, sondern vielmehr langfristig die natürliche Nährstoffausstattung der Waldböden wiederherzustellen.

Hohe Stickstoffeinträge führen zudem zu einer Eutrophierung der Waldbestände mit vielfältigen negativen Auswirkungen auf die Waldökosysteme. Für viele gesetzlich geschützte Waldlebensraumtypen wurden in Baden-Württemberg negative Veränderungen in der Vegetation der Boden- und Strauchschicht nachgewiesen (ROTH et al., 2022). Besonders empfindlich reagieren im Allgemeinen Pflanzenarten, die an nährstoffarme Standorte angepasst sind, während stickstoffliebende Pflanzenarten profitieren. Auch die Waldbäume werden durch Stickstoffeutrophierung in ihrer Vitalität beeinträchtigt. Hohe Stickstoffgehalte führen zu einem Nährstoffgleichgewicht im Boden, da andere wichtige Nährelemente, wie z. B. Magnesium, Calcium oder Kalium, von den Bäumen nicht mehr in ausreichender Menge aufgenommen werden können (WALDNER et al., 2015). Bei Mangelerkrankung verringert sich die Wassernutzungseffizienz der Bäume (BRAUN et al., 2012). Sie werden anfälliger für Trockenheit, Frost und biotische Schädlinge (DE VRIES et al., 2007, ERISMAN und DE VRIES, 2000). Übermäßige Stickstoffversorgung kann auch das Feinwurzelwachstum hemmen

und damit die Nährstoffaufnahme und das Baumwachstum zusätzlich vermindern (BRAUN et al., 2012). Auch ist die Mykorrhizierung der Wurzeln im ungünstigen Bodenmilieu durch hohen Stickstoffeintrag oft eingeschränkt (BRAUN et al., 2021).

Zur Verringerung der Stickstoffbelastung der Wälder ist es notwendig, die Emissionen aus Verkehrs- und Industriequellen weiter zu reduzieren. Vor allem aber müssen Anstrengungen unternommen werden, die bislang wenig rückläufigen Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft weiter abzusenken, beispielsweise durch eine effizientere Düngemittelverwendung und angepasste Viehbesatzdichten.



**Abb. 34:** Depositionsbehälter auf dem Schauinsland vor einer Kuhweide (Foto: R. Hug).



## 5 WALDBÖDEN ALS METHANSENKE – BAKTERIEN ALS SCHLÜSSEL ZUM KLIMASCHUTZ

Methan ist ein hochwirksames Treibhausgas und spielt für die vom Menschen verursachte Klimaerwärmung nach Kohlendioxid die zweitwichtigste Rolle. Laut aktuellem IPCC-Bericht stammen mittlerweile rund 50 bis 65 Prozent der globalen Methanemissionen aus anthropogenen Quellen wie der Haltung von Wiederkäuern oder dem Nassreisenanbau. In der Atmosphäre wird der Großteil des Methans (90 Prozent) durch chemische Reaktionen unter Beteiligung von UV-Licht wieder abgebaut.

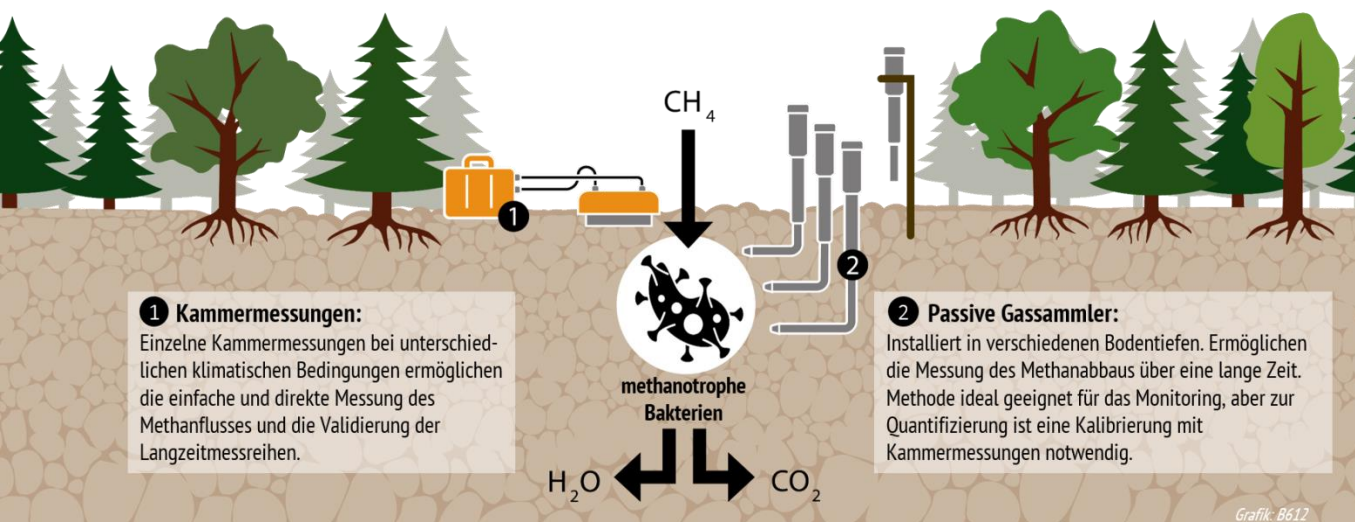
Weniger bekannt ist dagegen, dass etwa 5 Prozent des atmosphärischen Methans von in Böden lebenden Bakterien abgebaut werden (IPCC, 2021). Methan dient, neben Sauerstoff, als Energiequelle für den Stoffwechsel dieser Bakterien und man spricht deshalb von methanotrophen Bakterien. Als Stoffwechselprodukt der Methankonsumption entsteht Kohlendioxid, welches zwar ebenfalls ein Treibhausgas ist, jedoch eine 28mal geringere Treibhauswirkung als Methan besitzt. Methanotrophe Bakterien weisen eine weite Verbreitung über verschiedene Ökosysteme hinweg auf (LIU et al., 2019). In landwirtschaftlichen Böden hemmen Stickstoffdüngung und Bodenbearbeitung aber den Methanabbau (BODELIER und LAANBROEK, 2004), weshalb die Böden von Waldökosystemen die wichtigste globale Methansenke darstellen.

Im Gegensatz zu den in der Atmosphäre ablaufenden Abbauprozessen kann der Mensch auf die Methansenkenfunktion der

Waldböden prinzipiell Einfluss nehmen, etwa durch Verringerung der Bodenverdichtung oder Waldumbau. Was die Methansenke Waldböden jedoch langfristig beeinflusst, ist noch weitgehend unbekannt, ebenso wie der Einfluss des Klimawandels. Diese Wissenslücke beruht vor allem auf einem Mangel an Daten, denn Bodengasdaten über mehrere Jahrzehnte sind absolute Seltenheit. Feldmessungen zum Methanabbau in Waldböden unterliegen oft keiner einheitlichen und zeitlich regelmäßigen Beprobung, der wichtigsten Voraussetzung für ein Monitoring. Viele Messungen sind auf Grund des aufwendigen Messverfahrens auch beschränkt auf wenige Jahre. Wie sich durch den Klimawandel bedingte Veränderungen (ansteigende Temperaturen, veränderte Niederschlagsregime) auf den Methanabbau in Böden auswirken, ist daher nicht abschließend geklärt.

### Versuchsflächen

Die Methanflüsse werden in Baden-Württemberg auf den Flächen des intensiven Ökosystemmonitorings (Level II) seit mehr als 20 Jahren gemessen. Während in Fichtenbeständen die Bodenluft bereits seit 1998 beprobt wird, wurden 2010 auch Messflächen in benachbarten Buchenbeständen angelegt, um Baumarteneinflüsse untersuchen zu können. Neben reinen Wirtschaftswäldern erfolgen auch Messungen in einem Bannwald. An zwei Standorten gibt es zusätzlich langjährige Messreihen



**Abb. 35:** Abbau von Methan ( $\text{CH}_4$ ) in Waldböden. Gemessen wird langfristig über passive Gassammler, die die Bodenluft verschiedener Tiefenstufen sammeln. Zusätzlich erfolgen klassische Kammermessungen des Methanflusses in den Boden, um die Flüsse beider Messmethoden zu validieren.



**Abb. 36:** FVA-Verfahren zur Bestimmung des Methanabbaus im Waldboden auf den Flächen des intensiven Ökosystemmonitorings der FVA Baden-Württemberg (Foto: V. Lang).

aus Kalkungsversuchen. Die unterschiedlichen Höhenstufen der Standorte bewirken große Unterschiede in der Jahresniederschlagssumme und der Jahresmitteltemperatur. Auf den Standorten überwiegen sandig-schluffige Böden, die jedoch ein breites Spektrum im Skelettgehalt aufweisen.

### Bodengasmonitoring

Zur Beobachtung der Methanflüsse werden passive Gassammler (SCHACK-KIRCHNER, 1993, Abb. 35) verwendet, die dauerhaft in verschiedenen Bodentiefen bis zu einer Tiefe von 10 cm installiert sind, wo ein Großteil des Methanumsatzes stattfindet (MAIER et al., 2017). Über ein Edelstahlrohr, welches als künstliche Makropore dient, wird die Bodenluft diffusiv in einem Glasfläschchen gesammelt. Einmal installiert, werden diese Glasfläschchen in einem regelmäßigen Rhythmus, mindestens aber alle vier Wochen, getauscht und im Labor auf den Methanengehalt in der Bodenluft analysiert. Die Bodengasbeprobung mit Passivsammlern ist nicht destruktiv und kann deswegen prob-

lemlos für das Langzeitmonitoring einer Fläche eingesetzt werden. Um aus den Methangehalten in den verschiedenen Tiefenstufen die tatsächlichen Methanflüsse im Boden und damit die Rate der Methankonsumption ermitteln zu können, muss die Gasdurchlässigkeit des jeweiligen Waldbodens für Methan bekannt sein, die unter anderem vom aktuellen Wassergehalt abhängt. Da diese Größen nur mit einer gewissen Unsicherheit bestimmt werden können, werden die kontinuierlichen Messungen mittels passiver Gassammler um Kammermessungen bei verschiedenen Bodenfeuchtebedingungen ergänzt (Abb. 36). Kammermessungen sind die häufigste Messmethode zur Bestimmung von Treibhausgasflüssen. Dabei wird für gewöhnlich eine Haube auf den Waldboden aufgesetzt. Die Menge an Methan, die von Bakterien im Waldboden verbraucht wird, führt während der Messung zu einem Konzentrationsabfall in der Messhaube. Hieraus kann direkt auf die abgebaute Methanmenge bzw. die Rate der Methankonsumption im Waldboden geschlossen werden. Durch den Vergleich beider durchgeführten Messmethoden wird eine Validierung der Langzeitmessreihen ermöglicht.



## Steuergrößen des Methanabbaus

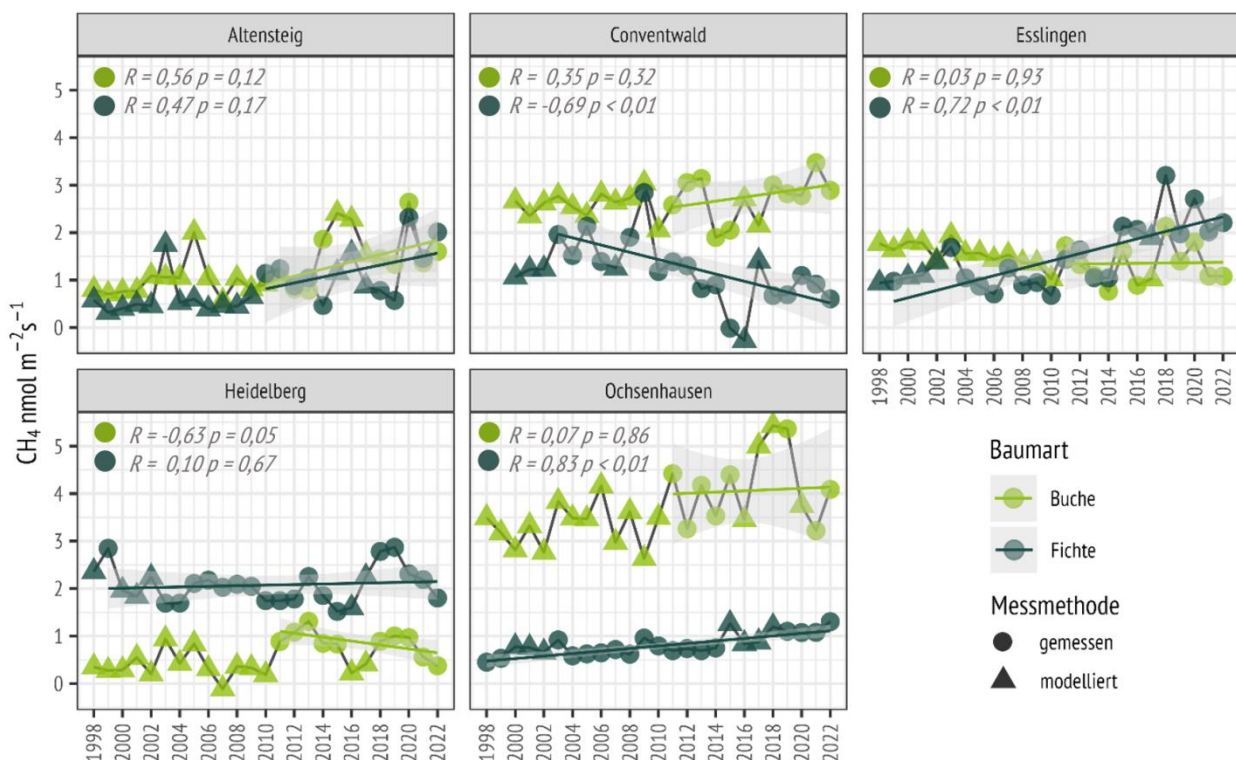
Kurzzeitig steuern vor allem Bodenfeuchte und -temperatur die mikrobielle Aktivität und damit auch den Methanabbau in Waldböden. Bei trockenen Bedingungen kann Sauerstoff und Methan aus der Atmosphäre leicht in den Boden diffundieren und mehr Methan abgebaut werden. Steigt der Wassergehalt, so sind immer weniger Bodenporen luftgefüllt, wodurch der Methanabbau reduziert wird. Der Bodenfeuchtegehalt wiederum ist von anderen Faktoren abhängig. Feinkörnige, wenig poröse Böden mit einem hohen Tongehalt können das Wasser über einen längeren Zeitraum halten und weisen damit einen geringeren Gasaustausch auf als grobkörnige, poröse Böden mit einem hohen Sandgehalt.

Je höher die Temperatur, umso aktiver sind auch die methanotrophen Bakterien im Boden. Im Sommer wird daher mehr Methan abgebaut als in den Wintermonaten. Der Einfluss des Bodenwassergehalts überwiegt jedoch. Die Saisonalität der Methanflüsse ist daher weniger ausgeprägt als beim CO<sub>2</sub>-Fluss, der die Atmung aller Bodenlebewesen widerspiegelt und somit deutlich stärker von der Bodentemperatur beeinflusst wird.

## Langfristige Trends des Methanabbaus

Über die bekannten kurzzeitigen Treiber wie Bodentemperatur und -feuchte sowie zusätzliche auf den Flächen erhobene Klimaparameter lässt sich der Methanabbau mit statistischen Methoden modellieren, um dann auch langfristige Trends und Einflussfaktoren untersuchen zu können. Alle untersuchten Monitoringflächen in Baden-Württemberg weisen eine durchweg positive Methankonsumption auf (Abb. 37), stellen also tatsächlich eine Methansenke dar.

Vor allem für die längeren Messreihen in den Fichtenbeständen zeigen sich signifikante, aber über alle Flächen uneinheitliche zeitliche Trends. Auf zwei der fünf betrachteten Fichtenstandorte (Esslingen, Ochsenhausen) steigt die Methankonsumption über den Beobachtungszeitraum, während die Methankonsumption am Standort Conventwald mit der Zeit signifikant abgenommen hat und an zwei weiteren Standorten (Altensteig, Heidelberg) keine Veränderung zeigt. Auch in den Buchenbeständen zeigt die Mehrheit der Standorte positive (Altensteig, Conventwald) oder keine (Esslingen, Ochsenhausen) Trends, wenngleich die Ergebnisse aufgrund der Kürze der Zeitreihen statis-

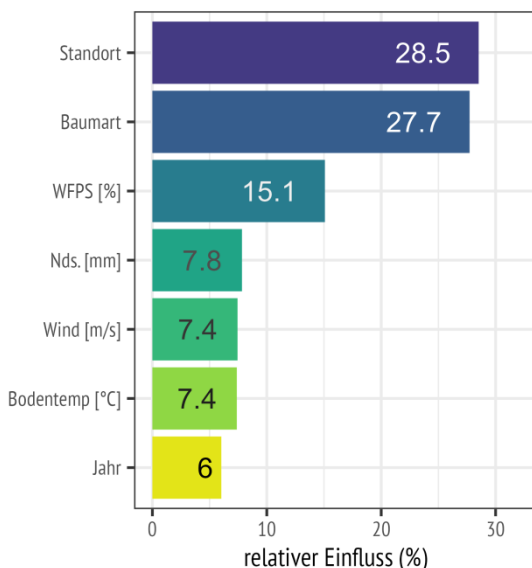


**Abb. 37:** Trendanalyse der Methankonsumption aller bisher ausgewerteten Messflächen in Baden-Württemberg. Die langzeitlichen Trends sind teilweise signifikant ( $p \leq 0,05$ ), jedoch nicht eindeutig gerichtet und unterliegen einer großen Unsicherheit. Da die Modellierung der Methanflüsse noch vorläufig ist, wurde der Trend bisher nur über den Zeitraum der gemessenen Daten betrachtet. Die graue Fläche gibt den Standardfehler der Trendgeraden der Methanflüsse an.

tisch noch nicht abgesichert sind. Eine generelle Abnahme der Methansenke in Waldböden kann auf Grundlage dieser Messdaten daher nicht angenommen werden.

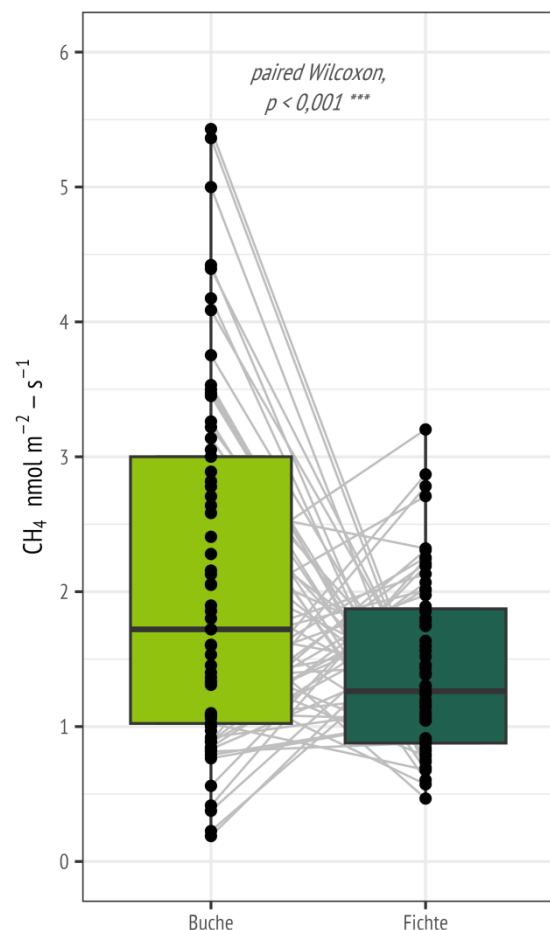
### Einflussfaktoren auf die Methansenkenfunktion

In der statistischen Analyse der Einflussfaktoren auf die Jahreswerte der Methanflüsse zeigen sich unter Berücksichtigung aller erfassten Umweltparameter auf den Versuchsfeldern als größte Einflussfaktoren der Standort (29 Prozent) direkt gefolgt von der Baumart (28 Prozent) (Abb. 38). Standortliche Unterschiede wie die Bodentextur, der Skelettgehalt oder die Nährstoffvorräte im Boden nehmen offenbar mehr Einfluss auf den lokalen Methanabbau als Klimaparameter. Es zeigt sich, dass in Buchenbeständen signifikant mehr Methan abgebaut wird als in den benachbarten Fichtenflächen (Abb. 39), Böden unter Fichten also für methanotrophe Bakterien ungünstigere Bedingungen bieten. Dies liegt vor allem an der Nadelstreu, welche ätherische Öle (sogenannte Monoterpene) enthält, dadurch die mikrobielle Aktivität hemmt und somit auch den Methanabbau in Waldböden reduziert. Der Klimaschutz aus Bodenperspektive liefert damit ein weiteres Argument für den Waldbau hin zu höheren Anteilen an Laubbaumarten an dafür geeigneten Standorten.



**Abb. 38:** Analyse der langzeitlichen Einflussfaktoren auf die Jahresmittelwerte der Methankonsumption aller Standorte mit Hilfe von Boosted Regression Trees. Chemische Kenndaten der Böden sind bisher noch nicht integriert. WFPS bezeichnet den wassergefüllten Porenraum, Nds. den mittleren Jahresniederschlag.

Der im Jahresmittel wassergefüllte Porenraum (WFPS) nimmt mit 15 Prozent Einfluss auf den Methanabbau, gefolgt von der Jahresniederschlagssumme mit 8 Prozent (Abb. 38). Der Bodenwassergehalt bestimmt damit nicht nur kurzzeitig den Abbau, sondern hat auch einen langfristigen Einfluss auf den Methanabbau. Nasse Jahre bzw. erhöhte Jahresniederschlagssummen hemmen den Gastransport, während in trockenen Jahren ein vermehrter Methanabbau stattfindet. Bisher ist auf den Versuchsfeldern in Baden-Württemberg aber noch keine generelle Zunahme der Jahresniederschlagssumme zu beobachten. Lediglich die Bodentemperatur zeigt über die gesamte Beobachtungsperiode eine eindeutige Zunahme. Die Temperatur spielt aber, wie auch die übrigen Umweltparameter, für die zeitliche Entwicklung der Methansenkenleistung nur eine untergeordnete Rolle. Damit kann auf der Grundlage der Messreihen bisher kein Zusammenhang zwischen Methankonsumption und sich verändernden Umweltparametern als Folge des Klimawandels angenommen werden.



**Abb. 39:** Vergleich der Jahresmittelwerte der Methankonsumption in Buchen- und Fichtenbeständen desselben Standorts ab 2010. Waldböden im Buchenbestand zeigen signifikant höhere Methankonsumptionsraten.



**FVA-Projekt:  
Soils as Methan Sinks (SaMS)**

Im Rahmen des vom Waldklimafond finanzierten Projektes „SaMS“ untersucht die FVA Baden-Württemberg, ob rückläufige Trends des Methanabbaus auch in baden-württembergischen Wäldern beobachtet werden können und wie der Mensch die Methansenkenfunktionen des Waldbodens erhöhen kann.



[www.fva-bw.de/soils-as-methane-sinks](http://www.fva-bw.de/soils-as-methane-sinks)

Auch das Messjahr hat einen gewissen Einfluss (6 Prozent) auf den Methanabbau. Während lange Zeit kaum Veränderungen im Methanabbau zu erkennen waren, nahm dieser in den Trockenjahren 2015 bis 2018 stark zu. Die geringe Bodenfeuchte in den Trockenjahren erhöhte den Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre, wodurch den Bakterien mehr Methan als Nahrungsquelle zur Verfügung stand und abgebaut wurde. Diese Zunahme kehrte sich ab dem Jahr 2019 jedoch um. Ursächlich hierfür sind die starken Absterbeerscheinungen und Auflichtungen der untersuchten Waldbestände infolge der mehrjährigen intensiven Trockenphase, wodurch der Waldboden dem Sonnenlicht intensiver ausgesetzt ist, sich stärker erwärmt und infolgedessen der Humus verstärkt abgebaut wird. Bei der Mineralisation werden große Mengen Ammonium freigesetzt, welche ein für den Methanstoffwechsel der Bakterien essentielles Enzym hemmen und somit den Methanabbau bremsen. Dies führte in den letzten Jahren zu einer Abnahme der Methansenkenleistung, wenn auch nicht auf das Niveau von vor 2015.

## Fazit und Ausblick

Die Methankonsumption zeigt auf den verschiedenen Intensivmessflächen in Baden-Württemberg keinen einheitlichen Trend. Es wurden sowohl tendenziell zunehmende als auch abnehmende oder stagnierende Methanabbauraten beobachtet. Die Befürchtung, dass infolge des Klimawandels oder anderer Umwelteinflüsse die Methansenke von Waldböden generell abnehmen könnte, kann aktuell auf der Grundlage dieser Auswertungen nicht bestätigt werden. Es zeigen sich jedoch große standörtliche Einflüsse und systematische Unterschiede zwischen Buchen- und Fichtenbeständen. Ein zunehmender Laubholzanteil im Zuge des klimaangepassten Waldumbaus könnte demgemäß zu einer Steigerung der Methansenkenleistung und somit zu einer Stärkung der Klimaschutzfunktion von Waldböden führen.

Noch sind die Auswertungen zum Methanabbau in den Waldböden Baden-Württembergs nicht abgeschlossen. Neben der Bodenluft werden auf den Flächen des intensiven Ökosystemmonitorings (Level II) auch Streu-, Wasser- und Bodenproben chemisch analysiert. Diese Daten sollen zusammen mit weiteren, regelmäßig erfassten Kenndaten (unter anderem Phänologie und Bodenprofilansprachen) genutzt werden, um die Ursachen der beobachteten standörtlichen Unterschiede in den Methanabbauraten und deren zeitlichen Trend noch differenzierter zu erklären.

## 6 FORSTLICHES UMWELTMONITORING

Das Forstliche Umweltmonitoring untersucht den Zustand der Wälder. Es dient dazu Veränderungen zu erfassen, Risiken für den Waldzustand aufzuzeigen und Auswirkungen auf die Ökosystemfunktionen von Wäldern zu belegen. Hierfür werden auf verschiedenen Ebenen die Reaktionen der Waldökosysteme auf einwirkende Umwelteinflüsse intensiv beobachtet (Abb. 40).

Die mittlerweile über 30 Jahre alten Datenzeitreihen des Forstlichen Umweltmonitorings stellen eine wertvolle Informationsquelle dar, die von vielen Forschenden zur Beantwortung unterschiedlichster Fragestellungen genutzt wird. Die Daten bieten die Möglichkeit, langfristige Veränderungen in Waldökosystemen zu analysieren, deren Ursachen zu ergründen und Strategien für die Bewirtschaftung und den Waldbau zu entwickeln, um die vielfältigen Funktionen von Waldökosystemen auch zukünftig zu gewährleisten.

Durch den Klimawandel stehen die Wälder aktuell vor großen Herausforderungen. Extremwetterereignisse wie langanhaltende sommerliche Hitze- und Dürreperioden, Sturm- und Orkan-

böen oder auftretende Spätfrostereignisse bedeuten mittlerweile in Kombination mit verschiedenen Schadorganismen eine außerordentlich hohe und anhaltende Belastung der Wälder. Zusätzlich ist der Nährstoffkreislauf vieler Waldstandorte durch die anthropogen bedingte Versauerung und Eutrophierung gestört, wodurch die Waldernährung im Hinblick auf verschiedene essentielle Nährelemente beeinträchtigt ist.

In den nächsten Jahren und Jahrzehnten werden sich die Wälder in vielen Landesteilen unter dem Einfluss klimatischer Veränderungen wandeln. Mit dem Forstlichen Umweltmonitoring können diese dynamischen Veränderungen systematisch beobachtet und so beispielsweise regionale Schwerpunkte erhöhter Waldbaurisiken ermittelt werden. So ist bereits heute ersichtlich, dass die Fichte in bestimmten warm-trockenen Regionen Baden-Württembergs unterhalb von 600 Metern ausfällt. In welchem Ausmaß sich die Wälder zukünftig verändern werden, zeigt sich schon heute eindrücklich in der Oberrheinebene, in der die Kiefer flächig ausfällt und Buchen, aber auch Douglasien stark geschädigt sind.

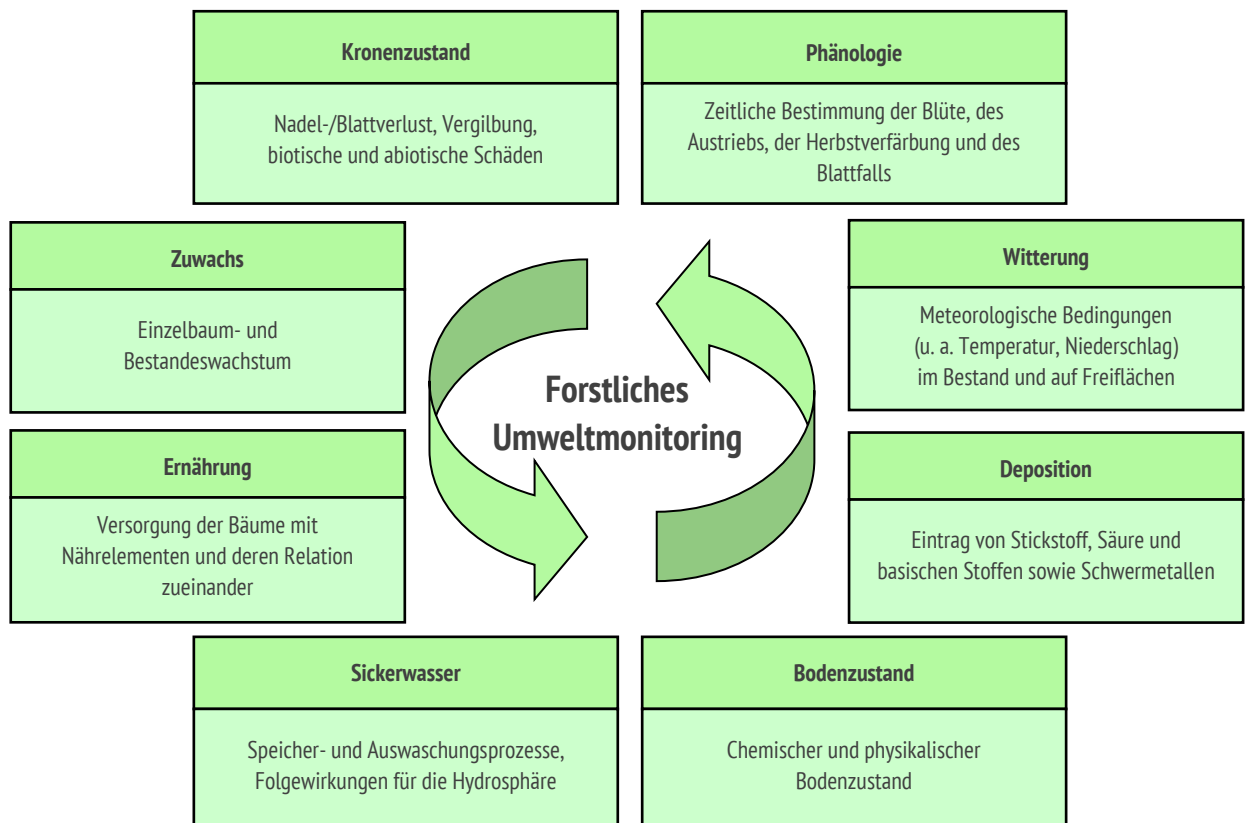


Abb. 40: Themen und Messgrößen des Forstlichen Umweltmonitorings.



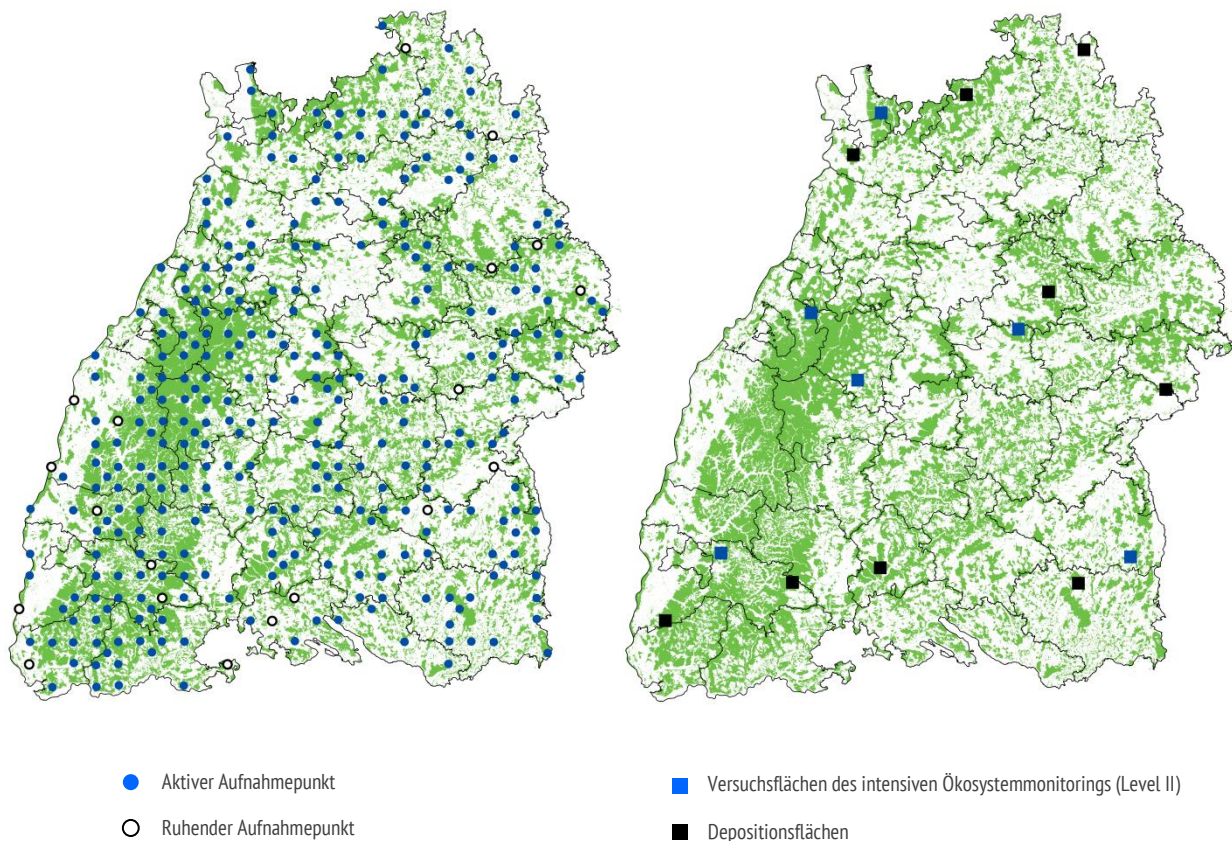
## Methodischer Aufbau

Das Forstliche Umweltmonitoring gliedert sich methodisch in zwei unterschiedliche Untersuchungsebenen: die Rasterstichproben und die Versuchsflächen.

Die Rasterstichproben umfassen systematisch ausgewählte Stichprobenpunkte, die über das gesamte Land gleichmäßig verteilt sind. Aufgrund ihres hohen Stichprobenumfangs liefern sie flächenrepräsentative Ergebnisse für die gesamte Waldfläche Baden-Württembergs. Jeder Stichprobenmittelpunkt im Wald wird als Aufnahmepunkt angelegt, unabhängig von Standort, Baumartenzusammensetzung oder sonstigen Kriterien. Seit dem Jahr 2005 werden in Baden-Württemberg alle Erhebungen der Rasterstichproben einheitlich auf dem 8x8 km Netz sowie auf dem europäischen 16x16 km-Netz durchgeführt (Abb. 41, links). Davor fand die Waldzustandserhebung auf jährlich wechselnden Aufnahmerastern mit stark schwankender Anzahl an Aufnahmepunkten statt (Anlage 2). Neben der Waldzustandserhebung (WZE) zählt die Bodenzustandserhebung (BZE) sowie die Immissionsökologische Waldernährungsinventur (IWE) zu den Rasterstichproben.

Die geografische Lage der Versuchsflächen wird im Gegensatz zu den Rasterstichproben entsprechend dem Untersuchungsziel bestimmt. Hierbei können der Standort, die Baumartenzusammensetzung, das Baumalter oder die Verteilung der Versuchsflächen im Land ausschlaggebend für die Auswahl sein (Abb. 41, rechts). Auf den Versuchsflächen finden prozessorientierte Untersuchungen statt, die eine Analyse von Ursache-Wirkungs-Beziehungen für bestimmte Standorte oder Waldgebiete ermöglichen. Zu den Versuchsflächen gehören die Flächen des intensiven Ökosystemmonitorings, die Waldklimastationen, die Depositionsflächen sowie andere Versuchsstandorte, die zusätzliche fachspezifische Informationen über die Waldentwicklung erfassen.

Mit den beiden unterschiedlichen Untersuchungsebenen des Forstlichen Umweltmonitorings ist es möglich, ein ausgewogenes Verständnis der Waldökosysteme in Baden-Württemberg zu erlangen. Während die Rasterstichproben die Vitalität und Veränderungen der Wälder auf breiter Basis aufzeigen, bieten die Versuchsflächen die Möglichkeit, spezifische Fragen zur Waldökologie und zu den Einflüssen von Umweltfaktoren auf bestimmten Standorten zu vertiefen.



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

### Waldstrategie Baden-Württemberg 2050: Analyse und Monitoring des Waldes durch forstliche Fernerkundung

Fernerkundungsverfahren nutzen Aufnahmen aus Drohnen, Flugzeugen oder Satelliten. Sie zeichnen die spektrale Reflexion von Waldoberflächen und/oder deren horizontale und vertikale Strukturen auf. Dadurch können sie flächige Analysen liefern und somit in Kombination mit terrestrischen Inventuren wie der Waldzustandserhebung eine neue Qualität im Monitoring der Wälder ermöglichen.

Dazu bedarf es Arbeitsabläufe zur standardisierten und qualitätsgesicherten Prozessierung und IT-Infrastrukturen, die rechenintensive Analysen erlauben. Dies hat sich die FVA Freiburg mit dem Aufbau eines forstlichen Fernerkundungszentrums zur Aufgabe gemacht, welches unter dem Dach der Waldstrategie 2050 etabliert und finanziert wird.



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

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

#### Neues Bodenfaunamonitoring

Der Boden ist ein fundamentaler Bestandteil des Ökosystems, bildet er doch die Grundlage für das gesamte terrestrische Leben. Es wird vermutet, dass weltweit knapp 60 Prozent aller Arten permanent oder periodisch den Boden als Habitat nutzen (ANTHONY et al. 2023). Dabei sind besonders Waldböden dicht und artenreich mit Lebewesen besiedelt. Neben mikroskopisch kleinen Organismen wie Bakterien und Pilzen bilden vor allem wirbellose Tiere wie Springschwänze, Hornmilben und Regenwürmer einen wichtigen Bestandteil der Biodiversität im Boden.

Durch ihre Grabtätigkeiten sowie der Zerkleinerung und Zersetzung von totem organischem Material steuern Bodenorganismen entscheidende Prozesse wie die Belüftung, Entwässerung und Nährstoffkreisläufe von Böden. Dadurch nehmen sie eine Schlüsselrolle für die Verfügbarmachung von Nährstoffen für die pflanzliche Primärproduktion, aber auch die Kohlenstoffsenkenfunktion von Waldböden ein.

Das Forstliche Umweltmonitoring hat sich lange Zeit auf die Messung abiotischer (chemischer, physikalischer, hydrologischer) Bodenkennwerte beschränkt. Mit dem wachsenden Wissen über die Bedeutung der Bodenfauna für sämtliche biogeochemischen Prozesse im Boden haben Bestrebungen zugenommen, die Bodenfauna in das Umweltmonitoring zu integrieren. In Baden-Württemberg wird seit mehreren Jahren die Bodenfauna von Wäldern auf landesweit verteilten Flächen entlang diverser Umwelt- und Bewirtschaftungsgradienten intensiv untersucht. Dabei stehen die Analyse des Vorkommens, der Artenzahl, der Biomasse und der Gemeinschaftsstruktur von Regenwürmern (Lumbricidae), Springschwänzen (Collembola) und Hornmilben (Oribatida) sowie Laufkäfern (Carabidae) im Fokus der Untersuchung (Abb. 42). Aufbauend auf den ersten Untersuchungen wurde ein Konzept entwickelt, mit welchem das Bodenfaunamonitoring als Teil des Forstlichen Umweltmonitorings regelmäßig und dauerhaft beobachtet werden soll.





**Abb. 42:** Aufnahme eines Springschwanzes (*Collembola*) der Art *Dicyrtomina ornata* (Foto: S. Bluhm).

Anknüpfend an das Bodenfaunamonitoring untersucht die FVA Baden-Württemberg im Projekt „Relevanz des Waldbodenmikrobioms (WBMB) für Nährstoffkreisläufe und Einflüsse von Baumart und Klima“ zusammen mit der Universität Freiburg und der Technischen Universität München die Artenzusammensetzung der Mikroorganismen, sowie deren Funktion für Nährstoffkreisläufe in Waldböden. Finanziert wird das Projekt von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR). Die Untersuchungen werden auf verschiedenen Versuchsflächen der Baumarten Fichte, Douglasie und Buche entlang eines Temperatur- und Niederschlagsgradienten durchgeführt. Die mikrobielle Artenzusammensetzung wird mittels genetischer Sequenzierung bestimmt. Neben dem Einfluss der mikrobiellen Gemeinschaft auf die Nährstoffkreisläufe im Waldboden sollen unter anderem auch die zu erwartenden Veränderungen der mikrobiellen Gemeinschaft und deren Funktion infolge des Klimawandels beurteilt werden. Daraus ableitend können so zukünftige Belastungen der Wälder abgeschätzt und Auswirkungen der Baumartenzusammensetzung auf die Nährstoffkreisläufe und die Kohlenstoffsenkenfunktion von Waldböden prognostiziert werden.

#### FVA-Projekte: Bodenfauna und Bodenmikrobiom

Weitere Informationen zum Bodenfaunamonitoring und dem Projekt „Relevanz des Waldbodenmikrobioms (WBMB) für Nährstoffkreisläufe und Einflüsse von Baumart und Klima“ finden Sie hier:



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



[www.fva-bw.de/klima-bodenorganismen](http://www.fva-bw.de/klima-bodenorganismen)

## 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 Aufnahme nicht mehr stehend am Stichprobenpunkt vorhanden sind, werden 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.

Hauptkriterium zur Beurteilung des Kronenzustandes sind der Nadel-/Blattverlust 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.

## Durchführung der Waldzustandserhebung 2023

Die diesjährigen Außenaufnahmen zur Waldzustandserhebung fanden im Zeitraum vom 21. Juli bis 18. August an insgesamt 320 Stichprobenpunkten statt. An weiteren 19 Stichprobenpunkten ruht derzeit die Aufnahme, da nicht mehr genügend Bäume in ausreichender Höhe zur Verfügung stehen.

Für die Waldzustandserhebung 2023 wurde der Kronenzustand von insgesamt 7.661 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 Douglasie. Alle anderen vorkommenden Baumarten werden für die Darstellung des Kronenzustandes in den Gruppen „sonstige Nadelbäume“ und „sonstige Laubbäume“ zusammengefasst.

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 2023

Tab. 1: Schadstufenberechnung.

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

Berechnung der Schadstufen				
Nadel-/Blattverlustklasse	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	

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 und Bergahorn sowie den sonstigen Laubbäumen überwiegt der Anteil der jüngeren Altersstufe; dagegen ist bei der Tanne und den sonstigen Nadelbäumen der Anteil älterer Bäume besonders hoch.

## Qualitätssicherung

Seit Beginn der Waldzustandserhebung in Baden-Württemberg wird durch zahlreiche Maßnahmen zur Qualitätssicherung eine hohe Datenqualität gewährleistet. 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 Aufnahmeteam in Baden-Württemberg intensiv auf eigens hierfür eingerichteten Schulungspfaden durch die FVA Baden-Württemberg vorberei-



**Tab. 2:** Anzahl untersuchter Probestämme der Waldzustandserhebung 2023 und prozentuale Anteile nach Baumarten.

Baumart	bis 60 Jahre	ab 61 Jahre	Gesamt	Anteil %
<b>Fichte</b>	907	1.575	2.482	32,4%
<b>Tanne</b>	178	740	918	12,0%
<b>Kiefer</b>	72	252	324	4,2%
<b>Douglasie</b>	102	54	156	2,0%
<b>sonstige Nadelbäume</b>	21	118	139	1,8%
<b>Buche</b>	530	1.411	1.941	25,4%
<b>Eiche</b>	176	436	612	8,0%
<b>Bergahorn</b>	173	105	278	3,6%
<b>Esche</b>	97	153	250	3,3%
<b>sonstige Laubbäume</b>	405	156	561	7,3%
<b>Gesamt</b>	2.661	5.000	7.661	100,0%

tet. 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 Kurse zur Abstimmung 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 Kronensprache innerhalb Baden-Württembergs und im gesamten Bundesgebiet bestätigen.

## Auswertungsmethoden

Um die Stichprobenergebnisse der Waldzustandserhebung 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-/Blattverlustes 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 aufgenommen wurden.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die vergleichsweise günstigen Witterungsbedingungen des Jahres 2023, mit ausreichend Niederschlag im Frühjahr und häufigen Regenereignissen im Juli und August, haben zu einer teilweisen Regeneration der Wälder beigetragen. Die Folgen der ausgeprägten sommerlichen Hitze- und Dürreperioden der vergangenen Jahre sind in den Wäldern Baden-Württembergs in allen Landesteilen aber weiterhin unübersehbar. Eine hohe Absterberate sowie ein schlechter Kronenzustand der Bäume prägen vielerorts das Waldbild.

### Leichte Erholung – jedoch weiterhin starke Schäden

Die mittlere Kronenverlichtung der Wälder verringert sich im Jahr 2023 um 1,5 Prozentpunkte auf 26,9 Prozent. Der Schädigungsgrad der Wälder Baden-Württembergs ist allerdings weiterhin sehr hoch. Seit dem Beginn der Waldzustandserhebungen wurde lediglich in den Jahren 2019, 2020 und 2022 eine höhere Kronenverlichtung festgestellt. Aktuell gelten 44 Prozent der Waldfläche als deutlich geschädigt. Neben den Folgen der Hitze- und Dürrejahre beeinträchtigen in diesem Jahr erneut verschiedene Schadorganismen wie holzbrütende Insekten, blattfressende Raupen bzw. Käfer sowie pilzliche Schaderreger die Vitalität der Wälder.

In Baden-Württemberg ist seit dem Jahr 2018, ausgelöst durch Sturm- und Schneebruchholz in Kombination mit ausgeprägten sommerlichen Dürrephasen, eine massive Ausbreitung verschiedener Fichten- und Tannenborkenkäfer zu beobachten. Auch im Verlauf des Jahres 2023 führte die hohe Ausgangspopulation der Borkenkäfer, trotz verzögerter Entwicklung nach kühl-feuchter Frühjahrswitterung, zu einer hohen Absterberate von Fichten und Tannen. Besonders betroffen waren der Schwarzwald sowie die nordöstlichen Landesteile von Baden-Württemberg. Während der Kronenzustand der Fichten im Landesdurchschnitt mit 24,9 Prozent mittleren Nadelverlusts im Vergleich zum Vorjahr nahezu unverändert bleibt, zeigt sich dieses Jahr im Kronenzustand der Tannen eine Verbesserung. Besonders junge Bäume erwiesen sich dieses Jahr als sehr vital. Der Nadelverlust der Tannen verringert sich im Mittel auf 23,5 Prozent.

Für die Kiefer stellen die trocken-heißen Standorte der Oberrheinebene einen besonderen Schadensschwerpunkt in Baden-Württemberg dar. Durch Trockenstress und starken Mistelbefall kommt es hier seit mehreren Jahren zu einer starken Schädigung der Bäume. Geschwächte Kiefern sind zudem prädisponiert für einen Befall durch verschiedene Schwächeparasiten wie *Diplodia* (Pilzinfektion) oder holzbrütende Käfer, deren Befall häufig zum Absterben der Bäume führt. Aber auch in anderen Regionen Baden-Württembergs zeichnet sich seit wenigen Jahren ein ähnliches Schädgeschehen bei einzelnen Kiefern ab. Dennoch verringert sich dieses Jahr, unter dem Einfluss ausreichender Niederschläge, der Nadelverlust der Kiefern landesweit auf 31,4 Prozent.

Ebenfalls verbessert hat sich der Kronenzustand der Douglasien. Der mittlere Nadelverlust verringert sich auf 19,2 Prozent. Besonders vital zeigen sich dieses Jahr junge Douglasien, während bei älteren Bäumen oftmals unter dem Einfluss des pilzlichen Erregers der Douglasienschütte stärkere Kronenschäden auftreten.

Der mittlere Blattverlust der Buchen hat sich gegenüber dem Vorjahr mit 32,3 Prozent kaum verändert. Durch die häufigen Niederschläge während der Vegetationszeit wurden auch bei der Buche deutlich weniger Trocknisschäden registriert, als dies noch in den Vorjahren der Fall war. Jedoch führten ein erhöhter Fruchtbehang und ein verstärkter Befall durch den Buchenspringrüssler wiederholt zu einer starken Belastung der Bäume, die sich in einer erhöhten Kronenverlichtung älterer Buchen zeigte. Dagegen hat sich dieses Jahr der Vitalitätszustand jüngerer Buchen nach den erheblichen Trockenschäden im Vorjahr deutlich erholt.

Auch der Kronenzustand der Eiche hat sich dieses Jahr spürbar verbessert. Insbesondere bei älteren Eichen konnte gegenüber dem Vorjahr eine Regeneration der Baumkronen festgestellt werden, die häufig sehr große Blätter und eine dichte Belaubung aufwies. Begünstigt wurde die Erholung des Vitalitätszustandes durch eine geringe Blüh- und Fruchtdensität und damit eine geringere physiologische Belastung der Eichen. Der mittlere Blattverlust der Eichen verringert sich dementsprechend deutlich auf 29,4 Prozent. Regional wurden allerdings auch dieses Jahr stärkere Kronenschäden an Eichen registriert, die zum einen durch blattfressende Schmetterlingsraupen oder Mehltaupilzbefall verursacht wurden. Zum anderen werden seit



einigen Jahren insbesondere auf flachgründigen und wenig wasserspeichernden Böden stärkere Kronenschäden beobachtet. Geschwächte Eichen sind zudem besonders durch den Eichenprachtkäfer gefährdet.

Im Vergleich mit den anderen Baumarten ist der Schädigungsgrad des Bergahorns im Landesdurchschnitt geringer, was auf den hohen Anteil an jungen Bäumen dieser Baumart zurückgeführt werden kann. Gegenüber dem Vorjahr verringert sich der mittlere Blattverlust des Bergahorns auf 17,2 Prozent. Nach den vergangenen Trockenjahren ist an geschwächten Bäumen vermehrt die Ahorn-Rußrindkrankheit aufzufinden: eine Pilzerkrankung, bei der auf der Rinde ein schwarzes Sporenlager angelegt wird und befallene Bäume meist innerhalb kurzer Zeit absterben.

Besonders dramatisch stellt sich der Vitalitätszustand der Esche dar, die stark unter dem Befall des pilzlichen Erregers des Eschentriebsterbens leidet. Neben einer Schädigung der Eschentriebe bilden sich im Zuge der Krankheit oftmals Stammfußnekrosen, die zu einer Instabilität der Eschenbestände führen. Die Mortalitätsrate der Eschen ist stark erhöht, so dass der Eschenanteil im Land seit einigen Jahren kontinuierlich abnimmt. Der Schädigungsgrad der (bislang) überlebenden Eschen ist zudem mit einem mittleren Blattverlust von 42,6 Prozent sehr hoch.

### Vitalität der Buche

Der Vitalitätszustand der Buche hat sich aufgrund der außergewöhnlichen Dürre und Hitze der vergangenen Jahre extrem verschlechtert. Seither ist der Holzeinschlag der Buche sprunghaft angestiegen. Der Einschlag geschädigter Buchen steht oft im Zusammenhang mit einer aufgrund von Pilzbefall zu erwartenden raschen Holzersetzung.

Im Gegensatz zu Fichte und Tanne, bei denen von Borkenkäfern befallene Bäume in der Regel rasch absterben, reagiert die Buche meist mit einem verzögerten, länger andauernden Siechtum auf ihre Belastungssituation. Oftmals ist bei schwer geschädigten Buchen die Oberkrone bereits abgestorben, während der untere Kronenbereich noch lebt. Herausbrechende Zweige und Äste stellen dabei für die Waldarbeit und den Waldbesuch eine große Gefahr dar.

Im Verlauf des trocken-heißen Sommers 2022 wurden vor allem in den Wuchsgebieten Oberrheinisches Tiefland und Neckarland starke Schäden an bestehender Buchen-Naturverjüngung festgestellt, die sich durch Vergilbung, Welke und erhöhter Mortalität äußerte. Folgeuntersuchungen im Jahr 2023 zeigten jedoch, dass es aufgrund der häufigeren Niederschläge in diesem Jahr zu keiner weiteren Schädigung junger Buchen kam.

Zudem wurde im Jahr 2022 an einzelnen Standorten in Baden-Württemberg eine außergewöhnliche Wuchsreaktion junger Buchen beobachtet. Nach einer langen Sommertrockenheit im Spätsommer kam es nach ausgiebigen Niederschlägen zu einem vorzeitigen Austrieb der bereits für das nächste Jahr angelegten Knospen. Da an diesen Trieben keine vollständige Verholzung mehr erfolgen kann, sind sie grundsätzlich im Winter einer hohen Frostgefährdung ausgesetzt. Im vergleichsweise milden Winter 2022/23 wurden jedoch kaum akute Frostschäden festgestellt. Jedoch wiesen betroffene Buchen im Frühjahr 2023 einen deutlich verkürzten Neuaustrieb auf.

Die häufig beobachteten Absterbeerscheinungen in der Oberkrone von Altbuchen stehen meist in Verbindung mit einem Befall durch die „Pfennig-Kohlenkruste“. Dieser Pilz dringt in das Holz ein und verursacht dort eine Holzfäule. Labortechnische Untersuchungen zeigen zwar eine niedrigere Abbaurate im Vergleich mit anderen vorkommenden Weißfäule verursachenden Pilzen, jedoch ist zu vermuten, dass sich die Aktivität der wärmeliebenden „Pfennig-Kohlenkruste“ zukünftig weiter erhöhen wird.

Das Zusammenspiel zwischen abiotischen und biotischen Schadfaktoren lässt unter den rasch ablaufenden klimatischen Veränderungen noch viele Fragen offen. Daher müssen in den nächsten Jahren weitere Untersuchungen zur Buchenvitalitätsschwäche durchgeführt werden, um daraus stabilisierende, präventive und kurative Maßnahmen für Buchenwälder ableiten zu können.

### Methansenke Waldboden

Methan ist nach Kohlendioxid das zweitwichtigste Treibhausgas, welches den vom Menschen gemachten Klimawandel verstärkt. Zwar wird weit weniger Methan ausgestoßen als Kohlendioxid, jedoch ist die Treibhauswirkung gegenüber Kohlendioxid um den Faktor 28 erhöht. Laut aktuellem IPCC-Bericht stammen mittlerweile rund 50 bis 65 Prozent der globalen

Methan-Emissionen aus anthropogenen Quellen wie der Haltung von Wiederkäuern oder dem Nassreisbau.

Im Boden lebende Bakterien können das geruch- und farblose Gas Methan unter Bildung von Kohlendioxid abbauen. Da auf landwirtschaftlichen Flächen die Aktivität der Bakterien durch Düngung und Bodenbearbeitung gehemmt wird, gelten Waldböden global als die wichtigste Methansenke. Jedoch sind die Einflussfaktoren und insbesondere die Auswirkungen des Klimawandels auf die Methansenkenfunktion der Waldböden noch weitgehend unbekannt. In Baden-Württemberg wird daher auf Versuchsflächen der langfristige Trend des Methanabbaus untersucht.

An den Versuchsflächen des intensiven Ökosystemmonitorings (Level II) werden zur langfristigen Messung der Methanabnahme in Waldböden Passivgassammler verwendet, die in verschiedenen Bodenschichten bis zu einer Tiefe von 10 cm dauerhaft installiert sind. Zusätzlich werden bei verschiedenen Bodenfeuchtebedingungen Kammerversuche durchgeführt. Untersucht werden dabei auf unterschiedlichen Standorten sowohl Fichten- als auch benachbarte Buchenbestände. Neben reinen Wirtschaftswäldern erfolgen zudem Messungen in einem Bannwald.

Der kurzfristige Methanabbau im Waldboden wird im Wesentlichen durch die Bodenfeuchte und die Bodentemperatur bestimmt. Bei trockenen Bedingungen diffundiert viel Methan in die freien Bodenporen und kann dort von Bakterien abgebaut werden. Gleichzeitig steigt die mikrobielle Aktivität mit höheren Temperaturen.

Eine modellgestützte, statistische Analyse der Messdaten zeigt für die Versuchsflächen in Baden-Württemberg einen langfristigen Methanabbau im Waldboden. Vor allem für die längeren Messreihen in den Fichtenbeständen zeigen sich signifikante, aber über alle Flächen uneinheitliche zeitliche Trends. Von einer generellen Abnahme der mikrobiellen Aktivität aufgrund des Klimawandels kann auf Grundlage dieser Messungen bisher nicht ausgegangen werden. Größere Unterschiede zeigen sich jedoch in der statistischen Analyse der Baumart: Während unter Fichten die mikrobielle Aktivität durch die Nadelstreu gehemmt wird, ist unter Buchen der Methanabbau im Boden und damit die Methansenkenleistung deutlich größer.

## Fazit

Die Waldzustandserhebung untersucht seit Beginn der 1980er Jahre den Gesundheitszustand der Waldbäume. Den Startschuss zur Etablierung eines permanenten Monitoringnetzes im Wald gaben immissionsbedingte Waldschäden, die damals vornehmlich auf exponierten Mittelgebirgslagen im Schwarzwald, Odenwald und im Schwäbisch-Fränkischen Wald auftraten. Hohe Säureimmissionen, die mit dem Regen in die Wälder eingetragen wurden („saurer Regen“), verursachten damals starke Schäden im Baumbestand und eine langfristige Versauerung der Böden. In Kombination mit aktuellen Schadstoffemissionen hat dies in vielen Wäldern bis heute eine langfristige Beeinträchtigung der Speicher-, Filter- und Pufferfunktionen der Waldböden zur Folge. Dadurch wird die Anfälligkeit der Wälder gegenüber anderen Stressfaktoren wie Hitze und Trockenheit zusätzlich erhöht, zumal das Wachstum der für die Wasseraufnahme wichtigen Feinwurzeln auf anthropogen stark versauerten Böden oftmals vermindert ist.

Das Jahr 2023 war mit seiner feuchten und über längere Phasen milden Witterung eine Verschnaufpause für den Wald. Dies darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass extreme Hitze- und Trockenjahre im Zuge des Klimawandels immer häufiger werden und die Wälder einer weiterhin zunehmenden Belastung ausgesetzt sein werden. Auch wenn die aktuelle Phase wiederholter Dürre- und Hitzejahre die Debatte um die beobachteten Waldschäden dominiert, darf nicht vergessen werden, dass auch andere Stressoren, und ganz besonders eine eingeschränkte Nährstoffversorgung, den Wald und seine Vitalität stark beeinträchtigen.

Die Bedeutung der Wälder für eine aktive Luftreinhaltung, die Bereitstellung von Trinkwasser, den Ausgleich des Landschaftswasserhaushalts und nicht zuletzt die Bekämpfung des Klimawandels ist unbestreitbar. Wälder dienen als natürliche Luftfilter und speichern schädliche Treibhausgase in ihrer Biomasse und im Waldboden. Darüber hinaus ermöglicht die nachhaltige Nutzung von Holz als lokal bereitgestellter Rohstoff die langfristige Speicherung von Kohlenstoff und bietet eine Möglichkeit, kohlenstoffintensive Materialien wie Beton zu ersetzen.

Die vielfältigen Ökosystemfunktionen von Wäldern sind vor den Hintergrund des immer schneller ablaufenden Klimawandels akut gefährdet. Schon heute zeichnen sich weitreichende Veränderungen in den Waldbildern Baden-Württembergs ab. Besonders deutlich wird dies an der Baumart Fichte, die in tieferen Lagen weitgehend ausfällt und deren wirtschaftliche Nutzung

dort nicht mehr möglich sein wird. Aber auch bei Kiefern, Buchen und selbst Douglasien ist in den unteren Lagen, ganz besonders in der Oberrheinebene, ein zunehmend schlechter Gesundheitszustand zu beobachten. Auch bei der Tanne deutet sich eine Arealverschiebung an, da sie insbesondere in der Vorbergzone des Schwarzwaldes aufgrund von Dürre und Käferbefall vermehrt abstirbt.

Die Suche nach alternativen, bevorzugt heimischen, aber auch fremdländischen Baumarten sowie für die künftigen standörtlichen Bedingungen besser geeigneten Provenienzen, Geno- und Phänotypen muss deswegen eine zentrale Stellung in den Strategien für den klimaangepassten Waldumbau einnehmen. Hierfür sind neben neu anzulegenden Anbauversuchen unbedingt auch die empirischen Erfahrungsschätze der Forstpraxis zu nutzen. Neben der reinen Produktionsleistung muss in die Eignungsbewertung einer Baumart auch deren Ökosystemverträglichkeit (z. B. Biodiversität) sowie die Auswirkungen auf weitere Ökosystemfunktionen berücksichtigt werden.

Das Forstliche Umweltmonitoring ist ein leistungsfähiges Instrument, um die aktuelle Walddynamik zu beobachten, Empfehlungen für den notwendigen Waldumbau abzuleiten und die Folgen für Ökosystemfunktionen von Wäldern abzuschätzen. Aktuelle Bestrebungen auf europäischer Ebene bemühen sich um eine Stärkung des Forstlichen Umweltmonitorings, um bestehende Monitoring- und Inventurprogramme an zukünftige Herausforderungen anzupassen, um so etwa ein besseres Monitoring aller Entwicklungsphasen eines Waldes zu ermöglichen, um Ökosystemprozesse in unterschiedlich stark bewirtschafteten bzw. unbewirtschafteten Wäldern besser vergleichen zu können oder auch neue Technologien (z. B. Fernerkundungsmethoden) zu integrieren.

Auch die Waldstrategie 2050 des Landes greift diese Entwicklungen auf. Mit der Gründung und Etablierung eines Fernerkundungszentrums an der FVA sollen Verfahren entwickelt und optimiert werden, mit deren Hilfe terrestrische Monitoring-Programme wie die Waldzustandserhebung künftig um Fernerkundungsdaten ergänzt werden können. Daneben werden mit der Waldstrategie 2050 eine Vielzahl kurz- bis mittelfristig wirkender Maßnahmen angegangen. Ganz zentral ist hierbei die Überarbeitung der Waldentwicklungstypen-Richtlinie, welche konkrete Handlungsempfehlungen aufzeigt, durch die klimalabile Waldbestände mittel- bis langfristig stabilisiert werden können. Auch weitere Maßnahmen, unter anderem die Erarbeitung von Konzepten für das integrierte Waldbrandmanagement, für einen verbesserten Wasserrückhalt im Wald und die Bereit-

haltung von Infrastruktur zur Holzkonservierung, werden dazu beitragen, die Waldbewirtschaftung an geänderte Klimabedingungen anzupassen und somit die vielfältigen Ökosystemfunktionen von Wäldern auch in Zukunft zu sichern.



## 8 LITERATURVERZEICHNIS

ANTHONY, M. A., BENDER, S. F., & VAN DER HEIJDEN, M. G. (2023): Enumerating soil biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120 (33), e2304663120.

BODELIER, P. L. E., LAANBROEK, H. J. (2004): Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS microbiology ecology* 47 (3), S. 265-277. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(03\)00304-0](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(03)00304-0).

BRAUN, S., B. RIHM, W. FLÜCKIGER (2012): Stickstoffeinträge in den Schweizer Wald: Ausmass und Auswirkungen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 163, S. 355-362.

BRAUN, S., HOPF, S., TRESCH, S., DE WITTE, L., ANTONI, D., BADER, D., GROELLY, M., SCHRÖDER, U., STRITT, C., WOËFFRAY, R. (2021): Wie geht es unserem Wald? 38 Jahre Walddauerbeobachtung (S. 1-116). DOI: <https://zenodo.org/record/5674637>.

DELB, H., BURGER, M., GRÜNER, J., KAUTZ, M., THOMAS, L., WONSACK, D., WUßLER, J. (2023): Die Waldschutzsituation 2022/2023 in Baden-Württemberg. *AFZ-Der Wald* 78 (9), S. 16-20.

DE VRIES, W., H. KROS, G. J. REINDS, W. WAMELINK, J. MOL, H. VAN DOBBEN, R. BOBBINK, B. EMMETT, S. SMART, C. EVANS, A. SCHLUTOW, P. KRAFT, S. BELYAZID, H. SVERDRUP, A. VAN HINSBERG, M. POSCH UND J.-P. HETTELINGH (2007): Development in deriving critical limits and modelling critical loads of nitrogen for terrestrial ecosystems in Europe. *Alterra*. 206 S. DWD (2023): [https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/pressemitteilungen\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/pressemitteilungen_node.html) (Stand: 18.9.2023).

ERISMAN, J. W. UND W. DE VRIES (2000): Nitrogen deposition and effects on European forests. *Environmental Reviews*, 8, S. 65-93.

FVA (2023): Warme Temperaturen lassen weiterhin Frischbefall zu. *Borkenkäfer-Newsletter, Südwest 03/2023*, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. 6 S.

GÖTTLEIN, A. AND K.-H. MELLERT (2019): Ableitung von Schwefel-Stickstoff-Relationen für wichtige mitteleuropäische Baumarten aus dem Wertebereich normaler Ernährung und deren Veränderung von BZE I nach BZE II. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 189 (11/12): S. 221-229.

GÖTTLEIN, A., FÄTH, J., RAU, M., MELLERT, K.H. (2020): Schwefel – vom Überschuss zum Mangel. *AFZ-DerWald* 9/2020: S 31-33.

IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.

JOHN, R.; GRÜNER, J.; SEITZ, G.; DELB, H. (2019): Buchen in Südwestdeutschland leiden unter dem Trockenstress der Vorjahre. *Waldschutz Info* (3), 13 S.

KAUTZ, M., SANDER, F., DELB, H. (2023): Borkenkäfer und Rüssler profitieren von Trockenstress an Weißtannen. *FVA Baden-Württemberg, Waldschutz-Info* 1/2023, 8 S.

KLEMMT, H.-J., EUSEMANN, P., GRÜNER, J., HAHN, A., KÄTZEL, R., KÜHLING, M., LANGER, G., MUND, M., NIESAR, M., REITER, P., SANDERS, T., THURM, E. (2023): Die Zukunft der Rotbuche in Mitteleuropa. *AFZ-DerWald* 15(8): S. 12-16.

LIU, L., ESTIARTE, M., PEÑUELAS, J. (2019): Soil moisture as the key factor of atmospheric CH<sub>4</sub> uptake in forest soils under environmental change. *Geoderma* 355, 113920. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113920>.

LUBW (2023): *Reaktiver Stickstoff in der Atmosphäre von Baden-Württemberg: Ammoniakkonzentration und Stickstoffdeposition 2012 bis 2016 (Depositionsbericht 2023)*. Karlsruhe, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. Publikationsdienst ID 10362: 155 S.

LUCHI N, CAPRETTI P, FEDUCCI M, VANNINI A, CECCARELLI B, VETTRAINO AM (2015). Latent infection of *Biscogniauxia nummularia* in *Fagus sylvatica*: a possible bioindicator of beech health conditions. *iForest* (early view). – doi: 10.3832/ifor1436-008.

MAIER, M., LONGDOZ, B., LAEMMEL, T., SCHACK-KIRCHNER, H., LANG, F. (2017): 2D profiles of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and gas diffusivity in a well aerated soil: measurement and Finite Element Modeling. *Agricultural and Forest Meteorology* 247, S. 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.008>.

ROTH, M., MÜLLER-MEISSNER, A., MICHIELS, H-G., HAUCK, M. (2022): Vegetation changes in the understory of nitrogen-sensitive temperate forests over the past 70 years. *Forest Ecology and Management* 503: 119754.

SCHACK-KIRCHNER, H., HILDEBRAND, E. E., WILPERT, K. V. (1993): Ein konvektionsfreies Sammelsystem für Bodenluft. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 156 (4), S. 307-310. <https://doi.org/10.1002/jpln.19931560406>.

TROPF J., EURICH L., GRÜNER J., DELB H. (2021): Ursachen- und Risikoanalyse zu Dürreschäden an Buche in Baden-Württemberg. Zwischenbericht Notfallplanprojekt 1692.pdf.

TROPF J., BIEN S., EURICH L., GRÜNER J., LANGER G. J. (2022): Pilzliche Schäden an der Rotbuche. *AFZ-DerWald* 77(24): S. 32-35.

WALDNER, P., A. THIMONIER, E. G. PANNATIER, S. ETZOLD, M. SCHMITT, A. MARCHETTO, P. RAUTIO, K. DEROME, T. M. NIEMINEN, S. NEVALAINEN, A.-J. LINDROOS, P. MERILÄ, G. KINDERMANN, M. NEUMANN, N. COOLS, B. DE VOS, P. ROSKAMS, A. VERSTRAETEN, K. HANSEN, G. PIHL KARLSSON, H.-P. DIETRICH, S. RASPE, R. FISCHER, M. LORENZ, S. IOST, O. GRANKE, T. G. M. SANDERS, A. MICHEL, H.-D. NAGEL, T. SCHEUSCHNER, P. SIMONČIČ, K. VON WILPERT, H. MEESENBURG, S. FLECK, S. BENHAM, E. VANGUELOVA, N. CLARKE, M. INGERSLEV, L. VESTERDAL, P. GUNDERSEN, I. STUPAK, M. JONARD, N. POTOČIĆ UND M. MINAYA (2015): Exceedance of critical loads and of critical limits impacts tree nutrition across Europe. *Annals of Forest Science*, 72, S. 929-939.

## ANLAGEN

### Anlage 1:

Anzahl der aufgenommenen Bäume nach Baumarten und Altersklassen bei der Waldzustandserhebung 2023

Baumart	Bäume <61 Jahre	Bäume >60 Jahre	Bäume insgesamt
Fichte	907	1.575	2.482
Tanne	178	740	918
Kiefer	72	252	324
Douglasie	102	54	156
Lärche	18	114	132
Schwarzkiefer	1	4	5
Thuja	2	0	2
Buche	530	1.411	1.941
Eiche	176	436	612
Bergahorn	173	105	278
Esche	97	153	250
Hainbuche	70	40	110
Roteiche	74	8	82
Linde	29	29	58
Spitzahorn	47	6	53
Kirsche	29	16	45
Birke	33	8	41
Rot-Erle	25	15	40
Vogelbeere	32	6	38
Robinie	22	5	27
Ulme	8	9	17
Edelkastanie	10	4	14
Feldahorn	4	7	11
Weide	9	0	9
Weiß-Erle	6	0	6
Aspe	2	1	3
Nuss	2	0	2
sonstige Laubbäume	2	0	2
Elsbeere	0	2	2
Tulpenbaum	1	0	1
<b>Gesamt</b>	<b>2.661</b>	<b>5.000</b>	<b>7.661</b>



**Anlage 2:**

Aufnahmedichte der Waldzustandserhebung von 1985 bis 2023

<b>Jahr</b>	<b>Rasternetz</b>	<b>Anzahl Aufnahmepunkte</b>	<b>Anzahl 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
2023	8x8 km	320	7.661

\*1 Flächen-/Punkt- und Traufaufnahme

\*2 Schwarzwald verdichtet auf 4x4 km

**Anlage 3:**

Schadstufenverteilung der Waldzustandserhebung in Prozent von 1985 bis 2023

Jahr	Schadstufe					
	0 un- geschädigt	1 schwach geschädigt	2 mittels stark geschädigt	3 stark geschädigt	4 abgestorben	2 bis 4 deutlich 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
2023	22	34	39	3	2	44

**Anlage 4:**

Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2023 in den Landkreisen

Landkreis	Anzahl aufgenommene Bäume	bis 60 Jahre Anteil Schadstufe 2-4 [%]	ab 61 Jahre Anteil Schadstufe 2-4 [%]	mittl. Nadel-/Blattverlust gesamt [%]	95%-Konfidenzintervall (+/-)	Anteil Bäume ab 50% Nadel-/Blattverlust	Verhältnis Baumart Nh:Lh [%]	Verhältnis Alter bis 60: ab 61 [%]	mittleres Probebaumalter
Alb-Donau-Kreis	192	k.A.	82	34,4	1,61	4,7	36:64	18:82	94
Baden-Baden	48	k.A.	k.A.	32,4	5,26	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Biberach	288	7	72	25,8	2,00	4,2	68:32	60:40	59
Bodenseekreis	96	k.A.	80	28,6	2,84	3,1	28:72	33:67	75
Böblingen	168	31	86	33,5	3,06	12,5	20:80	35:65	98
Breisgau Hochschwarzwald	312	21	72	31,5	2,29	8,3	65:35	37:63	88
Calw	264	5	52	19,3	2,02	3,8	59:41	46:54	74
Emmendingen	168	24	75	30,9	2,54	6,0	57:43	32:68	84
Enzkreis	192	k.A.	71	41,4	3,23	27,1	7:93	0:100	110
Esslingen	120	k.A.	73	33,2	2,65	7,5	34:66	15:85	88
Freiburg im Breisgau	24	k.A.	k.A.	22,3	6,46	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Freudenstadt	378	4	58	27,4	1,95	9,8	82:18	20:80	106
Göppingen	120	k.A.	75	33,3	2,36	5,0	64:36	20:80	78
Heidelberg	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Heidenheim	120	k.A.	76	24,2	3,24	5,8	45:55	40:60	83
Heilbronn	96	k.A.	53	25,5	2,49	3,1	0:100	25:75	84
Heilbronn-Stadt	24	k.A.	k.A.	46,9	7,00	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hohenlohekreis	168	37	80	31,4	3,55	13,1	8:92	68:32	58
Karlsruhe	264	32	65	24,3	2,23	4,9	33:67	52:48	66
Karlsruhe-Stadt	24	k.A.	k.A.	32,1	3,28	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Konstanz	72	k.A.	69	35,8	3,75	9,7	42:58	0:100	105
Lörrach	240	6	58	24,0	2,22	3,3	33:67	43:57	79
Ludwigsburg	72	k.A.	60	31,5	4,15	6,9	24:76	3:97	88
Main-Tauber-Kreis	216	40	66	28,6	1,90	5,1	17:83	25:75	83
Mannheim	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Neckar-Odenwald-Kreis	288	19	78	34,2	2,40	13,9	27:73	22:78	93
Ortenaukreis	552	13	61	23,7	1,76	7,8	71:29	45:55	75
Ostalbkreis	288	20	76	32,0	2,37	9,0	60:40	28:72	77
Pforzheim	24	k.A.	k.A.	9,2	4,67	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Rastatt	183	45	62	29,6	3,19	12,6	67:33	33:67	102
Ravensburg	336	10	78	20,5	1,63	3,0	75:25	70:30	45
Rems-Murr-Kreis	168	0	75	29,5	3,74	16,1	59:41	33:67	82
Reutlingen	192	3	76	31,1	2,01	6,8	36:64	31:69	81
Rhein-Neckar-Kreis	216	38	67	33,6	2,43	12,5	29:71	28:72	96
Rottweil	214	31	66	30,2	2,51	6,5	83:17	27:73	84
Schwäbisch Hall	168	k.A.	69	30,8	2,96	14,3	35:65	29:71	88
Schwarzwald-Baar-Kreis	264	3	71	33,0	2,16	11,0	94:6	22:78	99
Sigmaringen	288	17	77	27,7	1,63	3,8	91:9	48:52	62
Stuttgart	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tübingen	144	k.A.	86	37,2	3,36	20,1	45:55	34:66	87
Tuttlingen	168	k.A.	60	27,9	1,60	1,2	80:20	25:75	85
Ulm	24	k.A.	k.A.	40,4	6,41	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Waldshut	288	15	73	34,1	2,53	9,4	63:37	27:73	95
Zollernalbkreis	190	10	78	31,1	2,18	12,1	34:66	49:51	63