



Zuviel des Guten?

Über die Gefährdung der Waldböden durch Stickstoffeinträge

von Karl H. Mellert

Waldböden erfüllen wichtige Funktionen im Stoff- und Wasserhaushalt ganzer Landschaften. Sie sind zudem die entscheidende Grundlage für die Forstwirtschaft, die vor dem Hintergrund des Klimawandels eine steigende Verantwortung für die Bereitstellung nachhaltig erzeugter regenerativer Rohstoffe besitzt. Die Erhaltung der Schutz- und Holzproduktionsfunktion der Waldböden ist daher sowohl ökologisch als auch ökonomisch ein wichtiges Ziel im Rahmen staatlicher und privater Daseinsvorsorge. Die Waldböden in Mitteleuropa zählen zu den am höchsten mit Stickstoff belasteten auf unserem Kontinent. Auch in Deutschland läuft die Stickstoffeutrophierung der Waldböden gegenwärtig in vielen Gebieten mit großer Geschwindigkeit ab. Die Einträge stagnieren auf (zu) hohem Niveau und übersteigen mittlerweile den Stickstoffbedarf der Waldbäume. Dies führt unter anderem zur Bodenversauerung und zur Verarmung der Böden mit wichtigen Nährstoffen. Dies hat negative Konsequenzen nicht nur für den Waldbestand, sondern auch für den Grundwasser- und Klimaschutz. Der vorliegende Beitrag benennt die Quellen der erhöhten Stickstoffbelastung von Waldböden und beschreibt die unterschiedlichen Auswirkungen und Folgen für den Wald und für nachfolgende Systeme wie den Wasserhaushalt. Abschließend zeigt der Autor für Wald- und Landwirtschaft Lösungswege auf, die eine Renaturierung der Waldböden ermöglichen.

Waldböden erfüllen im Stoff- und Wasserhaushalt ganzer Landschaften wichtige Funktionen wie zum Beispiel die Filterung von Luft und Niederschlägen sowie die Wasser- und die Kohlenstoffspeicherung. Als Abbau-, Ausgleichs- und Speichermedium schützen sie aufgrund ihrer Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungsfunktion auch die Grundwasserressourcen (Schutzfunktion). Tieren, Pflanzen und Bodenorganismen bieten sie Lebensraum und tragen so zur Erhaltung der Biodiversität bei. Die Effekte auf den Waldboden sind daher untrennbar mit Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften im Wald und auf mit dem Wald verbundene Systeme wie das Grundwasser verbunden. Die Beantwortung der Frage nach einer Gefährdung der Waldböden durch Stickstoffeinträge kann daher nicht ohne den Blick auf andere mit dem Boden verwobene natürliche Ressourcen und den Bezug zur Forstwirtschaft beantwortet werden.

Die genannten Bodenfunktionen hängen wesentlich vom jeweiligen Zustand der Böden ab. Die Waldböden und deren Leistungsfähigkeit werden in Deutschland vor allem durch atmosphärische Säure-, Stickstoff- und Schadstoffeinträge verändert, insbesondere

leiden ihre Pufferfunktionen unter den hohen Belastungen (1, 2, 6). Langjährige Stickstoffeinträge führen zunächst fast unmerklich zu tief greifenden Veränderungen in den Waldböden. Denn für das Wachstum der Wälder unserer Breiten stellte Stickstoff (N) in der Vergangenheit das limitierende Nährelement dar. Seit den 1990er-Jahren hat das Element Stickstoff aber eine erstaunliche Wandlung in seiner ökologischen Beurteilung erfahren. Ausgehend von einem positiven Image als wichtigster Pflanzennährstoff und Garant für gesicherte Ernährung besitzt Stickstoff wegen seiner eutrophierenden Wirkung inzwischen eine ähnliche Umweltrelevanz wie Schwefel Anfang der 1980er-Jahre. Der Hintergrund für diese Entwicklung ist die ständige Anreicherung des weltweiten Stickstoff-Kreislaufes durch künstliche N_2 -Fixierung durch Industrie, Verkehr und Landwirtschaft.

Quellen der Stickstoffeinträge

Die Einträge aus der Atmosphäre in die Waldböden entstammt hauptsächlich aus zwei Quellen:

- Verbrennungsvorgänge bei hohen Temperaturen (davon 67 Prozent Abgase von Kraftfahrzeugen, der Rest aus dem Energiesektor, das heißt aus Kraftwerken und anderen Feuerungsanlagen),
- Ausgasung beziehungsweise Verdunstung von Ammoniak (zu 85 Prozent aus der landwirtschaftlichen Produktion).

Bei den Verbrennungsvorgängen bilden sich bei den hohen Verbrennungstemperaturen aus Stickstoff und Sauerstoff Stickoxide (NO_x). Durch den Einsatz von Katalysatoren bei Kraftfahrzeugen konnte der Anfall von Stickoxiden pro Fahrzeug erheblich vermindert werden, allerdings wurde dieser Effekt durch den zunehmenden Verkehr zum Teil wieder kompensiert. Der Anteil der Emissionen aus Wärmekraftwerken, welche Kohle, Öl oder Gas einsetzen, wurde durch effektive Filteranlagen stark reduziert. In der Natur bilden sich Stickoxide nur bei Blitzentladungen. Im Vergleich zu den emittierten Mengen und den durch Mikroorganismen pflanzenverfügbar gemachten Stickstoff ist der Eintrag aus Blitzentladungen vernachlässigbar.

Die Emission von oxidierten Stickstoffverbindungen ist in Deutschland von 3,33 Millionen Tonnen im Jahr 1980 auf 1,3 Millionen Tonnen – berechnet als Stickstoffdioxid – im Jahr 2007 zurückgegangen (ein Minus von 60 Prozent). Die EU-Richtlinie über Nationale Emissionshöchstgrenzen (NEC) sieht für Deutschland eine weitere Reduktion auf eine Million Tonnen Stickstoffdioxid (NO_2) bis zum nächsten Jahr vor. Ähnlich wie beim Schwefeldioxid (SO_2) wurden bei den Stickoxiden demnach große Fortschritte bei der Luftreinhaltung erzielt.

Anders sieht die Entwicklung bei den reduzierten Stickstoff-Verbindungen Ammoniak und Ammonium aus. Seit Mitte der 1990er-Jahre ist die Ammoniakemission in Deutschland in der Bilanz nahezu gleich geblieben. Als Quelle von reduzierten Stickstoff-Verbindungen spielt die Landwirtschaft die Hauptrolle. Ammoniak (NH_3) stammt vor allem aus der Tierhaltung, insbesondere aus der Ausbringung und Lagerung von wirtschaftseigenen Düngern sowie aus Stallemissionen. In geringerem Umfang kommt Ammoniak auch aus der Anwendung und Herstellung stickstoffhaltiger Mineraldünger. Natürliche Ammoniakemissionen aus mikrobiellen Prozessen im Boden natürlicher und naturnaher Ökosysteme spielen in Relation zur anthropogenen Gesamt-Ammoniakemission kaum eine Rolle.

Seit den 1950er-Jahren wird auf der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland mehr Stickstoff ausgebracht als mit den Ernteprodukten abgefahren wird (8). Der kumulative Stickstoffüberschuss beträgt von 1950 bis 2007 in den alten Bundesländern über vier Tonnen pro Hektar. Zurzeit umfasst der mittlere Stickstoffüberhang in Deutschland mindestens 85 Kilo-

ogramm Stickstoff je Hektar und Jahr und gelangt zum überwiegenden Teil in die Gewässer beziehungsweise in die Atmosphäre. Die Ammoniakemission aus anthropogenen Quellen ist in Deutschland von 835.000 Tonnen Ammoniak im Jahr 1980 auf 600.000 Tonnen im Jahr 2003 um 28 Prozent gesunken. Die NEC-Richtlinie sieht bis zum Jahr 2010 für Deutschland eine weitere Reduktion auf 550.000 Tonnen Ammoniak vor.

Der Rückgang der Emissionen zwischen 1990 und 2007 um 94.000 Tonnen wurde überwiegend durch den Abbau der Tierbestände in den neuen Bundesländern unmittelbar nach der Wiedervereinigung erzielt, das heißt: in den übrigen Bereichen zusammengenommen erhöhte er sich dagegen leicht (12). Seit Mitte der 1990er-Jahre ist die Ammoniakemission in Deutschland in der Bilanz daher nahezu gleich geblieben.

Einträge in Wälder ...

Wälder haben aufgrund ihrer großen Blattoberfläche die größte Kontaktfläche zur Atmosphäre und erhalten daher wesentlich höhere atmogene Einträge als landwirtschaftliche Flächen. Hinzu kommt, dass Waldböden im Gegensatz zu den seit jeher vom Menschen gedüngten landwirtschaftlichen Böden wesentlich empfindlicher auf die atmosphärischen Stickstoffeinträge reagieren. Besonders intensiv werden die Stickstoffeinträge in die Waldböden zum Beispiel an den 22 Waldklimastationen in Bayern untersucht. Der neueste bayerische Waldzustandsbericht (1) zeigt, dass die Einträge in die Waldböden seit Beginn der Messungen Anfang der 1990er-Jahre auf hohem Niveau stagnieren. Ein Trend der Gesamtstickstoffbelastung ist in den bayerischen Daten nicht zu erkennen. Auch aus anderen Bundesländern wird eine vergleichbare Situation gemeldet. Durch zusätzliche Stickstoffaufnahme im Kronenbereich kann für die Waldökosysteme Deutschlands von einer mittleren Stickstoffdeposition von rund 50 (20 bis 80) Kilogramm pro Hektar und Jahr ausgegangen werden (9). In Regionen mit intensiver Landwirtschaft werden Spitzenwerte von über 100 Kilogramm Stickstoff/Hektar in den Waldboden eingetragen, der überwiegende Teil der Einträge wird dann als Ammonium deponiert. Dies ist ein Mehrfaches des Stickstoffbedarfs der Waldbäume. Dabei sind lokale Emittenten von großer Bedeutung für die Belastungen vor Ort (10). An Waldrändern können die Stickstoffdepositionen ein Mehrfaches der Werte innerhalb des Waldes erreichen (11).

... und ihre Auswirkungen auf Waldböden

Die wichtigsten Folgen der Stickstoffeinträge für die Waldböden sind:

- Stickstoffdüngung, -eutrophierung und schließlich Stickstoffsättigung (keine Nettospeicherung mehr im System),
- Nährelementungleichgewichte in den Böden,
- Bodenversauerung und Verarmung des Bodens an wichtigen Nährstoffen.

Diese an den Waldböden gebundenen Prozesse haben Konsequenzen für die Waldbäume, das Waldökosystem als Ganzes sowie für nachfolgende Systeme wie Grund- und Oberflächengewässer. Zudem entwickeln sich derart belastete Waldböden zu einer Quelle klimarelevanter Stickoxid-Spurengasemissionen. Nicht zuletzt wird das Gleichgewicht der Lebensgemeinschaften im Wald nachhaltig gestört. Die Effekte der Stickstoffeinträge für den Waldboden und deren Konsequenzen für den Wald werden im Folgenden näher erläutert.

Eine Reihe von Untersuchungen innerhalb der letzten 20 Jahre zeigt, dass viele Waldböden nach Jahrzehnten anhaltender Stickstoffeutrophierung aus der Luft in eine Phase der Stickstoffsättigung eintreten. Der Stickstoffbedarf von Waldbeständen liegt bei circa fünf bis 15 Kilogramm Stickstoff pro Hektar, ein darüber hinausgehendes Stickstoffangebot können die Waldbäume nicht aufnehmen. Wenn zudem die Stickstoff-Speicherreserven des Bodens und der Bodenpflanzen erschöpft sind, spricht man von einer Stickstoffsättigung. Da der Wald dann nicht mehr in der Lage ist, Stickstoff weiterhin festzuhalten, wird aller eingetragener Stickstoff aus dem Wurzelraum *als Nitrat* ins Grundwasser ausgewaschen (4, 5).

In vielen Wäldern ist die atmogene Stickstoffdüngung der Böden für die Forstwirtschaft zunächst weniger mit negativen Folgen verbunden, sondern äußert sich in erhöhten Zuwächsen der Waldbäume. Diese Wachstumsbeschleunigung der Wälder ist weit verbreitet und führt dazu, dass die vorwiegend in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts erstellten Ertragstafeln die Zuwächse der Bäume in der Regel unterschätzen. Auf armen Böden ist die Unterschätzung des Zuwachses am stärksten. Auf diesen Standorten übertrifft der Düngungseffekt durch Stickstoff auch alle weiteren positiven Wachstumseffekte, die etwa durch die Klimaerwärmung (z. B. die Verlängerung der Wachstumsperiode von Bäumen) verursacht werden können (7).

Der Zuwachsgewinn beruht neben der Erhöhung der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch die Düngung aus der Luft auf der schonenderen Nutzung des Waldes seit Mitte des letzten Jahrhunderts. In der Vergangenheit fand nämlich jahrhundertlang eine Übernutzung der Wälder durch Streunutzung, Waldweide und Brennholznutzung bis ins 20. Jahrhundert hinein statt. Der Stickstoffspeicher der Waldökosysteme wurde dadurch entleert und die Stickstoffknappheit verschärft. Deshalb sickert aus vielen Waldböden trotz Stickstoffeinträgen

immer noch kaum Nitrat, solange bis das gesamte Waldökosystem (Vegetation, Bodentiere, -pilze und -bakterien sowie Humus) seinen Stickstoffbedarf gedeckt hat. Die Stickstoffspeicherkapazität ist jedoch durch den Gesamtbedarf des jeweiligen Waldökosystems begrenzt. Durch den anthropogen bedingten atmosphärischen Stickstoffeintrag der letzten Jahrzehnte in die vormals stickstofflimitierten Waldökosysteme werden also die Stickstoffreservoirs der Waldböden nun wieder aufgefüllt, teilweise sogar überfüllt.

Der Ausgleich des Stickstoffdefizits kann allerdings damit verbunden sein, dass nun andere Nährelemente in einen relativen Mangel treten, wenn der Waldboden mit ihnen schlecht ausgestattet ist. So hat das durch Stickstoffeintrag angeregte Wachstum zur Folge, dass auch andere essentielle Nährstoffe und auch Wasser in größeren Mengen aufgenommen werden müssen. Mit zunehmender stickstoffbedingter Wachstumssteigerung können *Nährelementdisharmonien* auftreten. Das Verhältnis von Stickstoff zu weiteren wichtigen Nährstoffen wie Magnesium weitet sich mit fortschreitender Verbesserung der Stickstoffversorgung bis hin zur Überernährung. Ernährungsstörungen mit relativer Unterversorgung insbesondere an Kalium und Magnesium sowie Wassermangelsituationen nehmen zu. Erhöhte Disposition gegenüber abiotischen (Fröste, Temperaturstürze) und biotischen Schadfaktoren (Insekten, Pilze) können ebenfalls als Folge der Stickstoffüberversorgung auftreten. Bei lang anhaltendem hohen Stickstoffeintrag ist sogar mit einer Zuwachsdpression zu rechnen, wenn die negativen Effekte der Überdüngung die Oberhand gewinnen. Negative Auswirkungen auf das Baumwachstum durch eine extreme Stickstoffüberdüngung wurden in mehreren experimentellen Studien gezeigt.

Die Emission von oxidierten Stickstoffverbindungen ist neben Schwefeldioxid die wichtigste Ursache für den „sauren Regen“, der als eine der Ursachen für *Bodenversauerung* und atmogene Waldschäden auf schwach gepufferten, sauren Waldböden gilt. In der Atmosphäre, auf der Oberfläche von Pflanzen und im Boden kann die Salpetersäure zu Nitratsalzen neutralisiert werden. Diese Neutralisierung ist mit einer Freisetzung von Nährstoffen verbunden und führt zu deren Auswaschung mit dem Sickerwasser. Die Nährstoffverarmung bildet den negativen Haupteffekt der Bodenversauerung.

Der Versauerungseffekt ist bei dem vor allem aus landwirtschaftlichen Quellen stammenden Ammoniak deutlich stärker als bei Nitrat, weil bei der mikrobiellen Umwandlung von Ammonium zu Nitrat zusätzlich Protonen frei werden. Die interne Versauerung durch Ammoniumumwandlung kann die direkte Belastung durch Säureeinträge durch Salpeter- und Schwefelsäure um ein Mehrfaches übersteigen, wenn das gebildete Nitrat nicht mehr vollständig von Pflanzen aufgenommen,

sondern aus dem Boden ausgewaschen wird. Im Extremfall kann es durch die Versauerung in wenig gepufferten Böden (saure Magmatite und Metamorphite wie Granit und Gneis z. B. im Bayerischen Wald, Thüringer Wald, Harz oder Buntsandsteine z. B. im Schwarzwald, Spessart) auch zur Freisetzung von toxischen Ionen wie Aluminium und Schwermetallen kommen. Diese können schädliche Wirkungen auf die Waldbäume beziehungsweise die Bodenorganismen ausüben und nach ihrer Passage durch den Boden ins Grundwasser eingetragen werden. Bei Exposition zu einer hohen atmosphärischen Stickstofffracht, die mit einer starken Bodenversauerung und in Extremfällen sogar mit einer direkten Schädigung (Verätzungen der Nadel- und Blattorgane) einhergeht, werden Zuwachseinbußen bis hin zur Bestandsauflösung beobachtet.

In den meisten Fällen aber treten Folgen für den Wald und nachfolgende Systeme wie das Grundwasser bereits auf, lange bevor Schäden am Wald sichtbar werden. Denn viele unserer häufigsten Waldbaumarten sind an saure Bedingungen angepasst (z. B. Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Birke) und erweisen sich daher als sehr robust gegenüber einer Bodenversauerung. So werden in vitalen Waldbeständen, die keinerlei Anzeichen einer Schädigung zeigen, sondern im Gegenteil durch gesteigertes Wachstum zunächst von den Stickstoffeinträgen zu profitieren scheinen, bereits hohe Nitratausträge beobachtet. Auch in dieser Phase der Stickstoffsättigung sind Waldböden dann keine Garanten mehr für sauberes Grundwasser. Viele Waldböden haben diesen Zustand bereits erreicht mit zum Teil heute schon schwerwiegenden Folgen für nachfolgende Systeme, vor allem für das Grundwasser und die Oberflächengewässer. Zudem entwickeln sich derart belastete Waldböden zu einer Quelle klimarelevanter Stickoxid-Spurengasemissionen.

Durch die flächige Stickstoffeutrophierung werden des Weiteren nicht nur in den Wäldern oligotrophe Lebensgemeinschaften bedroht. Die Eutrophierung aus der Luft begünstigt breitblättrige „Allerwelts-Arten“, seltene und lichtbedürftige Pflanzen werden von ihnen zunehmend verdrängt. Auch hier sind es meist wieder die landwirtschaftlichen Emissionen, die die größten Probleme verursachen, denn ein erheblicher Teil des Ammoniaks wird bei geringer Verweilzeit in der Atmosphäre in Nachbarschaft zu seiner Quelle wieder deponiert und kann so zur Stickstoffbelastung benachbarter, natürlicherweise nährstoffarmer Ökosysteme (Heideflächen, Magerwiesen, Moore, Wälder) beitragen. Zur Erhaltung dieser meist geschützten Pflanzengemeinschaften müssten Maßnahmen zur De-Eutrophierung oder zur Neuschaffung entsprechender Standorte ergriffen werden, wenn zumindest einen kleiner Rest unserer traditionell artenreichen Kulturlandschaft oder typischen Naturlandschaft speziell auch im Wald erhalten werden soll.

Lösungsansätze

Im Rückblick auf die letzten Jahrzehnte müssen die Wirkungen von Stickstoffeinträgen aus der Atmosphäre für die Waldböden als ambivalent eingestuft werden. In früheren Jahren hat die Bodenfruchtbarkeit auf vielen Standorten, vor allem auf vormals streugenen degradierten Böden, durch die Stickstoffeinträge zunächst zugenommen. Dies ist aber trügerisch, denn langfristig ist auch auf diesen Standorten wieder mit einer Bodendegradation infolge der Stickstoffdepositionen zu rechnen. Zudem ist die Filter- und Pufferfunktion vieler Waldböden gefährdet bzw. heute schon weitgehend außer Kraft gesetzt. Dies geht mit Nährelementverlusten der Waldböden und mit einer Nitratbelastung des Grundwassers einher. Außerdem bedroht der Stickstoffeintrag akut Lebensgemeinschaften, an die nährstoffarme Verhältnisse angepasst sind. Eine weitere deutliche Minderung der Stickstoffemission ist daher unumgänglich.

Nach den Fortschritten bei der Reduktion des Ausstoßes oxidierter Stickstoffverbindungen müssen nun endlich auch Erfolge bei der Reduktion der landwirtschaftlichen Stickstoffemissionen erzielt werden, wenn die Puffer- und Filterfunktion der Waldböden wiederhergestellt und weitere Schäden an waldbürtigen

Folgerungen & Forderungen

- Die Stickstoffeinträge führen heute zu Bodenversauerung, Eutrophierung und Nährstoffungleichgewichten und damit zu massiven Belastungen von Waldbeständen, Waldböden und Grundwasser.
- Um diese bedrohlichen Folgen zu verringern, müssen vorrangig die Einträge von Ammoniak und Ammonium aus der Landwirtschaft reduziert werden. Dazu müssen die Tierbestände reduziert, moderne Düngungsverfahren und eine bodennahe Gülleausbringung angewandt werden und die ökologische Landwirtschaft ausgeweitet werden.
- Trotz der Erfolge bei der Reduktion von Stickoxiden sind im Verkehrsbereich weitere Verbesserungen notwendig, zum Beispiel die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs, Förderung umweltfreundlicher Verkehrsmittel und die Stärkung des öffentlichen Personennah- und -fernverkehrs.
- Im Wald können waldbauliche Lösungen wie die Umwandlung von Nadelholzforsten in stabile Laubwälder helfen, die Stickstoffausträge zu verringern und die negativen Auswirkungen auf die Waldökosysteme zu vermindern.
- Um die Stickstoffemissionen weiter zu reduzieren und die nachteiligen Auswirkungen auf die Wälder abzumildern, sind Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffemissionen in der Industrie, in der Landwirtschaft und im Verkehr zu fördern.

Grundwasservorkommen abgewendet werden sollen. Differenzierte Maßnahmen zur Sanierung stark belasteter Flächen erfordern seitens der Forstwirtschaft ein standortspezifisch abgestimmtes Vorgehen. Nur so können die Bodenfunktionen im Wald nachhaltig und nebenwirkungsarm wiederhergestellt werden. Die Umwandlung von Kiefern- und Fichtenforsten in naturnahe Mischwälder spielt bei der Restaurierung der Waldböden allgemein eine große Rolle (3, 9, 13). Bei stark stickstoffbelasteten Wäldern mit besonderen Funktionen kann im Einzelfall auch die Option einer gezielten Biomasse- oder gar Streunutzung zur De-Eutrophierung des Waldbodens bestehen.

Im landwirtschaftlichen Bereich sind vor allem eine Reduktion der Tierbestände, der Einsatz moderner Düngungsverfahren (Precision Farming) und eine bodennahe Gülleausbringung erforderlich, um die Stickstoffemissionen zu mindern. Die Förderung der ökologischen Landwirtschaft brächte vor allem über den geringen Viehbesatz (*eine* Großvieheinheit im Vergleich zu *vier* Großvieheinheiten pro Hektar bei konventionellen Veredelungsbetrieben) eine deutliche Reduktion, aber auch über die bevorzugte Ausbringung von Festmist als Dünger, da hier erheblich geringere Mengen Ammoniak ausgasen als bei Gülle und Jauche.

Neben den Einflussmöglichkeiten von Gesetzgebung und landwirtschaftlicher Beratung könnte ein entsprechendes Verbraucherverhalten eine Senkung der Stickstoff-Bilanzüberschüsse herbeiführen. Eine Reduzierung des individuellen Fleischkonsums wäre eine wirksame Maßnahme zur Rückführung der Stickstoffüberschüsse und deren Folgen. Sie böte zudem individuelle gesundheitliche Vorteile und würde auch andere negative Begleiterscheinungen der Billigfleischproduktion eindämmen.

Literatur

- (1) Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (2009): Waldzustandsbericht 2008. München (<http://www.forst.bayern.de>).
- (2) Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2000): Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenver-

sauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen. Bonn.

- (3) R. Heitz (1998): Umbau von Fichtenreinbeständen in naturnahe Mischwälder – Auswirkungen auf bodenchemischen Zustand und Bioelementhaushalt. Dissertation Forstwissenschaftliche Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- (4) C. Huber, W. Weis und A. Göttlein, A. (2008): Sickerwasserqualität bei Stickstoffsättigung Erkenntnisse aus den Experimenten und Langzeituntersuchungen im Höglwald. LWF aktuell 66, S.13–15.
- (5) K.H. Mellert et al. (2005): Risiko erhöhter Nitratkonzentrationen unter Wald in Bayern – Regionalisierung von Inventurergebnissen aus dem Raster des Level. In: Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz 2, S. 4–24.
- (6) K.H. Mellert et al. (2007): Prädiktoren des Nitrataustrags aus Wäldern – Ergebnisse der bayerischen Nitratinventur im mitteleuropäischen Vergleich. In: Forstarchiv 78, S.139–149.
- (7) K.H. Mellert et al. (2008): Predicting the regional risk of elevated nitrate concentrations below forests in Bavaria by empirical modelling at different spatial scales. In: International Journal of Environmental Studies 65, p. 359–376.
- (8) R. Nieder, W. Köster und K.C. Kersebaum (2007): Beitrag der Landwirtschaft zu diffusen N-Einträgen. In: Wasserwirtschaft 1–2, S. 53–57.
- (9) J. Prietzel (2004): Humusveränderungen nach Einbringung von Buche und Eiche in Kiefernreinbestände auf verschiedenartigen Standorten. In: J Plant Nutrition Soil Sci. 167, p. 428–438.
- (10) A. Spangenberg (2002): Stickstoffbelastung an Waldrändern – Untersuchungen in südbayerischen Regionen mit hoher Ammoniakemission. (Forstliche Forschungsberichte 190) München.
- (11) A. Spangenberg und C. Kölling (2004): Nitrogen deposition and nitrate leaching at forest edges due to high ammonia emissions in Southern Bavaria. In: Water, Air, and Soil Pollution 152, p.1–23.
- (12) UBA 2009: <http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/public/>
- (13) W. Weis, C. Huber und A. Göttlein (2008): Waldverjüngung und Wasserqualität. LWF aktuell 66, S. 9–12.

Autor

Dipl. Biologe Karl H. Mellert
Freier Berater im Ressourcenmanagement
für eine nachhaltige Agrar-, Wald- und Wasserwirtschaft.

AGWA Umweltberatung
Planegger Str. 46
81241 München
E-Mail: karl.mellert@online.de

