

Stoffeinträge

Birte Scheler

<https://doi.org/10.5281/zenodo.5636068>

Mit dem Niederschlag gelangen verschiedene Nähr- und Schadstoffe in gelöster Form in den Wald. Zusätzlich werden diese Stoffe als trockene Deposition (gas- und partikelförmig) 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 so genannte 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.

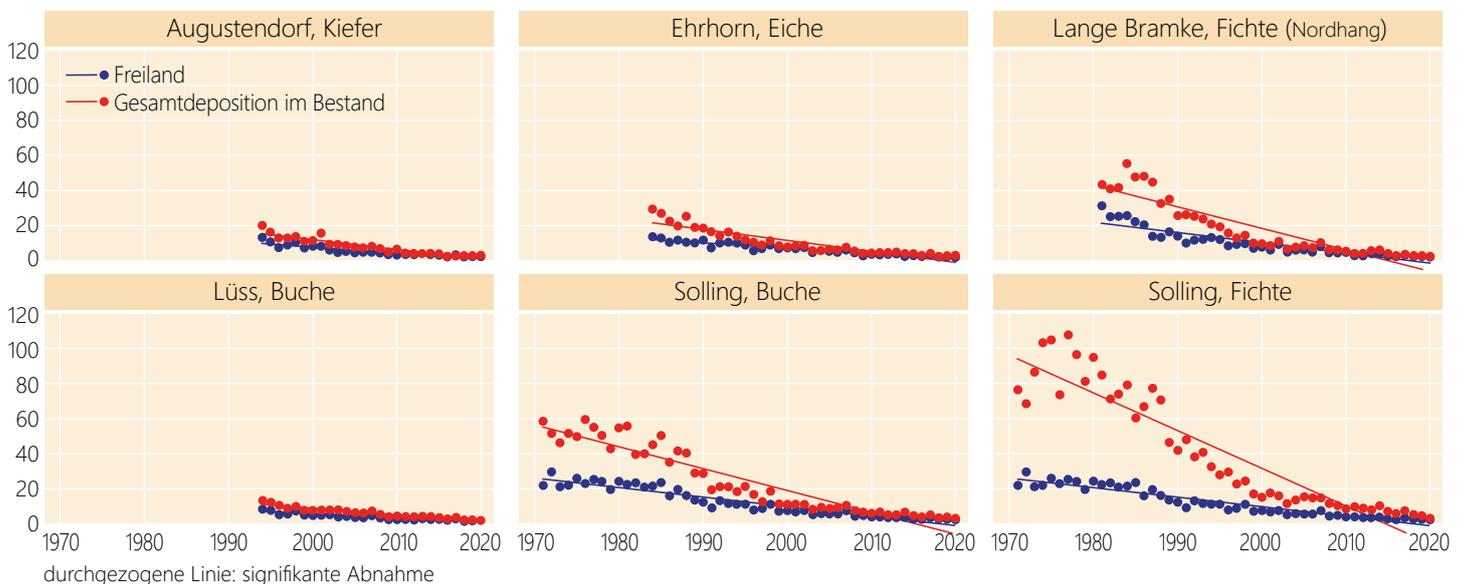
Um die Wirkungen erhöhter Stoffeinträge und damit verbundener Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme wie beispielsweise das Grundwasser zu untersuchen, wurde bereits 1968 mit der systematischen Erfassung der Stoffeinträge auf je einer Buchen- und Fichtenfläche im Solling begonnen. Aktuell wird in Niedersachsen im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings der Stoffeintrag in vier Fichten- und 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 Kronentraufe auch der bei dieser Baumart quantitative bedeutsame Stammablauf gemessen. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdpositionsraten berechnet.



Intensiv-Monitoringfläche Augustendorf: Streufall- und Depositionssammler
Foto: J. Weymar

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



Im März 2020 wurden auf der Eichenfläche in Ehrhorn aus Gründen der Verkehrssicherheit zahlreiche bestandesbildende Eichen und zur Förderung der Eichennaturverjüngung der gesamte, qualitativ schlechte Buchenunterstand entfernt. Durch diese Maßnahmen wurde die Bestandesstruktur wesentlich verändert, was sich auf die Höhe der Kronentraufe und Stoffeinträge auswirkt.

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 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

Im Vergleich mit dem 10-jährigen Mittel der Jahre 2010-2019 fielen die Niederschläge 2020 in weiten Teilen Niedersachsens geringer aus, in Augustendorf (nordwestdeutsches Tiefland) fiel hingegen im Freiland 119 mm bzw. 15 % mehr Niederschlag. Die Kronentraufe unter Kiefer war hier mit +78 mm ebenfalls 15 % höher als im Mittel der vorangegangenen 10 Jahre. Das absolute Niederschlagsdefizit im Freiland war in Ehrhorn (-105 mm, Hohe Heide) am höchsten. In der Kronentraufe wurden die größten Defizite in den Fichtenbeständen im Harz (-74 bis -113 mm) und im Solling (-106 mm) 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 bereits auf einem

Stoffeinträge

relativ geringen Niveau lag, hat er 2020 im Vergleich zum Mittel der Jahre 2010-2019 mit Ausnahme der Kronentraufe in Augustendorf (Kiefer) nochmals deutlich abgenommen. Er betrug mit dem Bestandesniederschlag unter Buche je Hektar zwischen 1,9 kg (Göttinger Wald) und 3,2 kg (Solling), unter Fichte zwischen 2,4 kg (Lange Bramke, Nordhang und Südhang) und 3,2 kg (Solling), unter Kiefer (Augustendorf) 3 kg und unter Eiche 3,1 kg. Der absolute Rückgang im Vergleich zum Mittel 2010-2019 lag zwischen 0,8 kg (Ehrhorn, Eiche) und 4,5 kg je Hektar (Solling, Fichte), die relative Abnahme betrug zwischen 21 % (Ehrhorn, Eiche) und 53 % (Lange Bramke, Kamm).

Im Freiland lag der Sulfatschwefeleintrag zwischen 1,3 kg (Göttinger Wald) und 2,4 kg je Hektar (Augustendorf), die absolute Abnahme bewegte sich zwischen 0,7 kg (Augustendorf) und 1,1 kg je Hektar (Ehrhorn, Lange Bramke).

Stickstoffeintrag

Stickstoff wird in oxidierter Form als Nitrat (Quellen: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) und in reduzierter Form als Ammonium (landwirtschaftliche Quellen) in das Ökosystem eingetragen. In Augustendorf (Weser-Ems-Region) betrug der Ammoniumanteil im 10-jährigen Mittel (2011-2020) 65 % und in Ehrhorn (Hohe Heide) 62 %. Auf den anderen Flächen des Intensiven Monitorings lag er zwischen 48 % (Göttinger Wald,

Buche) und 59 % (Lüss, Buche). In dem hohen Ammonium-eintrag in Augustendorf spiegelt sich die intensive Landwirtschaft einschließlich Intensivtierhaltung dieser Region wider. Der Nitratstickstoffeintrag hat im Freiland und der Gesamtdosition aller vier Baumarten auf allen untersuchten Flächen bei der Betrachtung des Zeitraums seit Untersuchungsbeginn bzw. seit 1994 signifikant abgenommen. Im Gegensatz zum Schwefeleintrag war er im Zeitraum 2011-2020 jedoch nur noch auf den Flächen Augustendorf (Kiefer) und Lange Bramke (Südhang) weiter deutlich rückläufig. Auf allen anderen Flächen zeigt sich eine tendenzielle Abnahme mit jährlichen Schwankungen auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. 2020 betrug der Nitratstickstoffeintrag im Freiland zwischen 2,3 (Göttinger Wald) und 3,5 kg je Hektar (Solling) und unter Buche (Gesamtdosition) zwischen 4,0 (Lüss) und 6,8 kg je Hektar (Solling). Unter Fichte betrug die Gesamtdosition von Nitratstickstoff im Solling 8,5 kg je Hektar und zwischen 4,9 und 7,2 kg je Hektar im Harz.

Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf den niedersächsischen Flächen des Intensiven Monitorings seit Untersuchungsbeginn ebenfalls signifikant abgenommen. Im Zeitraum 2010-2020 wurde eine weitere deutliche Abnahme jedoch nur auf einer der neun Bestandesflächen (Lange Bramke Kamm, Fichte) und auf keiner Freifläche beobachtet. Im Freiland lag der Ammoniumstickstoffeintrag 2020 zwischen 2,8 (Göttinger Wald) und 6,8 kg je Hektar (Augustendorf) und unter Buche zwischen 5,2 (Göttinger Wald) und 9,5 kg je Hektar (Solling). Unter Fichte betrug er je Hektar 11,9 kg im Solling und zwischen 6,1 und 7,9 kg im Harz. Auffallend hoch waren nach wie vor die Ammoniumstickstoffeinträge in Augustendorf unter Kiefer mit 13,4 kg je Hektar.

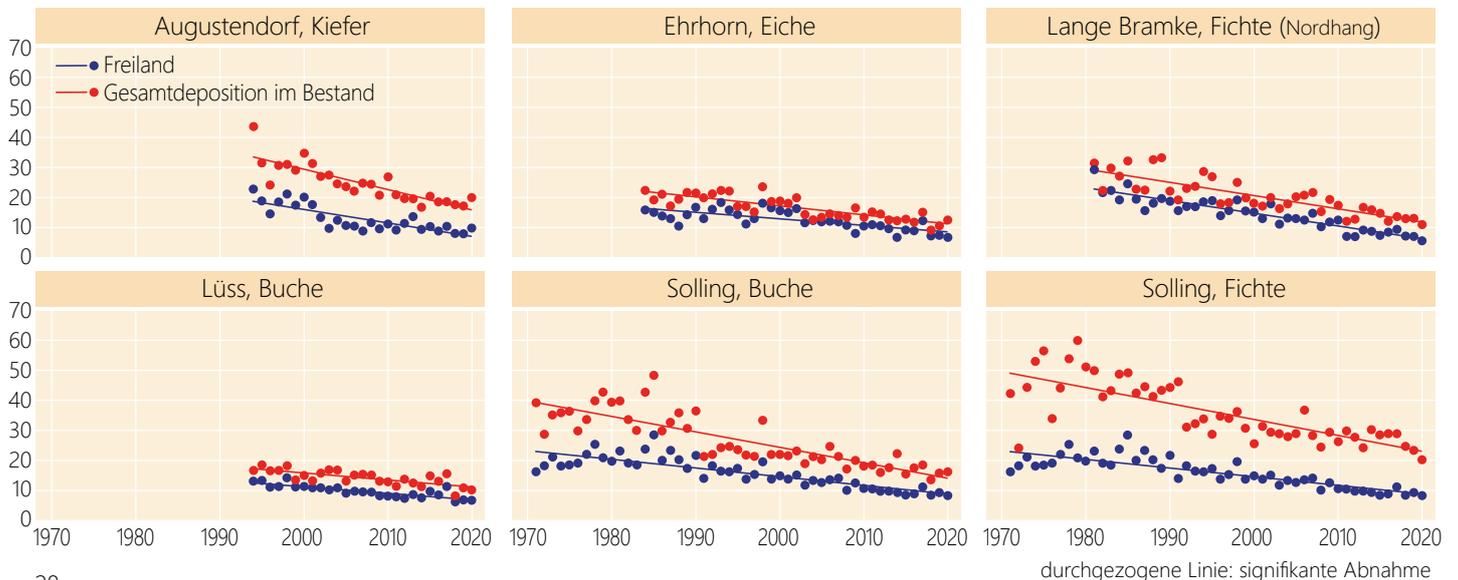
Verschiedene Bemühungen haben in der Vergangenheit zu einer Reduktion der Stickstoffemissionen und hieraus resultierenden rückläufigen Einträgen geführt. Da sich diese Entwicklung in den vergangenen Jahren jedoch nicht im gleichen Maße fortgesetzt hat, überschreitet der anthropogen bedingte atmosphärische Stickstoffeintrag im Mittel der letzten 5 Jahre (2016-2020) mit Werten bis zu 16,3 kg je Hektar unter Buche (Solling), 25,2 kg je Hektar unter Fichte (Solling), 18,4 kg je Hektar unter Kiefer (Augustendorf) und 11,8 kg je Hektar unter Eiche (Ehrhorn) nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Dieser überschüssige Stickstoff reichert sich



Intensiv-Monitoringfläche Solling (Fichte)

Foto: J. Evers

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



Stoffeinträge

zunächst im Ökosystem an. Wird die Speicherkapazität überschritten oder kommt es zu abrupten Störungen im Ökosystem durch Kalamitäten wie Windwurf oder Schädlingsbefall, wird der Stickstoff rasch mineralisiert. Da Nitrat den Austrag basischer Nährstoffkationen befördert, kommt es zu erhöhten Nährstoffverlusten mit dem Sickerwasser aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden. Zusätzlich werden angrenzende Ökosysteme wie Oberflächengewässer oder das Grundwasser ggf. durch hohe Nitratausträge gefährdet.

Gesamtsäure

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdosition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002). 2020 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland zwischen 0,4 kmol_c (Göttinger Wald) und 0,8 kmol_c, (Augustendorf), unter Buche zwischen 0,8 (Göttinger Wald) und 1,4 kmol_c je Hektar (Solling) sowie unter Fichte zwischen 1,0 (Lange Bramke Nordhang) und 1,7 kmol_c je Hektar (Solling). Der Gesamtsäureeintrag je Hektar unter Eiche (Ehrhorn) betrug 1,1 kmol_c. Auffallend hoch waren die Gesamtsäure-

einträge mit 1,6 kmol_c je Hektar auch auf der Kiefernfläche in Augustendorf, eine Folge der besonders hohen Ammoniumbelastung in dieser Region.

Ein Teil des Säureeintrags wird durch ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragene Basen neutralisiert. Diese Säureneutralisationskapazität durch Baseneintrag lag 2020 zwischen gut 0,1 kmol_c (Augustendorf, Kiefer) und 0,3 kmol_c je Hektar (Solling, Fichte; Lange Bramke Kamm, Fichte) bzw. zwischen 8 % (Augustendorf, Kiefer) und 26 % (Göttinger Wald, Buche; Lange Bramke Kamm, Fichte) 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 z. B. 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 standortsangepasste Kalkung zum Schutz der Waldböden und der Erhaltung ihrer Filterfunktion für das Grundwasser kann empfohlen werden.



Intensiv-Monitoringfläche Lüss

Foto: J. Spielmann

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, Erismann JW, Vermeulen AT, Nagel HD (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, Band 24, 204-210

Gesamtsäureeintrag auf ausgewählten Monitoringflächen in kmol_c je Hektar und Jahr

