

Stoffeinträge

Birte Scheler

<https://doi.org/10.5281/zenodo.10083023>

Mit dem Niederschlag gelangen Nähr- und Schadstoffe in gelöster Form in den Wald. Zusätzlich werden diese Stoffe in gas- und partikelförmiger Form eingetragen. Dieser atmosphärische Stoffeintrag stellt für das Ökosystem Wald jedoch 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. Aktuell wird in Niedersachsen im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings der Stoffeintrag in jeweils einem Eichen- und Kiefernbestand, drei Buchen- sowie drei (ehemals vier) Fichtenbeständen erfasst. Im Herbst 2021 wurde die Fichtenfläche Lange Bramke Kamm nach Borkenkäferbefall komplett geräumt. Der Befall breitete sich 2022 auf den Flächen Lange Bramke Nordhang und Südhang weiter aus. Auf der Fläche Nordhang starben einzelne Bäume im unmittelbaren Umfeld des Depositionsmessfelds ab bzw. wurden gefällt, was sich auf die Höhe der Kronentraufe und des Stoffeintrags im Jahr 2022 ausgewirkt hat.

Jeder Bestandesmessfläche (Kronentraufe) ist eine Freifläche (Freilandniederschlag) zugeordnet. In Buchenbeständen wird zur Erfassung des Bestandesniederschlags neben der Kronentraufe auch der bei dieser Baumart quantitative bedeutsame Stammablauf gemessen. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdepositionsraten berechnet.

Die Höhe der Stoffeinträge wird maßgeblich durch verschiedene Faktoren wie Niederschlagsmenge, -intensität und -verteilung, Windgeschwindigkeit, Baumart, Bestandeshöhe, Kronenschluss und -rauigkeit 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 ganzjährigen und im Vergleich mit Kiefern dichteren Benadelung stärker durch Stoffeinträge belastet als Buchen-, Eichen- und Kiefernbestände. Dieser Baumarteneffekt zeigt sich sehr gut im Solling, wo eine Fichten- und eine Buchenfläche in unmittelbarer Nachbarschaft und somit unter gleichen klimatischen und luftchemischen Verhältnissen beobachtet werden.

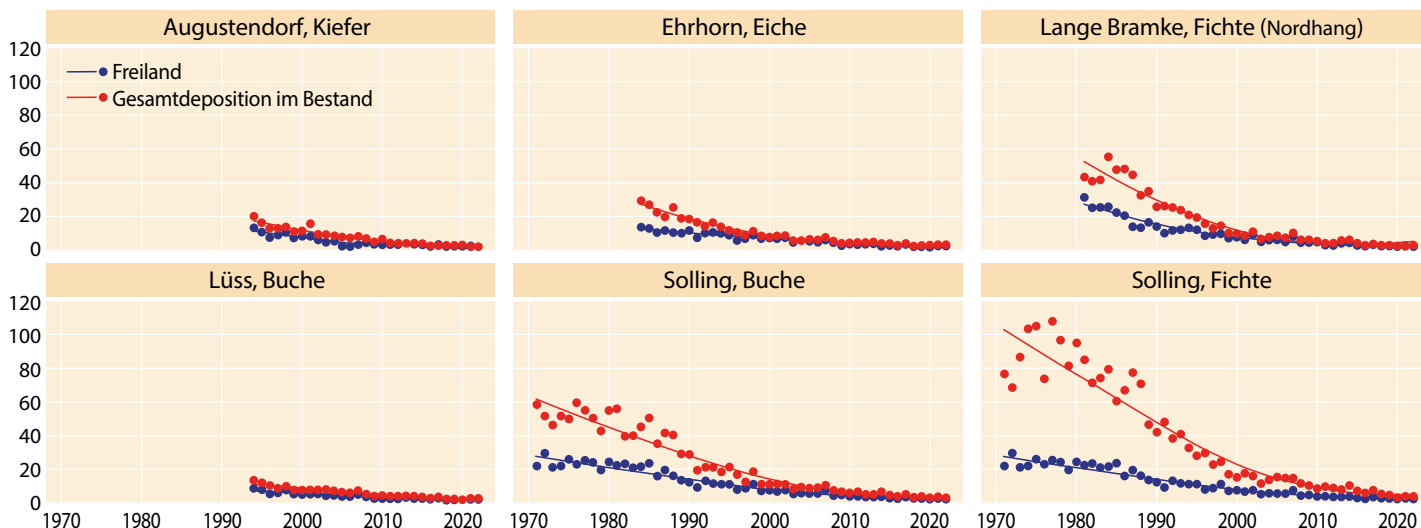
Niederschlag

2022 fiel auf allen niedersächsischen Flächen des Intensiven Monitorings weniger Niederschlag als im 10-jährigen Mittel der Jahre 2012–2021. Besonders groß war das Niederschlagsdefizit im Harz (Freiland -279 mm bzw. -24 %, Lange Bramke Fichte Nordhang -235 mm bzw. -24 %), gefolgt von Augustendorf im Mittelwestdeutsche Tiefland (Freiland -142 mm bzw. -18 %, Kiefer: -80 mm bzw. -15 %), Solling (Freiland -130 mm bzw. -13 %, Fichte -111 mm bzw. -15 %, Buche -90 mm bzw. -10 %) und Göttinger Wald (Freiland -118 mm bzw. -17 %, Buche -84 mm bzw. -15 %). Sehr geringe Abweichungen wurden für das Ostniedersächsische Tiefland mit -11 mm (-1 %) in Lüss und -12 mm (-5 %) in Ehrhorn registriert.

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 2013–2022 weiter deutlich abgenommen.

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



durchgezogene Linie: signifikante Abnahme

2022 betrug er mit der Gesamtdeposition unter Buche je Hektar zwischen 2,2 kg (Göttinger Wald) und 3,2 kg (Solling), unter Fichte zwischen 2,8 kg (Lange Bramke Südhang) und 3,8 kg (Solling), unter Kiefer (Augustendorf) 2,2 kg und unter Eiche 3,1 kg je Hektar. Im Freiland lag der Sulfatschwefeleintrag zwischen 1,4 kg je Hektar (Göttinger Wald) und 2,4 kg je Hektar (Ehrhorn).

Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form) und als Ammonium (reduzierte Form) in das Ökosystem eingetragen. Die größten Emittenten für Stickoxide (NOx) waren 2021 die Bereiche „Verkehr“ (37 %), „Energiewirtschaft“ (24 %) sowie „private Haushalte und Kleingewerbe“ (12 %). Die Ammoniakemissionen stammen zu ca. 95 % aus der Landwirtschaft (UBA, 2023).

Aufgrund der von 1990 bis 2021 erfolgten Reduktion der Emissionen (NOx -66 %, Ammoniak -29 %), sind die Stickstoffeinträge im Freiland und mit der Gesamtdeposition im Beobachtungszeitraum deutlich zurückgegangen.

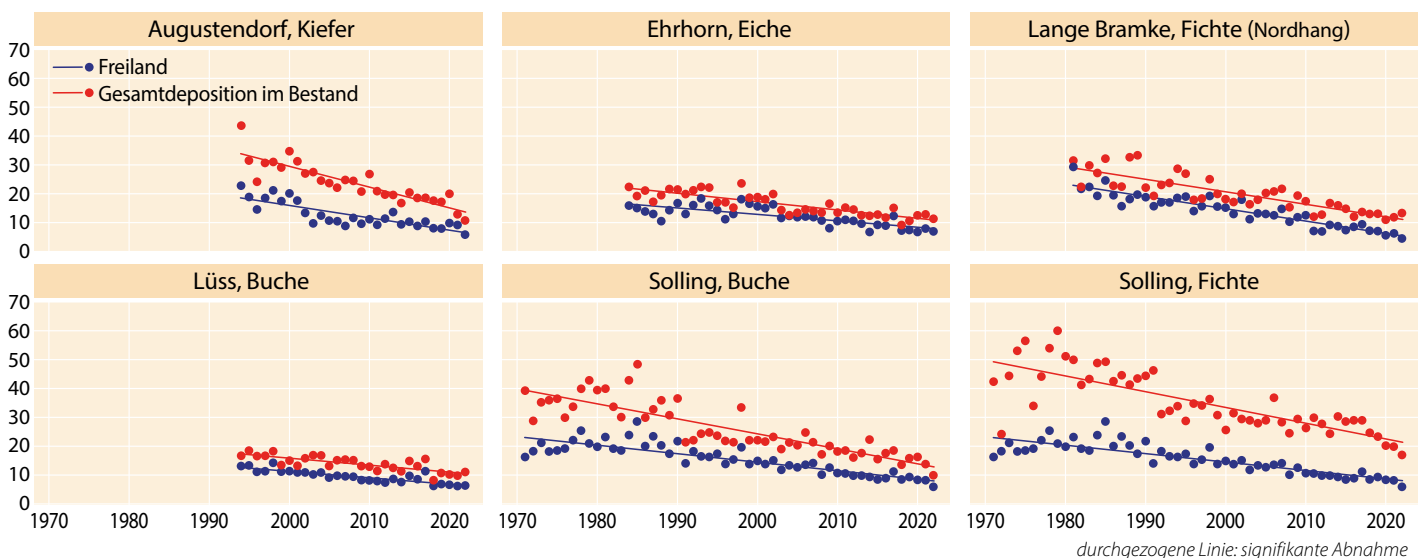
Bezogen auf das Mittel der Jahre 1989–1991 betrug die Reduktion der Nitratreinträge (Mittel 2020–2022) im Freiland zwischen 50 % (Ehrhorn) und 75 % (Göttinger Wald). Die Reduktion mit der Gesamtdeposition betrug unter Buche zwischen 52 % (Solling) und 56 % (Göttinger Wald), unter Fichte zwischen 54 % (Solling) und 59 % (Lange Bramke Südhang) sowie 45 % unter Eiche (Ehrhorn). In den letzten zehn Jahren (2013–2022) hat der Nitratreintrag mit Ausnahme der Freiflächen im Solling und in Ehrhorn sowie der Eichenfläche in Ehrhorn weiter deutlich abgenommen. Er betrug 2022 je Hektar unter Buche zwischen 3,8 kg (Lüss) und 4,3 kg (Solling), unter Fichte zwischen 4,4 kg (Lange Bramke Südhang) und 7,2 kg (Solling), 3,3 kg unter Eiche (Ehrhorn) und 3,2 kg unter Kiefer (Augustendorf). Die Reduktion der Ammonium-einträge bezogen auf das Mittel der Jahre 1989–1991 lag im Freiland zwischen 53 % (Ehrhorn) und 71 % (Lange Bramke)

und fiel damit deutlich höher aus als aufgrund der Reduktion der bundesweiten Ammoniakemissionen zu erwarten wäre. Bei der Gesamtdeposition betrug die Reduktion unter Buche rund 55 % (Solling, Göttinger Wald), unter Fichte zwischen 43 % (Lange Bramke Südhang) und 60 % (Solling) und 40 % unter Eiche. Im Zeitraum 2013–2022 hat der Ammoniumeintrag mit der Gesamtdeposition im Gegensatz zum Nitratstickstoffeintrag nur auf drei der acht Intensivmessflächen (Solling Fichte und Buche, Göttinger Wald Buche) weiter deutlich abgenommen.

2022 lag der Ammoniumstickstoffeintrag je Hektar unter Buche zwischen 4,9 kg (Göttinger Wald) und 7,2 kg (Lüss), unter Fichte zwischen 8,3 kg (Lange Bramke Nordhang) und 9,9 kg (Solling), unter Kiefer bei 7,5 kg (Augustendorf) und unter Eiche bei 8,2 kg. Im Freiland lag er zwischen 2,1 kg (Lange Bramke) und 4,4 kg (Ehrhorn) je Hektar. Aktuell beträgt der Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag im Freiland zwischen 47 % und 66 %, unter Buche zwischen 54 % und 65 %, unter Fichte zwischen 58 % und 68 %, unter Eiche 71 % und 70 % unter Kiefer in Augustendorf, einem Gebiet mit intensiver Tierhaltung.

Der anthropogen bedingte anorganische Stickstoffeintrag hat seit Beginn der Untersuchungen deutlich abgenommen, in Augustendorf (Kiefer, Freiland), Göttinger Wald (Buche, Freiland), Solling (Buche, Fichte, Freiland) und Lange Bramke (Freiland) wurden 2022 die niedrigsten Einträge von anorganischem Stickstoff seit Beginn der Untersuchungen registriert. Dennoch überschreitet der Stickstoffeintrag im Mittel der letzten 5 Jahre (2018–2022) mit Werten bis zu 13,9 kg je Hektar und Jahr unter Buche (Solling), bis zu 21 kg je Hektar und Jahr unter Fichte (Solling), 11,3 kg je Hektar und Jahr unter Eiche (Ehrhorn) und 15,7 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

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



Borkenkäferbefall, die aktuell auf den Fichtenflächen Lange Bramke zu beobachten sind, wird der Stickstoff rasch mineralisiert und es kommt zu erhöhten Nitratausträgen. Nitrat wird im Bodenwasser von Nährstoffkationen wie Calcium, Magnesium oder Kalium sowie sauren Kationen wie Aluminium begleitet. Dadurch verlieren die Ökosysteme einerseits wichtige Nährstoffe aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden, andererseits 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 gefährdet. Eine weitere Reduktion der Stickstoffemissionen ist zum Schutz der Ökosysteme wichtig.

eine größere Rolle. Die nährstoffreiche Säurepufferkapazität aus Verwitterung reicht auf den oft nährstoffarmen Waldstandorten jedoch auch unter Berücksichtigung der Baseneinträge nicht aus, um die Säureinträge vollständig zu kompensieren. Eine standortangepasste Kalkung zum Schutz der Waldböden und der Erhaltung ihrer Filterfunktion für das Grundwasser kann empfohlen werden.



Foto: J. Evers

Level II-Fichtenfläche Solling

Gesamtsäureeintrag

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002). 2022 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland zwischen 0,4 kmol_c (Göttinger Wald, Lange Bramke) und 0,6 kmol_c, (Ehrhorn), unter Buche zwischen 0,8 (Göttinger Wald) und 1,0 kmol_c je Hektar (Lüss) sowie unter Fichte zwischen 1,2 (Lange Bramke Nordhang) und 1,5 kmol_c je Hektar (Solling). Der Gesamtsäureeintrag je Hektar unter Eiche (Ehrhorn) betrug 1,0 kmol_c und unter Kiefer (Augustendorf) 0,9 kmol_c je Hektar. Ein Teil des Säureeintrags wird durch ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragene Basen neutralisiert. Diese Säureneutralisationskapazität durch Baseneintrag lag 2022 zwischen 0,1 kmol_c je Hektar (Augustendorf, Kiefer) und 0,4 kmol_c je Hektar (Solling Fichte) bzw. zwischen 14 % (Augustendorf, Kiefer) und 36 % (Göttinger Wald, 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

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.

UBA (2023): <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

