

# Stoffeinträge

**Birte Scheler**

<https://doi.org/10.5281/zenodo.10026908>

Mit dem Niederschlag gelangen Nähr- und Schadstoffe in gelöster Form in den Wald. Zusätzlich werden diese Stoffe in gas- und partikelförmiger Form eingetragen. Dieser atmosphärische Stoffeintrag stellt für das Ökosystem Wald jedoch 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 Kiefernbestände in Klötze (Altmark) und Nedlitz

(Fläming), seit 2013 zusätzlich in einen 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 Gesamtdositionsraten 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

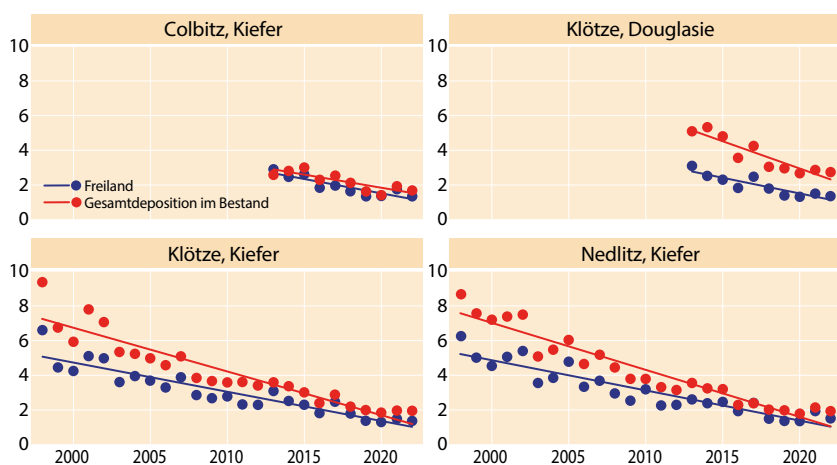
2022 war in Sachsen-Anhalt ein weiteres sehr trockenes Jahr. Die Niederschlagsmenge im Freiland betrug in Colbitz nur 388 mm, in Klötze fielen 437 mm und in Nedlitz 530 mm Niederschlag. Im Vergleich zum Mittel der Jahre 2012–2021 betrug die Abweichung in Colbitz -124 mm (-24 %), in Klötze -148 mm (-25 %) und in Nedlitz -81 mm (-13 %). Entsprechend gering war der Bestandesniederschlag, der den Bäumen für ihr Wachstum und zur Stärkung ihrer Vitalität zur Verfügung stand. Unter Kiefer betrug er in Colbitz 289 mm (-115 mm bzw. -28 %), in Klötze 338 mm (-105 mm bzw. -24 %) und in Nedlitz 431 mm (-25 mm bzw. -6 %). Dem Douglasienbestand standen nur 249 mm (-143 mm bzw. -36 %) Niederschlag zur Verfügung. Die vergleichsweise geringen Abweichungen beim Bestandesniederschlag in Nedlitz dürften Folge eines waldbaulichen Eingriffs sein. Der Wasserhaushalt der Bestände war 2022 durch geringe Niederschläge in Kombination mit überdurchschnittlichen Temperaturen ein weiteres Jahr sehr angespannt.



Foto: NW-FVA

Level II-Kiefernfläche Nedlitz

## 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

## 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 in gasförmiger und gelöster Form hat in Folge dieser Maßnahmen sehr deutlich abgenommen, eine Entwicklung, die bis 2022 angehalten hat. Im Vergleich zum Mittel der Jahre 2012–2021 hat er 2022 im Freiland nochmals zwischen 0,5 und 0,9 kg je Hektar und mit der Gesamtdepo-

Foto: J. Evers

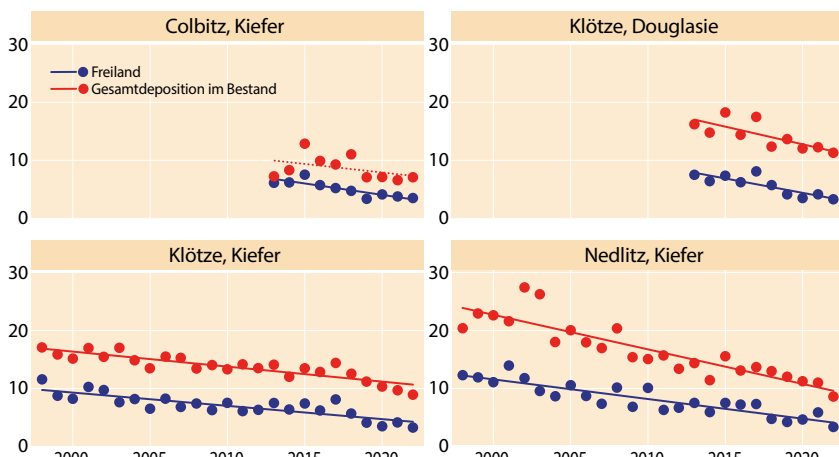


sition zwischen 0,6 und 1,1 kg je Hektar abgenommen. 2022 betrug der Sulfatschwefeleintrag mit dem Bestandesnieder-schlag je Hektar unter Kiefer 1,7 kg in Colbitz und 1,9 kg in Klötze und Nedlitz sowie 2,7 kg unter Douglasie (Klötze). Im Freiland lag er zwischen 1,3 (Colbitz, Klötze) und 1,5 kg je Hektar (Nedlitz).

### Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form) und als Ammonium (reduzierte Form) in das Ökosystem eingetragen. Die größten Emittenten für Stickoxide (NOx) waren 2021 die Bereiche „Verkehr“ (37 %), „Energiewirtschaft“ (24 %) sowie „private Haushalte und Kleingewerbe“ (12 %). Die Ammoniakemissionen stammen zu ca. 95 % aus der Landwirtschaft (UBA, 2023). Aufgrund der von 1990 bis 2021 erfolgten Reduktion der Emissionen (NOx -66 %, Ammoniak -29 %), sind die Stickstoff-einträge im Freiland und mit der Gesamtdeposition im Beobachtungszeitraum deutlich zurückgegangen.

#### 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

Bezogen auf das fünfjährige Mittel zu Beginn der Untersuchungen (1998–2002) betrug die Reduktion der Nitrateinträge (Mittel 2020–2022) im Freiland in Klötze 60 % und in Nedlitz 50 % sowie mit der Gesamtdeposition unter Kiefer 42 % (Klötze) bzw. 44 % (Nedlitz). In den vergangenen 10 Jahren (2013–2022) hat der Nitratstickstoffeintrag sowohl mit der Gesamtdeposition (Ausnahme Colbitz Kiefer) als auch im Freiland weiter deutlich abgenommen. 2022 betrug er je Hektar unter Kiefer zwischen 3,1 kg (Colbitz) und 4,0 kg (Nedlitz), 5,3 kg unter Douglasie (Klötze) und im Freiland 1,5 kg (Colbitz, Klötze) bzw. 1,6 kg (Nedlitz).

Die Reduktion der Ammoniuminträge betrug im Freiland 65 % (Klötze) bzw. 68 % (Nedlitz) und mit der Gesamtdeposition 36 % (Klötze) bzw. 61 % (Nedlitz). In den letzten 10 Jahren ist der Ammoniumeintrag im Freiland und mit der Gesamtdeposition (Ausnahme Colbitz Kiefer) erfreulicherweise weiter gesunken. Er betrug 2022 unter Kiefer je Hektar 4 kg in Colbitz, 5,6 kg in Klötze und 4,5 kg in Nedlitz, unter Douglasie (ebenfalls Klötze) lag er bei 6 kg und im Freiland bei 1,8 kg (Klötze, Nedlitz) bzw. 2,0 kg in Colbitz.

Der Anteil des Ammoniums am anorganischen Stickstoffeintrag hat im Beobachtungszeitraum seit 1998 in Nedlitz sowohl im Freiland als auch der Gesamtdeposition abgenommen, während er in Klötze unter Kiefer signifikant angestiegen, im Freiland jedoch gleich geblieben ist. Im Mittel der Jahre 2020 bis 2022 betrug er im Freiland zwischen 53 % (Klötze) und 57 % (Nedlitz), unter Kiefer zwischen 56 % (Colbitz) und 61 % (Klötze) und unter Douglasie 54 %.

Obwohl der anthropogen bedingte anorganische Stickstoffeintrag seit Beginn der Untersuchungen deutlich abgenommen hat, überschreitet er im Mittel der letzten 5 Jahre (2018–2022) mit Wer-

ten bis zu 11,1 kg je Hektar und Jahr unter Kiefer (Nedlitz) und 12,3 kg unter Douglasie (Klötze) nach wie vor den Bedarf der Wälder 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 Borkenkäferkalamität, wie sie seit 2018 in anderen Trägerländer der NW-FVA großflächig auftraten, wird der Stickstoff rasch mineralisiert und es kommt zu erhöhten Nitratausträgen. Nitrat wird im Bodenwasser von Nährstoffkationen wie Calcium, Magnesium oder Kalium sowie sauren Kationen wie Aluminium begleitet. Dadurch verliert das Ökosystem einerseits wichtige Nährstoffe aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden, andererseits erhöht sich die Konzentration von Kationen wie z. B. Aluminium in der Bodenlösung, die für die Vegetation schädlich sind. Angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer werden ggf. durch hohe Nitratausträge gefährdet. Eine weitere Reduktion der Stickstoffemissionen ist zum Schutz der Ökosysteme wichtig.

### Gesamtsäureeintrag

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002). 2022 betrug der Gesamtsäureeintrag im Freiland 0,3 (Colbitz, Klötze, Nedlitz), unter Kiefer zwischen 0,6 (Colbitz) und 0,7 (Klötze, Nedlitz) sowie unter Douglasie 1,0 kmol<sub>c</sub> je Hektar. Ein Teil des Säureeintrags wird durch ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragene Basen neutralisiert. Diese Säureneutralisationskapazität durch Baseneintrag lag 2022 zwischen 0,2 kmol<sub>c</sub> je Hektar (Klötze, Kiefer) und 0,4 kmol<sub>c</sub> je Hektar (Nedlitz, Kiefer) bzw. zwischen 28 % (Klötze Kiefer) und 58 % (Nedlitz, 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 jedoch 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 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

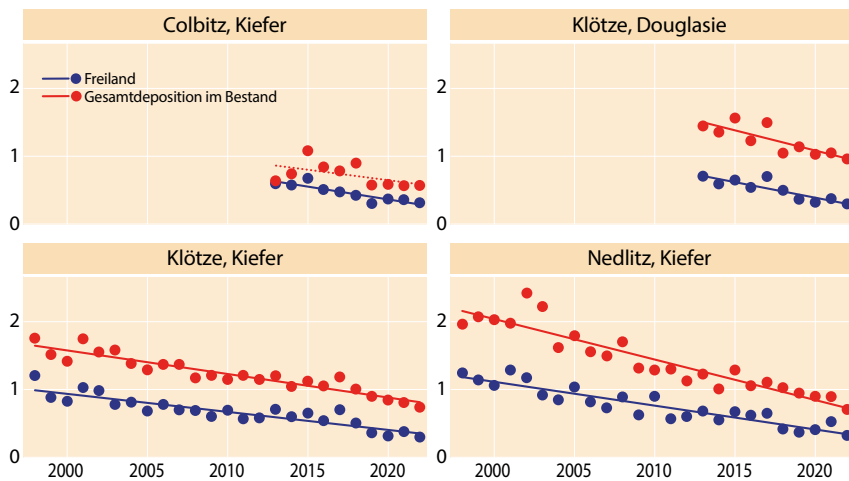
Gauger, T.; Anshelm, F.; Schuster, H.; Draaijers, G. P. J.; Bleeker, A.; Erisman, J. W.; Vermeulen, A. T. & Nagel, H.-D. (2002): Kartierung ökosystembezogener Langzeittrends atmosphärischer Stoffeinträge und Luftschadstoffkonzentrationen in Deutschland und deren Vergleich mit Critical Loads und Critical Levels. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU/UBA, FE-Nr. 299 42 210, Institut für Navigation, Univ. Stuttgart. 207 S.

UBA (2023): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/stickstoffoxid-emissionen#entwicklung-seit-1990>

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.

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



Level II-Douglasienfläche Klötze

Foto: NW-FVA