



Waldzustandsbericht 2016



Vorwort



Liebe Leserinnen, liebe Leser,

ich freue mich über Ihr Interesse am Gesundheitszustand unseres hessischen Waldes. Hessen ist mit einem Flächenanteil von mehr als 42 Prozent ein walddreiches Land und hat besonders viele naturnahe Laub- und Mischwälder. Der Wald ist in seiner Vielfalt für uns sehr wertvoll: Er ist ein Ort der Erholung, er leistet einen Beitrag zum Klimaschutz, ist Lebensraum für eine artenreiche Tier- und Pflanzenwelt und ist umweltfreundlicher Rohstofflieferant. Daraus resultiert eine besondere Verantwortung zum Erhalt unseres Waldes.

Ausgelöst durch die Waldschadensdiskussion der Achtziger Jahre wurde vor mehr als 30 Jahren auf europäischer Ebene ein forstliches Umweltmonitoring eingeführt. Im Rahmen dieses Monitorings werden jährlich Daten von rund 4.000 Bäumen in Hessen erhoben. Diese liefern uns einen Überblick über den aktuellen Gesundheitszustand der heimischen Wälder und lassen die vielfältigen Einflüsse wie Witterungsverlauf, Stoffeinträge, Insekten- und Pilzbefall erkennbar werden, die den Zustand des Waldes im Jahresverlauf beeinflussen.

Seit mehr als 15 Jahren schwankt der erfasste mittlere Nadel- und Blattverlust in Hessen zwischen 20 und 26 Prozent. In diesem Jahr liegt er über alle Baumarten und Altersstufen hinweg bei 25 Prozent (2015: 21 Prozent) und damit im oberen Bereich. Der zuletzt eher positive Trend hat sich somit, wie von den Experten bereits erwartet, leider nicht fortgesetzt.

Das Jahr 2015 war deutschlandweit das zweitwärmste seit 1881. In Hessen lag das Niederschlagsdefizit im vergangenen Jahr bei rund 23 Prozent, hinzu kam in Südhessen eine ausgeprägte Sommerdürre: Diese außergewöhnlichen Witterungsereignisse blieben nicht ohne Folgen. Die Extreme stressten die Bäume insbesondere auf weniger gut wasserversorgten Standorten im Jahresverlauf deutlich und begünstigten die Entwicklung der Fichtenborkenkäfer. Zudem wurde die Grundlage für eine intensive Buchenblüte gelegt.

Erfreulicherweise brachte die erste Jahreshälfte 2016 landesweit betrachtet ausreichende Niederschläge bei insgesamt noch moderaten Temperaturen. Die Sommermonate Juli und August waren dann deutlich zu trocken.

Aufgrund der hohen und sehr verstreuten Ausgangspopulation kam es im Verlauf des Jahres zu einer erheblichen Zunahme von Borkenkäferschäden an der Fichte. Die besonders starke Fruktifikation der Buchenwälder im Jahr 2016 führte zu einer deutlichen Zunahme des Blattverlustes der älteren Buchen auf 37 Prozent (2015: 29 Prozent). Das hat das hessische Gesamtergebnis maßgeblich beeinflusst. Der Anteil mittel bis stark fruktifizierender Buchen in der Altersstufe über 60 Jahre liegt in diesem Jahr bei 83 Prozent (2015: 0 Prozent). Die Kronenverlichtung älterer Eichen und Kiefern ist dagegen weitestgehend stabil geblieben.

Die Auswirkungen des letzten Trockenjahres 2003 waren über mehrere Jahre spürbar, die weiteren Folgewirkungen des Jahres 2015 bleiben abzuwarten. Die langjährigen Messreihen des forstlichen Umweltmonitorings belegen allerdings auch, dass sich die artenreichen und naturnahen Wälder Hessens als stabiles Ökosystem erwiesen haben.

Zusammen mit den Ergebnissen der Waldzustandserhebung enthält diese Broschüre weitere aktuelle Informationen zur Witterung, zum Insekten- und Pilzbefall sowie neue Forschungsergebnisse zum Trockenstress in Wäldern und zu Entwicklungen in den hessischen Waldböden.

Die Veränderungen unserer Umwelt durch die globale Erwärmung und die Belastungen unserer Atmosphäre mit Schadstoffen erfordern unser zielgerichtetes, langfristiges und konsequentes Handeln – auch zum künftigen Erhalt des hessischen Waldes und seiner vielfältigen Leistungen. Folgerichtig wird der Wald auch im Rahmen des Integrierten Klimaschutzplanes Hessen 2025 eine wichtige Rolle spielen. Einerseits gilt es, die heimischen Wälder durch den erforderlichen Wissenstransfer sowie Beratung und Förderung der Waldbesitzer möglichst flächendeckend noch klimastabiler zu gestalten. Zum anderen sind die Möglichkeiten zur Speicherung von Kohlenstoff im Wald und in langlebigen Holzprodukten zu nutzen.

Ich bin überzeugt, dass wir mit den aktuellen und geplanten Initiativen unserer Umweltpolitik, die den Bürgerinnen und Bürgern, Unternehmen und Kommunen in vielfältigen Bereichen Möglichkeiten für einen Beitrag zum Klimaschutz eröffnen, auf dem richtigen Weg sind.

Machen Sie mit!

Mit freundlichen Grüßen

Ihre

Priska Hinz

Hessische Ministerin für Umwelt, Klimaschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Wiesbaden, im November 2016



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	2
Inhaltsverzeichnis	3
Hauptergebnisse	4
Uwe Paar und Inge Dammann	
WZE-Ergebnisse für alle Baumarten	6
Uwe Paar und Inge Dammann	
Buche	8
Eiche	9
Fichte	10
Kiefer	11
Wald in der Rhein-Main-Ebene	12
Uwe Paar, Inge Dammann und Martin Rohde	
Witterung und Klima	13
Johannes Suttmöller	
Bodenwasserhaushalt und Trockenstress	17
Paul Schmidt-Walter, Bernd Ahrends und Henning Meesenburg	
Insekten und Pilze	20
Ulrich Bressemer, Michael Habermann, Rainer Hurling, Andreas Rommerskirchen, Gitta Langer und Pavel Plašil	
Forstliches Umweltmonitoring	22
Johannes Eichhorn, Uwe Paar, Jan Evers, Andreas Schulze, Jörg Weymar, Henning Meesenburg, Michael Spielmann und Inge Dammann	
Stoffeinträge	25
Birte Scheler	
Hauptergebnisse der Waldbodenzustandserhebung in Hessen (BZE II)	27
Jan Evers, Uwe Paar, Inge Dammann, Egbert Schönfelder, Marcus Schmidt und Johannes Eichhorn	
Die Substratgruppe Buntsandstein	30
Jan Evers, Uwe Paar und Inge Dammann	
Schwermetallbelastung der Wälder	34
Nils König, Heike Fortmann, Uwe Klinck, Birte Scheler und Markus Wagner	
Literaturverzeichnis	39
Impressum	40

Hauptergebnisse

Waldzustandserhebung

Nach der Verbesserung des Kronenzustandes im hessischen Wald im Vorjahr hat sich die mittlere Kronenverlichtung in 2016 um 4 %-Punkte erhöht. Sie liegt in diesem Jahr bei 25 %.

Die Verlichtung der Kronen bei den älteren Bäumen ist von 25 % (2015) auf 30 % angestiegen. Bei den jüngeren Bäumen hat sie von 7 % (2015) auf 12 % zugenommen.

Die Gesamtentwicklung (alle Baumarten, alle Alter) seit 1984 zeigt folgendes Bild: Nach einer Phase des Anstiegs der Kronenverlichtung im Zeitraum bis 1994 folgte eine relativ stabile Phase von 1995-1999. Seit 2000 sind stärkere Schwankungen der mittleren Kronenverlichtung zwischen 20 und 26 % festzustellen.

Die Baumarten im Einzelnen

Im Vergleich zum Vorjahr hat sich der Kronenzustand der älteren Buche in 2016 um 8 %-Punkte verschlechtert (2015: 29 %; 2016: 37 %). Dieses Ergebnis steht vor allem im Zusammenhang mit der Fruchtbildung der Buche. Nach dem Ausbleiben der Fruktifikation der älteren Buchen im Vorjahr fruktifizierten in 2016 83 % der Buchen mittel bis stark.

Die Kronenverlichtung der älteren Eiche in 2016 hat sich gegenüber dem Vorjahr kaum verändert (2015: 20 %, 2016: 19 %). Dies gilt auch für die Kiefer (2015: 21 %, 2016: 23 %).

Bei der älteren Fichte hat sich die mittlere Kronenverlichtung von 26 % im Vorjahr auf 31 % erhöht. Trockenstress und eine ansteigende Borkenkäferpopulation haben dieses Ergebnis beeinflusst.

Die jährliche Absterberate (alle Bäume, alle Alter) ist von 0,1 % in 2014/2015 auf 0,5 % angestiegen. Erhöhte Absterberaten waren bereits in den zurückliegenden Jahrzehnten jeweils nach starken Sturmwürfen sowie nach extremen Trockenjahren festzustellen. Die diesjährige Absterberate liegt damit über dem langjährigen Mittel der Jahre 1984-2016 von 0,3 %.

Rhein-Main-Ebene

Im Vergleich zum Vorjahr hat sich in der Rhein-Main-Ebene der Kronenzustand der älteren Bäume geringfügig verschlechtert (2015: 27 %, 2016: 29 %). Leicht verbessert hat sich dagegen der Kronenzustand der jüngeren Bäume. Insbesondere die jüngeren Bäume zeigen aber im gesamten Beobachtungszeitraum in der Rhein-Main-Ebene einen schlechteren Kronenzustand als in Gesamthessen.

Die nach wie vor ungünstige Situation des Waldzustandes in der Rhein-Main-Ebene zeigt sich auch am Beispiel der Eiche: Bei nahezu gleichem Ausgangsniveau zu Beginn der Zeitreihe hat sich die Kronenverlichtung der älteren Eiche in der Region von 15 % (1984) auf 32 % (2016) erhöht, im Land Hessen dagegen von 13 % auf 19 %.

Witterung und Klima

Das Vegetationsjahr 2015/2016 (Oktober-September) ist mit einer Mitteltemperatur von 10,1 °C ebenso wie 2014 und 2007 eines der wärmsten Jahre seit Messbeginn. Die Temperaturabweichung betrug landesweit knapp +2,0 °C. In acht von 12 Monaten war es in Hessen zu trocken, allerdings konnten sehr hohe Niederschlagsmengen im November

2015 sowie im Februar und Juni 2016 das Niederschlagsdefizit vermindern, so dass im Vegetationsjahr 2015/2016 die Niederschlagsmenge rund 92 % des langjährigen Mittelwertes erreichte. Im Gegensatz zum Vorjahr war es in der Vegetationsperiode 2016 mit einem Niederschlagsdefizit von bis zu 30 % im Norden des Landes deutlich zu trocken, während in der Rhein-Main-Ebene nur ein geringes Defizit gemessen wurde.

Bodenwasserhaushalt und Trockenstress

Mit dem Klimawandel ändert sich die Wasserverfügbarkeit für die Waldbestände. Anhand von Wasserhaushaltssimulationen auf dem Netz der Bodenzustandserhebung (BZE) lässt sich zeigen, wie sich verschiedene Parameter des Bodenwasserhaushalts und zum Trockenstress an den Waldstandorten ausprägen. Beispielsweise haben die Phasen der Bodenaustrocknung seit Anfang der 1990er Jahre zugenommen. Die Variabilität zwischen den BZE-Punkten hat gleichzeitig abgenommen, d. h. auch auf in der Vergangenheit besser wasserversorgten Standorten tritt vermehrt Trockenstress auf. Im Rahmen einer klimasensitiven Forstwirtschaft unterstützen Informationen zur Dynamik der Wasserverfügbarkeit die Planung und Bewirtschaftung der Wälder.

Insekten und Pilze

Der Witterungsverlauf 2015/2016 hat die Entstehung und Entwicklung von Schäden durch Pilze begünstigt. Hierzu gehören das *Diplodia*-Triebsterben der Kiefer sowie Hallimasch und Wurzelschwamm an verschiedenen Baumarten. Darüber hinaus ist das Eschentriebsterben auf großer Fläche präsent. In Teilbereichen gab es in Fichtenbeständen zahlreiche Befallsherde durch Borkenkäfer. Bei der Eiche hingegen sind Schäden durch die Eichenfraßgesellschaft landesweit nur in geringem Ausmaß aufgetreten.



Foto: H. Heinemann

Hauptergebnisse

Stoffeinträge

Die Messergebnisse des Intensiven Monitorings bestätigen die Wirksamkeit der ergriffenen Luftreinhaltemaßnahmen zur Reduktion von Schwefelemissionen. Die ehemals sehr hohen Schwefeinträge in die Wälder haben im Vergleich zu den frühen 1980er Jahren um rund 90 % abgenommen. 2015 sind die Eintragsraten weiter gesunken und betragen pro Hektar zwischen 2,0 kg (Buche: Krofdorf, Hess. Ried) und 4,5 kg (Fichte: Königstein, Fürth).

Während der Eintrag von Nitratstickstoff auf allen Monitoringflächen zurückgegangen ist, trifft dies beim Ammoniumstickstoff nur für fünf der elf Flächen zu. Ammonium ist heute relativ betrachtet auf sieben von elf untersuchten hessischen Flächen der bedeutendste Säurebildner im Waldboden. Trotz des Rückgangs übersteigt der Stickstoffeintrag weiter den geringen Bedarf der Wälder für ihr Wachstum und trägt u. a. zur Bodenversauerung bei.

Bodenzustandserhebung im Wald (BZE)

Die Ergebnisse der bodenchemischen Analysen der BZE I und II belegen die Wirkungen der Bodenschutzkalkungen auf den Waldboden. Dies zeigt der Vergleich ungekalkter und gekalkter BZE-Punkte der Substratgruppen Buntsandstein, Grauwacke, Tonschiefer, Quarzit etc. (empfohlene Kalkungsstandorte/Kalkungskulisse) und damit insgesamt von Böden aus saurem Ausgangsgestein, die vor allem im Hauptwurzelraum stark versauert sind. Die Waldböden dieser Gruppe sind zum Zeitpunkt der BZE II weiter versauert. Gekalkte Böden dieser Gruppe zeigen dagegen eine deutliche und signifikante Verbesserung der Basensättigung bis in 10 cm Bodentiefe. Die Bodenschutzkalkung hat demnach einen langfristig positiven Einfluss auf den chemischen Bodenzustand und auf die Sicherung und Erhaltung des Nähr-

stoffhaushalts. Hessische Waldböden stellen eine wichtige Kohlenstoffsenke dar. Die mit durchschnittlich über 80 t je Hektar gespeicherten Kohlenstoffvorräte in Hessens Waldböden zeugen von dieser langfristigen Nettospeicherung. Im Zeitraum 1992 (BZE I) bis 2007 (BZE II) haben die Kohlenstoffvorräte in hessischen Waldböden insgesamt moderat um 6 % zugenommen.

Substratgruppe Buntsandstein

Der Buntsandstein ist die am häufigsten vorkommende Substratgruppe in Hessen (knapp 30 %). In der Regel findet man an den Buntsandstein-Standorten bis zu 70 cm mächtige lehmige, schluffige, sandige Decken (Löss-Lehmdecken) über dem Silikatgestein. Als Bodentypen sind Braunerden (38 %), Podsol-Braunerden (13 %) und Pseudogley-Braunerden (13 %) vorherrschend. Als natürliche Waldgesellschaften finden sich auf diesen Standorten typische Hainsimsen-Buchenwälder und deren Subtypen. Zum Zeitpunkt der BZE II ergeben sich für den Buntsandstein in Hessen knapp 20 % durchschnittliche Basensättigung, was eine geringe Basenversorgung anzeigt.

Schwermetallbelastung der Wälder

Im Intensiven Monitoring werden seit über 30 Jahren auch Untersuchungen zur Schwermetallbelastung durchgeführt. Zu den – aufgrund ihrer toxischen Wirkung – wichtigsten Schwermetallen gehören Blei und Cadmium. Beide werden fast ausschließlich durch Stäube in die Wälder eingetragen, sind also anthropogenen Ursprungs. Das Schwermetallmonitoring belegt, dass veränderte Produktionstechniken und gesetzliche Vorgaben seit den 1980er Jahren eine drastische Verringerung der Blei- und Cadmumeinträge in die Wälder bewirkt haben.



Foto: M. Spielmann

WZE-Ergebnisse für alle Baumarten

Uwe Paar und Inge Dammann

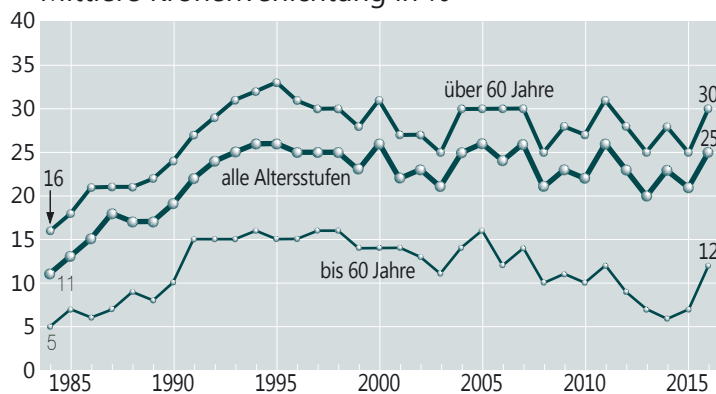
Mittlere Kronenverlichtung

Die Waldzustandserhebung 2016 weist als Gesamtergebnis für die Waldbäume in Hessen (alle Baumarten, alle Alter) eine mittlere Kronenverlichtung von 25 % aus.

Damit hat sich die mittlere Kronenverlichtung im Vergleich zum Vorjahr um 4 %-Punkte erhöht.

Der Wert ist bei den älteren (über 60jährigen) Bäumen von 25 % (2015) auf 30 % angestiegen. Die Kronenverlichtung der jüngeren Bäume ist von 7 % (2015) auf 12 % angestiegen.

Mittlere Kronenverlichtung in %



Anteil starker Schäden

Insgesamt liegt der Anteil starker Schäden über alle Baumarten und alle Alter mit durchschnittlich 3 % im langjährigen Mittel auf einem eher geringen Niveau. Der Anteil starker Schäden liegt 2016 bei den älteren Bäumen mit 3 % auf dem gleichen Niveau wie im Vorjahr. Bei den jüngeren Bäumen liegt der Anteil starker Schäden wie im Vorjahr bei 2 %. Die Zeitreihe der bis 60jährigen Bäume zeichnet die beiden wesentlichen Ereignisse in der landesweiten Waldentwicklung der letzten 20 Jahre, die Stürme Vivian und Wiebke 1990 und den extremen Sommer 2003, besonders klar nach. In beiden Fällen wirkten die Ereignisse mehrere Jahre nach.

Anteil starker Schäden, alle Baumarten, alle Alter in %

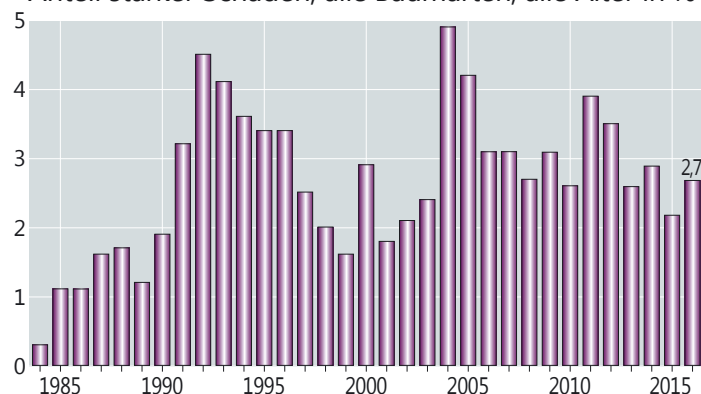


Foto: J. Weymar

WZE-Ergebnisse für alle Baumarten

Absterberate

Die Absterberate (alle Bäume, alle Alter) hat sich von 0,1 % in 2014/2015 auf 0,5 % erhöht. Sie liegt damit über dem langjährigen Mittel der Jahre 1984-2016 von 0,3 %. Auch nach dem Trockenjahr 2003 waren für zwei Jahre erhöhte Werte festzustellen. Infolge der gravierenden Sturmwürfe Anfang der 1990er Jahre traten für einige Jahre ebenfalls erhöhte Werte auf. Der Anstieg der Absterberate in 2015/2016 resultiert vorrangig aus vereinzelt Absterbeprozessen von Eiche und Kiefer. Die jährliche Absterberate ist ein wichtiger Indikator für Vitalitätsrisiken des Waldes. Dies gilt besonders vor dem Hintergrund prognostizierter Klimaänderungen.

Jährliche Absterberate, alle Baumarten, alle Alter in %

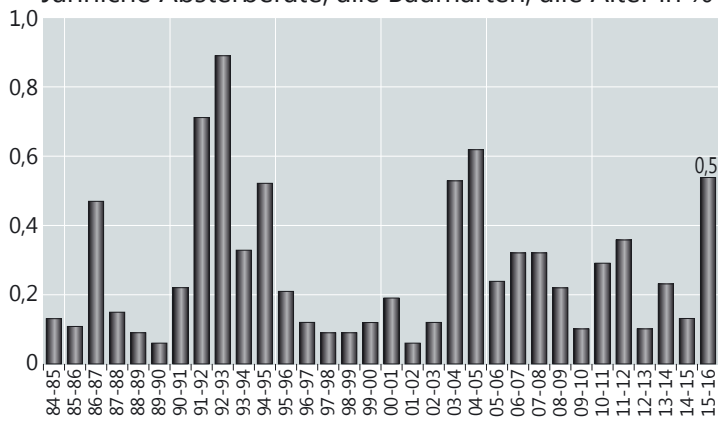


Foto: M. Spielmann

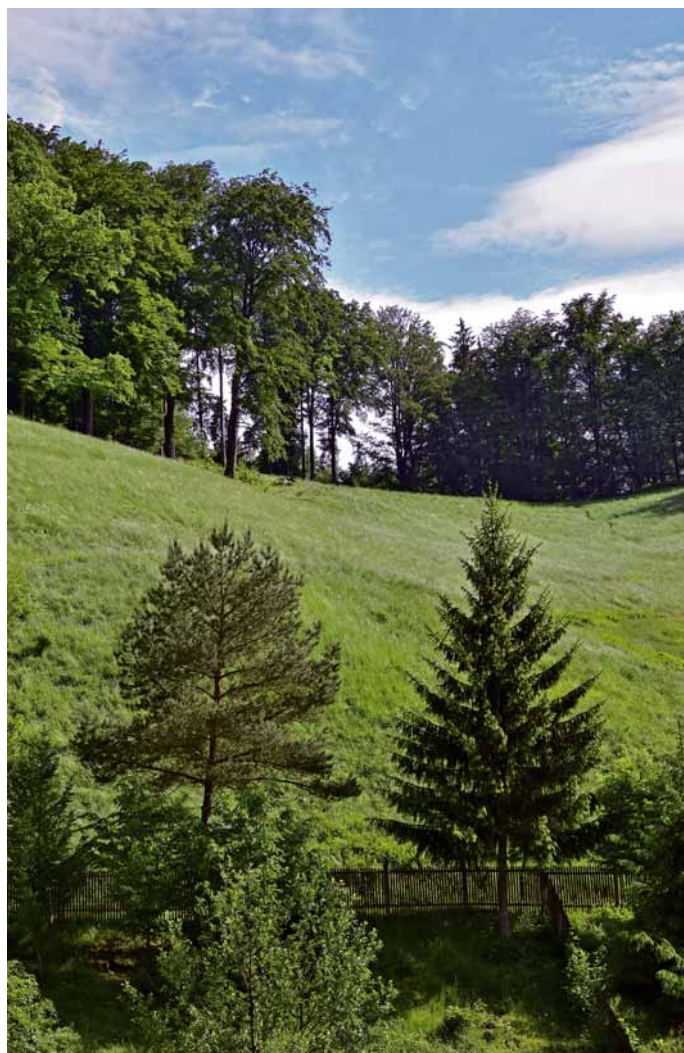
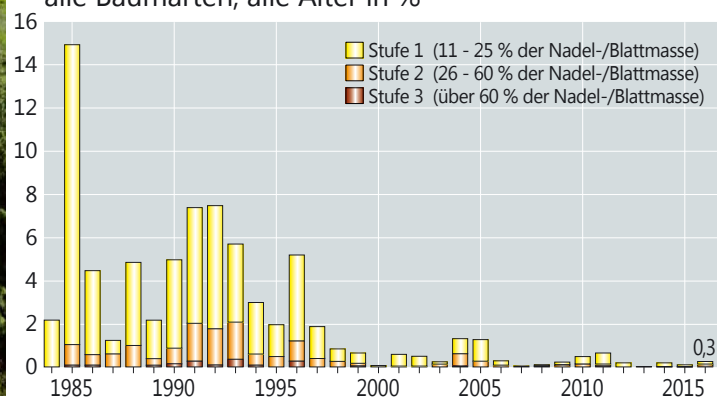


Foto: M. Spielmann

Vergilbungen

Vergilbungen der Nadeln und Blätter sind häufig ein Indiz für Magnesiummangel in der Nährstoffversorgung der Waldbäume. Mit Ausnahme des Jahres 1985 liegt der Anteil von Bäumen mit Vergilbungen der Blätter und Nadeln durchgehend auf einem geringen Niveau. Seit Mitte der 1990er Jahre gingen die Vergilbungserscheinungen nochmals deutlich zurück. Seit dieser Zeit wird dieses Merkmal nur noch vereinzelt festgestellt. Die von den Waldbesitzern und Forstbetrieben durchgeführten Waldkalkungen mit magnesiumhaltigen Kalken und der Rückgang der Schwefel-emissionen haben dazu beigetragen, das Auftreten dieser Mangelercheinung zu reduzieren.

Anteil an den Vergilbungsstufen, alle Baumarten, alle Alter in %



Buche

Ältere Buche

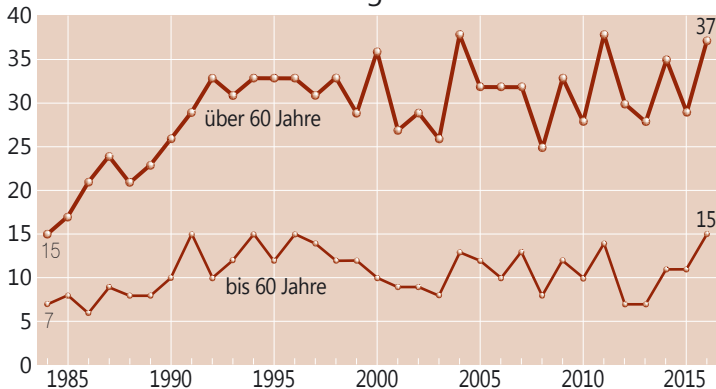
Nach dem deutlichen Anstieg der Kronenverlichtung im Zeitraum von 1984-1992 und einer Stagnation auf nahezu gleich bleibendem Niveau in der Zeit bis 1999 sind ab 2000 deutliche Schwankungen in der Ausprägung des Kronenzustandes der Buche festzustellen. Hierbei sind bei der älteren Buche vor allem stärkere Fruktifikationsereignisse die Ursache.

In 2016 hat sich der Kronenzustand im Vergleich zum Vorjahr um 8 %-Punkte verschlechtert (2015: 29 %; 2016: 37 %). Diese Entwicklung steht vor allem im Zusammenhang mit der Fruchtbildung der Buche. Nach dem Ausbleiben der Fruktifikation der älteren Buchen im Vorjahr zeigen in 2016 83 % eine mittlere bis starke Fruktifikation.

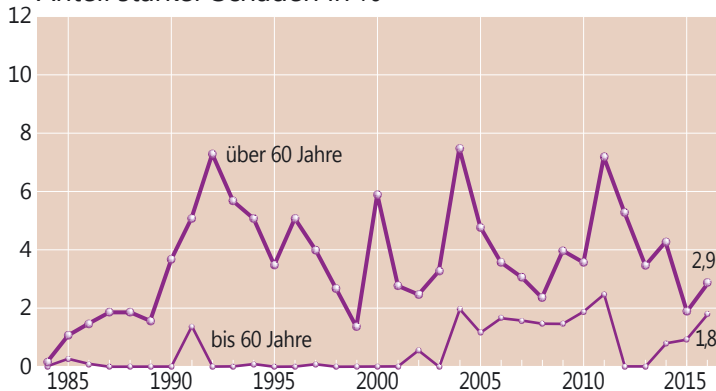
Jüngere Buche

Bei der jüngeren Buche hat sich die mittlere Kronenverlichtung von 11 % (2015) auf 15 % erhöht.

Mittlere Kronenverlichtung in %



Anteil starker Schäden in %



Anteil mittel und stark fruktifizierender älterer Buchen in %

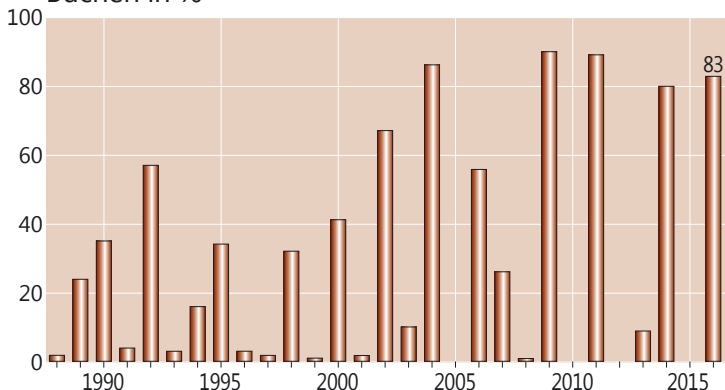


Foto: J. Weymar

Starke Schäden

Der Anteil starker Schäden an älteren Buchen hat sich von 2 % (2015) auf 3 % erhöht. Bei den jüngeren Buchen zeigen nur 2 % deutliche Schäden.

Absterberate

Die Buche weist im Vergleich der Hauptbaumarten seit 1984 die geringste Absterberate auf. Im Mittel liegt die Absterberate der jüngeren und älteren Buche unter 0,1 % (2016: 0,1 %).

Fruchtbildung

Nach dem Ausbleiben der Fruchtbildung im Vorjahr haben 2016 wieder mehr als 80 % der Buchen mittel oder stark fruktifiziert.

Die Ergebnisse zur Fruchtbildung im Rahmen der Waldzustandserhebungen zeigen die Tendenz, dass die Buche in den letzten drei Jahrzehnten in kurzen Abständen und vielfach intensiv fruktifiziert. Dies steht einerseits im Zusammenhang mit einer Häufung warmer Jahre, die in Verbindung mit der Klimaerwärmung zu sehen sind, sowie einer erhöhten Stickstoffversorgung der Bäume, einer Folge der über Jahre hohen Belastung hessischer Wälder durch anthropogene Stickstoffeinträge. Geht man davon aus, dass eine starke Mast erreicht wird, wenn ein Drittel der älteren Buchen mittel oder stark fruktifizieren, ergibt sich rechnerisch für den Beobachtungszeitraum 1988-2016 alle 2,6 Jahre eine starke Mast. Literaturrecherchen (Paar et al. 2011) hingegen ergaben für den Zeitraum 1839-1987 Abstände zwischen zwei starken Masten von im Mittel 4,7 Jahren.

Eiche

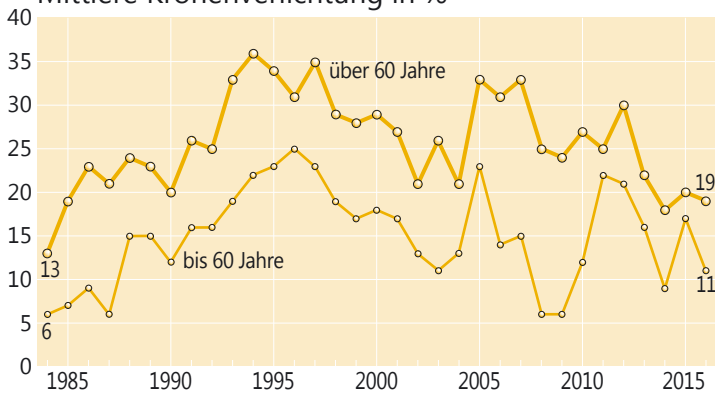
Ältere Eiche

Die Kronenverlichtung der älteren Eiche ist in 2016 leicht zurückgegangen (2015: 20 %, 2016: 19 %). Die Entwicklung der Kronenverlichtung der Eiche wird insgesamt stark durch das unterschiedlich ausgeprägte Vorkommen der Eichenfraßgesellschaft bestimmt. Seit 2013 wird in der WZE-Stichprobe kein oder nur ein geringer Anteil an mittleren oder starken Fraßschäden durch Schmetterlingsraupen an der älteren Eiche festgestellt. Im Vergleich zu 2012 (intensiverer Fraß) zeigt sich der Kronenzustand der älteren Eichen in den letzten vier Jahren deutlich verbessert.

Jüngere Eiche

Die Kronenverlichtung der jüngeren Eiche hat sich von 17 % (2015) auf 11 % verbessert.

Mittlere Kronenverlichtung in %



Anteil starker Schäden in %

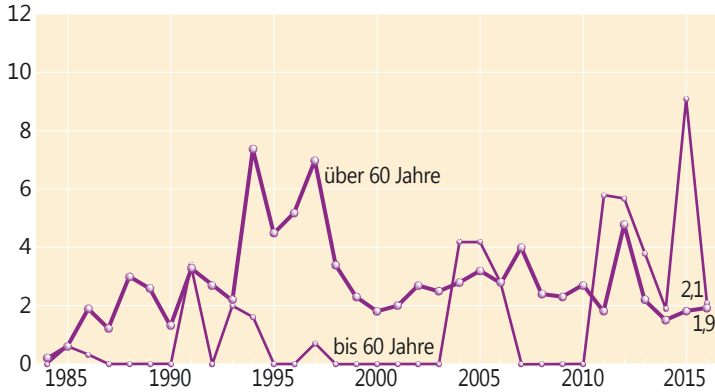


Foto: J. Evers

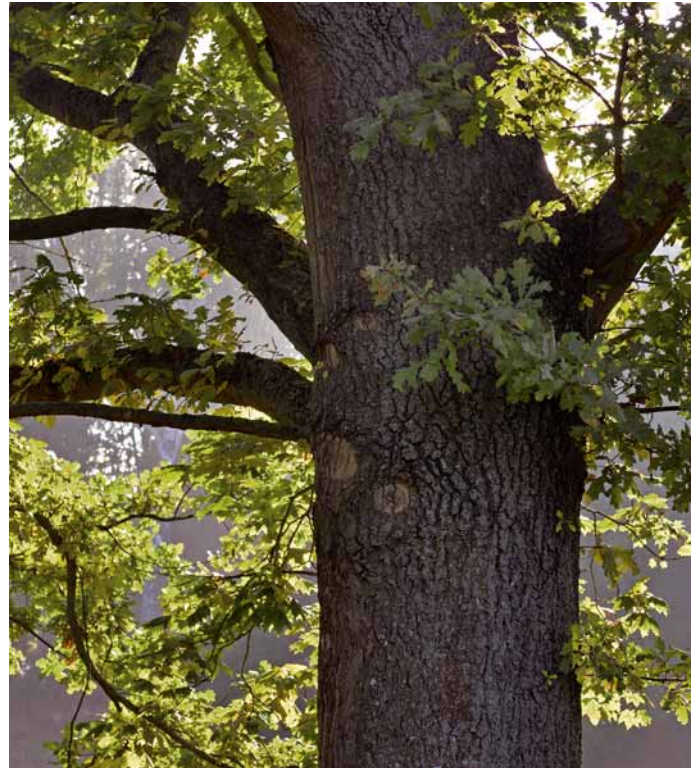


Foto: J. Evers

Starke Schäden

Phasen mit erhöhten Anteilen starker Schäden an älteren Eichen stehen in der Regel in Verbindung mit intensivem Insektenfraß. In 2016 liegt der Anteil starker Schäden für die älteren Eichen bei nur 2 %.

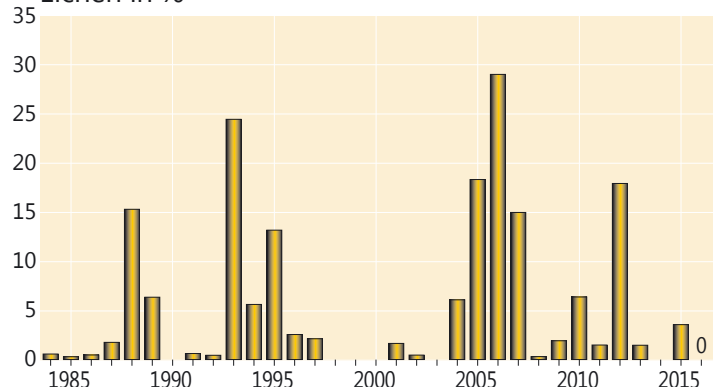
Absterberate

Die Absterberate der älteren Eiche liegt in 2015/2016 mit 1,5 % deutlich über dem langjährigen Mittel (0,3 %).

Fruchtbildung

Die Fruchtbildung der Eiche ist zum Zeitpunkt der Waldzustandserhebung im Juli und August nur schwer einzuschätzen, weil die Eicheln dann noch sehr klein sind. Für die Partnerländer der NW-FVA wurde daher für WZE-Punkte mit mindestens 17 Eichen im Alter über 60 Jahre im 8 km x 8 km-Raster eine zusätzliche Erfassung in der zweiten Septemberwoche durchgeführt. Die Eichen dieser Referenzstichprobe, bestehend aus 13 WZE-Punkten, haben zu 17 % mittel und stark fruktifiziert.

Anteil mittlerer und starker Fraßschäden an älteren Eichen in %



Fichte

Ältere Fichte

Bei der älteren Fichte hat sich die mittlere Kronenverlichtung von 26 % im Vorjahr auf 31 % erhöht.

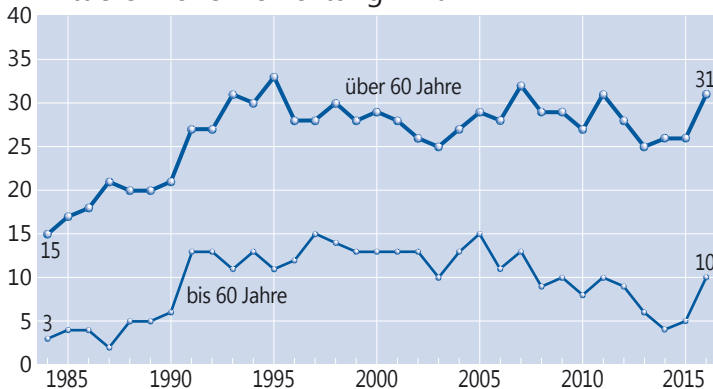
Jüngere Fichte

Auch bei der jüngeren Fichte ist die mittlere Kronenverlichtung von 5 % (2015) auf 10 % angestiegen. Der ausgeprägte Trockenstress in 2015 und regional im Frühjahr 2016 sowie ansteigende Borkenkäferpopulationen haben den Kronenzustand der älteren und jüngeren Fichten deutlich beeinflusst.

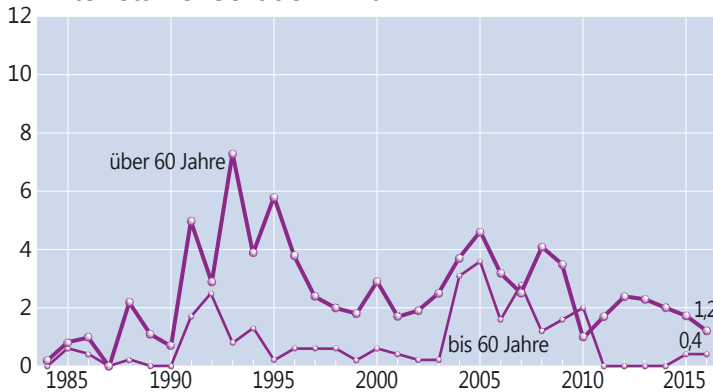


Foto: J. Evers

Mittlere Kronenverlichtung in %



Anteil starker Schäden in %



Starke Schäden

Für die Fichte ergibt sich im Mittel aller Erhebungsjahre ein Anteil an starken Schäden von 2 % (alle Alter). Aktuell liegt der Anteil stark geschädigter junger Fichten bei nur 0,4 %, von den älteren Fichten wurden 1 % als stark geschädigt eingestuft. Erhöht waren die Anteile starker Schäden Anfang der 1990er Jahre, mitverursacht durch Sturmschäden, sowie nach dem extremen Trockenjahr 2003.

Absterberate

Die Absterberate der Fichte liegt im Mittel der Jahre 1984-2016 bei 0,4 %. Im Zeitraum 2014 bis 2016 liegt der Wert bei 0,3 %. Erhöhte Absterberaten sind 1991-1995 (bis 2 %), 2004-2005 (bis 1,4 %) und 2008-2009 (bis 1,1 %) aufgetreten, jeweils nach besonderen abiotischen und biotischen Schadereignissen.



Foto: J. Weymar

Kiefer

Ältere Kiefer

Die mittlere Kronenverlichtung der älteren Kiefer hat sich von 21 % (2015) auf 23 % geringfügig erhöht. Nach einem Anstieg der Kronenverlichtung in der Zeit von 1984 bis 1994 hat sich der Kronenzustand seit dieser Zeit tendenziell leicht verbessert.

Jüngere Kiefer

Die mittlere Kronenverlichtung der jüngeren Kiefer ist von 12 % (2015) auf 17 % angestiegen.

Mittlere Kronenverlichtung in %

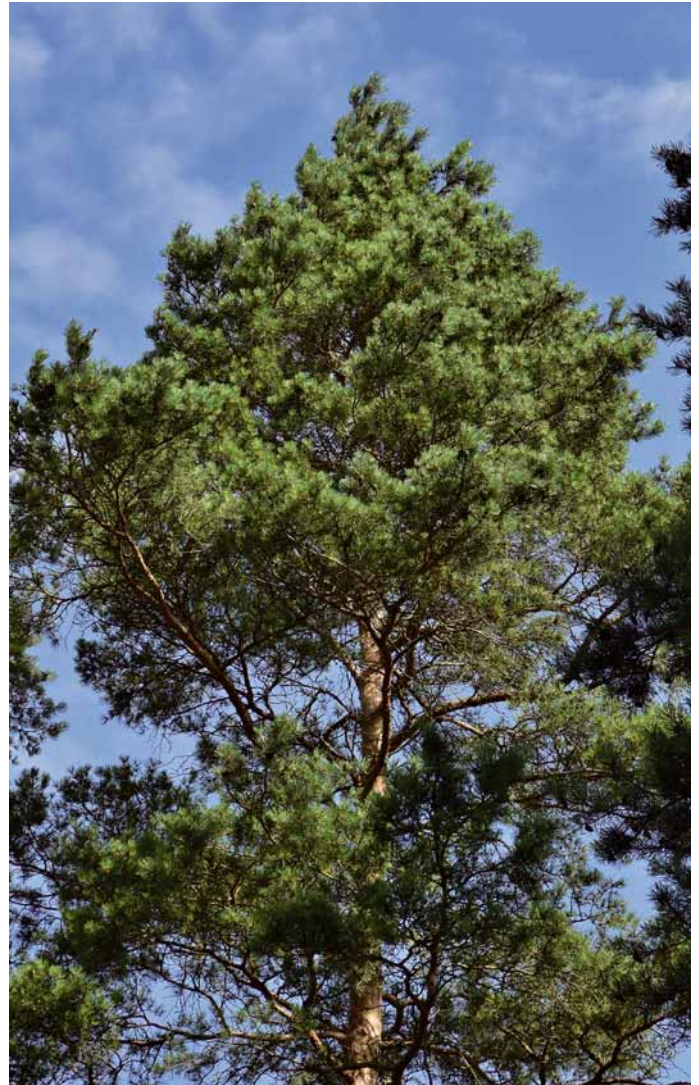
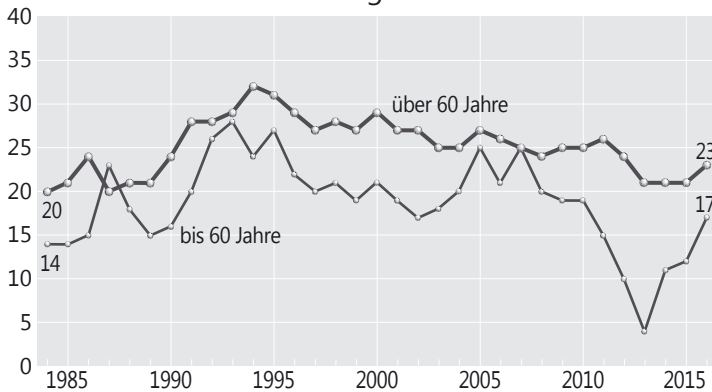


Foto: M. Spielmann



Foto: M. Spielmann

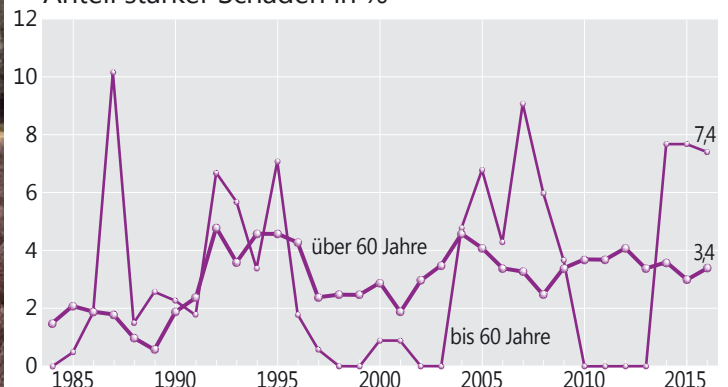
Starke Schäden

Der Anteil starker Schäden liegt bei der Kiefer im langjährigen Mittel bei 3 %. Erhöhte Anteile starker Schäden wurden 1987, 1992-1996 und im Anschluss an das Trockenjahr 2003 sowie in den Jahren 2014-2016 vorwiegend bei den jüngeren Kiefern festgestellt.

Absterberate

Die Absterberate der Kiefer (alle Alter) schwankt im Erhebungszeitraum zwischen 0 % und 2 %. In 2016 entspricht der Wert von 0,7 % annähernd dem langjährigen Mittel (0,5 %).

Anteil starker Schäden in %



Wald in der Rhein-Main-Ebene

Uwe Paar, Inge Dammann und Martin Rohde

Im Vergleich zum Vorjahr hat sich in der Rhein-Main-Ebene der Kronenzustand der älteren Bäume geringfügig verschlechtert (2015: 27 %, 2016: 29 %). Geringfügig verbessert hat sich dagegen der Kronenzustand der jüngeren Bäume. Die mittlere Kronenverlichtung verringerte sich von 17 % auf 16 %. Insbesondere die jüngeren Bäume zeigen allerdings in der Rhein-Main-Ebene einen erheblich schlechteren Kronenzustand als in Gesamthessen.

Die Eiche zählt zu den charakteristischen Baumarten dieser Region, die an die dortigen Klimabedingungen grundsätzlich gut angepasst sind.

Dass sich mittelfristig die Situation in der Rhein-Main-Ebene grundlegend verschlechtert hat, wird am Beispiel der Eiche deutlich. 1984, zu Beginn der methodisch unveränderten Zeitreihe, lag die Kronenverlichtung älterer Eichen in der Rhein-Main-Ebene bei 15 %. Der heutige Wert von 32 % stellt eine Verdopplung des mittleren Blattverlustes dar. Deutlich günstiger ist dagegen die Entwicklung des Kronenzustandes der älteren Eiche in Gesamthessen (1984: 13 %, 2016: 19 %).

Bereits im Rahmen der ersten Aufnahme zum Mistelbefall an der Kiefer im Jahr 2002 wurde für ca. ein Drittel der Kiefern in der Rhein-Main-Ebene Mistelbefall festgestellt. Seitdem erhöhte sich der Anteil von Kiefern mit Mistelbefall auf 42 %. Ihr gehäuftes Vorkommen kann als Hinweis auf ökologische Ungleichgewichte interpretiert werden. Die Ergebnisse zum Waldzustand und die Gründe für seine Entwicklung in der Rhein-Main-Ebene und im Besonderen im Hess. Ried sind in verschiedenen Forschungsberichten dargelegt (z. B. Waldentwicklungsszenarien für das Hess. Ried, Ahner et al. 2013, zu beziehen über die NW-FVA). Zusammenfassend bestätigen die Ergebnisse, dass „die Wälder im Ballungsraum Rhein-Main zu den forstlichen Brennpunkten in Mitteleuropa gehören. Flächenverbrauch, Zerschneidung, Stoffeinträge aus der Luft, steigender Wasserbedarf und biotische sowie abiotische Belastungen führen zu einer schleichenden Destabilisierung der Wälder und damit verbundenen Waldauflösungserscheinungen. Ein geordneter Forstbetrieb ist somit vielerorts nicht mehr möglich.“

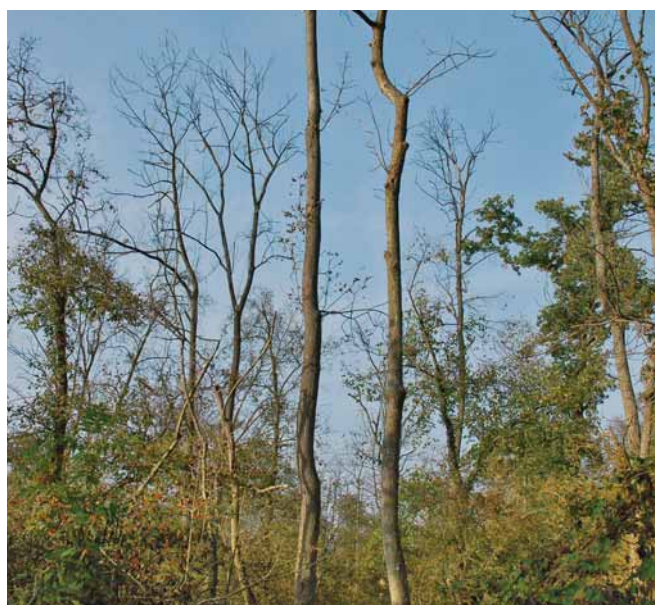
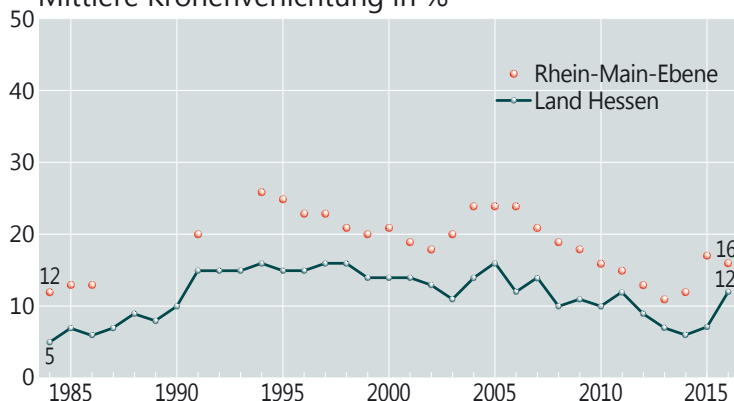
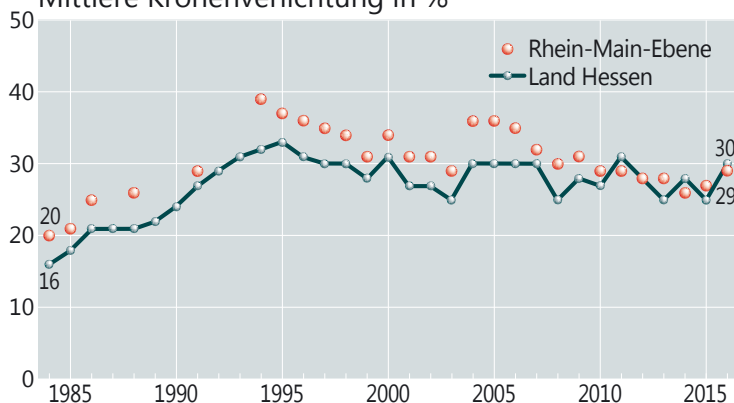


Foto: J. Evers

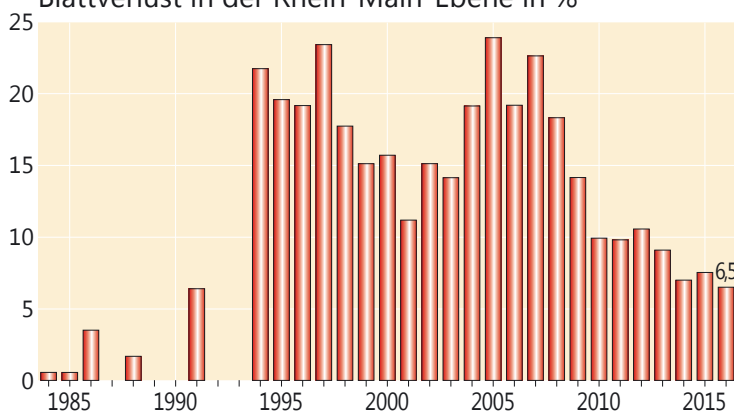
Alle Baumarten, bis 60 Jahre
Mittlere Kronenverlichtung in %



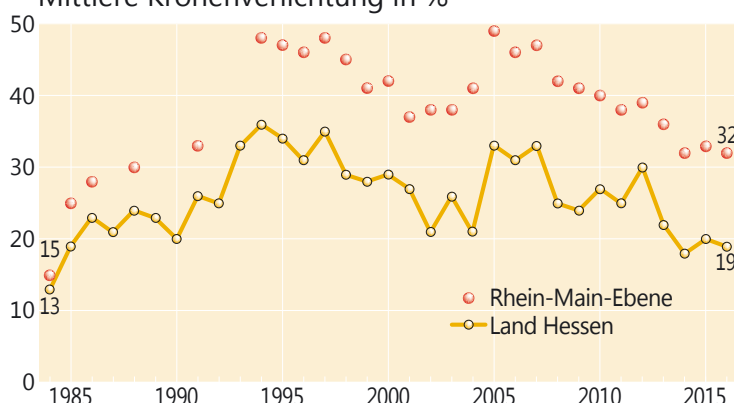
Alle Baumarten, über 60 Jahre
Mittlere Kronenverlichtung in %



Anteil der über 60-jährigen Eichen mit über 60 %
Blattverlust in der Rhein-Main-Ebene in %



Eiche, über 60 Jahre
Mittlere Kronenverlichtung in %



Witterung und Klima

Johannes Suttmöller

Der Witterungsverlauf für Hessen wird anhand von Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) beschrieben. Die Höhe der Niederschläge und ihre Verteilung über das Jahr sowie die Temperaturdynamik sind wichtige Einflussgrößen auf die Vitalitätsentwicklung der Waldbäume. Dabei spielen sowohl der langjährige Witterungsverlauf als auch die Werte des vergangenen Jahres eine Rolle. Dargestellt sind jeweils die Niederschlagssummen und die Mitteltemperaturen sowie die Abweichungen vom Mittel der Klimanormalperiode 1961-1990. Grundlage für die Auswertung bilden die Messdaten des DWD (192 Klima- und 995 Niederschlagsstationen), die auf ein 200 m x 200 m-Raster interpoliert wurden, so dass der Mittelwert über die gesamte Landesfläche von Hessen gebildet werden konnte.

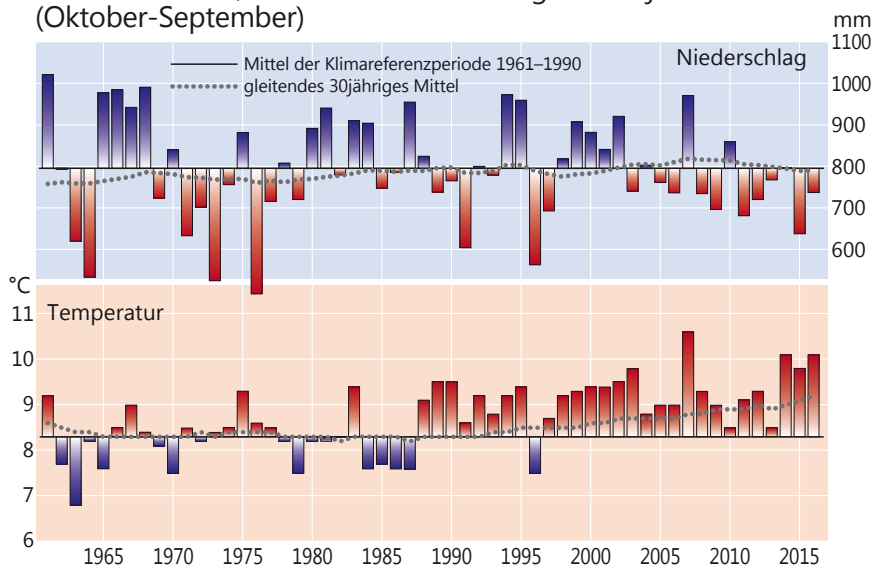
Temperatur und Niederschlag im langjährigen Verlauf

Die langjährigen Messdaten für den Zeitraum von 1961 bis 2016 zeigen seit 1988 eine gegenüber der Referenzperiode (1961-1990) erhöhte Temperatur. Im Vegetationsjahr 2016 (Oktober 2015 bis September 2016) hat sich die langjährige Mitteltemperatur von 8,3 °C (Mittelwert der Referenzperiode) auf aktuell 9,2 °C erhöht (Mittelwert 1987-2016). Um den gemessenen Temperaturanstieg zu verdeutlichen, wurde das gleitende 30jährige Mittel berechnet, das für jedes Jahr den Mittelwert aus den vorausgegangenen 30 Jahren bildet (gepunktete Linie in der Abbildung rechts). Dabei war das Vegetationsjahr 2016 mit 10,1 °C nach den Jahren 2007 und 2014 das drittwärmste Jahr seit Messbeginn in Hessen. Die Temperaturabweichung betrug im Flächenmittel +1,8 °C.

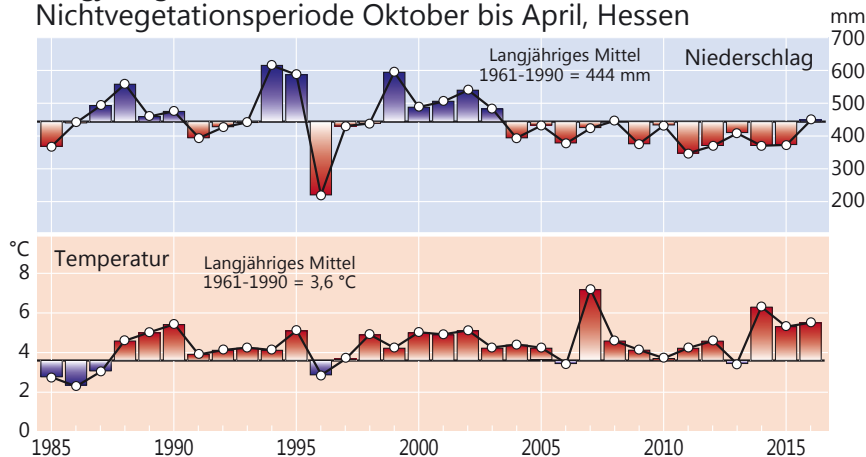
Wie bereits in den letzten Jahren zu beobachten war, weisen fast alle Monate positive Temperaturabweichungen auf. Nur der Oktober 2015 fiel etwas zu kühl aus. Der Dezember 2015 ging mit einer Temperaturanomalie von +5,6 °C sogar als wärmster Dezember seit Messbeginn in die Wetterhistorie ein. Auch der September 2016 wies mit einer Temperaturabweichung von +3,7 °C und einer Mitteltemperatur von 16,9 °C eher sommerlichen Charakter auf.

Mit 737 mm entsprach die Niederschlagssumme im Vegetationsjahr 2015/2016 rund 93 % des langjährigen Mittelwertes der Referenzperiode (1961-1990) von 795 mm. Die Niederschlagshöhe schwankt im Zeitraum 1961 bis 2016 von Jahr zu Jahr mit Werten von weniger als 500 mm (1976) bis annähernd 1000 mm (1961) sehr stark (Abbildung rechts). Perioden mit überdurchschnittlich hohen Niederschlägen wechseln mit trockenen Perioden ab, so dass keine einheitliche Tendenz festgestellt werden kann. Es fällt jedoch auf, dass die letzten Jahre im Landesdurchschnitt eher zu trocken ausgefallen sind.

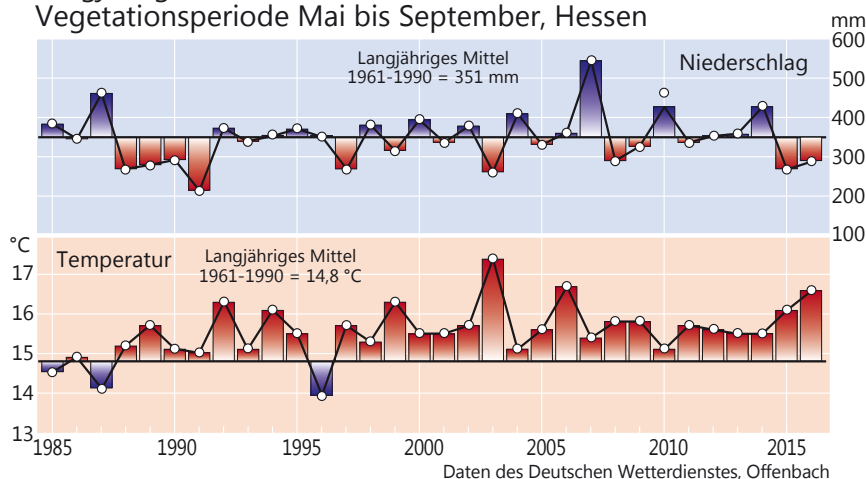
Abweichungen von Niederschlag und Temperatur vom Mittel der Klimareferenzperiode 1961-1990 und gleitendes 30jähriges Mittel in Hessen, Jahreswerte für das Vegetationsjahr (Oktober-September)



Langjährige Klimawerte (1985-2016) Nichtvegetationsperiode Oktober bis April, Hessen



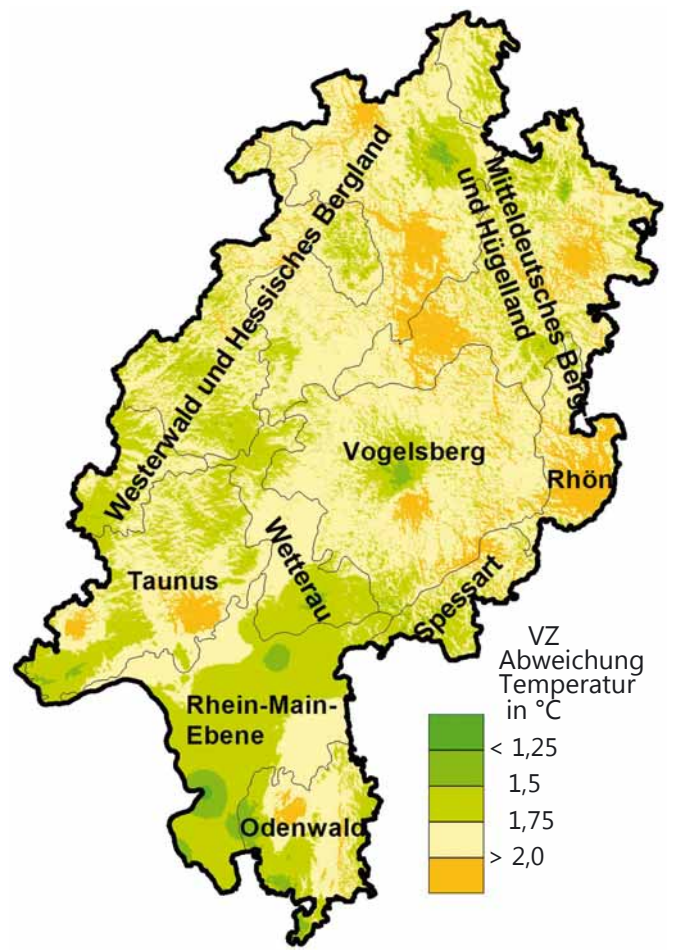
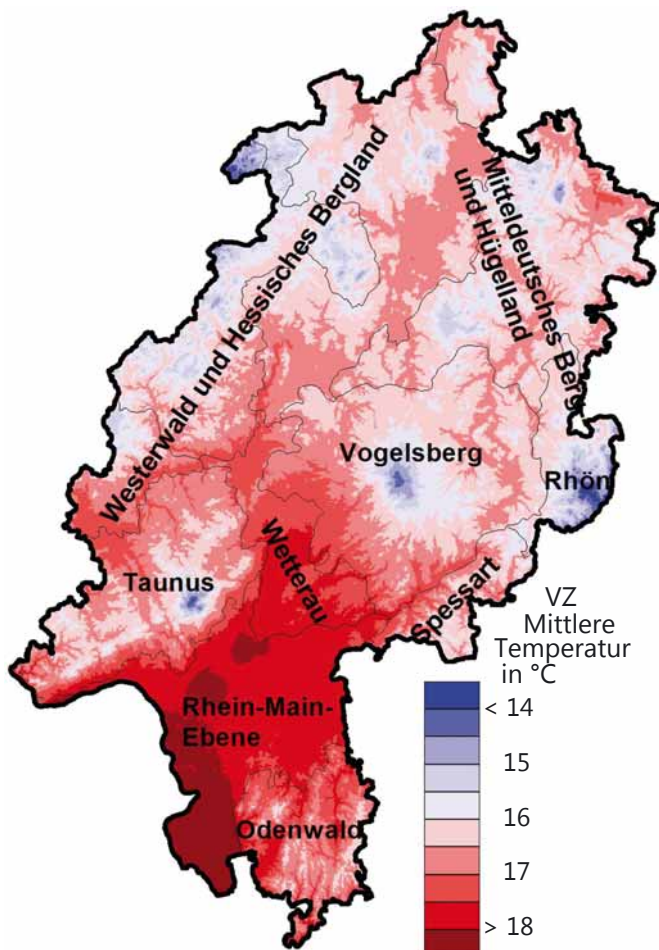
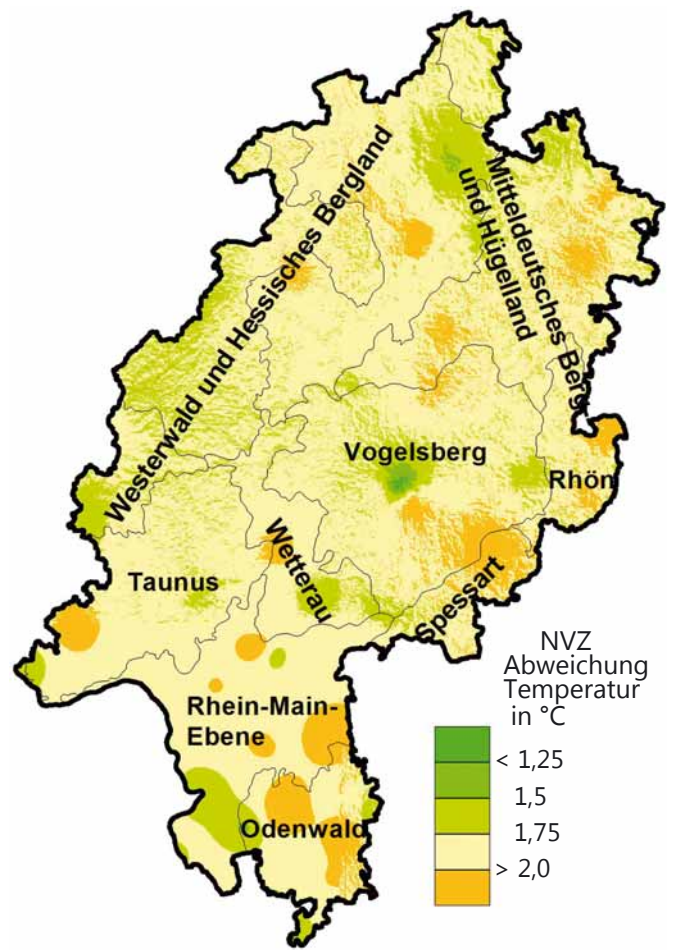
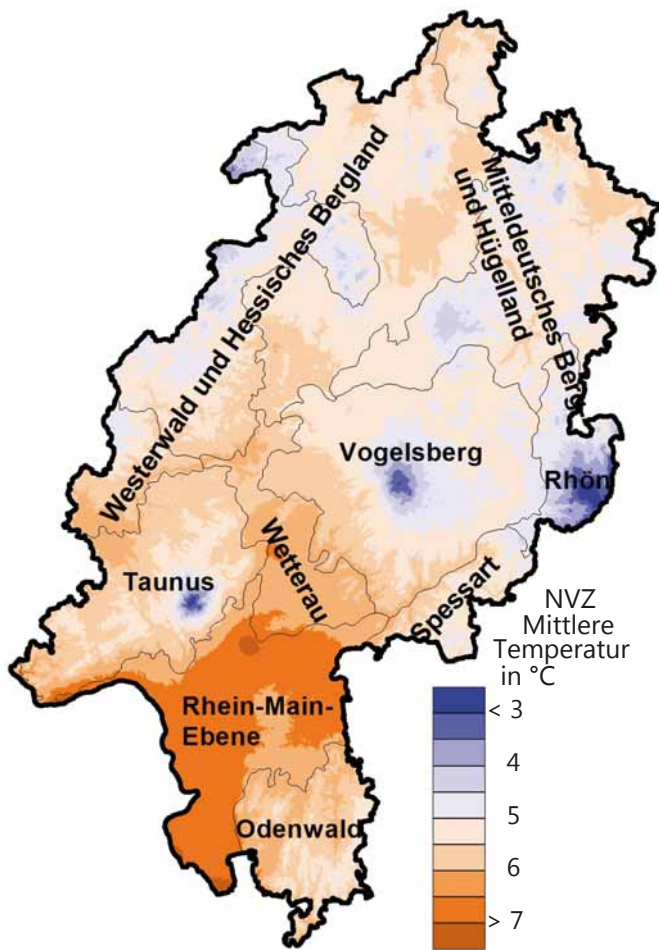
Langjährige Klimawerte (1985-2016) Vegetationsperiode Mai bis September, Hessen



In der Vegetationszeit (Mai bis September) wurde die Mitteltemperatur von 14,8 °C mit 16,6 °C deutlich überschritten und auch die Temperaturen in der Nichtvegetationszeit (Oktober bis April) lagen mit 5,5 °C signifikant über dem Mittelwert der Referenzperiode (3,6 °C). Während die Niederschlagssumme in der Nichtvegetationszeit mit 449 mm fast dem langjährigen Mittelwert von 444 mm entsprach, fielen in der Vegetationsperiode nur 82 % (288 mm) der üblichen Niederschlagsmenge (siehe Abbildungen oben).

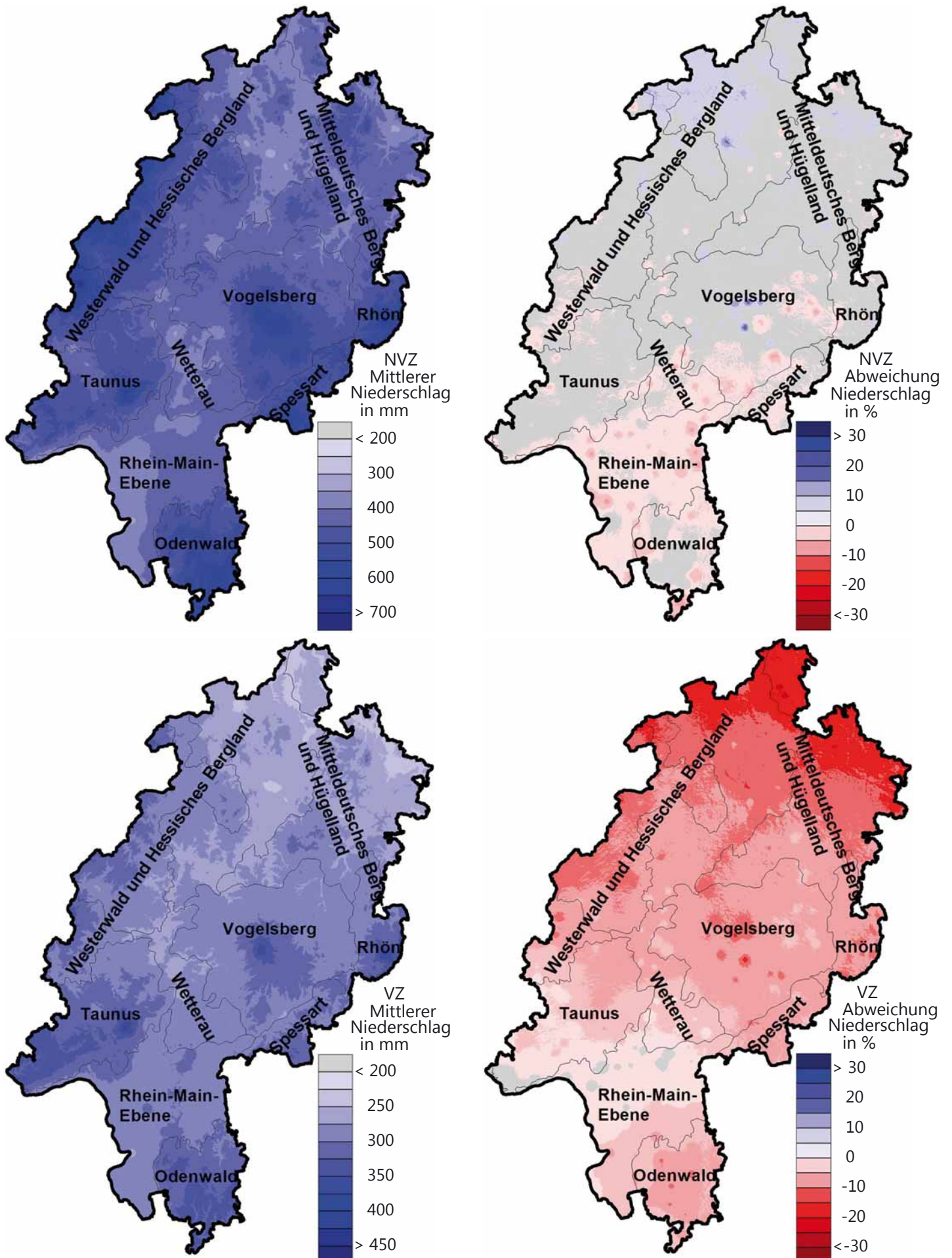
Witterung und Klima

Gemessene Temperaturen und deren Abweichungen zum langjährigen Mittel in der Nichtvegetationszeit (NVZ) 2015/2016 und in der Vegetationszeit (VZ) 2016



Witterung und Klima

Gemessene Niederschlagssummen und deren Abweichungen zum langjährigen Mittel in der Nichtvegetationszeit (NVZ) 2015/2016 und in der Vegetationszeit (VZ) 2016



Witterung und Klima

Ein Trend zu feuchteren Wintern und trockeneren Sommern, wie es die aktuellen Klimaszenarien projizieren, ist bisher nicht zu beobachten. Der erwartete Temperaturanstieg spiegelt sich in den Messreihen dagegen gut wieder (siehe 30jähriges Mittel in der Abbildung Seite 13). Die beobachtete Erwärmung entspricht dabei eher dem ‚worst case‘-Szenario und würde einen Temperaturanstieg von rund 4 °C bis zum Jahr 2100 im Vergleich zur vorindustriellen Temperaturniveaus (Mittelwert 1850-1900) zur Folge haben. Um die Erwärmung auf 1,5 °C bis 2,0 °C bis zum Jahr 2100 zu begrenzen, müssten die Treibhausgas-Emissionen kurzfristig und drastisch reduziert werden.

Witterungsverlauf von Oktober 2015 bis September 2016

Im Vegetationsjahr 2015/2016 (Oktober-September) wurden in Hessen fast durchgehend positive Temperaturabweichungen gemessen. Während das Vegetationsjahr noch mit einem unterkühlten Oktober startete, folgten ein warmer November und ein rekordwarmer Dezember. Trotz kurzer winterlicher Episoden lagen die Monatsmitteltemperaturen von Januar bis April über den langjährigen Mittelwerten. Der Februar 2016 war mit einer Abweichung von +2,5 °C sogar deutlich zu warm. Auch im weiteren Jahresverlauf lagen die Monatsmitteltemperaturen durchweg über den Werten der Referenzperiode 1961-1990. Von Mai bis August traten Temperaturabweichungen von +1,3 °C bis +1,6 °C auf. Das Vegetationsjahr endete mit einer ungewöhnlichen Hitzeperiode im September, wobei an vielen Messstationen des DWD in Hessen neue Rekordwerte gemessen wurden.

Obwohl acht von 12 Monaten im Vegetationsjahr 2015/2016 zu trocken waren, lagen die Niederschläge nur leicht unter dem langjährigen Niederschlagsmittel. Aufgrund der überdurchschnittlich hohen Niederschläge im November 2015 und im Februar und Juni 2016, die jeweils rund 125 % bis 150 % des langjährigen Niederschlagsolls betrug, konnte das Niederschlagsdefizit der übrigen Monate deutlich verringert werden. Der Wechsel von trockenen und feuchten Monaten prägte die Witterung in Hessen bis in den Frühsommer hinein. Nach einem nassen Juni setzte dann aber im Juli eine Trockenperiode ein, die nur von wenigen Niederschlagsereignissen unterbrochen wurde und bis zum Ende des Vegetationsjahres im September 2016 andauerte. Dabei fiel regional im August und September weniger als

50 % der langjährigen Niederschlagsmenge. Aufgrund der Trockenheit setzten insbesondere bei der Buche auf exponierten und schlecht wasserversorgten Standorten im August eine verfrühte Laubfärbung und Laubfall ein.

Die positive Temperaturabweichung in der Nichtvegetationszeit schwankte in Hessen zwischen +1,0 °C und gut +2,5 °C. Dabei wechselten Regionen mit überdurchschnittlich hohen Abweichungen mit Gebieten geringerer positiver Anomalie kleinräumig ab (Abbildung Seite 14). So betrug die Abweichung im Odenwald weiträumig mehr als +2,0 °C, während im benachbarten Hessischen Ried die Mitteltemperatur „nur“ +1,5 °C vom langjährigen Mittel abwich. In der Vegetationsperiode ergibt sich ein ähnliches Bild, wobei die Regionen mit den höchsten Temperaturabweichungen überwiegend in Mittel- und Nordhessen zu finden sind. Auch wurden in einigen Mittelgebirgen wie in der Rhön und im Taunus hohe Temperaturabweichungen von bis zu knapp +3,0 °C gemessen. In der Rhein-Main-Ebene lagen die Mitteltemperaturen dagegen meist rund +1,5 °C über den Werten der Referenzperiode, wobei jedoch verbreitet Mitteltemperaturen von über 18,0 °C in der Vegetationszeit auftraten.

In der Nichtvegetationsperiode wurde in Mittel- und Nordhessen das langjährige Niederschlagsoll fast flächendeckend erreicht bzw. leicht überschritten. In der Rhein-Main-Ebene und in den südlichen Regionen von Taunus, Wetterau, Vogelsberg und Spessart sowie in Teilen des Odenwaldes traten dagegen leichte Niederschlagsdefizite von bis zu -15 % auf. In der Vegetationsperiode 2016 wurde aufgrund der Trockenheit landesweit das Niederschlagsoll nicht erreicht. Im Gegensatz zur Vegetationsperiode 2015 wurden dieses Jahr jedoch die höchsten Defizite mit bis zu -30 % in Nordhessen gemessen, während in der Rhein-Main-Ebene nur geringe Defizite von bis zu -10 % auftraten.

Das Vegetationsjahr 2015/2016 reiht sich nahtlos in die überdurchschnittlich warmen Jahre der letzten 25 Jahre ein. Es ist mit einer Mitteltemperatur von 10,1 °C ebenso wie 2014 und 2007 eines der wärmsten Jahre seit Messbeginn. Die Temperaturabweichung betrug +1,8 °C. Die Niederschläge lagen mit 737 mm im Landesmittel nur leicht unter den Mittelwerten der Referenzperiode von 1961-1990. Allerdings war es im Vergleich zum Vorjahr diesmal im Norden des Landes während der Vegetationsperiode sehr trocken, während in der Rhein-Main-Ebene, die im letzten Jahr von einer Dürre betroffen war, nur zu leichten Niederschlagsdefiziten kam.

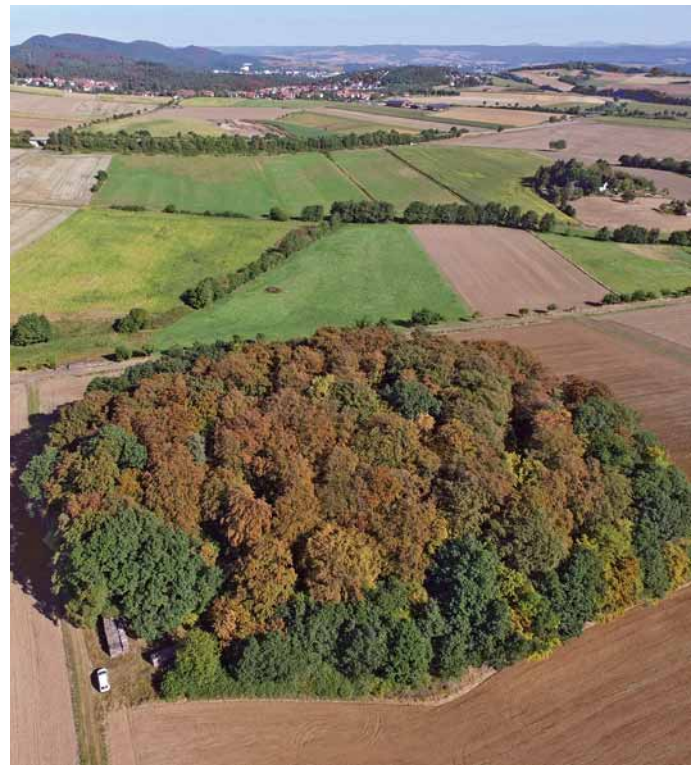


Foto: J. Evers

Bodenwasserhaushalt und Trockenstress

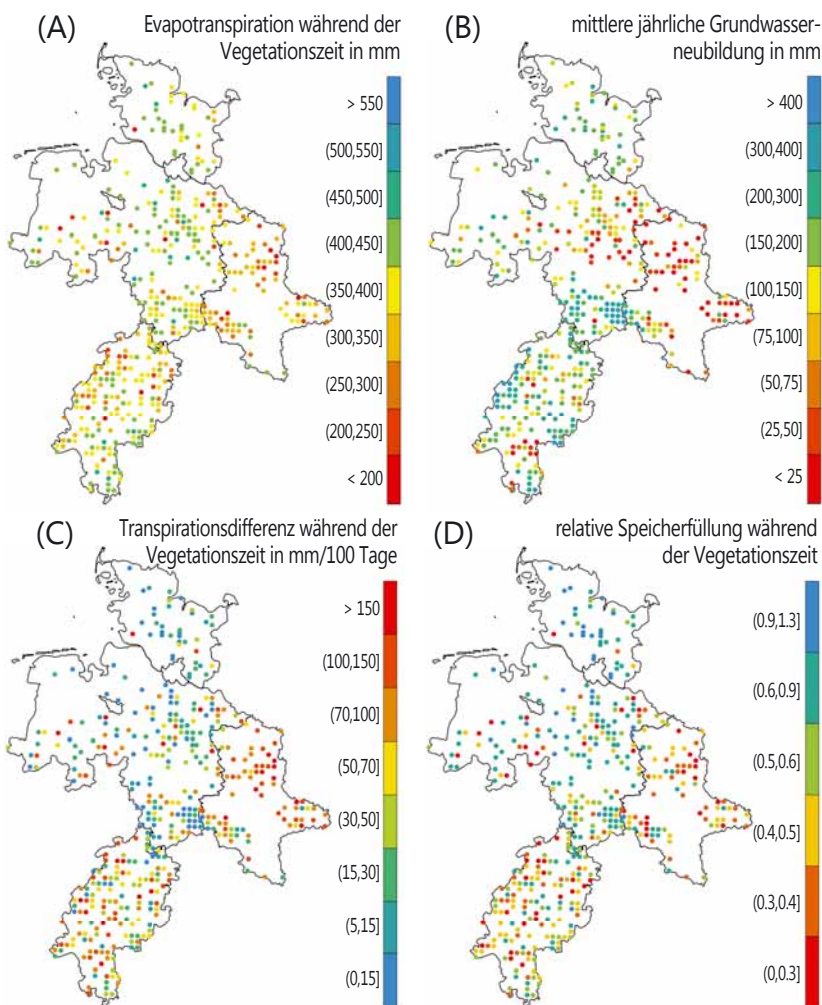
Paul Schmidt-Walter, Bernd Ahrends und Henning Meesenburg

Der Wasserhaushalt ist neben der Nährstoffversorgung die wichtigste lokale Standortskomponente. Durch den Klimawandel werden unsere Waldökosysteme in den nächsten Jahrzehnten aber klimatischen Bedingungen ausgesetzt sein, die sich in ihrer Intensität und Dynamik grundsätzlich von denen der Vergangenheit unterscheiden. Die möglichen Auswirkungen dieser veränderten Umweltbedingungen auf die Wälder und ihre Böden umfassen nicht nur reduzierte Grundwasserneubildungsmengen, sondern auch das Bodenwasserregime einschließlich der Verfügbarkeit des Bodenwassers für Baumwurzeln. Damit ergibt sich eine direkte Beziehung zur Produktionsfunktion (Zuwachs der Waldbäume). Diese Folgen betreffen nicht nur die Jahre mit auftretender Trockenheit, häufig ist z. B. ein vermindertes Wachstum in den Jahren nach der Dürre stärker ausgeprägt. Darüber hinaus wird von besonders starken Reaktionen beim Auftreten von trockenen Bodenverhältnissen in aufeinanderfolgenden Jahren ausgegangen. Da der Klimawandel die Standortbedingungen unserer Wälder auch heute schon merklich verändert hat, kann ein möglicher Einfluss von Temperatur- und Niederschlagsveränderungen anhand von hinreichend langen Klimazeitreihen aus der Vergangenheit untersucht werden. Hierfür werden im Projekt



Vorzeitige Blattverfärbung der Buche im August 2016

Foto: J. Weymar



WP-KS-KW (Veränderte Produktivität und Kohlenstoffspeicherung der Wälder Deutschlands angesichts des Klimawandels) umfassende Wasserhaushaltssimulationen an Aufnahmepunkten der zweiten Bodenzustandserhebung (BZE II) durchgeführt. Das BZE II-Netz eignet sich für derartige Untersuchungen besonders, da es repräsentativ für die Waldflächen in Nordwestdeutschland ist und alle wesentlichen für die Wasserhaushaltssimulation notwendigen bodenphysikalischen Kenngrößen (Bodenart, Trockenrohdichte, Skelettgehalt, Humusgehalt) und Bestandesparameter erhoben werden. Bei den hier vorgestellten Simulationen wurde für die jeweiligen Waldbestandstypen von konstanten Bestandeseigenschaften und -entwicklungen ausgegangen, um den Einfluss der Klimaentwicklung und regionale Unterschiede deutlicher herauszuarbeiten.

Gesamtverdunstungsmenge

Die Abbildung links (A) zeigt die räumliche Verteilung der Gesamtverdunstungsmenge (Evapotranspiration) während der Vegetationsperiode. Ein großer Teil der BZE-Punkte liegt im Bereich von 300-500 mm. Sehr hohe Verdunstungsraten (>450 mm) treten vereinzelt in Bereichen auf, die niederschlagsreich sind und gleichzeitig über hohe Temperaturen mit entsprechend langen Vegetationsperioden verfügen. Ein gehäuftes Auftreten von niedrigen Gesamtverdunstungsraten (<350 mm) findet sich im Regenschatten des Harzes, im Hessischen Schiefergebirge, in der Altmark sowie weiterhin auf Standorten mit hohen Skelettgehalten und/oder geringen effektiven Durchwurzelungstiefen.

Medianwerte der realen Evapotranspiration während der Vegetationsperiode (A), der jährlichen Grundwasserneubildung (B), der Transpirationsdifferenz während der Vegetationsperiode (C) und der mittleren relativen pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicherfüllung während der Vegetationsperiode (D) für BZE II-Punkte im Zeitraum 1981-2010.

Bodenwasserhaushalt und Trockenstress

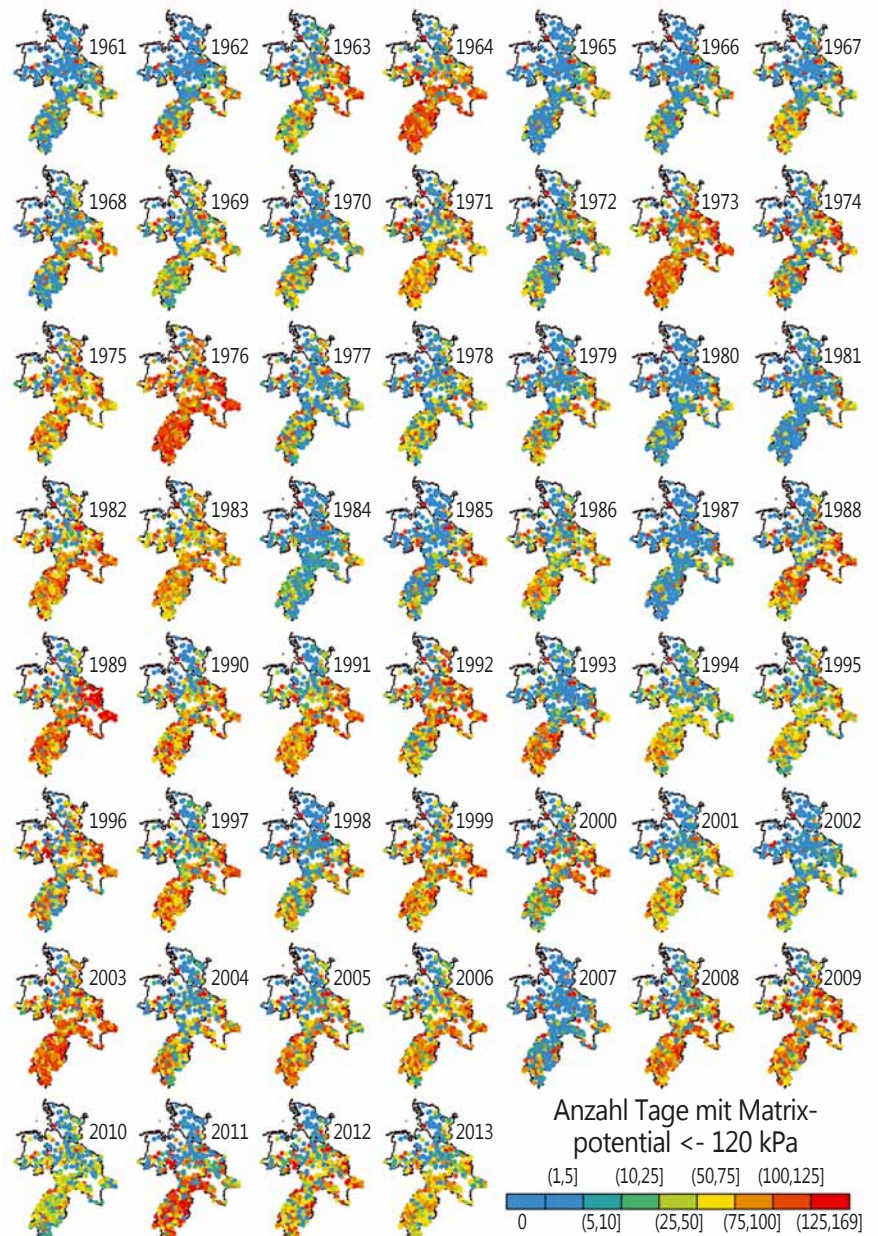
Grundwasserneubildung

Stärker ausgeprägte räumliche Muster zeigt die Grundwasserneubildung (Abbildung Seite 17 (B)), da sie primär vom Niederschlag bestimmt wird. Die Grundwasserneubildung hat als Ökosystemleistung unserer Wälder eine große Bedeutung, da im Vergleich mit anderen Landnutzungsformen die Qualität des unter Wald gebildeten Grundwassers als insgesamt hochwertig anzusehen ist. Folglich ist der Anteil bewaldeter Flächen in Trinkwassergewinnungsgebieten häufig überproportional hoch. Für den Großteil der BZE-Punkte liegt die jährliche Grundwasserneubildung bei 50-400 mm. Niedrige Werte (<100 mm) befinden sich vorwiegend in Sachsen-Anhalt, im Ostniedersächsischen Tiefland und vereinzelt in Hessen (Hessisches Ried und Großraum Frankfurt). Hohe Grundwasserneubildungsraten (>400 mm) konzentrieren sich auf den Harz und in Hessen auf den Westerwald und das Hessisch-Fränkische Bergland.

Transpirationsdifferenz und relative Bodenwasserspeicherfüllung

Zwei Indikatoren zur Beschreibung der Trockenstresssituation von Wäldern sind die Transpirationsdifferenz und die relative Bodenwasserspeicherfüllung. Die Transpirationsdifferenz beschreibt die Differenz zwischen der bei jederzeit optimaler Wasserversorgung möglichen (potenziellen) Transpiration und der bei gegebener Wasserverfügbarkeit real möglichen Transpiration und berücksichtigt stärker die absolute Wasserverfügbarkeit. Sie ermöglicht es festzustellen, ob die Verdunstung eines Standortes durch Wassermangel begrenzt ist (Abbildung Seite 17 (C)). Je niedriger der Wert, desto günstiger ist die Wasserversorgung. Werte unter 5 mm pro 100 Tage während der Vegetationsperiode werden in den Hochlagen der Mittelgebirge und an vielen Standorten in Schleswig-Holstein erreicht. In Sachsen-Anhalt dagegen überwiegen Werte von >100 mm während der Vegetationsperiode pro 100 Tage. Aber auch an vielen Standorten in Hessen werden entsprechende Werte erreicht.

Standorte mit geringer relativer Auffüllung des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers befinden sich vorwiegend in Sachsen-Anhalt und Hessen (Abbildung Seite 17 (D)). Neben geringen Niederschlagsmengen während der Vegetationsperiode sind hierfür auch geringe Speicherkapazitäten auf flachgründigen Standorten verantwortlich. Auf vielen anderen BZE-Punkten tritt demgegenüber Wassermangel nur in Trockenjahren auf. Die kurzzeitige Verknappung der Wasserversorgung des Bestandes führt zu Trockenstress



Dynamik der Bodenaustrocknung in Nordwestdeutschland von 1961 bis 2013 (Zuständigkeitsbereich NW-FVA)

und ist damit eine Risikokomponente. Mögliche Folgen sind Blattverlust, Abnahme der Vitalität, erhöhte Mortalität und eine temporäre Verringerung der Wuchsleistung.

Räumliche und zeitliche Dynamik

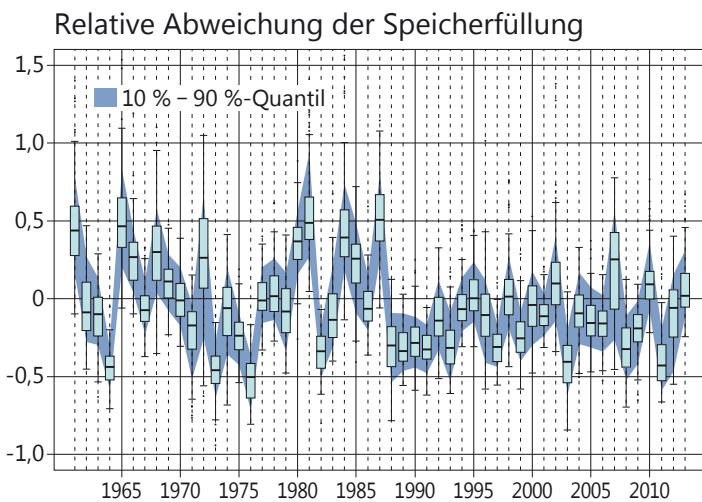
Neuere Untersuchungen deuten darauf hin, dass Abweichungen von den langjährigen Witterungsbedingungen eine zentrale Bedeutung für das bestandsspezifische Trockenstressrisiko haben (Choat et al. 2012). Demzufolge sollten im Vergleich zu Mittelwerten auch die zeitlichen Veränderungen betrachtet werden. Entsprechend wurden die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung der BZE-Punkte hinsichtlich der Raum-Zeit-Dynamik ausgewertet. Hierbei lässt sich die zeitliche Entwicklung anschaulich mit dem Ausmaß von Perioden starker Bodenaustrocknung (Matrixpotentiale von weniger als -120 kPa im Wurzelraum) beschreiben (Abbildung oben). Rote Symbole markieren intensiven Wassermangel und blaue Symbole unkritische Wasserversorgungen. In extremen Trockenjahren (1973, 1976, 1989 und 2003) weist der überwiegende Anteil der BZE-Punkte eine rote Einfärbung auf. Eine Ausnahme hiervon können in einzelnen Jahren die Küstenstandorte in Niedersachsen und Schleswig-Holstein

Bodenwasserhaushalt und Trockenstress

bilden. In Jahren, die weder durch extreme Trockenheit noch durch sehr hohe Niederschläge gekennzeichnet sind, fällt ein ausgeprägtes räumliches Muster des Wassermangels auf. Bereiche mit besonders intensivem Wassermangel sind zum einen die grobbodenreichen Mittelgebirgslagen, deren Wasservorräte schnell aufgebraucht sind, und zum anderen sehr niederschlagsarme Regionen (z. B. im Regenschatten des Harzes). In der zeitlichen Dynamik häuft sich seit Beginn der 1990er Jahre das Auftreten von erhöhtem Wasserstress. Neben dieser Zunahme von Trockenstress zeigen die Modellergebnisse auch eine Abnahme der Variabilität zwischen den BZE-Punkten. Die ist darauf zurückzuführen, dass in der Vergangenheit besser versorgte Standorte in der Zeitachse nach 1990 ebenfalls gehäuft Trockenstress erfahren.



Trinkwassergewinnungsgebiete liegen häufig im Wald
Foto: M. Spielmann



Pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicherfüllung in der Vegetationsperiode für die BZE-Punkte in Hessen im Zeitraum 1961 bis 2013. Verteilung (Median, Quantil-Bereich 25-75 %, 10 %- und 90 %-Quantil), dargestellt als relative Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 1961-1990.



Boden mit hohem Skelettanteil und geringer Wasserspeicherkapazität
Foto: NW-FVA

Feuchte und trockene Vegetationsperioden in Hessen

Die langfristige Entwicklung von Wassermangelperioden in Hessen wird aus der Abbildung links ersichtlich, in der die zeitliche Entwicklung der pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicherfüllung im Wurzelraum als Verteilung der relativen Abweichungen zum Referenzzeitraum 1961-1990 dargestellt ist. So können Jahre identifiziert werden, die in der Vegetationsperiode gegenüber dem Referenzzeitraum überdurchschnittlich feucht oder trocken waren. Sind Ende der 1970er bis Mitte der 1980er Jahre ein Großteil der BZE-Punkte überdurchschnittlich mit Wasser versorgt, liegt von 1989 bis 1992 das 90 %-Quantil unter 0, hier weisen also in vier aufeinanderfolgenden Vegetationsperioden mehr als 90 % der hessischen BZE-Punkte eine unterdurchschnittliche Wasserversorgung auf. In den extremen Trockenjahren 1976 und 2003 zeigten fast 75 % der BZE-Punkte eine sogar um mindestens 25 % niedrigere mittlere Speicherfüllung. Insgesamt zeigt sich auch hier, dass Jahre mit unterdurchschnittlicher Wasserversorgung während der Vegetationsperiode seit dem Ende der 1980er Jahre zugenommen haben. In den meisten Jahren seit 1989 liegt der Median unter 0, woraus ersichtlich wird, dass hier für die Mehrzahl der BZE-Punkte im Vergleich zu 1961-1990 unterdurchschnittliche Speicherfüllungen verzeichnet wurden. Diese Abnahme ist statistisch signifikant und auf die Zunahme der Temperaturen bei gleichbleibenden Niederschlagsverhältnissen zurückzuführen.

Fazit

Die durch den Klimawandel bedingten Veränderungen in Häufigkeit, Dauer und Intensität von Trockenperioden müssen bei einer klimasensitiven Betrachtung des Wasserhaushalts beachtet werden. Änderungen der Wasserverfügbarkeit im Zuge des Klimawandels müssen dementsprechend bei der Baumartenwahl, der waldbaulichen Behandlung und im Rahmen des Wald- und Grundwasserschutzes berücksichtigt werden. Ohne flächendeckende, verlässliche und dynamische Informationen zum Wasserhaushalt ist eine vorausschauend an den Klimawandel angepasste und damit stabile Forstwirtschaft nicht möglich. Entsprechend gilt es, dieses Modellsystem nicht nur wie dargestellt auf BZE-Punkte anzuwenden, sondern direkt in die Standortskartierung zu integrieren und außerdem die mögliche zukünftige Klimaentwicklung einschließlich deren Unsicherheiten in die Betrachtungen einzubeziehen.

Insekten und Pilze

Ulrich Bressemer, Michael Habermann, Rainer Hurling,
Andreas Rommerskirchen, Gitta Langer und Pavel Plašil

Witterung

Für das Jahr 2016 gab es insbesondere zu Beginn der Vegetationszeit vielerorts einen für die Entstehung und Entwicklung von Pilzschäden förderlichen Witterungsverlauf: Verregneter Start in den Mai, gefolgt von trockenem, sonnigem und zunehmend warmem Wetter, in der zweiten Mai-Dekade erneut Regen und im letzten Monatsdrittel feucht-warme Luft. Im Juni setzte sich die wechselhafte Witterung fort. Sehr zahlreich waren im Frühsommer die Meldungen zu Pilzschäden an jungen Trieben (z. B. Grauschimmelfäule/*Botrytis cinerea* und *Diplodia*-Triebsterben/*Sphaeropsis sapinea* an jungen Douglasien und Kiefern).

Ab Ende August war vielerorts eine auffällig verfrüht einsetzende Laubverfärbung vornehmlich an Altbuchen zu beobachten. Teilweise wurden auch grüne Blätter abgeworfen. Dies hat wahrscheinlich mit der anhaltenden Hitze und Trockenheit im August/September in Verbindung mit der physiologischen Beanspruchung vieler Buchen durch starke Fruktifikation zu tun. Besonders betroffen waren sonnenexponierte Kuppen-, Hang- und Randlagen und Bäume auf flachgründigen Standorten. Mitte September präsentierten sich die Buchen in manchen Bereichen hinsichtlich Laubverfärbung und Laubabfall bereits ähnlich wie im Frühwinter. Bezeichnend war, dass andere Baumarten (z. B. Eiche) zunächst keine vorzeitige Laubverfärbung zeigten. Diese Beobachtung unterstreicht erneut, dass die Buchenmast in diesem Zusammenhang ein gravierender Stressfaktor ist.



Verfrühte Laubfärbung bei der Buche

Foto: J. Eichhorn

Borkenkäfer

Da im Herbst 2015 in vielen Regionen die Befallsansprache von Borkenkäferschäden im Bestandesinneren schwierig war, konnten relativ viele Borkenkäfer in die Überwinterung entkommen. Dies führte zu Saisonbeginn im Frühjahr 2016 zu starkem Schwärmflug des Buchdruckers, der vielerorts schnell Stehndbefall an besonnten Fichtenrändern nach sich zog. Im Ergebnis konnten sich die Jungkäfer der ersten Generation oft etablieren, so dass zahlreiche Befallsherde der zweiten Generation im Bestandesinneren gefunden wurden.

Waldmaikäfer

Nachdem im Sommer 2015 im Raum Hanau-Wolfgang nach Maikäfer-Engerlingen des 3. Stadiums gegraben wurde, setzte im Mai 2016 erwartungsgemäß der Flug der aus dem Boden geschlüpften Käfer ein. An der Mehrzahl der Monitoringstandorte waren Aktivitäten der Maikäfer festzustellen. Daher wird wiederum mit nennenswerter Eiablage gerechnet, so dass vor Kulturbegründungen der Engerlingsbesatz mittels Probegrabungen geprüft werden sollte.



Maikäferfraß

Foto: T. Ullrich

Eichenfraßgesellschaft

Im Jahr 2016 wurden lokale Licht- bis Kahlfraßereignisse durch die Eichenfraßgesellschaft auf insgesamt ca. 400 Hektar gemeldet. Davon wurden auf ca. 30 Hektar Schäden durch den Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea* L.) verursacht. Damit ist der Umfang der gemeldeten Schäden durch die Eichenfraßgesellschaft im Vergleich zum Vorjahr erheblich zurückgegangen.

Fraßgeschehen an Alteichen und Vitalität der Eichen

In den Trägerländern der NW-FVA werden von Seiten der Abt. Waldschutz dauerhaft auf 45 Beobachtungsflächen etwa 2100 Alteichen zu verschiedenen Terminen im Jahresverlauf vor dem Hintergrund der „Eichenkomplexerkrankung“ beobachtet. Im Frühjahr 2016 war auf allen Flächen nur unbedeutender Fraß durch die Eichenfraßgesellschaft zu verzeichnen (im Mittel unter 1 %). Selten waren an einzelnen Eichen Blattverluste von 10 % oder 20 % durch Fraß zu erkennen.

Bei der „Schwerpunktansprache Krone/Stamm“ im August 2016 waren die Eichen in den Beobachtungsbeständen im Mittel meist deutlich besser belaubt als in den Vorjahren. Allerdings konnten sich Bäume, die in den vergangenen Jahren bereits sehr hohe Blattverluste hatten, nicht wesentlich regenerieren. Letzteres traf auch auf die Eichen in der Rhein-Main-Ebene zu. Hier war keine deutliche Verbesserung der Belaubungszustände festzustellen.

Eichen in geschlossenen Beständen haben meist geringere Blattverluste als solche in aufgelichteten Bestandteilen oder an Bestandeslöchern. Frischer Schleimfluss kommt derzeit kaum vor, auch Mehltau ist in diesem Jahr eher unbedeutend.

Insekten und Pilze

Bereits im Frühjahr 2016 wurden auf den Beobachtungsflächen zehn (ca. 0,5 %) neu abgestorbene Eichen seit der Ansprache im Sommer 2015 festgestellt. In der letzten Erkrankungsphase der „Eichenkomplexerkrankung“ tritt oftmals Befall mit Hallimasch (*Armillaria* sp.) auf, der über die hervorgerufene Wurzelfäule die Eichen zum Absterben bringt.

Eschentriebsterben

Das Eschentriebsterben (Erreger: *Hymenoscyphus fraxineus*) ist auf großer Fläche präsent. Es führte örtlich bereits zur Auflösung von Bestandteilen und zum Absterben von Eschenaufforstungen.

Durch die Bildung von Wasserreisern und Sekundärkronen vermittelten viele Eschen in 2016 zunächst den Eindruck scheinbarer Erholung. Zudem setzte die Neuinfektion im Kronenbereich, vermutlich infolge gebietsweiser Niederschlagsdefizite in Frühjahr/Frühsummer 2016, etwas später ein und war in den entsprechenden Gebieten erst ab Ende Juni/Anfang Juli zu erkennen.

Bei sehr starken Kronenschäden etwa ab Blattverlusten von 70 % muss im Wurzelraum mit Befall durch Hallimasch (*Armillaria* sp.) und andere Wurzelpilze gerechnet werden.



Eschentriebsterben

Foto: NW-FVA, Abteilung Waldschutz

Diplodia-Triebsterben der Kiefer

Dem Auftreten des *Diplodia*-Triebsterbens (Erreger: *Sphaeropsis sapinea*) geht in der Regel eine Schwächung der Bäume voraus. Maßgebliche prädisponierende Faktoren können nach derzeitiger Einschätzung sein: Trockenheit/Hitze (siehe Niederschlagsdefizite 2015 und 2016), Überflutung von Flächen, Hagelschlag mit Rindenverletzungen, Fraß an den Nadeln, Mistelbefall und Wurzelfäulen.

Zudem hat sich der milde Winter 2015/16 im Zusammenhang mit aktuellen *Diplodia*-Fällen 2016 vermutlich auch ausgewirkt. Bekannt ist eine „physiologische Schwächung“ der Kiefer durch ausgeprägte Wärmephasen im Hochwinter.

Im Jahr 2016 ist das *Diplodia*-Triebsterben verstärkt aufgetreten. Bereits zu Beginn der Vegetationszeit 2016 konnte

der Erreger des Triebsterbens mehrfach in geschädigten Kulturen bzw. Naturverjüngungen von Kiefer und Douglasie nachgewiesen werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird das *Diplodia*-Triebsterben bei Waldkiefern entlang eines Transekts über die Trägerländer der NW-FVA hinaus untersucht (Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Bayern, Thüringen, Hessen, Baden-Württemberg).



Absterbende Krone einer Waldkiefer infolge des *Diplodia*-Triebsterbens

Foto: NW-FVA, Abteilung Waldschutz

Hallimasch

Dem Befall durch Hallimasch (*Armillaria* sp.) geht in der Regel eine Schwächung der Wirtsbäume voraus. Vom Hallimasch-Befall betroffen sind u. a. Buchen- und Douglasienkulturen, Traubeneichen im Zusammenhang mit der Eichenkomplexerkrankung, durch Stauwasser geschädigte Altbuchen in Verbindung mit Wurzelschwammbefall und Fichten in Verbindung mit Befall durch Wurzelschwamm.



Befall mit Hallimasch (weißes Fächermycel) am Stammfuß einer stark durch Eschentriebsterben geschädigten Esche

Foto: NW-FVA, Abteilung Waldschutz

Forstliches Umweltmonitoring

Johannes Eichhorn, Uwe Paar, Jan Evers, Andreas Schulze, Jörg Weymar, Henning Meeseburg, Michael Spielmann und Inge Dammann

Aufgaben

Die natürliche zeitliche Veränderung der Waldbestände, Managementmaßnahmen und vor allem biotische und abiotische Einflüsse der Umwelt führen zu Veränderungen in Waldökosystemen. Hinzu kommt, dass die Ansprüche der Gesellschaft an den Wald weit gefächert sind und gesellschaftliche Veränderungen widerspiegeln. Während noch vor wenigen Jahrzehnten der Kohlenstoffspeicherung in Waldböden keine besondere Bedeutung zugemessen wurde, erlangt heute der Kohlenstoffvorrat in Waldböden und seine Veränderung ein zunehmendes wissenschaftliches, politisches und wirtschaftliches Interesse. Waldfunktionen als Ausdruck gesellschaftlicher Erwartungen können nur dann nachhaltig entwickelt, gesichert und bewirtschaftet werden, wenn sie in ihrem Zustand und in ihrer Veränderung zahlenmäßig darstellbar sind.

Das Forstliche Umweltmonitoring leistet dazu einen wesentlichen Beitrag. Es erfasst mittel- bis langfristig Einflüsse der Umwelt auf die Wälder wie auch deren Reaktionen, zeigt Veränderungen von Waldökosystemen auf und bewertet diese auf der Grundlage von Referenzwerten. Die Forstliche Umweltkontrolle leistet Beiträge zur Daseinsvorsorge, arbeitet die Informationen bedarfsgerecht auf, erfüllt Berichtspflichten, gibt Entscheidungshilfen für die Forstpraxis und berät die Politik auf fachlicher Grundlage.

Konzept

Grundsätzlich werden im Forstlichen Umweltmonitoring waldfächenrepräsentative Übersichtserhebungen auf Rasterebene (Level I), die intensive Dauerbeobachtung ausgewählter Waldökosysteme im Rahmen verschiedener Beobachtungsprogramme (Bodendauerbeobachtungsprogramm (BDF), Level II, Waldökosystemstudie Hessen (WÖSSH)) sowie Experimentalflächen unterschieden.

Das Konzept umfasst folgende Monitoringprogramme, wobei einzelne Monitoringflächen mehreren Programmen zugeordnet sein können:

- Level I (Übersichtserhebungen)
- BDF (Bodendauerbeobachtungsprogramm)
- Level II (ICP Forests Intensive Monitoring plots)
- Level II Core (Level II mit intensivierten Erhebungen)
- WÖSSH (Waldökosystemstudie Hessen)
- Experimentalflächen; dazu zählen:
Forsthydrologische Forschungsgebiete, Flächen zur Bodenschutzkalkung und zur Nährstoffergänzung sowie zur wasser- und stoffhaushaltsbezogenen Bewertung von Nutzungsalternativen.

An den Level I-Punkten werden folgende Erhebungen durchgeführt:

- Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren (auf allen Stichprobenpunkten der Waldzustandserhebung (WZE) und der Bodenzustandserhebung (BZE)).
- Auf den BZE-Punkten werden zusätzlich Baumwachstum, Nadel-/Blatternahrung, Bodenvegetation und der

morphologische, physikalische und chemische Bodenzustand untersucht. Auf dem BZE-Netz erfolgt zusätzlich in einer fünften Traktecke eine Erhebung von Daten entsprechend dem Verfahren der Bundeswaldinventur.

Auf Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) werden langfristige standorts-, belastungs- und nutzungsspezifische Einflüsse auf Waldböden erfasst. BDF dienen als Eichstelle und der Vorsorge für rechtzeitige Maßnahmen zum Schutz von Böden in ihrer Substanz und ihren Funktionen. Das BDF-Programm umfasst für forstlich genutzte Flächen folgende Erhebungen (Höper & Meeseburg 2012):

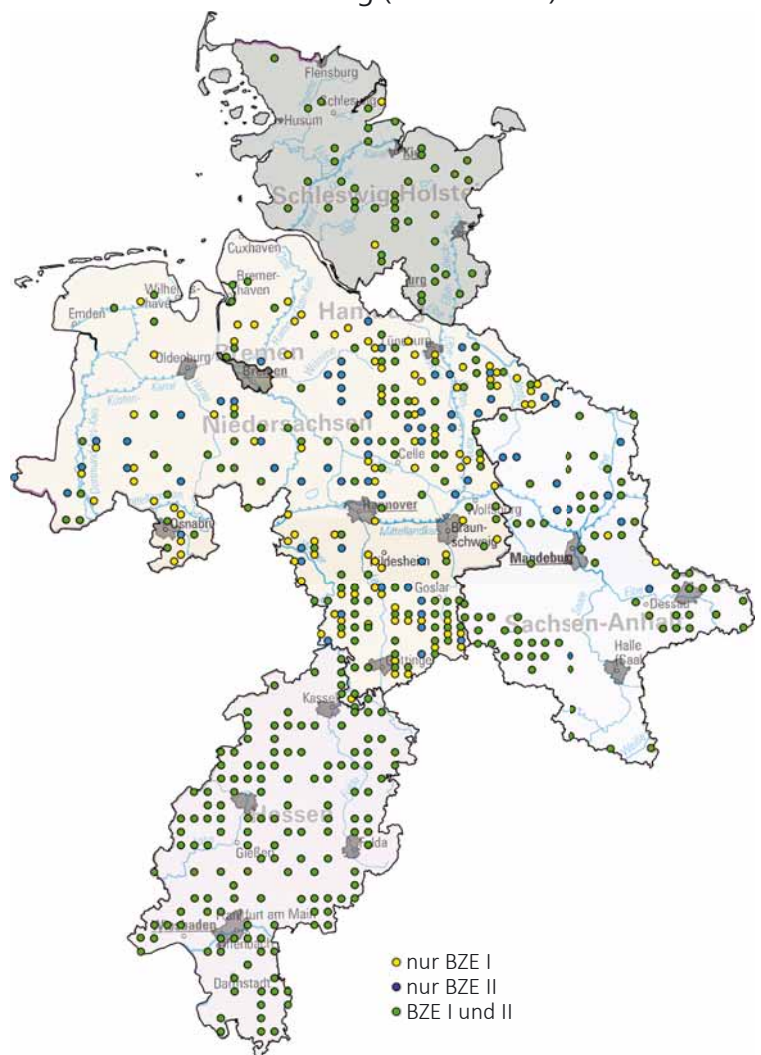
- Chemischer und physikalischer Bodenzustand, Nadel-/Blatternahrung, Baumwachstum, Bodenvegetation, Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren.

Auf Intensiv-BDF werden zusätzlich Erhebungen zum Wasser- und Stoffhaushalt von Waldböden durchgeführt:

- Deposition, Bodenlösung, Streufall, Meteorologie und Bodenhydrologie.

Auf den Flächen der Waldökosystemstudie Hessen werden auf repräsentativen Standorten Waldökosystemzustände und -prozesse beobachtet, um Veränderungen von Waldfunktionen durch Umwelteinflüsse festzustellen. Die Erhebungen auf WÖSSH-Flächen beinhalten folgende Indikatoren:

Übersichtserhebung (Level I - BZE)



Forstliches Umweltmonitoring

- Deposition, Bodenlösung, Nadel-/Blatternahrung, Baumwachstum, Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren, chemischer und physikalischer Bodenzustand sowie Bodenvegetation.

Das Monitoring auf Level II-Flächen (Standard) umfasst nach der Modifizierung im Rahmen der ICP Forests Manualrevision 2010 folgende Erhebungen:

- Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren, Baumwachstum, Nadel-/Blatternahrung, Bodenvegetation, Deposition, Bodenzustand.

Level II Core-Flächen sind eine Unterstichprobe der Level II-Flächen. Sie haben die Zielsetzung einer möglichst umfassenden Beobachtung. Neben den Erhebungen auf Level II-Standardflächen sind hier folgende Erhebungen verpflichtend durchzuführen (ICP Forests 2010):

- Streufall, Baumphänologie, Baumwachstum (intensiviert), Bodenlösung, Bodenfeuchte, Luftqualität, Meteorologie.

Die im Forstlichen Umweltmonitoring verwendeten Instrumente der Ökosystemüberwachung stehen europaweit harmonisiert nach den Grundsätzen des ICP Forests (2010), der BDF-Arbeitsanleitung (Barth et al. 2000), der BZE-Arbeitsanleitung (Wellbrock et al. 2006) sowie dem Handbuch Forstliche Analytik (BMELV (Hrsg.) 2005) zur Verfügung. Sie garantieren die Qualität und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Das Untersuchungsdesign der Forstlichen Umweltkontrolle für die Bereiche Level I, Intensives Forstliches Umweltmonitoring und Experimentalflächen für die Länder Hessen, Niedersachsen, Bremen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein zeigen die Abbildungen unten.

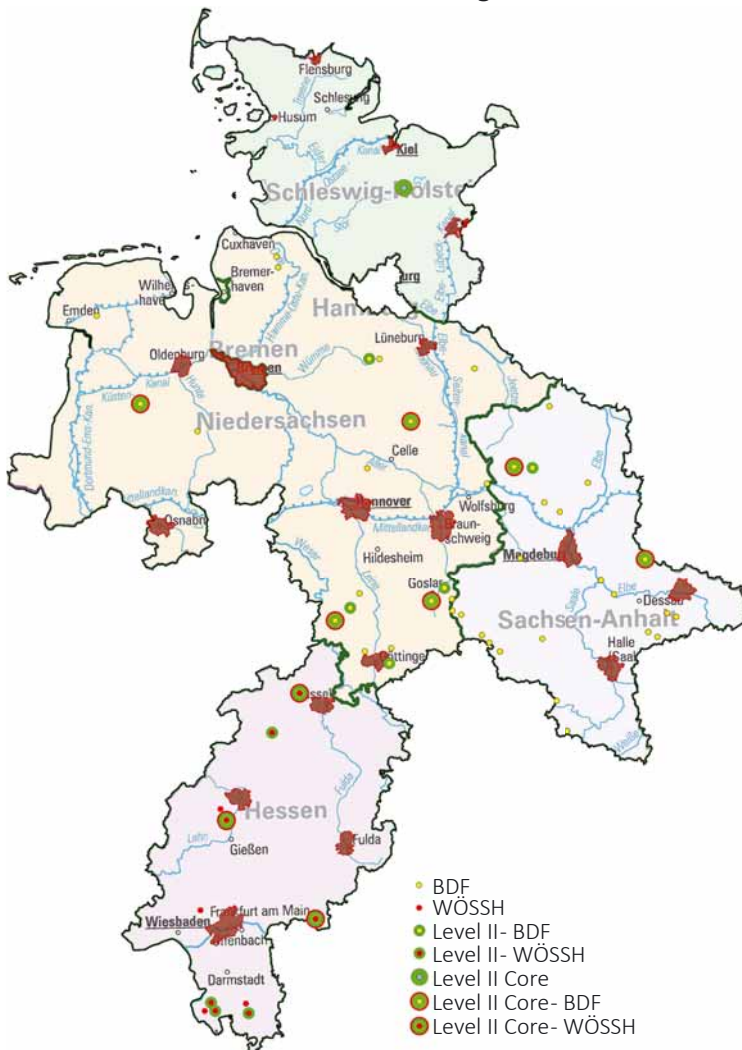
In Hessen umfasst das Level I-Netz 139 Inventurpunkte, das Intensive Forstliche Umweltmonitoring 11 Monitoringflächen und 27 Experimentalflächen. Das hessische Bodendauerbeobachtungsprogramm fällt in die Zuständigkeit des HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie). Die hessischen Bodendauerbeobachtungsflächen sind daher nicht in der Abbildung unten dargestellt.



Schulung der Kronenansprache

Foto: M. Spielmann

Intensives Monitoring



Experimentalflächen



Forstliches Umweltmonitoring

Waldzustandserhebung – Methodik und Durchführung

Die Waldzustandserhebung ist Teil des Forstlichen Umweltmonitorings in Hessen. Sie liefert als Übersichtserhebung Informationen zur Vitalität der Waldbäume unter dem Einfluss sich ändernder Umweltbedingungen.

Aufnahmeumfang

Die Waldzustandserhebung erfolgt auf mathematisch-statistischer Grundlage. Auf einem systematisch über Hessen verteilten Rasternetz werden seit 1984 an jedem Erhebungspunkt Stichprobenbäume begutachtet.

Die Rasterweite des landesweiten Stichprobennetzes beträgt 8 km x 8 km, in der Rhein-Main-Ebene werden zusätzliche Erhebungen im 4 km x 4 km-Raster durchgeführt. Die landesweite Auswertung erfolgte 2016 auf der Basis von 132 Punkten, für die Rhein-Main-Ebene wurden insgesamt 49 Punkte ausgewertet. Dieser Aufnahmeumfang ermöglicht repräsentative Aussagen zum Waldzustand auf Landesebene und für die Rhein-Main-Ebene. Für den Parameter mittlere Kronenverlichtung zeigt die Tabelle die 95 %-Konfidenzintervalle für die Baumarten und Altersgruppen der WZE-Stichprobe 2016. Je weiter der Vertrauensbereich, desto unschärfer sind die Aussagen. Die Weite des Vertrauensbereiches wird im Wesentlichen beeinflusst durch die Anzahl der Stichprobenpunkte in der jeweiligen Auswerteeinheit und die Streuung der Kronenverlichtungswerte. Für relativ homogene Auswerteeinheiten mit relativ gering streuenden Kronenverlichtungen sind enge Konfidenzintervalle auch bei einer geringen Stichprobenanzahl sehr viel leichter zu erzielen als für heterogene Auswerteeinheiten, die sowohl in der Altersstruktur als auch in den Kronenverlichtungswerten ein breites Spektrum umfassen. Mit dem 8 km x 8 km-Raster werden – mit Abstrichen bei der jüngeren Buche

95 %-Konfidenzintervalle für die Kronenverlichtung der Baumartengruppen und Altersstufen der Waldzustandserhebung 2016 in Hessen. Das 95 %-Konfidenzintervall (= Vertrauensbereich) gibt den Bereich an, in dem der wahre Mittelwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegt.

Baumarten- gruppe	Alters- gruppe	Anzahl Bäume	Anzahl Plots	Raster	95%-Konfidenz- intervall (+/-)
Buche	alle Alter	1108	91	8x8 km	2,8
	bis 60 Jahre	110	18	8x8 km	5,4
	über 60 Jahre	998	74	8x8 km	2,6
Eiche	alle Alter	322	54	8x8 km	2,6
	bis 60 Jahre	47	11	8x8 km	3,5
	über 60 Jahre	275	44	8x8 km	2,8
Fichte	alle Alter	627	58	8x8 km	4,2
	bis 60 Jahre	283	24	8x8 km	3,1
	über 60 Jahre	344	35	8x8 km	3,2
Kiefer	alle Alter	571	50	8x8 km	2,2
	bis 60 Jahre	27	7	8x8 km	11,9
	über 60 Jahre	544	43	8x8 km	2,3
andere Laubbäume	alle Alter	306	42	8x8 km	4,9
	bis 60 Jahre	195	24	8x8 km	4,2
	über 60 Jahre	111	22	8x8 km	7,2
andere Nadelbäume	alle Alter	234	42	8x8 km	3,5
	bis 60 Jahre	132	24	8x8 km	3,4
	über 60 Jahre	102	20	8x8 km	7,2
alle Baumarten	alle Alter	3168	132	8x8 km	1,9
	bis 60 Jahre	794	43	8x8 km	2,3
	über 60 Jahre	2374	103	8x8 km	1,7



Schulung der WZE-Aufnahmeteams Foto: M. Spielmann

und Kiefer, den anderen Laubbäumen (über 60 Jahre) und den anderen Nadelbäumen (über 60 Jahre) – für die Baumartengruppen belastbare Ergebnisse für die Kronenverlichtungswerte erzielt.

Aufnahmeparameter

Bei der Waldzustandserhebung erfolgt eine visuelle Beurteilung des Kronenzustandes der Waldbäume, denn Bäume reagieren auf Umwelteinflüsse u. a. mit Änderungen in der Belaubungsdichte und der Verzweigungsstruktur. Wichtigstes Merkmal ist die Kronenverlichtung der Waldbäume, deren Grad in 5 %-Stufen für jeden Stichprobenbaum erfasst wird. Die Kronenverlichtung wird unabhängig von den Ursachen bewertet, lediglich mechanische Schäden (z. B. das Abbrechen von Kronenteilen durch Wind) gehen nicht in die Berechnung der Ergebnisse der Waldzustandserhebung ein. Die Kronenverlichtung ist ein unspezifisches Merkmal, aus dem nicht unmittelbar auf die Wirkung von einzelnen Stressfaktoren geschlossen werden kann. Sie ist daher geeignet, allgemeine Belastungsfaktoren der Wälder aufzuzeigen. Bei der Bewertung der Ergebnisse stehen nicht die absoluten Verlichtungswerte im Vordergrund, sondern die mittel- und langfristigen Trends der Kronenentwicklung. Zusätzlich zur Kronenverlichtung werden weitere sichtbare Merkmale an den Probestämmen wie der Vergilbungsgrad der Nadeln und Blätter, die aktuelle Fruchtbildung sowie Insekten- und Pilzbefall erfasst.

Mittlere Kronenverlichtung

Die mittlere Kronenverlichtung ist der arithmetische Mittelwert der in 5 %-Stufen erhobenen Kronenverlichtung der Einzelbäume.

Starke Schäden

Unter den starken Schäden werden Bäume mit Kronenverlichtungen über 60 % sowie Bäume mittlerer Verlichtung (30-60 %), die zusätzlich Vergilbungen über 25 % aufweisen, zusammengefasst.

Stoffeinträge

Birte Scheler

Wald filtert durch seine große Kronenoberfläche stärker als alle anderen Landnutzungsformen gas- und partikelförmige Stoffe aus der Luft. Aufgrund dieses Filtereffektes ist das Ökosystem Wald besonders stark durch anthropogen verursachte Sulfatschwefel- und Stickstoffeinträge (Nitrat und Ammonium) belastet. 1984 wurde in Hessen mit der systematischen Erfassung von Stoffeinträgen in Wälder begonnen, um die Wirkungen erhöhter Einträge und damit verbundener Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme wie beispielsweise Grundwasser zu untersuchen. Derzeit wird die Deposition in sieben Buchen- und zwei Fichtenbeständen sowie je einer Kiefern- und Eichenfläche erfasst. Die Stoffeinträge werden jeweils auf einer Freifläche (Freilandniederschlag) und einer Bestandesmessfläche (Bestandesniederschlag) beobachtet. In Buchenbeständen wird auch der dort quantitativ bedeutsame Stammablauf gemessen. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich, 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdpositionsraten bestimmt.

Die Höhe der Stoffeinträge wird maßgeblich durch verschiedene Faktoren wie Niederschlagsmenge und -verteilung, Baumart, Bestandeshöhe, Kronenrauigkeit oder lokale Emittenten bestimmt. Aus diesem Grund sind die Stoffeinträge im niederschlagsreichen Bergland (Fürth/Odenwald, Spessart und Königstein) höher als in niederschlagsärmeren Gebieten wie der Rhein-Main-Ebene oder dem mittelhessischen Raum. Beim Vergleich der Baumarten sind Fichten- und Douglasienbestände wegen der ganzjährigen und im Vergleich mit Kiefern dichteren Benadelung stärker durch Stoffeinträge belastet als Buchen-, Eichen- und Kiefernbestände.

Niederschlag

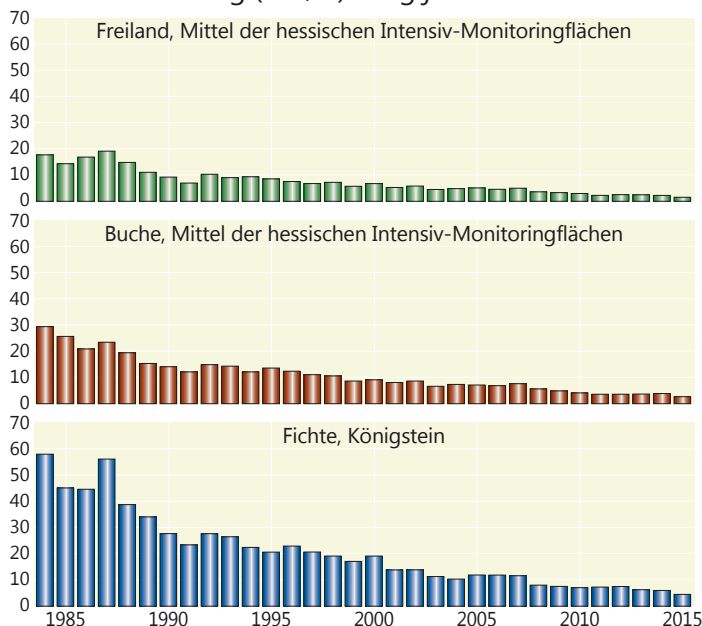
2015 sind im Freiland auf allen hessischen Monitoring-Flächen z. T. erheblich geringere Niederschläge gefallen als im Mittel der Jahre 2010-2014. In Nord- und Mittelhessen waren die Abweichungen geringer als in Südhessen und betragen -38 mm in Zierenberg (Nordhessen), -82 mm in Krofdorf (Mittelhessen) und zwischen -251 mm (Hess. Ried) und -275 mm (Fürth) in Südhessen.

Beim Bestandesniederschlag betragen die negativen Abweichungen zum Mittel 2010-2014 zwischen 12 mm (Zierenberg Buche) und 237 mm (Hess. Ried Buche).

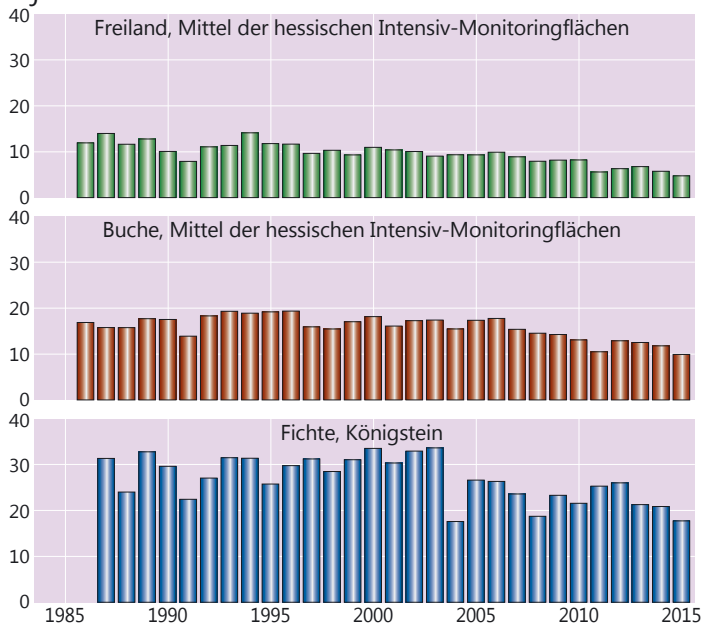
Schwefel

Durch die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung ist der Schwefeleintrag (jeweils gemessen als Sulfatschwefel, $\text{SO}_4\text{-S}$) stark zurückgegangen. Er lag 2015 pro Hektar unter Buche zwischen 2,0 kg (Krofdorf, Hess. Ried) und 3,5 kg (Zierenberg), unter Fichte bei 4,5 kg (Königstein, Fürth) und im Freiland zwischen 1,1 kg (Krofdorf, Hess. Ried) und 2,3 kg (Fürth). Obwohl die Schwefeleinträge sich in den letzten Jahren bereits auf einem relativ niedrigen Niveau bewegten, haben sie 2015 im Vergleich zum Mittel der Jahre 2010-2014 auf allen Flächen nochmals deutlich abgenommen. Im Freiland betrug die Abnahme bis zu 1,1 kg (Fürth), mit der Gesamtdposition unter Buche zwischen 1,0 kg (Kellerwald) und 1,6 kg (Fürth) und unter Fichte bis zu 2,4 kg (Königstein). Auf allen Monito-

Schwefel-Eintrag ($\text{SO}_4\text{-S}$) in kg je Hektar und Jahr



Stickstoff-Eintrag ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) in kg je Hektar und Jahr



ringflächen wurde 2015 der niedrigste Schwefeleintrag seit Beginn der Messungen registriert. Die Säurebelastung des Ökosystems durch Schwefeleinträge sank damit 2015 je Hektar auf 0,24 kmol_c unter Fichte (Königstein, Fürth), unter Buche auf Werte zwischen 0,11 kmol_c (Krofdorf) und 0,16 kmol_c (Fürth, Zierenberg) sowie unter Eiche auf 0,13 kmol_c und unter Kiefer auf 0,11 kmol_c .

Stickstoff

Stickstoff, ein Hauptnährstoff der Pflanzen, wird einerseits in oxidierter Form als Nitrat (Quellen: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) andererseits in reduzierter Form als Ammonium (landwirtschaftliche Quellen) in das Ökosystem eingetragen. Das Verhältnis von Ammonium zu Nitrat betrug im langjährigen Mittel (1994-2014) annähernd 50:50.

Der Nitratstickstoffeintrag hat im Freiland und der Gesamtdposition aller vier Baumarten seit Untersuchungsbeginn auf allen Flächen signifikant abgenommen. Er betrug 2015

Stoffeinträge



Intensiv-Monitoringfläche Zierenberg

Foto: J. Weymar

im Hessenmittel pro Hektar im Freiland 2,4 kg und unter Buche 5,1 kg (Gesamtdeposition mit Stammablauf). Unter Fichte war er am höchsten und betrug pro Hektar 8,6 kg in Königstein und 10,4 kg in Fürth. Im Vergleich zum Mittel der Jahre 2010-2014 reduzierte sich der Nitratreintrag je Hektar unter Buche um bis zu 1,3 kg (Spessart), um bis zum 3,5 kg unter Fichte (Königstein) und im Freiland um Werte zwischen 0,5 kg (Fürth) und 1,6 kg (Königstein).

Ein uneinheitliches Bild zeigt sich weiterhin beim Eintrag von Ammonium. Während in Südhessen auf den drei Flächen im Hessischen Ried (Buche, Eiche, Kiefer) und in Fürth (Fichte) ein signifikanter Rückgang des Ammoniumstickstoffeintrags sowohl im Freiland als auch mit der Gesamtdeposition beobachtet werden kann, ist in sechs Waldbeständen in Nord- und Mittelhessen trotz teilweise signifikanter Rückgänge im Freiland keine Abnahme der Gesamtdeposition erkennbar. Im Kellerwald hingegen hat der Ammoniumeintrag mit der Gesamtdeposition deutlich abgenommen, obwohl die Einträge im Freiland seit 2006 (Messbeginn) nur gering rückläufig sind.

Im Hessenmittel betrug 2015 der Ammoniumstickstoffeintrag pro Hektar im Freiland 2,4 kg und unter Buche 4,7 kg. In den beiden Fichtenbeständen lag er bei 9,1 kg (Königstein) bzw. 12 kg (Fürth). Damit hat der Ammoniumeintrag im Vergleich zum Mittel der Jahre 2010-2014 im Hessenmittel unter Buche um 1,4 kg und im Freiland um 0,6 kg abgenommen, während er im Fürth unter Fichte um 0,8 kg je Hektar angestiegen ist.

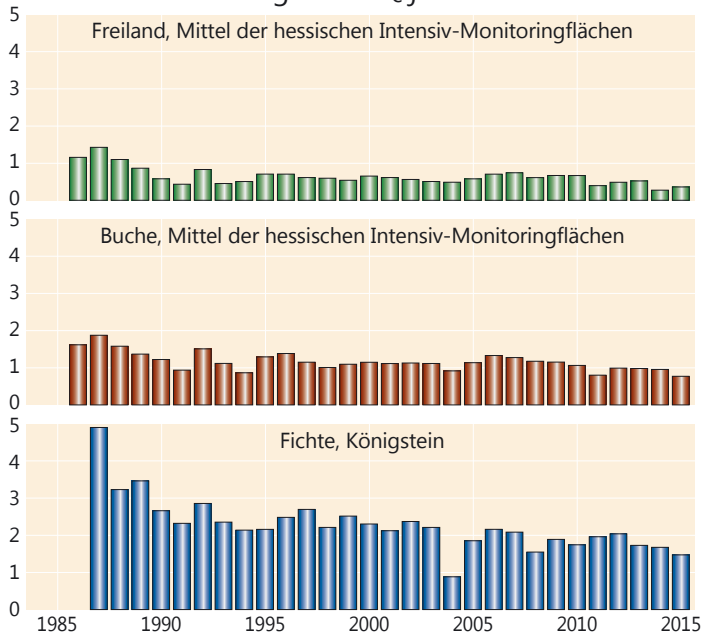
Trotz verschiedener Bemühungen zur Reduktion der Stickstoffemissionen und hieraus resultierender rückläufiger Einträge übersteigt der atmosphärische Stickstoffeintrag nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum, was gravierende Konsequenzen für den Wald sowie angrenzende Ökosysteme wie Fließ- und Grundgewässer zur Folge haben kann.

Gesamtsäure

Der aktuelle Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid abzüglich der mit dem Niederschlag eingetragenen Basen Calcium, Magnesium und Kalium (jeweils nicht see-salzbürtige Anteile; Gauger et al. 2002).

2015 betrug der aktuelle Gesamtsäureeintrag pro Hektar 0,4 kmol_c im Freiland (Hessenmittel), 0,8 kmol_c unter Buche (Hessenmittel) und unter Fichte 1,5 kmol_c (Königstein) bzw. 1,7 kmol_c (Fürth).

Gesamtsäure-Eintrag in kmol_c je Hektar und Jahr



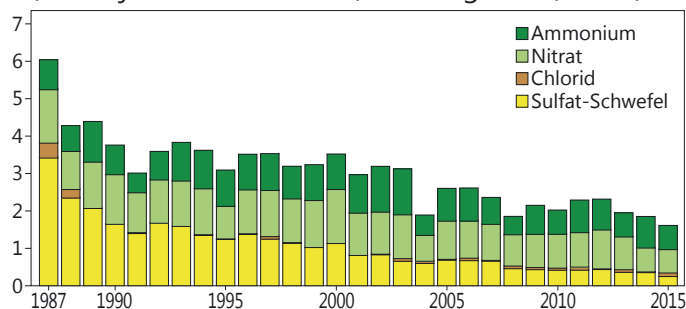
Anteile der Säurebildner

Anhand der 29jährigen Zeitreihe des Gesamtsäureeintrags unter Fichte in Königstein kann eindrucksvoll gezeigt werden, dass sich durch die Reduktion der Schwefeleinträge die Bedeutung der einzelnen Säurebildner deutlich verschoben hat.

1987 betrug die Säurebelastung durch Sulfatschwefel in Königstein 3,4 kmol_c je Hektar. Der Anteil von Schwefel am Gesamtsäureeintrag betrug in diesem Jahr 56 %. Der Schwefeleintrag sank in den folgenden Jahrzehnten kontinuierlich und damit die Säurebelastung auf 0,24 kmol_c (2015) bzw. 15 % des Gesamtsäureeintrags.

Die Säurebelastung durch Nitrat schwankte zwischen maximal 1,4 kmol_c je Hektar (1986, 2000) und 0,6 kmol_c (2015), der relative Anteil von Nitrat am Gesamtsäureeintrag stieg von 24 % (1987, 1988) auf 38 % (2015). Die Säurebelastung durch Ammonium liegt in der gleichen Größenordnung und bewegte sich zwischen 1,2 kmol_c (2002, 2003) und 0,5 kmol_c (1991, 2008). Im Mittel der letzten fünf Jahre ist der anorganische Stickstoffeintrag (NH₄-N + NO₃-N) für 80 % des Gesamtsäureeintrags verantwortlich.

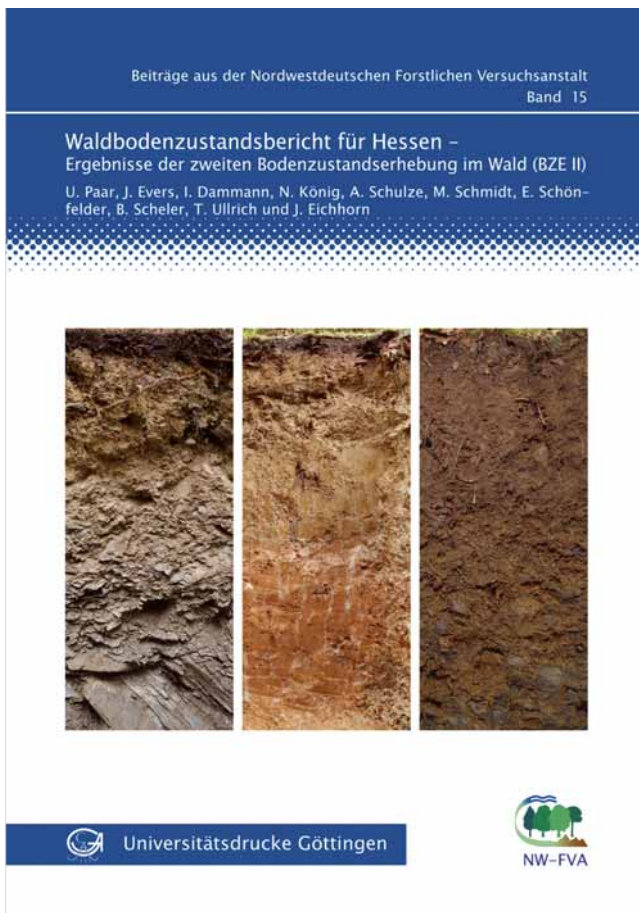
Anteile der Säurebildner am Gesamtsäure-Eintrag (kmol_c je Hektar und Jahr) in Königstein (Fichte)



kmol_c (Kilomol charge) = Menge an Ladungsäquivalenten. Sie berechnet sich wie folgt: Elementkonzentration multipliziert mit der Wertigkeit des Moleküls (=Ladungsäquivalente pro Molekül), dividiert durch das Molekulargewicht. Multipliziert mit der Niederschlagsmenge ergibt sich die Fracht an Ladungsäquivalenten in kmol_c je Hektar

Hauptergebnisse der Waldbodenzustandserhebung in Hessen (BZE II)

Jan Evers, Uwe Paar, Inge Dammann, Egbert Schönfelder, Marcus Schmidt, Nils König und Johannes Eichhorn



Der nachfolgende Beitrag fasst die Ergebnisse des in Kürze erscheinenden Waldbodenzustandsberichtes für Hessen (BZE II) zusammen.

Die bundesweit systematische Stichprobeninventur zum Zustand der Waldböden gibt ein umfassendes und flächendeckendes Bild hinsichtlich des aktuellen Zustandes und der Veränderungen der Waldböden.

Die erste Bodenzustandserhebung (BZE I) wurde in Hessen in der Zeit von Anfang 1992 bis Anfang 1993 durchgeführt. Die Wiederholungsinventur (BZE II) fand schwerpunktmäßig in der Zeit von 2006 bis 2008 statt. Beide Erhebungen basieren auf dem systematischen repräsentativen 8 x 8 km-Rasternetz mit insgesamt 139 Aufnahmepunkten.

Bei der BZE II wurden folgende Merkmalsgruppen erfasst: Forstliche Daten und allgemeine Angaben, Boden (Profilbeschreibung, Bodenchemie sowie Bodenphysik), Nadel-/Blatternahrung, Bestandesdaten, Vitalität (Waldzustandserhebung) und Bodenvegetation.

Die Ergebnisse der BZE II belegen, dass die BZE-Stichprobe die Verhältnisse des Waldes in Hessen sehr gut abbildet. So entsprechen die Verteilungen der Trophiestufen und Baumartenteile für die BZE-Punkte den Verteilungen in der Standortskartierung und Forsteinrichtung.

Bodenchemische Verhältnisse

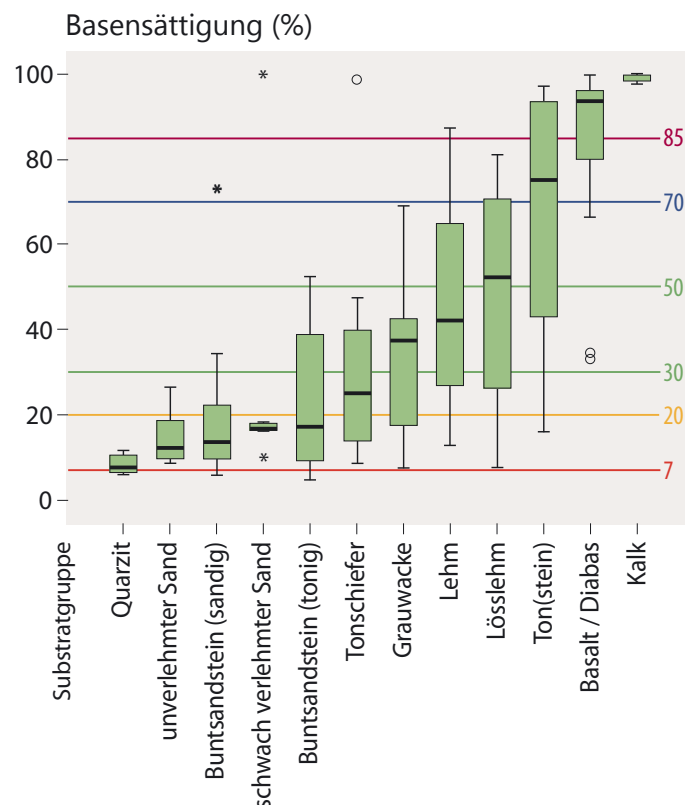
Mit der Aufgliederung nach Substratgruppen (siehe Abbildung rechts) werden Muster deutlich, wie die bodenchemische Situation nach Standorten variiert. So befinden sich die Böden aus Quarzit, schwach verlehmt und un-

verlehmt Sand und Buntsandstein im Median unterhalb von 20 % Basensättigung und damit lediglich im als gering eingestuften Bewertungsbereich.

Darüber hinaus zeigt die Einteilung nach dem Kalkungsstatus der BZE-Punkte, dass die gebildeten Kollektive sich seit der BZE I unterschiedlich entwickelt haben. Ausgeschieden wurden die Gruppen (1) „entfällt“, zu der die Substratgruppen gehören, die nicht für eine Kalkung vorgesehen sind (Kalk, Basalt/Diabas, Zechstein, Sande) und (2) die Kalkungskulisse, zu der die Substratgruppen gehören, die für eine Kalkung vorgesehen sind. Diese Kalkungskulisse beinhaltet die gekalkten Punkte, an denen vor der Probenahme der BZE II Kalkungen stattgefunden haben und die ungekalkten Punkte, an denen bis 2007 noch keine Kalkung stattgefunden hat.

Für Hessen insgesamt zeigt sich eine signifikante Verbesserung nur in der Tiefenstufe 0-5 cm, in den anderen Tiefenstufen gab es keine Veränderung der Basensättigung (Teilgrafiken oben, Abbildung Seite 28). Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung liegen vorwiegend im mittleren Bewertungsbereich zwischen 30 und 50 % und damit meist über dem Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt (rote Kreise). Auf Profilebene werden in Hessen durchschnittlich 40 % Basensättigung erreicht. Dies liegt genau im mittleren, grün dargestellten Bewertungsbereich. Eine Veränderung auf Profilebene gab es nicht (kleine Teilgrafiken Mitte, Abbildung Seite 28).

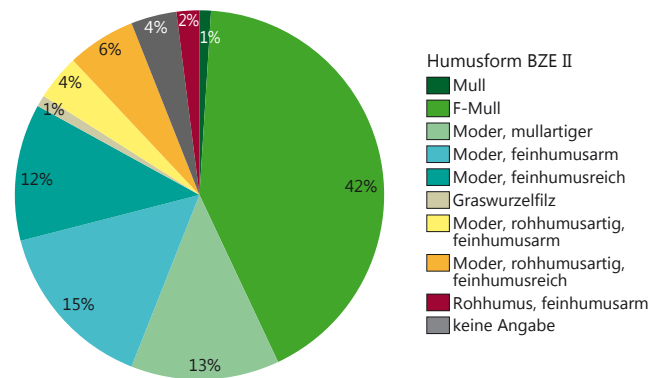
Die Ergebnisse der bodenchemischen Analysen der BZE I und II belegen die Wirkungen der Bodenschutzkalkungen auf den Waldboden: Durch die Kalkung werden Basenverluste, vor allem infolge hoher Säureeinträge, aber auch durch Sulfatausträge, Biomassenentzug und verringerte ba-



Durchschnittliche Basensättigung im Mineralboden in der BZE II nach Substratgruppen in hessischen Waldböden bis 90 cm Bodentiefe (die waagerechten Linien entsprechen den Bewertungsbereichen nach der AK-Standortskartierung)

Hauptergebnisse der Waldbodenzustandserhebung in Hessen (BZE II)

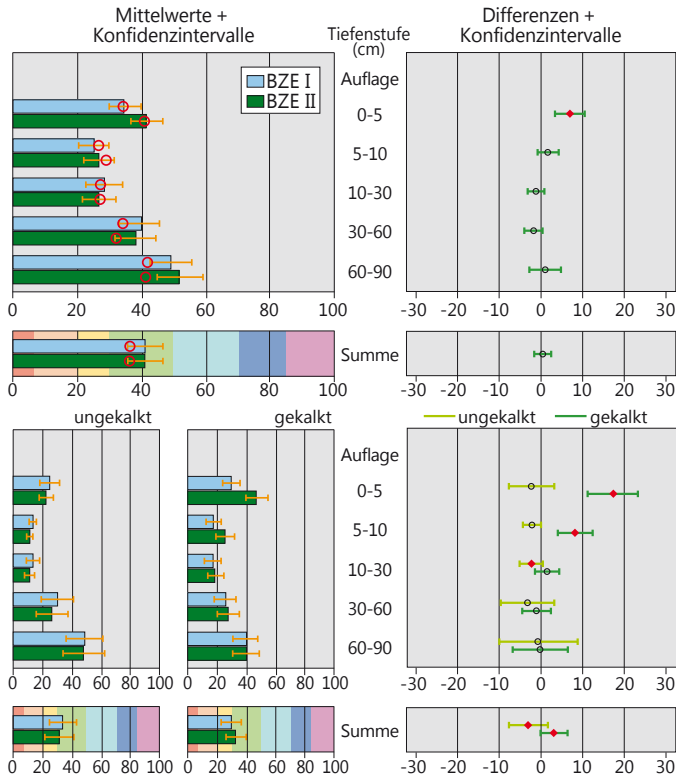
sische Einträge aus der Luft kompensiert. Auf den gekalkten Standorten zeigt sich eine Verbesserung der durchschnittlichen Basensättigung (Abbildung unten). Innerhalb der Kalkungskulisse lässt sich eine deutliche und signifikante Verbesserung der Basensättigung bis in 10 cm Bodentiefe im gekalkten Kollektiv nachweisen, während sich im ungekalkten Kollektiv die Basensättigung weiter verschlechtert. Dies wirkt sich auch bis auf die Profilebene aus. Besonders positive Effekte der Waldkalkung zeigen sich auf Buntsandstein-Standorten mit noch deutlicheren Verbesserungen der Basensättigung bis in 60 cm Mineralbodentiefe.



- Humusform BZE II
- Mull
 - F-Mull
 - Moder, mullartiger
 - Moder, feinhumusarm
 - Moder, feinhumusreich
 - Graswurzelfilz
 - Moder, rohhumusartig, feinhumusarm
 - Moder, rohhumusartig, feinhumusreich
 - Rohhumus, feinhumusarm
 - keine Angabe

Verteilung der Humusformen der BZE II in Hessen

Basensättigung (%) – Hessen (gesamt)



Basensättigung in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II – BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken)



BZE-Punkt im Spessart

Foto: NW-FVA

Die Bodenschutzkalkung hat danach einen langfristig positiven Einfluss auf den chemischen Bodenzustand und auf die Sicherung und Erhaltung des Nährstoffhaushalts. Auf der anderen Seite zeigen die Ergebnisse der BZE II deutliche Risiken für schwach nährstoffversorgte Standorte, die bislang nicht gekalkt wurden. Diese Waldböden in Hessen verarmen weiter. Über alle Tiefenstufen hat die Basensättigung zwischen BZE I und BZE II abgenommen. Innerhalb von nur 15 Jahren sind deutliche Calcium- und Magnesiumverluste auf diesen Standorten festzustellen.

Obwohl hessische Wälder ein weites Spektrum an Standortseigenschaften von reich bis arm abdecken und im Basenhaushalt eine ungünstige Entwicklung auf nicht gekalkten Standorten der Kalkungskulisse nachzuweisen ist, zeigt sich für den morphologisch ansprechbaren Humuszustand und die bodenbiologische Aktivität eine positive Entwicklung.

Mit 56 % Anteil an der BZE II überwiegen die besseren Humusformen Mull und mullartiger Moder. Der typische Moder (feinhumusarm und -reich), der eher auf mittleren Standorten vorkommt, ist mit 27 % vertreten. Ungünstigere Humusformen, wie der rohhumusartige Moder und Rohhumus, finden sich bei rund 15 % aller Standorte.

Hessische Waldböden stellen eine wichtige Kohlenstoffsenke dar. Die mit durchschnittlich über 80 Tonnen pro Hektar gespeicherten Kohlenstoffvorräte in Hessens Wald-



BZE-Buntsandsteinprofil im Kaufunger Wald

Foto: H. Kasel

Hauptergebnisse der Waldbodenzustandserhebung in Hessen (BZE II)

böden zeugen von dieser langfristigen Nettospeicherung. Im Zeitraum 1992 (BZE I) bis 2007 (BZE II) haben die Kohlenstoffvorräte in hessischen Waldböden insgesamt moderat zugenommen (6 % bezogen auf den Vorrat der BZE I). Die Ergebnisse geben Hinweise für einen positiven Einfluss der Kalkung auf den Kohlenstoffhaushalt: Zwar wird durch die Waldkalkung der Kohlenstoffvorratsabbau im Auflagehumus deutlich angeregt, insgesamt werden jedoch diese Kohlenstoffverluste über einen Vorratsaufbau im Mineralbodenhumus im Oberboden mehr als kompensiert. Die Bodenschutzkalkung könnte somit die Senkenfunktion für Kohlenstoff in hessischen Waldböden verbessert haben. Trotz des luftgetragenen Eintrages an anorganischem Stickstoff von ca. 16 kg pro Hektar und Jahr (Buche) bzw. ca. 25 kg pro Hektar und Jahr (Fichte) in der Zeit von 1992-2006 haben sich die Stickstoffvorräte auf Profilebene im Zeitraum von der BZE I zur BZE II insgesamt tendenziell verringert. Stoffbilanzierungsansätze ergeben Hinweise, dass in den meisten hessischen Waldökosystemen eine erhöhte Stickstoffaufnahme durch die oberirdische Biomasse stattfindet bzw. auch relevante Lachgasemissionen (N_2O) aus den Waldböden wahrscheinlich sind.

Waldernährung

Hauptbaumart in Hessen ist die Buche, sie nimmt 31 % der Waldfläche ein. Bei der Buche sind in der BZE II-Stichprobe Ernährungsdefizite besonders häufig festgestellt worden. Ein Großteil der Buchenbestände weist substratübergreifend (latenten) Phosphormangel auf. Zusätzlich besteht eine angespannte Schwefelernährungssituation und an einem Drittel der BZE II-Buchenpunkte ist die Versorgung mit Kalium und/oder Magnesium unzureichend. Die Stickstoffquotienten zeigen, dass disharmonische Elementverhältnisse weit verbreitet sind. Hinzu kommt, dass im Intensiven Monitoring für die Buche eine Abnahme für alle Hauptnährelemente (Ausnahme: Stickstoff) festzustellen ist.



BZE-Grauwacke-Profil am östlichen Rand des Rothaargebirges

Foto: H. Kasel



Bodenprobenahme an einer Profilwand

Foto: H. Kasel

Für die Fichte, Kiefer und Eiche ist die Ernährungssituation wesentlich entspannter. 33 % (Fichte), 36 % (Kiefer) und 41 % (Eiche) der BZE II-Punkte sind ohne (latenten) Mangel an Hauptnährelementen und weisen harmonische Stickstoffquotienten auf.

Der Vergleich gekalkter und ungekalkter BZE II-Punkte zeigt eine verbesserte Ernährungssituation durch die Bodenschutzkalkung für Calcium (Eiche), Magnesium (Buche und Eiche) sowie Phosphor (Kiefer). Die Schwefelgehalte in Buchenblättern und die Eisengehalte in Fichtennadeln sind dagegen an den gekalkten BZE II-Punkten geringer als an den ungekalkten.

Die hohen Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern aller vier Baumarten auf allen Substraten zeigen den Einfluss anthropogener Stickstoffeinträge in die Wälder.

Bodenvegetation

Die direkte Verbindung der BZE II-Vegetationsdaten mit den auf Stichprobenpunkten erhobenen bodenchemischen Kenngrößen ermöglichte Analysen zu den Zusammenhängen zwischen der Pflanzenartenzusammensetzung der Waldbestände und dem Bodenzustand ($pH(H_2O)$), der Basensättigung und den C/N-Verhältnissen sowie zu den austauschbaren Vorräten der basischen Kationen Calcium, Magnesium und Kalium jeweils bezogen auf den mineralischen Oberboden in 0-5 cm Bodentiefe. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse konnten Zeigerarten identifiziert werden, die operationale Hilfestellungen für die Trophieabschätzung hessischer Waldstandorte ermöglichen.

Standortskartierung

Bodenchemische Analysen sind von besonderer Wichtigkeit für eine differenzierte Standortdiagnostik. Sie können die Nährstoffeinschätzung der Standortskartierung präzisieren, um das standörtliche Potenzial einzelner Standorte besser abschätzen zu können. Dadurch lassen sich forstliche Maßnahmen (u. a. Baumartenwahl, Waldkalkungen und Vollbaumnutzungen) näher am Standortpotenzial orientieren und nachhaltiger ausrichten.

Die Substratgruppe Buntsandstein

Jan Evers, Uwe Paar und Inge Dammann

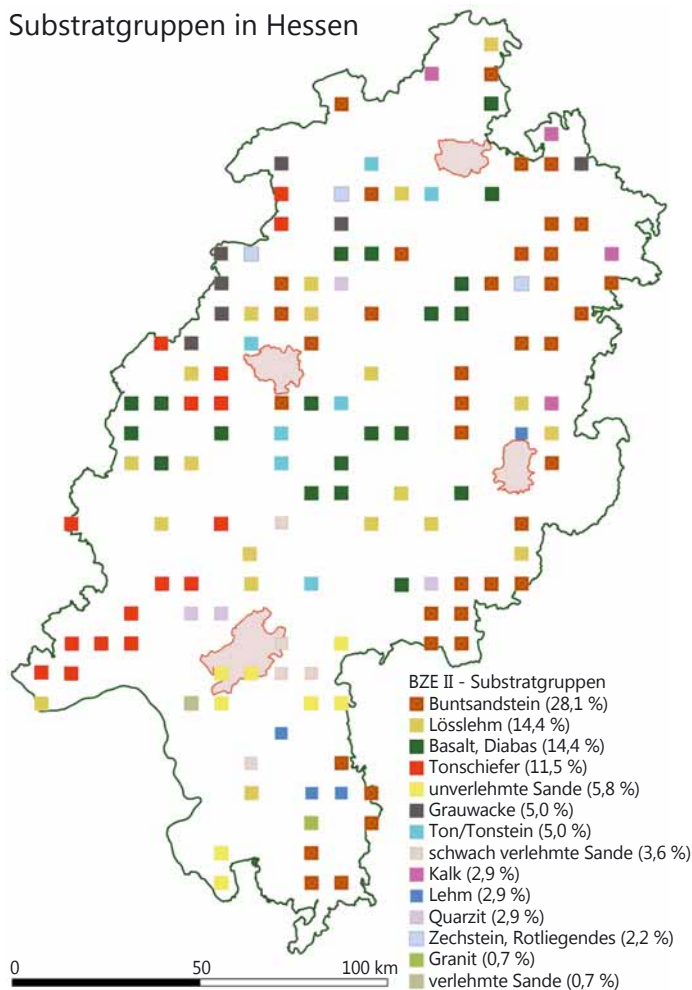
Jeder der 388 BZE II-Punkte in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt wurde einer Substratgruppe zugeordnet. Die Generierung der länderübergreifenden Substratgruppen erfolgte nach den Merkmalen Ausgangssubstrat (Ausgangsgestein), Lagerung (Substrat-Lagerung), Bodenart, Bodenmorphologie und Bodenphysik. In Hessen kommen 14 der für Nordwestdeutschland insgesamt definierten 16 Substratgruppen vor. Für 39 BZE-Punkte (28 %) wurde die Substratgruppe „Buntsandstein“ ausgewiesen. Der Buntsandstein ist somit die am häufigsten vorkommende Substratgruppe in Hessen.

Schwerpunktmäßig liegt das große osthessische Buntsandsteinvorkommen im mitteldeutschen Trias-Berg- und Hügelland (Reinhardswald, Kaufunger Wald, Sandsteingebiet Hersfeld/Niederaula), am Ostrand des Vogelsberges (Fulda-/Haune-Bergland), in der Rhön und im Spessart. Das südlichste Buntsandsteingebiet findet sich im Odenwald (Ostteil und zentraler Odenwald). Größere nordwestlich vorkommende Buntsandsteinplatten sind im Burgwald und im Waldeck-Wolfhagener Berg- und Hügelland ausgeprägt (Schwerpunkt Ostteil des Landkreises Waldeck-Frankenberg).

Geologie

Die in Hessen landschaftsprägenden, zumeist rotfarbigen Buntsandsteinschichten wurden als Lockersedimente vor rund 240 Mio. Jahren (Trias) abgelagert. Die Sedimente bestehen im Wesentlichen aus Flusssanden (eher nährstoff-

Substratgruppen in Hessen



Zuordnung der 139 hessischen BZE II-Punkte zu Substratgruppen



Buntsandstein-Steinbruch bei Bad Karlshafen (Karlshafen-Schichten, Solling-Formation)
Foto: M. Spielmann

ärmer) und feinkörnigen Stillwasserablagerungen (nährstoffreicher), die aus südlichen, höher gelegenen Gebieten über Fließgewässer transportiert wurden. Die Ablagerungen wurden dann unter dem Gewicht weiterer Sedimentfolgen jüngerer Zeitalter verfestigt und nach dem Abtrag dieser Schichten im Zuge tektonischer Gebirgsfaltungen, Erosion und Verwitterung wieder freigelegt. Je nach Beschaffenheit und Herkunft des sedimentierten Materials kann der Buntsandstein sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein. Es können z. B. auch Tone, Kalke und Gipse bis hin zu kiesigen Schichten mit eingelagert sein. Die namensgebende rotbraune Färbung resultiert aus Eisenoxid, welches aus der Verbindung von im Gestein enthaltenem Eisen mit Luftsauerstoff im Wechsel von Feucht- und Trockenphasen entsteht. Durch Bleichungsprozesse kommen aber auch gelbliche bis sehr helle Farben vor.

Standorte des Oberen Buntsandsteins (Röt) sind in Hessen nur selten mit Wald bestockt. Sie weisen einen höheren Tongehalt und eine bessere Nährstoffversorgung auf und werden i. d. R. landwirtschaftlich genutzt. Unter Wald werden sie überwiegend in die Substratgruppe Ton(stein) eingeordnet. Der Untere- und Mittlere Buntsandstein ist durch Serien feinkörniger Sand- und Tonsteine charakterisiert. Sie werden von grobkörnigen Sandsteinen unterbrochen, die jeweils eine neue Sedimentationsfolge einleiten.

Der Mittlere Buntsandstein wird klassisch unterteilt in den Hauptbuntsandstein (sm1) und den Bausandstein (sm2). Er kann aber auch in vier Sedimentations-Großzyklen gegliedert werden: Solling-, Hardegsen-, Detfurth- und Volpriehausen-Formation. Der Untere Buntsandstein wird in zwei Folgen gegliedert: Bernburg- und Calvörde-Formation.

Der Buntsandstein wurde immer schon als Baumaterial geschätzt, viele historische Gebäude wie Kirchen, Klöster und Brücken wurden aus diesem Material errichtet. Im Wald finden sich häufig alte, aufgelassene Steinbrüche.

Bodenart und Bodenartenschichtung (Substrat-Lagerung)

In der Regel findet man an den Buntsandstein-Standorten in Hessen bis zu 70 cm mächtige, teils lehmige, schluffige bis sandige Decken (Löss-Lehmdecken) über dem Silikatgestein. Diese sind auf 54 % der Standorte mit einer Mächtigkeit

Die Substratgruppe Buntsandstein

keit zwischen 30 und 70 cm ausgebildet, während bei 31 % die Deckschicht nur bis zu 30 cm mächtig ist. Die Basislagen werden durch den anstehenden Buntsandstein stärker sandig mit regional schluffig-tonigen Einschaltungen geprägt.

Bodentypen

Als Bodentypen sind Braunerden (38 %), Podsol-Braunerden (13 %) und Pseudogley-Braunerden (13 %) im Bereich der Buntsandsteinstandorte vorherrschend. Die Braunerden, Parabraunerde-Braunerden und Braunerde-Parabraunerden sind zwar in unterschiedlichem Maße podsoliert, stellen sich aber hinsichtlich der Folgen von Bodenversauerung günstiger dar als die Podsol-Braunerden und Braunerde-Podsole. Die erste Gruppe stellt ungefähr 50 % aller Standorte des Buntsandsteins in Hessen, die zweite ungefähr 20 %. 30 % der Buntsandstein-Standorte weisen Einflüsse von Stau- und Hangwasser auf.

Humusformen

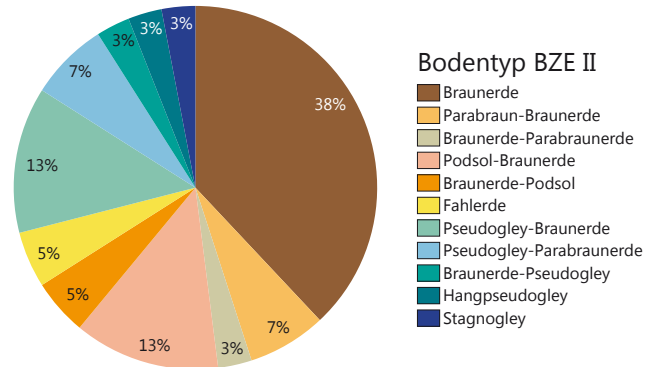
Die vorkommenden Humusformen sind recht vielfältig: Die besseren Humusformen Mull und Mullartiger Moder kommen auf rund 40 % der Buntsandstein-Standorte vor, die mittleren Humusformen des typischen Moders (feinhumusarme und feinhumusreiche Ausprägung) auf 28 % und die ungünstigeren Humusformen des Rohhumusartigen Moders sowie des Rohhumus auf gut einem Viertel. Vereinzelt trat Graswurzelfilz-Moder auf oder der Humuszustand konnte wegen zu starker Störungen nicht eindeutig klassifiziert werden.

Trophie

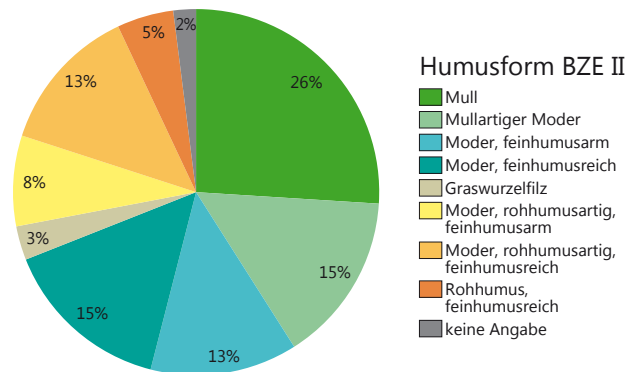
Die Trophie der Buntsandsteinstandorte ist i. d. R. mesotroph oder schwach mesotroph, es können aber auch oligotrophe Standorte (Podsole) vorkommen.



BZE-Buntsandsteinprofil bei Bebra in Nord-Osthessen: Verunreinigter Löss über einer Buntsandsteinfließerde Foto: NW-FVA



Verteilung der Bodentypen in der Substratgruppe Buntsandstein in Hessen (BZE II)



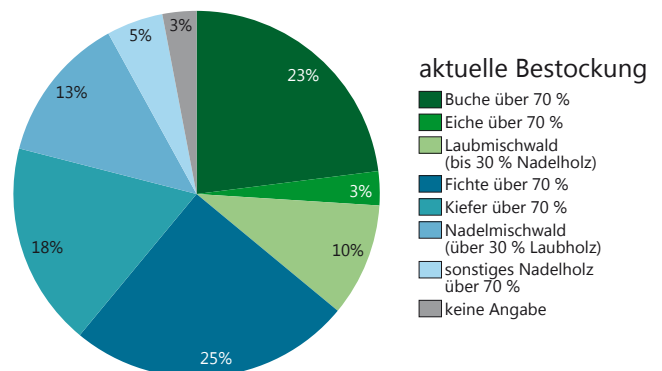
Verteilung der Humusformen in der Substratgruppe Buntsandstein in Hessen (BZE II)

Natürliche Waldgesellschaften und aktuelle Bestockung

Als natürliche Waldgesellschaften finden sich auf Standorten des Buntsandsteins typische Hainsimsen-Buchenwälder und deren Subtypen.

Diese Subtypen der Hainsimsen-Buchenwälder sind im staufeuchten Bereich durch die Rasenschmiele gekennzeichnet, im feuchten und schattigen Bereich durch Frauenern und Eichenfarn und in nährstoffärmeren Bereichen durch das Weißmoos. Das Flattergras zeigt dagegen eine etwas nährstoffreichere Ausbildung an. Drahtschmiele und Heidelbeere kommen in den trockeneren und sonnigeren Standortsbereichen vor.

Zum Zeitpunkt der BZE II waren 36 % der Buntsandsteinstandorte mit Laubwald – überwiegend Buche – und 61 % mit Nadelwald bestockt, hier hauptsächlich Fichten- und Kiefernbestände.



Verteilung der aktuellen Bestockung in der Substratgruppe Buntsandstein in Hessen (BZE II)

Die Substratgruppe Buntsandstein

Chemische Bodenkenngrößen

Austauschkapazität

Eine der wichtigsten bodenchemischen Kenngrößen ist die Austauschkapazität als Summe der Konzentrationen der leicht mobilisierbaren Kationbasen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium sowie der Kationsäuren Aluminium, Eisen, Mangan und Protonen.

Mit rund 400 kmol_c je Hektar Austauschkapazität (summiert bis 90 cm Bodentiefe) fällt die Substratgruppe Buntsandstein in Hessen in den mittleren Bewertungsbereich nach der AK-Standortskartierung (2016). Die Spannbreiten sind jedoch recht hoch, sie reichen mit 160 kmol_c je Hektar vom gering-mittleren Bewertungsbereich bis zum mittel-hohen Bewertungsbereich mit 850 kmol_c je Hektar (BZE II). Die Substratgruppe Buntsandstein kann in eine mehr sandige und eine mehr tonige Fraktion unterteilt werden. In der sandigen Fraktion ist die Austauschkapazität mit durchschnittlich rund 300 kmol_c je Hektar bis 90 cm Bodentiefe nur fast halb so hoch wie in der tonigen Fraktion mit 560 kmol_c je Hektar. Bei den tonigen Buntsandsteinböden liefern vor allem die Bodenschichten unter 30 cm Bodentiefe mit 200 kmol_c je Hektar relativ hohe Werte der Austauschkapazität. Im Vergleich dazu liegt die Austauschkapazität dieser Bodenschichten bei den mehr sandigen Buntsandsteinböden nur bei ungefähr 100 kmol_c je Hektar. Im Vergleich zu den anderen Waldstandorten in Hessen finden sich nur bei den Sanden in der Rhein-Main Ebene geringere Werte für die Austauschkapazität als bei der sandigen Fraktion des Buntsandsteins. Damit zählt diese Ausprägung des Buntsandsteins zu den ärmsten

Standorten in Hessen. Die tonige Ausprägung des Buntsandsteins dagegen übertrifft hinsichtlich der Austauschkapazität die Grauwacken, die meisten Tonschiefer, Quarzite und Granite und rangiert damit in Hessen im mittleren standörtlichen Bereich. Standorte mit Zechstein, Lösslehm, Kalk, Basalt und Diabas sowie Tonstein weisen deutlich höhere Austauschkapazitäten auf.

Basensättigung

Im Zuge fortschreitender Bodenversauerung werden die an der Pufferung beteiligten basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium vom Austauscher durch die sauren Kationen Aluminium, Eisen, Mangan und Wasserstoff-Ionen verdrängt. Die Austauschkapazität bleibt dabei weitgehend konstant, es verringert sich jedoch die Basensättigung, also der relative Anteil der basischen Nährstoffkationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium im Vergleich zur Summe aller Kationen am Austauscher. Ein starkes Absinken der Basensättigung im Mineralboden ist eine Folge luftbürtiger, versauernd wirkender Stoffeinträge. Eine Basensättigung unterhalb von 20 % wird als gering und unter 7 % als sehr gering eingestuft. Diese Werte werden in den am stärksten versauerten Waldböden erreicht. Für Böden mittlerer Nährstoffgüte ist eine Basensättigung von 30 bis 50 % definiert und bei gut nährstoffversorgten Standorten erreicht die Basensättigung Werte von über 50 %.

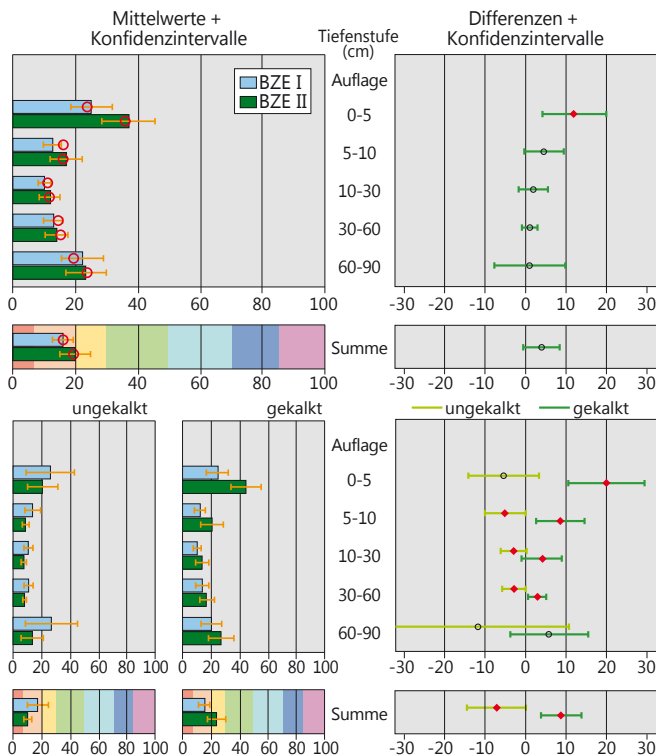
Zum Zeitpunkt der BZE II ergeben sich im Buntsandstein in Hessen knapp 20 % durchschnittliche Basensättigung auf Profilebene, was eine geringe Basenversorgung anzeigt (Abbildung links). Dieser Wert liegt nur halb so hoch wie der Durchschnittswert für Hessen. Mit 16 % Basensättigung im Durchschnitt lagen die Werte der BZE I sogar noch niedriger. Die jeweils höchsten Werte in der BZE I und II nach Tiefenstufen finden sich in 0-5 cm Bodentiefe. Hier ist der Einfluss organischer Substanz und der Waldkalkung am höchsten. Mit der Bodentiefe sinken die Werte deutlich ab und liegen zwischen 10 und 17 %. In 60-90 cm Bodentiefe erreichen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung mit 22 % den gering-mittleren Bewertungsbereich.

Basensättigungen von unter 20 % zeigen an, dass diese Standorte nicht mehr über das Potential an austauschbaren Nährstoffen verfügen, welches grundsätzlich bei gegebener Austauschkapazität an vergleichbaren, unbelasteten Waldstandorten zur Verfügung stand. In diesem Milieu wird der Austauscher und die Bodenlösung durch das Kation Aluminium geprägt. Calcium, Magnesium und Kalium liegen in vergleichsweise geringen Anteilen vor. Für Baumwurzeln kann es unter diesen Bedingungen schwierig werden, ausreichend Nährstoffe aufzunehmen. Aluminium wirkt in der Bodenlösung in höheren Konzentrationen zudem toxisch gegenüber Pflanzenwurzeln. In diesen Fällen können Kompensationsmaßnahmen in Form von Waldkalkungen sinnvoll sein. Daher wurden in Hessen rund 70 % der Buntsandstein-Standorte gekalkt.

Veränderung der Basensättigung

In Bodentiefen zwischen 5 und 60 cm werden kritische Werte von unter 15 % Basensättigung erreicht (Abbildung links). Insgesamt hat die Basensättigung im Buntsandstein im Oberboden zugenommen, in 0-5 cm Bodentiefe signi-

Basensättigung (%)



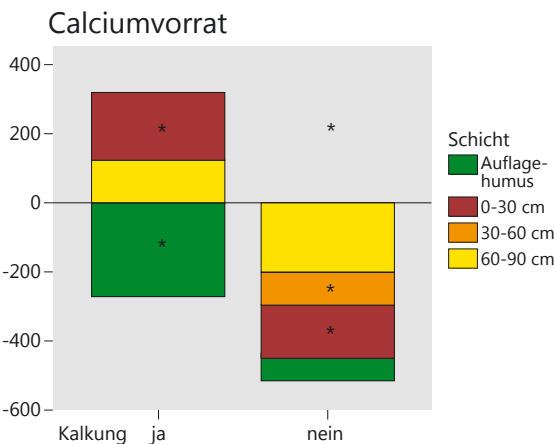
Basensättigung der Substratgruppe Buntsandstein (n=39) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II – BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt (n=11) / gekalkt (n=27) (untere 6 Grafiken); ein BZE-Punkt entfällt, da der Kalkungsstatus nicht zu klären war.

Die Substratgruppe Buntsandstein

fikant. Im gekalkten Kollektiv des Buntsandsteins zeigen sich signifikante Zunahmen bis in 60 cm Bodentiefe, im ungekalkten Kollektiv dagegen signifikante Abnahmen bis in diese Bodentiefe. Im ungekalkten Kollektiv ist die Basensättigung zum Zeitpunkt der BZE II deutlich niedriger als im gekalkten Kollektiv.

Veränderung der Calcium- und Magnesiumvorräte

Im gekalkten Kollektiv des Buntsandsteins haben die Calciumvorräte im Auflagehumus signifikant abgenommen (-47 % bezogen auf die BZE I). Diese Abnahmen werden kompensiert durch Zunahmen im Mineralboden. Signifikante Zunahmen gab es bis 30 cm Bodentiefe (+90 %). Die Calciumvorräte auf Profilebene im gekalkten Kollektiv des Buntsandsteins nahmen um 6 % zu. Dagegen kam es im ungekalkten Kollektiv im Auflagehumus und allen Bodenschichten zu deutlichen Abnahmen, die für 0-30 und 30-60 cm Bodentiefe und für das Gesamtprofil signifikant sind. Insgesamt ergeben sich für das ungekalkte Kollektiv des Buntsandsteins Abnahmen von 50 % des Calciumvorrates im Vergleich zur BZE I.



Differenzen der Calciumvorräte (kg je Hektar) der BZE II zur BZE I nach Tiefenstufen der Substratgruppe Buntsandstein (gekalkt (n=27) und ungekalkt (n=11)) in Hessen

Die Magnesiumvorräte haben im gekalkten Kollektiv des Buntsandsteins auf Profilebene bezogen auf die Vorräte der BZE I um 20 % zugenommen, im ungekalkten Kollektiv um 23 % abgenommen. Besonders deutlich und signifikant waren die Zunahmen in 0-30 (+ 206 %) und 30-60 cm (+36 %) beziehungsweise die Abnahmen im ungekalkten Kollektiv in 0-30 cm Bodentiefe (-55 %).

Die Ergebnisse zeigen, dass es trotz des Rückgangs der Säureeinträge auf ungekalkten Standorten des Buntsandsteins in Hessen zu starken Calciumverlusten, aber auch zu Verlusten von Magnesium aus dem Mineralboden gekommen ist. Auf gekalkten Standorten war dies nicht der Fall. Auf ungekalkten Stand-

orten verringert sich die Basensättigung weiter, auf gekalkten Standorten steigt sie an. Verallgemeinernd bedeutet dies für die silikatarmeren Waldstandorte, dass Kompensationsmaßnahmen durch Waldkalkungen dringend fortzuführen sind.

Ernährungssituation der Waldbäume

In der Substratgruppe Buntsandstein sind in Hessen alle vier Hauptbaumarten vertreten (Tabelle unten). Die Bewertung der Ernährungssituation von Buche, Fichte, Kiefer und Eiche erfolgt anhand der Mediane für die Hauptnährstoffe (Stickstoff, Kalium, Phosphor, Calcium und Magnesium) sowie der Stickstoffquotienten zum Zeitpunkt der BZE II.

Für Buche, Fichte und Kiefer überwiegen auf Buntsandstein die gekalkten Standorte, die daher das Gesamtergebnis wesentlich beeinflussen. Die Buche zeigt eine angespannte Phosphorernährung (latenter Mangel) sowie ein unausgewogenes N/P-Verhältnis. Auf den meisten Standorten in Hessen bestehen Phosphordefizite bei der Buche, die sowohl auf den gekalkten als auch den ungekalkten BZE II-Punkten verbreitet sind. Bei der Buche kommt es nach Kalkungsmaßnahmen tendenziell zu einer Erhöhung der Calcium- und Magnesiumgehalte, sodass auf den gekalkten BZE II-Punkten die N/Ca- und N/Mg-Verhältnisse ausgewogen sind, auf den ungekalkten BZE II-Punkten dagegen in den unharmonischen Bereich fallen.

Fichten und Eichen auf BZE II-Buntsandsteinstandorten befinden sich im Bereich normaler Hauptnährelementgehalte und ausgewogener Stickstoffquotienten. An den ungekalkten BZE II-Punkten sind die N/P-Verhältnisse bei beiden Baumarten unausgewogen.

Auch die Kiefer ist an den gekalkten BZE II-Punkten auf Buntsandstein überwiegend normal mit Hauptnährstoffen versorgt, lediglich die N/P-Quotienten zeigen unausgewogene Verhältnisse an. Für die Kiefer auf ungekalkten BZE II-Punkten werden latenter Mangel an Phosphor und Magnesium festgestellt, entsprechend sind die N/P- und N/Mg-Verhältnisse unausgewogen.

Insgesamt hat die Kalkung der Buntsandsteinstandorte die Ernährungssituation der vier Hauptbaumarten – insbesondere für Kiefer und Buche – verbessert.

Elementgehalte und Stickstoffquotienten

Baumart	Kalkung	Anzahl BZE-Punkte	Elementgehalte (mg/g)					Stickstoffquotient			
			Stickstoff N	Phosphor P	Kalium K	Calcium Ca	Magnesium Mg	N/P	N/K	N/Ca	N/Mg
Rotbuche		21	23	1,0	7,7	6,3	1,2	20,8	3,1	3,4	19,9
	ja	14	23	1,0	7,2	6,7	1,3	20,6	3,1	3,2	19,2
	nein	7	24	1,0	7,8	6,1	1,1	22,0	2,9	4,1	23,4
Fichte		24	17	1,5	5,4	4,7	1,1	11,6	3,2	3,5	15,9
	ja	18	16	1,5	5,4	4,6	1,1	11,0	3,1	3,5	15,5
	nein	6	17	1,3	5,4	4,7	1,1	12,9	3,2	3,5	16,5
Kiefer		15	18	1,1	4,8	2,9	0,7	14,9	3,6	6,2	23,6
	ja	10	17	1,3	4,9	3,1	0,8	14,3	3,3	5,8	22,3
	nein	4	19	1,1	4,7	2,8	0,7	17,0	3,9	6,7	26,6
Eiche		7	27	1,5	8,0	6,2	1,5	19,7	3,0	4,5	15,9
	ja	3	24	1,5	7,6	7,8	1,9	16,8	3,0	2,9	15,7
	nein	4	27	1,4	8,8	6,1	1,5	19,9	3,1	4,7	19,7

 Elementgehalt im latenten Mangel bzw. Stickstoffquotient unausgewogen
 Elementgehalt im Normalbereich bzw. Stickstoffquotient ausgewogen
 Elementgehalt oberhalb des Normalbereichs

Median der Elementgehalte und Stickstoffquotienten in Nadeln (1. Nadeljahrgang) und Blättern von Buche, Fichte, Kiefer und Eiche an BZE II-Punkten auf Buntsandstein insgesamt und getrennt in gekalkte und ungekalkte BZE II-Punkte. Bewertung der Elementgehalte nach Göttlein (2015) und der Stickstoffquotienten nach Mellert u. Göttlein (2012)

Schwermetallbelastung der Wälder

Nils König, Heike Fortmann, Uwe Klinck, Birte Scheler und Markus Wagner

Im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings werden neben den Säure- und Stickstoffeinträgen seit den 1980er Jahren auch die Belastungen der Waldökosysteme mit Schwermetallen erfasst.

Ursprung der Schwermetallbelastung

Ungeachtet ihres Risikopotentials wurden durch Verbrennungsprozesse und im Rahmen der Güterproduktion in der Vergangenheit große Mengen an Schwermetallen wie Blei, Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Chrom, Kobalt, Nickel oder Zink in die Atmosphäre freigesetzt. Durch den atmosphärischen Ferntransport kam es auch in Wäldern, die weit entfernt von den Emissionsquellen liegen, zu einer Anreicherung von Schwermetallen.

Zu den hinsichtlich ihrer Toxizität relevantesten Schwermetallen gehört das Blei. Es wurde früher als Antiklopfmittel dem Benzin zugesetzt. Außerdem ist es ein wichtiger Bestandteil von Legierungen und wird in Bleiakkumulatoren verwendet. Bleipigmente werden auch in großem Maßstab für rostschützende Grundierungen und Farben benötigt.

Ein weiteres bedeutsames Schwermetall ist Cadmium, das in verschiedenen Legierungen, in Batterien, in einigen Leuchtfarben und in Düngemitteln enthalten ist und als Stabilisator in Kunststoffen sowie als Korrosionsschutz verwendet wird. Trotz seiner Toxizität ist Cadmium in den Produkten des Alltags nahezu allgegenwärtig.

Andere Schwermetalle wie Kupfer, Zink oder Kobalt stellen wichtige Mikronährstoffe dar und sind erst in höheren Konzentrationen giftig.

Schwermetalle in der Umwelt

Schwermetalle können als Stäube durch die Atmosphäre weit verteilt werden und gelangen so in Gewässer und Böden. In Gewässern werden sie schnell verdünnt und fallen teilweise als schwerlösliche Carbonate, Sulfate oder Sulfide aus, die sich zunächst in den Gewässerböden anreichern. Wenn die Anlagerungskapazität der Sedimente erschöpft ist, steigt die Konzentration der Schwermetallionen im Wasser an.

Höhere Schwermetallgehalte in Waldböden stellen in erster Linie eine Gefahr für die Organismen der Zersetzerkette im Boden dar. Moose, krautige Pflanzen und Bäume werden erst bei höheren Belastungen geschädigt. Die Löslichkeit und damit auch die Toxizität von Schwermetallen im Boden hängt in starkem Maße vom Säuregrad (pH-Wert) sowie vom Ton- und Humusgehalt des Bodens ab, da hohe pH-Werte sowie hohe Ton- und Humusgehalte zur Immobilisierung der Metalle beitragen. Eine Bewertung des Gefahrenpotenzials von Schwermetallen lässt sich somit nur unter Berücksichtigung weiterer bodenchemischer Kenngrößen durchführen. In besonders sauren sowie ton- und humusarmen Böden können Beeinträchtigungen der physiologischen Aktivität der Mikroorganismen bereits bei geringen Schwermetallgehalten auftreten. Da Waldböden nicht wie landwirtschaftliche Böden umgepflügt werden, kann es zu besonders hohen Anreicherungen der Schwermetalle im Humus und dem oberen Mineralboden kommen.

Waldböden enthalten je nach Ausgangsgestein natürlicherweise gewisse Mengen an Schwermetallen. Dies ist der so genannte geogene Anteil. Bei der Bewertung der Toxizität muss dies berücksichtigt werden. Zusätzliche, anthropogen (vom Menschen verursacht) eingetragene Schwermetalle werden zunächst von den Huminstoffen im Boden gebunden oder an mineralischen Oberflächen angelagert. Sie sind leichter für Pflanzen und Mikroorganismen verfügbar und damit gefährlicher. Durch unterschiedliche Aufschluss- und Extraktionsmethoden können die anthropogenen und geogenen Anteile der Schwermetalle analytisch getrennt bestimmt werden.

Schwermetallmonitoring

Im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings der Länder Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein werden auf 20 Versuchsflächen seit über 30 Jahren Schwermetallein- und -austräge untersucht. Die Untersuchungsflächen wurden zum Teil im Rahmen der Waldschadensforschung in den 1970er und 1980er Jahren angelegt. Im Rahmen der Bodenschutz- und Waldmonitoringprogramme der Länder sowie des europäischen Level II-Programms wurden die damals begonnenen Untersuchungen fortgeführt.



Frühere Schwermetallquelle für Bleibelastung: Verkehr

Foto: J. Weymar

Schwermetallbelastung der Wälder

Ziel dieser Untersuchungen ist es, die zeitliche Entwicklung der Schwermetalleinträge zu quantifizieren, ihre Anreicherung im Boden zu ermitteln und die Auswirkungen auf das Ökosystem zu bestimmen. Zu diesen Auswirkungen gehören die Fixierung der abgelagerten Schwermetalle auf Pflanzen- und Bodenoberflächen sowie die Tiefenverlagerung der Schwermetalle im Boden. Einhergehend mit diesen Prozessen kann es zu einer Aufnahme durch die Bodenmikroorganismen sowie die Wurzeln der Bäume und der sonstigen Bodenvegetation kommen. Auch in der Biosphäre des Waldökosystems ist demnach eine Anreicherung der Schwermetalle möglich, die bei der Überschreitung tolerierbarer Gehalte toxische Wirkungen haben kann.

Schwermetalleinträge in Waldökosysteme

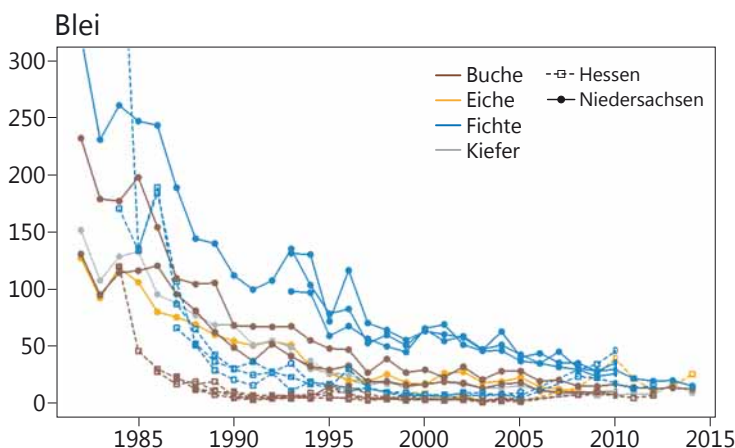
Seit mehr als zwei Jahrzehnten nehmen die Emissionen vor allem in Mitteleuropa und Nordamerika ab, was auf veränderte Produktionstechniken und gesetzliche Vorgaben der jüngsten Vergangenheit zurückzuführen ist. Besonders die dabei angewandten Staubminderungsmaßnahmen und die Stilllegung veralteter Produktionsstätten sowie die Einführung von bleifreiem Benzin führten zu einer erheblichen Verringerung der Schwermetallemissionen.

In den Abbildungen unten ist die Entwicklung der Blei- und Cadmiumeinträge über die Kronentraufe auf 20 Monitoringflächen in Niedersachsen und Hessen in den letzten 32

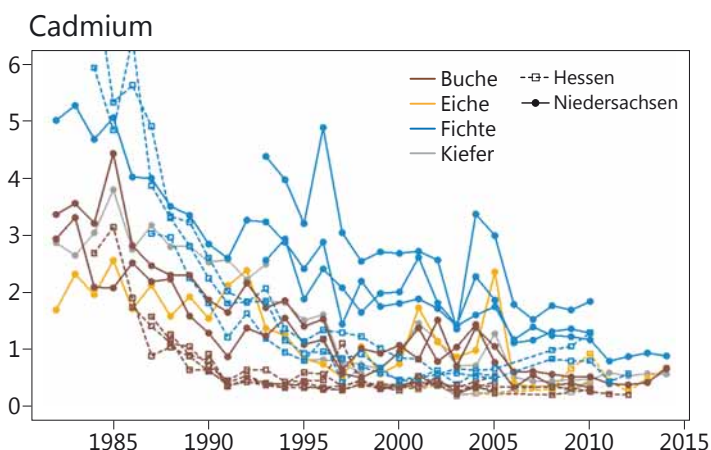
Jahren dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Einträge auf allen Flächen seit den 1980er Jahren teilweise um den Faktor 10 verringert haben. Hauptgründe für diese Reduktion sind die in den 1980er Jahren verordnete Abgasreinigung der großen Kohlekraftwerke und das damals beschlossene Benzin-Blei-Gesetz.

Während z. B. in den 1970er Jahren die Bleiemissionen in Westdeutschland allein aus dem Kfz-Verkehr rd. 7000-8000 Tonnen pro Jahr betrug, ging die Emission bis 1995 auf wenige hundert Tonnen zurück. Im gleichen Zeitraum sank der Bleigehalt im Schwebstaub der Luft an den Messstationen des Umweltbundesamtes um 95 %. Mittlerweile rückt durch die Verwendung von bleifreiem Treibstoff die Bedeutung der Bleiemissionen durch das Verkehrswesen immer weiter in den Hintergrund. Mittlerweile wird Blei vor allem noch bei Verhüttungsprozessen emittiert.

Die Einträge auf den Nadelbaumflächen sind deutlich höher als auf den Laubbaumflächen (Abbildungen links). Dies liegt an der größeren Auskämmwirkung der ganzjährig begrünzten Nadelbäume gegenüber den winterkahlen Laubbäumen. Die scheinbar niedrigeren Einträge auf den hessischen Flächen (gestrichelte Linien) sind auf eine andere Messtechnik auf diesen Versuchsflächen zurückzuführen. In Hessen wurden für die Schwermetallbestimmung die Niederschlagsproben aus den Sammlern für die Erfassung der Säure- und Staubeinträge verwendet. In Niedersachsen hingegen wurden von Anfang an spezielle Schwermetallsammler verwendet, bei denen auch die an den Gefäßwänden angelagerten Anteile der Schwermetalle erfasst werden. Laborversuche haben ergeben, dass die Vernachlässigung dieser Fraktion die Einträge je nach Element um das 2 bis 5fache unterschätzt. Ab 2007 wurden dann auch in Hessen spezielle Schwermetallsammler verwendet. Seit diesem Zeitpunkt liegen die erfassten Eintragsmengen in einer ähnlichen Größenordnung. Der Rückgang der Schwermetalleinträge gilt auch für alle anderen untersuchten Schwermetalle wie Kupfer, Zink, Kobalt, Nickel oder Chrom, was den Erfolg der zahlreichen Umweltgesetze aus den 1980er und 1990er Jahren nochmals unterstreicht.



Jährliche Blei-Einträge (Gramm je Hektar) mit der Kronentraufe für 20 Flächen des Intensiven Waldmonitorings in Hessen und Niedersachsen von 1982-2014



Jährliche Cadmium-Einträge (Gramm je Hektar) mit der Kronentraufe für 20 Flächen des Intensiven Waldmonitorings in Hessen und Niedersachsen von 1982-2014



Schwermetallquelle: verbrauchte Batterien

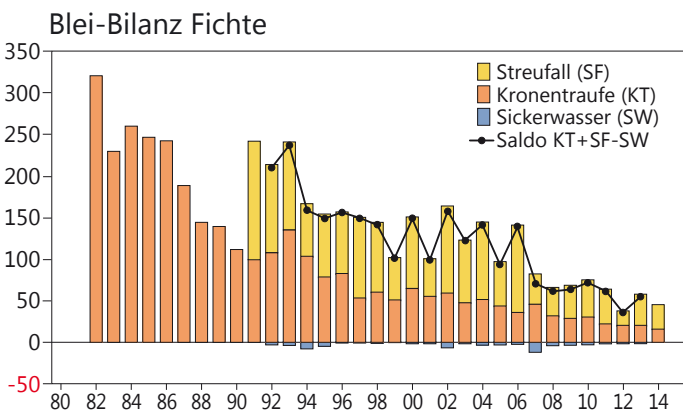
Foto: J. Evers

Schwermetallbelastung der Wälder

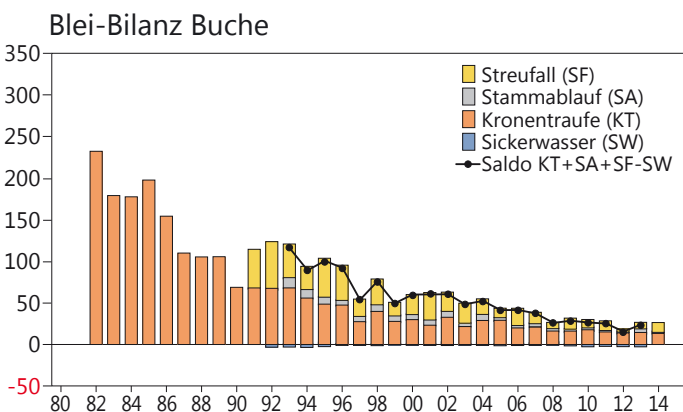
Schwermetallbilanzen

Neben den Einträgen mit der Kronentraufe sind hinsichtlich der Menge noch die Einträge mit der Nadel- oder Blattstreu und – besonders bei Buchenbeständen – die mit dem Stammablauf von Bedeutung. Der Vergleich der Summe der Einträge mit den Austrägen im Sickerwasser unterhalb des Wurzelraums ergibt die Schwermetallbilanz. Diese Bilanz lässt erkennen, ob die Metalle im Waldboden gespeichert werden oder ob sie das System verlassen und damit eine Gefahr für das Grundwasser werden können.

Am Beispiel der ältesten Versuchsflächen im Solling werden die Bilanzen für Blei und Cadmium auf einer Fichten- und einer Buchenfläche vorgestellt (Abbildungen unten und rechts). Dabei ist zu beachten, dass sich Blei und Cadmium im Waldökosystem unterschiedlich verhalten. Blei wird stark an mineralischen Oberflächen angelagert und in Humuskomplexen gebunden; es wird praktisch nicht über die Wurzeln aufgenommen. Cadmium hingegen wird zum einen nur schwach angelagert und zum anderen leichter über die Wurzel aufgenommen. Während sich für Blei die Einträge als Summe aus Kronentraufe, Streufall und Stammablauf berechnen, liegen die Cadmиеinträge zwischen dieser Summe und der Summe von Kronentraufe und Stammablauf, da ein Teil des Streueintrags aus dem über die Wurzeln aufgenommenen Cadmium (interner Kreislauf) stammt und deshalb nicht als direkter Eintrag zu werten ist. Die resultierende Eintrags-Austragsbilanz ist bei Blei mit der schwarzen

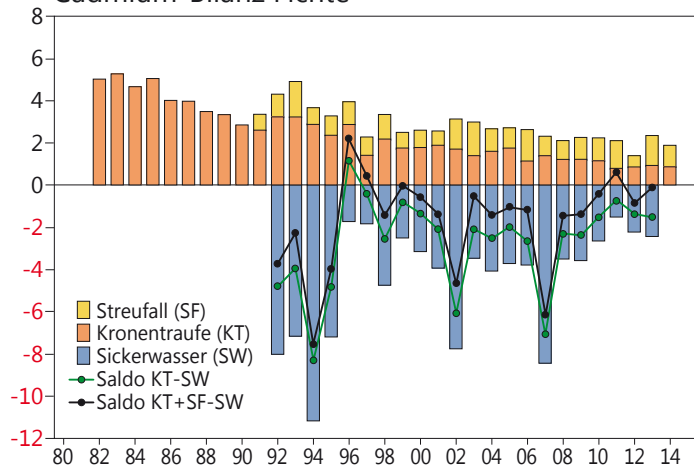


Jährliche Blei-Bilanz und -Salden aus Ein- und Austrägen (g je Hektar) für eine Fichtenfläche im Solling von 1982-2014. Die schwarze Linie entspricht dem Saldo aus Kronentraufe plus Streufall minus Austrag.



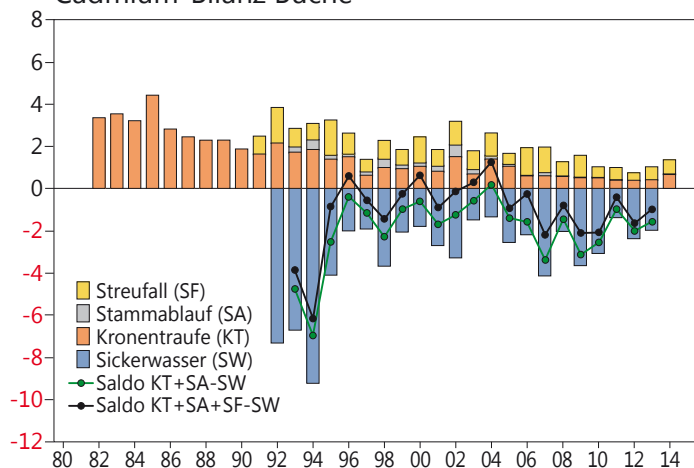
Jährliche Blei-Bilanz und -Salden aus Ein- und Austrägen (g je Hektar) für eine Buchenfläche im Solling von 1982-2014. Die schwarze Linie entspricht dem Saldo aus Kronentraufe plus Stammablauf plus Streufall minus Austrag.

Cadmium-Bilanz Fichte

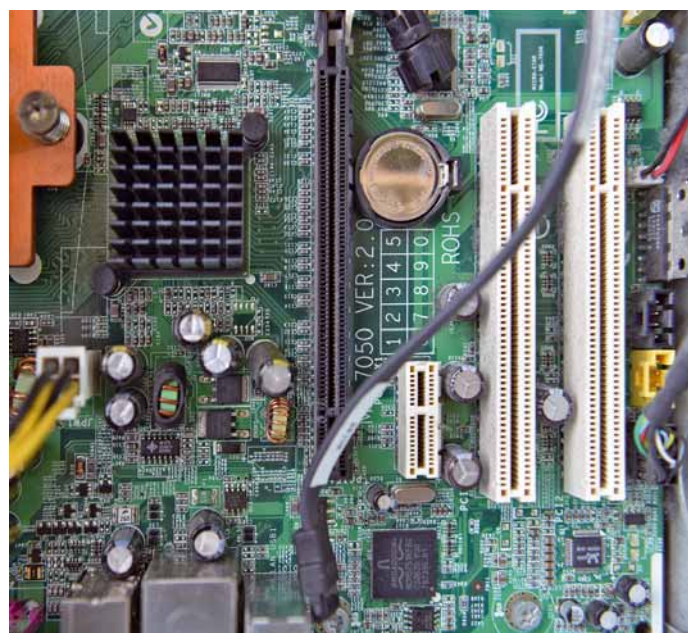


Jährliche Cadmium-Bilanz und -Salden aus Ein- und Austrägen (g je Hektar) für eine Fichtenfläche im Solling von 1982-2014. Die schwarze Linie entspricht dem Saldo aus Kronentraufe plus Streufall minus Austrag, die grüne Linie dem aus Kronentraufe minus Austrag.

Cadmium-Bilanz Buche



Jährliche Cadmium-Bilanz und -Salden aus Ein- und Austrägen (g je Hektar) für eine Buchenfläche im Solling von 1982-2014. Die schwarze Linie entspricht dem Saldo aus Kronentraufe plus Stammablauf plus Streufall minus Austrag, die grüne Linie dem aus Kronentraufe plus Stammablauf minus Austrag.

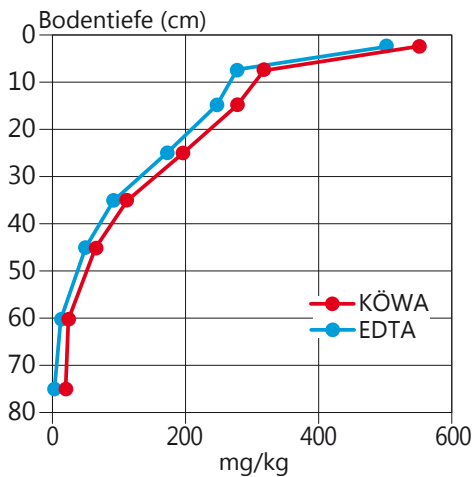


Schwermetallquelle: Computerplatine

Foto: J. Evers

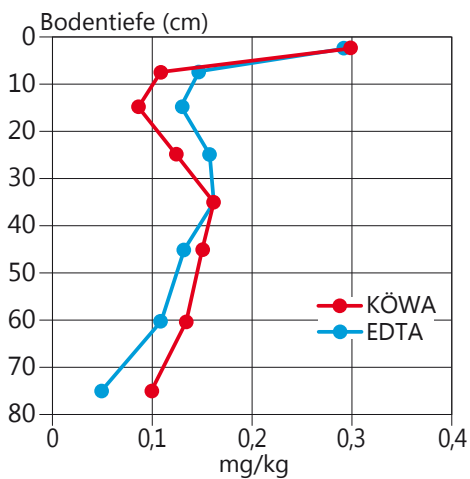
Schwermetallbelastung der Wälder

Königswasser- und EDTA-extrahierbares Blei



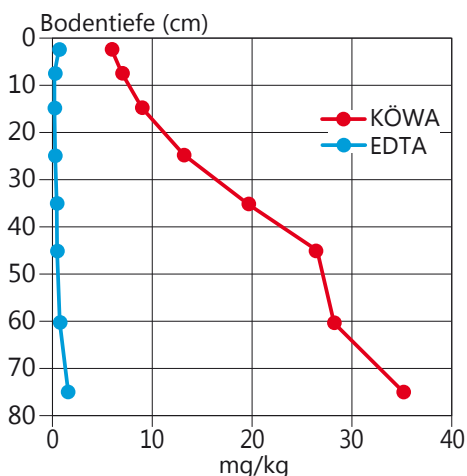
Tiefenprofil der Blei-Gehalte [mg/kg] im Harz (Lange Bramke Kamm) nach unterschiedlichen Extraktionsverfahren

Königswasser- und EDTA-extrahierbares Cadmium



Tiefenprofil der Cadmium-Gehalte [mg/kg] im Harz (Lange Bramke Kamm) nach unterschiedlichen Extraktionsverfahren

Königswasser- und EDTA-extrahierbares Nickel



Tiefenprofil der Nickel-Gehalte [mg/kg] im Harz (Lange Bramke Kamm) nach unterschiedlichen Extraktionsverfahren

Linie beschrieben. Bei Cadmium liegt sie zwischen der schwarzen und der grünen Linie. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Bilanz bei Blei (schwarze Linie) auf beiden Flächen positiv ist, das eingetragene Blei also nahezu komplett im Boden gespeichert wird. Bei Cadmium fällt die Bilanz in fast allen Jahren negativ aus, was bedeutet, dass mehr Cadmium das Ökosystem unterhalb der Wurzelzone verlässt als eingetragen wird. Diese für den Solling dargestellten Sachverhalte gelten beim Blei auch für alle anderen untersuchten Flächen in ähnlicher Weise. Für Cadmium sind die Bilanzen auf den unterschiedlichen Versuchsflächen je nach Bodenart und Versauerungsgrad durchaus unterschiedlich; es gibt auch Flächen mit einer positiven Bilanz.

Unterscheidung geogener und anthropogener Schwermetallanteile

Um Aussagen über den Verbleib der eingetragenen Schwermetalle im Boden machen zu können, wurden auf allen Versuchsflächen sowohl die Gesamtgehalte der Metalle (Königswasser-extrahierbar; dies entspricht für die meisten Metalle den Gesamtgehalten) in der Humusauflage und den verschiedenen Bodentiefen untersucht als auch der über die Luftverschmutzung eingetragene Anteil (EDTA-extrahierbar; EDTA ist ein Komplexbildner, der in erster Linie die Metallionen, die an der Bodenoberfläche angelagert oder in Humuskomplexen gebunden sind, bindet und extrahiert). Dadurch ist erkennbar, ob die Schwermetallbelastung eines Bodens geogenen (dem Ausgangsgestein zuzusprechenden) oder anthropogenen Ursprungs ist (Abbildungen links). Die Bleigehalte im Boden nehmen für die Beispielfläche im Harz (Lange Bramke) mit der Tiefe deutlich ab und sind fast ausschließlich anthropogenen Ursprungs (Abbildung links oben). Das eingetragene Blei wird vornehmlich in der Humusauflage und im oberen Mineralboden gespeichert und angereichert. Auch Cadmium ist nahezu vollständig durch Luftverschmutzung in den Waldboden gelangt (Abbildung links Mitte; die EDTA-extrahierbaren Anteile sind im Oberboden nur scheinbar höher als die Königswasser-extrahierbaren, die Streuung der Daten für beide Methoden liegt bei 20-40 %, sodass kein signifikanter Unterschied festzustellen ist). Es ist im Vergleich zum Blei schon

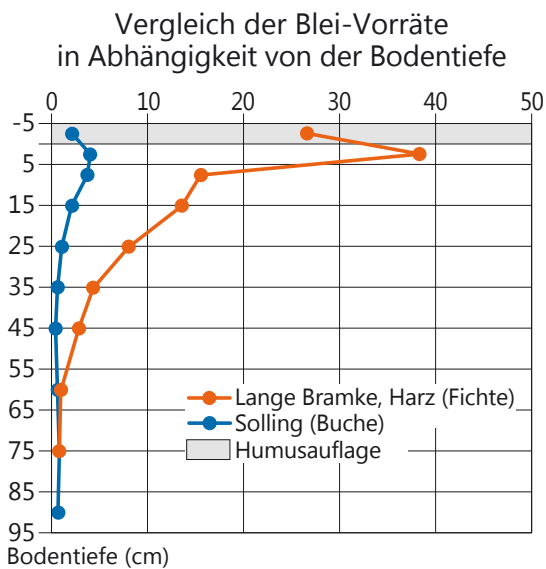


Schwermetallquelle: Kohlekraftwerke

Foto: M. Spielmann

Schwermetallbelastung der Wälder

in größere Tiefen eingesickert und verteilt sich deshalb gleichmäßiger im Bodenprofil. Nahezu rein geogenen Ursprungs ist hingegen Nickel; hier ist der zusätzliche Eintrag durch den Menschen vernachlässigbar. Der Gesamtgehalt nimmt mit der Tiefe deutlich zu, was gleichfalls auf die Herkunft aus dem Ausgangsgestein hinweist (Abbildung Seite 37 unten). Diese für eine Fichtenfläche im Harz getroffenen Aussagen gelten auch für die meisten anderen Versuchsflächen. Bei Kupfer und Zink stammt nur ein geringer Teil aus anthropogenen Quellen. Kobalt, Nickel und Chrom sind nahezu ausschließlich geogenen Ursprungs.



Tiefenprofil der Blei-Vorräte (kg je Hektar und cm) in der Langen Bramke, Harz (Fichte) und im Solling (Buche)



Depositions-Messfläche mit Schwermetallsammlern (Nr. 5 und Nr. 2) Foto: NW-FVA



Entnahme eines Schwermetall-Sammelgefäßes Foto: NW-FVA

Die von allen untersuchten Flächen am höchsten belastete ist der Standort Lange Bramke im Harz. Hier wurden aufgrund der langen, schon im Mittelalter begonnenen Erzbergbau-Tätigkeiten über Jahrhunderte große Mengen an schwermetallhaltigen Stäuben in die Waldökosysteme eingetragen. Die Gehalte im Boden z. B. für Blei sind hier um den Faktor 5 bis 10 höher als im Solling (Abbildung links). Dennoch wird das gesamte Blei im Boden gespeichert; es ist aber schon bis in eine Tiefe von etwa 50 cm vorgedrungen.

Fazit

Das Schwermetall-Monitoring belegt eindeutig die großen Erfolge der Luftreinhaltepolitik der 1980er und 1990er Jahre. Die Einträge von Schwermetallen haben drastisch abgenommen und sind nun in den industriefernen Waldgebieten auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Die meisten der eingetragenen Schwermetalle werden in der Humusauflage und im oberen Mineralboden gespeichert und können dort hohe Konzentrationen erreichen. Lediglich das sehr mobile Cadmium ist bereits in tiefere Bodenschichten eingedrungen und wird kontinuierlich in die Zone unterhalb des Wurzelraums ausgewaschen. Eine Fortsetzung des Monitorings erlaubt es, das weitere Verhalten und Eindringen der bislang ausgewählten Schwermetalle beobachten und gleichzeitig neue Belastungen frühzeitig erkennen zu können.

Literaturverzeichnis

Ahner J, Ahrends B, Engel F, Hansen J, Hentschel S, Hurling R, Meeseburg H, Mestemacher U, Meyer P, Möhring B, Nagel J, Pape B, Rohde M, Rumpf H, Schmidt M, Schmidt Mat, Spellmann H, Suttmöller J (2013): Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried. Entscheidungsunterstützung vor dem Hintergrund sich beschleunigt ändernder Wasserhaushalts- und Klimabedingungen und den Anforderungen aus dem europäischen Schutzgebietssystem Natura 2000. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 10, 398 S

AK Standortkartierung (2016): Forstliche Standortaufnahme. Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 6. Auflage, Eching bei München, 400 S

Barth N, Brandtner W, Cordsen E, Dann T, Emmerich KH, Feldhaus D, Kleefisch B, Schilling B & Utermann J (2000): Bodendauerbeobachtung, Einrichtung und Betrieb von Bodendauerbeobachtungsflächen. In: Bachmann G, König W & Utermann J (Hrsg.): Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, 3, Kennziffer: 9152, 1-127, Erich Schmidt Verlag, Berlin

BMVEL (Hrsg.) (2005): BMELV-Gutachterausschuss Forstliche Analytik: Handbuch Forstliche Analytik – Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Mit Ergänzungen bis 2015.

Choat B, Jansen S, Brodribb TJ, Cochard H, Delzon S, Bhaskar R, Bucci SJ, Feild TS, Gleason SM, Hacke UG, Jacobsen AL, Lens F, Hafiz Maherali H, Marti'Nez-Vilalta J, Mayr S, Mencuccini M, Mitchell PJ, Nardini A, Pittermann J, Pratt RB, Sperry JS, Westoby M, Wright IJ & Zanne AE (2012): Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491, 752-755.

Gauger T, Anshelm F, Schuster H, Draaijers GPJ, Bleeker A, Erisman JW, Vermeulen AT & Nagel HD (2002): Kartierung ökosystembezogener Langzeittrends atmosphärischer Stoffeinträge und Luftschadstoffkonzentrationen in Deutschland und deren Vergleich mit Critical Loads und Critical Levels. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU/UBA, FE-Nr. 299 42 210., Institut für Navigation, Univ. Stuttgart. 207 S

Göttlein A (2015): Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche, Buche. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182, 173-186

Höper H & Meeseburg H (2012): Das Bodendauerbeobachtungsprogramm. In: 20 Jahre Bodendauerbeobachtungsprogramm in Niedersachsen. Tagungsband, GeoBerichte, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.), Band 23, 6-18

ICP Forests (2010): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE, ICP Forests, Hamburg

Mellert KH & Göttlein A (2012): Comparison of new foliar nutrient thresholds derives from van den Burg's literature compilation with established central European references. *European Journal of Forest Research* 131, 1461-1472

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

Ulrich B (1991): Beiträge zur Methodik der Waldökosystemforschung. Berichte des Forschungszentrums für Waldökosysteme/Waldsterben. Reihe B, Band 24, 142 S

Wellbrock N, Aydin CT, Block J, Bussian B, Deckert M, Diekmann O, Evers J, Fetzer KD, Gauer J, Gehrmann J, Kölling C, König N, Liesebach M, Martin J, Meiwes KJ, Milbert G, Raben G, Riek W, Schäffer W, Schwerhoff J, Ullrich T, Utermann J, Volz HA, Weigel A & Wolff B (2006): Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II), Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. BMELV (Hrsg.). Berlin, 413 S



Impressum:

Ansprechpartner

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Abteilung Umweltkontrolle

Sachgebiet Wald- und Bodenzustand

Grätzelstraße 2, 37079 Göttingen

Tel.: 0551/69401-0

Fax: 0551/69401-160

Zentrale@nw-fva.de

www.nw-fva.de



Bearbeitung: Paar U, Dammann I,
Weymar J, Spielmann M und
Eichhorn J

Titelfoto: NW-FVA

Layout: Paar E

Herstellung: Nordwestdeutsche
Forstliche Versuchsanstalt

Druck: Printec Offset Kassel

Der Waldzustandsbericht 2016
ist abrufbar unter
www.nw-fva.de und
www.umwelt.hessen.de

Hauptverantwortliche für die Waldzustandserhebung in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein:

Prof. Dr. Johannes Eichhorn
Abteilungsleiter
Umweltkontrolle



Dr. Uwe Paar
Sachgebietsleiter Wald- und
Bodenzustand, Redaktion



Inge Dammann
Leiterin der Außenaufnahmen,
Auswertung, Redaktion



Dr. Jan Evers
Bodenzustandserhebung



Andreas Schulze
Datenbank



Jörg Weymar
Außenaufnahmen und Kontrollen



Michael Spielmann
Außenaufnahmen und Kontrollen



Dr. Bernd Westphal
Außenaufnahmen und Kontrollen

