



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Am Puls des Waldes

Umweltwandel und seine Folgen – ausgewählte Ergebnisse des intensiven forstlichen Umweltmonitorings

Liebe Leserinnen und Leser,



Der Wald ist ein faszinierendes Ökosystem. Die dort heimischen Tiere, Pflanzen, Pilze und Mikroorganismen sowie Bodeneigenschaften, Temperatur, Niederschläge, Licht und Nährstoffe beeinflussen sich gegenseitig. Ihr Zusammenspiel ist vielschichtig und kompliziert. In der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts wuchs das Bewusstsein, dass Schadstoffe aus Industrie, Kraftwerken, Verkehr und Haushalten dieses komplexe Beziehungsnetz erheblich stören. Um diese Vorgänge zu verstehen, um den Puls des Waldes zu fühlen, wurde das forstliche Umweltmonitoring aufgebaut, mit dem Ziel, die wichtigsten Daten aus dem Waldökosystem zu erfassen und daraus Rückschlüsse zu ziehen.

Es ist beeindruckend, welch riesiger Datensatz in den vergangenen mehr als dreißig Jahren zusammengetragen wurde. Ein Datensatz, der unser Verständnis für die Zusammenhänge in Waldökosystemen enorm bereichert und uns eine wertvolle Unterstützung ist, gerade auch in Zeiten des Klimawandels. Die langen Zeitreihen sind hierbei beispiellos. Denn Messungen in befristeten Forschungsprojekten umfassen meistens nur wenige Jahre. Ein weiterer Vorzug ist die internationale Vernetzung: Im forstlichen Umweltmonitoring arbeiten Wissenschaftler von Spanien bis Finnland, von Irland bis zur Türkei zusammen. Kooperationen bestehen mit Partnern unter anderem in den Vereinigten Staaten von Amerika, Kanada und Japan.

Die vorliegende Broschüre soll Einblicke in dieses von Bund und Ländern getragene Beobachtungssystem

geben. Sie soll über erfreuliche Entwicklungen ebenso berichten wie über Herausforderungen.

Ein großer Erfolg sind die in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts eingeleiteten Luftreinhaltemaßnahmen. Heute haben die Wälder begonnen, sich von den damaligen Säure- und Schwefeleinträgen zu erholen.

Zu den Herausforderungen zählt die weitere Minderung der Stickstoffeinträge ebenso wie der Klimawandel. Wir müssen noch mehr tun, um Stickstoffeinträge in die Umwelt zu mindern. Dazu verpflichten uns nicht nur die Vorsorge für die Umwelt und die Verantwortung für kommende Generationen, sondern auch internationale Verträge und das europäische Recht. Und wir müssen Treibhausgasemissionen mindern und unsere Wälder an den Klimawandel anpassen.

Dafür werden wir einen langen Atem brauchen. Der Schutz unserer Wälder ist eine Generationenaufgabe, die heute beginnt. Das Waldmonitoring ist hierbei eine wesentliche Stütze. Denn nur, wenn wir den Wald verstehen, können wir ihn retten.

Ihre

Julia Klöckner

Bundesministerin für Ernährung und Landwirtschaft

INHALT		
	<i>Vorsorge für den Wald</i>	6
	Umwelt im Wandel – Ergebnisse im Überblick	7
	Vom Waldsterben zum europaweiten Monitoringnetz	7
	Intensive Umweltbeobachtungen – Ursache und Wirkung verstehen	12
	Gesetzlicher Auftrag an Bund und Länder	13
	Ausblick – neue Technologien und Forschungsrichtungen	15
	<i>Versauerung – Wälder erholen sich langsam</i>	16
	Versauerung – Ursachen, Folgen, Entwicklungen	17
	Schwefelreduktion erfolgreich	18
	Bodenwasser – weniger Sulfat	21
	Basensättigung – so sauer ist der Boden	24
	Rückgang der Schwefelgehalte in Nadeln und Blättern	25
	<i>Stickstoffeinträge immer noch hoch</i>	26
	Eine Herausforderung für unsere Wälder	27
	Stickstoffeinträge rückläufig – aber weiterhin auf hohem Niveau	28
	Erhöhte Werte im Bodenwasser deuten sich an	29
	Bäume zeigen Nährstoffungleichgewichte	30
	Bodenvegetation verändert sich nur wenig	32
	<i>Klimaerwärmung und Witterungsextreme</i>	34
	Die Klimaerwärmung auf Level-II-Flächen	35
	Niederschlagsmuster – regional und jahreszeitlich verschieden	36
	Bäume „fiebern“ – stärkere Wachstumsschwankungen	39
	Wie kommen Baumarten mit Trockenstress zurecht?	39
	Jahre intensiver Fruchtbildung bei der Buche treten häufiger auf	42
	Die Wachstumsphase beginnt früher und endet später	43
	Hohe Ozonkonzentrationen	45
	Grundlagen für die Broschüre	46
	Abbildungsverzeichnis	48
	Tabellenverzeichnis	50

Vorsorge für den Wald

Wald erfüllt vielfältige Nutz- und Schutzfunktionen und bildet eine unentbehrliche Lebensgrundlage für uns Menschen. Um Risiken rechtzeitig zu erkennen, ist eine langfristige Beobachtung unverzichtbar. Erst auf der Grundlage langer Messreihen kann beurteilt werden, wie sich Umweltveränderungen auf die Gesundheit der Wälder auswirken. Das intensive forstliche Monitoring in Europa liefert seit über 30 Jahren Daten und Erkenntnisse zur Dynamik des Umweltwandels und seinen Folgen. Für die forstliche Praxis und Umweltpolitik stellen die Ergebnisse eine wichtige Informationsquelle dar. Auf ihrer Basis können Entscheidungen zum Schutz der Wälder getroffen werden. Die Erhebungen belegen: Die Luftreinhaltemaßnahmen zeigen Wirkung. Doch der Klimawandel und Stickstoffeinträge beeinflussen die Wälder weiterhin.

Umwelt im Wandel – Ergebnisse im Überblick

Die Umweltbedingungen von Wäldern verändern sich: Extremereignisse wie Trockenheit, langfristig hohe Einträge von Stickstoff, die Spätfolgen hoher Säurebelastungen sowie erhöhte Ozonkonzentrationen sind aktuelle Umweltprobleme, die Herausforderungen für die Forstwirtschaft und die Erhaltung der Waldökosysteme darstellen.

- **Versauerung:** Der Eintrag von Schwefel in Wälder konnte durch Luftreinhaltemaßnahmen wirksam reduziert werden. Der Waldboden an den Messstandorten erholt sich langsam von der Schwefelbelastung. Dennoch tragen Stickstoffeinträge weiterhin zur Versauerung der Standorte bei.
- **Stickstoffeinträge:** Langjährig hohe Stickstoffeinträge beeinträchtigen die Fruchtbarkeit der Böden, den Nährstoffkreislauf und die natürliche Entwicklung der Lebensgemeinschaften im Wald.
- **Klimawandel:** Die Vegetationsperiode beginnt früher und endet später. Das Wachstum der Bäume unterliegt infolge des gehäuften Auftretens klimatischer Extreme stärkeren Schwankungen als früher. Vielerorts leiden vor allem Fichten unter der Trockenheit und geraten an ihre physiologischen Grenzen. Zudem steigt das Risiko für Schadinsektenbefall.

Die Broschüre stellt ausgewählte Ergebnisse des intensiven Monitorings in Deutschland zu den Kernthemen Versauerung, Stickstoffeinträge und Klimawandel vor.

Vom Waldsterben zum europaweiten Monitoringnetz

In seiner 30-jährigen Geschichte stellt das forstliche Umweltmonitoring heute national wie international eine der wichtigsten Informations- und Datenquellen zum Schutz der Wälder dar. Auf der Grundlage der Daten wurden wichtige umweltpolitische Entscheidungen zur Luftreinhaltung getroffen. So konnte der Eintrag von Schwefel in die Wälder wirksam reduziert werden.

Zudem liefert die Waldökosystemforschung wichtige Erkenntnisse für den Waldbau hin zu standortgerechten, strukturierten Mischwäldern, um die Anpassungsfähigkeit der Wälder zu steigern.

Seinen Ursprung nahm das forstliche Umweltmonitoring in der Waldschadensforschung der 1980er-Jahre. Damals fanden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler immer mehr Hinweise dafür, dass Bäume unter dem Einfluss von Luftschadstoffen wie Schwefeldioxid und Stickstoffverbindungen litten. Diese Erkenntnis war nicht neu. Bereits im 19. Jahrhundert beobachtete man, dass Bäume durch Rauchgas geschädigt wurden. Besonders in der Nähe von Erzaufbereitungsanlagen im Harz verkümmerten Bäume (Küster H., 2008). Mit der Industrialisierung verunreinigten Schadstoffe die Luft zunehmend. In den 1980er Jahren wurden hohe Schwefeldioxid-Emissionen mit dem Waldsterben – Kronenauflichtungen, Verfärbung von Nadeln und verstärkte Nadelverluste – in Verbindung gebracht.



Abbildung 1: Streufallmessung (rechteckige Behälter), Depositionsmessung und Umfangmessbänder der Level-II-Fläche Merzalben, Rheinland-Pfalz

Als Reaktion darauf bauten Bund und Länder das forstliche Umweltmonitoring aus. 1982 begann man, die neuartigen Waldschäden in einem systematischen Raster landesweit einheitlich zu erfassen (Mühlhaus, 1985). Im Jahr 1985 begann das forstliche Umweltmonitoring mit europaweiten Erhebungen auf einem systematischen Stichprobennetz (Level I); in den 90er Jahren wurde es um das intensive forstliche Monitoring auf ausgewählten Beobachtungsflächen (Level II)

ergänzt. Letzteres wurde mit dem Ziel eingeführt, die Belastung in den Wäldern kontinuierlich und fortlaufend zu erfassen, belastbare Daten zur Wirkung von Luftschadstoffen bereitzustellen und Prozesse und Zusammenhänge in Waldökosystemen zu verstehen. Eingebunden in ein internationales Informationsnetzwerk liefert das Level-II-Monitoring Daten und Bewertungsgrundlagen für die Forst- und Umweltpolitik. Aufgrund seiner langen Messreihen, die zum Teil 30 Jahre zurückreichen, können ökologische Funktionen der Wälder und deren Beeinträchtigung beurteilt sowie neue Phänomene identifiziert werden. Insgesamt ist das forstliche Umweltmonitoring heute ein großes, aufeinander abgestimmtes Beobachtungssystem, das einzigartige Daten und Ergebnisse zur Bewertung des Zustands und der Entwicklung der Wälder in Deutschland und Europa liefert.

Das forstliche Umweltmonitoring ist in die Genfer Luftreinhaltekonvention der Europäischen Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen (UNECE) eingebunden. Das Übereinkommen trat 1983 als völkerrechtlicher Vertrag zur Luftreinhaltung in Kraft. Unter seinem Dach bildete sich 1985 das Internationale Kooperationsprogramm zur Erfassung und Überwachung der Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf Wälder (ICP Forests). Die Ergebnisse aus diesem Netzwerk liefern Informationen zum Einfluss von Luftverschmutzung und Klimawandel auf Waldzustand und Biodiversität auf europäischer Ebene. Das forstliche Umweltmonitoring in Deutschland ist Teil dieses internationalen Netzwerkes. Seit 2018 werden Daten im Rahmen des wirkungsseitigen Monitorings der NEC-Richtlinie (Nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe) an die europäische Union übermittelt.

Forstliches Umweltmonitoring in Deutschland und Europa

Level I – Erhebungen auf einem systematischen Stichprobennetz

*Waldzustandserhebung: jährliche Erfassung des Kronenzustands
Bodenzustandserhebung: periodische Erhebung des Zustandes der Waldböden*

Level II – Intensives Monitoring auf ausgewählten Flächen

Umwelteinflüsse und deren Wirkung auf Waldökosysteme werden durch die Kombination zeitlich hochaufgelöster Messungen und periodischer Erhebungen untersucht. Eine Auswahl von 68 über Deutschland verteilten Flächen bildet nach Forstchefbeschluss von 2012 die Grundlage für nationale Auswertungen; ergänzend betreiben die Länder weitere Flächen.

ICP Forests – Europäisches Waldmonitoring

Level I und Level II sind im Rahmen des ICP Forests in das europaweite Waldmonitoring eingebettet: Die Punkte des systematischen Stichprobennetzes im Verband 16x16 km sind Teil des europaweiten 16x16-km-Netzes und die Messdaten der Level-II-Flächen in Deutschland fließen in das europäische Waldmonitoring von ICP Forests ein. Derzeit nehmen 42 Staaten an dem Programm teil. Auf europaweit über 500 Level-II-Flächen werden jährlich Umwelteinflüsse und ihre Wirkung auf Wälder untersucht.

Abbildung 2: Level-I-Erhebungsnetz (16 km x 16 km) in Deutschland

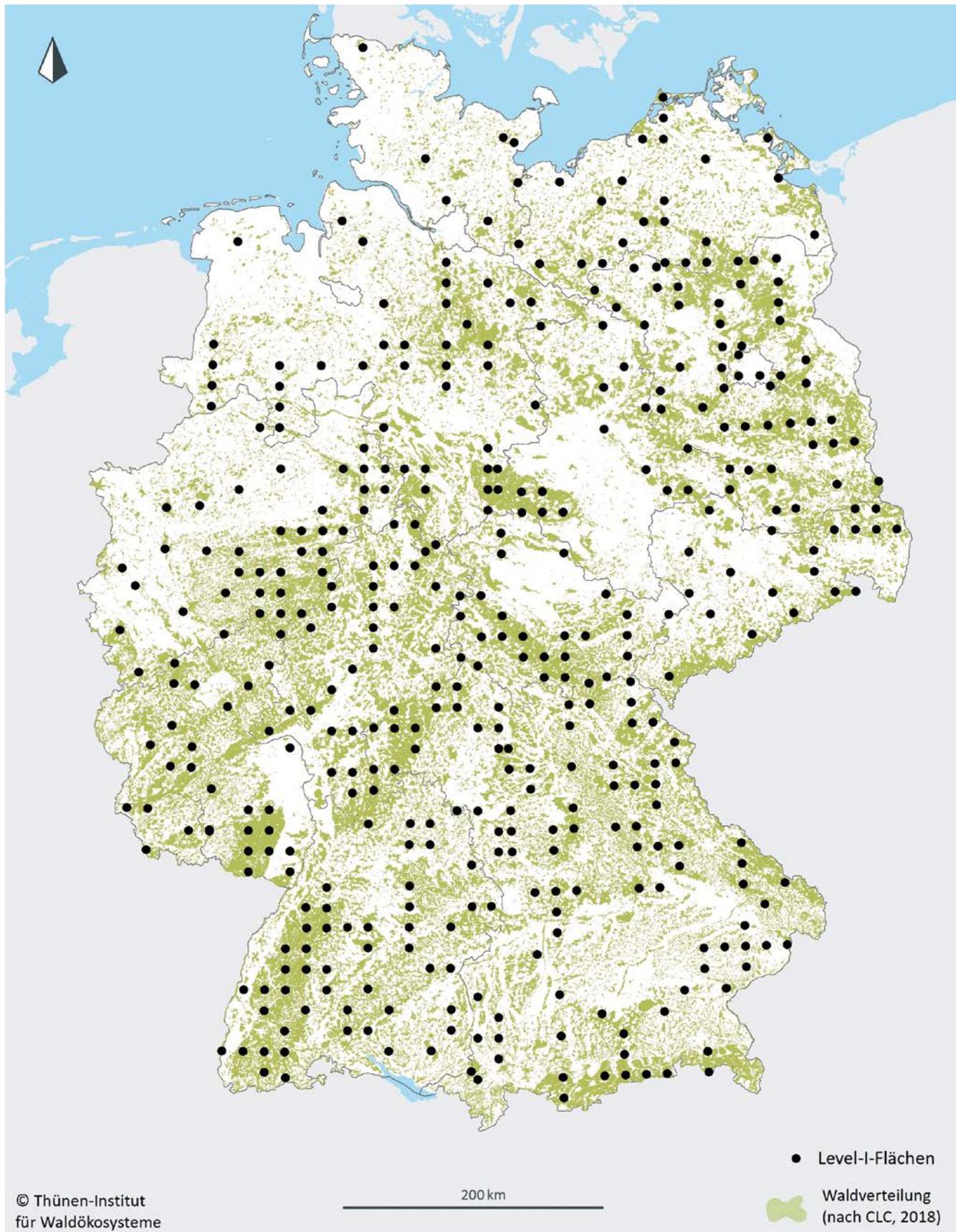


Abbildung 3: Flächen des intensiven forstlichen Umweltmonitorings in Deutschland

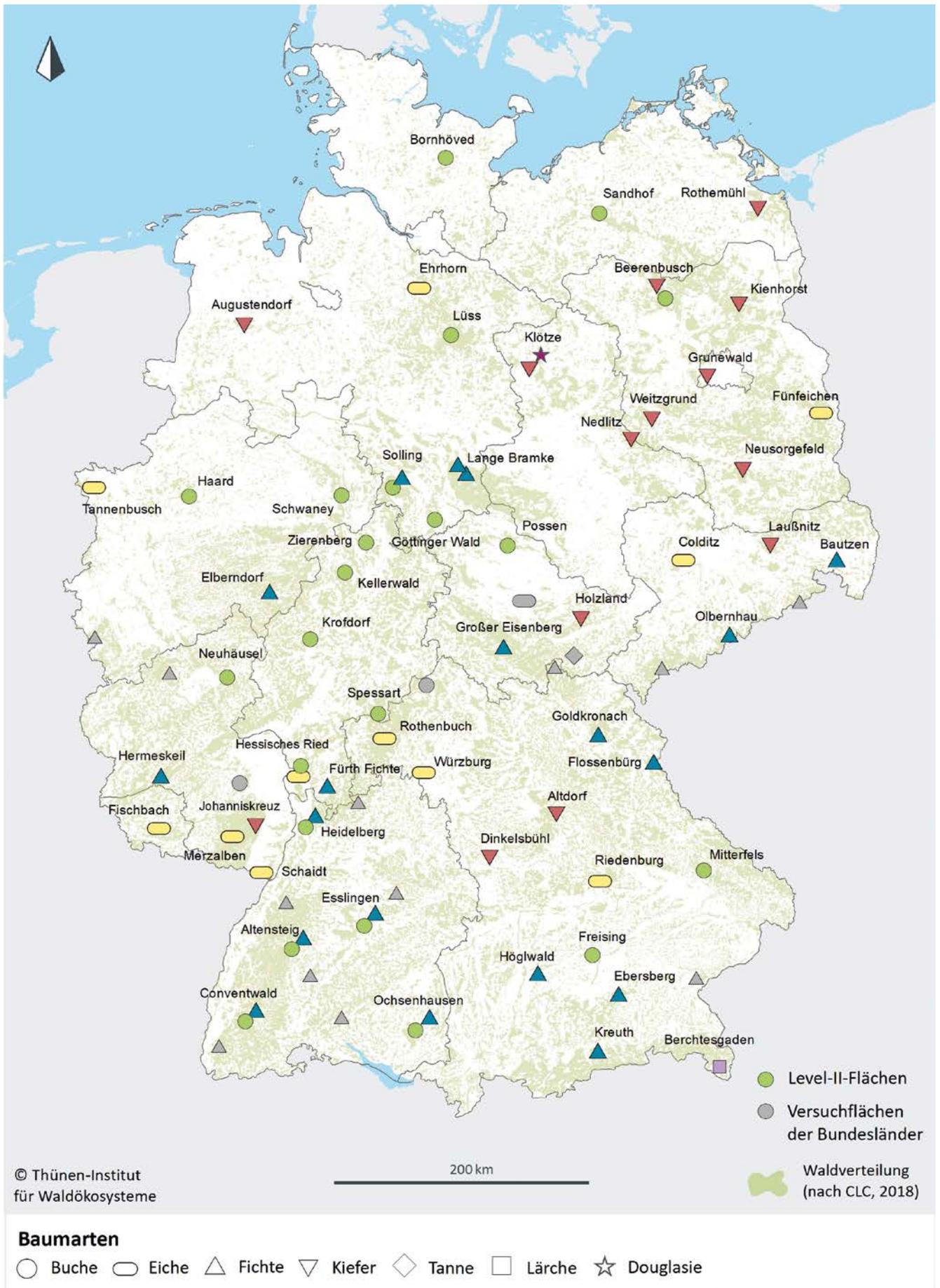
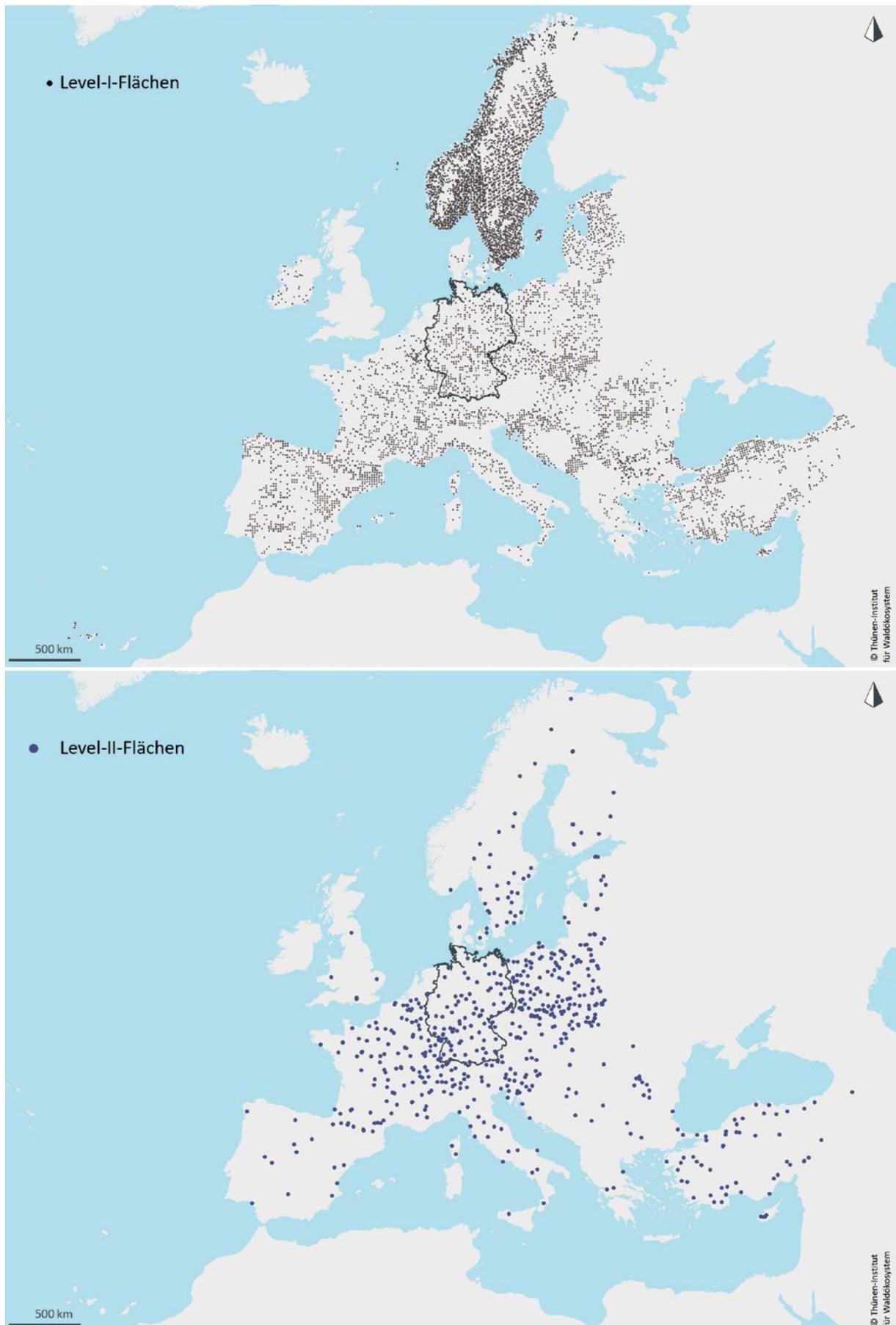


Abbildung 4: Level-I-Flächen und Level-II-Flächen in Europa



Intensive Umweltbeobachtungen – Ursache und Wirkung verstehen

Ein Ziel der vertiefenden Umweltbeobachtung ist es, die Beziehungen von Ursache und Wirkung zwischen Wald-ökosystemen und den Faktoren, die sie beeinflussen, besser zu verstehen und darauf aufbauend Empfehlungen zur nachhaltigen Nutzung von Wäldern, zum Erhalt und zur Entwicklung von Funktionen und Leistungen von

Waldgebieten abzuleiten. Im Mittelpunkt der Beobachtungen und Forschung stehen Fragen wie zum Beispiel:

- Wie hoch ist die Belastung durch Luftschadstoffe in Wäldern?
- Wie wirken sich Witterung und Klima auf Waldstandorte aus?
- Wie wirken sich Luftschadstoffe und Witterung auf die Vitalität der Bäume aus?
- Welche Einflussfaktoren bestimmen das Wachstum des Waldes?
- Welche Auswirkungen haben Stoffeinträge auf die biologische Vielfalt?

Tabelle 1: Messgrößen des intensiven forstlichen Umweltmonitorings

Erhebung	Erhebungsmerkmale	Erhebungsturnus
Deposition	Stoffkonzentrationen im Niederschlagswasser: Schwefel- und Stickstoffverbindungen, außerdem Kalium, Magnesium, Calcium, Natrium, Schwermetalle und andere Substanzen	fortlaufend
Luftqualität	Luftchemie: Konzentration von Stickoxiden, Ammoniak, Schwefeldioxid, Ozon in der Luft	fortlaufend
Meteorologie	Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Wind	fortlaufend
Phänologie	Entwicklungsstadien der Bäume im Jahresverlauf, z. B. Zeitpunkt des Austriebs neuer Blätter, der Blüte, des herbstlichen Blattfalls	jährlich
Kronenzustand	Kronenzustand, Absterberate, Schäden durch Pilze, Insekten, Trockenheit, Hitze, Frost	jährlich
Ozonschäden	Schäden an Blättern	jährlich
Zuwachs	Baumanzahl, Baumart, Messung von Durchmesser und Höhe an Einzelbäumen	alle fünf Jahre
Nadel- u. Blattanalysen	Elementgehalte (z. B. Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Calcium, Magnesium, Kalium, Aluminium, Schwermetalle) in den Blättern/Nadeln, durchschnittliche Blattmasse	jährlich bzw. alle zwei Jahre
Blattflächenindex	Fläche der Blätter und Nadeln pro Einheit Bodenfläche	mind. alle zwei Jahre
Streufall	Streumenge: herabfallende Früchte, Blätter und Zweige Streuchemie: Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Calcium, Magnesium, Kalium, Schwermetalle	fortlaufend
Boden	Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Calcium, Magnesium, Kalium, Aluminium, pH-Wert, Schwermetalle, physikalische Bodenparameter	alle 10–20 Jahre
Bodenlösung	Ionenkonzentrationen im Bodenwasser in unterschiedlichen Bodentiefen, z. B. Nitrat, Phosphor, Schwefel, Calcium, Magnesium, Kalium, Aluminium, Schwermetalle, pH-Wert	fortlaufend
Vegetation	Bestandesstruktur, Pflanzenarten, Deckungsgrade der Kraut- und Strauchvegetation	alle fünf Jahre
Kronenzustand	Kronenzustand, Absterberate, Schäden durch Pilze, Insekten, Trockenheit, Hitze, Frost	jährlich
Ozonschäden	Schäden an Blättern	jährlich

Um Antworten auf diese Fragen zu finden, wird auf den Level-II-Flächen in ausgewählten Waldbeständen verteilt auf ganz Deutschland kontinuierlich und langfristig eine Vielzahl verschiedener Parameter erfasst: von der Stickstoff- und Schwefelkonzentration im Niederschlagswasser über Gehalte von Nährelementen in Blatt- und Nadelproben bis hin zur Artenzusammensetzung. Felddaufnahme, Beprobung und Analyse erfolgen nach einheitlichen europäischen Standards, die im Handbuch vom ICP Forests dokumentiert sind. So entsteht ein riesiger Datenpool, der inzwischen teilweise bis zu 30 Jahre zurückreicht und jährlich wächst. Diese einzigartigen Zeitreihen ermöglichen rückschauende Analysen zu Zustand und Entwicklung der Wälder in Deutschland und ermöglichen einen Ausblick auf die Zukunft durch modellgestützte Prognosen.

Gesetzlicher Auftrag an Bund und Länder

Das Level-II-Programm wird von Bund und Ländern gemeinsam getragen. Seit 2014 ist das forstliche Umweltmonitoring in der Rechtsverordnung über Erhebungen zum forstlichen Umweltmonitoring (ForUmV) geregelt. Die Bundesländer betreiben die Messstandorte, erheben Daten und werten sie für länderspezifische Fragestellungen aus. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) hat das Thünen-Institut für Waldökosysteme mit dem bundesweiten Datenmanagement, den Auswertungen



Abbildung 5: Messstation Solling, Niedersachsen

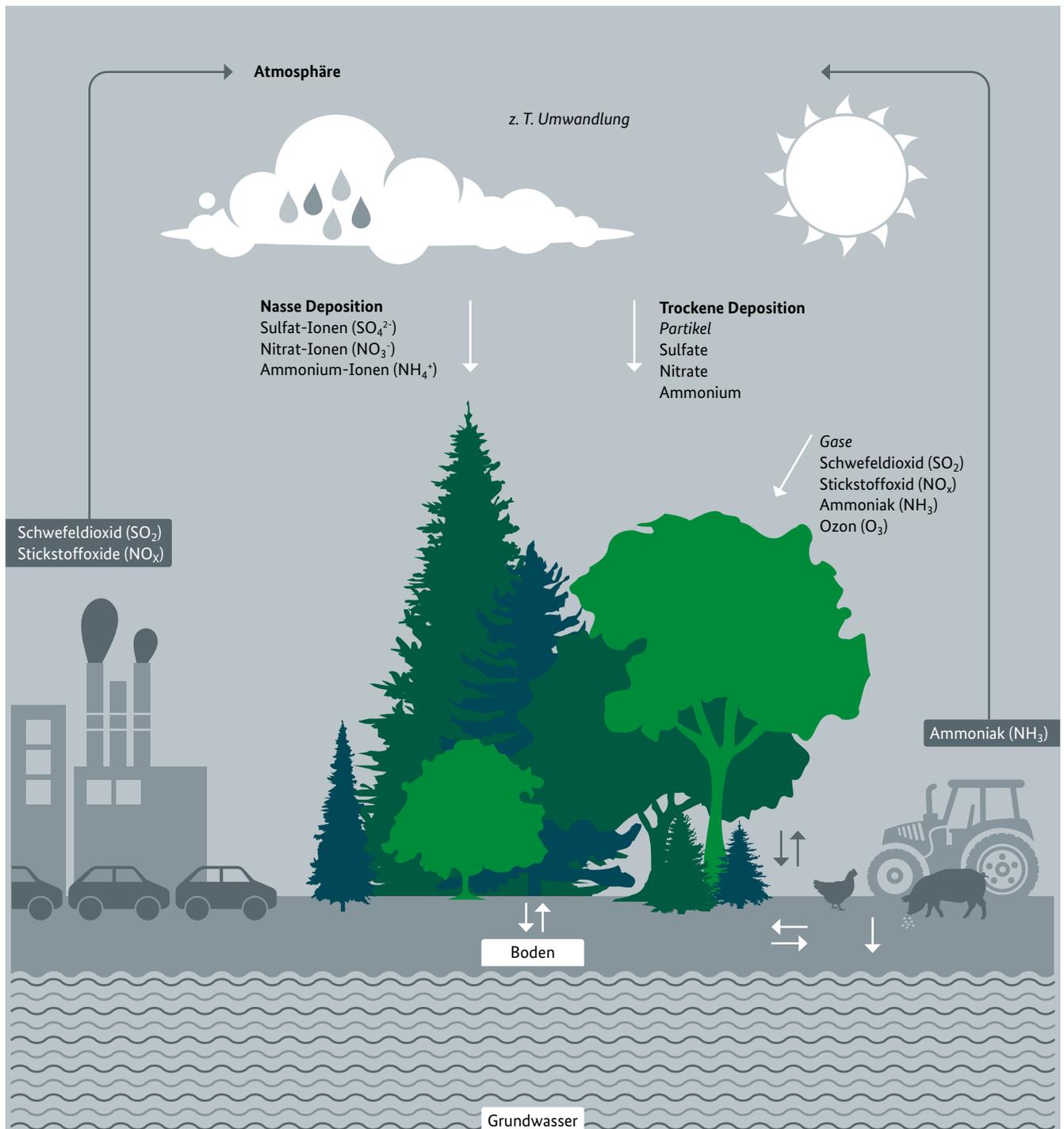
Das Level-II-Monitoring baut auf langfristigen Messstandorten auf. Die längsten Zeitreihen im Solling reichen bis in die 1960er-Jahre zurück. Auf dem Bild zu sehen sind Streufallsammler, Depositionssammler, Schwermetallsammler sowie Umfangmessbänder an den Bäumen.

und dem Erstellen von Berichten auf nationaler Ebene beauftragt. Dazu zählen im Einzelnen das Datenmanagement, die Qualitätsprüfung und die Auswertungen für die nationale Berichterstattung und Politikberatung. Weitere Auswertungen erfolgen in fachlicher

Zusammenarbeit in einer Bund-Länder-Arbeitsgruppe. Die Daten werden auch externen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern für deren Forschungsprojekte zur Verfügung gestellt und in gemeinsamen Projekten mit ihnen ausgewertet.

Abbildung 6: Schematische Darstellung des Eintrags von Luftschadstoffen in Wälder

Luftschadstoffe und ihre Umwandlungsprodukte werden mit dem Niederschlag und als Gase oder Partikel mit der Luft in die Wälder eingetragen. Das intensive forstliche Umweltmonitoring erfasst in ausgewählten Waldbeständen die maßgeblichen Umwelteinflüsse wie den Eintrag von Luftschadstoffen, die Witterung und die Wasserversorgung sowie deren Auswirkungen auf die Waldökosysteme.



Ausblick – neue Technologien und Forschungsrichtungen

Neue Messmethoden und Technologien werden integriert und im Gleichklang mit dem technologischen Fortschritt ständig weiterentwickelt. Sie helfen, die Messgenauigkeit zu erhöhen und komplexere Zusammenhänge auf den Level-II-Flächen besser zu erfassen. Das Monitoring an den Level-II-Flächen bietet Referenzdaten und dient so als Kristallisationspunkt für Forschung und Entwicklung. Hier sei eine Auswahl von Methoden vorgestellt, die derzeit an Level-II-Flächen ergänzend eingesetzt werden.

Phänologische Aufnahmen mittels Drohnen

Unbemannte Flugobjekte – Drohnen – werden zunehmend zur Aufnahme von hochauflösenden, multispektralen Luftbildern genutzt. So lässt sich zum Beispiel die räumliche Varianz in der Blattentfaltung und -verfärbung erfassen. Diese ist sowohl für die Weiterentwicklung von Wasserhaushaltsmodellen als auch hinsichtlich der Anpassung von Baumarten an den Klimawandel von Bedeutung. Am Thünen-Institut für Waldökosysteme und an Forschungsinstituten der Länder wird die Drohnen-Befliegung getestet und mit Ergebnissen von terrestrischen Aufnahmen verglichen.



Abbildung 7: Die räumliche Varianz in der Blattentfaltung und -verfärbung lässt sich durch den Einsatz von Drohnen erfassen

Gas Austausch über dem Wald

Um zu ermitteln, wie sich die Menge an im Wald gespeichertem Kohlenstoff verändert, oder um die Trockenheitsgefährdung von Waldstandorten zu bewerten, wird

die Eddy-Kovarianz-Methode angewendet. Sie liefert Daten zu Verdunstungsraten, CO₂-Flüssen und anderen Gasen. Hierfür sind hochauflösende meteorologische Messungen von Wind, Strahlung, Luftfeuchte und CO₂-Gehalt über den Baumkronen erforderlich. So steht auf der Level-II-Fläche Kienhorst in Brandenburg ein 30 m hoher Mast, der mit Messgeräten bestückt ist.



Abbildung 8: Eingefahrener, mit Messgeräten bestückter Mast auf der Level-II-Fläche Kienhorst, Brandenburg. Im ausgefahrenen Zustand ist der Mast 30 m hoch.

Stoffkreisläufen auf der Spur

Die Wassernutzungseffizienz bei der Photosynthese unterscheidet sich, je nachdem wie trocken ein Standort ist. Um dies zu zeigen, wurden auf einigen Level-II-Flächen Proben von Fichten entnommen und die Isotopensignatur des Holzes untersucht. Isotope sind Atome eines chemischen Elements, die sich in ihrer Masse unterscheiden und sich deshalb bei biologischen oder physikalischen Prozessen etwas unterschiedlich verhalten. Um Stoffflüsse in Ökosystemen besser aufzuklären, messen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter anderem die Isotopenverhältnisse von Kohlenstoff, Sauerstoff oder Stickstoff.

Kohlenstoffumsatz im Waldboden

Standardisiertes organisches Material wie Beuteltee kann wichtige Informationen zum Kohlenstoffkreislauf in Wäldern bieten. Im Boden vergraben, wie auf einigen Level-II-Flächen in Nordwestdeutschland, wird der hier verwendete Grün- bzw. Rooibostee von Mikroorganismen abgebaut. Wie schnell dies geschieht, ist ein wichtiger Indikator für die Umsatzrate von organischem Material. Beuteltee internationaler Hersteller wird weltweit nach denselben standardisierten Verfahren hergestellt. Dies ermöglicht eine kostengünstige Zusammenarbeit in globalen Projekten wie TeaComposition, das sich an etablierte Monitoringnetzwerke richtet.

Versauerung – Wälder erholen sich langsam

Vor allem Schwefel- und Stickstoffeinträge sind dafür verantwortlich, dass Waldböden versauern. Die Schwefelbelastung ist dank der Maßnahmen zur Luftreinhaltung in den letzten Jahrzehnten stark zurückgegangen. Dies macht sich in den Wäldern bemerkbar. Jedoch wird immer noch zu viel Stickstoff über die Luft in Wälder eingetragen.

Versauerung – Ursachen, Folgen, Entwicklungen

Waldböden sind vielerorts stark versauert. Eine moderate Versauerung der Waldböden ist ein natürlicher Prozess. Die vom Menschen verursachten Stoffeinträge sowie die Übernutzung der Wälder beschleunigen und verstärken diesen natürlichen Vorgang jedoch stark. Hauptverursacher für die übermäßige Versauerung von Waldböden sind Schwefel- und Stickstoffverbindungen, die mit dem Regen und der Luft in Wälder eingetragen werden. Sie entstehen bei allen Verbrennungsvorgängen zum Beispiel im Verkehr, im Hausbrand, in der Energieerzeugung und in der Industrie sowie in der Landwirtschaft. An vielen Waldstandorten überstiegen in der Vergangenheit die Einträge dieser Säurebildner die Pufferkapazitäten der Böden.

Die Versauerung der Böden hat vielfältige Auswirkungen auf Wälder und ihre Bäume sowie den Boden und seine Ökosystemleistungen. Es leiden sowohl Böden und ihre Fruchtbarkeit als auch die Vitalität der Bäume. Mit sinkendem pH-Wert werden wichtige Nährstoffe wie

Calcium, Magnesium und Kalium nicht mehr im Boden gebunden, sondern ausgewaschen, und stehen somit den Bäumen nicht mehr zur Verfügung. Bei starker Versauerung wird Aluminium freigesetzt, welches in hohen Konzentrationen toxisch wirkt und die Pflanzenwurzeln und Mykorrhizapilze schädigt. Saure Milieus beeinträchtigen auch das Vorkommen und die Aktivität von Bodenorganismen. Eine hohe Aktivität der Bodenorganismen sorgt für eine schnelle Umsetzung der Nährelemente und eine höhere Bodenfruchtbarkeit.

Die intensiven Beobachtungen an den Level-II-Flächen in Deutschland und Europa bestätigen den Erfolg gemeinsamer umweltpolitischer Anstrengungen. Die Säurebelastung durch Schwefel ist deutlich zurückgegangen. Mit der Großfeuerungsanlagen-Verordnung konnte der Schwefeldioxid-Ausstoß aus Fabrikanlagen und Kraftwerken reduziert und mit der Einführung des Katalysators Schadstoffe der Autoabgase vermindert werden. Flankierend führte man in den Wäldern seit den 1980er-Jahren in vielen Regionen Deutschlands Bodenschutzkalkungen durch.

Ende der 1980er-Jahre wurden häufig über 30 Kilogramm Schwefel pro Hektar und Jahr in den Wald eingetragen. Heute sind es meist unter fünf Kilogramm. Untersuchungen des Bodenwassers und des Bodens



Abbildung 9: Depositionssammler auf der Level-II-Fläche Fischbach, Saarland. Depositionsmessungen sind ein zentraler Bestandteil des Level-II-Monitorings. Mithilfe der Trichter wird der Niederschlag im Freiland oder unter den Baumkronen aufgefangen und regelmäßig auf Schwefel- und Stickstoffgehalte sowie weitere Stoffe untersucht.



Abbildung 10: Stammabflussmessungen auf der Level-II-Fläche Sandhof, Mecklenburg-Vorpommern

Bei glattrindigen Baumarten wie etwa der Buche macht der Stammabfluss einen nicht unerheblichen Anteil des Niederschlags im Bestand aus. Daher wird bei diesen Baumarten zusätzlich der am Stamm ablaufende Niederschlag gemessen und auf Stoffkonzentrationen untersucht.

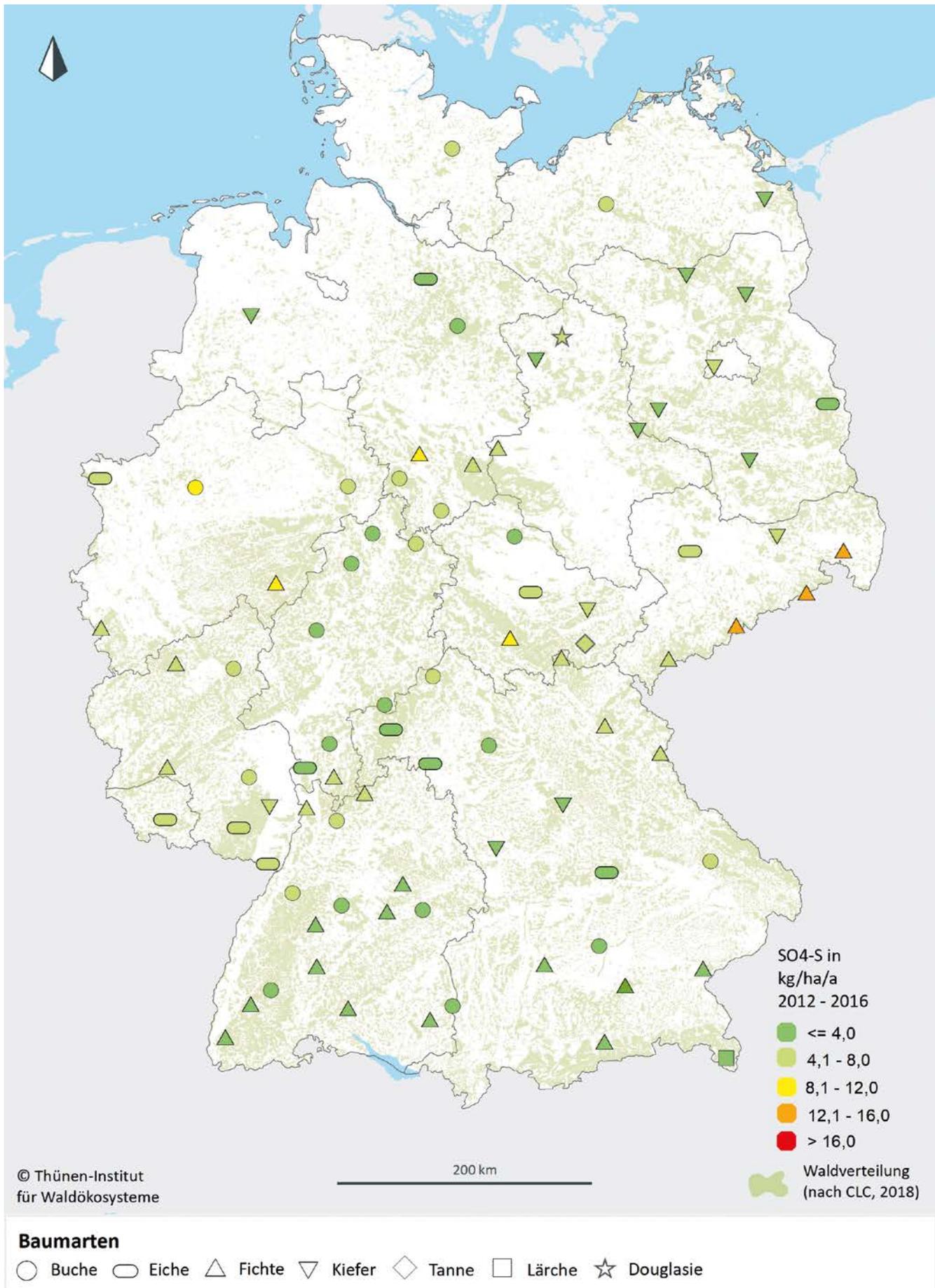
lassen eine langsame Erholung der Waldböden erkennen. Dennoch schreitet die Versauerung der Waldböden, besonders in deren unterem Bereich, mancherorts weiter fort. Verantwortlich dafür sind immer noch zu hohe Stickstoffeinträge und der bereits eingetragene Schwefel, der langsam in die Tiefe verlagert wird.

Schwefelreduktion erfolgreich

Die Deposition von Sulfatschwefel ist bereits vor dem Jahr 2000 nach Inkrafttreten der ersten Stufe der Großfeuerungsanlagen-Verordnung und der TA Luft 1986 deutlich zurückgegangen. Zwischen 2000 und 2016 hat sich der Eintrag nochmals um etwa 60 % reduziert. Im Bestand werden derzeit jährlich etwa 4 Kilogramm pro Hektar eingetragen. Auf der Freifläche sind es jährlich rund 3 Kilogramm pro Hektar. Hohe Stofffrachten von über 12 Kilogramm pro Hektar jährlich werden nur noch in Sachsen in Grenznähe zu Tschechien gemessen.

Durch den Rückgang der Schwefeleinträge hat sich auch die Säurebelastung in den Böden stark verringert. Teilweise schreitet die Versauerung jedoch insbesondere in den Unterböden an versauerungsempfindlichen Standorten aufgrund der Säureinträge der letzten Jahrzehnte weiter fort.

Abbildung 11: Depositionsrate von Sulfatschwefel im Zeitraum von 2012 bis 2016



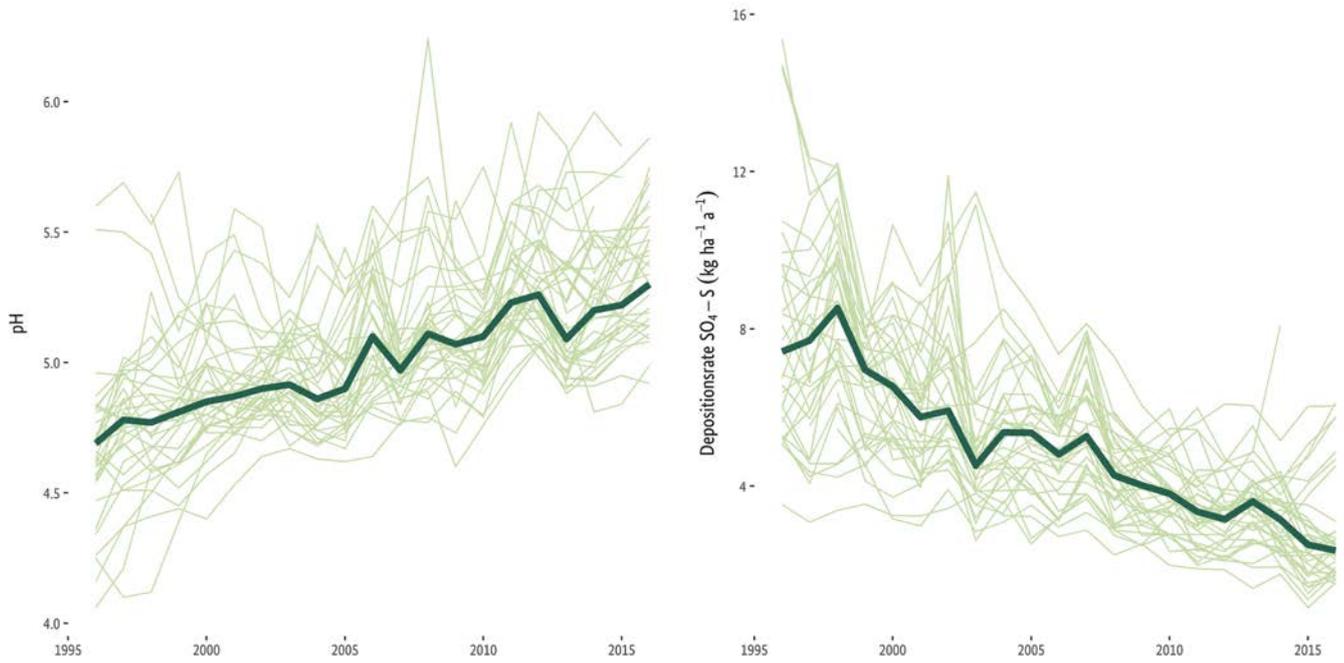


Abbildung 12: Anstieg des pH-Werts und Reduktion der Sulfatschwefeleinträge mit dem Freilandniederschlag seit 1996. Die dunkelgrüne Linie stellt den Median über alle Flächen dar. In die Darstellung sind 39 Flächen (hellgrüne Linien) mit ausreichender zeitlicher Abdeckung eingegangen.

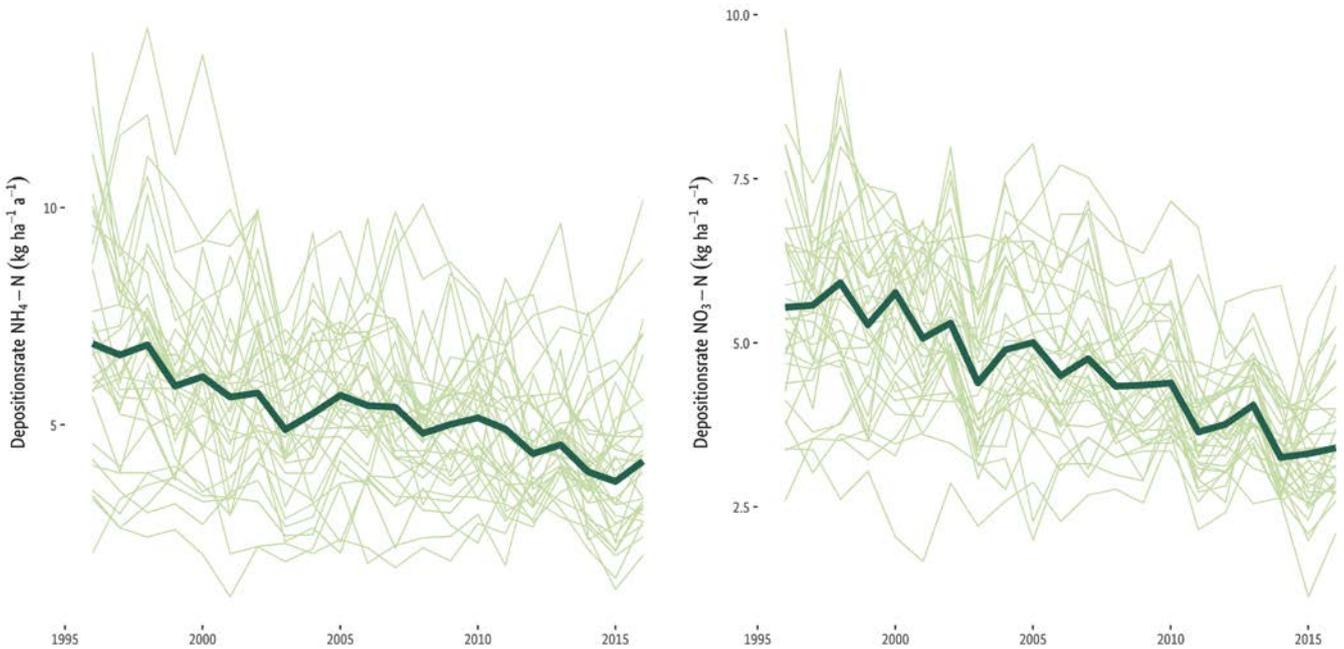


Abbildung 13: Reduktion der Ammonium- und Nitrateinträge mit dem Freilandniederschlag seit 1996. Die dunkelgrüne Linie stellt den Median über alle Flächen dar. In die Darstellung sind 38 Flächen (hellgrüne Linien) mit ausreichender zeitlicher Abdeckung eingegangen.

Bodenwasser – weniger Sulfat

Haben sich Waldböden inzwischen erholt? Diese Frage lässt sich nicht mit einem einfachen Ja oder Nein beantworten. Vielmehr zeigen Daten zur Wasserchemie, dass die Auswirkungen von der Bodentiefe und der Vorbelastung abhängen. Die Zusammensetzung des Bodenwassers gibt Hinweise auf die Säurebelastung und die Verfügbarkeit von Nährstoffen.

Der Gehalt an Sulfat ist zurückgegangen. Die Sulfatkonzentration nimmt im Durchschnitt im Oberboden um etwa 4,8 % pro Jahr und im Unterboden um etwa 4,2 % pro Jahr ab. Darin lässt sich ein positiver Effekt der gesunkenen Schwefelemissionen erkennen. Zudem befindet sich weniger Aluminium im Bodenwasser als früher (2,1 bzw 3,4 % pro Jahr im Ober- bzw. Unterboden), was sich positiv auf die Pflanzenwurzeln auswirkt.

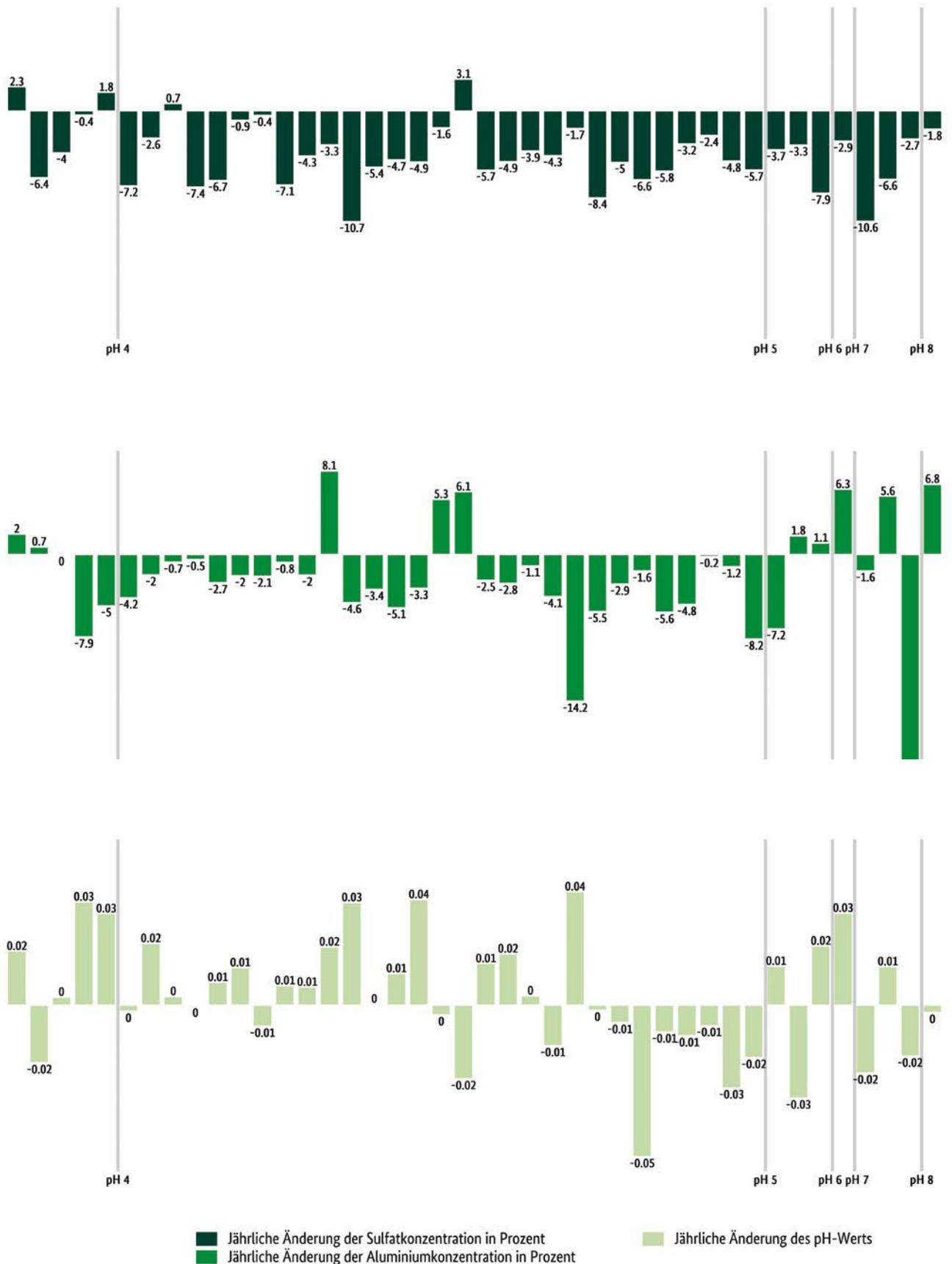
Hinsichtlich des Versauerungsgrades des Bodenwassers sind die Aussagen weniger eindeutig: Im Durchschnitt steigt der pH-Wert der Bodenlösung leicht an. Die Entwicklung ist jedoch vom pH-Wert des Ausgangsbodens abhängig. Auf stark versauerten Böden steigen die pH-Werte der Bodenlösung des Oberbodens langsam wieder an. Bei nicht so stark versauerten Böden schreitet die Versauerung der Bodenlösung des Unterbodens aber weiter voran. Insgesamt erholen sich die Waldböden nur sehr langsam von der Versauerung – ein Prozess, der Jahrzehnte in Anspruch nimmt.

Diese Ergebnisse decken sich mit Trends, die aus europaweiten Auswertungen hervorgehen (Johnson et al. 2018) sowie mit Befunden aus Bodenproben. In einer Studie basierend auf Daten von mehreren Hundert Level-II-Flächen in Europa (Cools und de Vos, 2011) wurde in den letzten 30 Jahren eine Erholung von sehr sauren Böden, aber eine weiter fortschreitende Versauerung von weniger sauren Böden beobachtet.

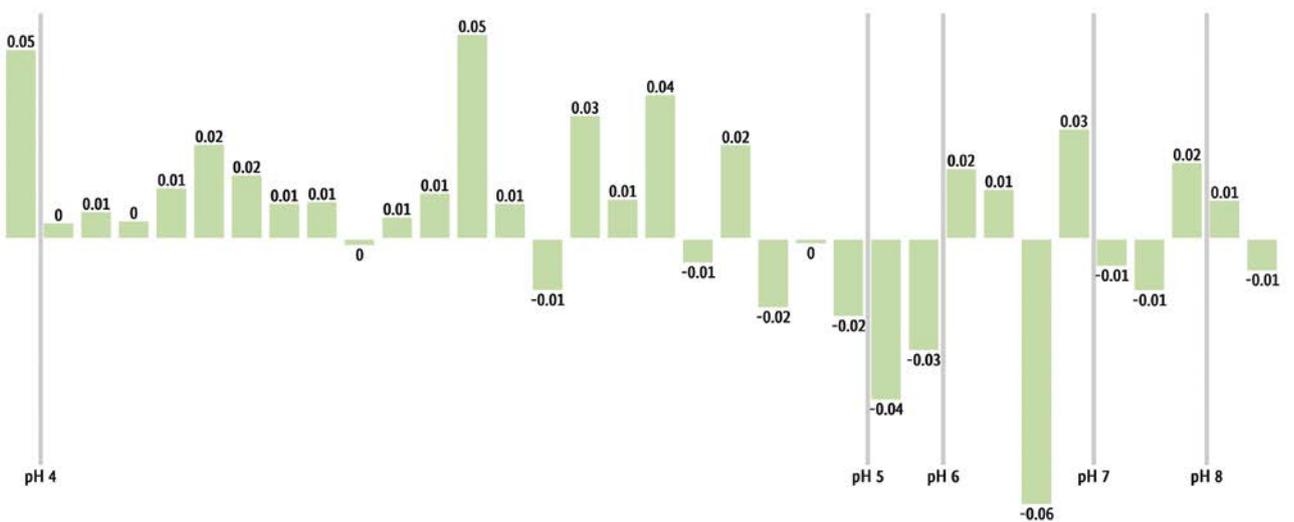
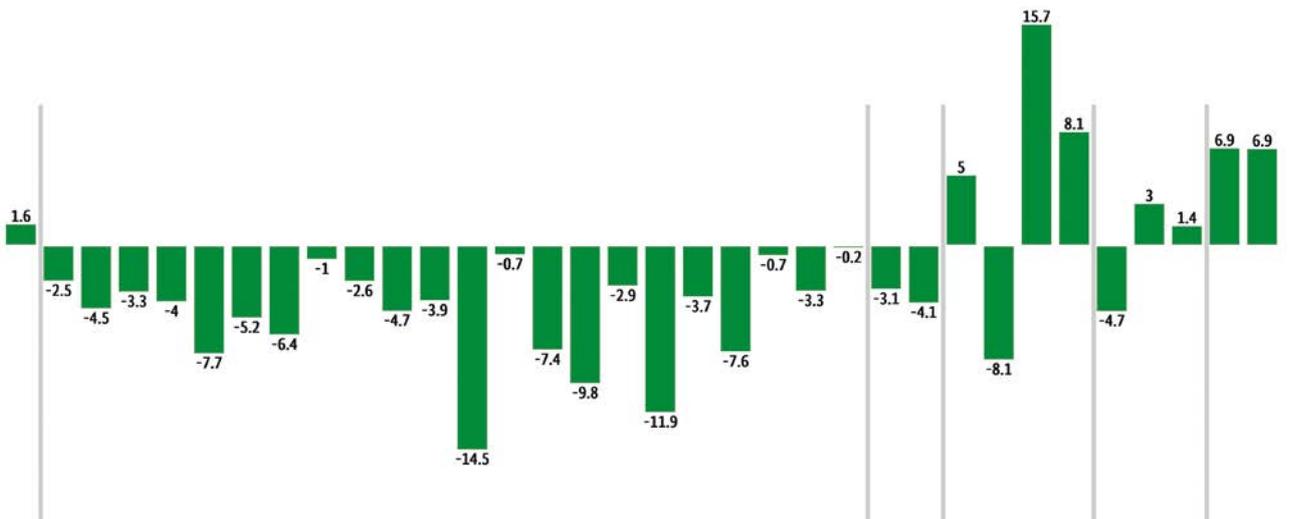
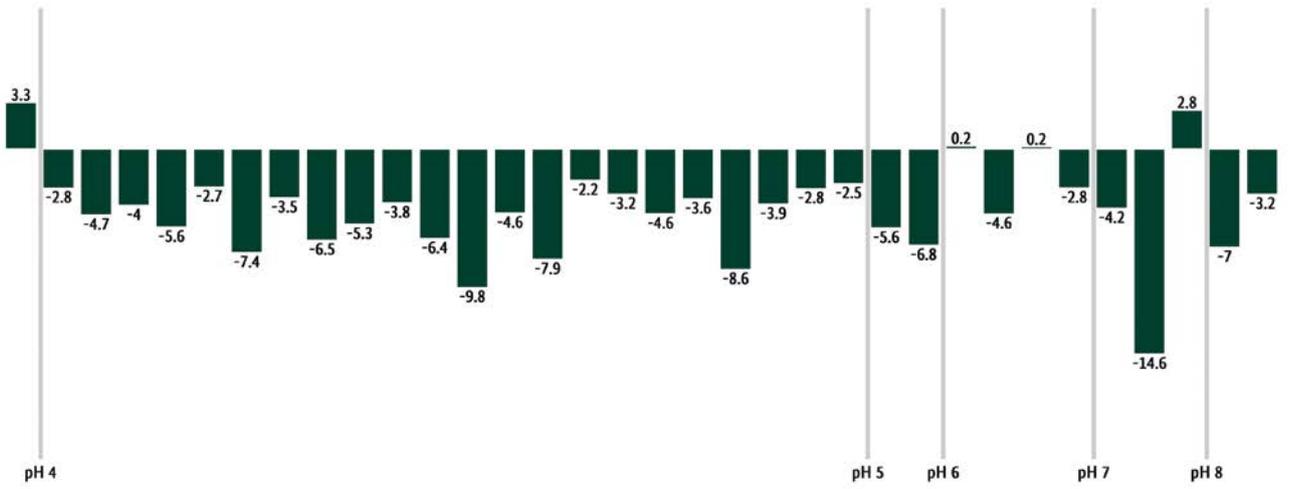


Abbildung 14: Jährliche Änderung von Sulfat, Aluminium, und pH-Wert in der Bodenlösung im Ober- und Unterboden von Level-II-Flächen sortiert nach dem pH-Wert der Bodenlösung

Oberboden



Unterboden



■ Jährliche Änderung der Sulfatkonzentration in Prozent
■ Jährliche Änderung der Aluminiumkonzentration in Prozent
■ Jährliche Änderung des pH-Werts

Basensättigung – so sauer ist der Boden

Der Versauerungszustand kann auch anhand der Basensättigung des Bodens bewertet werden. Je höher die Basensättigung ist, desto höher die Fähigkeit des Bodens, Säureeinträge abzapuffern und in einem konstanten pH-Bereich zu bleiben. Zudem ist die Basensättigung ein Kennwert zur Beurteilung des Nährstoffangebots von Böden.

Auswertungen der Bodendaten von Level-II-Flächen in Deutschland weisen ebenfalls auf eine leichte Erholung des Oberbodens hin. Beispielhaft steht hierfür die Level-II-Fläche Solling Fichte: Im Zeitraum von 1981 bis 1990 wurde hier eine fortschreitende Versauerung festgestellt. Nach 1990 konnte eine leichte Erhöhung der Basensättigung des Oberbodens beobachtet werden – was eine Erholung bedeutet. Im Unterboden hat die Basensättigung jedoch auch nach 1990 weiter abgenommen. Ein Grund dafür war die Remobilisierung früherer Schwefeleinträge (Meessenburg et al. 2016).

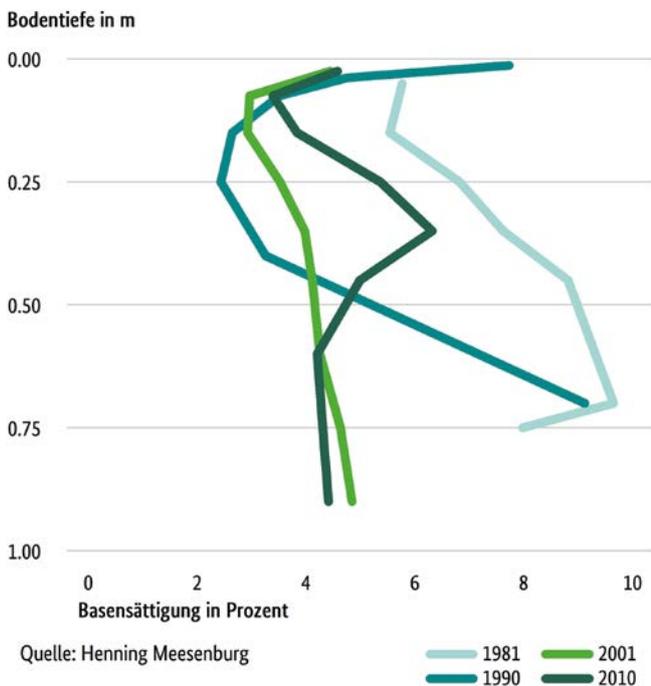


Abbildung 15: Zeitliche Veränderungen des Tiefenverlaufs der Basensättigung am Beispiel der Level-II-Fläche Solling Fichte, Niedersachsen



Abbildung 16: Bodenprofil der Level-II-Fläche Solling Fichte, Niedersachsen

Rückgang der Schwefelgehalte in Nadeln und Blättern

Aufgrund der historisch hohen Schwefeleinträge in Wäldern wurde in vielen Gebieten Europas eine Anreicherung von Schwefel in den Nadeln und Blättern der Bäume nachgewiesen. Seit einigen Jahren gehen die Konzentrationen wieder zurück. So wurde auf den Level-II-Flächen in Deutschland bei den vier Hauptbaumarten (Buche, Eiche, Fichte, Kiefer) ein signifikanter Rückgang der Anreicherung von Schwefel in Blättern und Nadeln beobachtet. Die größte Abnahme bezogen auf die Gehalte im Jahr 2000 zeigt sich bei Fichte mit 1,0 % pro Jahr, gefolgt von der Kiefer mit 0,8 % pro Jahr. Bei der Buche liegt die Abnahme in der Größenordnung von 0,5 % pro Jahr, bei der Eiche von 0,4 % pro Jahr. Die absoluten Gehalte in den Blättern sind regional stark unterschiedlich, da abhängig von historischen Schwefeleinträgen und der damit verbundenen Verfügbarkeit von Schwefel im Boden. Beispielsweise finden sich im Ruhrgebiet deutlich höhere Schwefelgehalte in den Blättern und Nadeln als in Bayern.

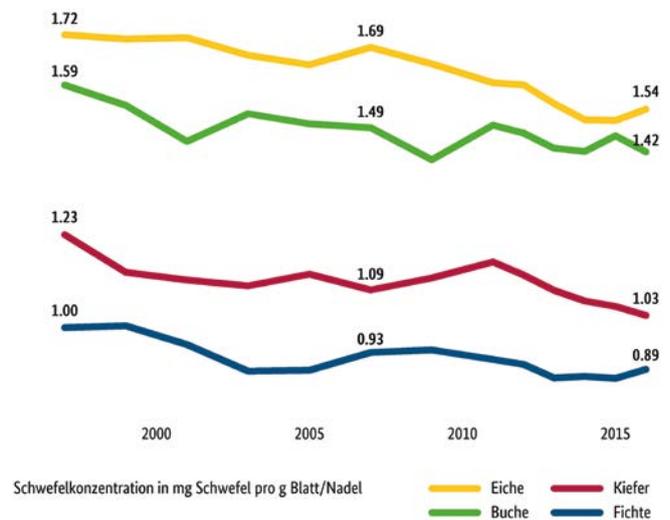


Abbildung 17: Änderung des Schwefelgehalts in Nadeln und Blättern der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Kiefer und Fichte

Stickstoffeinträge immer noch hoch

Waldbäume hatten früher meist zu wenig Stickstoff zu ihrer Verfügung. Heute leiden Wälder zunehmend an einem Überangebot des Nährstoffs. Obwohl die Tendenz rückläufig ist, werden auf den Level-II-Flächen nach wie vor zu hohe Stickstoffeinträge gemessen. Zu viel Stickstoff bereitet Wäldern Probleme: Ungleichgewichte in der Nährstoffversorgung beeinträchtigen die Vitalität der Bäume, Nitrat gefährdet das Grundwasser und der Artenreichtum droht zu schwinden.



Abbildung 18: Freifläche
Level-II-Messstation Laußnitz,
Sachsen

Zum Level-II-Messnetz gehören neben den Versuchsfeldern im Bestand auch Freiflächen auf Lichtungen oder am Waldrand. Durch den Vergleich der Messungen auf den Freiflächen und im Bestand kann die Bedeutung des Kronenraums für die Deposition in Wäldern bestimmt werden. Außerdem werden auf der Freifläche meteorologische Messungen durchgeführt.

Eine Herausforderung für unsere Wälder

Stickstoff ist ein lebenswichtiger Nährstoff für Pflanzen. In den Wäldern unserer Breiten war er einst ein knappes und daher begehrtes Gut. An vielen Standorten begrenzte die Stickstoffverfügbarkeit das Vorkommen und Wachstum von Bäumen und Bodenvegetation. Vielerorts hat sich dieser Zustand umgekehrt – dem Mangel folgte Überfluss. Seit Jahrzehnten werden reaktive Stickstoffverbindungen wie etwa Stickstoffoxide und Ammoniak über die Atmosphäre verstärkt in Wälder eingetragen. Auf globaler Ebene hat sich durch den Menschen die jährliche Freisetzung von reaktiven Stickstoffverbindungen seit Mitte des 19. Jahrhunderts verzehnfacht (SRU 2015). Stickstoffoxide (NO_x) entstehen in der Industrie und Energieerzeugung, wenn fossile Rohstoffe verbrannt werden, aber auch durch Abgase im Verkehr und Hausbrand. Ein weiterer Verursacher ist die Landwirtschaft. Vor allem bei der intensiven Tierhaltung sowie der Düngung mit Gülle und synthetischen Stickstoffdüngern entweicht Ammoniak (NH_3). Stickstoffoxide und Ammoniak wandeln

sich zum Teil in der Atmosphäre zu Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) um. Die Einträge von Stickstoffverbindungen in den Wald erfolgen über den Niederschlag oder als Gase und Partikel. Zu hohe Einträge stören den natürlichen Stoffkreislauf der Waldökosysteme jedoch empfindlich.

Der zusätzliche Stickstoff hatte zunächst eine Düngewirkung. Bäume reagierten mit verstärktem Wachstum. Allerdings ziehen hohe atmosphärische Stickstoffeinträge vielerorts eine Übersättigung der Wälder nach sich – die sogenannte Eutrophierung. Für Bäume und Wälder hat der Überschuss unterschiedliche Konsequenzen.

→ Ungleichgewichte in der Nährstoffversorgung

An Waldstandorten, an denen es zu viel Stickstoff und gleichzeitig zu wenig andere lebensnotwendige Nährstoffe gibt, können sich langfristige Verschiebungen der Nährstoffgehalte ergeben. Hat ein Baum zum Beispiel viel Stickstoff zur Verfügung, kann dies zu einem Mangel an Phosphor, Calcium, Magnesium oder Kalium führen.

→ Versauerung der Waldböden

Stickstoffverbindungen tragen ähnlich wie Schwefelverbindungen zur Versauerung der Waldböden bei.

- **Erhöhte Anfälligkeit der Bäume**
Stickstoffeinträge führen dazu, dass sich das Zusammenleben von Wurzeln und Mikroorganismen im Boden verändert. Zusammen mit der Versauerung und den Ungleichgewichten in der Nährstoffversorgung führt dies dazu, dass die Bäume anfälliger gegen Frostschäden und den Befall mit Schadinsekten und Pilzen werden.
- **Veränderung der Lebensgemeinschaft**
Zu viel Stickstoff verändert die Artenzusammensetzung der Wälder. Pflanzenarten, die Stickstoff gut verwerten können, verdrängen nach und nach Arten, die an Stickstoffarmut angepasst sind. Das führt zu einer schleichenden Vereinheitlichung der Vegetation an Standorten mit hohen Stickstoffeinträgen.
- **Belastung des Grund- und Trinkwassers**
Stickstoff, der nicht verwertet oder gespeichert werden kann, wird als Nitrat mit dem Sickerwasser ausgetragen. Dadurch kann es zu einer Belastung des Grundwassers und damit auch des Trinkwassers kommen.

Die intensiven Beobachtungen auf den Level-II-Flächen eignen sich, um die Zusammenhänge von Ursache und Wirkung im Stickstoffkreislauf von Wäldern besser zu verstehen. Vielerorts bestätigen die Untersuchungen die Folgen zu hoher Stickstoffeinträge. Seit den 1990er-Jahren gehen die Einträge zwar wieder zurück, nach wie vor wird jedoch zu viel Stickstoff eingetragen. Die Ergebnisse deuten auf eine Übersättigung der Level-II-Flächen mit Stickstoff hin. Die Bäume auf den Messflächen weisen zunehmende Nährstoffungleichgewichte auf, die eine sich verschlechternde Ernährungssituation anzeigen.

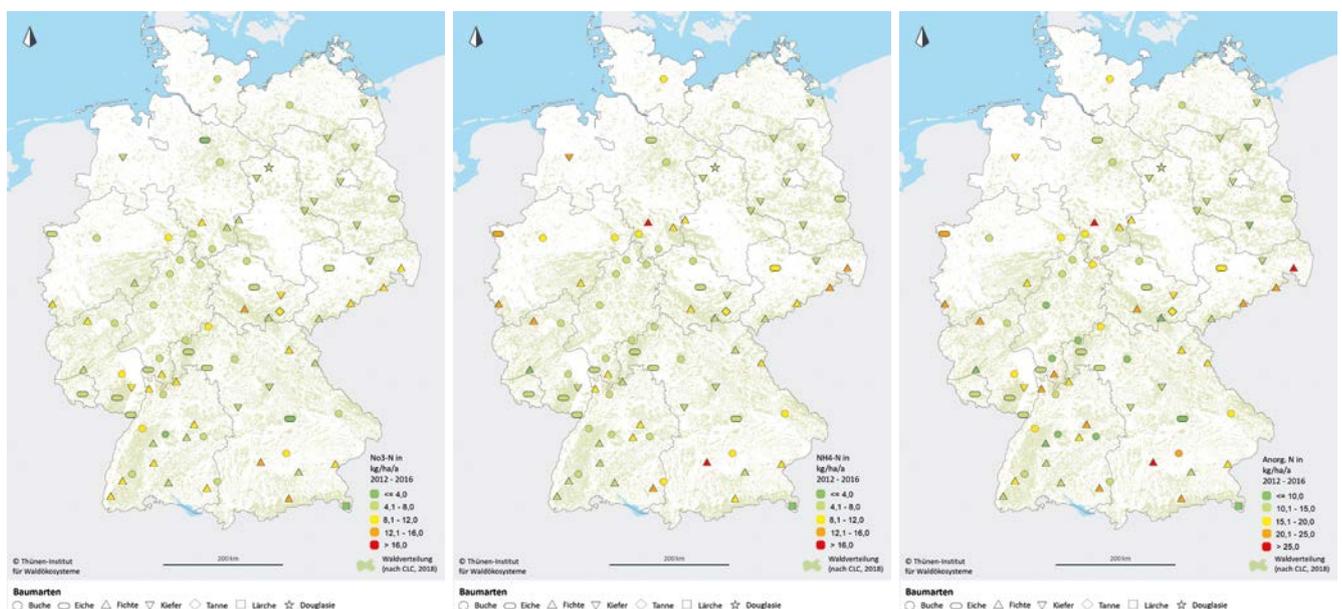
Bei europaweiten Level-II-Auswertungen wurde eine Verschiebung in der Artenzusammensetzung der Waldvegetation nachgewiesen.

Stickstoffeinträge rückläufig – aber weiterhin auf hohem Niveau

Die intensiven Beobachtungen bestätigen einen Rückgang der Stickstoffeinträge auf den Level-II-Flächen. Die jährliche Deposition von anorganischem Stickstoff pro Hektar unter dem Kronendach ist im Zeitraum von 2000 bis 2016 um etwa 4 Kilogramm zurückgegangen. Dies entspricht einer Abnahme um 23 %. Dabei war der Rückgang der Ammoniumdeposition (20 %) etwas schwächer als der der Nitratdeposition (29 %).

Trotz dieser Entwicklung wird an den meisten Standorten noch immer mehr Stickstoff eingetragen, als die Waldökosysteme auf Dauer vertragen können. Die in der Literatur als unbedenklich veröffentlichten Schwellenwerte für Stickstoff liegen bei einer jährlichen Zufuhr zwischen 5 bis 15 Kilogramm Stickstoff pro Hektar für Nadelwald und 10 bis 20 Kilogramm pro Hektar für Laubwald. Auf 51 % der Level-II-Flächen überschreiten die Einträge diese Grenzwerte, 49 % liegen innerhalb der von den Grenzwerten beschriebenen Spannweiten.

Abbildung 19: Depositionsraten von anorganischem Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ und deren Summe) im Bestandesniederschlag im Zeitraum 2012–2016



Insgesamt wurden auf den Level-II-Flächen im Zeitraum von 2012 bis 2016 jährlich insgesamt etwa 19 Kilogramm Stickstoff pro Hektar eingetragen. Auf dem am stärksten belasteten Waldstandorten waren es sogar bis zu 32 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr, auf den am schwächsten belasteten Standorten etwa 10 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr.

Der leichte Rückgang der Nitratstickstoffeinträge deutet auf eine langsame, aber kontinuierliche Reduktion der Stickstoffemissionen hin. Nitratstickstoff resultiert hauptsächlich aus den Emissionen von Straßenverkehr und Energieerzeugung. Aber auch Messstandorte in Regionen, die durch intensive Landwirtschaft geprägt sind, weisen zum Teil sehr hohe Eintragsraten auf. Diese sind auf Tierhaltung und die Ausbringung von Gülle zurückzuführen.

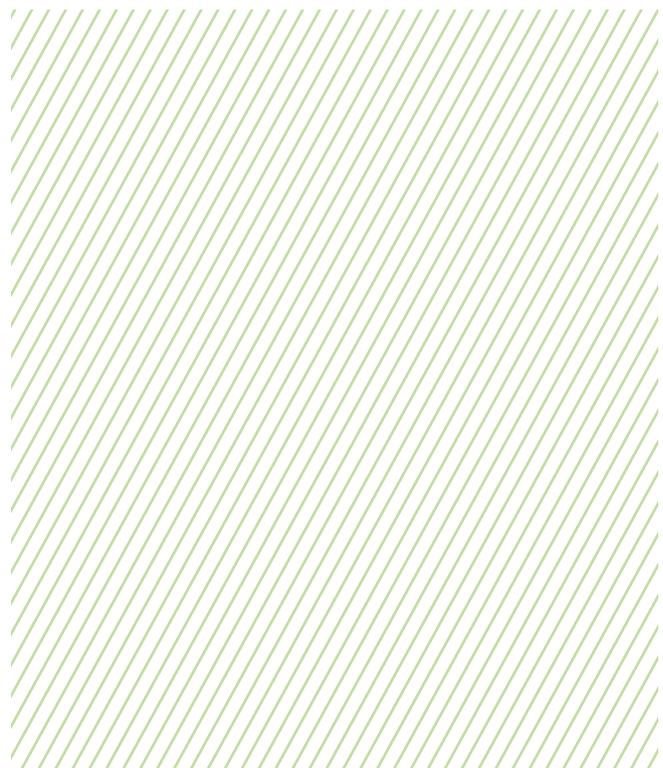
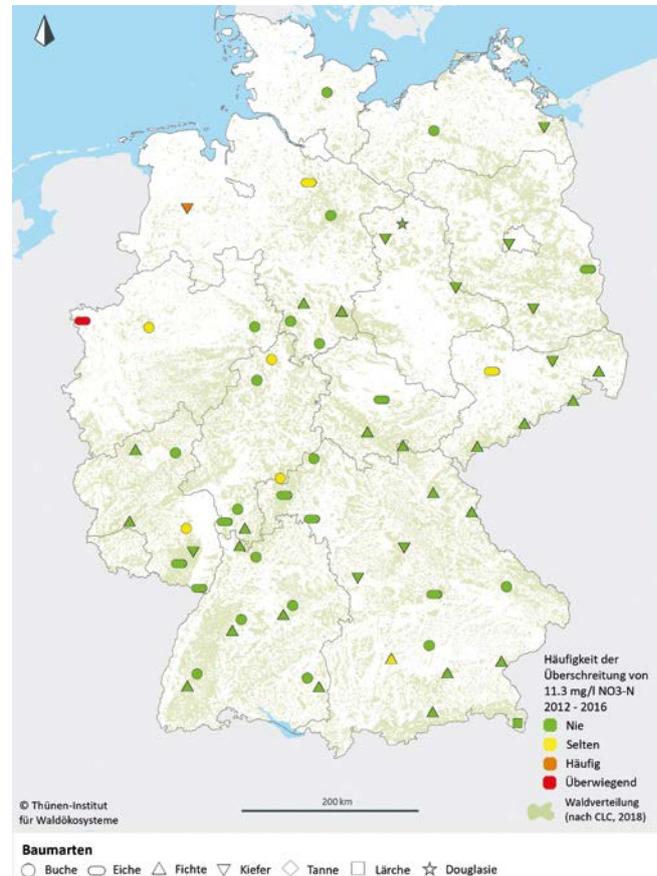
Erhöhte Werte im Bodenwasser deuten sich an

Die Untersuchung der Stickstoffkonzentrationen im Bodenwasser geben weitere Hinweise auf den Stickstoffstatus und dessen Konsequenzen für die Wälder. Auf etwa 70 % der Messflächen treten Werte auf, die höher sind, als in Wäldern ohne Luftverschmutzung zu erwarten wären. Neben dieser Bewertung werden Grenzwerte für Stickstoffgehalte im Bodenwasser von Wäldern über ein verstärktes Risiko für Frostschäden und Pilzbefall definiert. Auf etwa 45 % der Flächen wird dieser Grenzwert überschritten.

Das unter dem Wald versickernde Wasser trägt zur Neubildung von Grundwasser bei. Auf den Level-II-Flächen wird nicht in Tiefen gemessen, die direkte Rückschlüsse auf eine unmittelbare Gefährdung tiefer liegender Grundwasserkörper erlauben. Erhöhte Nitratwerte im Bodenwasser weisen nichtsdestotrotz darauf hin, dass die Einträge weiter gemindert werden müssen, um einer künftigen Gefährdung des Grundwassers vorzubeugen.

So zeigt ein Vergleich des Nitrats im Bodenwassers mit den Grenzwerten, die für Trinkwasser gelten, dass es auf 11 der 68 Level-II-Flächen zeitweise zu Überschreitungen kommt. Auf zwei stark belasteten Flächen liegen sogar mehr als ein Drittel der Messzeiträume über dem definierten Grenzwert.

Abbildung 20: Häufigkeit der Überschreitung des Grenzwerts für Nitrat nach Trinkwasserverordnung (11,3 mg NO₃-N l⁻¹) im Zeitraum 2011–2015



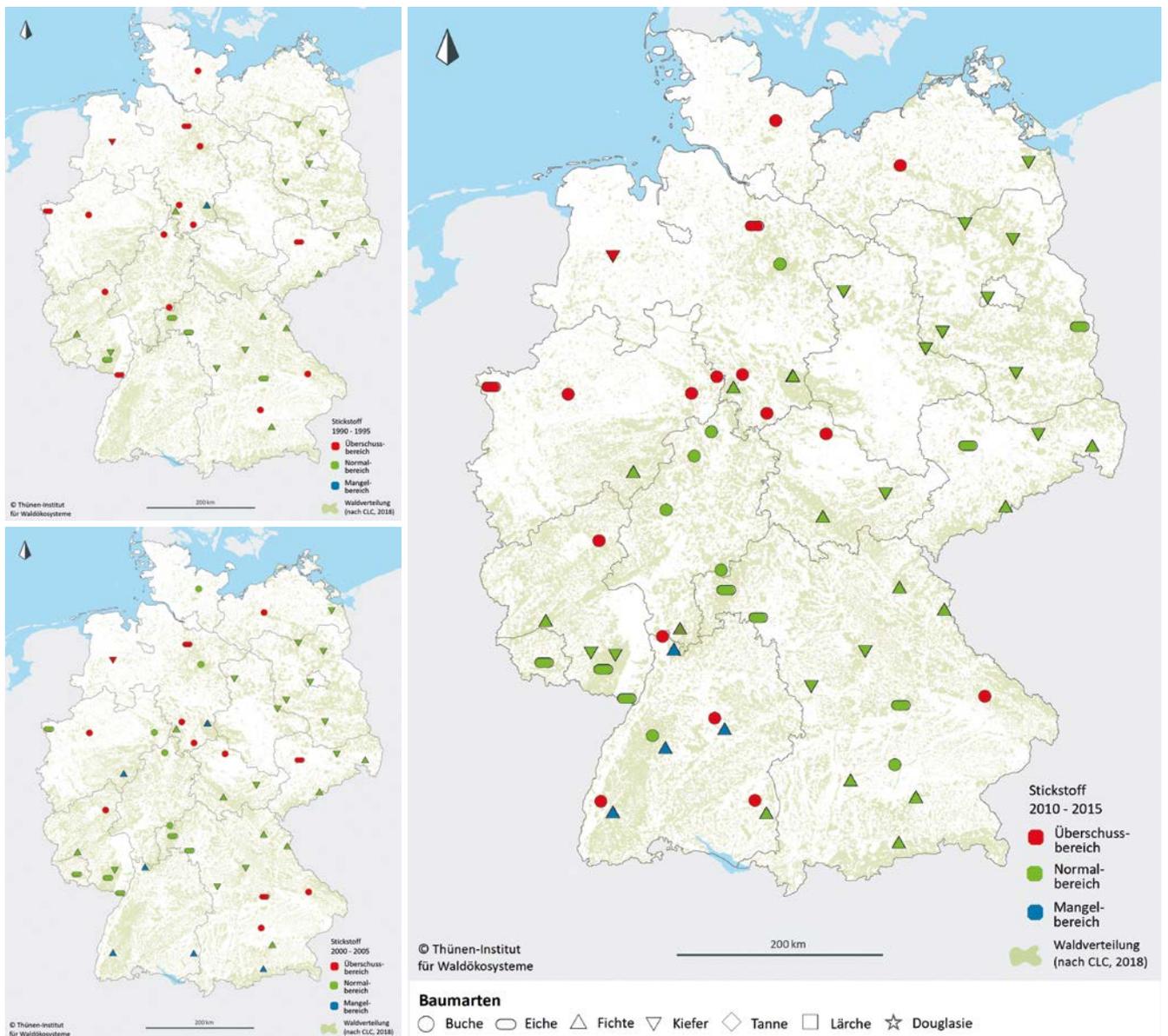
Bäume zeigen Nährstoffungleichgewichte

In den vergangenen Jahren haben der Eintrag von Stickstoff und steigende Kohlendioxid-Konzentrationen in der Atmosphäre zu einem schnelleren Wachstum der Bäume geführt. Dies zog auch einen steigenden Nährstoffbedarf nach sich. Zusätzlich werden auch dem Boden durch die Holzernte Nährstoffe entzogen. Während Stickstoff über die Luft in die Wälder eingetragen wird, verbleibt die Verfügbarkeit von anderen Nährstoffen wie

Phosphor in den meisten Böden auf gleichem, begrenztem Niveau. Um Nährstoffungleichgewichte festzustellen, werden frische Blätter und Nadeln aus der oberen Krone auf ihre Elementgehalte analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass heute oft Phosphor – nicht mehr Stickstoff – der für das Wachstum limitierende Nährstoff ist. Bestimmte Grenzwerte der Nährstoffverhältnisse, zum Beispiel von Stickstoff zu Phosphor (N:P), sollten nicht über- oder unterschritten werden.

Knapp die Hälfte der Blatt- und Nadelproben von Level-II-Flächen liegt über dem Grenzwert, was auf zu viel Stickstoff verglichen mit Phosphor hindeutet. Gleichzei-

Abbildung 21: Bewertung der Stickstoff- und Phosphornährung auf den Level-II-Flächen für drei Zeiträume

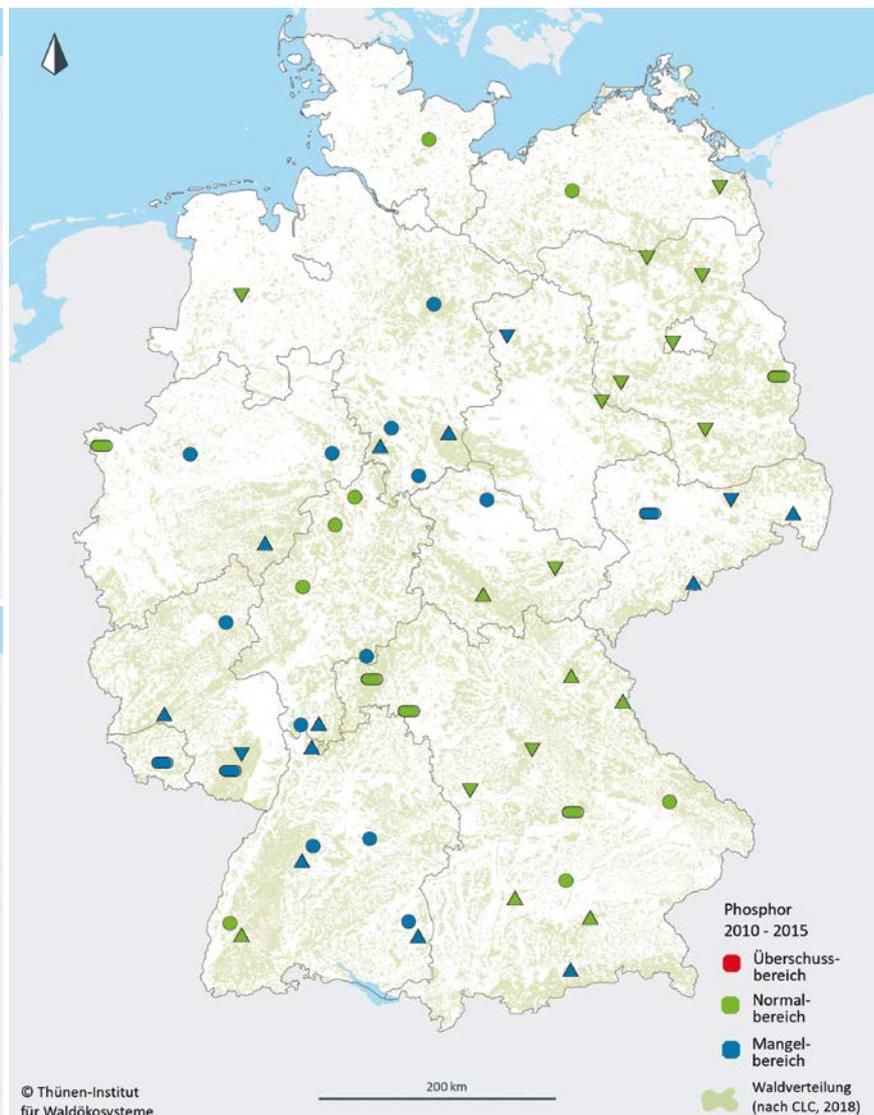
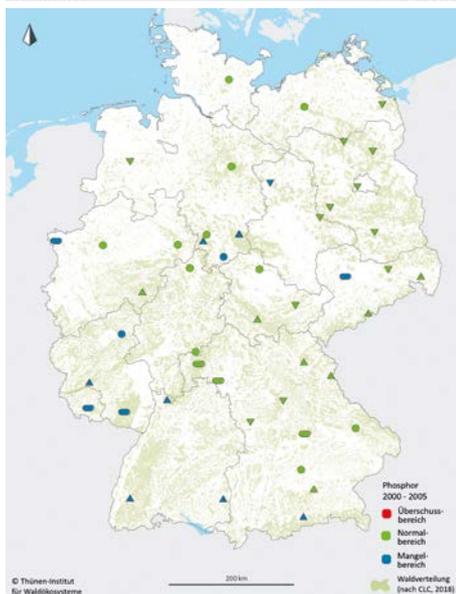
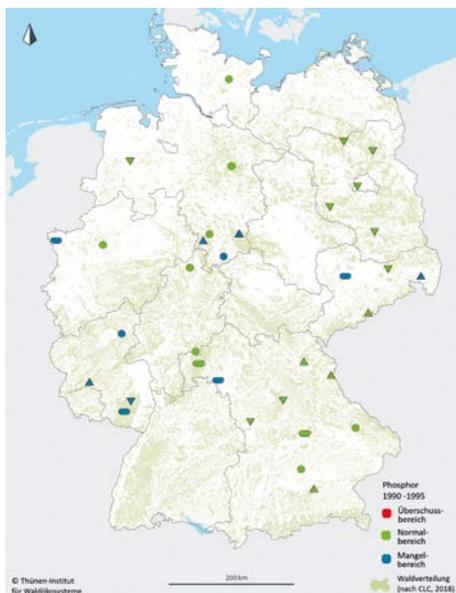


tig werden die unteren Grenzwerte für alle Baumarten kaum unterschritten. Stickstoffmangel bei gleichzeitigem Überangebot an Phosphor kommt also nur äußerst selten vor.

Dies wird auch bestätigt, wenn die Elemente einzeln betrachtet werden. Bei der Buche deuten über die Hälfte der untersuchten Blattproben auf zu viel Stickstoff hin, bei der Eiche liegen über ein Drittel der Blattproben über dem artspezifischen Grenzwert. Die Phosphorkonzentrationen beider Laubbaumarten liegen in etwa bei 40 % der Blattproben im Mangelbereich. Seit den 1990er Jahren wird auf den Level-II-Flächen ein leichter Rück-

gang (0,2–0,3 % pro Jahr) in den Stickstoffkonzentrationen in den Blättern beobachtet. Im selben Zeitraum hat auch die Phosphorkonzentration in den Buchenblättern signifikant abgenommen. Eine Verbesserung in Hinblick auf Nährstoffgleichgewichte ist nicht feststellbar.

Bei der Fichte ist die Situation etwas anders: Bei dieser Baumart liegen rund ein Drittel der Stickstoffkonzentrationen der Nadelproben im Mangelbereich. Bei Fichten tritt Stickstoffmangel besonders häufig in Gebirgslagen auf, wo die Nährstoffaufnahme gestört sein kann. Phosphormangel tritt in über der Hälfte der Nadelproben der Fichte auf. Für diese Baumart sind keine signifikanten

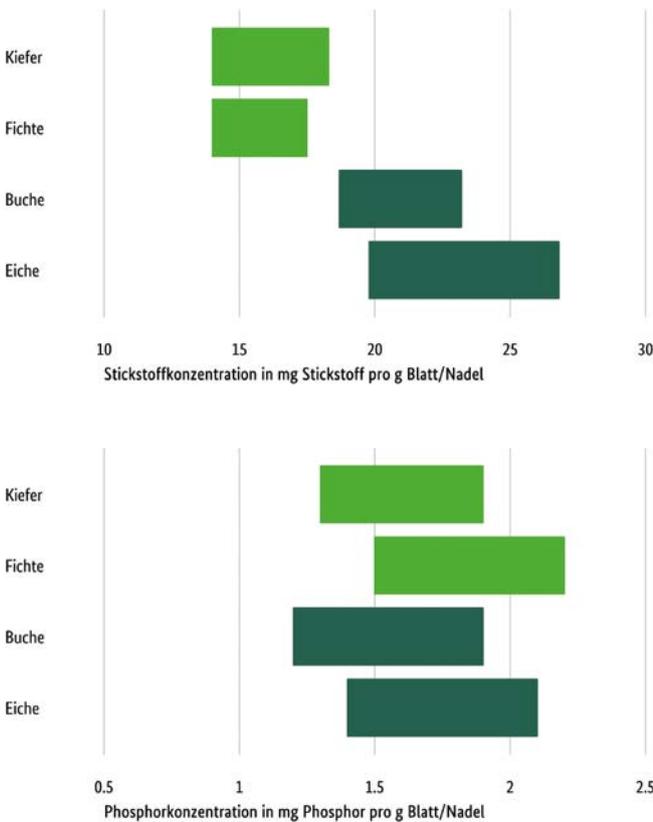


Baumarten

- Buche
- Eiche
- △ Fichte
- ▽ Kiefer
- ◇ Tanne
- Lärche
- ☆ Douglasie

Trends in den Nährstoffkonzentrationen der Nadeln seit Beginn des Level-II-Programms nachweisbar. Europäische Auswertungen zeigen allgemein einen Trend zu abnehmender Nährstoffversorgung der Bäume in den letzten Jahren (Jonard M. et. al. 2014). Ungleichgewichte im Nährstoffhaushalt beeinflussen die Vitalität der Bäume. Ist ihre Nährstoffversorgung nicht ausgeglichen, sind Bäume weniger widerstandsfähig gegenüber Trockenheit und Frost sowie Schaderregern.

Abbildung 22: Ernährungsbewertung nach Mellert und Göttlein (2012). Der Normalbereich ist grün dargestellt.



Bodenvegetation verändert sich nur wenig

Ein Überangebot an Stickstoff verschiebt das Artenspektrum hin zu stickstoffliebenden Pflanzen. Stickstoffreiche Standorte zeichnen sich oft durch einen geringeren Artenreichtum aus als Mangelstandorte. Erhebungen über lange Zeiträume und auf vielen Flächen sind wichtig, da sich Veränderungen der Pflanzengesellschaften nur schleichend bemerkbar machen.

So ist der Einfluss des Stickstoffeintrages auf die Zusammensetzung der Bodenvegetation bisher auf Level-II-Flächen in Deutschland nicht abschließend geklärt. Jedoch zeigen europaweite Untersuchungen, dass auf Level-II-Flächen erhöhte Stickstoffeinträge zu einem kleinen, aber statistisch signifikanten Teil verantwortlich für ein vermehrtes Vorkommen stickstoffliebender Arten sind (Dirnböck et. al. 2014, van Dobben und De Vries 2017).



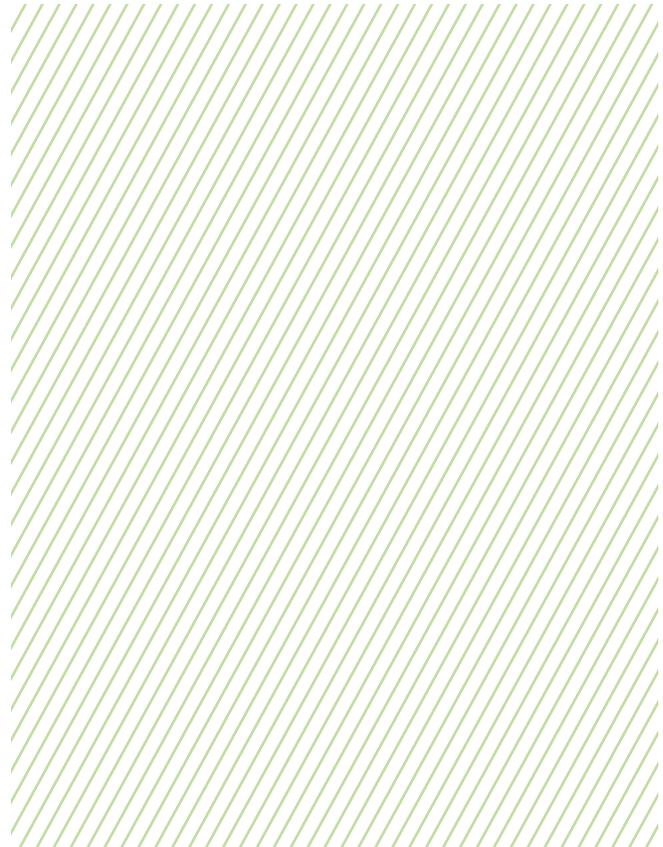
Abbildung 23: Ein Baumkletterer nimmt Nadelproben.

Blatt- und Nadelproben werden mindestens alle zwei Jahre aus dem oberen Drittel der Baumkronen entnommen.

Abbildung 24: Brombeeren (*Rubus spec.*) gehören zu den Zeigerpflanzen für Stickstoff im Wald. Sie breiten sich auch auf einigen Level-II-Flächen, wie Höglwald, Bayern aus.



Abbildung 25: Aufnahmeraster für Vegetationsaufnahmen auf der Level-II-Fläche Laußnitz, Sachsen



Klimaerwärmung und Witterungsextreme

Jahrhundertsommer, Hitzerekorde, anhaltende Sommertrockenheiten, Waldbrände und Sturmereignisse machen deutlich, wie sich Wetterextreme auf den Wald auswirken können. Die Feststellung vieler weiterer Folgen sich ändernder Standort- und Wachstumsbedingungen, wie stärkere Wachstumsschwankungen, verstärkte Fruchtbildung bei der Buche oder die Auswirkungen von Ozon, bedürfen intensiver Beobachtungen. Auch hier zeigt sich: Der von Menschen verursachte Klimawandel ist in den Wäldern angekommen.

nommen werden. Wälder haben ihr eigenes Klima; im Vergleich zum urbanen Raum können die Temperaturen um etwa 4 Grad Celsius abweichen. Zudem können meteorologische Verhältnisse kleinräumig aufgrund der Exposition und Höhenlage sehr stark schwanken. Gerade zur Dokumentierung von Spätfrösten, die auch kleinräumig auftreten können, sind hochauflösende Messdaten nahe den Beständen unabdingbar. Besonders in der Niederschlagsverteilung kann es kleinräumig zu großen Unterschieden kommen, sodass sich Werte für einzelne

Waldbestände nicht aus jenen anderer Messstationen ableiten lassen.

Da für viele Auswertungen längere, lückenlose Zeitreihen erforderlich sind, wurden die vorhandenen Messreihen mithilfe von Modellierungen vervollständigt. Insbesondere die in dieser Broschüre gezeigten Werte für die Zeit vor Beginn des Messprogramms beruhen auf Modellierungen.

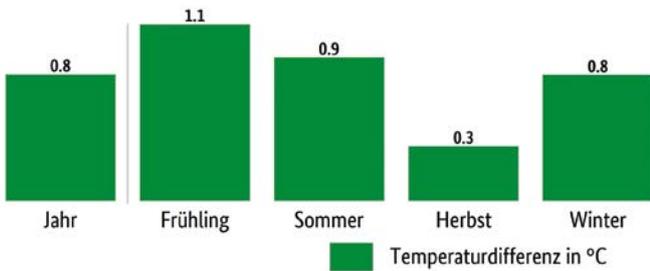
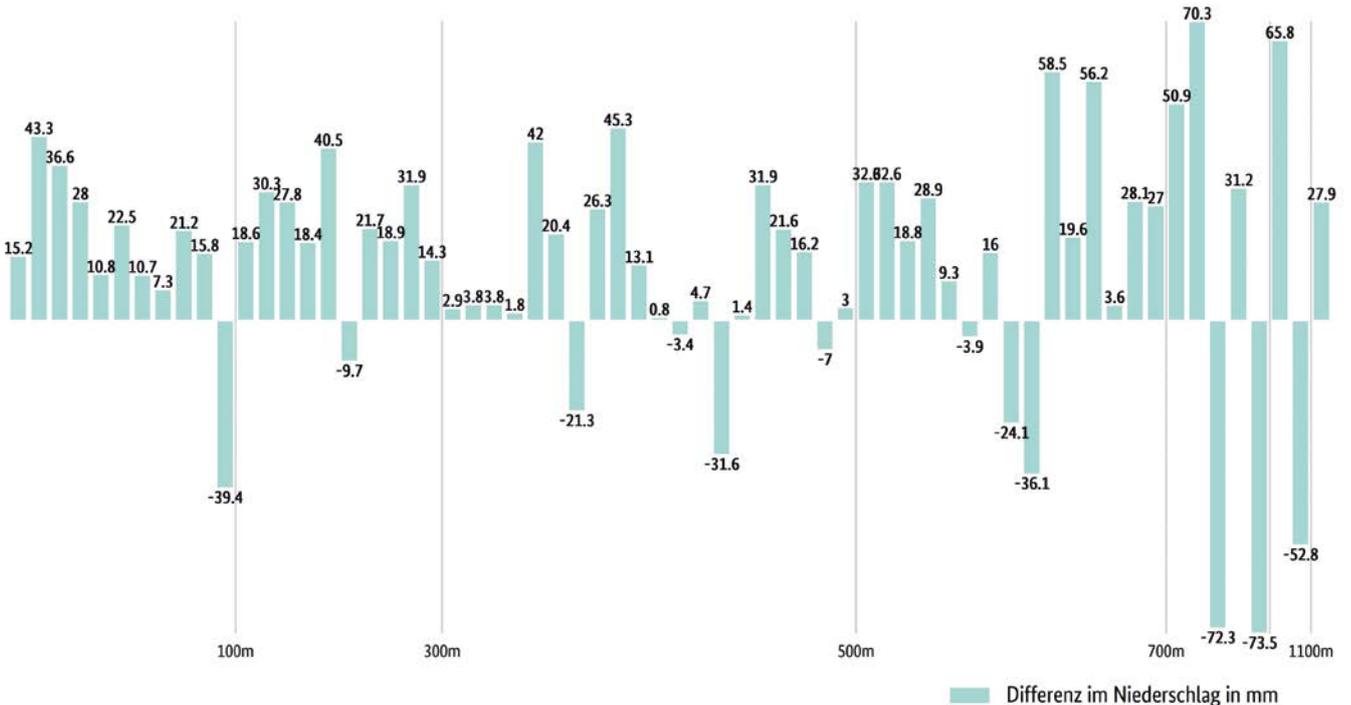


Abbildung 27: Änderung der mittleren Temperaturen zwischen den Zeiträumen 1961–1990 und 1985–2014 für das Gesamtjahr und die vier Jahreszeiten (Mittel aller Level-II-Flächen)

Niederschlagsmuster – regional und jahreszeitlich verschieden

Niederschlagsmengen und -muster unterscheiden sich regional weitaus stärker als Temperaturen. Die Alpen sind über das Jahr hinweg die feuchteste Region Deutschlands. Zu den trockensten Regionen gehören das Nordostdeutsche Tiefland und die Ostdeutschen Becken und Hügel (DWD, 2017).

Abbildung 28: Änderung der mittleren Jahresniederschlagssumme zwischen den Zeiträumen 1961–1990 und 1985–2014 auf den Level-II-Flächen



Global wie deutschlandweit scheinen sich die Niederschlagsmuster und -intensitäten zu verändern. Die mittlere jährliche Niederschlagssumme nimmt auf der Mehrzahl der Level-II-Flächen (53 von 65 Flächen) zu, auf den anderen Flächen verringert sich jedoch der Niederschlag. Somit gibt es keinen einheitlichen Trend über alle Level-II-Flächen hinweg.

Die Änderungen im Niederschlag sind in den Jahreszeiten unterschiedlich ausgeprägt. Im Frühjahr, wenn eine ausreichende Wasserversorgung für Bäume besonders wichtig ist, zeigt sich über die Jahre hinweg ein Rückgang der Niederschlagssummen auf den Level-II-Flächen. Im Sommer gibt es keine merklichen Veränderungen in den Niederschlagssummen. Da bei höheren Temperaturen auch die Verdunstung höher ist, verschlechtert sich nichtsdestotrotz die klimatische Wasserbilanz. In Herbst und Winter ist ein deutlicher Anstieg der Niederschlags-

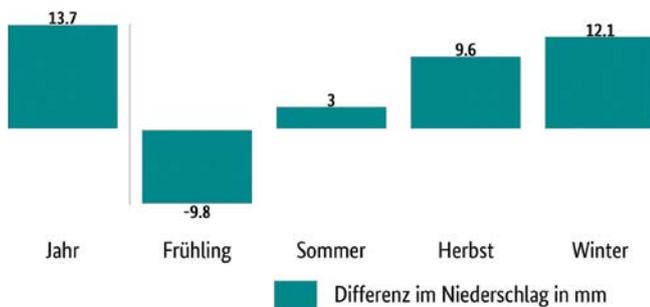


Abbildung 29: Änderung der mittleren Niederschlagssummen aller Level-II-Flächen zwischen den Zeiträumen 1961–1990 und 1985–2014 im Jahr und den Jahreszeiten

summen zu verzeichnen. Die Veränderungen innerhalb der Jahreszeiten lassen jedoch keinen einheitlichen Trend auf allen Level-II-Flächen erkennen.



Abbildung 30: Klimamessturm auf der Level-II-Fläche Conventwald, Baden-Württemberg



Abbildung 31: Waldbrände können bei trockenen Bedingungen bereits im April entstehen



Abbildung 32: Larve des Blauen Kiefernprachtkäfers

Die Larve des Blauen Kiefernprachtkäfers frisst unter der Rinde. Vitale Kiefern können den Angriff des Käfers abwehren. Bei geschwächten Kiefern führt der Insektenbefall zum Tod.



Abbildung 33: Befall von Fichten durch Borkenkäfer

Leiden Bäume an Trockenstress, können sie sich nicht effektiv gegen Schädlinge zur Wehr setzen. Der wichtigste Schutzmechanismus von Bäumen gegen Borkenkäfer ist die Harzproduktion. Das Einbohren durch den Borkenkäfer löst Harzfluss aus, was einzelne Käfer töten kann. In Trockensituationen kann zu wenig Wasser für die Harzproduktion zur Verfügung stehen. Die Bäume sind dann anfälliger gegenüber einem Befall. Bei Massenvermehrungen des Borkenkäfers sind Bäume jedoch meist unabhängig von weiteren Faktoren chancenlos gegenüber dem Schädling.

Bäume „fiebern“ – stärkere Wachstumsschwankungen

In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden an den Level-II-Standorten zunehmend stärkere Schwankungen im Dickenwachstum der Bäume beobachtet. Auf Jahre mit starkem Wachstum folgten Jahre mit Zuwachseinbrüchen. Ein Grund dafür sind veränderte klimatische Bedingungen – aber auch eine größere Sensibilität der Bäume für ebendiese. Auf fast allen Flächen lassen sich Einbrüche im Zuwachs feststellen, die meist auf sehr heiße oder sehr trockene Wetterbedingungen zurückzuführen sind. Nicht nur im selben Jahr ist das Wachstum vermindert: Extreme Trockenjahre sind oft Auslöser für eine über mehrere Jahre anhaltende Zuwachsreduktion. Neben der Temperatur und dem Niederschlag beeinflussen jedoch auch Standortbedingungen den Zuwachs der Bäume. Auch diese haben sich während der letzten Jahrzehnte verändert und sind wahrscheinlich für die größere Sensibilität mitverantwortlich.

Wie kommen Baumarten mit Trockenstress zurecht?

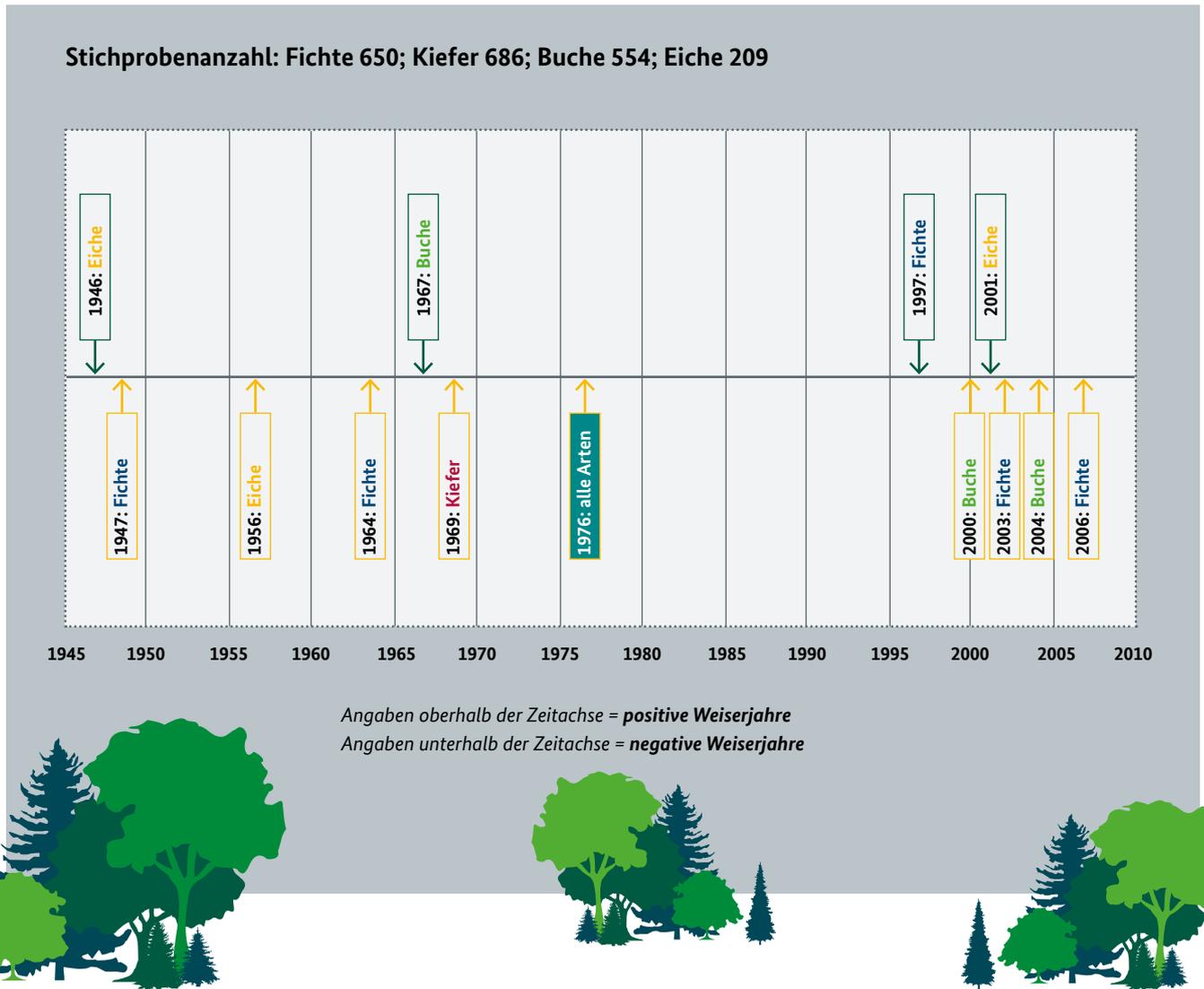
2003, 2006, 2010, 2015 – seit Anfang des Jahrtausends häufen sich überdurchschnittlich trockene und warme Jahre. Auch 2018 und 2019 waren außergewöhnliche Jahre – deutlich wärmer und trockener als die langjährigen Mittel. 2018 war die Abweichung besonders im Frühling und Sommer ausgeprägt. Langanhaltende Trockenheit erhöht die Waldbrandgefahr. Die Bäume reagieren auf Trockenstress mit sinkender Vitalität und reduzierten Abwehrkräften. Dadurch können sie

Eindringlinge wie den Borkenkäfer schlechter abwehren, für den eine besonders warme und trockene Witterung ideale Bedingungen bietet. Zeitgleich haben sich die Käfer im gesamten Bundesgebiet derart stark vermehrt, dass Schadholz nicht schnell genug entnommen werden konnte, um einer weiteren Ausbreitung vorzubeugen. Auf Grundlage der Daten für die Jahre 2018 und 2019 sowie der zu erwartenden Schäden für das laufende Jahr geht das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft von einem Schadholzanfall von 160 Millionen Kubikmetern und einer Fläche von 245.000 Hektar aus, die wiederbewaldet werden muss.

Die Verringerung ihres Stoffwechsels im Zuge langanhaltender Trockenperioden führt auch zu einem geringen Zuwachs der Bäume. Die Beobachtungen auf den Level-II-Flächen zeigen, dass es hierbei große Unterschiede zwischen den Baumarten gibt. Die Fichte leidet im Vergleich zu Buche, Eiche und Kiefer besonders unter Trockenheit, was sich durch eine besonders hohe Anzahl sehr schmaler Jahrringe bemerkbar macht. Vergleiche von Jahrringserien im Zeitraum von 1945 bis 2010 an Bäumen der Level-II-Flächen zeigen bei Fichten häufiger Jahre mit geringerem Holzzuwachs. Diese sogenannten negativen Weiserjahren stimmen mit sehr trockenen Jahren überein.

Permanent installierte Umfangmessbänder erlauben es, die Wachstumsrate von Bäumen mit hoher Auflösung zu erfassen und die Auswirkung der Witterung genau zu beziffern. Auswertungen von Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt in Baden-Württemberg vom Sommer 2015 bestätigen die höhere Trockenheitsanfälligkeit der Fichten: Sie stellten ihr Wachstum deutlich früher ein als Buchen und zeigten dadurch ein dreimal niedrigeres Dickenwachstum (Meining et al. 2015). Im Vergleich zu den feuchteren Vorjahren hatten die Fichten ein über 50 % geringeres Wachstum. Bei der Buche zeigte sich ein weniger eindeutiger Effekt. Das liegt nicht nur am tieferen Wurzelwerk, das eine längere Versorgung mit Wasser während Trockenperioden erlaubt. Vielmehr kann auch in feuchten Jahren eine Zusatzbelastung der Buchen aufgrund verstärkter Fruchtbildung auftreten, die sich negativ auf das Wachstum auswirkt.

Abbildung 34: Überregional positive und negative Weiserjahre für die vier Hauptbaumarten



Weiserjahre sind Jahre, in denen fast alle Bäume einer Population eine einheitliche Wachstumsreaktion zeigen. Diese Reaktion kann über eine größere Region auftreten und verschiedene Baumarten betreffen und wird meist von Großwetterlagen, wie zum Beispiel dem Jahrhundertssommer 1976, verursacht. Nehmen die Jahrringe gleichläufig ab, sind es negative Weiserjahre; bei besonders günstigen Wuchsbedingungen treten positive Weiserjahre auf.



Abbildung 35: Blick über Schorfheide, Brandenburg, mit starker Fruktifikation bei Linde und Buche

Manche Baumarten sind robuster gegenüber langanhaltender Trockenheit. Laubbäume wie Traubeneiche, Linde, Hainbuche, Spitzahorn sind besser angepasst als Nadelbäume wie etwa die Fichte. Dies hängt maßgeblich von Baumphysiologie und -anatomie ab. So beeinflussen u. a. Wurzeltiefe der Bäume, Nährstoffbedarf und der baumartenspezifische Aufbau des Holzes und der Blätter die Lebensfähigkeit der Bäume.

Jahre intensiver Fruchtbildung bei der Buche treten häufiger auf

Daten der Waldzustandserhebung (Level I) und der Level-II-Flächen zeigen, dass insbesondere die Buchen seit 1990 häufig und intensiv Früchte ausbilden. Jahre mit intensiver Fruchtbildung nennt man auch Mastjahre. In der Zeitreihe der Waldzustandserhebung zeigt sich, dass die Buchen in den letzten beiden Jahrzehnten z. T. jedes zweite Jahr intensiv fruktifizieren. Literaturrecherchen ergaben dagegen für den Zeitraum 1839–1987 Abstände zwischen zwei starken Buchenmasten für 20-Jahresintervalle zwischen 3,3 und 7,1 Jahren (Paar et al. 2011).

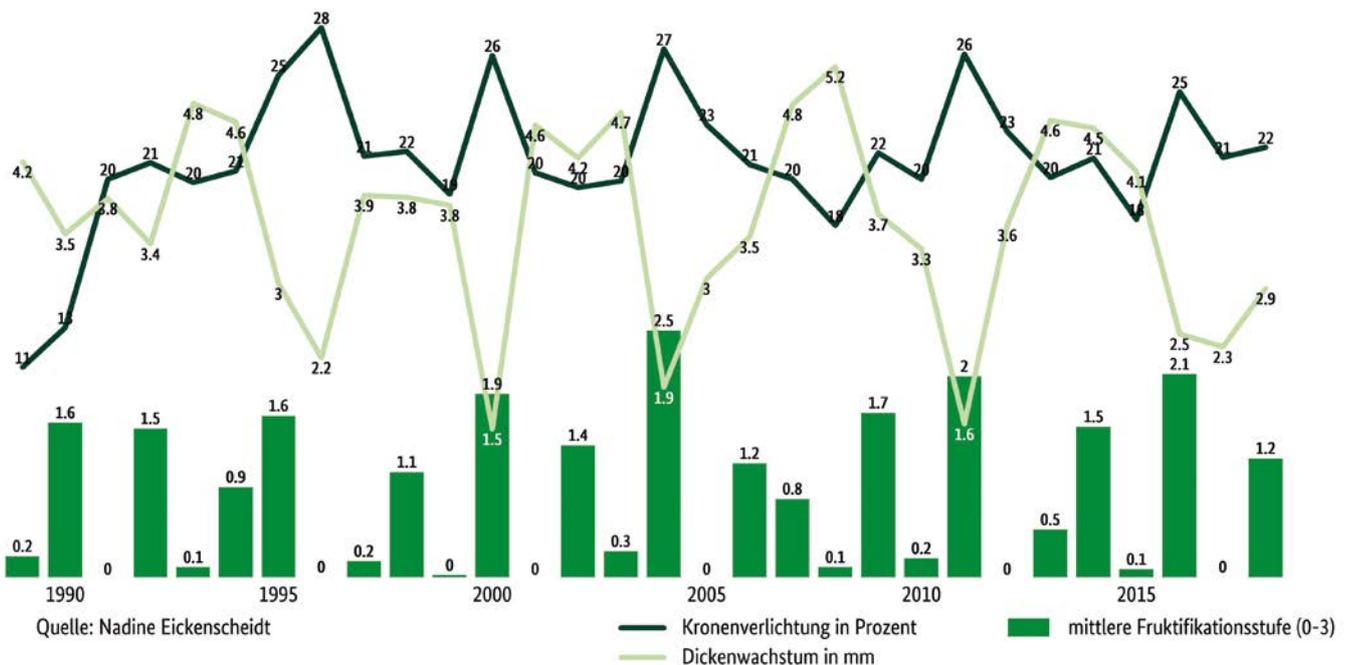
Bei der Buche werden Mastjahre durch die Witterungssituation im Vorjahr der Mast ausgelöst. Ist dann auch die

Witterung im Frühjahr günstig, d. h. die Blüten werden nicht durch Frost oder Trockenheit zerstört, können sich viele Früchte (Bucheckern) entwickeln. Folglich kann die Tendenz zu kürzeren Abständen intensiver Fruchtbildung durch den Temperaturanstieg als Folge des fortschreitenden Klimawandels, die erhöhten Stickstoffeinträge in die Wälder sowie höhere CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre erklärt werden.

Eine intensive Fruchtbildung wirkt sich auf den Kronenzustand der Buche aus. Zum einen ändert sich die Verzweigungsstruktur, wenn statt Triebknospen Blütenknospen gebildet werden, zum anderen ist die Samenproduktion mit einem hohen Verbrauch an Reservestoffen verbunden. In Mastjahren sind daher häufig kleinere Blätter und kürzere Triebe zu beobachten. In der Folge nimmt die Belaubungsdichte der Buchen im Mastjahr ab und auch der Holzzuwachs ist geringer als in Jahren ohne Fruchtbildung. Exemplarisch werden hier die Zusammenhänge für die Level-II-Fläche Haard in Nordrhein-Westfalen vorgestellt.

Abbildung 36: Mittlere Fruchtbildung, mittlere Kronenverlichtung und mittlerer Durchmesserzuwachs von Buchen auf der Level-II-Fläche Haard, NRW von 1989 bis 2018

Die Fruchtbildung (Fruktifikation) wird bei der Kronenzustandsansprache in Stufen von 0 (keine Fruktifikation) bis 3 (starke Fruktifikation) bewertet. In der Abbildung wird der Mittelwert aus diesen Stufen für die einzelnen Jahre gezeigt.



Besonders markant zeigt sich auf der Buchenfläche Haard, wie in den Jahren 2000, 2004 und 2011 mit der Intensität der Fruchtbildung die Kronenverlichtung ansteigt und der Durchmesserzuwachs abnimmt. Nach einem Mastjahr steigt der Durchmesserzuwachs bereits im Folgejahr wieder auf durchschnittliche Werte an, während sich die Erholung der Kronenverlichtung über mehrere Jahre hinzieht. Deutlich wird auch, dass eine Zunahme der Kronenverlichtung auch unabhängig von Mastjahren auftritt. Auf der Fläche Haard war für den Anstieg der Kronenverlichtung 1991 vor allem lang anhaltende Trockenheit ausschlaggebend, 1996 waren es Trockenheit, Kälte und Blattschäden.

Eine gute Samenproduktion ist für die Waldbewirtschaftung von großem Vorteil, denn die Bucheckern sind die Grundlage für das Gelingen von Naturverjüngungen. Außerdem kann der Samen für die Anzucht junger Buchen zur Begründung von Mischwäldern genutzt werden.



Abbildung 37: Buchenzweig mit Früchten

Die Wachstumsphase beginnt früher und endet später

Die Zeit des Jahres, in der Bäume wachsen, blühen und fruchten, hat sich in den letzten 20 Jahren verschoben. Vor allem Buche und Fichte treiben früher aus und die Wachstumsphase hat sich verlängert. Dies zeigen phänologische Beobachtungen auf den Level-II-Flächen. Diese Trends zeigen deutlich die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Bäume.

Gemittelt über die untersuchten Level-II-Flächen begann die Blättentfaltung bei der Buche am 24. April, wobei sie sich zwischen 1998 und 2016 um etwa zwei Wochen vom 1. Mai auf den 18. April verschoben hat. Regional gibt es jedoch große Unterschiede: Der früheste Austrieb wurde im Steigerwald (Bayern) dokumentiert. Hier trieb die Buche im Jahr 2007 schon am 27. März

aus. Der späteste Austrieb der Buche wurde im Jahr 1998 im Bayerischen Wald und in Esslingen bei Stuttgart am 26. Mai beobachtet.

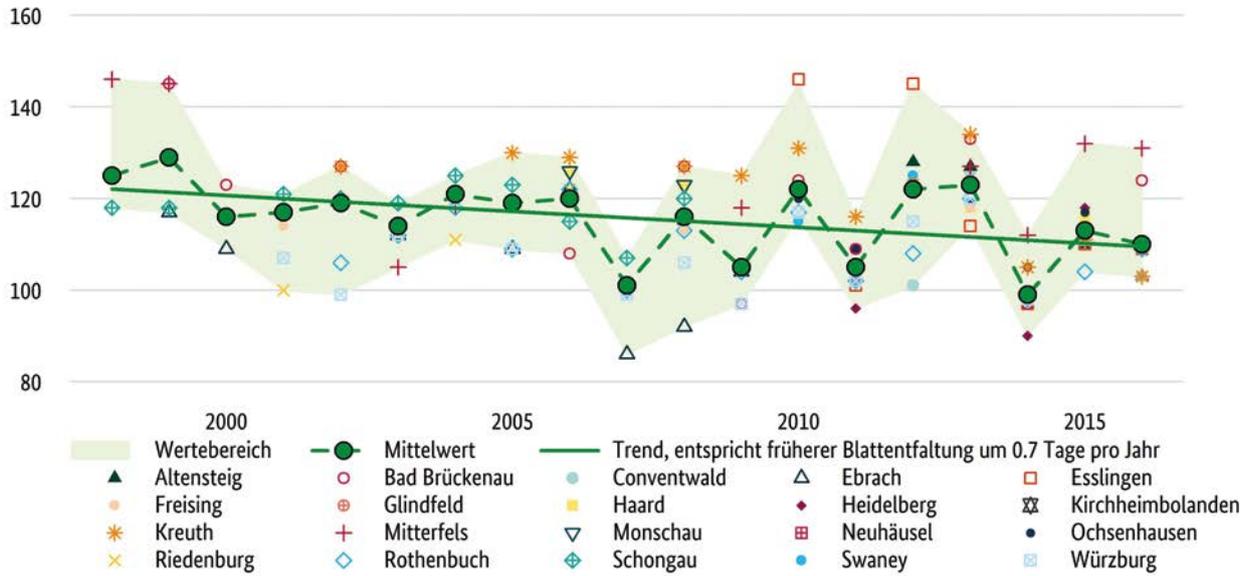
Bei der Fichte begann der Nadelaustrieb gemittelt über die untersuchten Level-II-Flächen am 8. Mai. Auch bei der Fichte war im Zeitraum zwischen 1998 bis 2016 eine Verschiebung des Nadelaustriebs um etwa 12 Tage vom 14. auf den 2. Mai zu beobachten. Der früheste Nadel-austrieb fand am 10. April auf einem Messstandort im Fichtelgebirge im Jahr 2017 und der späteste am 26. Juni auf einem Waldstandort im Allgäu im Jahr 1999 statt.

Eine Verlängerung der Vegetationsperiode sowie die Reduktion von Frosttagen können sich generell positiv auf das Baumwachstum und damit das Holzwachstum auswirken, solange die Wasserversorgung gesichert ist. Mit dem früheren Beginn der Wachstumsphase steigt jedoch auch das Risiko von Frostschäden und dem Erfrieren von jungen Trieben, wenn im Frühjahr auftretende Spätfröste in die verfrühte Wachstumsphase der Bäume fallen.

Abbildung 38: Beginn der Blattentfaltung bei Buche und Fichte

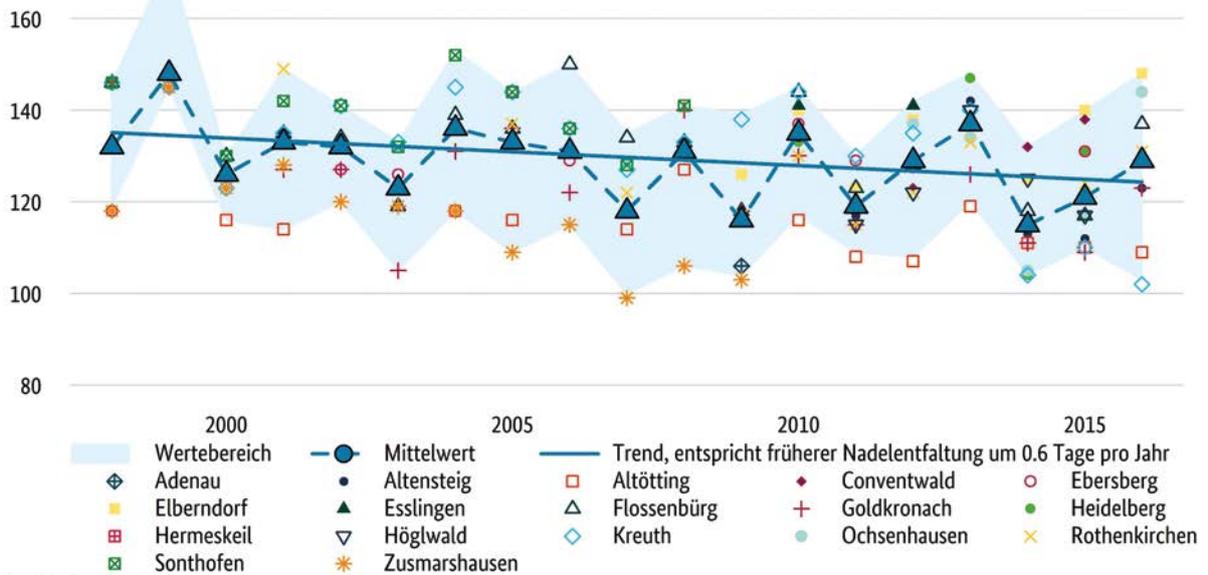
Buche

Tage des Jahres



Fichte

Tage des Jahres



Quelle: Stephan Raspe



Abbildung 39: Messeinrichtungen auf der Level II-Fläche Possen, Thüringen

Hohe Ozonkonzentrationen

Das Auftreten von hohen Ozonkonzentrationen an heißen Sommertagen belastet den Menschen. Ozon ist auch für die Vegetation ein toxischer Luftschadstoff, der Bäume schädigen kann. Während für Menschen vor allem hohe Spitzenwerte gefährlich sind, können für Pflanzen schon geringere, aber kontinuierliche erhöhte Ozonwerte problematisch werden. Die Belastung durch Ozon hängt wesentlich – jedoch nicht nur – von den Witterungsbedingungen ab. Mitentscheidend ist die Konzentration der Vorläuferstoffe, wie Stickstoffoxide (NO_x), flüchtige, organische Kohlenwasserstoffe (VOC) und Kohlenmonoxid (CO), aus denen Ozon (O_3) als sekundäre Luftverunreinigung entsteht.

Auf ausgewählten Level-II-Flächen werden die Konzentrationen des bodennahen Ozons während der Vegetationsperiode von April bis September ständig erfasst. In den letzten 10 Jahren betrug der gemessene Mittelwert von bodennahem Ozon 60,6 Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g m}^{-3}$). Die Mittelwerte können aber jährlich stark schwanken: 2015, ein besonders warmes und trockenes Jahr, zeigte den höchsten Mittelwert von 66,9 $\mu\text{g m}^{-3}$. Dagegen führte das niederschlagsreiche Jahr 2017 zu dem niedrigsten Mittelwert von 57,4 $\mu\text{g m}^{-3}$.

In den Sommermonaten Mai, Juni und Juli war die Luftkonzentration von Ozon wesentlich höher als im Rest des Jahres. Dieser Zeitraum entspricht der Hauptwachstumsperiode der Waldbäume. In trockenen Perioden tendieren Bäume jedoch dazu, ihre Spaltöffnungen für den Luftaustausch in den Blättern geschlossen zu halten, um zu starker Verdunstung vorzubeugen. Dadurch wird auch die Aufnahme von Ozon reduziert, das Risiko für Ozonschäden sinkt. So wurde für Level-II-Flächen in Baden-Württemberg beschrieben, dass an Blättern älterer Bäume eher Ozonschäden feststellbar sind als den Blättern jüngerer Bäume. Dies wird auf die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit für die Bäume zurückgeführt: Da jüngere Bäume einen kleineren Wurzelraum haben, wird vermutet, dass sie bei trockenen Bedingungen früher ihre Spaltöffnungen schließen (Meining et al. 2017).

Von den Waldbäumen ist die Baumart Buche gegenüber Ozon generell besonders empfindlich – die meisten im Level-II-Netz übermittelten Blattschäden traten bei dieser Baumart auf.

Die negative Wirkung von Ozon auf Blätter ist hinlänglich bewiesen – Ozon führt zu einer Verringerung der Kohlenstoffbindung. Inwieweit Ozon sich auch auf Vitalität und Wachstum der Bäume auswirkt, ist derzeit noch Forschungsobjekt. Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren ist ein direkter Zusammenhang zwischen Ozonbelastung und Baumwachstum nur schwer darzustellen (Cailleret et al. 2018; Gottardini et al. 2018).

Grundlagen für die Broschüre

Publikationen

Sanders, T. et al. (in prep). 30 Jahre intensives forstliches Monitoring in Deutschland. Thünen Report.

Cailleret, M., Ferretti, M., Gessler, A., Rigling, A., Schaub, M. (2018). Ozone effects on European forest growth – Towards an integrative approach. *Journal of Ecology*, 106(4), 1377–1389.

Cools, N., De Vos, B. (2011). Availability and evaluation of European forest soil monitoring data in the study on the effects of air pollution on forests. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 4, 205. <https://doi.org/10.3832/ijfor0588-004>

Dirnböck, T., Grandin, U., Bernhardt-Römermann, M., Beudert, B., Canullo, R., Forsius, M., Grabner, M.-T., Holmberg, M., Kleemola, S., Lundin, L., Mirtl, M., Neumann, M., Pompei, E., Salemaa, M., Starlinger, F., Staszewski, T., Uziębło, A. K., (2014). Forest floor vegetation response to nitrogen deposition in Europe. *Glob Change Biol* 20, 429–440. <https://doi.org/10.1111/gcb.12440>

DWD, Pressemitteilung 20.12.2018. Erste Bilanz des Deutschen Wetterdienstes zum Jahr 2018 in Deutschland. www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181220_jahr2018_rekord_news.html

DWD (2017). Nationaler Klimareport. 3. korrigierte Auflage, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, S. 14., 20, 21, 22.

Gottardini, E., Cristofolini, F., Cristofori, A., Ferretti, M. (2018). In search for evidence: combining ad hoc survey, monitoring, and modeling to estimate the potential and actual impact of ground level ozone on forests in Trentino (Northern Italy). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8206–8216.

Küster, H. (2008). *Geschichte des Waldes*. C.H. Beck, S. 229.

Johnson, J., Pannatier, E.G., Carnicelli, S., Cecchini, G., Clarke, N., Cools, N., Hansen, K., Meesenburg, H., Nieminen, T. M., Pihl-Karlsson, G., Titeux, H., Vanguelova, E., Verstraeten, A., Vesterdal, L., Waldner, P., Jonard, M. (2018). The response of soil solution chemistry in European forests to decreasing acid deposition. *Global Change Biology*. <https://doi.org/10.1111/gcb.14156>

Jonard M., Fürst A., Verstraeten A., Thimonier A., Timmermann V., Potočić N., Waldner P., Benham S., Hansen K., Merilä P., Ponette Q., de la Cruz A., Roskams P., Nicolas M., Croisé L., Ingerslev M., Matteucci G., Decinti B., Bascietto M., Rautio P. (2014). Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Glob Chang Biol*. 418-30. <https://doi.org/10.1111/gcb.12657>

Meesenburg, H., B. Ahrends, S. Fleck, et al. (2016). Long-Term Changes of ecosystem services at Solling, Germany: Recovery from acidification, but increasing nitrogen saturation? *Ecological Indicators* 65: 103–112.

Meining, S., Wilpert, K. v., Hölscher, A., Augustin, N., Hallsworth, C., Schumacher, J., John, R., Bublitz, T., Metzler, B., Delb, H., Enderle, R., Kändler, G. (2015). *Waldzustandsbericht 2015*. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 62 Seiten.

Meining, S., Puhlmann, H., Augustin, N., Delb, H., John, R., Metler, B., Kohnle, U. (2017). *Waldzustandsbericht 2017*. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 44 Seiten.

Mellert, K. H., Göttlein, A. (2012). Comparison of new foliar nutrient thresholds derived from van den Burg's literature compilation with established central European references. *European Journal of Forest Research*, 131(5), 1461–1472.

Mühlhaus, B. (1985). Sondermeßprogramm Wald. Konzept, Kosten, Entwicklungstendenzen. *AFZ* 25/26, 656-658.

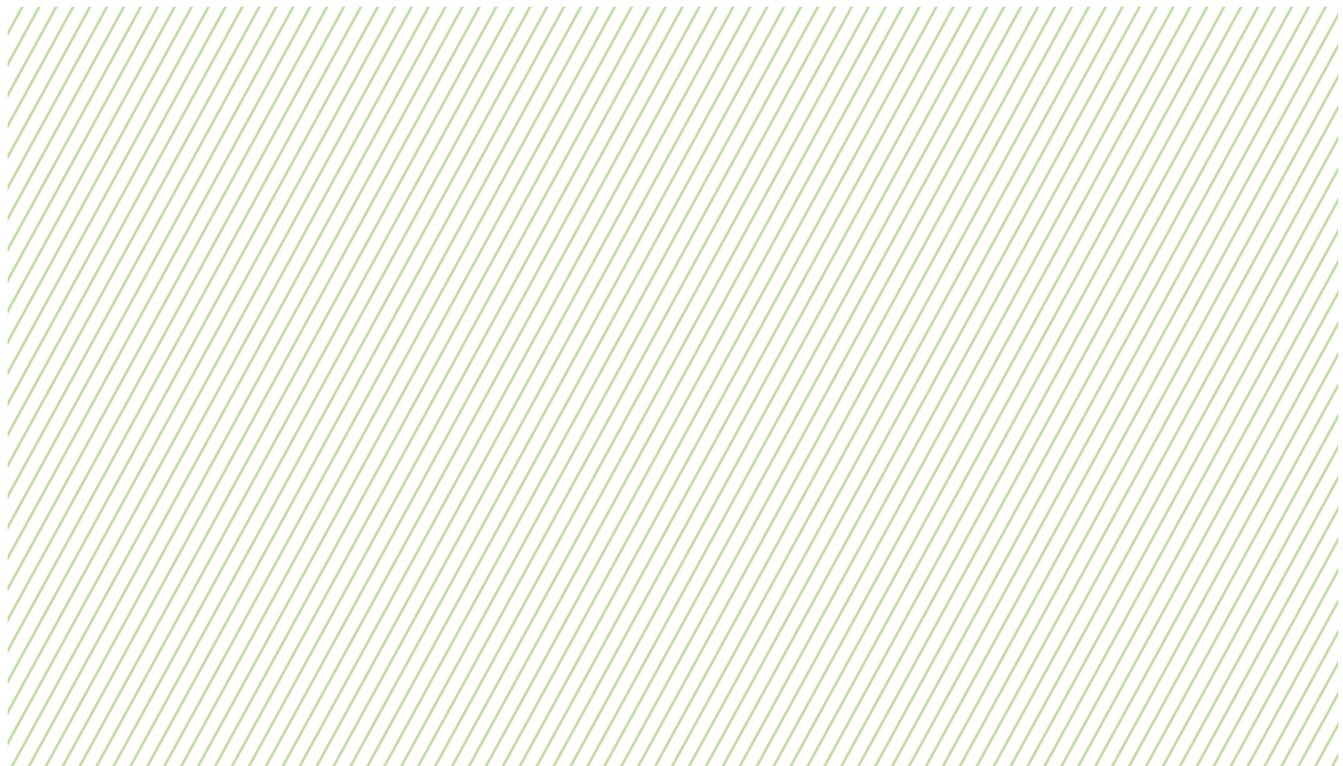
Paar U., Guckland A., Dammann I., Albrecht M., Eichhorn J. (2011): Häufigkeit und Intensität der Fruktifikation der Buche. *AFZ-DerWald*, 6, 26–29.

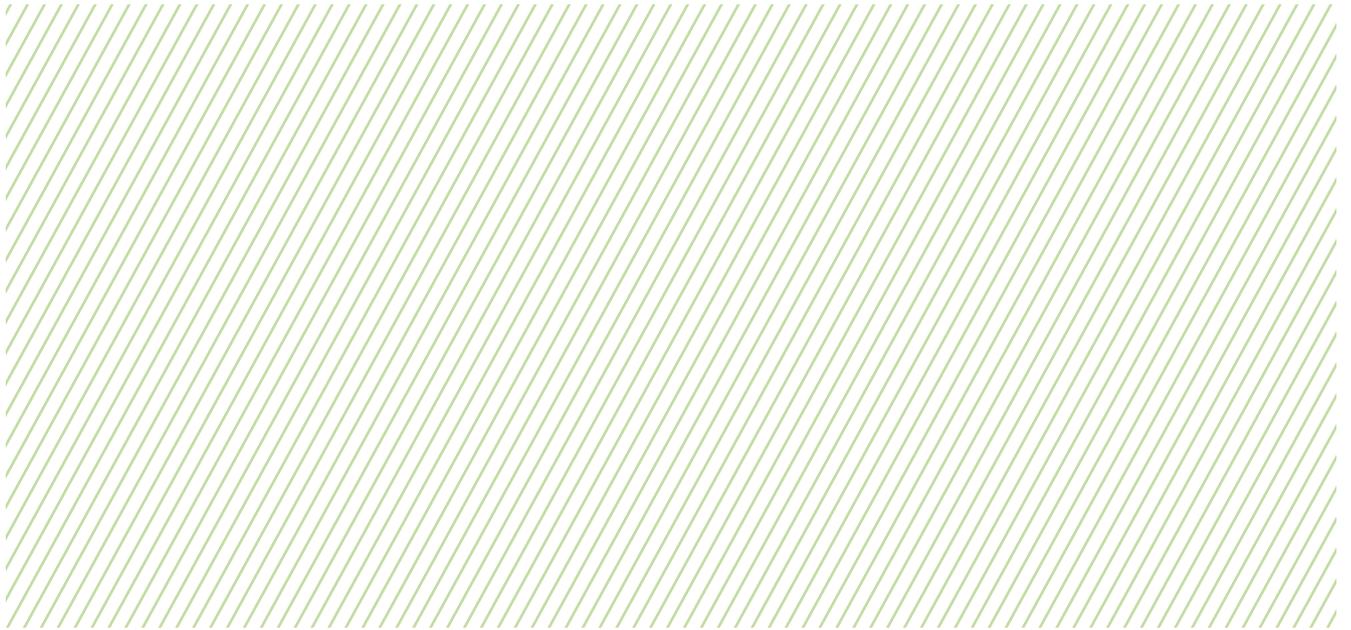
SRU (2015) (Hrsg.). Sondergutachten Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sachverständigenrat für Umweltfragen.

van Dobben, H. F., De Vries, W. (2017). The contribution of nitrogen deposition to the eutrophication signal in understorey plant communities of European forests. *Ecol Evol* 7, 14–227. <https://doi.org/10.1002/ece3.2485>

Internet

<https://blumwald.thuenen.de/level-ii/projekte/>





Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	<i>Streufallmessung (rechteckige Behälter), Depositionsmessung und Umfangmessbänder auf der Level-II-Fläche Fläche Merzalben, Rheinland-Pfalz</i>	7
Abbildung 2:	<i>Level-I-Erhebungsnetz (16 km x 16 km) in Deutschland</i>	9
Abbildung 3:	<i>Flächen des intensiven forstlichen Umweltmonitorings in Deutschland</i>	10
Abbildung 4:	<i>Level-I-Flächen und Level-II-Flächen in Europa</i>	11
Abbildung 5:	<i>Messstation Solling, Niedersachsen</i>	13
Abbildung 6:	<i>Schematische Darstellung des Eintrags von Luftschadstoffen in Wälder</i>	14
Abbildung 7:	<i>Die räumliche Varianz in der Blattentfaltung und -verfärbung lässt sich durch den Einsatz von Drohnen erfassen.</i>	15
Abbildung 8:	<i>Eingefahrener, mit Messgeräten bestückter Mast auf der Level-II-Fläche Kienhorst, Brandenburg</i>	15
Abbildung 9:	<i>Depositionssammler auf der Level-II-Fläche Fischbach, Saarland</i>	17
Abbildung 10:	<i>Stammabflussmessungen auf der Level-II-Fläche Sandhof, Mecklenburg-Vorpommern</i>	18
Abbildung 11:	<i>Depositionsrate von Sulfatschwefel im Zeitraum von 2012 bis 2016</i>	19
Abbildung 12:	<i>Anstieg des pH-Werts und Reduktion der Sulfatschwefeleinträge und im Freilandniederschlag seit 1996</i>	20

Abbildung 13:	<i>Reduktion der Ammonium- und Nitrateinträge mit dem Freilandniederschlag seit 1996</i>	20
Abbildung 14:	<i>Jährliche Änderung von Sulfat, Aluminium, und pH-Wert in der Bodenlösung im Ober- und Unterboden von Level-II-Flächen sortiert nach dem pH-Wert der Bodenlösung</i>	22/23
Abbildung 15:	<i>Zeitliche Veränderungen des Tiefenverlaufs der Basensättigung am Beispiel der Level-II-Fläche Solling Fichte, Niedersachsen</i>	24
Abbildung 16:	<i>Bodenprofil der Level-II-Fläche Solling, Niedersachsen</i>	24
Abbildung 17:	<i>Änderung des Schwefelgehalts in Nadeln und Blättern der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Kiefer und Fichte</i>	25
Abbildung 18:	<i>Freifläche Level-II-Messstation Laußnitz, Sachsen</i>	27
Abbildung 19:	<i>Depositionsraten von anorganischem Stickstoff (NH₄-N, NO₃-N und deren Summe) im Bestandesniederschlag im Zeitraum 2012–2016</i>	28
Abbildung 20:	<i>Häufigkeit der Überschreitung des Grenzwerts für Nitrat nach Trinkwasserverordnung (11,3 mg NO₃-N l⁻¹) im Zeitraum 2011–2015</i>	29
Abbildung 21:	<i>Bewertung der Stickstoff- und Phosphorernährung auf den Level-II-Flächen für drei Zeiträume</i>	30/31
Abbildung 22:	<i>Ernährungsbewertung nach Mellert und Göttlein (2012)</i>	32
Abbildung 23:	<i>Ein Baumkletterer nimmt Nadelproben</i>	32
Abbildung 24:	<i>Brombeeren (Rubus spec.) gehören zu den Zeigerpflanzen für Stickstoff im Wald</i>	33
Abbildung 25:	<i>Aufnahmeraster für Vegetationsaufnahmen auf der Level-II-Fläche Laußnitz, Sachsen</i>	33
Abbildung 26:	<i>Änderung der mittleren Jahresmitteltemperatur zwischen den Zeiträumen 1961–1990 und 1985–2014 auf den Level-II-Flächen</i>	35
Abbildung 27:	<i>Änderung der mittleren Temperaturen zwischen den Zeiträumen 1961–1990 und 1985–2014 für das Gesamtjahr und die vier Jahreszeiten (Mittel aller Level-II-Flächen).</i>	36
Abbildung 28:	<i>Änderung der mittleren Jahresniederschlagssumme zwischen den Zeiträumen 1961–1990 und 1985–2014 auf den Level-II-Flächen</i>	36
Abbildung 29:	<i>Änderung der mittleren Niederschlagssummen aller Level-II-Flächen zwischen den Zeiträumen 1961–1990 und 1985–2014 im Jahr und den Jahreszeiten</i>	37
Abbildung 30:	<i>Klimamessturm auf der Level-II-Fläche Conventwald, Baden-Württemberg</i>	37
Abbildung 31:	<i>Waldbrände können bei trockenen Bedingungen bereits im April entstehen</i>	37
Abbildung 32:	<i>Larve des Blauen Kiefernprachtkäfers</i>	38

Abbildung 33:	<i>Befall von Fichten durch Borkenkäfer</i>	38
Abbildung 34:	<i>Überregional positive und negative Weiserjahre für die vier Hauptbaumarten</i>	40
Abbildung 35:	<i>Blick über Schorfheide, Brandenburg mit starker Fruktifikation bei Linde und Buche</i>	41
Abbildung 36:	<i>Mittlere Fruchtbildung, mittlere Kronenverlichtung und mittlerer Durchmesserzuwachs von Buchen auf der Level-II-Fläche Haard, NRW von 1989 bis 2018</i>	42
Abbildung 37:	<i>Buchenzweig mit Früchten</i>	43
Abbildung 38:	<i>Beginn der Blattentfaltung bei Buche und Fichte</i>	44
Abbildung 39:	<i>Messeinrichtungen auf der Level-II-Fläche Possen, Thüringen</i>	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	<i>Messgrößen des intensiven forstlichen Umweltmonitorings</i>	12
-------------------	--	----

HERAUSGEBER

Bundesministerium für Ernährung und
Landwirtschaft (BMEL), Referat 515
Rochusstraße 1, 53123 Bonn

STAND

Januar 2020

BEARBEITUNG

Dr. Inken Krüger, Dr. Tanja Sanders, Marieanna Holzhausen,
Dr. Tobias Schad, Andreas Schmitz (Thünen-Institut für
Waldökosysteme), Sigrid Strich (BMEL, Referat 515)

Mit Beiträgen von:

Dr. Henning Andrae (Staatsbetrieb Sachsenforst), Dr. Nadine
Eickenscheidt (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
NRW), Inge Dammann und Dr. Henning Meesenburg
(Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt), Hans-Peter Dietrich
und Dr. Stephan Raspe (Bayerische Landesanstalt für Wald und
Forstwirtschaft), Martin Haßdenteufel (Landesamt für Umwelt-
und Arbeitsschutz), Andrea Hölscher (Forstliche Versuchs- und
Forschungsanstalt Baden-Württemberg), Dr. Alexander Russ
(Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde), Hans-Werner Schröck
(Landesforsten Rheinland-Pfalz)

KONZEPTION UND TEXTENTWURF

Ursula Schmidt, Berlin

GESTALTUNG

design idee, büro für gestaltung, Erfurt

DRUCK

BMEL

BILDNACHWEIS

Titelseite: Rainer Fuhrmann/StockAdobe.com, Seite 3:
BMEL/Torsten Silz/photothek.net, Seite 7: Hans Werner Schröck,
Landesforsten RLP, Seite 9–11: Thünen-Institut, Seite 13:
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Seite 14: design
idee, büro für gestaltung, Seite 15: Thünen-Institut, Stuart Krause,
Seite 15: LFB, Alexander Russ, Seite 17: Thünen-Institut, Inken
Krüger, Seite 18: Landesforst, MV, Seite 19: Thünen-Institut, Seite 20:
Thünen-Institut, Seite 20: Thünen-Institut, Seite 22/23: Thünen-
Institut, Seite 24: Thünen-Institut nach Daten der Nordwestdeutschen
Forstlichen Versuchsanstalt, Seite 24: Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt, Seite 25: Thünen-Institut, Seite 27: Raphael Benning
(2015), Seite 28–31: Thünen-Institut, Seite 32: Thünen-Institut nach
Mellert und Göttlein (2012), Seite 32: Christoph Ziegler (ehem. LANUV
NRW), Seite 33: Raphael Benning (2015), Seite 33: Thünen-Institut,
Andreas Schmitz, Seite 35: Thünen-Institut, Seite 36: Thünen-Institut,
Seite 36: Thünen-Institut, Seite 37: Andrea Hölscher, FVA Freiburg,
Seite 38: Hannes Lemme, LWF, Seite 38: Inken Krüger, Thünen-Institut,
Seite 40: design-idee, Erfurt, Seite 41: Thünen-Institut, Stuart Krause,
Seite 42: Thünen-Institut nach Daten des LANUV NRW, Seite 43:
NWFVA, Abteilung Umweltkontrolle, Seite 44: Thünen-Institut nach
Daten der LWF, Seite 45: FFK Gotha

**Diese Publikation wird vom BMEL unentgeltlich
abgegeben. Sie darf nicht im Rahmen
von Wahlwerbung politischer Parteien oder
Gruppen eingesetzt werden.**

Weitere Informationen unter

www.bmel.de

[@bmel](https://twitter.com/bmel)

[Lebensministerium](https://www.facebook.com/Lebensministerium)

