Atmosphärische Stoffeinträge bis 2025

Birte Scheler
https://doi.org/10.5281/zenodo.22894775

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 größere Mengen an Schadstoffen und (Fein-)Stäuben aus der Luft (Immissionsschutzfunktion). Der atmosphärische Stoffeintrag ist deshalb in Wäldern höher als bei allen anderen Landnutzungsformen. Die teilweise extrem hohen Säure- und Stickstoffeinträge der Vergangenheit haben das chemische Bodenmilieu durch Versauerung und Eutrophierung negativ verändert. Durch effektive Maßnahmen zur Luftreinhaltung sind die Stoffeinträge zwar deutlich zurückgegangen, die Folgen der ehemals hohen bis sehr hohen Stoffeinträge stellen für das Ökosystem Wald jedoch nach wie vor eine ernstzunehmende Belastung dar. 1968 wurde im Solling mit der systematischen Erfassung der Stoffeinträge in je einen Buchen- und Fichtenbestand begonnen. Ab den frühen 1980er Jahren wurde in Niedersachsen sukzessive ein Messnetz zur Quantifizierung der Schwefel-, Stickstoff- und Säureeinträge aufgebaut. Dieses ermöglichte und ermöglicht die Untersuchung der Folgen und Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme, die mit erhöhten Stoffeinträgen verbunden sein können. Aktuell werden in Niedersachsen im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings die Stoffeinträge in drei Buchenaltbestände, je einen Kiefern-, Fichten- und sehr lichten Eichenaltbestand sowie einen ca. 25-jährigen Fichtenjungbestand (Solling) aus Naturverjüngung erfasst. Drei langjährig untersuchte Fichtenbestände im Harz sind nach Borkenkäferbefall abgestorben und die Flächen geräumt worden. Hier wird aktuell nur der Stoffeintrag im Freiland gemessen.

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 1994) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdepositionsraten 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 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

Das Kalenderjahr 2025 war nach den niederschlagsreichen Jahren 2023 und 2024 wieder ein niederschlagsarmes Jahr. Im Vergleich zum 10-jährigen Mittel der Jahre 2015–2024 wurden auf allen Flächen deutlich geringere Mengen registriert. Die Höhe des Freilandniederschlags betrug zwischen 507 mm (Lüss, Ostheide) und 918 mm (Lange Bramke Harz). Sie lag zwischen102 mm (Göttinger Wald) und 256 mm (Lange Bramke, Harz) unter dem Mittel der Jahre 2015–2024.
Der Bestandesniederschlag betrug zwischen 355 mm (Lüss, Buche) und 716 mm (Solling, Fichte). Im Vergleich zum Mit-



Foto: M. Spielmann

Level II-Fläche Ehrhorn

tel des Zeitraums 2015–2024 standen den Wäldern zwischen 106 mm (Göttinger Wald, Buche) und 266 mm (Lüss, Buche) weniger Bestandesniederschlag zur Verfügung.
Relativ gesehen fiel im Freiland zwischen 61 % (Lüss) und 88 % (Göttinger Wald) und im Bestand zwischen 57 % (Lüss, Buche) und 85 % (Solling, Fichte) des 10-jährigen Niederschlagsmittels (2015–2024). Die Höhe der Kronentraufe im Fichtenjungbestand (Solling) war 55 mm geringer, die Interzeption 6 % höher als im Altbestand auf der gleichen Fläche.

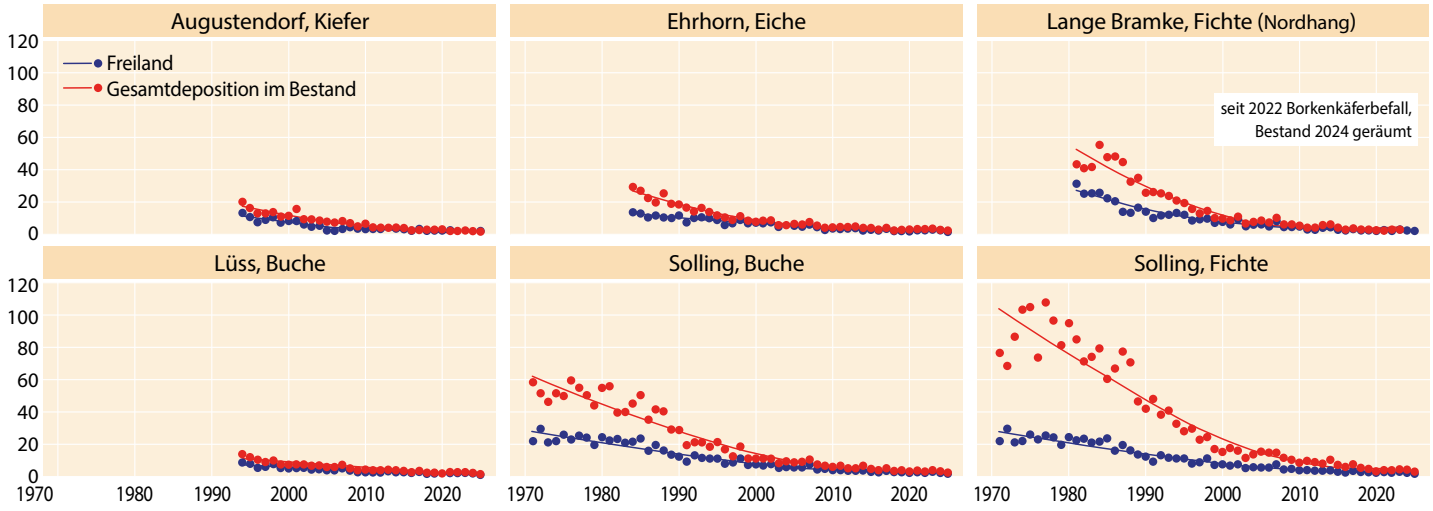
Schwefeleintrag

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 drastisch zurückgegangen. Der signifikante Rückgang der Schwefeleinträge setzte sich auf den Flächen Augustendorf (Kiefer), Göttinger Wald (Buche, Freiland), Lange Bramke (Freiland) und Solling (Fichte, Buche)) in den letzten 10 Jahren fort. Auf allen anderen Flächen verharren die Schwefeleinträge auf dem erreichten sehr niedrigen Niveau. 2025 betrug der Sulfatschwefeleintrag je Hektar im Freiland zwischen 1,2 kg (Lüss) und 2,0 kg (Augustendorf) sowie im Bestand zwischen 1,5 kg (Lüss, Buche) und 3,2 kg (Solling, Fichte). Im Fichtenjungbestand (Solling) betrug er hingegen nur 1,9 kg je Hektar, das entspricht knapp zwei Drittel des Eintrags des Altbestands.

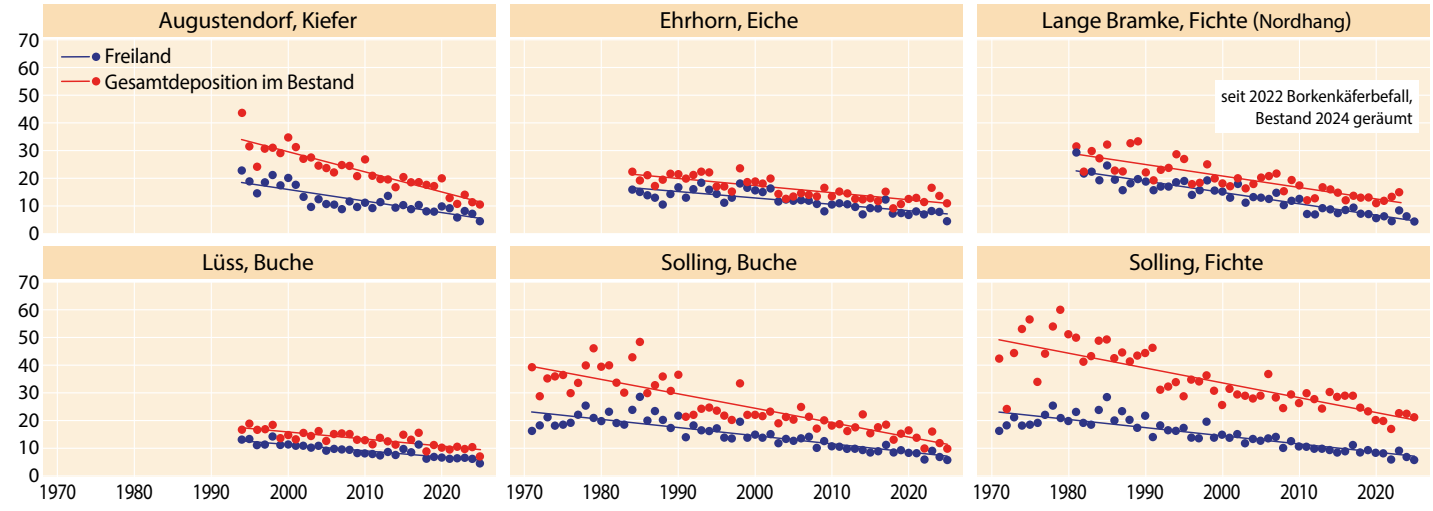
Stickstoffeintrag

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 (2016–2025) 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 (SO_4-S) auf ausgewählten Monitoringflächen in kg je Hektar und Jahr



Stickstoffeintrag (NH_4-N + NO_3-N) auf ausgewählten Monitoringflächen in kg je Hektar und Jahr



durchgezogene Linie: signifikante Abnahme

baumartenübergreifend auf allen Monitoringstandorten signifikant abgenommen. Diese Entwicklung ist dem deutlichen Rückgang der NO_X-Emissionen durch Nachbehandlung von Abgasen (Katalysatoren im Verkehrsbereich, Rauchgasentstickung mit $DeNO_X$-Anlagen bei Großfeuerungen) zu verdanken. In dem für alle Flächen gemeinsamen 32-jährigen Zeitraum (1994–2025) betrug der mittlere, jährliche Rückgang je Hektar zwischen 0,11 kg (Ehrhorn, Eiche) und 0,21 kg (Solling, Fichte). In den vergangenen zehn Jahren (2016–2025) war er auf den untersuchten Flächen mit Ausnahme der Bestandesflächen im Solling (Buche und Fichte) weiterhin deutlich rückläufig. 2025 betrug er je Hektar im Freiland zwischen 1,4 kg (Augustendorf) und 2,6 kg (Solling) und unter Buche (Gesamtdeposition) zwischen 2,7 kg (Lüss) und 4,5 kg (Solling). Unter Kiefer (Augustendorf) belief sich die Gesamtdeposition von Nitratstickstoff pro Hektar auf 4,1 kg, unter Fichte (Solling) auf 9,6 kg. Im Fichtenjungbestand (Solling) betrug der Nitratstickstoffeintrag mit 4,4 kg je Hektar nur 46 % des Eintrags des Fichtenaltbestands.

Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf den niedersächsischen Intensiv-Monitoringflächen ebenfalls signifikant abgenommen, eine Folge der Reduzierung der Ammoniakemission in der Landwirtschaft durch die Umsetzung von Maßnahmen wie bspw. der emissionsarmen Lagerung und Ausbringung von Düngern, der Reinigung der Stallabluft oder einer optimierten Fütterung. Der mittlere, jährliche Rückgang je Hektar lag im Zeitraum 1994–2025 zwischen 0,12 kg (Ehrhorn, Eiche und Lüss, Buche) und 0,53 kg (Augustendorf, Kiefer). Betrachtet man die letzten 10 Jahre 2016–2025, wurde eine weitere deutliche Abnahme für die Bestandesflächen Augustendorf (Kiefer), Göttinger Wald (Buche), Lüss (Buche) und Solling (Fichte) beobachtet. 2025 lag der Ammoniumstickstoffeintrag im Freiland je Hektar zwischen 2,3 kg (Göttinger Wald, Lange Bramke) und 3,1 kg (Solling) sowie unter Buche zwischen 3,9 kg (Göttinger Wald) und 5,4 kg (Solling). Unter Kiefer (Augustendorf) betrug er pro Hektar 6,4 kg und unter Fichte (Solling) 11,6 kg. Im Fichtenjungbestand (Solling) betrug der Ammoniumstickstoffeintrag mit 5,3 kg weniger als 50 % des Eintrags des Fichtenaltbestands.



Foto: B. Scheler

Streusammler aud der Level II-Fläche Ehrhorn



Foto: B. Scheler

Niederschlagssammler auf der Level II-Fläche Ehrhorn

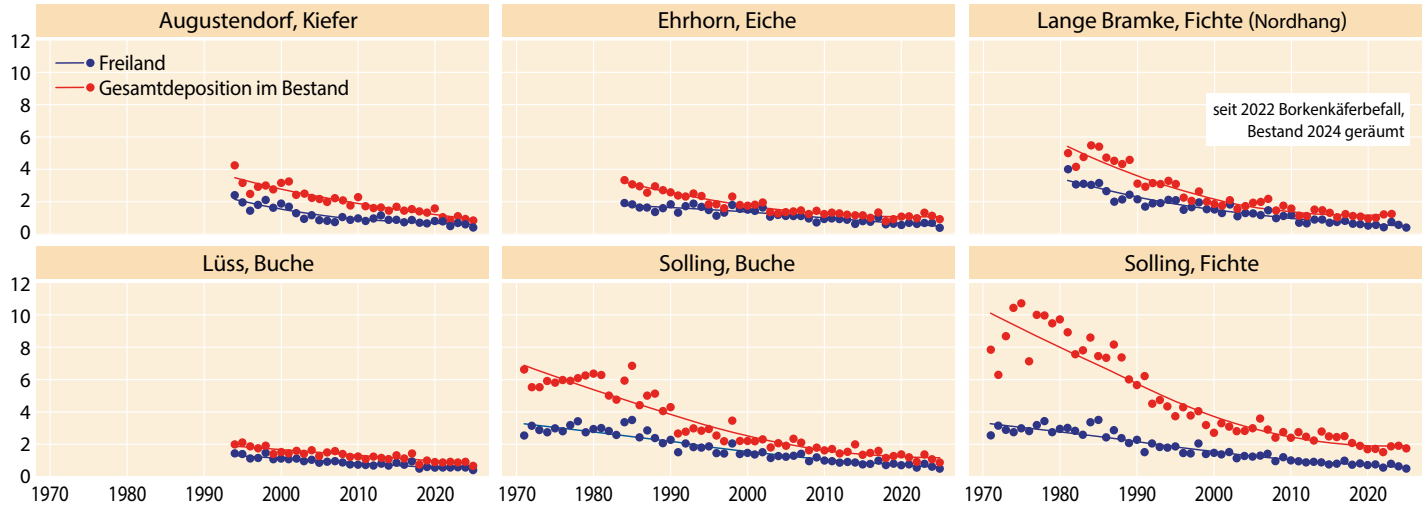
Durch die Umsetzung verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffemissionen haben die anorganischen Stickstoffeinträge seit Untersuchungsbeginn deutlich abgenommen. Die mittleren jährlichen Abnahmen von Nitrat- bzw. Ammoniumstickstoff in Höhe von 0,1 kg bis 0,5 kg je Hektar seit 1994 erscheinen auf den ersten Blick gering. Vergleicht man jedoch die mittleren anorganischen Stickstoffeinträge der Perioden 1994–1998 und 2021–2025, sanken die Einträge um bis zu 64 %.

Der anthropogen bedingte atmosphärische anorganische Stickstoffeintrag betrug im Mittel der letzten fünf Jahre (2021–2025) je Hektar und Jahr unter Buche zwischen 9,3 kg (Lüss) und 12,4 kg (Solling), unter Fichte (Solling) 20,7 kg und unter Kiefer (Augustendorf) 11,9 kg.

Er sollte jedoch in einer Größenordnung liegen, die durch die internen Regulationsmechanismen der Ökosysteme (Pflanzenaufnahme und Speicherung) kompensiert werden kann. Bei einer langfristigen Überschreitung der Belastungsgrenzen können nach dem bisherigen Kenntnisstand schädigende Effekt nicht ausgeschlossen werden.

Negative Auswirkungen von jahrzehntelang zu hohen Stick-

Gesamtsäureeintrag auf ausgewählten Monitoringflächen in $kmol_c$ je Hektar und Jahr



durchgezogene Linie: signifikante Abnahme

stoffeinträgen können gegenwärtig im Harz beobachtet 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 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 Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002).

2025 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland zwischen 0,4 $kmol_c$ (alle Flächen außer Solling) und 0,5 $kmol_c$ (Solling), unter Buche zwischen 0,7 $kmol_c$ (Lüss, Göttinger Wald) und 0,9 $kmol_c$ (Solling), 0,8 $kmol_c$ unter Kiefer (Augustendorf) sowie 1,7 $kmol_c$ unter Fichte (Solling). Im Fichtenjungbestand im Solling belief sich der Gesamtsäureeintrag auf 0,8 $kmol_c$, nur knapp 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 Gesamtsäureeintrag ab, erhält man den ökosystemar bedeutsamen Netto-Gesamtsäureeintrag (Gauger et al. 2002).

Auf den niedersächsischen Flächen des Intensiven Monitorings wurden im Mittel der Jahre 2021–2025 zwischen 14 % (Augustendorf, Kiefer) und 31 % (Lüss, Buche) der Gesamtsäureeinträge durch nicht seesalzbürtige eingetragene Basen abgepuffert.

Obwohl die Gesamtsäureeinträge deutlich zurückgegangen sind (vgl. Abb. oben) zeigen viele Standorte immer noch eine sehr geringe Basensättigung und 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. und Hüttermann A.: Effects of Acid Rain on Forest Processes. Wiley-Liss. New York. S. 1-50.