

Stoffeinträge

Birte Scheler

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13846844>

Nähr- und Schadstoffe werden sowohl in gelöster Form mit dem Niederschlag als auch gas- und partikelförmig in Wälder eingetragen. Aufgrund der großen Oberflächen der Kronen ist der atmosphärische Stoffeintrag in Wäldern deutlich höher als bei allen anderen Landnutzungsformen. Diese sogenannte Immissionsschutzfunktion 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 in je einen Buchen- und Fichtenbestand im Solling begonnen. In Niedersachsen wird der Stoffeintrag im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings aktuell in drei Buchenaltbeständen sowie je einem Eichenalt-, Kiefernalt- und Fichtenaltbestand erfasst. Die drei Fichtenaltbestände in der Langen Bramke (Harz) sind seit 2021 sukzessive nach Borkenkäferbefall abgestorben und komplett geräumt worden. Auf der Fläche Lange Bramke Nordhang wurden die Stoffeintragsmessungen im absterbenden Bestand noch bis Ende 2023 durchgeführt, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

Neu hinzugekommen sind Stoffeintragsmessungen in einem Fichtenjungbestand aus Naturverjüngung im Solling, der sich nach Borkenkäferbefall im Jahr 2006 entwickelt hat.

Jeder Bestandesmessfläche (Kronentraufe) ist eine Freifläche (Freilandniederschlag) zugeordnet. In Buchenbeständen wird

zur Erfassung des Bestandesniederschlags neben der Kronentraufe zusätzlich der bei dieser Baumart mengenmäßig bedeutsame Stammablauf gemessen. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdositionsraten berechnet.

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 dichten, ganzjährigen Benadelung stärker durch Stoffeinträge belastet als Buchen- und Eichenbestände sowie Kiefernwälder mit ihren lichtereren Kronen. Dieser Baumarteneffekt zeigt sich sehr gut im Solling, wo eine Fichten- und eine Buchenfläche in unmittelbarer Nachbarschaft und somit unter gleichen klimatischen Verhältnissen beobachtet werden.

Niederschlag

2023 war ein überdurchschnittlich niederschlagsreiches Jahr. Die Höhe des Freilandniederschlags lag zwischen 935 mm (Göttinger Wald) und 1659 mm (Lange Bramke). Im Vergleich zum 10-jährigen Mittel der Jahre 2013–2022 wurde zwischen 371 mm (Augustendorf) und 519 mm (Lange Bramke) mehr Niederschlag registriert. Die Höhe des Bestandesniederschlags betrug zwischen 829 mm (Göttinger Wald, Buche) und 1435 mm (Solling, Buche). Im Vergleich zum Mittel des Zeitraums 2013–2022 waren es zwischen 270 mm (Göttinger Wald) und 553 mm (Solling, Buche) mehr.

Foto: C. Klinck



Freifläche Göttinger Wald

Relativ gesehen fielen im Freiland zwischen 141 % (Augustendorf) und 158 % (Ehrhorn) und im Bestand zwischen 148 % (Göttinger Wald, Buche) und 186 % (Lüss Buche) des 10-jährigen Niederschlagsmittels (2013–2022). Die Höhe der Kronentraufe im Fichtenjungbestand (Solling) war knapp 90 mm geringer als im Altbestand auf der gleichen Fläche, die Interzeption lag 5 % höher.

Eintrag 2023 jedoch auf allen Flächen über dem Wert des Vorjahrs. Er betrug pro Hektar zwischen 1,6 kg (Göttinger Wald) und 2,9 kg (Solling, Lange Bramke) im Freiland sowie zwischen 2,4 kg (Göttinger Wald Buche) und 4,6 kg (Solling Fichte) mit dem Bestandesniederschlag. Im Fichtenjungbestand (Solling) betrug er hingegen nur 3 kg je Hektar, das entspricht zwei Drittel des Eintrags des Altbestands.

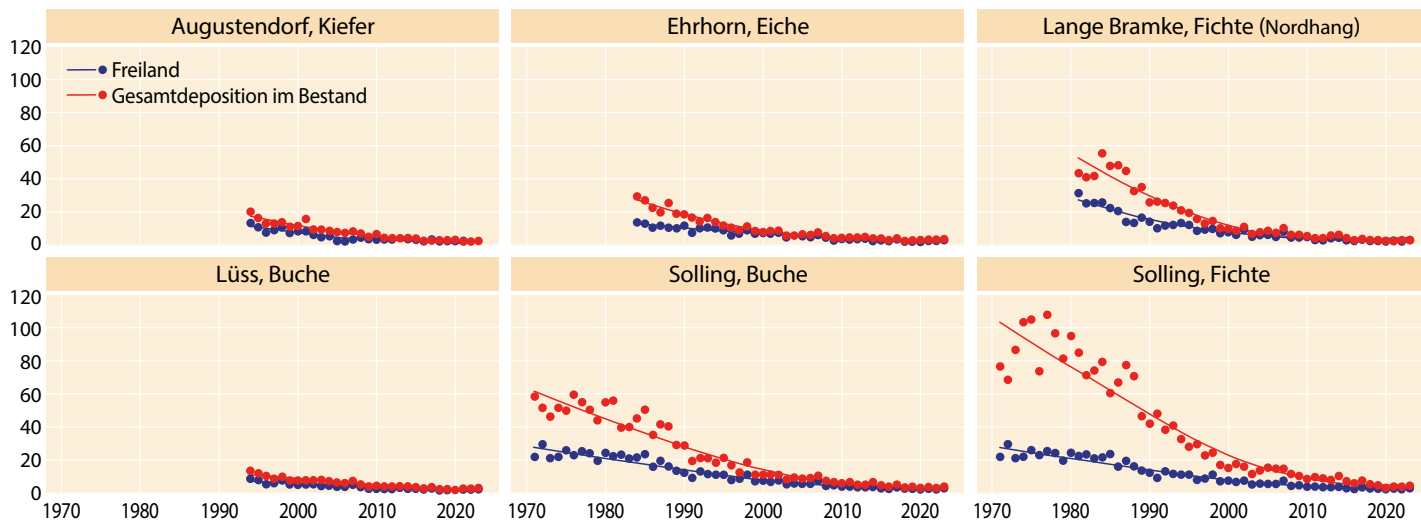
Schwefeleintrag

Durch die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung sowie die Einführung schwefelarmer bzw. schwefelfreier Kraft- und Brennstoffe wurden die Schwefeldioxidemissionen wirksam reduziert. Die Sulfatkonzentration im Niederschlag hat seit Untersuchungsbeginn deutlich abgenommen und die gasförmige Belastung durch Schwefeldioxid ist nur noch sehr gering. Der Sulfatschwefeleintrag liegt deshalb schon seit Jahren auf einem sehr niedrigen Niveau. Bedingt durch die deutlich höheren Niederschlagsmengen im Jahr 2023 lag der

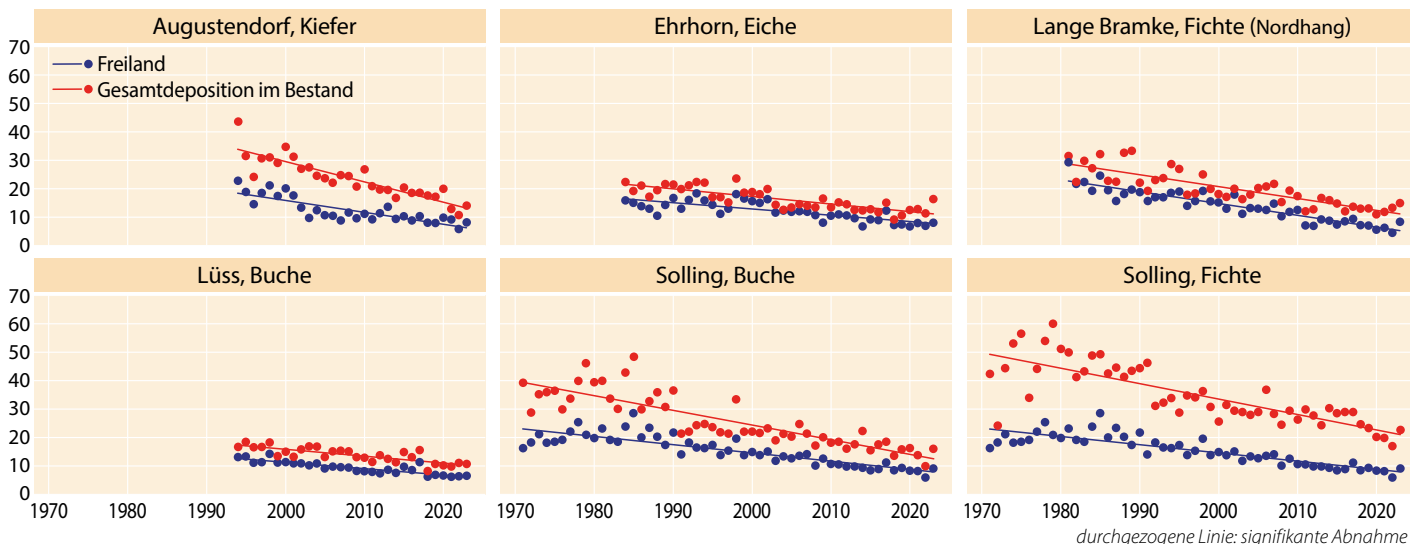
Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form, Quellen: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) und als Ammonium (reduzierte Form, landwirtschaftliche Quellen) in das Ökosystem eingetragen. In dem Gebiet Weser-Ems (Augustendorf) ist der Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag im Freiland mit 66 % im 10-jährigen Mittel (2014–2023) am höchsten, gefolgt von der Region Hohe Heide (Ehrhorn) mit 61 %. In dem hohen Ammoniumeintrag in Augustendorf spiegelt sich die intensive Landwirtschaft einschließlich Intensivtierhaltung dieser Region wieder.

Sulfatschwefeleintrag (SO₄-S) auf ausgewählten Monitoringflächen in kg je Hektar und Jahr



Stickstoffeintrag (NH₄-N + NO₃-N) auf ausgewählten Monitoringflächen in kg je Hektar und Jahr



durchgezogene Linie: signifikante Abnahme

Betrachtet man den Zeitraum seit Untersuchungsbeginn bzw. seit 1994, hat der Nitratstickstoffeintrag im Freiland und mit der Gesamtdosition aller vier Baumarten auf allen untersuchten Flächen signifikant abgenommen. In den vergangenen zehn Jahren (2014–2023) war er hingegen nur noch auf den Flächen Augustendorf (Freiland, Kiefer), Göttinger Wald (Freiland, Buche) sowie Solling (Fichte) deutlich rückläufig, während er auf den anderen Flächen mit jährlichen Schwankungen auf demselben, relativ niedrigen Niveau verharrt. 2023 betrug er im Freiland zwischen 2,5 kg (Göttinger Wald) und 4,1 kg (Solling) je Hektar und unter Buche (Gesamtdosition) zwischen 4,6 kg (Lüss) und 7,2 kg (Solling) je Hektar. Unter Fichte belief sich die Gesamtdosition von Nitratstickstoff pro Hektar auf 10,1 kg im Solling und 6,9 kg in dem durch Borkenkäferbefall absterbenden Fichtenbestand im Harz (Lange Bramke Nordhang). Im Fichtenjungbestand (Solling) betrug der Nitratstickstoffeintrag mit 6 kg je Hektar nur 60 % des Eintrags des Fichtenaltbestands.

Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf den niedersächsischen Intensiv-Monitoringflächen seit Untersuchungsbeginn ebenfalls signifikant abgenommen. In dem 10-Jahreszeitraum 2014–2023 wurde eine weitere Abnahme jedoch nur auf den beiden Bestandesflächen im Solling (Buche und Fichte) sowie im Göttinger Wald (Freiland und Buche) beobachtet. Im Frei-

land lag er 2023 zwischen 3,1 kg (Göttinger Wald) und 5,3 kg (Augustendorf) je Hektar und unter Buche zwischen 5,5 kg (Lüss) und 8,9 kg (Solling). Unter Kiefer (Augustendorf) betrug er pro Hektar 10,3 kg und unter Fichte 12,6 kg im Solling bzw. 8,1 kg im Harz (Lange Bramke Nordhang). Im Fichtenjungbestand (Solling) betrug der Ammoniumstickstoffeintrag mit 7,4 kg rund 60 % des Eintrags des Fichtenaltbestands.

Durch die Umsetzung verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffemissionen haben die anorganischen Stickstoffeinträge seit Untersuchungsbeginn erheblich abgenommen. Diese Entwicklung hat sich in den vergangenen 10 Jahren jedoch nicht im gleichen Maße fortgesetzt.

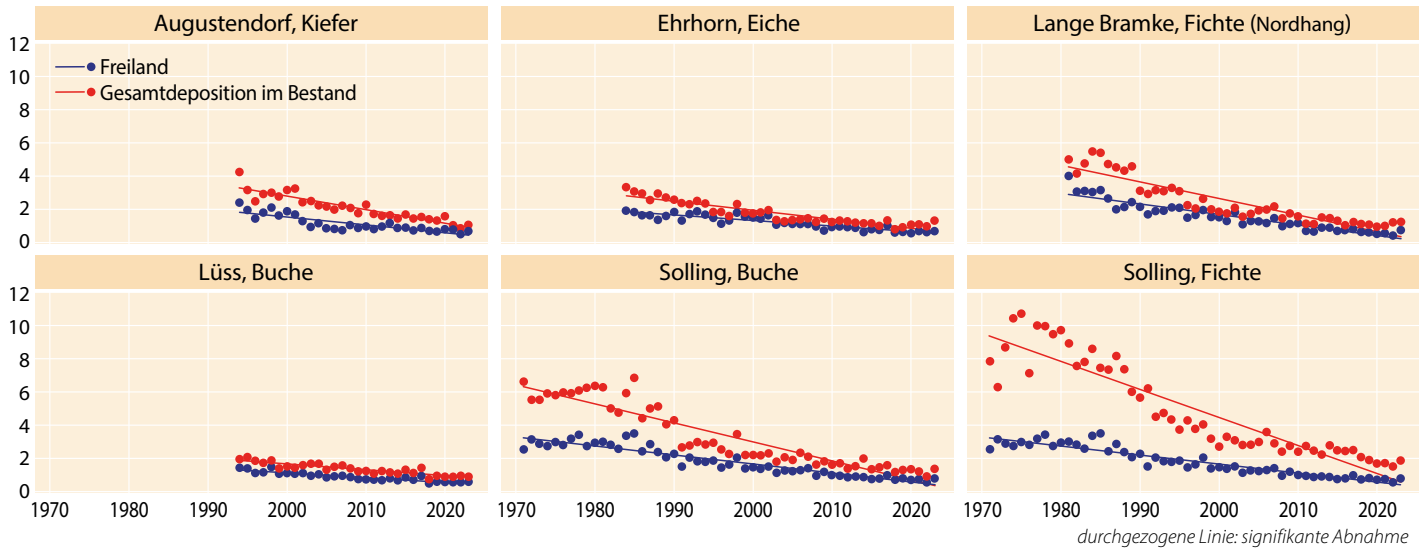
Der anthropogen bedingte atmosphärische anorganische Stickstoffeintrag überschritt im Mittel der letzten 5 Jahre (2019–2023) mit Werten bis zu 14,4 kg je Hektar unter Buche (Solling) und 20,6 kg je Hektar unter Fichte (Solling) nach wie vor deutlich den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Stickstoffeinträge, die über dem Bedarf des Ökosystems für das Wachstum liegen, reichern sich im Ökosystem an und ziehen – ggf. zeitverzögert – gravierende negative Konsequenzen nach sich.

Durch Kalamitäten wie Windwurf oder Borkenkäferbefall, durch die in den vergangenen Jahren u. a. im Harz riesige Freiflächen entstanden sind, kommt es zu einer Entkoppe-



Foto: J. Evers

Level II-Fichtenfläche Solling

Gesamtsäureeintrag auf ausgewählten Monitoringflächen in kmol_c je Hektar und Jahr

lung der Stoffkreisläufe. Der im Boden gebundene Stickstoff wird rascher mineralisiert, mangels Bäumen wird jedoch nur ein sehr kleiner Teil von der zwischenzeitlich aufgekommenen Schlagflora aufgenommen und erhöhte Nitratausträge mit dem Sickerwasser sind die Folge. Da Nitrat im Bodenwasser von Nährstoffkationen wie Calcium, Magnesium oder Kalium sowie sauren Kationen wie Aluminium begleitet wird, verlieren die Ökosysteme wichtige Nährstoffe aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden. Außerdem erhöht sich die Konzentration von sauren Kationen wie z. B. Aluminium in der Bodenlösung, die für die Vegetation schädlich sind. Angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer werden ggf. durch hohe Nitratausträge oder hohe Aluminiumkonzentrationen gefährdet. Zum Schutz der Ökosysteme ist eine weitere Reduktion der Stickstoffemissionen wichtig.

Gesamtsäureeintrag

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

2023 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland zwischen $0,5 \text{ kmol}_c$ (Göttinger Wald) und $0,8 \text{ kmol}_c$ (Solling), unter Buche zwischen $0,9 \text{ kmol}_c$ (Göttinger Wald, Lüss) und $1,4 \text{ kmol}_c$ (Solling) sowie unter Fichte $1,1 \text{ kmol}_c$ (Lange Bramke Nordhang) bzw. $1,9 \text{ kmol}_c$ (Solling). Im Fichtenjungbestand im Solling belief sich der Gesamtsäureeintrag auf $1,1 \text{ kmol}_c$, rund 60 % des Gesamtsäureeintrags des Fichtenaltbestands auf der gleichen Fläche.

Ein Teil des Säureeintrags wird durch die ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragenen Basen gepuffert. Berücksichtigt man diese Pufferleistung und zieht die nicht seesalzbürtigen Anteile der Basen Calcium, Magnesium und Kalium vom Gesamtsäureeintrag ab, erhält man den ökosystemar bedeutsamen Netto-Gesamtsäureeintrag (Gauger et al. 2002).

Auf den niedersächsischen Flächen des Intensiven Monitorings werden zwischen 10 % (Augustendorf Kiefer) und 23 % (Göttinger Wald) der Gesamtsäureeinträge durch nicht seesalzbürtige Basen abgepuffert.

Ein weiterer Teil des Säureeintrags wird im Erdreich durch Basen gepuffert, die durch Verwitterung freigesetzt werden. 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 deshalb 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, G. P. J.; Bleeker, A.; Erisman, J. W.; Vermeulen, A. T. & Nagel, H.-D. (2002): Kartierung ökosystembezogener Langzeittrends 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.
- Ulrich, B. (1991): Beiträge zur Methodik der Waldökosystemforschung. Berichte des Forschungszentrums für Waldökosysteme/Waldsterben. Reihe B, Bd. 24, 204-210.