

Atmosphärische Stoffeinträge bis 2024

Birte Scheler

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17542843>

Nähr- und Schadstoffe werden in gelöster Form mit dem Niederschlag sowie gas- und partikelförmig mit der Luft 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, weil hohe Einträge von Säure und Stickstoff durch Versauerung und Eutrophierung das chemische Bodenmilieu verändern. Die Höhe der Stoffeinträge wird durch Faktoren wie Niederschlagsmenge, -intensität und -verteilung, Windgeschwindigkeit, Baumart, Bestandeshöhe und Bestockungsgrad, Kronenrauigkeit oder lokale Emittenten bestimmt. Fichten- und Douglasienbestände sind beispielsweise wegen ihrer dichteren Benadelung stärker durch Stoffeinträge belastet als Laubwälder. 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 (Klötze) und auf dem Großlysimeter in Colbitz (Kiefer) bestimmt. Jeder Bestandesmessfläche (Kronentraufe) ist eine Freifläche (Freilandniederschlag) zugeord-

net. Mit Hilfe eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1994) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdpositionsraten berechnet.

Das umfangreiche Programm des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings ermöglicht außerdem die Untersuchung der Folgen und Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme, die mit erhöhten Stoffeinträgen verbunden sein können.

Niederschlag

Das Jahr 2024 war relativ niederschlagsreich. Die Höhe des Freilandniederschlags lag zwischen 626 mm (Nedlitz) und 690 mm (Klötze). Im Vergleich zum 10-jährigen Mittel der Jahre 2014–2023 wurden zwischen 25 mm (Nedlitz) und 113 mm (Colbitz) mehr Niederschlag registriert. Die Höhe des Bestandesniederschlags betrug zwischen 462 mm (Klötze, Douglasie) und 554 mm (Klötze, Kiefer). Hier zeigt sich der Einfluss der Bestandessituationen (Baumart, Anzahl der Bäume je Hektar) auf die Höhe der Kronentraufe.

Relativ gesehen fielen im Freiland zwischen 104 % (Nedlitz) und 122 % (Colbitz), im Bestand zwischen 110 % (Nedlitz, Kiefer) und 130 % (Colbitz, Kiefer) des 10-jährigen Niederschlagsmittels (2014–2023).

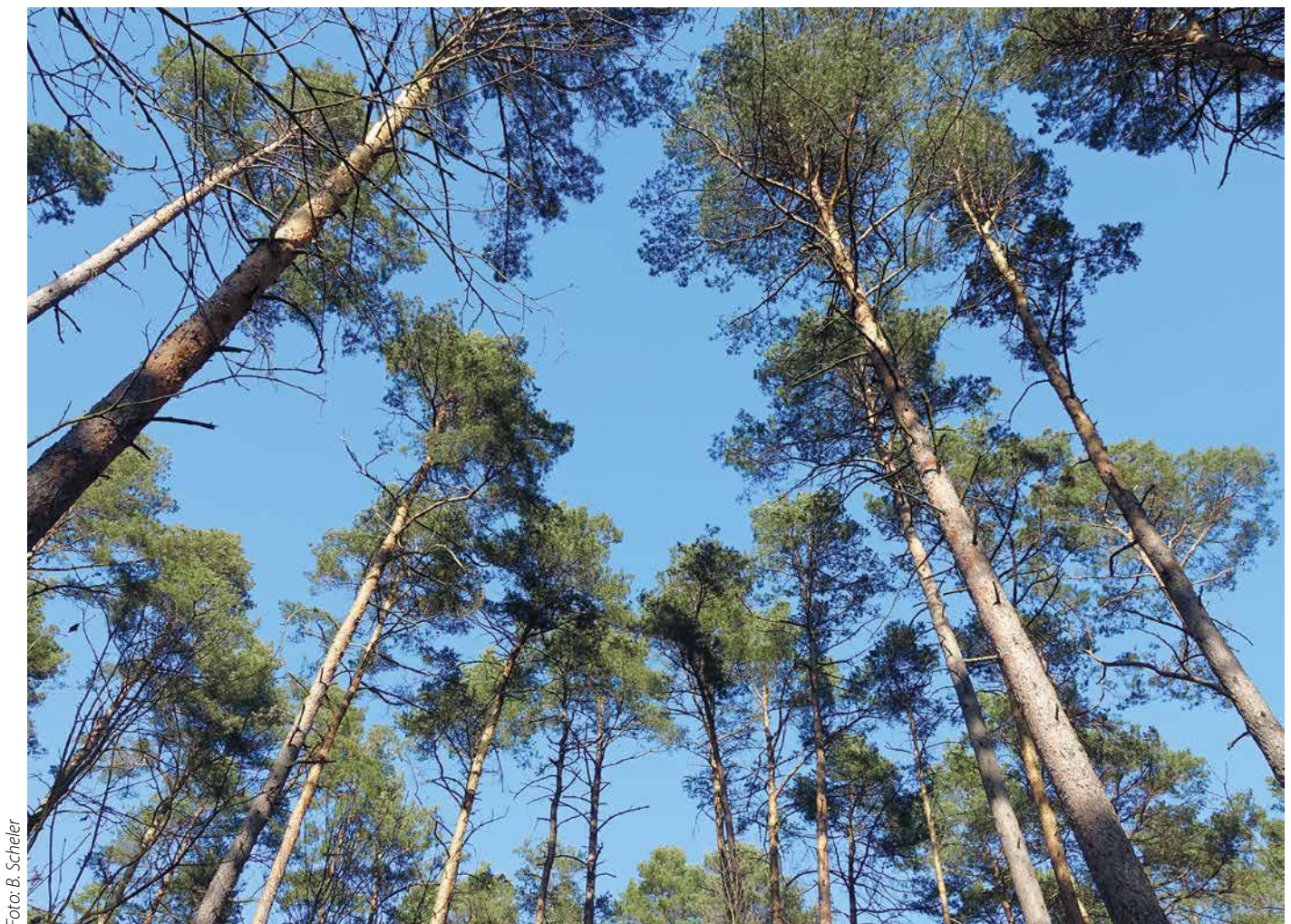


Foto: B. Scheler

Level II-Kiefernfläche Klötze



Foto: B. Scheler

Level II-Douglasienfläche Klötze

Schwefeleintrag

Durch die Substitution der Braunkohle als Hauptenergieträger nach der Wiedervereinigung, die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung sowie die Einführung schwefelarmer Kraft- und Brennstoffe wurden die Schwefeldioxidemissionen in den letzten Jahrzehnten wirksam reduziert. Infolge dieses Maßnahmenpakets sind die ehemals sehr hohen Schwefeleinträge in die Waldökosysteme seit vielen Jahren drastisch zurückgegangen.

Trotz des bereits erreichten niedrigen Niveaus zeigt sich auf allen untersuchten Flächen in Sachsen-Anhalt sowohl im Freiland als auch mit der Gesamtdosition im Bestand in den letzten 10 Jahren weiterhin eine signifikante Abnahme der Schwefeleinträge.

2024 betrug der Sulfatschwefeleintrag mit dem Bestandesniederschlag je Hektar unter Kiefer 1,5 kg in Nedlitz, 1,6 kg in Colbitz, 1,7 kg in Klötze und 2,2 kg unter Douglasie (Klötze). Im Freiland lag er bei 1,3 kg (Nedlitz) und 1,4 kg je Hektar (Colbitz, Klötze).

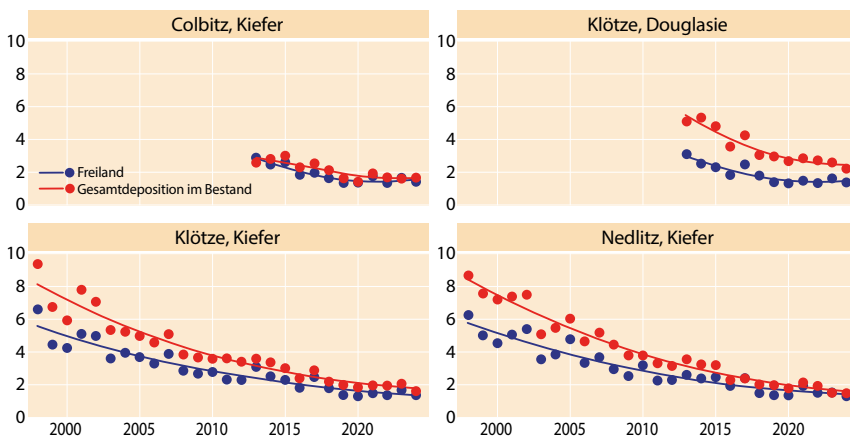
Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form: 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 2015–2024 zwischen 55 % und 60 %. Seit Untersuchungsbeginn ist der Ammoniumanteil am Stickstoffeintrag in Nedlitz (Freiland und Kiefer) deutlich zurückgegangen, während er in Klötze unter Kiefer leicht angestiegen ist.

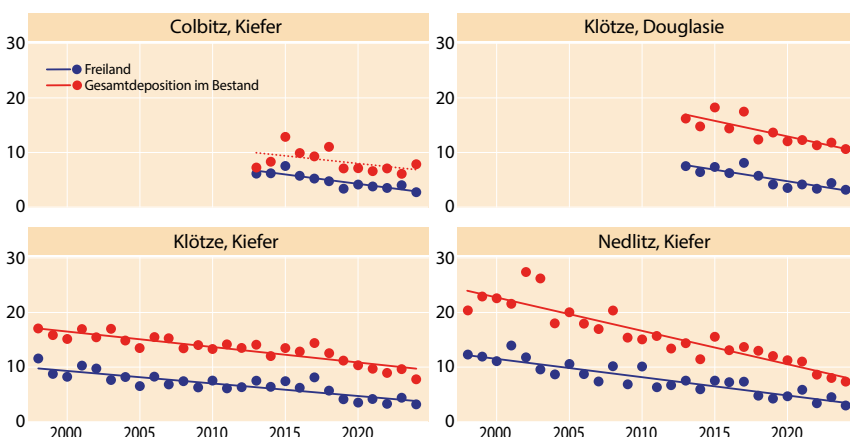
Der Nitratstickstoffeintrag hat seit Untersuchungsbeginn im Freiland und mit der Gesamtdosition auf allen untersuchten Flächen signifikant abgenommen. Diese deutliche Abnahme hat sich in den vergangenen zehn Jahren auf allen Flächen fortgesetzt. 2024 betrug er im Freiland zwischen 1,2 kg (Nedlitz, Colbitz) und 1,4 kg (Klötze) und unter Kiefer (Gesamtdosition) zwischen 2,7 kg (Colbitz) und 3,3 kg (Klötze) je Hektar. Unter Douglasie belief sich die Gesamtdosition von Nitratstickstoff im Jahr 2024 pro Hektar auf 5,5 kg (Klötze) und war damit gut 1,5mal so hoch wie unter der Kiefer in Klötze.

Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf den Intensiv-Monitoringflächen in Sachsen-Anhalt seit Untersuchungsbeginn ebenfalls signifikant

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



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, gepunktete Linie: kein signifikanter Trend

abgenommen. In den letzten 10 Jahren (2015–2024) wurde im Freiland und auf allen Bestandesflächen eine weitere signifikante Abnahme gemessen. Im Freiland lag er 2024 zwischen 1,5 kg (Colbitz) und 1,8 kg (Klötze) je Hektar. Die Ammoniumstickstoffgesamtdeposition betrug unter Kiefer zwischen 4,2 kg (Nedlitz) und 5,1 kg (Colbitz). Unter Douglasie (Klötze) betrug sie 5,1 kg je Hektar und war damit etwas höher als im benachbarten Kiefernbestand.

Durch die Umsetzung verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffemissionen haben die anorganischen Stickstoffeinträge seit Untersuchungsbeginn deutlich abgenommen. Die mittleren jährlichen Abnahmen von Nitrat- bzw. Ammoniumstickstoff in Höhe von 0,1 kg bis 0,4 kg je Hektar seit 1998 erscheinen auf den ersten Blick gering. In der Summe hat der anorganische Stickstoffeintrag in diesem Zeitraum unter Kiefer in Klötze jedoch um gut 7 kg und in Nedlitz um knapp 16 kg je Hektar abgenommen. Dies entspricht einer Reduzierung der Stickstoffeinträge seit 1998 um 45 % (Klötze) bzw. 64 % (Nedlitz).

Trotz der beobachteten Abnahme sind die anthropogen bedingten atmosphärischen anorganischen Stickstoffeinträge je Hektar und Jahr mit Werten von 9,7 kg unter Kiefer (Klötze, Nedlitz) und 11,9 kg unter Douglasie (Klötze) (Mittel 2020–2024) immer noch hoch. Sie sollten jedoch in allen Wäldern in einer Größenordnung liegen, die durch die internen Regula-

tionsmechanismen der Ökosysteme (u. a. Pflanzenaufnahme, Speicherung im Boden) kompensiert werden kann. Bei einer langfristigen Überschreitung der Belastungsgrenzen können nach dem bisherigen Kenntnisstand schädigende Effekte nicht ausgeschlossen werden.

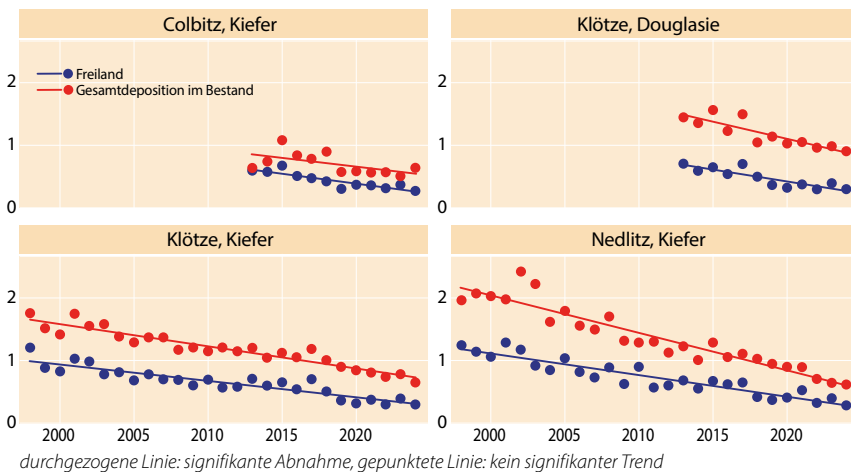
Negative Auswirkungen von jahrzehntelangen zu hohen Stickstoffeinträgen können gegenwärtig im Harz beobachtet werden. Durch Borkenkäferbefall sind in den letzten Jahren riesige Freiflächen entstanden. Das veränderte Mikroklima auf diesen Freiflächen fördert die rasche Mineralisierung des in der organischen Substanz des Bodens gebundenen Stickstoffs. Die freigesetzten Ionen werden jedoch aufgrund der fehlenden Baumschicht nur zu einem sehr kleinen Teil aufgenommen. Entsprechend sind kurzfristig erhöhte Nitratkonzentrationen im Sickerwasser die Folge. Da die Ladungssumme der Ionen im Sickerwasser ausgeglichen sein muss, führen hohe Austräge von Anionen (wie Nitrat) auch zu hohen Austrägen an Begleitkationen wie Calcium, Magnesium, Kalium und Aluminium mit dem Sickerwasser. Hierdurch verlieren die Ökosysteme zusätzlich wichtige Nährstoffe aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden. Angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundwässer werden ggf. durch hohe Nitratausträge sowie hohe Konzentrationen saurer Kationen wie Aluminium gefährdet. Zum Schutz der Ökosysteme ist eine weitere Reduktion der Stickstoffemissionen wichtig.



Foto: B. Scheeler

Level II-Kiefernfläche Klötze

Gesamtsäureeintrag im Freiland und im Bestand in kmol_c je Hektar und Jahr



Gesamtsäureeintrag

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002). 2024 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland rund 0,3 kmol_c, unter Kiefer rund 0,6 kmol_c und unter Douglasie 0,9 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



Foto: B. Scheler

Bodenprofil auf der Level II-Douglasienfläche Klötze



Foto: B. Scheler

Level II-Douglasienfläche Klötze

Gesamtsäureeintrag ab, erhält man den ökosystemar bedeutsamen Netto-Gesamtsäureeintrag (Gauger et al. 2002).

Auf den Intensiv-Monitoringflächen Sachsen-Anhalts wurden im Mittel der Jahre 2020–2024 in Klötze 25 % (Kiefer, Douglasie), in Nedlitz 47 % (Kiefer) und in Colbitz 53 % (Kiefer) der Gesamtsäureeinträge neutralisiert.

Obwohl die Gesamtsäureeinträge deutlich zurückgegangen sind (vgl. Abb. oben), zeigen viele Standorte erhöhte Konzentrationen von basischen und/oder sauren Kationen im Sickerwasser. Dieses gilt insbesondere für Standorte, die in der Vergangenheit hohen Schwefeldepositionen ohne den zusätzlichen Eintrag basischer Stäube ausgesetzt waren. Auf entsprechenden Standorten werden standortsangepasste Bodenschutzkalkungen erforderlich sein, um das Nährstoffangebot und die Filterfunktion der Waldböden langfristig zu erhalten und zu stabilisieren.

anthropogen: durch menschliche Aktivitäten verursacht

Deposition: Ablagerung von Stoffen

Eutrophierung: Nährstoffanreicherung

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 kmol_c je Hektar.

Literatur

- Gauger, T.; Anshelm, F.; Schuster, H.; Draaijers, G. P. J.; Bleeker, A.; Erismann, 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. & Hüttermann, A.: Effects of Acid Rain on Forest Processes. Wiley-Liss. New York. S. 1-50.