

# Stoffeinträge

## Birte Scheler

In Wäldern ist der atmosphärische Stoffeintrag für viele Nähr- und Schadstoffe die Haupteintragsquelle. Luftverunreinigungen gelangen in gelöster Form mit dem Niederschlag und zusätzlich durch den Auskämmeffekt der Baumkronen gas- und partikelförmig in das Ökosystem Wald. Aufgrund dieses Filtereffektes ist der Eintrag anthropogen bedingter Schwefel- und Stickstoffverbindungen (Nitrat und Ammonium) im Wald deutlich höher als bei anderen Landnutzungsformen. Diese so genannte Immissionsschutzfunktion des Waldes stellt jedoch für das Ökosystem Wald selbst eine Belastung dar, da Stoffeinträge das chemische Bodenmilieu durch Versauerung und Eutrophierung verändern. Bereits 1968 wurde im Solling auf je einer Buchen- und Fichtenfläche mit der systematischen Erfassung der Stoffeinträge begonnen, um die Wirkungen erhöhter Stoffeinträge und damit verbundener Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme wie beispielsweise das Grundwasser zu untersuchen. Aktuell wird in Niedersachsen im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings der Stoffeintrag in vier Fichten, drei Buchen-, 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 quantitativ 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 und -verteilung, Windgeschwindigkeit, Baumart, Bestandeshöhe, Kronenrauigkeit oder lokale Emittenten bestimmt. So sind die Stoffeinträge im Bergland (Harz und Solling) aufgrund höherer Niederschlagsmengen höher als im niedersächsischen Tiefland. Beim Vergleich der Baumarten sind Fichten- und Douglasienbestände 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 Verhältnissen beobachtet werden.

## Niederschlag

In Niedersachsen war 2017 eines der niederschlagsreichsten Jahre seit 1969. Im Vergleich zum 10-jährigen Mittel der Jahre 2007-2016 fiel im Freiland zwischen 148 mm (Göttinger Wald) und 268 mm (Solling) mehr Niederschlag, der Bestandesniederschlag war zwischen 23 mm (Lange Bramke Kamm Fichte) und 274 mm (Solling Fichte) höher als im Mittel des genannten Zeitraums.

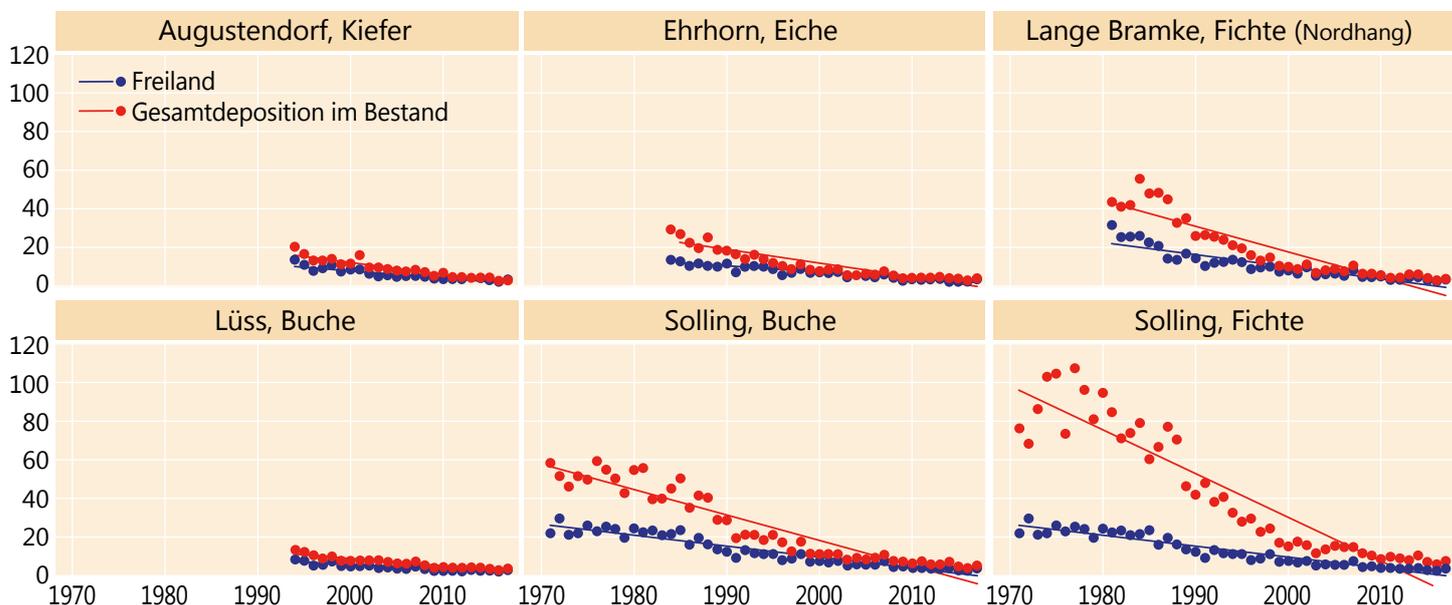
Die größten relativen Abweichungen vom 10-jährigen Mittel gab es in Ehrhorn (+32 % im Freiland, +36 % im Bestand), die geringsten in der Langen Bramke im Harz (+13 % im Freiland, zwischen +3 % und +12 % im Bestandesniederschlag unter Fichte). Aufgrund der deutlich höheren Niederschlagsmenge waren die Stoffeinträge 2017 im Vergleich mit 2016 ebenfalls erhöht.

## Schwefeleintrag

Durch die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung und die Einführung schwefelarmer bzw. schwefelfreier Kraft- und Brennstoffe konnten die Schwefeldioxidemissionen wirksam reduziert werden. In der Folge ging auch der Schwefeleintrag (gemessen als Sulfatschwefel  $SO_4-S$ ) seit Mitte der 1980er Jahre stark zurück. Die stetige Abnahme der Schwefeleinträge setzte sich mit Ausnahme der Fläche Ehrhorn (Eiche und Freiland) auf allen Bestandes- und Freilandmessflächen trotz des bereits zu Beginn der 2000er Jahre erreichten niedrigen Niveaus in den vergangenen 10 Jahren noch weiter fort. Aufgrund der deutlich erhöhten Niederschlagsmengen im Jahr 2017 hat sich der Schwefeleintrag im Vergleich zu 2016 jedoch wieder leicht erhöht.

Er betrug pro Hektar zwischen 3,0 kg (Augustendorf Kiefer) und 7,5 kg (Solling Fichte) mit dem Bestandesniederschlag sowie zwischen 2,0 kg (Göttinger Wald) und 3,6 kg (Solling)

Sulfatschwefel-Eintrag ( $SO_4-S$ ) auf ausgewählten Flächen in kg je Hektar und Jahr



# Stoffeinträge



Intensiv-Monitoringfläche Lüss

Foto: J. Evers

im Freiland. In Augustendorf war der Schwefeleintrag im Kiefernbestand erstmals geringer als der Eintrag im Freiland. Dies erklärt sich dadurch, dass die Sulfatkonzentration im Bestandesniederschlag gegenüber dem Freilandniederschlag zwar geringfügig höher war, aufgrund der deutlich geringeren Niederschlagsmenge unter dem Kronendach die Fracht (Konzentration \* Menge) insgesamt jedoch geringer war.

## Stickstoffeintrag

Stickstoff wird einerseits in oxidierter Form als Nitrat (Quellen: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) andererseits in reduzierter Form als Ammonium (landwirtschaftliche Quellen) in das Ökosystem eingetragen. In Augustendorf (Weser-Ems-Region) betrug der Ammoniumanteil im 10jährigen Mittel (2008-2017) 66 % und in Ehrhorn (Hohe Heide) 64 %. Auf den anderen Flächen des Intensiven Monitorings lag er zwischen 47 und 58 %. In dem hohen Ammoniumeintrag in Augustendorf spiegelt sich die intensive Landwirtschaft einschließlich Intensivtierhaltung dieser Region wider.

Der Nitratstickstoffeintrag hat im Freiland und der Gesamtdeposition aller vier Baumarten auf allen untersuchten Flächen bei der Betrachtung des Zeitraums seit Untersuchungsbeginn bzw. seit 1994 signifikant abgenommen. Im Gegensatz zum Schwefeleintrag ist er in den vergangenen 10 Jahren (2008-2017) nur auf der Fichtenfläche Lange Bramke Kamm rückläufig und verharret auf allen anderen Flächen auf dem Niveau des letzten Jahrzehnts. Er betrug 2017 pro Hektar im Freiland zwischen 3,6 kg (Göttinger Wald) und 5,3 kg (Solling) und unter Buche (Gesamtdeposition) pro Hektar zwischen 6,1 kg (Lüss) und 8,7 kg (Göttinger Wald). Unter Fichte betrug die Gesamtdeposition von Nitratstickstoff pro Hektar 12,8 kg im Solling und zwischen 6,8 und 9,2 kg in Harz.

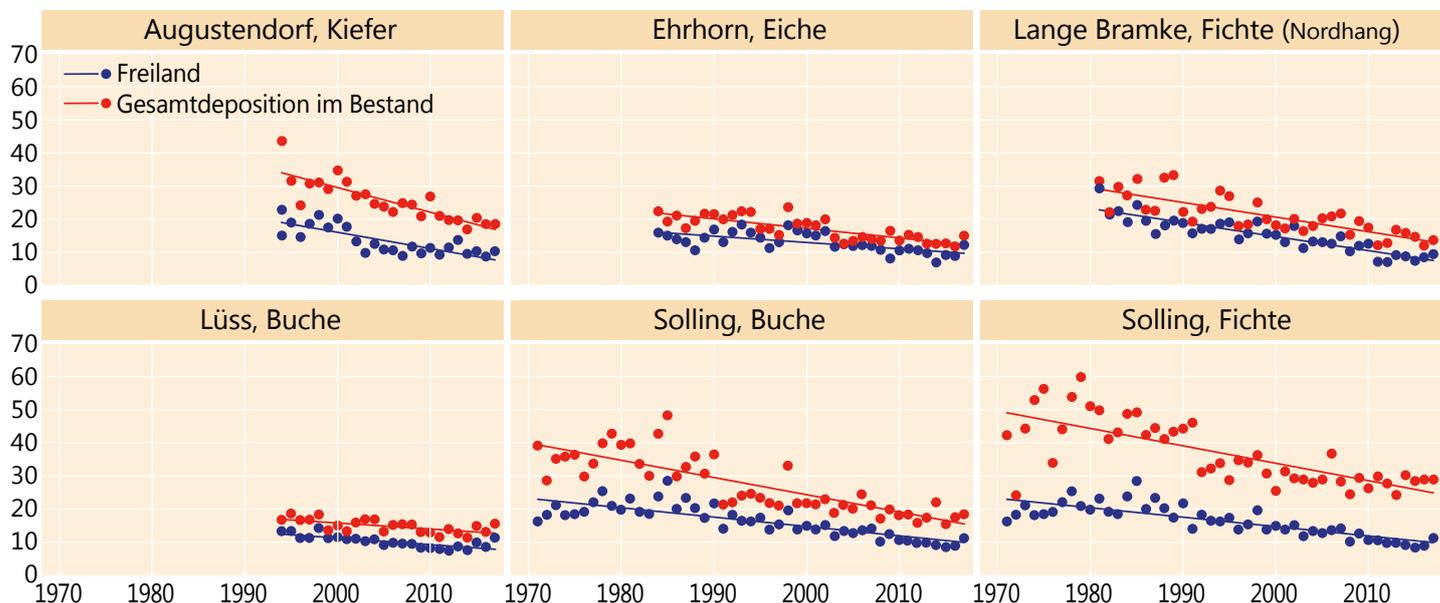
Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf den niedersächsischen Intensiv-Monitoringflächen seit Untersuchungsbeginn ebenfalls signifikant abgenommen. In dem 10-Jahreszeitraum 2008-2017 wurde, ähnlich wie beim Nitratstickstoffeintrag, eine weitere Abnahme jedoch nur auf zwei der neun Bestandesflächen (Lange Bramke Kamm



Intensiv-Monitoringfläche Solling, Buche

Foto: J. Evers

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



# Stoffeinträge

Fichte, Augustendorf Kiefer) beobachtet. Im Freiland lag er 2017 pro Hektar zwischen 3,6 kg (Göttinger Wald) und 7,5 kg (Ehrhorn) und unter Buche zwischen 7,5 kg (Göttinger Wald) und 9,8 kg (Solling). Unter Fichte betrug er pro Hektar 16 kg im Solling und zwischen 6,7 und 9,1 kg in Harz. Auffallend hoch sind die Ammoniumeinträge in Augustendorf unter Kiefer mit 11,7 kg pro Hektar.

Verschiedene Bemühungen haben in der Vergangenheit zu einer Reduktion der Stickstoffemissionen und hieraus resultierende rückläufige Einträge geführt. Diese Entwicklung hat sich in den vergangenen 11 Jahren bedauerlicherweise jedoch nicht im gleichen Maße fortgesetzt. Mit Werten zwischen 12,9 kg (Ehrhorn Eiche) und 28,2 kg pro Hektar (Solling Fichte) im Mittel der Jahre 2013–2017 überschreitet der atmosphärische Eintrag von anorganischem Stickstoff nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Stickstoffeinträge, die über dem Bedarf des Ökosystems für das Wachstum liegen, ziehen jedoch – ggf. zeitverzögert – gravierende negative Konsequenzen für den Wald selbst sowie angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer nach sich.

## Gesamtsäureeintrag

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdosition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile). Der Netto-Gesamtsäureeintrag berechnet sich aus dem Gesamtsäureeintrag abzüglich der mit dem Niederschlag eingetragenen Basen Calcium, Magnesium und Kalium (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile; Gauger et al. 2002).

2017 betrug der Gesamtsäureeintrag pro Hektar im Freiland zwischen 0,6 kmol<sub>c</sub> (Göttinger Wald) und 1,0 kmol<sub>c</sub> (Ehrhorn), unter Buche zwischen 1,4 kmol<sub>c</sub> (Göttinger Wald, Lüss) und 1,6 kmol<sub>c</sub> (Solling) sowie bis zu 2,5 kmol<sub>c</sub> unter Fichte (Solling).

Durch atmosphärische Baseneinträge in Höhe von 0,05 kmol<sub>c</sub> (Ehrhorn Eiche) bis 0,13 kmol<sub>c</sub> (Göttinger Wald Buche, Solling Fichte) pro Hektar und Jahr werden zwischen 4 und 9 % der Säureinträge in den Wald neutralisiert. Ein



Intensiv-Monitoringfläche Augustendorf

Foto: J. Weymar

weiterer Teil der Säureinträge wird auf dem Wege der Basenfreisetzung durch Verwitterung gepuffert. Die nachhaltige Säurepufferkapazität insbesondere nährstoffarmer Waldstandorte reicht jedoch auch unter Berücksichtigung der Baseneinträge nicht zur Kompensation der Säureinträge aus.

Eine standortsangepasste Kalkung zum Schutz der Waldböden und der Erhaltung ihrer Filterfunktion für das Grundwasser kann empfohlen werden.

*anthropogen = durch menschliche Aktivitäten verursacht*

*Deposition = Ablagerung von Stoffen*

*Eutrophierung = Nährstoffanreicherung*

*kmol<sub>c</sub> (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<sub>c</sub> je Hektar.*

Gesamtsäure-Eintrag auf ausgewählten Flächen in kmol<sub>c</sub> je Hektar und Jahr

