Atmosphärische Stoffeinträge bis 2025

Birte Scheler
https://doi.org/10.5281/zenodo.23184080

Nähr- und Schadstoffe werden in gelöster Form mit dem Niederschlag in Wälder eingetragen. Zusätzlich filtern die Kronenoberflächen effektiv gasförmige Stoffe und (Fein-)Stäube aus der Luft (Immissionsschutzfunktion). Der atmosphärische Stoffeintrag ist deshalb in Wäldern besonders hoch. Die teilweise extrem hohen Schwefel- und Stickstoffeinträge der Vergangenheit haben das chemische Bodenmilieu durch Versauerung und Eutrophierung negativ verändert. Die Höhe der Stoffeinträge wird durch Faktoren wie Niederschlagsmenge, -intensität und -verteilung, Windgeschwindigkeit, Baumart, Bestandeshöhe und Bestockungsgrad, Kronenrauigkeit oder lokale Emittenten bestimmt. So sind in den niederschlagsreichen Lagen der Mittelgebirge die Stoffeinträge höher als in der niederschlagsarmen Wetterau oder der Rhein-Main-Ebene. Fichten- und Douglasienbestände sind wegen der ganzjährigen dichteren Benadelung stärker durch Stoffeinträge belastet als Laubwälder. In Hessen werden seit 1984 Stoffeintragsmessungen durchgeführt. Aktuell umfasst dieses Monitoringprogramm sechs Buchenbestände und je einen Fichten- und Kiefernbestand. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1994) werden aus den gemessenen Stoffflüssen in den Waldbeständen und auf benachbarten Freiflächen Gesamtdepositionsraten berechnet.

Niederschlag

Die Höhe der Niederschläge erklärt einen Teil der Schwankungen der Höhe der Stoffeinträge zwischen einzelnen Jahren. 2025 zählt mit Ausnahme des Hess. Rieds zu den besonders niederschlagsarmen Jahren seit Beobachtungsbeginn.

Im Freiland fielen 2025 zwischen 68 % (Spessart) und 99 % (Hess. Ried) des Mittels der vorangegangenen 10 Jahre (2015–2024). Die absolute Niederschlaghöhe lag zwischen 576 mm (Zierenberg) und 812 mm (Fürth im Odenwald).

Der Bestandesniederschlag der Buchenflächen betrug 2025 zwischen 381 mm (Kellerwald) und 669 mm (Fürth im Odenwald). Unter Fichte wurden 518 mm (Fürth im Odenwald) erfasst und unter Kiefer 568 mm (Hess. Ried). Damit lag der Bestandesniederschlag zwischen 88 mm (Kellerwald, Buche) und 263 mm (Spessart, Buche) unter dem Mittel der letzten 10 Jahre (2015–2024).

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 verringerte sich der Sulfatschwefeleintrag in Wälder seit Beginn der Messungen um bis zu 95 %.

2025 betrug der Eintrag je Hektar unter Buche zwischen 1,2 kg (Kellerwald) und 1,9 kg (Fürth im Odenwald, Zierenberg), unter Fichte 2,0 kg (Fürth im Odenwald) und unter Kiefer 1,1 kg (Hessisches Ried). Im Freiland lag er zwischen 0,8 kg (Spessart) und 1,9 kg je Hektar (Krofdorf).

Schwefeleintrag (SO_4-S) in kg je Hektar und Jahr

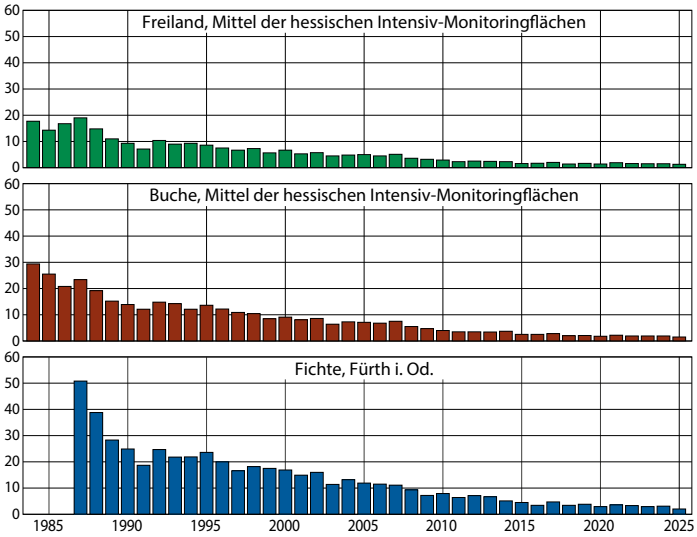




Foto: U. Klinck

Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) und als Ammonium (reduzierte Form: landwirtschaftliche Quellen) in Ökosysteme eingetragen. Im Freiland und unter Buche lag der Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag im 10-jährigen Mittel der Jahre 2016–2025 bei 54 %, unter Fichte bei 55 % und unter Kiefer bei 58 %.

Der Einsatz von Katalysatoren (Verkehrsbereich) und die Entstickung der Rauchgase von Großfeuerungsanlagen führte zu einer deutlichen Abnahme der NO_X-Emission seit den 1990er Jahren. In der Folge sank der Nitrateintrag spürbar. 2025 betrug der Nitratstickstoffeintrag je Hektar im Freiland zwischen 0,5 kg (Spessart) und 2,1 kg (Fürth im Odenwald). Die Gesamtdeposition unter Buche lag zwischen 2,6 kg (Kellerwald, Zierenberg) und 5,3 kg (Fürth im Odenwald) je Hektar. Im Fichtenbestand in Fürth betrug sie 6,8 kg, im Hessischen Ried unter Kiefer 2,0 kg je Hektar.

Durch Umsetzung von Maßnahmen in der Landwirtschaft wie bspw. der emissionsarmen Lagerung und Ausbringung von Düngern, der Reinigung der Stallabluft oder einer optimierten Fütterung, sanken die Ammoniakemissionen. In der Folge ging der Ammoniumstickstoffeintrag zurück.

Der Ammoniumstickstoffeintrag je Hektar betrug 2025 im Freiland zwischen 0,5 kg (Spessart) und 4,0 kg (Fürth im Odenwald). Die Gesamtdeposition belief sich unter Buche auf Werte zwischen 2,8 kg (Krofdorf) und 6,2 kg (Zierenberg). Unter Fichte lag sie bei 8,8 kg (Fürth im Odenwald) und unter Kiefer bei 3,2 kg je Hektar (Hessisches Ried).

Der anthropogen bedingte anorganische Stickstoffeintrag hat seit Beginn der Untersuchungen deutlich abgenommen. Im Mittel der letzten fünf Jahre (2021–2025) lag er je Hektar und Jahr unter Buche zwischen 6,6 kg (Kellerwald) und 12,5 kg (Fürth im Odenwald), unter Fichte (Fürth im Odenwald) bei 16,4 kg und unter Kiefer bei 5,2 kg. Trotz des deutlichen Rückgangs sind die Stickstoffeinträge in einigen Gebieten immer noch hoch. Sie sollten jedoch in allen Ökosystemen in einer Größenordnung liegen, die durch interne Regulationsmechanismen (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.

Das veränderte Mikroklima auf Freiflächen, die z. B. durch Sturmwürfe und Kalamitäten entstehen, fördert die Mineralisierung des in der organischen Substanz des Bodens gebundenen Stickstoffs. Die freigesetzten Ionen werden mangels Nährstoffaufnahme durch die Bäume nur zu einem sehr kleinen Teil durch die Bodenvegetation aufgenommen. Kurzfristig erhöhte Nitratkonzentrationen im Sickerwasser sind die Folge. Da die Ladungssumme der Ionen im Sickerwasser ausgeglichen ist, führen hohe Austräge von Anionen (wie Nitrat) auch zu hohen Austrägen an Kationen wie Calcium, Magnesium, Kalium und Aluminium. Hierdurch verlieren die Ökosysteme zusätzlich wichtige Nährstoffe aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden. Angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer werden ggf. durch erhöhte Nitratausträge sowie hohe Konzentrationen saurer Kationen wie Aluminium belastet. Zum Schutz der Ökosysteme ist eine weitere Reduktion der Stickstoffemissionen wichtig.

Stickstoffeintrag (NH_4-N + NO_3-N) in kg je Hektar und Jahr

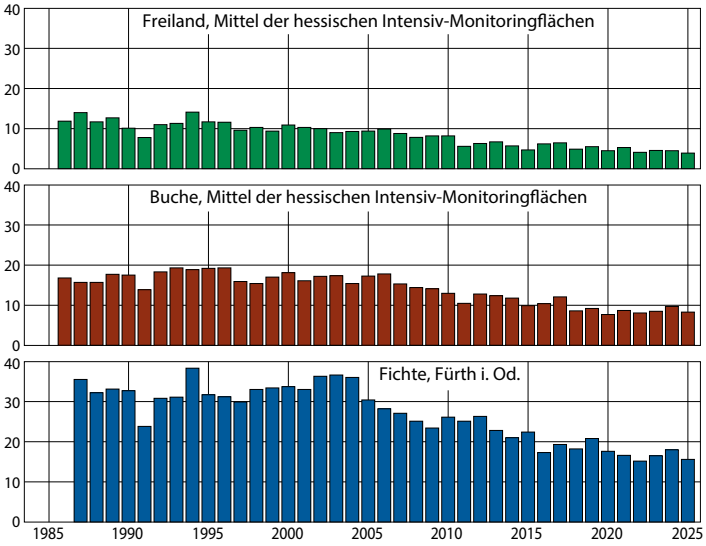




Foto: B. Scheler

Niederschlagssammler auf der Level II-Fläche Zierenberg

Gesamtsäureeintrag

Der Gesamtsäureeintrag in Ökosysteme berechnet sich als Summe der Gesamtdeposition von Nitrat- und Ammoniumstickstoff, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002). Durch den deutlichen Rückgang insbesondere des Schwefel- aber auch des Stickstoffeintrags hat die Säurebelastung in den Wäldern deutlich abgenommen. 2025 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar unter Kiefer 0,4 $kmol_c$ (Hess. Ried), unter Fichte 1,3 $kmol_c$ (Fürth im Odenwald) und unter Buche zwischen 0,5 $kmol_c$ (Kellerwald) und 0,9 $kmol_c$ (Fürth im Odenwald, Zierenberg). Im Freiland lag er 2024 zwischen 0,1 $kmol_c$ (Spessart) und 0,5 $kmol_c$ (Fürth im Odenwald) je Hektar.

Ein Teil des Säureeintrags wird durch ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragene Basen gepuffert. Auf den hessischen Flächen des Intensiven Monitorings wurden im Mittel der Jahre 2021–2025 unter Buche zwischen 23 % (Fürth im Odenwald) und 39 % (Zierenberg), unter Fichte (Fürth im Odenwald) 27 % und unter Kiefer (Hess. Ried) 48 % der Gesamtsäureeinträge auf diese Weise neutralisiert.

Gesamtsäureeintrag in $kmol_c$ je Hektar und Jahr

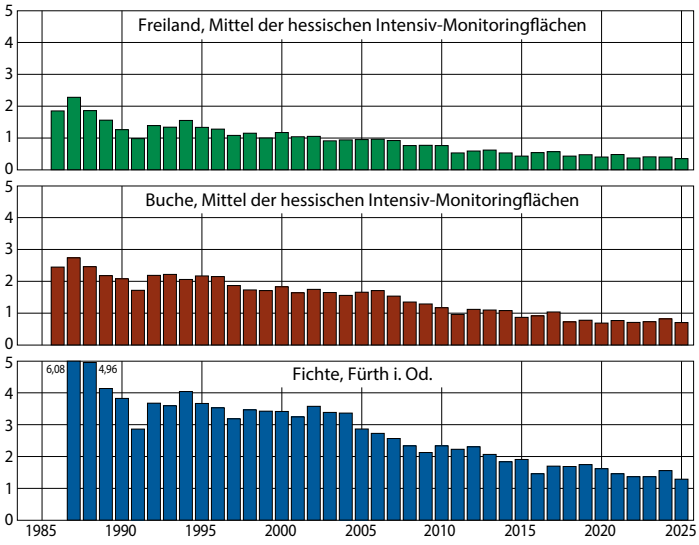




Foto: M. Spielmann



Foto: B. Scheler

Streusammler auf der Level II-Fläche Zierenberg

Obwohl die Gesamtsäureeinträge deutlich zurückgegangen sind (vgl. Abb. links) zeigen viele Standorte 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 sind nach wie vor standortsangepasste Bodenschutzkalkungen erforderlich, 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., 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. und Hüttermann A.: Effects of Acid Rain on Forest Processes. Wiley-Liss. New York. S. 1-50.