

Stoffeinträge

Birte Scheler

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7303457>

Mit dem Niederschlag gelangen verschiedene Nähr- und Schadstoffe in gelöster Form in den Wald. Zusätzlich werden diese Stoffe in gas- und partikelförmiger Form eingetragen. Im Vergleich verschiedener Landnutzungsformen ist der atmosphärische Stoffeintrag aufgrund des ausgeprägten Filtereffekts der großen Kronenoberflächen für Gase und partikuläre Stoffe in Wäldern besonders hoch. Diese sogenannte Immissionsschutzfunktion des Waldes stellt jedoch für das Ökosystem Wald selbst eine Belastung dar, da Schwefel- und Stickstoffverbindungen (Nitrat und Ammonium) das chemische Bodenmilieu durch Versauerung und Eutrophierung verändern.

Um die Wirkungen erhöhter Stoffeinträge und damit verbundener Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme wie beispielsweise das Grundwasser zu untersuchen, wurde bereits 1968 mit der systematischen Erfassung der Stoffeinträge auf je einer Buchen- und Fichtenfläche im Solling begonnen. Aktuell wird in Niedersachsen im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings der Stoffeintrag in vier Fichten-, drei Buchenbeständen sowie jeweils einem Eichen- und Kiefernbestand erfasst.

Jeder Bestandesmessfläche (Kronentraufe) ist eine Freifläche (Freilandniederschlag) zugeordnet. In Buchenbeständen wird zur Erfassung des Bestandesniederschlags neben der Kronen-

traufe auch der bei dieser Baumart quantitativ bedeutsame Stammablauf gemessen. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdepositionsraten berechnet.

Im Frühsommer 2021 wurde auf zwei Fichtenflächen in der Langen Bramke massiver Borkenkäferbefall festgestellt. Der rasch abgestorbene Bestand der Fläche Lange Bramke Kamm wurde im Herbst 2021 komplett geräumt. Das Absterben der Bäume und die anschließende Räumung haben sich auf die Höhe der Kronentraufe und der Stoffeinträge ausgewirkt. Bei der Fläche Nordhang war das unmittelbare Umfeld des Depositionsmessfeldes nicht durch Borkenkäferbefall betroffen, so dass die Messungen auf dieser Fläche im Jahr 2021 noch nicht beeinflusst waren. Leider hat sich der Befall im Jahr 2022 auf die gesamte Fläche und auch auf den Südhang ausgeweitet, so dass auch die Messungen in diesen Beständen ab dem Jahr 2022 nicht mehr repräsentativ für die Höhe der Kronentraufe und des Stoffeintrags eines 60–80-jährigen mittleren Fichtenbaumholzes sein werden.

Die Höhe der Stoffeinträge wird maßgeblich durch verschiedene Faktoren wie Niederschlagsmenge, -intensität und -verteilung, Windgeschwindigkeit, Baumart, Bestandeshöhe, Kronenrauigkeit oder lokale Emittenten bestimmt. So sind die Stoffeinträge im Bergland (Harz und Solling) aufgrund größerer Niederschlagsmengen höher als im niedersächsischen Tiefland. Fichten- und Douglasienbestände sind wegen der



Einbau von Lysimetern zur Untersuchung der Bodenlösung auf dem nach Borkenkäferbefall geräumten Teil der Fläche Lange Bramke Nordhang

ganzjährigen und im Vergleich mit Kiefern dichteren Benadelung stärker durch Stoffeinträge belastet als Buchen-, Eichen- und Kiefernbestände. Dieser Baumarteneffekt zeigt sich sehr deutlich im Solling, wo eine Fichten- und eine Buchenfläche in unmittelbarer Nachbarschaft und somit unter gleichen klimatischen Verhältnissen beobachtet werden.

Niederschlag

2021 lagen sowohl der Bestandes- als auch der Freilandniederschlag auf der Mehrzahl der untersuchten Monitoringflächen auf dem Niveau des 10-jährigen Mittels der Jahre 2011–2020. Größere positive Abweichungen wurden für das Osniedersächsische (Ehrhorn, Lüss) sowie das Mittelwestdeutsche Tiefland (Augustendorf) registriert. Auf der Fläche Lüss betrug der Bestandesniederschlag 113 % (+74 mm) und der Freiflächenniederschlag 110 % des 10-jährigen Mittels. In Ehrhorn betrug die Abweichung im Freiland +8 % (+61 mm) und unter Eiche +23 % (+147 mm), in Augustendorf war nur der Bestandesniederschlag mit +13 % (+71 mm) nennenswert erhöht. Der im Vergleich zum Freilandniederschlag deutlich stärker erhöhte Bestandesniederschlag in Ehrhorn und Augustendorf kann durch eine veränderte Bestandesstruktur in Folge waldbaulicher Eingriffe erklärt werden.

Schwefeleintrag

Durch die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung und die Einführung schwefelarmer Kraft- und Brennstoffe seit Mitte der 1980er Jahre wurden die Schwefeldioxidemissionen und in der Folge der Schwefeleintrag in gasförmiger und gelöster Form in Wälder wirksam reduziert. Obwohl er Anfang der 2000er Jahre bereits auf einem relativ geringen Niveau lag, hat er im Zeitraum 2012–2021 weiter deutlich abgenommen. Er betrug 2021 mit dem Bestandesniederschlag unter Buche



Foto: O. Schwerdtfeger

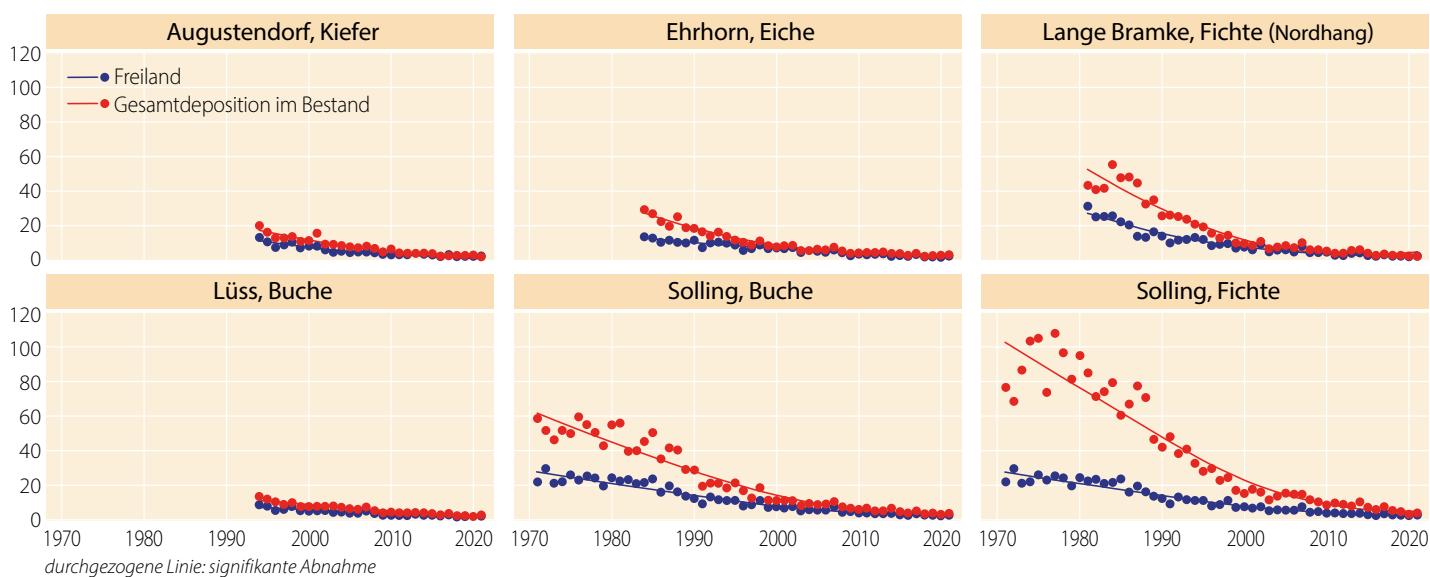
Erfassung des Bestandesniederschlags auf einer Intensiv-Monitoringfläche

je Hektar zwischen 2,2 kg (Göttinger Wald) und 3,7 kg (Solling), unter Fichte zwischen 2,3 kg (Lange Bramke Nordhang und Südhang) und 4,1 kg (Solling), unter Kiefer (Augustendorf) 2,2 kg und unter Eiche 3,2 kg je Hektar. Der absolute Rückgang im Vergleich zum Mittel 2011–2020 lag zwischen 0,5 kg je Hektar (Ehrhorn Eiche) und 3,0 kg je Hektar (Solling Fichte), die relative Abnahme betrug zwischen 14 % (Ehrhorn Eiche) und 54 % (Lange Bramke Kamm). Im Freiland lag der Sulfatschwefeleintrag zwischen 1,6 kg je Hektar (Göttinger Wald) und 2,8 kg je Hektar (Solling), die absolute Abnahme bewegte sich zwischen 0,3 kg je Hektar (Ehrhorn, Solling) und 0,6 kg je Hektar (Lange Bramke).

Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form) und als Ammonium (reduzierte Form) in das Ökosystem eingetragen. Die Stickoxidemissionen (NOx) haben im Zeitraum 1990–2020 um 66 %, die Ammoniakemissionen um 25 % abgenommen. Trotz einer überproportional starken Abnahme der Stickoxidemissionen im Bereich „Verkehr“, stammen immer noch 40 % aus diesem

Sulfatschwefeleintrag ($\text{SO}_4\text{-S}$) auf ausgewählten Monitoringflächen in kg je Hektar und Jahr





Bereich, gefolgt von der Energiewirtschaft (22 %) sowie den privaten Haushalten und Kleingewerbe (12 %). Die Ammoniakemissionen stammen unverändert zu ca. 95 % aus der Landwirtschaft (UBA 2022).

Infolge der Reduktion der Emission sind die Stickstoffeinträge im Freiland und mit der Gesamtdeposition im Beobachtungszeitraum deutlich zurückgegangen.

Bezogen auf das Mittel der Jahre 1989–1991 betrug die Reduktion der Nitrateinträge (Mittel 2019–2021) im Freiland zwischen 47 % (Ehrhorn) und 72 % (Göttinger Wald). Die Reduktion mit der Gesamtdeposition betrug unter Buche zwischen 45 % (Solling) und 53 % (Göttinger Wald), unter Fichte zwischen 49 % (Solling) und 63 % (Lange Bramke Kamm) sowie 40 % unter Eiche (Ehrhorn). Betrachtet man jedoch nur den Zeitraum 2012–2021, zeigt sich ein uneinheitliches Bild: Auf zwei von drei Buchenflächen (Göttinger Wald, Lüss), drei von vier Fichtenflächen (Lange Bramke Kamm und Südhang, Solling) sowie auf zwei von sechs Freiflächen (Göttinger Wald, Lange Bramke) hat der Nitratstickstoffeintrag weiter abgenommen, auf allen anderen Flächen verharrt er mit jährlichen Schwankungen auf einem gleichbleibenden Niveau.

Die Reduktion der Ammoniumeinträge im Zeitraum 1990–2020 lag im Freiland zwischen 51 % (Ehrhorn) und 65 % (Lange Bramke) und fiel damit lokal deutlich höher aus als die Reduktion der bundesweiten Emissionen. Bei der Gesamtdeposition betrug die Reduktion unter Buche zwischen 50 % (Solling) und 54 % (Göttinger Wald), unter Fichte zwischen 51 % (Lange

Bramke Nordhang) und 60 % (Lange Bramke Kamm) und 44 % unter Eiche. In den letzten 10 Jahren hat der Ammoniumeintrag im Gegensatz zum Nitratstickstoffeintrag nur im Göttinger Wald unter Buche (Gesamtdeposition) weiter deutlich abgenommen.

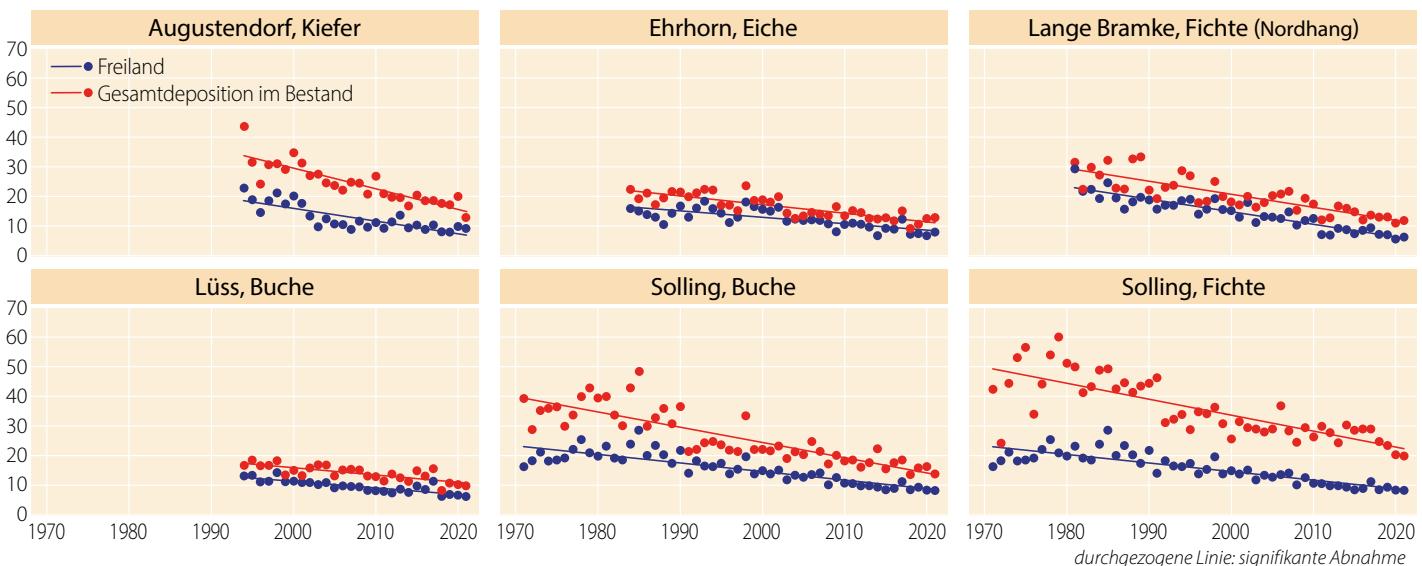
2021 lag der Ammoniumstickstoffeintrag je Hektar unter Buche zwischen 4,7 kg (Göttinger Wald) und 7,5 kg (Solling), unter Fichte zwischen 6,2 kg (Lange Bramke Südhang) und 11,5 kg (Solling), unter Kiefer bei 9,1 kg (Augustendorf) und unter Eiche bei 8,6 kg. Im Freiland lag er zwischen 3,1 kg (Göttinger Wald) und 6,1 kg (Augustendorf) je Hektar.

Bundesweit konnten die Stickoxidemissionen deutlich stärker reduziert werden als die Ammoniakemissionen. Dieser Unterschied spiegelt sich auf den niedersächsischen Untersuchungsflächen jedoch bei der Größenordnung der Reduktion der Nitrat- und Ammoniumeinträge kaum wider. Dementsprechend hat sich der Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag mit Ausnahme der Freifläche Göttinger Wald im Vergleich 1989–1991 mit 2021 um maximal 4 % verändert.

2021 betrug er zwischen 54 % und 67 % im Freiland, 50 % und 58 % unter Buche, zwischen 54 % und 59 % unter Fichte, 67 % unter Eiche und 71 % in Augustendorf unter Kiefer, einem Gebiet mit intensiver Tierhaltung.

Obwohl der anthropogen bedingte anorganische Stickstoffeintrag seit Beginn der Untersuchungen deutlich abgenommen hat, überschreitet er im Mittel der letzten 5 Jahre (2017–2021) mit Werten bis zu 15,6 kg je Hektar und Jahr unter Buche (Solling) wieder die Grenzwerte.

Stickstoffeintrag ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) auf ausgewählten Monitoringflächen in kg je Hektar und Jahr



ling), bis zu 23,4 kg je Hektar und Jahr unter Fichte (Solling), 12,1 kg je Hektar und Jahr unter Eiche (Ehrhorn) und 17,2 kg je Hektar und Jahr unter Kiefer nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Stickstoff, der nicht für das Wachstum der Vegetation benötigt wird, reichert sich im Ökosystem an. Im Fall von Störungen der Stoffkreisläufe durch Kalamitäten wie Windwurf oder Borkenkäferbefall, die aktuell auf den Fichtenflächen Lange Bramke zu beobachten sind, wird der Stickstoff rasch mineralisiert und kann bei hohen Stickstoffvorräten im Boden zu stark erhöhten Nitratausträgen führen. Nitrat wird im Bodenwasser von Nährstoffkationen wie Calcium, Magnesium oder Kalium und sauren Kationen wie Aluminium begleitet. Dadurch verliert das Ökosystem wichtige Nährstoffe aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden. Auf sauren Böden kann die vermehrte Lösung von Aluminium einen Säureschub verursachen. Außerdem werden angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer ggf. durch hohe Nitratausträge gefährdet. Eine weitere Reduktion der Stickstoffemissionen ist zum Schutz der Ökosysteme wichtig.

Gesamtsäureeintrag

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürige Anteile, Gauger et al. 2002).

2021 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland zwischen 0,5 kmol_c (Göttinger Wald) und 0,8 kmol_c (Augustendorf), unter Buche zwischen 0,8 (Göttinger Wald) und 1,2 kmol_c je Hektar (Solling) sowie unter Fichte zwischen 1,0 (Lange Bramke Nordhang und Südhang) und 1,7 kmol_c je Hektar (Solling). Der Gesamtsäureeintrag je Hektar unter Eiche (Ehrhorn) betrug 1,1 kmol_c und unter Kiefer (Augustendorf) 1,0 kmol_c je Hektar.

Ein Teil des Säureeintrags wird durch ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragene Basen neutralisiert. Diese Säureneutralisationskapazität durch Baseneintrag lag 2021 zwischen knapp

0,1 kmol_c je Hektar (Augustendorf, Kiefer) und 0,4 kmol_c je Hektar (Lüss, Buche) bzw. zwischen 8 % (Augustendorf, Kiefer) und 43 % (Lüss, Buche) des Säureeintrags. Ein anderer Teil der Gesamtsäure wird im Waldboden durch Basen gepuffert, die durch Verwitterung freigesetzt werden. Der partikuläre Eintrag basischer Stäube spielt nur in Einzelfällen bspw. in der Nähe von Steinbrüchen eine größere Rolle. Die nachhaltige Säurepufferkapazität aus Verwitterung reicht auf den oft nährstoffarmen Waldstandorten jedoch auch unter Berücksichtigung der Baseneinträge nicht aus, um die Säureeinträge vollständig zu kompensieren. Eine standortangepasste Kalkung zum Schutz der Waldböden und der Erhaltung ihrer Filterfunktion für das Grundwasser kann empfohlen werden.

anthropogen = durch menschliche Aktivitäten verursacht

Deposition = Ablagerung von Stoffen

Eutrophierung = Nährstoffanreicherung

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.

Literatur

- Gauger T, Anshelm F, Schuster H, Draaijers GPJ, Bleeker A, Erisman JW, Vermeulen AT, Nagel H-D (2002): Kartierung ökosystembezogener Langzeitrends 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
- UBA (2022): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/stickstoffoxid-emissionen#entwicklung-seit-1990>
- Ulrich B (1991): Beiträge zur Methodik der Waldökosystemforschung. Berichte des Forschungszentrums für Waldökosysteme/Waldsterben. Reihe B, Bd. 24, 204–210

Gesamtsäureeintrag auf ausgewählten Monitoringflächen in kmol_c je Hektar und Jahr

