

Stickstoff im Überfluss

Waldböden in Bayern reichern Stickstoff weiter an

**Stephan Raspe, Hans-Peter Dietrich,
Desirée Köhler, Alfred Schubert,
Joachim Stiegler**

Die Stickstoffeinträge in die Wälder Bayerns sind seit Jahrzehnten auf hohem Niveau. Wo bleibt dieser Stickstoff? Mit den umfangreichen Messungen an den Waldklimastationen können die Austräge mit dem Sickerwasser und die Aufnahme in die Waldbestände den Einträgen gegenüber gestellt werden. Die erstellten Bilanzen deuten auf eine Anreicherung in den Waldböden hin. Die Risiken der Stickstoffsättigung und Eutrophierung der Wälder nehmen weiter zu.

Die Stickstoffbelastung der Biosphäre ist eines der nach wie vor ungelösten Umweltprobleme in Deutschland (BMUB 2017; SRU 2015). Die seit vielen Jahrzehnten nahezu unvermindert hohen Stickstoffeinträge in die Wälder (Raspe et al. 2013) haben dazu geführt, dass bereits ein Drittel der bayerischen Wälder als Stickstoff-gesättigt gelten (Mellert et al. 2005). Zuletzt zeigte sich bei der landesweiten Bodenzustandsinventur (2006 bis 2008) im systematischen 8 x 8 km Raster, dass bei über einem Viertel der Waldböden Bayerns von einem erheblichem Nitrataustrag (NO_3^- -Konzentrationen in der Bodenlösung über 10 mg/Liter) ausgegangen werden muss und dass nur noch knapp 20% der Waldökosysteme das verfügbare Nitrat vollständig aufnehmen können (Schubert et al. 2015). An über 50% der bayerischen Waldklimastationen werden aktuell kritische Belastungsgrenzen (Critical Load) für den Eintrag eutrophierender Stickstoffverbindungen überschritten (StMELF 2017).

Unbelastete natürliche Waldökosysteme sind normalerweise stickstoff-limitiert und daher bestrebt, den angebotenen Stickstoff aus der Luft zu verwerten und möglichst wenig Stickstoff wieder zu verlieren. Zwar besteht gut 70% der Luft aus molekularem Stickstoff (N_2), dieser kann jedoch nur durch wenige spezialisierte Organismen (z. B. Stickstoff-bindende Bakterien im Boden) gebunden und somit für Pflanzen nutzbar gemacht werden. Durch



1 Stickstoff-Depositionssammler auf der WKS Freising Foto: S. Raspe, LWF

alle Verbrennungsprozesse in Industrie, Verkehr und Hausbrand entstehen aber sogenannte Stickoxyde (NO_x), die in der Atmosphäre mit Wasser zu Nitrat (NO_3^-) umgewandelt und mit dem Niederschlag in die Ökosysteme eingetragen werden. Eine weitere wichtige Quelle für reaktiven Stickstoff stellt die landwirtschaftliche Intensivtierhaltung dar. Hier entweicht sowohl bei der Tierhaltung direkt als auch bei der folgenden Gülleausbringung auf dem Feld Ammoniak (NH_3) in die Luft, das sich wiederum in der Atmosphäre in Wasser zu Ammonium (NH_4^+) löst. Ammonium wie Nitrat sind wichtige Pflanzennährstoffe und fördern das Wachstum der Wälder. Im Übermaß angeboten tragen sie jedoch auch maßgeblich zur Eutrophierung und Versauerung von Wäldern bei (Ammoniumaufnahme durch die Pflanze, Nitrifikation im Boden und Nitrataustrag aus den Waldböden). Daher gilt der Stickstoffbilanz ein ganz besonderes Augenmerk bei allen Stoffhaushaltsbetrachtungen von Waldökosystemen.

An den bayerischen Waldklimastationen werden maßgebliche und relevante Größen der Stickstoffflüsse gemessen, die für eine Stickstoffbilanz im Waldökosystem erforderlich sind. Mit dem nachfolgend dargestellten vereinfachten Bilanzansatz

wird der Frage nachgegangen, wie sich die Stickstoffvorräte der Böden in den letzten 25 Jahren entwickelten haben und ob an den Standorten der Waldklimastationen Stickstoff angereichert wurde oder verloren ging.

Stickstoffbilanz

Die Stickstoffbilanz berechnet sich aus der Differenz zwischen den Stickstoffeinträgen aus der Atmosphäre und den Stickstoffverlusten durch die Austräge mit dem Sickerwasser sowie der Stickstofffestlegungsrate im Bestand. Gasförmige Stickstoffverluste aus dem Boden durch Denitrifikationsprozesse werden hier nicht berücksichtigt, da deren Größenordnung nur mit unverhältnismäßigem Aufwand zu ermitteln wäre. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sie in der Regel vernachlässigbar klein sind.

Eine verkürzte Bilanzformel lautet also:

$$N_B = N_{\text{dep}} - (N_I + N_U)$$

N_B = Stickstoffbilanz

N_{dep} = Stickstoffeintrag

N_I = Stickstoffaustrag m. d. Sickerwasser

N_U = Stickstoffnettoaufnahme

Alle Angaben in [kg/(ha*a)]

N-Eintrag: über 20 kg/(ha*a)

Der Eintrag von Nitrat und Ammonium mit dem Niederschlag in die Wälder wird in den Beständen der Waldklimastationen mit der Kronentraufe seit über 20 Jahren kontinuierlich gemessen. Auf Grundlage der Messungen im Freiland und in der Kronentraufe des Bestandes können über sogenannte Kronenraumbilanzmodelle, wie sie von Ulrich (1983) für die meisten Kationen und Sulfat entwickelt und von zum Beispiel Draaijers und Erisman (1995) auch für Stickstoff erweitert wurden, die Raten der Stickstoffaufnahme im Kronenraum abgeschätzt werden. Aus dem Stickstoffeintrag mit der Kronentraufe und der Stickstoffaufnahme im Kronenraum ergibt sich dann der Gesamtstickstoffeintrag in die betrachteten Waldökosysteme. Darin ist allerdings die direkte gasförmige Stickstoffaufnahme über die Spaltöffnungen der Blätter und Nadeln nicht enthalten, da sie über Kronenraumbilanzmodelle nicht erfasst werden können. Insofern stellen die hier dargestellten Eintragsraten Mindestbefunde dar.

Im Mittel aller Waldklimastationen liegen die Stickstoffgesamteinträge bei 21 kg N/(ha*a), wobei die Spanne von 8 kg N/(ha*a), gemessen an der »Reinluftstation« der Waldklimastation Berchtesgaden unterhalb des Watzmanns, bis zu 38 kg N/(ha*a) an der höchstbelasteten Waldklimastation im Höglwald bei Augsburg reicht (Abbildung 2). Insgesamt ist seit Beginn der Messungen nur ein leicht abnehmender Trend zu erkennen. Im Mittel aller Waldklimastationen hat der Stickstoffeintrag von 25 auf 19 kg N/(ha*a) abgenommen. Bei über 50% der Waldklimastationen müsste der Stickstoffeintrag um bis zu 70% sinken, um langfristig schädliche Einflüsse auf die Waldökosysteme zu vermeiden (StMELF 2017).

Stickstoffaustrag: 6 kg/(h*a)

Ein wichtiger Austragspfad aus Waldökosystemen stellt der Stofftransport mit dem Sickerwasser dar, welches den Wurzelraum verlässt. Um diesen zu erfassen, wird das Bodenwasser in verschiedenen Tiefenstufen an den Waldklimastationen seit 1991 kontinuierlich beprobt und analysiert. Hierzu wurden in den verschiedenen Bodenhorizonten bis unter den

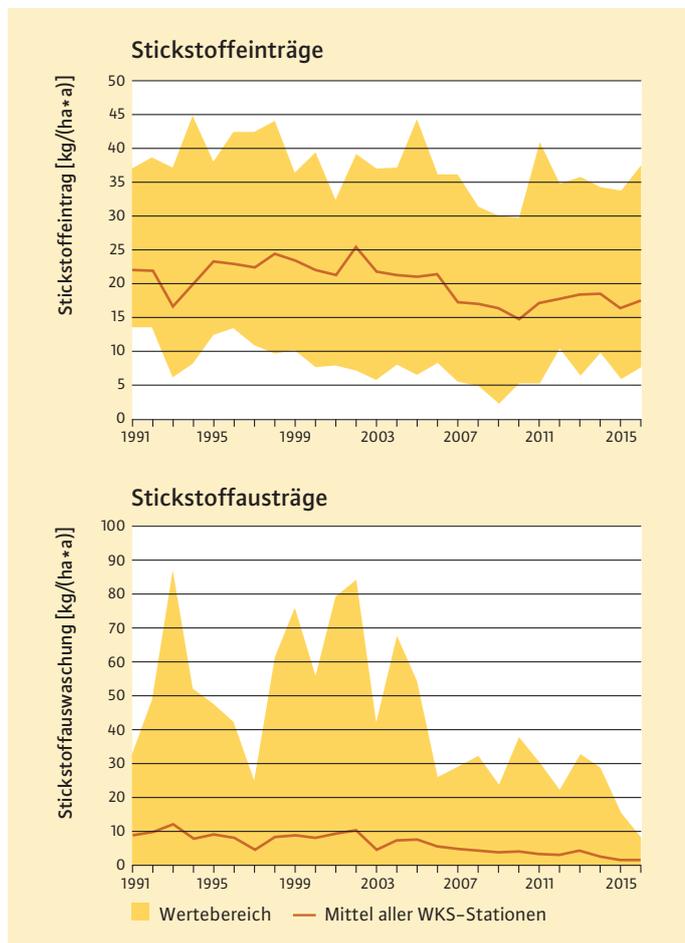
Wurzelraum sogenannte Saugkerzen eingebaut, mit deren Hilfe in regelmäßigen Zeitabständen Wasser aus der Bodenmatrix gesaugt wird. Die so gewonnene Bodenlösung wird dann im Labor der LWF auf seine anorganischen Inhaltsstoffe analysiert. Die Wasserflüsse im Boden werden mit dem Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook 90 (Hammel und Kenel 2001) berechnet. In das Modell gehen neben den bodenphysikalischen Kenndaten auch Bestandesmerkmale und die Triebkräfte der Witterung (Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Strahlungintensität und Windgeschwindigkeit) ein. Durch Multiplikation der Wasserflüsse mit den Stoffkonzentrationen im Sickerwasser unter dem Wurzelraum errechnet sich dann der Stoffaustrag mit dem Sickerwasser.

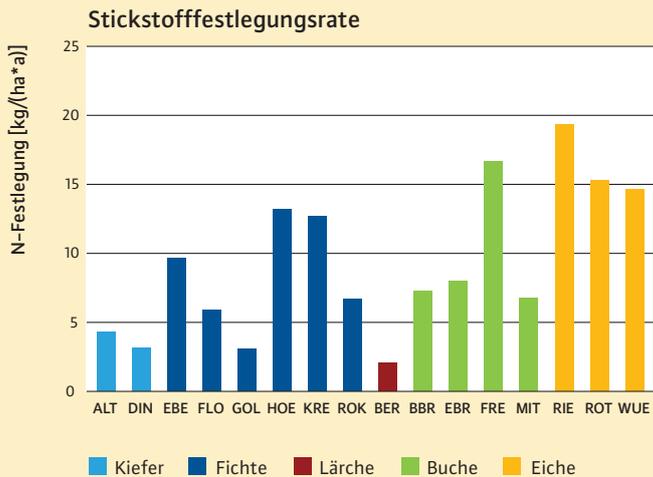
Im Mittel liegen die berechneten Stickstoffausträge an den Waldklimastationen bei 6 kg N/(ha*a), wobei die Spanne zwischen den Stationen noch größer als beim Eintrag ist. Während an den Kiefernstandorten (Altdorf, Bodenwöhr, Dinkelsbühl und Pegnitz) nur sehr wenig Stickstoff (unter 0,5 kg N/(ha*a) mit dem Sickerwasser ausgetragen wird, ist wiederum der von landwirtschaftlicher Flur umgebene Höglwald mit 42 kg N/(ha*a) Spitzenreiter. Insgesamt fällt auch hier ein rückläufiger Trend auf (Abbildung 2), der teilweise auch auf eine zunehmende Aufnahme über die Bodenvegetation in den sich verändernden Beständen zurückgeführt werden kann.

N-Festlegung im Bestand: 9,3 kg/(ha*a)

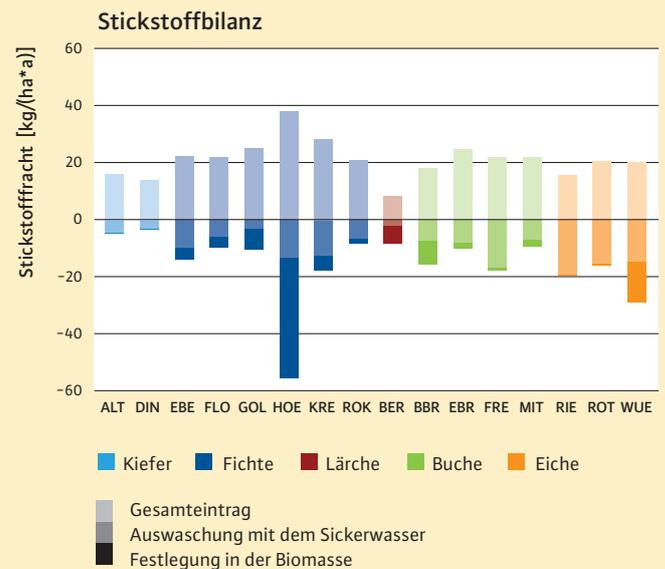
Eine weitere wichtige Bilanzgröße stellt die Stickstoffaufnahme und -festlegung in Holz und Rinde durch die Wälder dar. Stickstoff ist ein wichtiger Pflanzennährstoff, der in vielfältiger Weise in die Biomasse eingebaut wird. Stickstoff, der in den Blattorganen oder im Pflanzgewebe kurzlebiger Pflanzen gebunden ist, wird mit dem Streufall rasch wieder in den Waldboden zurückgeführt. Stickstoff in Holz und Rinde wird dagegen langfristig festgelegt und bei der Holzernte aus den Wäldern entfernt. Daher muss in unseren Wirtschaftswäldern die Stickstofffestlegung in der Biomasse auch als potenzielle Stickstoffsенke in der Bilanzrechnung berücksichtigt werden. Auf den Waldklimastationen wird regelmäßig alle fünf

2 Entwicklung der mittleren Gesamtstickstoffeinträge (oben) sowie der Stickstoffausträge mit dem Sickerwasser (unten) an den bayerischen Waldklimastationen von 1991 bis 2016. Die gelben Flächen stellen den Wertebereich zwischen dem jeweils niedrigsten und höchsten Jahresmittel des Eintrags bzw. Austrags dar.





3 Jährliche Stickstofffestlegungsrate in Holz und Rinde an den Waldklimastationen im Zeitraum von 1999 bis 2014; Im Mittel ergeben sich für Kiefer 4, Fichte 9, Buche 10 und Eiche 16 kg N/(ha*a). Kürzel der Waldklimastationen siehe Abbildung 5.



4 Stickstoffbilanzgrößen an den Waldklimastationen im Zeitraum von 1999 bis 2014; Im Mittel ergeben sich für Kiefer 4, Fichte 9, Buche 10 und Eiche 16 kg N/(ha*a). Kürzel der Waldklimastationen siehe Abbildung 5.

Jahre der laufende jährliche Zuwachs (iv) der Bestände durch eine Durchmesser- und Höherermittlung der Bäume ermittelt. Nach der folgenden Formel er-

$$N_u = K_{gr} \cdot \rho_{st} \cdot ctN_{dr}$$

N_u = Stickstoffnettoaufnahme [kg/(ha*a)]
 K_{gr} = jährlicher Zuwachs (iv) [m³/(ha*a)]
 ρ_{st} = Rohdichte des Stammholzes [kg/m³] aus Wagenführ (2000)
 ctN_{dr} = Stickstoffgehalt in Derbholz mit Rinde [mg/g] aus Jacobsen et al. (2003)

rechnet sich die Stickstofffestlegung im Bestand (nach CLRTAP 2017):

Für die bayerischen Waldklimastationen ergibt sich somit in dem Beobachtungszeitraum eine mittlere Stickstofffestlegungsrate von 9,3 kg N/(ha*a), wobei die Kiefernbestände mit 4 kg N/(ha*a) die geringsten und die Eichenbestände mit durchschnittlich 16 kg N/(ha*a) die höchsten Werte aufweisen (Abbildung 3). Stickstofffestlegungsdaten dieser Größenordnung stimmen gut mit den im Rahmen der empirischen Critical Load-Betrachtungen verwendeten mittleren Stickstoffaufnahmeleistungen überein (CLRTAP 2017).

Die tatsächliche Stickstoffaufnahme von Bäumen ist natürlich noch viel höher, da auch die Zweige, Blätter und Nadeln sowie die Blüten und Früchte mit Stickstoff versorgt werden müssen. Diese fallen jedoch im Laufe der Zeit wieder ab und

| Waldklimastationen | Wuchsbezirk | Führende Baumart | Höhe ü. NN [m] | Temperatur ¹ [°C] | Niederschlag ² [mm] |
|---------------------|-------------------------------------|------------------|----------------|------------------------------|--------------------------------|
| Altdorf (ALT) | Rezat-Rednitzsenke | Kiefer | 406 | 8,3 | 804 |
| Bad Brückenau (BBR) | Hohe Rhön | Buche | 812 | 6,1 | 950 |
| Berchtesgaden (BER) | Berchtesgadener Hochalpen | Lärche | 1500 | 5,2 | 1841 |
| Dinkelsbühl (DIN) | Südliche Keuperabdachung | Kiefer | 468 | 7,8 | 710 |
| Ebersberg (EBE) | Südliche Münchner Schotterebene | Fichte | 540 | 7,7 | 979 |
| Ebrach (EBR) | Steigerwald | Buche | 410 | 7,9 | 764 |
| Flossenbürg (FLO) | Innerer Oberpfälzer Wald | Fichte | 840 | 6,3 | 918 |
| Freising (FRE) | Oberbayerisches Tertiärhügelland | Buche | 508 | 8,3 | 818 |
| Goldkronach (GOL) | Fichtelgebirge | Fichte | 800 | 5,3 | 1310 |
| Höglwald (HOE) | Oberbayerisches Tertiärhügelland | Fichte | 545 | 9,0 | 904 |
| Kreuth (KRE) | Oberbayerische Flysch-Voralpen | Fichte | 1100 | 6,7 | 1857 |
| Mitterfels (MIT) | Östlicher Vorderer Bayerischer Wald | Buche | 1025 | 5,7 | 1507 |
| Riedenburg (RIE) | Südliche Frankenalb | Eiche | 475 | 8,1 | 701 |
| Rothenkirchen (ROK) | Frankenwald | Fichte | 670 | 6,4 | 1022 |
| Rothenbuch (ROT) | Hochspessart | Eiche | 470 | 6,9 | 1016 |
| Würzburg (WUE) | Südliche Fränkische Platte | Eiche | 330 | 9,3 | 634 |

gelangen als Streu zurück auf den Waldboden. Die mit dem Streufall zurückgeführte Stickstoffmenge beträgt im Mittel aller Waldklimastationen etwa 50 kg N/(ha*a). In Altbeständen wie an den Waldklimastationen kann davon ausgegangen werden, dass die Stickstoffflüsse bei der Aufnahme und im Streufall dieser Kronenkompartimente mehr oder weniger konstant bleiben und daher für eine weitere Bilanzierung des Bodenstickstoffs nicht berücksichtigt werden müssen.

5 Die 16 bayerischen Waldklimastationen, auf denen unter anderem auch die Stickstoff-relevanten Parameter gemessen werden.

1 Jahresmittel 1998–2016
2 Jahressumme 1998–2016

N-Anreicherung in den Waldböden: 6 kg/(ha*a)

Stellt man die oben dargestellten Stickstoffeinträge den Stickstoffverlusten gegenüber, erhält man also die Stickstoffbilanzen der Waldklimastationen für die letzten 25 Jahren. Aus den Bilanzen kann dann unmittelbar auf mögliche Veränderungen der Stickstoffvorräte in den Böden geschlossen werden (Abbildung 6). Im Mittel ergeben sich für die Kiefernstandorte eine jährliche Stickstoffakkumulation in den Böden von 11,2 kg N/(ha*a), für die Fichtenstandorte von 7,1 kg N/(ha*a) und für die Buchenstandorte von 8,5 kg N/(ha*a). Negative Bilanzen weisen nur der Högwald (-16,3 kg N/(ha*a)) sowie die Eichenstandorte Riedenburg (-3,7 kg N/(ha*a)) und Würzburg (-9,5 kg N/(ha*a)) auf. Dort sind Austräge und Festlegungsraten höher als die Einträge. In Berchtesgaden mit Lärche heben sich Ein- und Austräge auf (vgl. Abbildung 4).

Somit ergibt sich für alle Waldklimastationen eine mittlere jährliche Stickstoffakkumulation in den Böden von rund 6 kg N/ha*a (Abbildung 5). Von wenigen Ausnahmen abgesehen, müssten also die Stickstoffvorräte in den Waldböden in Bayern in den letzten Jahrzehnten zugenommen haben. Abweichende Befunde für den Gesamtboden bis 60 cm Tiefe aus dem Vergleich der bundesweiten Bodenzustandserhebungen (BZE1 und BZE2, Andreae et al. 2016) werden der-

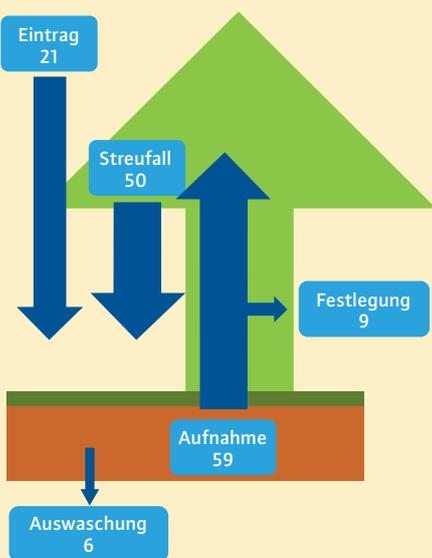


7 Auch auf den Freilandmessstellen der Waldklimastationen werden Stickstoff und andere Schadstoffe gemessen, die mit dem Niederschlag oder als Stäube in den Wald eingetragen werden. Die Probennehmerin der WKS Högwald, Eva Rusch, leert einen Depositionssammler auf der Freilandmessstelle.

zeit fachlich diskutiert und methodisch hinterfragt. Bestätigt hat sich jedoch, dass innerhalb des Zeitraums der beiden Bodeninventuren (WBI 1987 und BZE II 2006–2008) von nur 20 Jahren sowohl Stickstoffgehalte als auch -vorräte in den Oberböden der Wälder in Bayern gestiegen sind und die C/N-Verhältnisse entsprechend enger wurden (Schubert et al. 2015). Die Stickstoffüberdüngung der Wälder schreitet also weiter voran. Die Einträge aus der Luft können trotz günstiger Wachstumseffekte nicht mehr verwerten werden, die Risiken der Eutrophierung nehmen zu.

Literatur

- Andreae, H.; Eickenscheidt, N.; Evers, J.; Grüneberg, E.; Ziche, D.; Ahrends, B.; Höhle, J.; Nagel, H.-D.; Wellbrock, N. (2016): Stickstoffstatus und dessen zeitliche Veränderungen in Waldböden. In: Wellbrock, N.; Bolte, A.; Flessa, H. (eds.): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Rep. 43, S. 135–180
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): Stickstoffeintrag in die Biosphäre. Bericht der Bundesregierung Stand 17.05.2017, 24 S.
- CLRTAP (2017): Mapping critical loads for ecosystems, Chapter V of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution; accessed 20.12.2017 at www.icpmapping.org
- Draaijers, G.; Erisman, J.W. (1995): A canopy budget model to assess atmospheric deposition from Throughfall measurements. Water Air Soil Pollut. 85, S. 2253–2258
- Hammel, K.; Kennel, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 185, 148 S.
- Jacobsen, C.; Rademacher, P.; Meessenburg, H.; Meiwes, K.J. (2003): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten – Literaturstudie und Datensammlung. Berichtsbände des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Reihe B/69: 81 S. Selbstverlag der Universität Göttingen
- Mellert, K.H.; Gensior, A.; Kölling, Ch. (2005): Stickstoffsättigung in Wäldern Bayerns – Ergebnisse der Nitratinventur. Forstarchiv 76, S. 35–43
- Raspe, S.; Dietrich, H.-P.; Zimmermann, L. (2013): Stoffeinträge sind ein Standortsfaktor. LWF aktuell Nr. 94, S. 18–22
- Schubert, A.; Falk, W.; Stetter, U. (2015): Waldböden in Bayern – Ergebnisse der BZE II. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 213, 143 S.
- SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sondergutachten, Hausdruck, 564 S.
- StMELF – Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2017): Waldbericht 2017. http://www.stmelf.bayern.de/mam/cmso4/wissenstransfer/bilder/waldbericht_2017.pdf
- Ulrich, B. (1983): Interaction of forest canopies with atmospheric constituents: S=2, alkali and earth alkali cations and chloride. In Ulrich, B.; Pankrath, J. (Hrsg.): Effect of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, S. 33–45
- Wagenführ, R. (2000): Holzatlas, 5. Aufl., 707 S. Hanser Verlag, München



6 Mittlere jährliche Stickstoffflüsse an Waldklimastationen in kg N/(ha*a). Daraus ergibt sich eine mittlere jährliche Anreicherung im Boden von 6 kg N/(ha*a).

Zusammenfassung

Seit 1991 werden an den Bayerischen Waldklimastationen unter anderem die Stickstoffein- und austräge gemessen. Die Ergebnisse aus diesen langjährigen Messreihen belegen, dass sich die Stickstoffeinträge in die Wälder Bayerns seit Jahrzehnten auf einem hohem Niveau befinden. So werden im Durchschnitt jährlich etwa 21 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr eingetragen, während 6 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr mit dem Sickerwasser aus den Wäldern austragen werden. Da etwa 9 kg Stickstoff in Holz, Rinde und Pflanzengewebe festgelegt werden, ist mit einer Stickstoffanreicherung in den Waldböden von circa 6 kg pro Hektar und Jahr zu rechnen. Somit nehmen die Risiken einer weiteren Stickstoffsättigung und Eutrophierung der Wälder zu.

Autoren

Dr. Stephan Raspe, Hans-Peter Dietrich, Desirée Köhler und Alfred Schubert sind Mitarbeiter in der Abteilung »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Joachim Stiegler ist Mitarbeiter in der Abteilung »Waldbau und Bergwald« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.
Kontakt: Stephan.Raspe@lwf.bayern.de