

Stickstoffaustrag und -speicherung in Waldböden bei hohem Eintrag

Balázs Horváth, Karl Josef Meiwes und Henning Meesenburg

In den Waldökosystemen Mitteleuropas war in der Vergangenheit Stickstoff der das Baumwachstum begrenzende Nährstoff. In den letzten Jahrzehnten dagegen kommt Stickstoff aufgrund des hohen Eintrags aus der Atmosphäre immer öfter im Überfluss vor. Der Wald mit seinem unregelmäßigen Kronendach und mit dem sauren Auflagehumus ist ein nahezu idealer Filter für die Stickstoffverbindungen. Die hohe Belastung führt zu Veränderungen des Stickstoffhaushalts von Waldökosystemen und den damit verbundenen Prozessen, die als Stickstoffsättigung bezeichnet werden.

Stickstoff (N) gelangt in Form von Stickoxiden und Ammoniak bzw. Ammonium in den Wald. Quellen der Stickoxide sind hauptsächlich Hochtemperaturprozesse, wie z.B. die Verbrennung von Kraftstoff in Automotoren. Für Ammoniakemissionen stellt die industrielle Viehhaltung und die damit verbundene Gülleausbringung die wichtigste Quelle dar.

In einer Studie¹⁾ wurde nun der Grad der Stickstoffsättigung von Wäldern in einer Region untersucht, in der infolge intensiver Viehhaltung (über 1 Großvieheinheit je ha, [23]) die Emissionen an Ammoniak sehr hoch sind [5]. Dabei wurden die Nitratversickerung, die Stickstoffvorräte in der Humusaufgabe und im Mineralboden sowie die potenzielle Stickstoff-Mineralisation betrachtet.

Materialien und Methoden

Untersuchungsgebiet

Bei dem Untersuchungsgebiet im Raum Cloppenburg (bei Oldenburg, Niedersach-

sen) handelt es sich um eine flachwellige Geestlandschaft mit einem Waldanteil von ca. 10 %. Ausgangsmaterial der Böden sind vorwiegend Saale-eiszeitliche Talsande und Geschiebesande mit z.T. geringer Flugsandüberlagerung. Die Jahresmitteltemperaturen reichen von 8,0 bis 8,5° C. Der mittlere Jahresniederschlag liegt zwischen 700 und 750 mm. Die Stickstoff-Deposition nach dem Kronenraumbilanzansatz betrug in der Periode 1993 bis 2003 auf der Level-II-Monitoringfläche Augustendorf (Kiefer, 60 J.) 34,0 ($\pm 5,8$) kg/ha/a [22]. Für 2002/2003 wurde auf derselben Fläche mittels mikrometeorologischer Messmethoden sowie Widerstandsmodellierung ein N-Eintrag von 55 kg/ha/a ermittelt [9].

In der Studie wurden 50 Waldbestände der Baumarten Kiefer (n = 21), Douglasie (n = 18) (z.T. gemischt mit Fichte) und Eiche (n = 11) mit jeweils Jung- (22 ± 4 Jahre) und Altbeständen (Nadelholz: 58 ± 13 Jahre, Eiche: 115 ± 8 Jahre) untersucht.

Nitratgehalt im Sickerwasser

Im November und Dezember 2004 wurden pro Bestand drei Bohrungen bis zum Grundwasserspiegel bzw. bis in 5 m Tiefe niedergebracht (Edelmann-Handbohrer, Fa. Eijkelkamp). Es wurden tiefenstufenweise Mischproben gebildet, die noch am selben Tag für die Bestimmung des Nitrats mit 1N KCl extrahiert wurden [11, 12]. Die Austragsraten von Nitrat wurden unter Annahme einer Grundwasserneubildungs-

rate von 220 mm/a aus den Nitratkonzentrationen berechnet.

Beprobung der Humusaufgabe und des Mineralbodens 0 bis 20 cm

Im April 2005 wurde der Auflagehumus mittels Stechrahmen ($\phi = 27,5$ cm) mit drei Wiederholungen pro Bestand beprobt. Die Mineralbodenproben (0 bis 20 cm) wurden mit einem Kammerbohrer ($\phi = 80$ mm) in sechsfacher Wiederholung entnommen. Der Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt wurde mit einem CN-Elementanalysator (Fa. Hekatech) bestimmt.

Potenzielle Stickstoff-Nettomineralisation (NNM)

Für diese Untersuchung wurde der Wassergehalt der Proben des Auflagehumus und des Mineralbodens auf einem Niveau zwischen 40 und 60 % des maximalen Wassergehaltes eingestellt. Es wurden jeweils drei Teilproben von ca. 100 g Frischgewicht entnommen und in PE-Tüten gefüllt. Die Inkubation wurde bei 23° C durchgeführt. Die Stickstoffgehalte der ersten Extraktion nach drei Wochen Inkubation wurden als Nullpunkt für NNM definiert. Die zwei weiteren Teilproben wurden nach weiteren drei bzw. sechs Wochen Inkubation extrahiert, und der Ammonium- und Nitratgehalt wie oben beschrieben bestimmt [15].

Ergebnisse und Diskussion

Nitrataustrag mit dem Sickerwasser

Das Nitratkonzentrationsniveau im Sickerwasser war generell sehr hoch. Der Medianwert von 8,5 mg $\text{NO}_3\text{-N/L}$ ist sechs- bis achtmal höher als die Medianwerte, die aus Bayern [20] bzw. Dänemark [8] berichtet werden. Ähnlich hohe Werte (im Mittel 6,8 mg $\text{NO}_3\text{-N/L}$) wurden in den Niederlanden bei hoher Deposition und ähnlichen Bodenverhältnissen gefunden [10].

Die Nitrat-Austragsraten wurden auf die Waldbestände des Niedersächsischen Forstamtes (FA) Ahlhorn übertragen und nach den N-Sättigungskategorien des BMELF [7] klassifiziert (Abb. 1). Nach diesem Bewertungsschema müssen 52 % der Fläche des

Dr. B. Horváth war wissenschaftl. Mitarbeiter an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt und arbeitet heute in der Abteilung für Isotopengeologie des Geowissenschaftlichen Zentrums der Universität Göttingen. Dr. K. J. Meiwes leitet das Sachgebiet Stoffhaushaltsmodellierung/Datenmanagement in der Abteilung Umweltkontrolle bei der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Dr. H. Meesenburg leitet ebendort das Sachgebiet Intensives Umweltmonitoring.



Balázs Horváth
bhorvat@gwdg.de

¹⁾ Die Untersuchung wurde unter dem Titel „Regionalisierungsmodell zur Vorhersage von N-Austrägen unter Forst“ vom Niedersächsischen Ministerium für Umwelt- und Klimaschutz aus Mitteln der Wasserentnahmegelöhne gefördert.

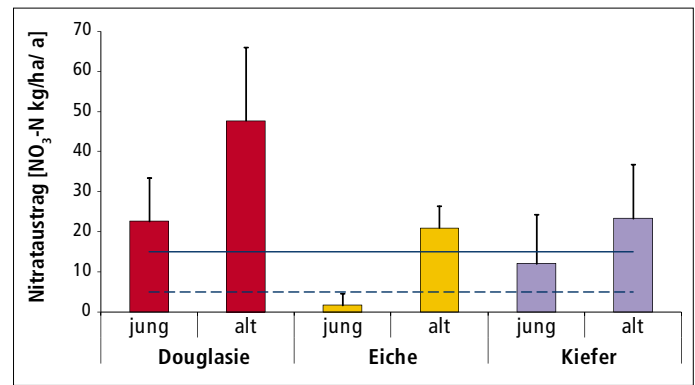
FA Ahlhorn als „mit Stickstoff gesättigt auf niedrigem Niveau“ klassifiziert werden, da der Nitrataustrag mit dem Sickerwasser den Wert von 5 kg N/ha/a überschreitet. Auf 35 % der Fläche wurde sogar der Schwellenwert von 15 kg N/ha/a übertroffen; diese Bestände gelten als „N-gesättigt auf hohem Niveau“. Die entsprechenden Zahlen für Bayern betragen 18 % bzw. 12 % [19].

Die Ergebnisse zeigen, dass die Stickstoffsättigung der Wälder in der Untersuchungsregion weit verbreitet und weit fortgeschritten ist. Mit der hohen Nitratbelastung des Sickerwassers ist auch ein hoher Verlust von Nährstoffen aus den Böden verbunden, da die Nitrat-Anionen durch entsprechende Mengen an Nährstoff-Kationen begleitet werden müssen. Auf der Level-II-Monitoringfläche Augstendorf betrug 2002/2003 der Calcium- und Magnesiumaustrag mit dem Sickerwasser 15 kg/ha/a bzw. 11 kg/ha/a [22].

In der Region Weser-Ems waren die terrestrischen Böden infolge weit verbreiteter historischer Heide- und Plaggennutzung an Stickstoff stark verarmt. Daher könnte angenommen werden, diese Waldökosysteme könnten wegen dieser Verarmung auch derzeit noch große Mengen an Stickstoff speichern. Die hohen Nitratausträge zeigen jedoch, dass der luftbürtige Stickstoffeintrag weit höher ist als dieses Speicherpotenzial. Der direkte Zusammenhang zwischen N-Deposition und Nitratversickerung kann – insbesondere bei geringerer Stickstoffdeposition – durch den ökosysteminternen Stickstoffkreislauf und durch Störeffekte (Witterung, Sturmschäden) überlagert werden [1, 3]. In der Untersuchungsregion wurde jedoch ein enger Zusammenhang zwischen Bestandeshöhe und Nitratkonzentration im Sickerwasser gefunden (Abb. 2). MOHR et al. [22] haben außerdem in dieser Region einen engen Zusammenhang ($r^2 = 0,80$; $p < 0,001$) zwischen N-Deposition und der Bestandeshöhe gefunden. Es ist daher naheliegend, hohe Nitratkonzentrationen im Sickerwasser auf hohe Stickstoffeinträge zurückzuführen.

Die Eichen- und die Kiefernaltbestände scheinen über eine relativ hohe Stickstoff-Speicherfähigkeit zu verfügen, da bei ihnen die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser vergleichsweise gering waren. MAGILL et al. [18] fanden bei Laubholzbeständen ebenfalls eine höhere Rückhaltefähigkeit gegenüber Stickstoffeinträgen. Dagegen entspricht der Befund nicht den Ergebnissen einer europaweiten Studie, in der die Laubholzbestände auf zunehmenden Stickstoffeintrag stärker mit Nitrataustrag reagierten als Nadelholzbestände [16; siehe auch 25]. In den alten,

Abb. 1: Jährlicher Nitrataustrag (kg N/ha/a) unter Douglasien-, Eichen- und Kiefernbeständen im Untersuchungsgebiet Cloppenburg (Median und mittlere absolute Abweichungen). Die blauen Linien bezeichnen die Schwellenwerte der N-Sättigungskategorien nach BMELF [7].



aufgelichteten Kiefernbeständen wirkt der üppige Unterwuchs als eine zusätzliche Senke für Stickstoff. Ferner kann in diesen aufgelichteten Beständen der luftbürtige Stickstoffeintrag vergleichsweise gering sein. Beides führt zu relativ niedrigen Nitratkonzentrationen.

Humuszustand

Bei der Analyse der Stickstoffvorräte im Auflagehumus wurden Jung- und Altbestände getrennt behandelt, da bei der Begründung der Jungbestände die Humusaufgabe durch intensive Bodenbearbeitung entfernt wurde (Räumung des Schlagabraums bzw. des Auflagehumus sowie teilweise Tiefumbruch, insbesondere nach dem Sturmwurf von 1972).

Der mittlere N-Vorrat in der Humusaufgabe der Jungbestände betrug 0,5 ($\pm 0,4$) t N/ha. Angesichts des kurzen Zeitraumes seit der Bestandesbegründung ist dieser Wert als hoch einzustufen. Der N-Vorrat in der Humusaufgabe plus Oberboden (0-20 cm) von 3,0 ($\pm 0,9$) t N/ha ist dagegen als gering anzusehen. Das C : N-Verhältnis in der Humusaufgabe der Jungbestände war im Mittel 20,6 ($\pm 2,4$). Es gab einen signifikanten Unterschied zwischen den Baumarten, deren Reihenfolge folgende war: Eiche = Douglasie < Kiefer. Im oberen Mineralboden wurde im Mittel ein C : N-Verhältnis von 25,2 ($\pm 3,4$) gefunden. Es gab keinen Unterschied zwischen den Baumarten.

In der Humusaufgabe der Altbestände befanden sich im Mittel 2,1 ($\pm 0,7$) t N/ha, was weit über dem Durchschnitt der deutschen Bodenzustandserhebung (0,8 t N/ha; [6]) liegt und als sehr hoch eingestuft werden muss. Der N-Vorrat in Humusaufgabe plus Oberboden war dagegen mit 4,2 ($\pm 1,3$) t/ha eher niedrig im Vergleich zum mittleren N-Vorrat von 5,8 t/ha in der Bodenzustandserhebung [6]. Das ist mit dem sandigen, tonarmen Bodenmaterial und dem damit verbundenen niedrigen Humusgehalt im Oberboden zu erklären. Das mittlere C : N-Verhältnis im Auflagehumus von

22,2 ($\pm 2,3$) entsprach ungefähr dem mittleren Wert der Bodenzustandserhebung auf sandigen Standorten (22,5 im Mittel) [6]. Andererseits entsprach die Mächtigkeit der Humusaufgabe der eines durchschnittlichen Rohhumus, dessen typisches C : N-Verhältnis bei 24,5 [6] liegt. Die Diskrepanz zwischen Humusmorphologie und C : N-Verhältnissen, die nicht den Humusformen entsprechen, wie sie v. ZESCHWITZ [28] beschrieben hat, ist wahrscheinlich mit der hohen Stickstoffdeposition zu erklären: Zum einen steigt der N-Gehalt in Blättern und Nadeln, dem Ausgangsmaterial der Streubildung, an. Zum anderen wird der atmosphärisch deponierte Stickstoff während des Zersetzungsprozesses der Streu in den Auflagehumus eingeschleust und teilweise festgelegt [21].

Im Oberboden konnten relativ hohe C : N-Verhältnisse (26,5 \pm 4,7) beobachtet werden. Der Tiefengradient des C : N-Verhältnisses von niedrigeren Werten im Auflagehumus zu höheren Werten im oberen Mineralboden ist ungewöhnlich. Normalerweise findet man im Mineralboden engere C : N-Verhältnisse als im Auflagehumus, weil im Gegensatz zum Auflagehumus im Mineralboden zusätzlich Stickstoff in mineralischer Form vorkommt. Zwischen dem Quotienten der

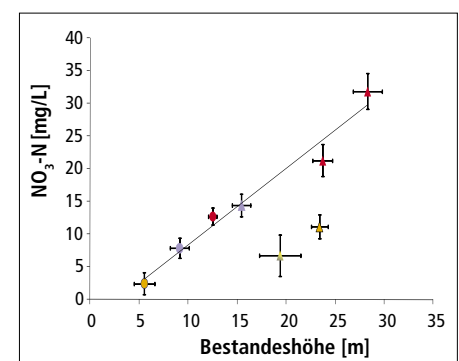


Abb. 2: Nitratkonzentration im Sickerwasser in Abhängigkeit der Bestandeshöhe unter Douglasie (rot), Eiche (gelb) und Kiefer (violett). (Kreise: Jungbestände, Dreiecke: mittelalte (Ki) und alte (Dgl, Ei, Ki), Bestände; Mittelwert \pm Standardfehler)

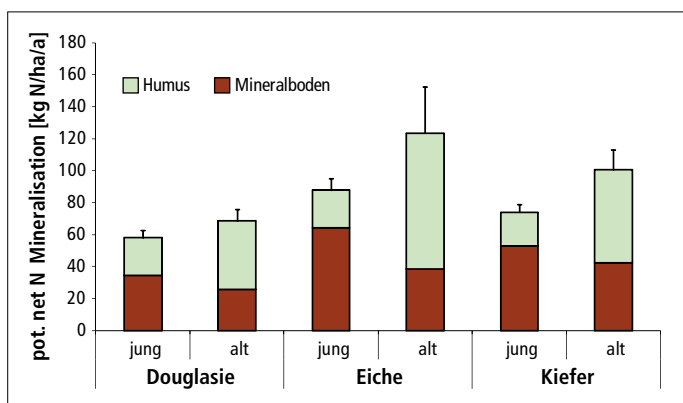


Abb. 3:
Potenzielle Netto-Stickstoff-mineralisationsraten (NNM). Mittelwerte und Standardfehler

C : N-Verhältnisse im Auflagehumus und im oberen Mineralboden ($C : N_{H/B}$) sowie der Nitratkonzentration im Sickerwasser unter den Altbeständen gab es eine signifikante Korrelation ($r^2 = 0,42$; $p < 0,001$). Demnach scheint das Verhältnis $C : N_{H/B}$ als Indikator für Stickstoffbelastung aus der Luft und Nitrataustrag mit dem Sickerwasser geeignet zu sein.

N-Speicherung in der Humusaufgabe

Da bei den Jungbeständen davon ausgegangen werden kann, dass bei der Bestandesgründung kein Auflagehumus vorhanden war, lässt sich eine mittlere Stickstoff-Speicherungsrate über das Bestandesalter errechnen. Diese Rate betrug in den Jungbeständen im Mittel 21 kg N/ha/a. Wenn man die Unterschiede der Stickstoffvorräte in den Jung- und Altbeständen als N-Speicherung interpretiert, kann man feststellen, dass die N-Speicherung auch in der mittleren Phase der Bestandesentwicklung nicht nachlässt. Entsprechend dieser Berechnung lag die jährliche mittlere N-Speicherung in der Humusaufgabe zwischen 21 kg N/ha/a (Kiefer) und 26 kg N/ha/a (Douglasie). Damit hält der Wald Stickstoff nicht nur in der Baumbiomasse, sondern auch in größeren Mengen im Auflagehumus zurück. Dies bedeutet, dass der Wald trotz hoher Nitratkonzentrationen im Sickerwasser immer noch als eine Senke für den eingetragenen Stickstoff wirkt.

N-Mineralisation

Die Raten der Netto-Stickstoffmineralisation (NNM) lagen im Mittel zwischen 172 (± 47) $\mu\text{g N/h/g}$ (Douglasienaltbestände) und 398 (± 129) $\mu\text{g N/h/g}$ (Eichenjungbestände). Bei Annahme einer Jahresmitteltemperatur von 8°C und einem Q_{10} -Wert (Faktor, um den die Reaktionsgeschwindigkeit steigt, wenn die Temperatur um 10°C erhöht wird) von 3,5 [14] ergibt sich eine mittlere Rate der NNM von 90 (± 41) kg N/ha/a. Der niedrigste Wert wurde für die Douglasienjungbestände (58 ± 16 kg N/ha/a), der höchste für die Eichenaltbestände (123 ± 65 kg N/ha/a) ermittelt (Abb. 3).

Mit dem Bestandesalter nahm bei allen untersuchten Baumarten die NNM zu, zwischen den Baumarten gab es die folgende Reihenfolge: Douglasie < Kiefer < Eiche. Der Anteil der Nitrifikation an der NNM (= Nitrifikationsgrad) betrug in der Humusaufgabe 54 bis 83 %, im Mineralboden 85 bis 123 %. Werte über 100 % deuten auf eine Immobilisierung von Ammonium während der Laborinkubation hin. Der Nitrifikationsgrad nahm mit dem Alter ab, zwischen den Baumarten gab es keine Unterschiede.

Die Werte der NNM-Raten sind im europäischen Vergleich als hoch einzustufen [24], insbesondere gilt das für den Nitrifikationsgrad. Wenn auch diese im Labor ermittelten NNM-Raten nicht direkt auf Freilandbedingungen übertragen werden können, macht die Größenordnung der Werte dennoch deutlich, dass unter günstigen Mineralisationsbedingungen eine hohe Nitratausschüttung stattfinden kann. Günstige Mineralisationsbedingungen mit erhöhten Nitratausträgen können u.a. in der Folge von Störungen wie Windwurf oder Insektenkalamitäten, aber auch als Folge von Hiebsmaßnahmen auftreten [z.B. 19, 13, 4].

Ein hoher Stickstoff-Sättigungsgrad stimuliert die N-Mineralisation [2, 17], deswegen wird der Stickstoffnettomineralisation (NNM) und dem Nitrifikationsgrad eine hohe Bedeutung als Indikator zugesprochen [z.B. 7]. In dieser Studie konnte jedoch keine Beziehung zwischen N-Mineralisationsparametern und der Nitratversickerung festgestellt werden. Unter den Eichenbeständen mit relativ geringen Nitrataustragsraten wurden sogar die höchsten NNM-Raten gemessen und unter Douglasienbeständen die niedrigsten. Das könnte durch die Qualität des Humus zu erklären sein. PERSSON et al. [24] fanden unter Laubholzbeständen ebenfalls höhere NNM-Raten als unter Nadelholzbeständen. Die Ergebnisse machen andererseits deutlich, dass, obwohl unter den Eichenbeständen aktuell die niedrigsten Nitratversickerungsraten ermittelt wurden, diese Bestände aber über ein hohes Potenzial für eine Nitratfreisetzung verfügen. Das zeigen nicht nur die hohen NNM-Raten,

sondern auch die hohen N-Vorräte in der Humusaufgabe. Die Ergebnisse zu den Nitratausträgen legen einerseits einen vermehrten Anbau von Eichen zur Verringerung des Risikos hoher Nitratausträge nahe, andererseits weist jedoch das hohe Potenzial für die Nitratfreisetzung auf die begrenzten Möglichkeiten hin, langfristig unter Bedingungen hoher Stickstoffeinträge mit der Eiche hohe Nitratausträge zu vermeiden.

Folgerungen

In den untersuchten Beständen weisen alle Indikatoren (Nitratversickerung, Stickstoff-Vorratsdaten, C : N-Verhältnisse, Stickstoff-Mineralisation) auf einen hohen Grad der Stickstoff-Sättigung hin. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass trotz der hohen Nitratversickerungsraten die Wälder noch immer eine erhebliche N-Senke darstellen, und somit einen Teil des in der Region Weser-Ems emittierten Ammoniak-Stickstoffs speichern. Hinsichtlich der Stickstoffspeicherung scheinen die Eichenbestände überdurchschnittlich effektiv zu sein. Dieser Befund bedarf der weiteren Klärung.

Solange die Stickstoffeinträge hoch sind, ist eine Abnahme der Nitratausträge nicht zu erwarten. Die hohen N-Vorräte im Auflagehumus und die hohen potenziellen N-Mineralisationsraten in allen Waldbeständen weisen darauf hin, dass bei Störungen im System wie z.B. Kahlschlag oder Windwurf zusätzlich Nitrat freigesetzt werden kann. Um die Wahrscheinlichkeit solcher Ereignisse zu senken, müssen die Bestände möglichst schonend behandelt werden.

Auf die Dauer jedoch kann in Regionen mit intensiver Viehhaltung wie beispielsweise in der Region Weser/Ems nur eine drastische Senkung der Stickstoffeinträge das Risiko von Nitratausträgen verringern. In der hier untersuchten Beispielsregion hat die Forstwirtschaft wegen der Altersstruktur der Bestände nur wenig Möglichkeiten, über den Wechsel von Nadelbaum- zu Laubbaumbeständen die Nitratausträge zu verringern. Bei einem solchen Baumartenwechsel ist zu berücksichtigen, dass die Ertragsleistung der Laubbaumarten geringer als die der Nadelbaumbestände ist. Dies wirft, ähnlich wie in der Landwirtschaft, die Frage auf, ob bei gezielten waldbaulichen Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers, die mit einem Minderertrag verbunden sind, ein finanzieller Ausgleich erfolgen sollte.

Literaturhinweise können bei den Autoren angefordert oder heruntergeladen werden bei: www.forstpraxis.de (Zeitschriften/AFZ-DerWald/Downloads)