

Atmosphärische Stoffeinträge bis 2024

Birte Scheler

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17240946>

Nähr- und Schadstoffe werden sowohl in gelöster Form mit dem Niederschlag als auch gas- und partikelförmig mit der Luft in Wälder eingetragen. Aufgrund ihrer großen Kronenoberfläche filtern Bäume große Mengen an Schadstoffen und (Fein-)Stäuben aus der Luft (Immissionsschutzfunktion). Der atmosphärische Stoffeintrag ist deshalb in Wäldern höher als bei allen anderen Landnutzungsformen. Diese Einträge stellen jedoch für das Ökosystem Wald eine Belastung dar, weil hohe Einträge von Säure und Stickstoff durch Versauerung und Eutrophierung das chemische Bodenmilieu verändern. 1968 wurde im Solling mit der systematischen Erfassung der Stoffeinträge in je einem Buchen- und Fichtenbestand begonnen. Ab den frühen 1980er Jahren wurde in Niedersachsen sukzessiv ein Messnetz zur Quantifizierung der Schwefel-, Stickstoff- und Säureinträge aufgebaut. Dieses ermöglicht die Untersuchung der Folgen und Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme, die mit erhöhten Stoffeinträgen verbunden sein können. Aktuell werden im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings in Niedersachsen die Stoffeinträge in drei Buchenaltbeständen, je einem Kiefern-, Fichten- und sehr lichten Eichenaltbestand sowie einem ca. 25-jährigen Fichtenjungbestand (Solling) erfasst. Drei langjährig untersuchte Fichtenbestände im Harz sind nach Borkenkäferbefall abgestorben und die Flächen geräumt worden. Hier wird aktuell nur noch der Stoffeintrag im Freiland gemessen.

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

nentraufe zusätzlich der bei dieser Baumart mengenmäßig bedeutsame Stammablauf gemessen. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1994) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdpositionsraten 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. Dieser Baumarten-effekt zeigt sich sehr gut im Solling, wo eine Fichten- und eine Buchenfläche in unmittelbarer Nachbarschaft und somit unter gleichen klimatischen Verhältnissen beobachtet werden.

Niederschlag

2024 war nach 2023 ein weiteres niederschlagsreiches Jahr. Zwar fiel auf allen Frei- und Bestandesmessflächen weniger Niederschlag als 2023, im Vergleich zum 10-jährigen Mittel der Jahre 2014–2023 wurden jedoch auf allen Flächen deutlich höhere Mengen registriert. Der Freilandniederschlag erreichte 2024 Werte zwischen 849 mm (Göttinger Wald) und 1316 mm (Solling). Er lag zwischen 70 mm (Augustendorf) und 239 mm (Solling) über dem Mittel der Jahre 2014–2023. Der Bestandesniederschlag betrug zwischen 655 mm (Augustendorf, Kiefer) und 1143 mm (Solling, Buche). Im Vergleich zum Mittel des Zeitraums 2014–2023 fiel zwischen 40 mm (Augustendorf, Kiefer) und 338 mm (Solling, Fichte) mehr Niederschlag.

Foto: B. Scheler



Geräumte Fichtenbestände in der Langen Bramke

Relativ gesehen fiel im Freiland zwischen 108 % (Augustendorf) und 125 % (Göttinger Wald) und im Bestand zwischen 107 % (Augustendorf, Kiefer) und 142 % (Solling, Fichte) des 10-jährigen Niederschlagsmittels (2014–2023). Die Höhe der Kronentraufe im Fichtenjungbestand (Solling) war 122 mm geringer, die Interzeption 7 % höher als im Altbestand auf der gleichen Fläche.

dem erreichten sehr niedrigen Niveau. Entsprechend betrug 2024 der Sulfatschwefeleintrag je Hektar im Freiland zwischen 1,4 kg (Göttinger Wald) und 2,5 kg (Solling) sowie im Bestand zwischen 2,2 kg (Göttinger Wald, Buche) und 4,3 kg (Solling, Fichte). Im Fichtenjungbestand (Solling) betrug er hingegen nur 2,7 kg je Hektar, das entspricht rund zwei Drittel des Eintrags des Altbestands.

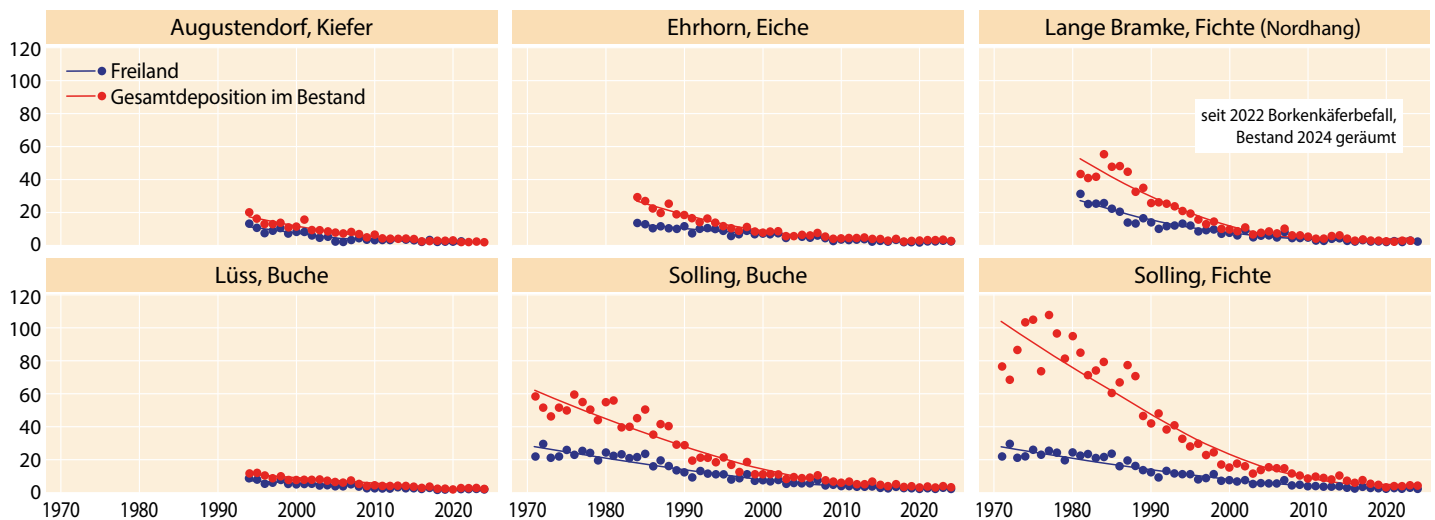
Schwefeleintrag

Durch die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung sowie die Einführung schwefelarmer bzw. schwefelfreier Kraft- und Brennstoffe wurden die Schwefeldioxidemissionen wirksam reduziert. Durch dieses Maßnahmenpaket sind die ehemals sehr hohen Schwefeleinträge in die Waldökosysteme nur noch sehr gering. Einige Flächen (Augustendorf, Kiefer; Göttinger Wald, Buche; Solling, Fichte) zeigen in den letzten 10 Jahren weiterhin einen signifikanten Rückgang der Schwefeleinträge. Auf allen anderen Flächen verharren die Schwefeleinträge auf

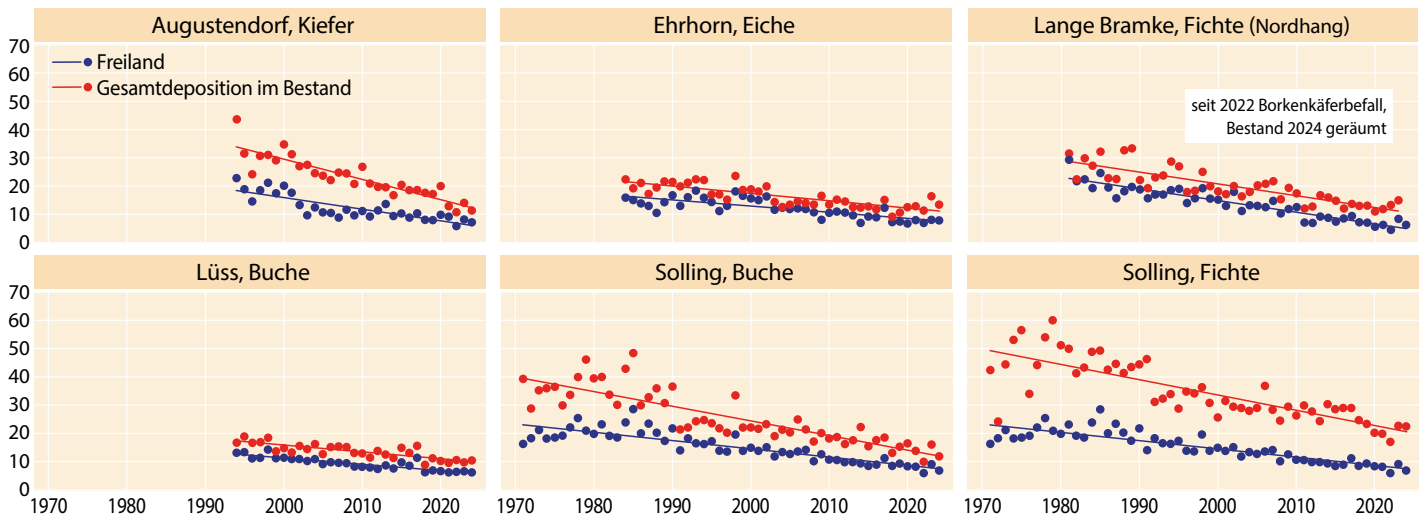
Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) und als Ammonium (reduzierte Form: landwirtschaftliche Quellen) in das Ökosystem eingetragen. Der Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag lag im 10-jährigen Mittel (2015–2024) im Freiland zwischen 52 % (Lange Bramke) und 66 % (Augustendorf). Der hohe Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag in Augustendorf ist durch die intensive Landwirtschaft einschließlich Intensivtierhaltung in dieser Region bedingt. Seit Untersuchungsbeginn haben die Nitratstickstoffeinträge

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



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



durchgezogene Linie: signifikante Abnahme

baumartenübergreifend auf allen Monitoringstandorten signifikant abgenommen. In dem für alle Flächen gemeinsamen 31-jährigen Zeitraum (1994–2024) betrug der mittlere, jährliche Rückgang je Hektar zwischen 0,13 kg (Lüss, Buche) und 0,22 kg (Solling, Fichte). In den vergangenen zehn Jahren (2015–2024) war er dagegen nur noch auf den Flächen Augustendorf (Freiland, Kiefer), Göttinger Wald (Freiland, Buche) sowie Lüss (Freiland) deutlich rückläufig, während er auf den anderen Flächen auf dem Niveau der Vorjahre verharrt. 2024 betrug er je Hektar im Freiland zwischen 2,2 kg (Göttinger Wald) und 3,1 kg (Solling) und unter Buche (Gesamtdeposition) zwischen 4,5 kg (Lüss, Göttinger Wald) und 5,2 kg (Solling). Unter Kiefer (Augustendorf) belief sich die Gesamtdeposition von Nitratstickstoff pro Hektar auf 4,4 kg, unter Fichte (Solling) auf 10,4 kg. Im Fichtenjungbestand (Solling) betrug der Nitratstickstoffeintrag mit 5,1 kg je Hektar nur 50 % des Eintrags des Fichtenaltbestands.

Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf den niedersächsischen Intensiv-Monitoringflächen ebenfalls signifikant abgenommen. Der mittlere, jährliche Rückgang je Hektar lag im Zeitraum 1994–2025 zwischen 0,11 kg (Lüss, Buche) und 0,53 kg (Augustendorf, Kiefer). Betrachtet man die letzten 10 Jahren 2015–2024, wurde eine deutliche Abnahme nur für die Bestandesflächen Augustendorf (Kiefer), Göttinger Wald (Buche), Lüss (Buche) und Solling (Fichte) beobachtet. 2024 lag der Ammoniumstickstoffeintrag im Freiland zwi-

schen 2,5 kg (Göttinger Wald) und 5,0 kg (Ehrhorn) je Hektar und unter Buche zwischen 4,4 kg (Göttinger Wald) und 6,4 kg (Solling). Unter Kiefer (Augustendorf) betrug er pro Hektar 7,0 kg und unter Fichte (Solling) 12,2 kg. Im Fichtenjungbestand (Solling) betrug der Ammoniumstickstoffeintrag mit 6,0 kg nur 50 % des Eintrags des Fichtenaltbestands.

Durch die Umsetzung verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffemissionen haben die anorganischen Stickstoffeinträge seit Untersuchungsbeginn deutlich abgenommen. Die mittleren jährlichen Abnahmen von Nitrat- bzw. Ammoniumstickstoff in Höhe von 0,1 kg bis 0,5 kg je Hektar seit 1994 erscheinen auf den ersten Blick gering. In der Summe hat der anorganische Stickstoffeintrag in diesem Zeitraum jedoch zwischen 7,2 kg (Lüss, Buche) und 21,5 kg (Augustendorf, Kiefer) abgenommen. Die relative Abnahme lag auf allen Flächen zwischen rund 35 % und 50 %.

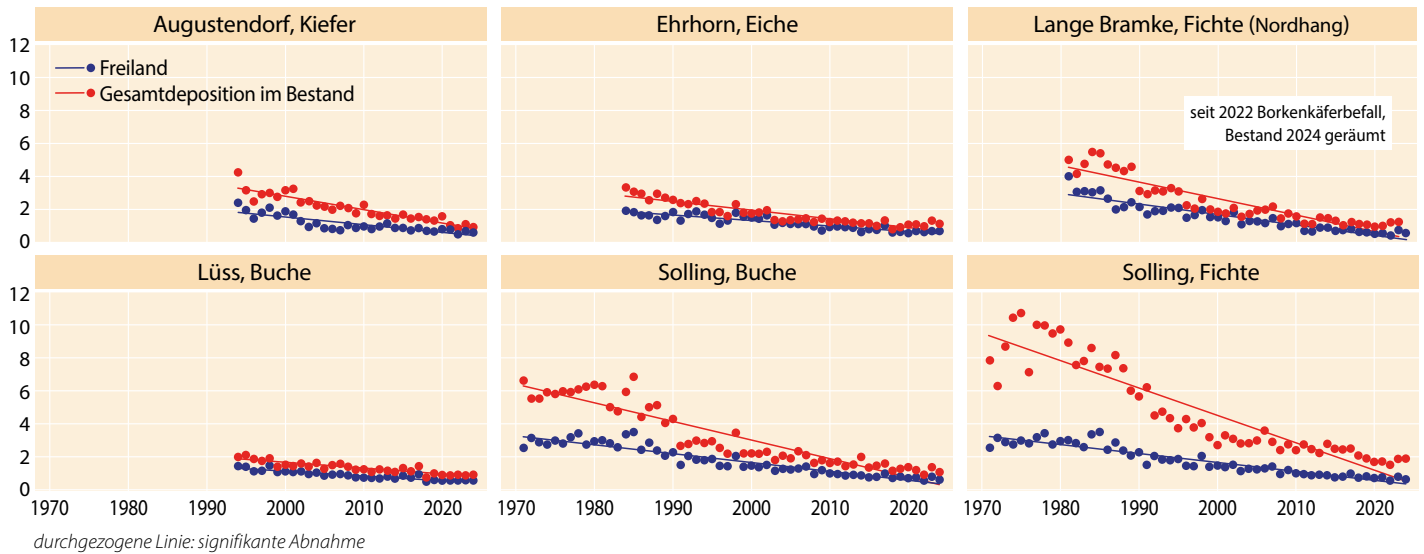
Trotz der beobachteten Abnahme sind die anthropogen bedingten atmosphärischen anorganischen Stickstoffeinträge je Hektar und Jahr mit Werten von bis zu 14,0 kg unter Buche (Solling), 19,9 kg unter Fichte (Solling) und 14,4 kg unter Kiefer (Augustendorf) (Mittel 2020–2024) immer noch hoch. Bei einer langfristigen Überschreitung der Belastungsgrenzen können nach dem bisherigen Kenntnisstand schädigende Effekte nicht ausgeschlossen werden.

Negative Auswirkungen von jahrzehntelang zu hohen Stickstoffeinträgen können gegenwärtig im Harz beobachtet



Foto: M. Brünjes

Level II-Buchenfläche Solling

Gesamtsäureeintrag auf ausgewählten Monitoringflächen in kmol_c je Hektar und Jahr

werden. Durch Borkenkäferbefall sind in den letzten Jahren riesige Freiflächen entstanden. Das veränderte Mikroklima auf diesen Freiflächen fördert die rasche Mineralisierung des in der organischen Substanz des Bodens gebundenen Stickstoffs. Die freigesetzten Ionen werden jedoch durch die fehlende Baumschicht nur zu einem sehr kleinen Teil aufgenommen. Entsprechend sind kurzfristig erhöhte Nitratkonzentrationen im Sickerwasser die Folge. Da die Ladungssumme der Ionen im Sickerwasser ausgeglichen sein muss, führen hohe Austräge von Anionen (wie Nitrat) auch zu hohen Austrägen an Begleitkationen wie Calcium, Magnesium, Kalium und Aluminium mit dem Sickerwasser. Hierdurch verlieren die Ökosysteme zusätzlich wichtige Nährstoffe aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden. Angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer werden ggf. durch hohe Nitratausträge sowie hohe Konzentrationen saurer Kationen wie Aluminium gefährdet. Zum Schutz der Ökosysteme ist eine weitere Reduktion der Stickstoffemissionen wichtig.

Gesamtsäureeintrag

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtd deposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002). 2024 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland zwischen 0,4 kmol_c (Göttinger Wald) und 0,7 kmol_c, (Ehrhorn), unter Buche zwischen 0,8 kmol_c (Göttinger Wald) und 1,1 kmol_c (Solling), 0,9 kmol_c unter Kiefer (Augustendorf) sowie 1,9 kmol_c unter Fichte (Solling). Im Fichtenjungbestand im Solling belief sich der Gesamtsäureeintrag auf 1,0 kmol_c, nur rund 50 % 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 Ge-

samtsäureeintrag ab, erhält man den ökosystemar bedeutsamen Netto-Gesamtsäureeintrag (Gauger et al. 2002).

Auf den niedersächsischen Flächen des Intensiven Monitorings wurden im Mittel der Jahre 2020–2024 zwischen 12 % (Augustendorf, Kiefer) und 30 % (Lüss, Buche) der Gesamtsäureeinträge durch nicht seesalzbürtige eingetragene Basen abgepuffert.

Obwohl die Gesamtsäureeinträge deutlich zurückgegangen sind (Abb. oben), zeigen viele Standorte erhöhte Konzentrationen von basischen und/oder sauren Kationen im Sickerwasser. Dieses gilt insbesondere für Standorte, die in der Vergangenheit hohen Schwefeldepositionen ausgesetzt waren. Auf entsprechenden Standorten werden nach wie vor standortsangepasste Bodenschutzkalkungen erforderlich sein, um das Nährstoffangebot und die Filterfunktion der Waldböden langfristig zu erhalten und zu stabilisieren.

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. (1994): Nutrient and Acid-Base Budget of Central European Forest Ecosystems. In: Godbold, D. u. Hüttermann, A.: Effects of Acid Rain on Forest Processes. Wiley-Liss. New York. S. 1-50.