

# Stoffeinträge

**Birte Scheler**

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7152799>

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 Sachsen-Anhalt 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). Im Rahmen des intensiven forstlichen Umweltmonitorings werden seit 1998 bzw. 2013 die Stoffeinträge in drei Kiefernbeständen in Nedlitz (Fläming), Klötze (Altmark) und Colbitz (Letzlinger Heide) sowie in einem Douglasienbestand (Klötze) erfasst, um die Wirkung erhöhter Stoffeinträge sowie damit verbundener Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme abschätzen zu können. Jeder Bestandesmessfläche (Kronentraufe) ist eine Freifläche (Freilandniederschlag) zugeordnet. Mit Hilfe eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdepositionsraten berechnet.

Die Höhe der Stoffeinträge wird maßgeblich durch verschiedene Faktoren wie Niederschlagsmenge und -verteilung, Windgeschwindigkeit, Baumart, Bestandeshöhe, Kronenrauigkeit oder lokale Emittenten bestimmt. Der Baumarteneffekt zeigt sich sehr gut in Klötze, wo eine Douglasien- und eine Kiefernfläche in unmittelbarer Nachbarschaft und somit unter gleichen klimatischen und luftchemischen Verhältnissen beobachtet werden. Aufgrund der dichteren Benadelung sind die Stoffeinträge unter Douglasie höher als unter Kiefer.

## Niederschlag

In Sachsen-Anhalt war die Abweichung der Niederschlagsmenge 2021 vom Mittel der Jahre 2011–2020 uneinheitlich. Während im Fläming im Freiland 47 mm (+8 %) mehr Niederschlag fiel, waren es in Colbitz 19 mm (-4 %) und in Klötze (Altmark) 61 mm (-10 %) weniger Niederschlag. Entsprechend war der Bestandesniederschlag in Nedlitz unter Kiefer ebenfalls höher als im Mittel der Vorjahre (+102 mm bzw. +23 %) und in Klötze unter



Foto: O. Schwerdtfeger

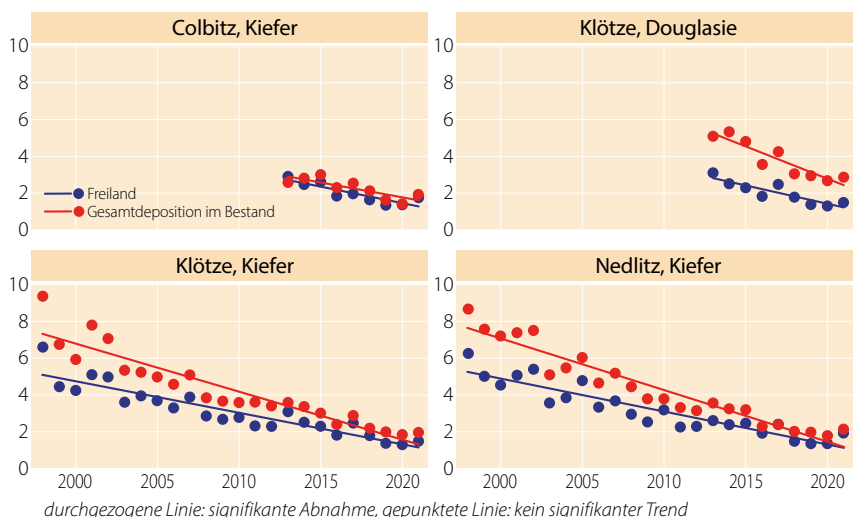
Messung der atmosphärischen Stoffeinträge auf dem Großlysimeter Colbitz

Kiefer 27 mm (-6 %) bzw. unter Douglasie 42 mm (-11 %) geringer. In Colbitz war der Bestandesniederschlag in Folge eines waldbaulichen Eingriffs trotz etwas geringerer Freilandniederschläge leicht erhöht (+14 mm bzw. +3 %). Der Wasserhaushalt der Bestände war durch insgesamt geringe Niederschläge in Kombination mit überdurchschnittlichen Temperaturen ein weiteres Jahr in Folge sehr angespannt.

## 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 Sachsens-Anhalts in gasförmiger und gelöster Form hat in Folge dieser Maßnahmen extrem abgenommen. Obwohl der Eintrag bereits auf einem relativ geringen Niveau lag, hat er 2021 im Ver-

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



gleich zum Mittel der Jahre 2011–2020 im Freiland nochmals zwischen 0,2 und 0,6 kg je Hektar und mit der Gesamtdeposition zwischen 0,5 und 1,1 kg je Hektar abgenommen. 2021 betrug der Sulfatschwefeleintrag mit dem Bestandesniederschlag je Hektar unter Kiefer 1,9 kg in Colbitz, 2,0 kg in Klötze, 2,1 kg in Nedlitz sowie 2,9 kg unter Douglasie. Im Freiland lag er zwischen 1,5 (Klötze) und 1,9 kg je Hektar (Nedlitz).

### 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 2000–2020 um 48 %, die Ammoniakemissionen um 14 % 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 Emissionen sind die Stickstoffeinträge im Freiland und mit der Gesamtdeposition im Beobachtungszeitraum deutlich zurückgegangen.

Bezogen auf den Eintrag im Jahr 1998 betrug die Reduktion der Nitrateinträge (Mittel 2019–2021) im Freiland in Nedlitz 46 % und in Klötze 60 %. Die Reduktion mit der Gesamtdeposition fiel unter Kiefer mit 31 % in Nedlitz und 40 % in Klötze geringer aus als im Freiland. Im Zeitraum 2012–2021 konnte auf allen Freiflächen und auf allen Bestandesmessflächen eine weitere deutliche Abnahme des Nitratstickstoffeintrags beobachtet werden. 2021 betrug er je Hektar unter Kiefer zwischen 3,0 kg (Colbitz) und 4,4 kg (Nedlitz) und unter Douglasie 5,5 kg. Damit war der Nitratintrag auf der Douglasienfläche 1,6 kg je Hektar höher als auf der Kiefernfläche.

Die Reduktion der Ammoniuminträge betrug, bezogen auf das Jahr 1998, im Freiland 67 % (Nedlitz) bzw. 74 % (Klöt-



Foto: O. Schwerdfäger

Blick in die Messhütte einer Level II-Fläche

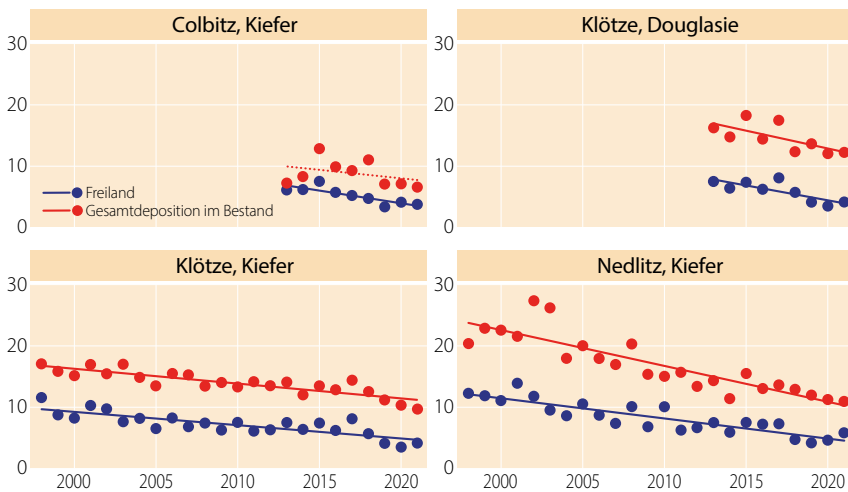
ze). Bei der Gesamtdeposition unter Kiefer betrug sie 50 % in Nedlitz und 64 % in Klötze. Damit fiel die Reduktion der Ammoniuminträge auf den untersuchten Flächen deutlich höher aus als die Reduktion der Ammoniakemissionen. Ursache hierfür könnte der Wegfall lokaler Emittenten sein. In den letzten 10 Jahren hat der Ammoniumeintrag in Klötze (Freiland und Kiefer) und in Colbitz (nur Freiland) weiter deutlich abgenommen, auf den Flächen Colbitz Kiefer, Klötze Douglasie sowie Nedlitz Freiland und Kiefer verharret der Eintrag von reduziertem Stickstoff mit jährlichen Schwankungen auf einem gleichbleibenden Niveau.

2021 lag er unter Kiefer zwischen 3,6 (Colbitz) und 6,6 (Nedlitz) kg je Hektar und unter Douglasie bei 6,8 kg je Hektar. Der Ammoniumeintrag unter Douglasie war damit 1 kg je Hektar höher als unter der in der Nähe gelegenen Kiefer.

Zwar konnten bundesweit die Stickoxidemissionen wesentlich stärker reduziert werden als die Ammoniakemissionen, auf den beiden langjährigen Untersuchungsflächen in Sachsen-Anhalt gingen die Stickstoffeinträge in Form von Ammonium jedoch stärker zurück als die in Form von Nitrat. In der Folge hat der relative Anteil des Ammoniums am anorganischen Stickstoffeintrag leicht abgenommen. 2021 lag er im Freiland zwischen 49 % (Colbitz) und 60 % (Nedlitz), unter Kiefer zwischen 54 % (Colbitz) und 60 % (Klötze, Nedlitz) und unter Douglasie bei 55 %.

Obwohl der anthropogen bedingte anorganische Stickstoffeintrag seit Beginn der Untersuchungen deutlich abgenommen hat, überschreitet er im Mittel der letzten 5 Jahre (2017–2021) mit Werten bis zu 12,2 kg je Hektar und Jahr unter Kiefer (Nedlitz) und 13,6 kg je Hektar und Jahr unter Douglasie (Klötze) nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Stickstoff, der nicht für das Wach-

### 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



Foto: M. Spielmann

tum der Vegetation benötigt wird, reichert sich im Ökosystem an. Im Fall von Störungen der Stoffkreisläufe durch Kalamitäten wie Windwurf oder Schädlingsbefall wird Stickstoff rasch mineralisiert, was bei hohen Stickstoffvorräten 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. Durch die vermehrte Lösung von Aluminium kommt es zu einem Säureschub. 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 Gesamtdosition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002). 2021 betrug der Gesamtsäureeintrag im Freiland zwischen 0,4 (Colbitz, Klötze) und 0,5 (Nedlitz), unter Kiefer zwischen 0,6 (Colbitz) und 0,9 (Nedlitz) sowie unter Douglasie 1,1 kmol<sub>c</sub> je Hektar.

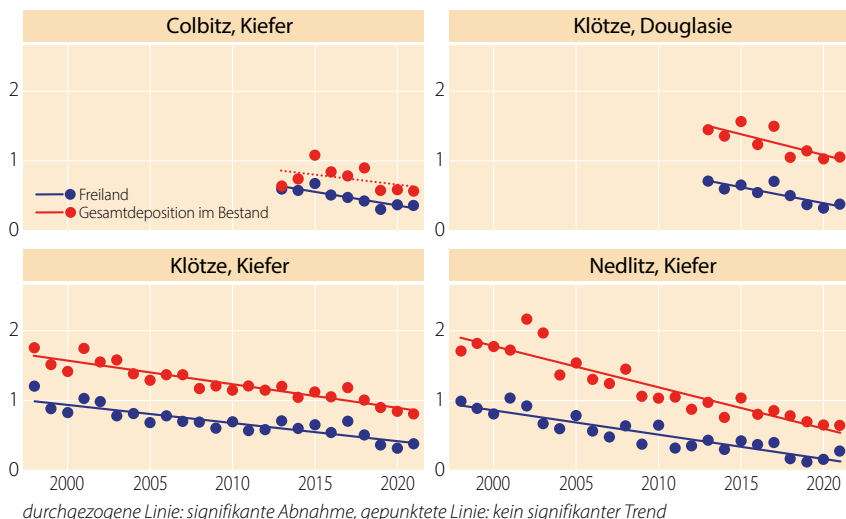
Ein Teil des Säureeintrags wird durch ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragene Basen neutralisiert. Diese Säureneu-

tralisationskapazität durch Baseneintrag lag 2021 zwischen knapp 0,2 kmol<sub>c</sub> je Hektar (Klötze, Kiefer) und 0,3 kmol<sub>c</sub> je Hektar (Nedlitz, Kiefer) bzw. zwischen 23 % (Klötze Kiefer) und 51 % (Colbitz, Kiefer) des Säureeintrags. Der Eintrag basischer Stäube spielte in Sachsen-Anhalt bis zum Einbau moderner Filteranlage in Kraftwerken nach der Wiedervereinigung eine große Rolle, heute hingegen nur noch in Einzelfällen, bspw. in der Nähe von Steinbrüchen. Ein weiterer Teil der Säureeinträge wird im Waldboden gepuffert, da bei der Verwitterung Basen freigesetzt werden.

Die nachhaltige Säurepufferkapazität 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.*

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



### Literatur

Gauger T, Anshelm F, Schuster H, Draaijers GPJ, Bleeker A, Erisman 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 nordost-deutschen 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