

# Stoffeinträge

## Birte Scheler

Nähr- und Schadstoffe werden mit dem Niederschlag in gelöster Form sowie durch den Auskämmeffekt der Baumkronen gas- und partikelförmig in Wälder eingetragen.

Aufgrund der großen Oberflächen der Kronen ist der atmosphärische Stoffeintrag in Wälder im Vergleich der Landnutzungsformen am höchsten. Diese so genannte Immissionschutzfunktion 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.

Im Solling wurde bereits 1968 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.

Auf der Fichtenfläche im Solling wurde im Juli 2019 massiver Borkenkäferbefall festgestellt. Da ein Teil der Bäume, die über den Depositionssammlern standen, entnommen werden musste, wird der Stoffeintrag auf dieser Fläche für das Jahr 2019 vermutlich unterschätzt.

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

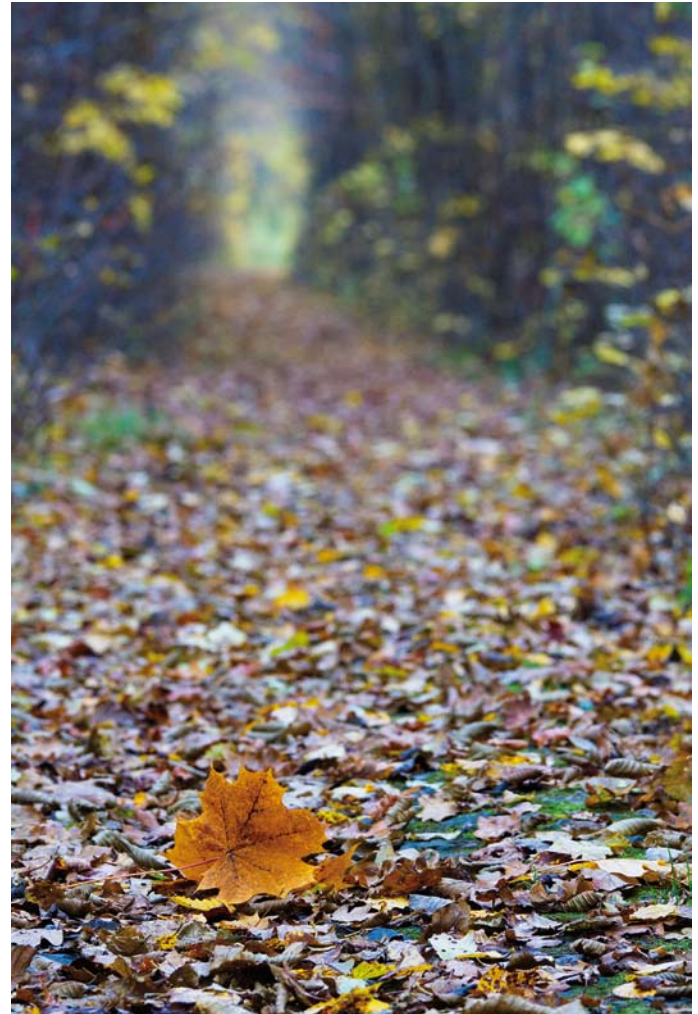


Foto: H. Heinemann

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 gleicher Immissionsbelastung und gleichen klimatischen Verhältnissen beobachtet werden.

## Niederschlag

In weiten Teilen Niedersachsens war 2019 nach 2018 ein weiteres sehr niederschlagsarmes Jahr. Zwar fielen auf allen sechs Freiflächen des Intensiven Monitorings zwischen 142 mm (Göttinger Wald) und 282 mm (Solling) mehr Niederschlag als 2018, im Vergleich zum 10-jährigen Mittel der Jahre 2009-2018 wurde jedoch auf vier der sechs Flächen zwischen 43 mm (Lange Bramke, Harz) und 80 mm (Lüss) weniger Niederschlag gemessen. In Augustendorf entsprach der Niederschlag dem Mittel und im Solling wurden 95 mm mehr registriert. Der Bestandesniederschlag war zwischen 18 mm (Augustendorf Kiefer) und 73 mm (Göttinger Wald) geringer als im Mittel des genannten Zeitraums. Im Solling übertraf der Bestandesniederschlag das 10-jährige Mittel mit 119 mm (Solling, Buche) bzw. 129 mm (Solling, Fichte) deutlicher als im Freiland, was durch den zum Vergleichszeitraum geringeren Überschildungsgrad der beiden Bestände bedingt ist.



Foto: H. Heinemann





Extraktion von Bodenproben zur Bestimmung der Inhaltsstoffe

Foto: N. König

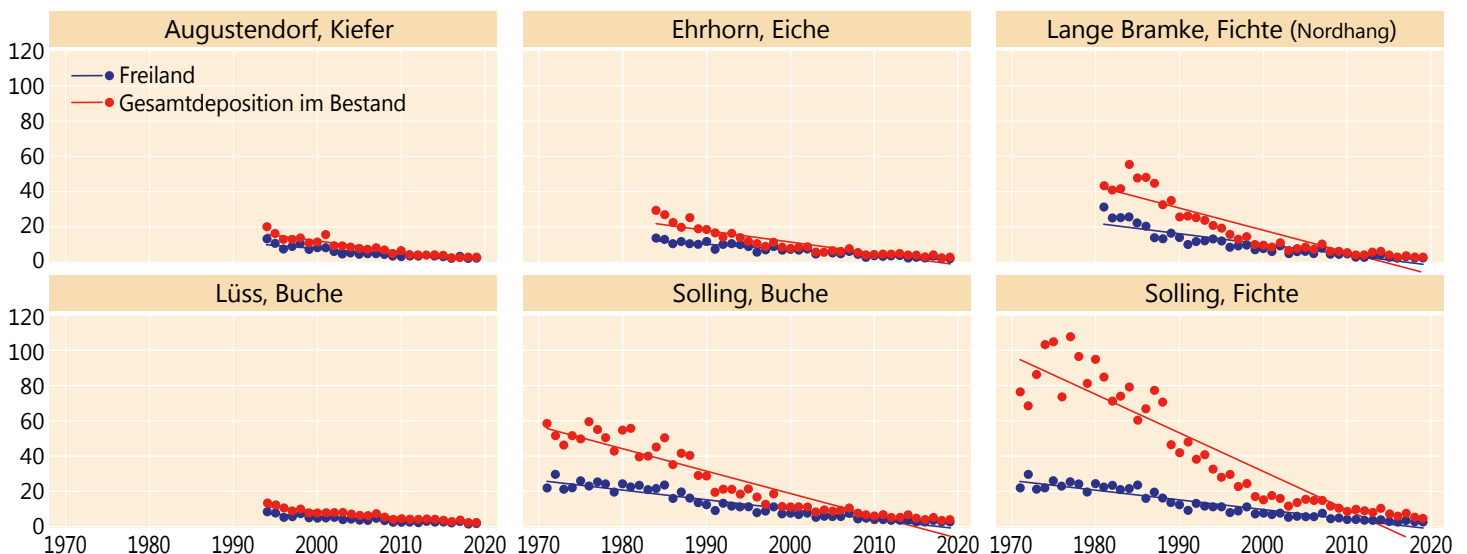
## Schwefeleintrag

Durch die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung und die Einführung schwefelarmer bzw. schwefeldreier Kraft- und Brennstoffe konnten die Schwefeldioxidemissionen wirksam reduziert werden. Aufgrund der seit Jahren sehr geringen Schwefeldioxidkonzentration der Luft spielt der gasförmige Eintrag nur noch eine untergeordnete Rolle. Der Sulfatschwefeleintrag erfolgt hauptsächlich in gelöster Form mit dem Niederschlag. Er betrug mit dem Bestandesniederschlag je Hektar zwischen 2,3 (Göttinger Wald Buche) und 4,7 kg (Solling Fichte) sowie zwischen 1,7 (Göttinger Wald) und 2,8 kg je Hektar (Solling) im Freiland. Die deutliche Abnahme der Sulfatschwefeleinträge um 0,7 auf 4,7 kg je Hektar im Bestand Solling Fichte trotz höherer Stoffeinträge im Freiland und höherer Bestandesniederschläge ist im geringeren Schlussgrad des Bestandes infolge des Borkenkäferbefalls begründet.

## 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 10-jährigen Mittel (2010-2019) 66 % und in Ehrhorn (Hohe Heide) 64 %. Auf den anderen Flächen des Intensiven Monitorings lag er zwischen 46 % (Göttinger Wald Buche) und 58 % (Lüss Buche, Solling Fichte). In dem hohen Ammoniumeintrag in Augustendorf spiegelt sich die intensive Landwirtschaft einschließlich Intensivtierhaltung dieser Region wider. Der Nitratstickstoffeintrag hat im Freiland und der Gesamtd deposition 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 (2010-2019) jedoch nur noch auf der Fläche Au-

Sulfatschwefeleintrag (SO<sub>4</sub>-S) im Freiland und im Bestand in kg je Hektar und Jahr



# Stoffeinträge

Augustendorf Kiefer nennenswert weiter rückläufig. Auf allen anderen Flächen zeigt sich eine tendenzielle Abnahme mit jährlichen Schwankungen auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. 2019 betrug der Nitratstickstoffeintrag im Freiland zwischen 2,8 (Augustendorf, Göttinger Wald, Lüss) und 4 kg je Hektar (Solling) und unter Buche (Gesamtdeposition) zwischen 4,4 (Lüss) und 6,8 kg je Hektar (Solling). Unter Fichte betrug die Gesamtdeposition von Nitratstickstoff im Solling 10 kg je Hektar und zwischen 6,1 und 8 kg je Hektar im Harz.

Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf den niedersächsischen Intensiv-Monitoringflächen seit Untersuchungsbeginn ebenfalls signifikant abgenommen. Im 10-Jahreszeitraum 2010-2019 wurde eine weitere signifikante Abnahme jedoch nur auf einer der neun Bestandesflächen (Lange Bramke Kamm Fichte) und auf einer Freifläche (Solling) beobachtet. Im Freiland lag er 2019 zwischen 3,2 (Göttinger Wald) und 5,3 kg je Hektar (Solling) und unter Buche zwischen 5,4 (Göttinger Wald) und 9 kg je Hektar (Solling). Unter Fichte betrug er je Hektar 13,2 kg im Solling und zwischen 7,1 und 9,3 kg je Hektar im Harz. Auffallend hoch sind nach wie vor die Ammoniumstickstoffeinträge in Augustendorf unter Kiefer mit 10,6 kg je Hektar.



Intensiv-Monitoringfläche Solling Buche

Foto: NW-FVA

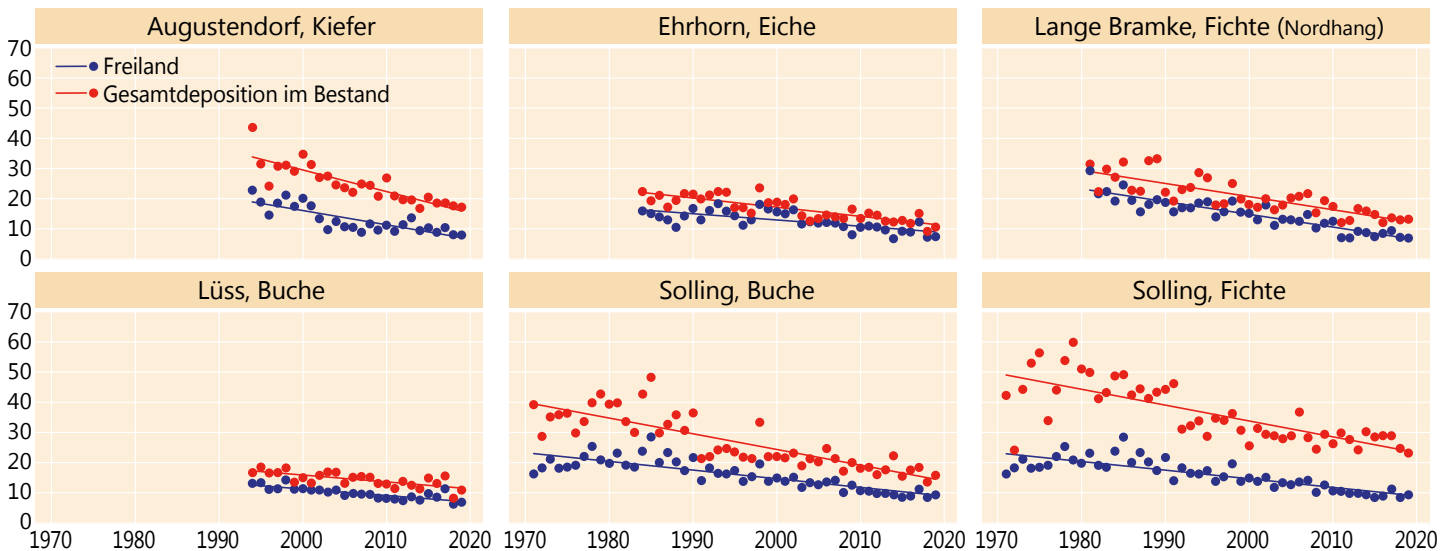
Verschiedene Bemühungen haben in der Vergangenheit zu einer Reduktion der Stickstoffemissionen und hieraus resultierenden rückläufigen Einträgen geführt. Da sich diese Entwicklung in den vergangenen Jahren jedoch nicht im gleichen Maße fortgesetzt hat, überschreitet der anthropogen bedingte atmosphärische Stickstoffeintrag im Mittel der letzten 5 Jahre (2015-2019) mit Werten bis zu 16,2 kg je Hektar unter Buche (Solling) und 26,8 kg je Hektar unter Fichte (Solling) nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Dieser überschüssige Stickstoff reichert sich 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 fördert, kommt es zu erhöhten Nährstoffverlusten mit dem Sickerwasser aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden. Zusätzlich werden angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer ggf. durch hohe Nitratausträge gefährdet. Dieser Prozess wurde auf einer Teilfläche der Fläche Solling Fichte Mitte 2019 durch Borkenkäferbefall angestoßen. Die Konsequenzen für das Ökosystem werden sich in den kommenden Jahren an der Entwicklung der Stoffkonzentration im Sickerwasser zeigen.



Erfassung der Niederschlagsmenge

Foto: O. Schwerdtfeger

Stickstoffeintrag (NH<sub>4</sub>-N + NO<sub>3</sub>-N) im Freiland und im Bestand in kg je Hektar und Jahr





# Stoffeinträge

## Gesamtsäure

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002).

2019 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland zwischen 0,5 (Göttinger Wald) und 0,8 kmol<sub>c</sub>, unter Buche zwischen 0,9 (Göttinger Wald) und 1,3 kmol<sub>c</sub> je Hektar (Solling) sowie unter Fichte zwischen 1,1 (Lange Bramke Nordhang) und 1,9 kmol<sub>c</sub> je Hektar (Solling). Auffallend hoch waren die Gesamtsäureeinträge mit 1,3 kmol<sub>c</sub> je Hektar auch auf der Kiefernfläche in Augustendorf, eine Folge der sehr hohen Ammoniumbelastung in dieser Region.

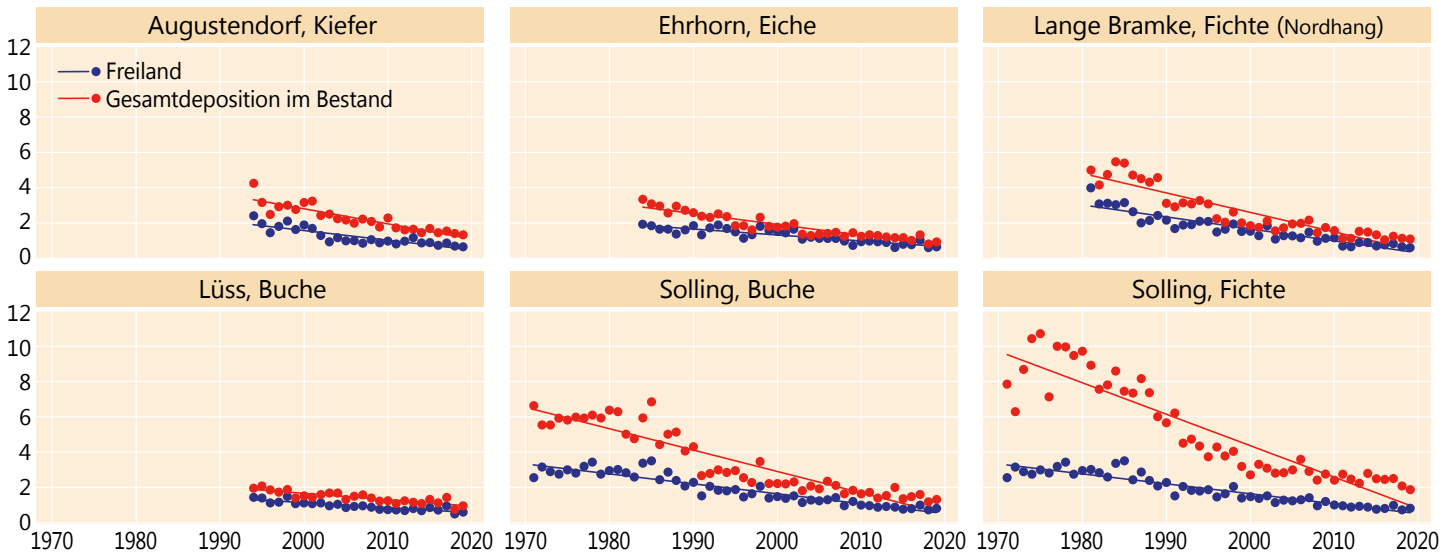
Ein Teil des Säureeintrags wird durch ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragene Basen neutralisiert, ein anderer wird im Waldboden durch Basen gepuffert, die durch Verwitterung freigesetzt werden. Der Eintrag basischer Stäube spielt nur in Einzelfällen, z. B. in der Nähe von Steinbrüchen,

eine Rolle. Die nachhaltige Säurepufferkapazität aus Verwitterung reicht auf den oft nährstoffarmen Waldstandorten jedoch auch unter Berücksichtigung der Baseneinträge nicht aus, um die Säureinträge vollständig zu kompensieren. 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.*

## Gesamtsäureeintrag im Freiland und im Bestand in kmol<sub>c</sub> je Hektar und Jahr



Intensiv-Monitoringfläche Ehrhorn Eiche

Foto: J. Weymar