

# Stoffeinträge

**Birte Scheler**

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7326907>

Mit dem Niederschlag gelangen verschiedene Nähr- und Schadstoffe in gelöster Form in den Wald. Zusätzlich werden diese Stoffe in gas- und partikelförmiger Form 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 sogenannte 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.

In Schleswig-Holstein wird seit 1989 im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings der Stoffeintrag in einem 115jährigen Buchenbestand bei Bornhöved erfasst. Der Bestandesmessfläche (Kronentraufe) ist eine Freifläche (Freilandniederschlag) zugeordnet. Zusätzlich wird zur Erfassung des gesamten Bestandesniederschlags der Stammablauf gemessen und analysiert, der in Buchenbeständen quantitativ bedeutsam ist. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich, 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdpositionsraten berechnet.

Die Höhe der Stoffeinträge wird maßgeblich durch verschiedene Faktoren wie Niederschlagsmenge und -verteilung, Baumart, Bestandeshöhe, Kronenrauigkeit bzw. lokale Emit-

ten bestimmt. Aus diesem Grund sind die Stoffeinträge in niederschlagsärmeren Gebieten in der Regel niedriger als in niederschlagsreichen Gegenden und aufgrund des Laubabwurfs unter Buche geringer als unter Fichte und Douglasie.

## Niederschlag

2021 war in Bornhöved hinsichtlich der Niederschlagshöhe ein feuchteres Jahr. Im Freiland fielen 843 mm, der Bestandesniederschlag (Kronentraufe und Stammablauf) betrug 652 mm. Damit fielen im Freiland 102 mm (bzw. 14 %) und im Bestand 61 mm (bzw. 10 %) mehr Niederschlag als im Mittel der Jahre 2011–2020. Im Vergleich zum langjährigen Mittel seit Untersuchungsbeginn im Jahr 1989 fiel das Niederschlagsplus mit 11 % (Freilandniederschlag) bzw. 6 % (Bestandesniederschlag) etwas geringer aus.

## 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 Sulfatschwefeleintrag in Wälder wirksam reduziert. Trotz höherer Niederschlagsmengen hat er mit dem Bestandesniederschlag im Vergleich zum Vorjahr weiter abgenommen.



Foto: O. Schwerdtfeger

Messung der Bodenfeuchte auf der Level II-Fläche Bornhöved

Er betrug 2021 pro Hektar 2,3 kg im Freiland und 3,4 kg im Buchenbestand. Dies war der zweitniedrigste (Bestand) bzw. drittniedrigste (Freiland) Eintrag seit 1989. Von der Schwefelgesamtdeposition unter Buche waren aufgrund der Nähe zum Meer 1,4 kg pro Hektar bzw. 40 % seesalzbürtig.

### Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form) und als Ammonium (reduzierte Form) in das Ökosystem eingetragen. Die Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) haben im Zeitraum 1990–2020 um 66 %, die Ammoniakemissionen um 25 % abgenommen. Trotz einer überproportional starken Abnahme der Stickoxidemissionen im Bereich „Verkehr“ stammen immer noch 40 % aus diesem Bereich, gefolgt von der Energiewirtschaft (22 %) sowie den privaten Haushalten und Kleingewerbe (12 %). Die

Ammoniakemissionen stammen unverändert zu ca. 95 % aus der Landwirtschaft (UBA 2022).

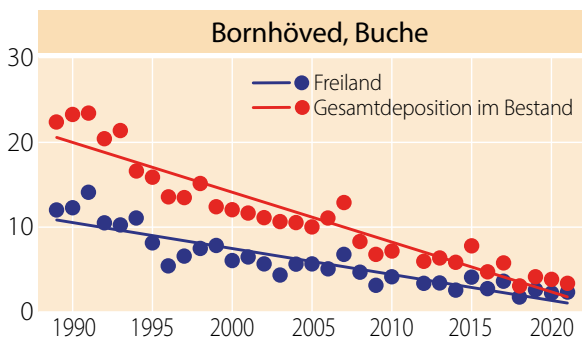
Infolge der Reduktion der Emission sind die Stickstoffeinträge im Freiland und mit der Gesamtdeposition im Beobachtungszeitraum deutlich zurückgegangen.

Bezogen auf das Mittel der Jahre 1989–1991 betrug die Reduktion der Nitratsinträge (Mittel 2019–2021) im Freiland und mit der Gesamtdeposition unter Buche 57 %. Im Zeitraum 2012–2021 sind sie nur mit der Gesamtdeposition weiter leicht gesunken, während sie im Freiland mit jährlichen Schwankungen auf dem erreichten Niveau verharren.

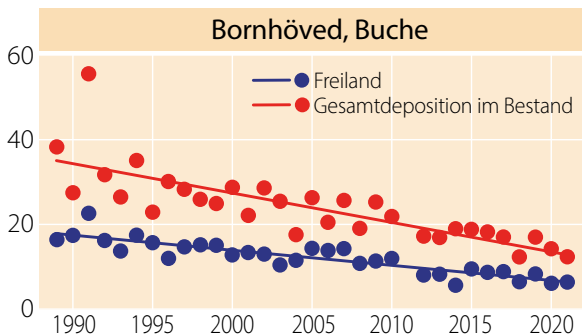
2021 betrug der Nitratsinträge je Hektar unter Buche 6,3 kg und im Freiland 3 kg.

Die Reduktion der Ammoniuminträge lag bei 67 % im Freiland bzw. 68 % mit der Gesamtdeposition. In den letzten 10 Jahren sind sie mit der Gesamtdeposition weiter leicht ge-

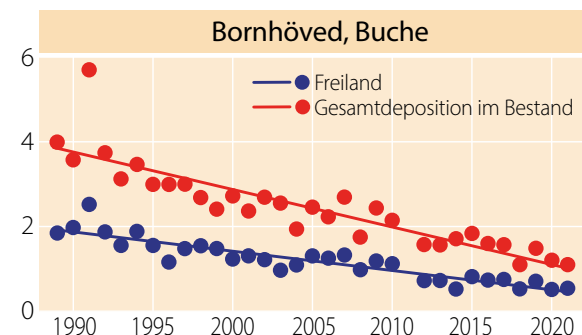
### Sulfatschwefeleintrag (SO<sub>4</sub>-S inkl. seesalzbürtigem Anteil) im Freiland und im Bestand in kg je Hektar und Jahr



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



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



durchgezogene Linie: signifikante Abnahme



Freifläche mit Klimamessurm auf der Level II-Fläche Bornhöved

Foto: O. Schwerdtfeger



Stammablauf-Messanlage auf der Level II-Fläche Bornhöved

sunken, blieb im Freiland jedoch mit jährlichen Schwankungen auf einem gleichbleibenden Niveau.

2021 betrug der Ammoniumstickstoffeintrag in Bornhöved unter Buche 5,9 kg und im Freiland 3,6 kg je Hektar.

Da die Ammoniumeinträge in Bornhöved stärker abgenommen haben als die Nitratreinträge, ist der relative Anteil des Ammoniums am anorganischen Stickstoffeintrag von rund 63 % (Mittel 1989–1991) auf 58 % im Freiland und 48 % unter Buche im Jahr 2021 gesunken.

Obwohl der anthropogen bedingte anorganische Stickstoffeintrag seit Beginn der Untersuchungen deutlich abgenommen hat, überschreitet er im Mittel der letzten 5 Jahre (2017–2021) mit 14,5 kg je Hektar und Jahr auf der Buchenfläche in Bornhöved nach wie vor den Bedarf des Bestandes 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 Schädlingsbefall wird der Stickstoff rasch mineralisiert, was bei hohen Vorräten im Boden zu stark erhöhten Nitratausträgen führen kann. Nitrat wird im Bodenwasser von Nährstoffkationen wie Calcium, Magnesium oder Kalium und sauren Kationen wie Aluminium begleitet. Dadurch verliert das Ökosystem wichtige Nährstoffe aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden. Auf sauren Böden kann die vermehrte Lösung von Aluminium einen Säureschub verursachen. Außerdem werden angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer ggf. durch hohe Nitratausträge gefährdet. Eine weitere Reduktion der Stickstoffemissionen ist zum Schutz der Ökosysteme wichtig.

## Gesamtsäureeintrag

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

2021 betrug der Gesamtsäureeintrag pro Hektar im Freiland 0,5 kmol<sub>c</sub>. Unter Buche betrug er 1,1 kmol<sub>c</sub> und war

damit 0,4 kmol<sub>c</sub> pro Hektar geringer als im Mittel der Jahre 2011–2020. 13 Prozent des Säureeintrags konnte durch mit dem Niederschlag ebenfalls eingetragene Basen neutralisiert werden.

Ein weiterer Teil der Säureeinträge wird im Waldboden durch Basen gepuffert, die im Rahmen der Verwitterung freigesetzt werden. Die nachhaltige Säurepufferung aus Verwitterung reicht auf den oft nährstoffarmen Waldstandorten auch unter Berücksichtigung der Baseneinträge nicht aus, um die Säureeinträge vollständig zu kompensieren. Eine standortangepasste Kalkung zum Schutz der Waldböden und der Erhaltung ihrer Filterfunktion für das Grundwasser kann auf nährstoffarmen Standorten 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.*

## Literatur

- Gauger T, Anshelm F, Schuster H, Draaijers GPJ, Bleeker A, Erismann JW, Vermeulen AT, 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
- Simon K-H, Westendorff K (1991): Stoffeinträge mit dem Niederschlag in Kiefernbeständen des nordostdeutschen Tieflandes in den Jahren 1985–1989. Beiträge Forstwirtschaft 25(4), 177–180
- UBA (2022): <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