

STICKSTOFF IM WALD

- UNVERZICHTBARER NÄHRSTOFF UND
WALDGEFÄHRDENDER SCHADSTOFF



Stickstoffverbindungen aus Tierhaltung und Kfz-Verkehr sind die mit Abstand wichtigsten waldschädigenden Luftschadstoffe in unserer Region. Das ist das Fazit langjähriger intensiver Waldökosystemforschung in Rheinland-Pfalz und im Saarland. Doch gleichzeitig wachsen unsere Wälder meist gut. Wie passt das zusammen? Woher stammt der in den Wald eingebrachte Stickstoff? Wirken die Luftreinhaltemaßnahmen bei den Stickstoffverbindungen und reichen die ergriffenen Maßnahmen aus? Welche weiteren Maßnahmen sind zum Schutz unserer Waldökosysteme erforderlich? Was kann der Waldbesitzende, was kann jeder Einzelne tun, um die Stickstoffbelastung unserer Wälder zu verringern? Das sind einige der Fragen, auf die nachfolgend eingegangen wird. Dargestellt werden dabei Befunde von drei Jahrzehnten Umweltbeobachtung und Waldökosystemforschung in beiden Ländern.

Unterschiedliche Stickstoffquellen

Stickstoff (N) wird in oxidierter Form, meist als Stickstoffmonoxid oder Stickstoffdioxid, bei Verbrennungsprozessen und in reduzierter Form als Ammoniak beim mikrobiellen Abbau organischer Substanz und bei der Zersetzung ammoniumhaltiger Düngemittel freigesetzt. Hauptquelle der Stickoxide ist mit einem Emissionsanteil von 40 % der Verkehr (insbesondere Fahrzeuge mit Dieselmotor), gefolgt von der Energiewirtschaft mit 24 %. Ammoniak stammt zu etwa 95 % aus der Landwirtschaft und hier vor allem aus der Tierhaltung. Aktuell werden nach Daten des Umweltbundesamtes für das Jahr 2014 in Deutschland etwa 1223 Kilotonnen (kt) Stickoxide (entspricht 372 kt N) und 740 kt Ammoniak (entspricht 609 kt N) je Jahr ausgestoßen. Die Emission der Stickoxide ist seit 1990 um etwa 58 % zurückgegangen. Hier zeigt sich vor allem die Wirksamkeit der Emissionsminderungstechniken wie des Katalysators beim Kfz und der Entstickungsanlagen in Kraft- und Heizwerken. Beim Ammoniak beträgt die Reduktion in diesem Zeitraum nur etwa 7 %. Auf Reinstickstoff (N) bezogen übersteigt der Stickstoffausstoß aus landwirtschaftlichen Quellen (ca. 600 kt N) den Stickstoffausstoß aus dem Straßenverkehr (ca. 160 kt N) um ein Mehrfaches. Die Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft dominieren inzwischen auch die in Säure-Äquivalenten berechneten, summierten Emissionen der Säurebildner: Der Emissionsanteil der Landwirtschaft bei

den Säurebildnern stieg von 17 % im Jahre 1990 auf über 50 % im Jahr 2014 an.

Die als Gase in die Atmosphäre ausgestoßenen Stickstoffverbindungen werden mit Luftströmungen weit verfrachtet und gelangen so von den Tierhaltungsarealen und Verkehrsadern in unsere Waldgebiete. Wälder sind mit ihren großen, hoch in den Luftraum aufragenden und fein zerteilten Kronen effektive Filter für Luftverunreinigungen. Daher werden in den Wäldern große Mengen an Stickstoff aufgefangen und auf dem Boden abgelagert. Die jährliche Eintragsrate, die sogenannte atmosphärische Deposition, liegt in beiden Ländern meist zwischen 20 und 40 kg Stickstoff (N) je Hektar Waldfläche. Das ist ein Vielfaches des als „natürlich“, das heißt ohne die Einwirkung des Menschen, angenommenen Stickstoffeintrags von maximal 0,5 kg N je Jahr. Mit in einzelnen Jahren über 50 kg N je Hektar und Jahr besonders hohe Depositionsraten weisen die Flächen auf, die von landwirtschaftlichen Nutzflächen umgeben sind, wie beispielsweise die Waldmessstation Ormesheim im Saarland.

Luftreinhaltemaßnahmen noch unzureichend

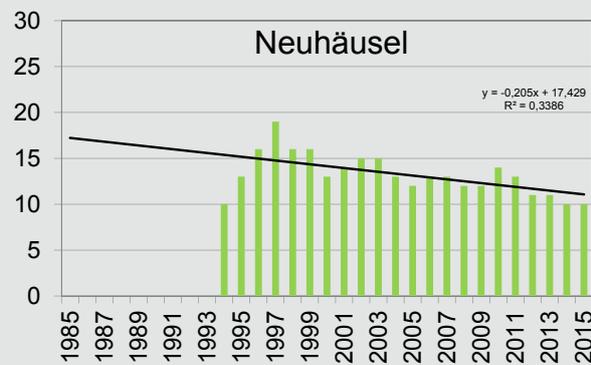
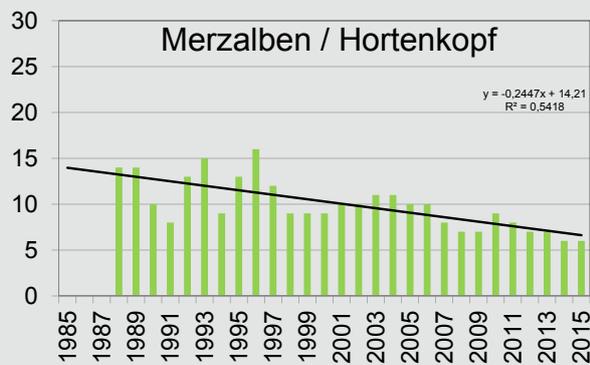
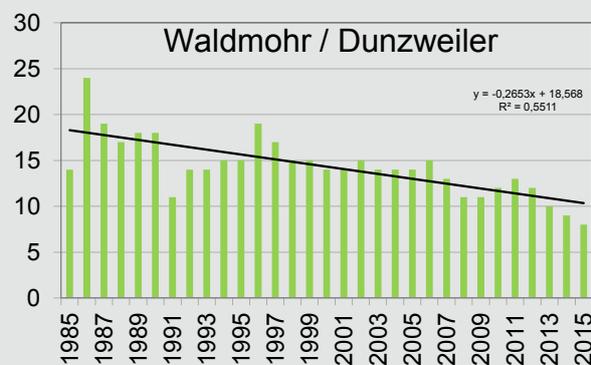
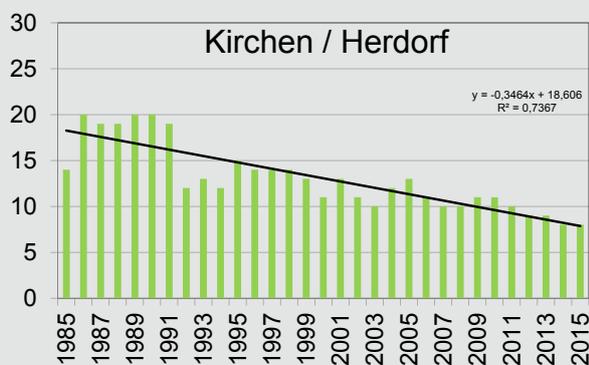
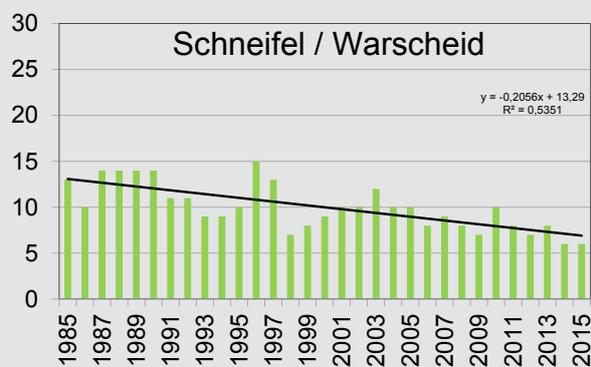
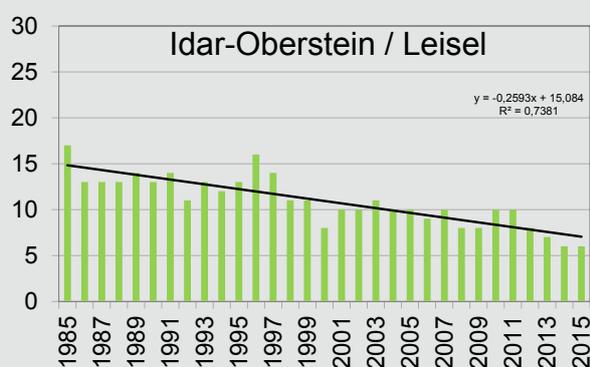
Die ergriffenen Luftreinhaltemaßnahmen zeigen bei den oxidierten und reduzierten Stickstoffverbindungen unterschiedliche Wirkung: Bei den Stickstoffoxiden hat sich dank erfolg-

reicher Verringerung der Stickoxidemissionen im Industriebereich und beim Straßenverkehr zum Beispiel durch die Festlegung von Euro-Normen (1 bis 6 für PKW und I bis VI für LKW) die NO₂-Immission in den Waldgebieten verbessert. Sowohl die Zeitreihen der rheinland-pfälzischen ZIMEN-Waldstationen als auch der Passivsammler an der saarländischen Waldforschungsstation Fischbach zeigen für Stickstoffdioxid einen eindeutig abneh-

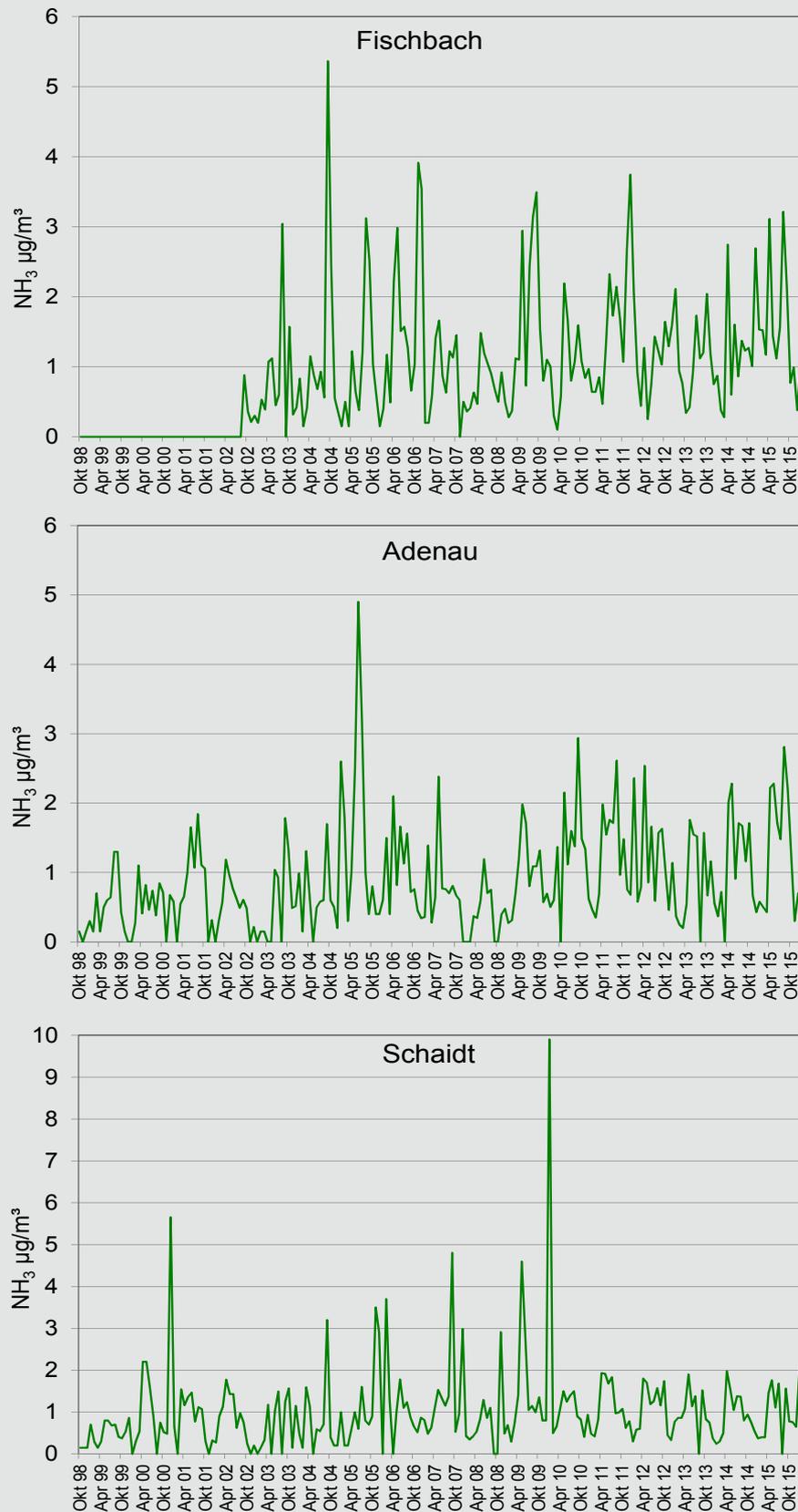
menden Trend. Bei den Ammoniakkonzentrationen in der Luft konnte demgegenüber bislang kein abnehmender Trend festgestellt werden.

Über die atmosphärische Deposition werden der oxidierte Stickstoff insbesondere in Form von Nitrat und der reduzierte Stickstoff in Form von Ammonium eingetragen. Hinzu kommt in geringerem Umfang organisch gebundener Stickstoff.

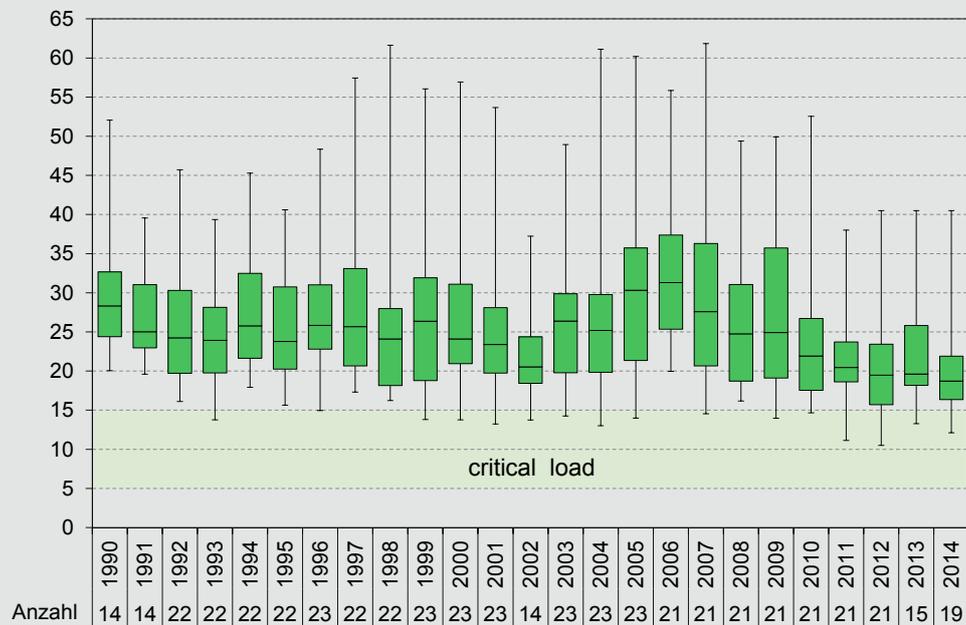
Entwicklung der Stickstoffdioxid-Immission (Jahresmittelwerte in µg/m³) an den rheinland-pfälzischen ZIMEN-Waldstationen (Jahresmittelwerte).



Verlauf der mit Passivsammlern ermittelten Ammoniak-Immission an der saarländischen Waldforschungsstation Fischbach und den rheinland-pfälzischen Level II Flächen Adenau und Schaidt.



Entwicklung der Stickstoffeinträge in den Wald. Dargestellt sind Boxplots der jährlichen Deposition an Gesamtstickstoff in kg/ha an saarländischen und rheinland-pfälzischen Messstationen des Forstlichen Umweltmonitorings.



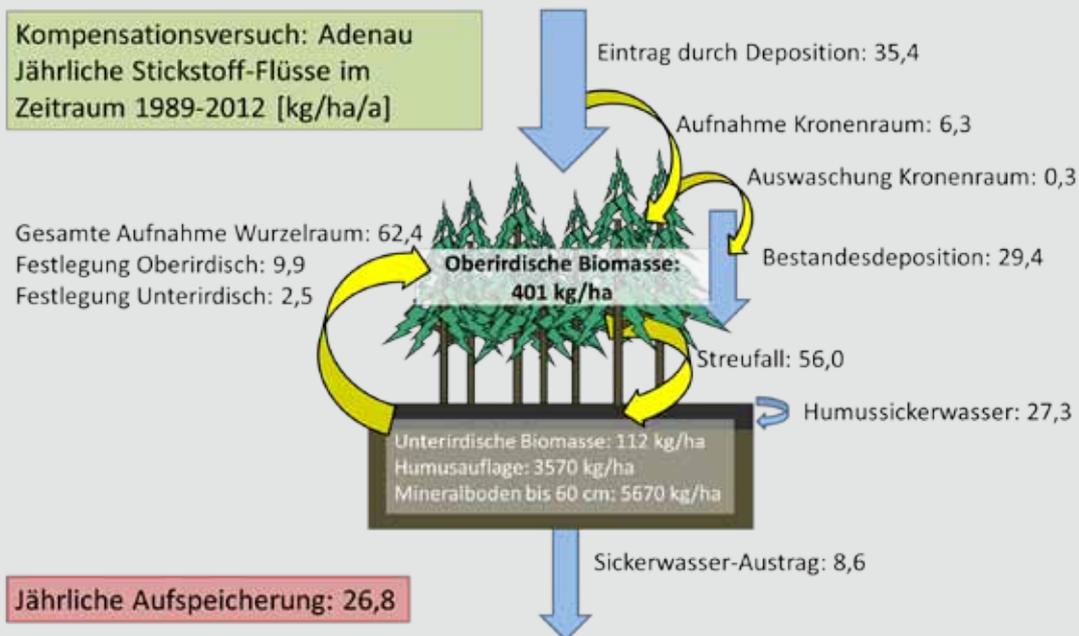
Die Summe dieser unterschiedlichen Stickstoffformen wird als Gesamtstickstoff bezeichnet. Die zum Teil drei Jahrzehnte zurückreichenden Zeitreihen des Forstlichen Umweltmonitorings beider Länder zeigen bislang leider keine eindeutige zeitliche Entwicklung der Eintragsraten an Gesamtstickstoff. Häufig zeigen sich beim Nitrat zwar leicht rückläufige Eintragsraten, beim Ammonium dagegen zum Teil sogar steigende Einträge. Beim Gesamtstickstoffeintrag zeigen 2 Untersuchungsflächen einen aufwärtsgerichteten, 8 Flächen einen abwärtsgerichteten und 14 Flächen keinen signifikanten zeitlichen Trend. An Waldmessflächen in Regionen, die durch intensive landwirtschaftliche Nutzung geprägt sind, nimmt Ammonium den weitaus größten und in der Zeitreihe auch ansteigenden Anteil am Stickstoffeintrag ein.

Die in den Waldgebieten beider Länder gemessenen Stickstoffeintragsraten übersteigen sehr deutlich die als ökosystemverträglich angesehenen Schwellenwerte (Critical Loads) von etwa 5 bis 15 in Ausnahmefällen bis 20 kg N je Hektar und Jahr. Die Emissionsminderung reicht beim Stickstoff anders als beim Schwefel also noch

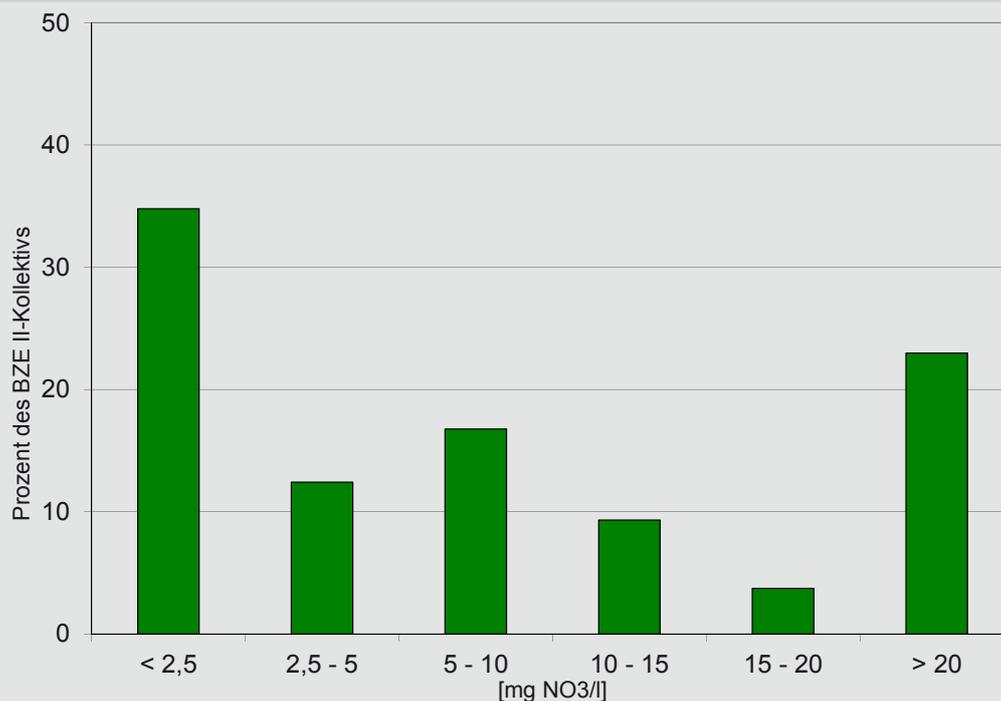
nicht aus, eine wirkliche Entlastung der Waldökosysteme zu bewirken.

Eingehende Bilanzierungen des Stickstoffhaushalts der Waldökosysteme über die Kalkulation der Stickstoffeinträge über die atmosphärische Deposition, der Stickstoffentnahme mit der Holznutzung und des Stickstoffaustrags mit dem Sickerwasserfluss an der Untergrenze des Wurzelraums zeigen meist deutliche Bilanzüberschüsse: Unsere Waldökosysteme reichern also Stickstoff an. Viele Ökosysteme befinden sich bereits im Zustand einer mehr oder minder ausgeprägten Stickstoffsättigung. Dies bedeutet, dass sie den Stickstoff nicht mehr vollständig im Ökosystem speichern und z.B. für eine erhöhte Biomasseproduktion nutzen können, sondern, dass sie Stickstoff in Form von Nitrat mit dem Sickerwasser abgeben. Diese Nitratauswaschung ist zum einen mit Bodenversauerung verbunden und zum anderen gefährdet das Nitrat im Bodensickerwasser die Qualität des Quell- und Grundwassers. Aktuelle Auswertungen zeigen an vielen Untersuchungsstellen erhöhte Nitratgehalte im Waldbodensickerwasser.

Langjährige Stickstoffbilanz eines Fichtenökosystems im Forstamt Adenau. Obgleich das Sickerwasser bereits erheblich mit Stickstoff befrachtet ist, zeigt die Ökosystembilanz einen Überschuss. Das System speichert demzufolge Stickstoff auf, was eine weiter zunehmende Eutrophierung und Destabilisierung des Ökosystems erwarten lässt.



Nitratgehalte im Unterboden der 161 Aufnahmepunkte der Waldbodenzustandserhebung in Rheinland-Pfalz. Gehalte unter 2,5 mg/l sind unbedenklich (keine Hinweise auf Stickstoffsättigung); Gehalte ab 5 mg/l können den ökosystemaren Bioelementhaushalt beeinträchtigen; Gehalte ab 10 mg/l werden als wasserwirtschaftlich relevant erachtet.



Waldschädigende Wirkungen des Stickstoffs

Die Überfrachtung der Waldökosysteme mit Stickstoff ist mit einer Fülle von schädlichen Wirkungen verbunden. Nachdem die Schwefeldioxidemissionen wirksam reduziert wurden, nimmt Stickstoff inzwischen die „Spitzenposition“ bei den versauernd wirkenden Luftschadstoffen ein. Ein besonders hohes Versauerungspotential geht hier vom insbesondere aus der Landwirtschaft stammenden Ammonium aus. Nehmen die Bäume Ammonium statt Nitrat zur Versorgung mit Stickstoff auf, geben sie nämlich an die Wurzelumgebung versauernde Ionen ab, während die Aufnahme von Nitrat entsauernd wirkt.

Die NitratAuswaschung infolge der überhöhten Stickstoffeinträge führt zu einer „Mitauswaschung“ von wichtigen basischen Nährstoffen wie Calcium, Magnesium und Kalium und damit zu einer Verarmung der Böden an diesen Nährelementen.

Ein Überangebot an Stickstoff bewirkt bei gleichzeitigem Unterangebot an anderen Nährstoffen die Entstehung von Nährstoffungleichgewichten, die das Gedeihen der Pflanzen beeinträchtigen. Der überhöhte Stickstoffeintrag lässt eine Verschiebung der Flora in Richtung N-ausnutzenden Pflanzenarten erwarten, die sich als bessere Wettbewerber erweisen und die schlechtwüchsigen, an N-Mangel angepassten Pflanzenarten verdrängen. Diese Veränderung der Biozönose läuft zurzeit beobachtbar in oligotrophen Lebensgemeinschaften, wie Heiden, Birken-Eichenwäldern (*Betulo-Quercetum*) und Magerrasen ab. Im Extremfall breiten sich in stickstoffgesättigten Waldökosystemen selbst auf von Natur aus armen Standorten Brennesseln, Brombeeren, Fingerhut, Weidenröschen, Kleinblütiges Springkraut und andere Stickstoffzeiger aus. Hierdurch kann auch die natürliche Verjüngung der Waldbäume behindert werden. Zudem werden die Bäume bei Stickstoffüberschuss anfällig gegen Pilzerkrankungen, Frost und Trockenheit.

Wird der überhöhte Stickstoff-Eintrag nicht gebremst, werden Veränderungen der Biodiversität durch Eutrophierung, eine weitere Bodenversauerung und eine Verarmung der Waldökosysteme an essentiellen Nährstoffen nicht aufzuhalten sein.

Durch anthropogene Aktivitäten emittierte Stickstoffverbindungen schädigen nicht nur unsere Waldökosysteme sondern auch das Grundwasser und die Oberflächengewässer durch Eutrophierung, tragen zum Klimawandel bei und schaden auch der menschlichen Gesundheit. Ammoniak wandelt sich über verschiedene Reaktionen in Ammoniumsulfat und Nitrat um. Diese Stoffe wiederum tragen dazu bei, dass sich gesundheits-schädliche Feinstaubpartikel bilden können. Auch Stickstoffdioxid ist bereits in geringen Konzentrationen gesundheitsschädigend, wie Feinstaub insbesondere für die Atemwege, aber auch für das Herz-Kreislauf-System. Stickoxide sind zudem wesentliche Vorläufersubstanzen für das für die Waldbäume, aber auch für die menschliche Gesundheit schädliche Ozon. Stickstoffgesättigte Böden können zudem verstärkt Lachgas emittieren, ein Treibhausgas dessen Treibhauswirksamkeit fast dreihundertmal so groß ist wie die von Kohlendioxid.

Nährstofffunktion des Stickstoffs

Zu den Stickstoffeinträgen und deren Wirkungen in den Waldökosystemen gibt es eine Fülle von wissenschaftlichen Studien. Die Belastung unseres Waldes durch überhöhte Stickstoffeinträge ist also eindeutig belegt. Auf der anderen Seite sind das Wachstum und die Biomasseproduktion in unseren Wäldern in den letzten Jahrzehnten aber sogar angestiegen.

Hier kommt die Nährstoffseite des Stickstoffs ins Spiel. Stickstoff ist ein Hauptnährstoff, ohne den keine Pflanze gedeihen kann. In der Mehrzahl unserer Waldgebiete wurde den Waldböden in geschichtlicher Zeit bis ins 19. Jahrhundert hinein durch Waldweide, Streunutzung und Plaggenhiebe übermäßig Nährstoffe entzogen. Hierdurch entstand vielerorts Stickstoffmangel, der das Wachstum deutlich einschränkte. Bei dieser Ausgangssituation unterstützte der Eintrag von Stickstoffverbindungen aus der anthropogen bedingten Emission von Ammoniak und Stickoxiden die nach Beendigung der Übernutzung eingeleitete Erholung der Standortsproduktivität. Verbunden mit waldbaulichen Maßnahmen wie

einer pfleglichen, naturnahen Waldbewirtschaftung und der Kalkung versauerungsgefährdeter Standorte konnten die Wälder die verbesserte Stickstoffverfügbarkeit für mehr Wachstum und Biomasseproduktion nutzen. Hinzu kommen wachstumsfördernde (aber klimaschädigende!) Wirkungen steigender Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre.

Aber ein überhöhter Stickstoffeintrag ist, wie bereits ausgeführt, mit Versauerung und Verarmung an anderen Nährstoffen verbunden. Die durch Luftschadstoffeintrag bedingte Stickstoffanreicherung kann demnach für begrenzte Zeit durchaus ein beschleunigtes Wachstum bewirken. Erst wenn die verfügbaren Vorräte anderer Nährstoffe soweit herabgesetzt sind, dass diese sich im Mangelbereich befinden, sind auch Zuwachseinbußen zu erwarten.

Offenbar sind die Zeiten eines durch Stickstoffeintrag geförderten Baumwachstums bereits vor-

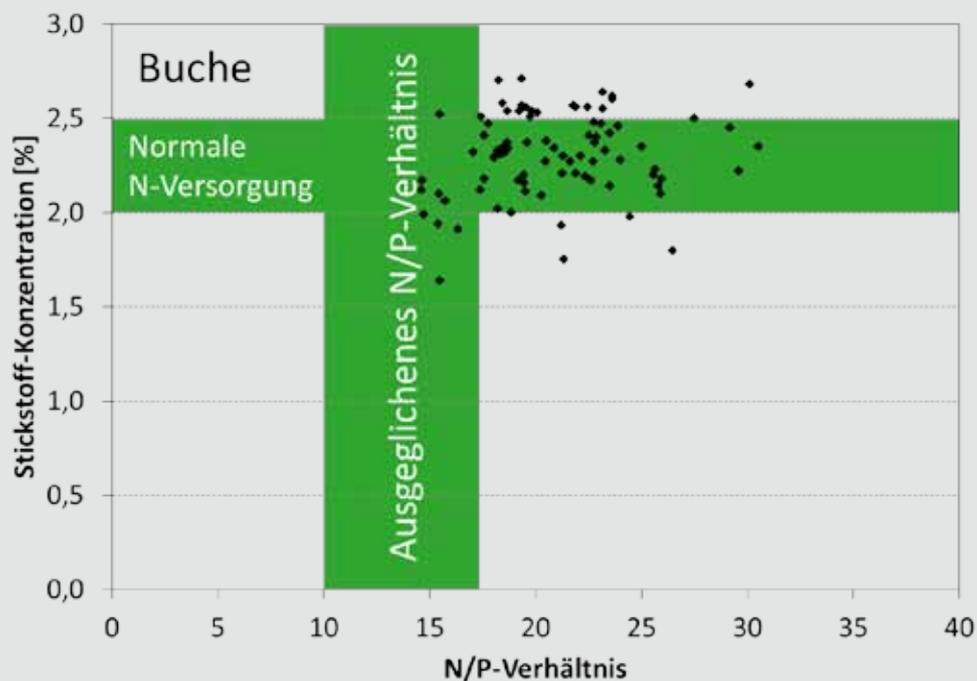
bei. Aktuelle Auswertungen zur Waldernährung anhand der Nährstoffgehalte in den Blättern bzw. Nadeln im Rahmen der landes- und bundesweiten Waldbodenzustandserhebung belegen, dass nicht mehr Stickstoff, sondern zunehmend Phosphor der das Wachstum begrenzende Nährstoff ist.

Welche Maßnahmen sind notwendig?

In erster Linie ist eine weitere Reduzierung der Ammoniak- und Stickoxidemissionen erforderlich. Hierzu müssen auf europäischer und nationaler Ebene ehrgeizige Emissionsminderungsziele angestrebt und umgesetzt werden.

Im Multikomponentenprotokoll der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (Economic Commission for Europe, UNECE), das die jährlichen Emissionen durch Einführung nationaler Höchstmengen begrenzt, hat sich Deutsch-

Stickstoffgehalte in Buchenblättern an den Beprobungspunkten der landesweiten Waldernährungserhebung in Rheinland-Pfalz, aufgetragen über dem N/P-Verhältnis. Der waagrechte grüne Balken umfasst die in der Literatur als „Normalbereich“ angegebenen Stickstoffgehalte, der senkrechte grüne Balken den Bereich eines ausgewogenen Stickstoff-Phosphorverhältnisses. Die Mehrzahl der Buchenbestände weist ein unausgewogenes N/P-Verhältnis auf, einige Bestände zeigen auch eine Stickstoff-Luxus-Ernährung.



land zu einer Reduktion der Stickstoffemission verpflichtet. Ab dem Jahr 2010 sollen 1.081 Tausend Tonnen (Tsd. t) Stickoxid (NO_x) und 550 Tsd. t Ammoniak (NH_3) nicht mehr überschritten werden. Darüber hinaus hat Deutschland im Zuge der Novellierung des Protokolls bis 2020 eine Reduktion der NO_x -Emissionen um 39 % und der NH_3 -Emissionen um 5 % gegenüber dem Wert von 2005 zugesagt. Auf EU-Ebene legt die Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen (NEC-Richtlinie) fest, dass Deutschland für NO_x ab 2010 eine Emissionshöchstmenge von 1.051 Tsd. t und für NH_3 eine Emissionshöchstmenge von 550 Tsd. t einzuhalten hat. Auch nach Korrektur der Emissionsraten um die beim Abgleich mit den NEC-Vorgaben nicht zu berücksichtigenden Emissionen („Adjustments“) werden beim Ammoniak die vorgegebenen Höchstmengen um mehr als 120 Tausend Tonnen überschritten, während die Vorgaben für die Stickoxide seit 2012 eingehalten werden.

Aktuell werden die nationalen Emissionshöchstmengen der EU-NEC-Richtlinie neu verhandelt. Beim Ammoniak sind die Minderungsvorschläge (EU-Kommission: - 38 % ab 2030 gegenüber Basisjahr 2005; EU-Rat: -29 %) im Vergleich zu anderen Luftschadstoffen (NO_x : -64 %; SO_2 : -57 %/-58 %) nur moderat.

Bei den Stickoxiden ist der Verkehrsbereich trotz der bereits ergriffenen Emissionsminderungsmaßnahmen weiterhin mit Abstand der größte Verursacher. Zur weiteren Emissionsminderung sind hier nicht nur ambitionierte Abgasstandards (Euro 6/VI für Pkw/Lkw), sondern, wie die aktuelle Diskussion um die Diskrepanz zwischen Angaben und Realität bei Verbrauch und Schadstoffemissionen der Fahrzeuge zeigt, realistischere Typgenehmigungsverfahren und effektivere Kontrollen erforderlich. Weitere wirksame Maßnahmen zur Reduzierung der NO_x -Emissionen sind eine Stärkung des Schienenverkehrs und des öffentlichen Nahverkehrs sowie eine verstärkte Einführung alternativer Antriebs-systeme bei Kfz, wie des Elektro- oder Hybrid-Antriebs. Wir alle können zur Verringerung der Stickoxidemissionen beitragen, indem wir, je nach persönlicher Möglichkeit, weniger Auto fahren und verbrauchs- und emissionsarme Kfz beim Kauf bevorzugen.

Zur Verringerung der Ammoniakemission sind vor allem weitere Maßnahmen der Landwirtschaft erforderlich. Zwingend notwendig ist die konsequente Anwendung der guten fachlichen Praxis und insbesondere die strikte Einhaltung der Vorschriften zur Ausbringung und Lagerung von Wirtschaftsdüngemitteln. Besonders wichtig ist der Einsatz moderner Technik zur bodennahen, gleichmäßigen Verteilung und Dosierung von Gülle bei Grünlandflächen und die rasche Einarbeitung auf Ackerflächen. Eine umweltgerechte, die Ammoniakemission reduzierende Tierhaltung ist für den Landwirt mit zusätzlichen Aufwendungen verbunden. Wir Verbraucher sollten dies anerkennen und bereit sein, es an der Fleischtheke oder beim Kauf von Milchprodukten mit ein paar Euro mehr zu honorieren.

Der Rückblick auf die letzten Jahrzehnte zeigt, dass sich der Stickstoffausstoß offenbar nur langsam verringern lässt. Vor allem die auch für die fernere Zukunft nur moderaten Minderungsziele beim Ammoniak lassen erwarten, dass die Stickstoffeutrophierung des Waldes und die durch überhöhte Stickstoffdeposition bedingte Beeinträchtigung der Waldbodenfunktionen noch lange bedeutsam sein wird. Was kann in dieser Situation der einzelne Waldbesitzende tun? Vorweg sei noch einmal betont: die einzig langfristig wirksame Maßnahme zum Schutz der Waldökosysteme und des Grund- und Quellwassers vor Stickstoffeutrophierung und Versauerung ist eine Reduzierung der Stickstoffeinträge durch eine entsprechende Emissionsminderung. Mit waldbaulichen Maßnahmen lässt sich die Stickstoffsättigung letztlich nicht aufhalten. Allerdings kann über die Baumartenwahl und über die waldbauliche Behandlung die Fähigkeit der Waldökosysteme, Stickstoff aufzunehmen und im System zu halten beeinflusst werden. Hierdurch lassen sich negative Effekte hinauszögern und mildern. Hohe Nitratauswaschungen treten vor allem in Nadelholzreinbeständen und vor allem beim Anbau von Nadelbäumen im Reinbestand auf zuvor mit Laubbäumen bestockten Flächen auf. Laubwälder und Laub-Nadel-Mischwälder können mehr Stickstoff speichern als reine Nadelwälder. Zudem ist der Stickstoff in Laubwäldern meist im

stabileren Mineralbodenhumus, in Nadelwäldern dagegen im labileren Auflagehumus festgelegt. Waldökosysteme reagieren schon bei beginnender Stickstoffsättigung sehr empfindlich auf Störungen z.B. durch Sturmwurf, Schneebruch oder Insektenkalamitäten und auch auf waldbauliche Maßnahmen wie Kahllebung, starke Verjüngungshiebe oder Bodenbearbeitung. Bei derartigen Störungen kommen mehr Wärme und mehr Wasser auf den Boden, wodurch der Humusumsatz und damit die Stickstofffreisetzung verstärkt werden. Da gleichzeitig die Stickstoffaufnahme durch die Bäume ganz oder teilweise ausfällt, wird der freigesetzte Stickstoff in Form von Nitrat mit dem Sickerwasser ausgetragen. Dies stellt nicht nur ein Risiko für das Grund- und Quellwasser dar, sondern gefährdet auch den Nährstoffhaushalt des Waldökosystems und damit die Bodenfruchtbarkeit. Der beste Schutz hiergegen ist ein naturnaher, auf den Aufbau stabiler laubbaumreicher Mischwälder setzender Waldbau. Wichtig ist auch die Erhaltung und Förderung einer Kraut- und Strauchschicht oder eines Baumunterstandes, da diese Vegetation bei kurzzeitigen Störungen, z.B. bei der Nutzung von hiebsreifen Bäumen, den freiwerdenden Stickstoff aufnehmen und negative Wirkungen für das Ökosystem verhindern oder abmildern kann. In diesem Zusammenhang ist auch der Wildbestand von großer Bedeutung. Wo das Gedeihen der jun-



Passivsammlersystem zum Messen von Ammoniak- und Stickstoffdioxidkonzentrationen an der saarländischen Station Fischbach

Foto D. Hemmerling

gen Waldbäume und der Bodenvegetation durch übermäßige Reh- oder Rotwildbestände massiv beeinträchtigt ist, sind gerade im Zusammenspiel mit überhöhten Stickstoffeinträgen Störungen im Nährstoffhaushalt und eine Minderung der Bodenfruchtbarkeit vorprogrammiert.

Weitere Informationen zur Belastung der Waldökosysteme beider Länder durch Stickstoff enthalten

- der Waldbodenzustandsbericht für Rheinland-Pfalz
http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Mitteilungen/Waldbodenzustandsbericht_1.pdf
- der Waldbodenzustandsbericht für Deutschland
<https://www.thuenen.de/de/wo/arbeitsbereiche/waldmonitoring/bodenzustandserhebung/>
- Die Webseiten des Forstlichen Umweltmonitorings im Saarland:
<http://www.saarland.de/70484.htm>
- die Webseiten der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft des Landes Rheinland-Pfalz (Forschungsschwerpunkte: „Luftschadstoffbelastung des Waldes“
<http://www.wald-rlp.de/forschungsanstalt-fuer-waldoekologie-und-forstwirtschaft/forschungsschwerpunkte/luftschadstoffbelastung-des-waldes.html>
und „Forstliches Umweltmonitoring“
<http://www.wald-rlp.de/forschungsanstalt-fuer-waldoekologie-und-forstwirtschaft/forschungsschwerpunkte/forstliches-umweltmonitoring/konzept-des-forstlichen-umweltmonitorings.html>