

# Atmosphärische Stoffeinträge bis 2024

**Birte Scheler**

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17524667>

Nähr- und Schadstoffe werden sowohl in gelöster Form mit dem Niederschlag als auch gas- und partikelförmig in Wälder eingetragen. Aufgrund ihrer großen Kronenoberflächen filtern Bäume große Mengen an Schadstoffen und (Fein-)Stäuben aus der Luft (Immissionsschutzfunktion). Daher ist der atmosphärische Stoffeintrag in Wäldern höher als bei allen anderen Landnutzungsformen. Diese Einträge stellen aber für das Ökosystem Wald eine Belastung dar, da hohe Einträge von Säure und Stickstoff (Nitrat und Ammonium) das chemische Bodenmilieu durch Versauerung und Eutrophierung verändern. Seit 1989 wird in Schleswig-Holstein im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings der Stoffeintrag in einen Buchenbestand bei Bornhöved erfasst. Ziel ist einerseits die Quantifizierung der atmosphärischen Stoffeinträge, insbesondere der von Schwefel, Stickstoff und Säure. Andererseits ermöglicht das umfassende Monitoringprogramm die Untersuchung der Folgen und Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme, die mit erhöhten Stoffeinträgen, aber auch mit dem Klimawandel verbunden sein können.

Der Bestandesmessfläche (Kronentraufe) ist eine Freifläche (Freilandniederschlag) zugeordnet. Zusätzlich wird zur Erfassung des gesamten Bestandesniederschlags der Stammablauf gemessen und analysiert, der in Buchenbeständen im



Foto: J. Evers

Vergleich zu anderen Baumarten quantitativ bedeutsam ist. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich, 1994) werden aus den gemessenen Stoffflüssen im Bestand und Freiland Gesamtdositionsraten berechnet.

## Niederschlag

Das Kalenderjahr 2024 war niederschlagsreich. Im Freiland fielen 891 mm und im Bestand inkl. Stammablauf 697 mm Niederschlag. Im Vergleich zum 10-jährigen Mittel der Jahre 2014–2023 wurde damit im Freiland 115 mm und im Bestand 91 mm mehr Niederschlag registriert.

Relativ gesehen fielen sowohl im Freiland als auch im Bestand 115 % des 10-jährigen Niederschlagsmittels (2014–2023).



Foto: J. Evers



## Schwefeleintrag

Durch die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung sowie die Einführung schwefelarmer bzw. schwefelfreier Kraft- und Brennstoffe wurden die Schwefeldioxidemissionen in den letzten Jahrzehnten wirksam reduziert. Durch dieses Maßnahmenpaket sind die ehemals sehr hohen Schwefeleinträge in die Waldökosysteme nur noch sehr gering. Im Freiland liegt der Eintrag seit 2015 mit jährlichen Schwankungen auf einem ähnlich niedrigen Niveau, im Bestand wurde in den letzten 10 Jahren weiterhin ein signifikanter Rückgang des Sulfatschwefeleintrags beobachtet.

2024 betrug er im Freiland 2,3 kg und unter Buche 2,9 kg je Hektar. Von der Schwefelgesamtd deposition unter Buche waren aufgrund der Nähe zum Meer 1,6 kg pro Hektar bzw. 55 % seesalzbürtig, d. h. natürlichen Ursprungs.

### Sulfatschwefeleintrag ( $\text{SO}_4\text{-S}$ inkl. seesalzbürtigem Anteil) im Freiland und im Bestand in kg je Hektar und Jahr

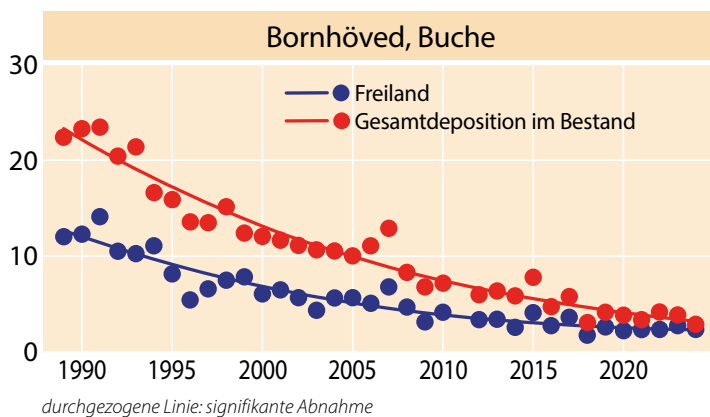


Foto: J. Evers

## Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) und als Ammonium (reduzierte Form: landwirtschaftliche Quellen) in das Ökosystem eingetragen. Im Freiland lag der Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag im Mittel der Jahre 2015–2024 bei 59 % und mit der Gesamtd deposition bei 56 %.

Durch die Umsetzung verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffemissionen haben die anorganischen Stickstoffeinträge in Bornhöved seit Untersuchungsbeginn deutlich abgenommen. Die signifikante Abnahme von Nitrat- und Ammoniumstickstoff hat sich in den vergangenen 10 Jahren

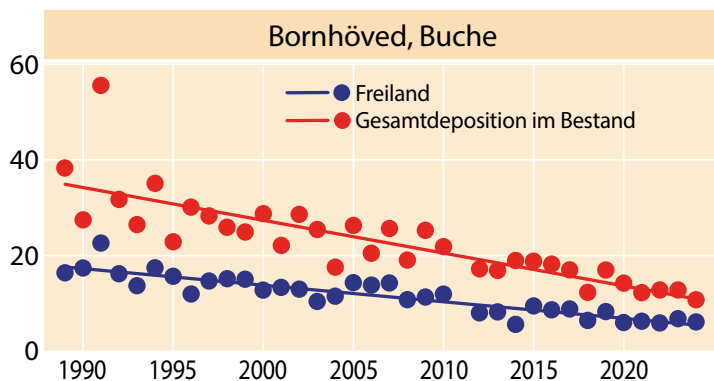


Foto: J. Evers



von 2015–2024 sowohl mit der Gesamtd deposition unter Buchen als auch im Freiland fortgesetzt. 2024 betrug der Nitratstickstoffeintrag je Hektar im Freiland 2,6 kg und 5,1 kg unter Buche (Gesamtd deposition), der Ammoniumeintrag belief sich auf 3,5 kg im Freiland und 5,7 kg unter Buche (Gesamtd deposition).

### Stickstoffeintrag ( $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ ) im Freiland und im Bestand in kg je Hektar und Jahr



durchgezogene Linie: signifikante Abnahme

Trotz der beobachteten Abnahme sind die anthropogen bedingten atmosphärischen anorganischen Stickstoffeinträge unter Buche mit 13,0 kg je Hektar und Jahr (Mittel 2020–2024) immer noch auf erhöhtem Niveau. Sie sollten jedoch in einer Größenordnung liegen, die durch die internen Regulationsmechanismen der Ökosysteme (Pflanzenaufnahme und Speicherung) kompensiert werden kann. Bei einer langfristigen Überschreitung der Belastungsgrenzen können nach dem bisherigen Kenntnisstand schädigende Effekte für das Ökosystem Wald und angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundwasserkörper nicht ausgeschlossen werden.

### Gesamtsäureeintrag

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

2024 betrug er im Freiland 0,5 kmol<sub>c</sub> und unter Buche 0,9 kmol<sub>c</sub> je Hektar.





Ein Teil des Säureeintrags wird durch die ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragenen Basen gepuffert. Berücksichtigt man diese Pufferleistung und zieht die nicht seesalzbürtigen Anteile der Basen Calcium, Magnesium und Kalium vom Gesamtsäureeintrag ab, erhält man den ökosystemar bedeutsamen Netto-Gesamtsäureeintrag (Gauger et al. 2002). Auf der Fläche Bornhöved wurden im Mittel der Jahre 2020–2024 15 % der Gesamtsäureinträge durch nicht seesalzbürtige eingetragene Basen gepuffert. Obwohl die Gesamtsäureinträge deutlich zurückgegangen sind (vgl. Abb. unten), zeigen viele Waldstandorte erhöhte Konzentrationen von basischen und/oder sauren Kationen im Sickerwasser. Dieses gilt insbesondere für Standorte, die in der Vergangenheit hohen Schwefeldepositionen ausgesetzt waren. Auf entsprechenden Standorten werden nach wie vor standortsangepasste Bodenschutzkalkungen erforderlich sein, um das Nährstoffangebot und die Filterfunktion der Waldböden langfristig zu erhalten und zu stabilisieren.

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

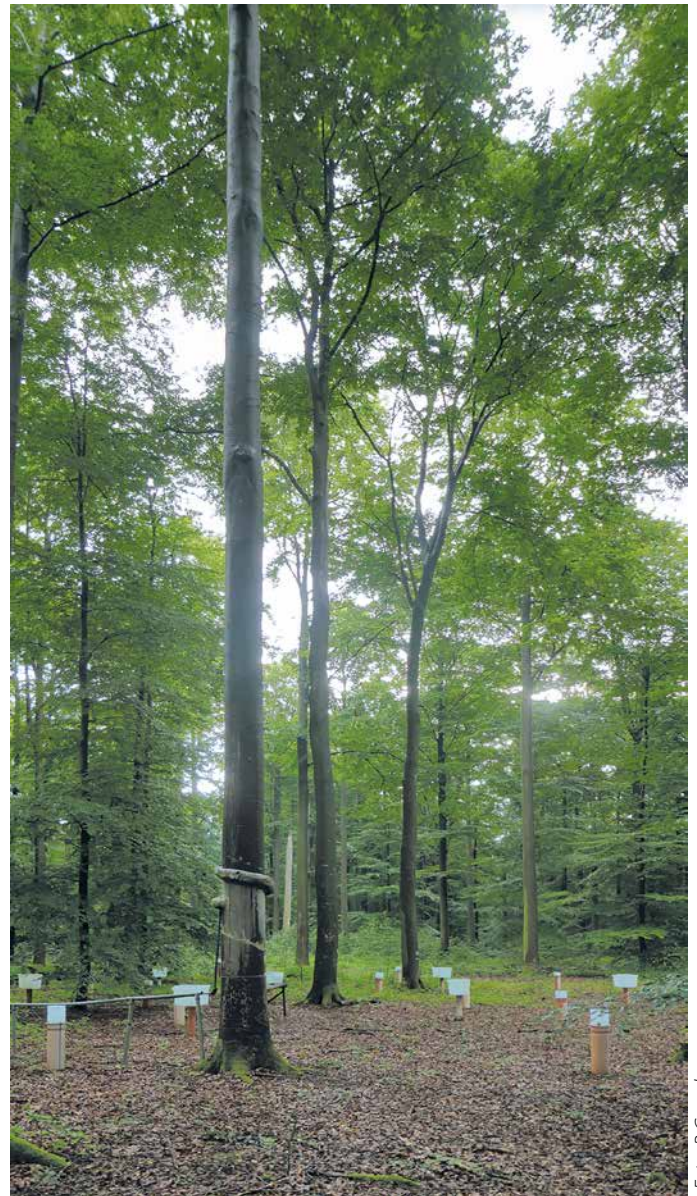
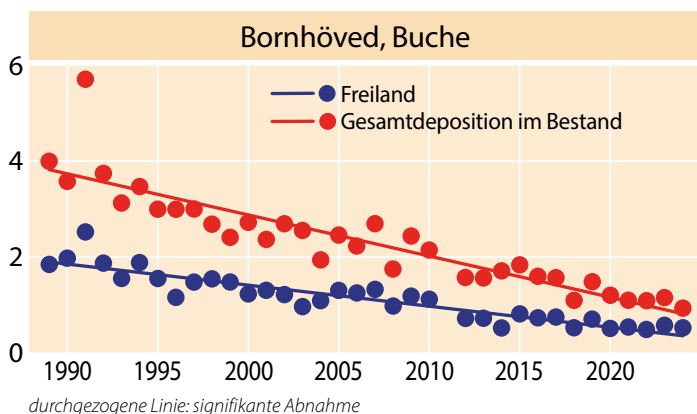


Foto: P. Gawehn

Level II-Fläche Bornhöved

*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, 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.
- Ulrich, B. (1994): Nutrient and Acid-Base Budget of Central European Forest Ecosystems. In: Godbold, D. u. Hüttermann, A.: Effects of Acid Rain on Forest Processes. Wiley-Liss. New York. S. 1-50.



Foto: J. Evers