

# Stoffeinträge

**Birte Scheler**

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14162510>

Nähr- und Schadstoffe werden sowohl in gelöster Form mit dem Niederschlag als auch gas- und partikelförmig in Wälder eingetragen. Aufgrund der großen Oberflächen der Kronen ist der atmosphärische Stoffeintrag in Wäldern deutlich höher als bei allen anderen Landnutzungsformen. Diese sogenannte Immissionschutzfunktion 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 mit den anthropogenen Stoffeinträgen verbundenen Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme beurteilen zu können, wurde der Stoffeintrag in Kiefernbestände des nordostdeutschen Tieflandes erstmals 1985 bis 1989 durch die Forschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Eberswalde erfasst (Simon u. Westendorff, 1991). Seit 1998 wird der Stoffeintrag im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings in zwei Kiefernbeständen in Klötze (Altmark) und Nedlitz (Fläming), seit 2013 zusätzlich in einem Douglasienbestand in Klötze und auf dem Großlysimeter in Colbitz bestimmt. Jeder Bestandesmessfläche (Kronentraufe) ist eine Freifläche (Freilandniederschlag) zugeordnet. Mit Hilfe eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdepositionsraten berechnet.

## Niederschlag

2023 war ein überdurchschnittlich niederschlagsreiches Jahr, vergleichbar mit den Jahren 2007 und 2017 in Klötze bzw. 2013 in Nedlitz. Die Höhe des Freilandniederschlags lag zwischen 737 mm (Colbitz) und 854 mm (Klötze). Im Vergleich zum 10-jährigen Mittel der Jahre 2013–2022 wurde zwischen 138 mm (Nedlitz) und 283 mm (Klötze) mehr Niederschlag registriert. Die Höhe des Bestandesniederschlags betrug zwischen 559 mm (Klötze, Douglasie)

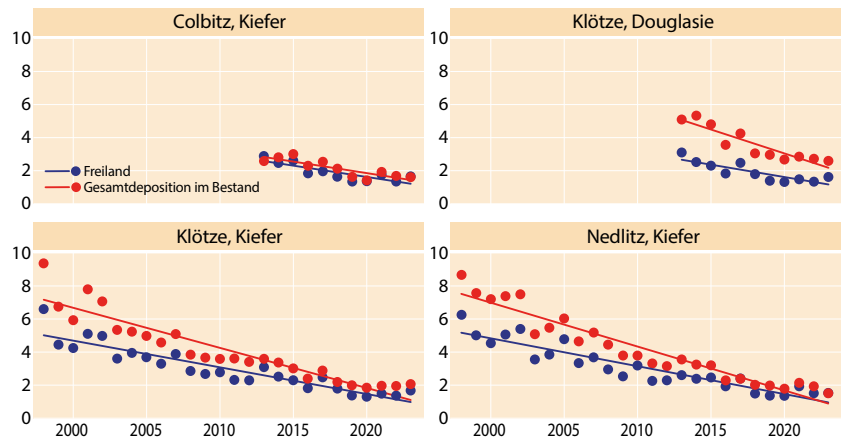
und 692 mm (Klötze, Kiefer). Im Vergleich zum Mittel des Zeitraums 2013–2022 waren es zwischen 124 mm (Nedlitz, Kiefer) und 259 mm (Klötze, Kiefer) mehr.

Relativ gesehen fielen im Freiland zwischen 123 % (Nedlitz) und 150 % (Klötze) und im Bestand zwischen 127 % (Nedlitz, Kiefer) und 160 % (Klötze, Kiefer) des 10-jährigen Niederschlagsmittels (2013–2022).

## Schwefeleintrag

Durch die Substitution der Braunkohle als Hauptenergieträger nach der Wiedervereinigung, die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung und die Einführung schwefelarmer Kraft- und Brennstoffe konnten die Schwefeldioxidemissionen wirksam reduziert werden. Der Schwefeleintrag in die Wälder Sachsen-Anhalts hat infolge dieser Maßnahmen sehr deutlich abgenommen, eine Entwicklung, die bis 2023 angehalten hat. 2023 betrug der Sulfatschwefeleintrag mit dem Bestandesniederschlag je Hektar unter Kiefer 1,5 kg in Nedlitz, 1,6 kg in Colbitz, 2,1 kg in Klötze (Kiefer) und 2,6 kg unter Douglasie (Klötze). Im Freiland lag er zwischen 1,5 kg (Nedlitz) und 1,7 kg je Hektar (Colbitz).

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



durchgezogene Linie: signifikante Abnahme, gepunktete Linie: kein signifikanter Trend



Foto: P. Gawehn

Intensiv-Monitoringfläche Großlysimeter Colbitz

## Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form, Quellen: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) und als Ammonium (reduzierte Form, landwirtschaftliche Quellen) in das Ökosystem eingetragen. Im Freiland und mit der Gesamtdosition lag der Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag im Mittel der Jahre 2014–2023 zwischen 55 % und 60 %. Seit Untersuchungsbeginn ist der Ammoniumanteil am Stickstoffeintrag in Nedlitz (Freiland und Kiefer) deutlich zurückgegangen, während er auf den anderen untersuchten Flächen gleich hoch geblieben ist bzw. unter Kiefer in Klötze etwas zugenommen hat.

Betrachtet man den Zeitraum seit Untersuchungsbeginn, hat der Nitratstickstoffeintrag im Freiland und mit der Gesamtdosition auf allen untersuchten Flächen signifikant abgenommen. Die deutliche Abnahme hat sich in den vergangenen zehn Jahren auf allen Flächen fortgesetzt. 2023 betrug er im Freiland zwischen 1,9 kg (Nedlitz, Colbitz) und 2,1 kg (Klötze) und unter Kiefer (Gesamtdosition) zwischen 2,9 kg (Colbitz) und 4,1 kg (Klötze) je Hektar. Unter Douglasie belief sich 2023 die Gesamtdosition von Nitratstickstoff pro Hektar auf 5,1 kg (Klötze).

Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf den Intensiv-Monitoringflächen in Sachsen-Anhalt seit Untersuchungsbeginn ebenfalls signifikant abgenommen. In den Jahren 2014–2023 wurde im Freiland und auf allen Bestandesflächen eine weitere signifikante Abnahme beobachtet. Im Freiland lag er 2023 zwischen 2,1 kg (Colbitz) und 2,6 kg (Nedlitz) je Hektar und unter Kiefer zwischen 3,2 kg (Colbitz) und 5,5 kg (Klötze). Unter Douglasie (Klötze) betrug er pro Hektar 6,7 kg.

Besonders eindrücklich zeigt sich die Abnahme der Stickstoffeinträge im Vergleich mit den Jahren 2017 (Klötze) bzw. 2013 (Nedlitz), die ähnlich niederschlagsreich waren wie 2023. Betrug der anorganische Stickstoffeintrag je Hektar in Klötze unter Kiefer 2017 noch 14,4 kg, waren es 2023 bei gleicher Niederschlagshöhe nur noch 9,6 kg. Unter Douglasie hat der



Foto: B. Scheler

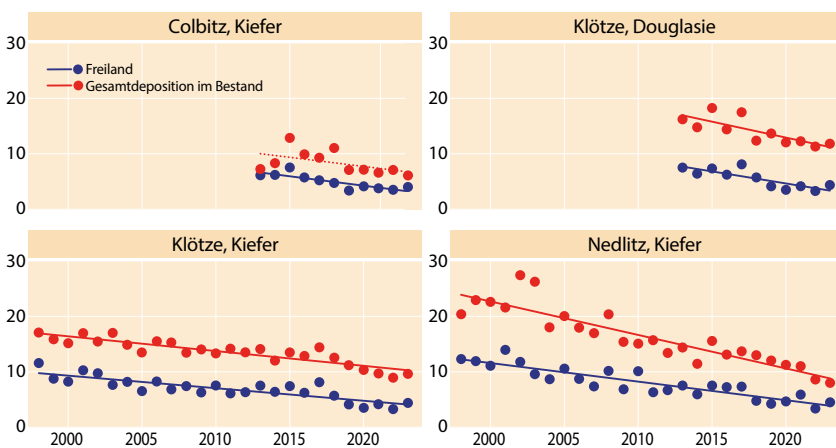
Level II-Kiefernfläche Nedlitz

Eintrag von 17,5 kg (2017) auf 11,8 kg abgenommen. In Nedlitz ist der Eintrag unter Kiefer von 14,4 kg im Jahr 2013 auf 7,1 kg je Hektar zurückgegangen.

Trotz der erfreulichen Abnahme des anthropogen bedingten atmosphärischen anorganischen Stickstoffeintrags überschritt er im Mittel der letzten fünf Jahre (2019–2023) mit 12,2 kg je Hektar unter Douglasie (Klötze) und rund 10 kg unter Kiefer (Klötze, Nedlitz) nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Stickstoffeinträge, die über dem Bedarf des Ökosystems für das Wachstum liegen, reichern sich im Ökosystem an und ziehen – ggf. zeitverzögert – gravierende negative Konsequenzen nach sich.

Durch Kalamitäten wie Windwurf oder Borkenkäferbefall, in deren Folge in den vergangenen Jahren u. a. im Harz riesige Freiflächen entstanden sind, kommt es zu einer Entkoppelung der Stoffkreisläufe. Der im Boden gebundene Stickstoff wird rascher mineralisiert, mangels Bäumen wird jedoch nur ein sehr kleiner Teil von der zwischenzeitlich aufgenommenen Schlagflora aufgenommen, erhöhte Nitratausträge mit dem Sickerwasser sind die Folge. Da Nitrat im Bodenwasser von Nährstoffkationen wie Calcium, Magnesium oder Kalium sowie sauren Kationen wie Aluminium begleitet wird, verlieren die Ökosysteme wichtige Nährstoffe aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden. Außerdem erhöht sich die Konzentration von sauren Kationen wie z. B. Aluminium in der Bodenlösung, die für die Vegetation

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



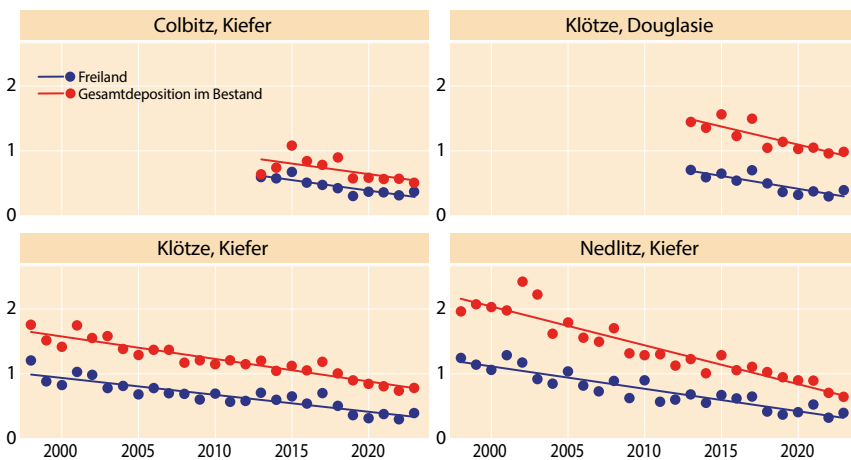
durchgezogene Linie: signifikante Abnahme, gepunktete Linie: kein signifikanter Trend

schädlich sind. Angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer werden ggf. durch hohe Nitratausträge oder hohe Aluminiumkonzentrationen gefährdet. Zum Schutz der Ökosysteme ist eine weitere Reduktion der Stickstoffemissionen wichtig.

## Gesamtsäureeintrag

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

### Gesamtsäureeintrag im Freiland und im Bestand in $\text{kmol}_c$ je Hektar und Jahr



durchgezogene Linie: signifikante Abnahme, gepunktete Linie: kein signifikanter Trend

2023 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland rund  $0,4 \text{ kmol}_c$ , unter Kiefer zwischen  $0,5 \text{ kmol}_c$  (Colbitz) und  $0,8 \text{ kmol}_c$  (Klötze) sowie unter Douglasie  $1,0 \text{ kmol}_c$  (Klötze). 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 den Intensiv-Monitoringflächen Sachsen-Anhalts wurden im Mittel der Jahre 2019–2023 zwischen 20 % (Klötze Kiefer) und 46 % (Colbitz Kiefer) der Gesamtsäureeinträge durch nicht seesalzbürtige Basen abgepuffert.

Ein weiterer Teil des Säureeintrags wird im Erdreich durch Basen gepuffert, die durch Verwitterung freigesetzt werden. 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 deshalb auf diesen Standorten empfohlen werden.



Foto: P. Gawehn

Wartungsarbeiten auf der Intensiv-Monitoringfläche Großlysimeter Colbitz

*anthropogen = durch menschliche Aktivitäten verursacht*  
*Deposition = Ablagerung von Stoffen*  
*Eutrophierung = Nährstoffanreicherung*  
 *$\text{kmol}_c$  (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  $\text{kmol}_c$  je Hektar.*

## Literatur

- Gauger, T., F. Anshelm, H. Schuster, G. P. J. Draaijers, A. Bleeker, J. W. Erisman, A. T. Vermeulen & H.-D. Nagel (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.
- Ulrich, B. (1991): Beiträge zur Methodik der Waldökosystemforschung. Berichte des Forschungszentrums für Waldökosysteme/Waldsterben. Reihe B, Bd. 24, 204–210.