

# Stoffeinträge

**Birte Scheler**

<https://doi.org/10.5281/zenodo.8430932>

Mit dem Niederschlag gelangen Nähr- und Schadstoffe in gelöster Form in den Wald. Zusätzlich werden diese Stoffe in gas- und partikelförmiger Form eingetragen. Der 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. Die Höhe der Stoffeinträge wird durch Faktoren wie Niederschlagsmenge, -intensität und -verteilung, Windgeschwindigkeit, Baumart, Bestandeshöhe und Bestockungsgrad, Kronenrauigkeit oder lokale Emittenten bestimmt. So sind die Stoffeinträge in den niederschlagsreichen Lagen der Mittelgebirge höher als beispielsweise in der niederschlagsarmen Wetterau. Fichten- und Douglasienbestände sind wegen der ganzjährigen und im Vergleich mit Kiefern dichteren Benadelung stärker durch Stoffeinträge belastet als Buchen-, Eichen- und Kiefernbestände.

In Hessen werden seit 1984 die Stoffeinträge in Wälder erfasst, aktuell in sechs Buchenbeständen, je einem Fichten- und Kiefernbestand sowie auf zugeordneten Freiflächen. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdositionsraten berechnet.

## Niederschlag

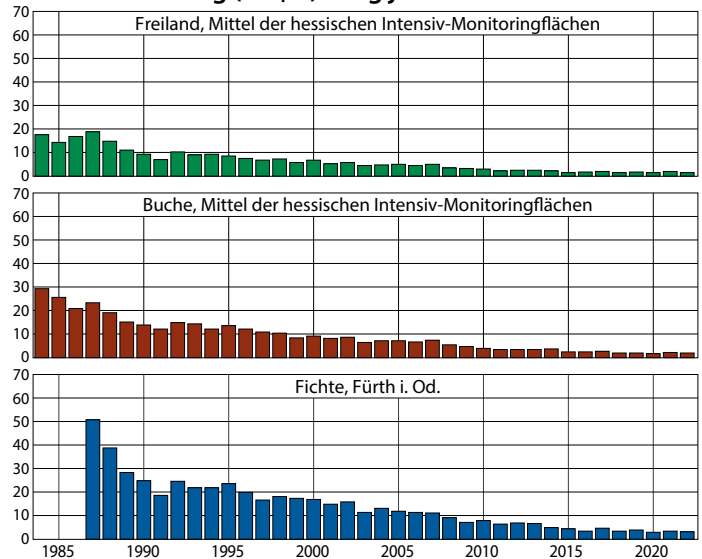
2022 war der Niederschlag auf allen untersuchten Monitoringflächen geringer als im 10-jährigen Mittel 2012–2021. Die geringsten negativen Abweichungen im Freiland wurden im Spessart (-3 % bzw. -8 mm), die höchsten im Hessischen Ried (-14 % bzw. -88 mm) gemessen.

Der Bestandesniederschlag der Buchenflächen betrug 2022 zwischen 435 mm (Kellerwald) und 765 mm (Spessart, Fürth im Odenwald). Unter Fichte wurden 616 mm (Fürth im Odenwald) registriert und unter Kiefer im Hessischen Ried 492 mm. Die Niederschlagsmengen im Freiland lagen zwischen 526 mm (Hessisches Ried) und 896 mm (Fürth im Odenwald).

## Schwefeleintrag

Durch die Umsetzung zahlreicher Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung und die Einführung schwefelarmer Kraft- und Brennstoffe seit Mitte der 1980er Jahre ging der Sulfatschwefeleintrag in Wälder sehr stark zurück. 2022 betrug er zwischen 6 und 10 % des Eintrags von 1987 und lag je Hektar unter Buche zwischen 1,5 kg (Kellerwald, Krofdorf, Hessisches Ried) und 2,7 kg (Fürth im Odenwald), unter Fichte bei 3,3 kg (Fürth im Odenwald) und unter Kiefer bei 1,2 kg (Hessisches Ried). Im Freiland betrug er im Hessenmittel 1,6 kg je Hektar mit Einträgen zwischen 1,2 kg (Krofdorf, Hessisches Ried) und 2,1 kg je Hektar (Spessart).

## Schwefeleintrag (SO<sub>4</sub>-S) in kg je Hektar und Jahr



## Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (oxidierte Form) und als Ammonium (reduzierte Form) in das Ökosystem eingetragen. Die größten Emittenten für Stickoxide (NO<sub>x</sub>) 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 (NO<sub>x</sub> -66 %, Ammoniak -29 %) sind die Stickstoffeinträge im Freiland und mit der Gesamtdosition im Beobachtungszeitraum deutlich zurückgegangen.

Da die Stickoxidemissionen stärker reduziert werden konnten als die Ammoniakemissionen, hat der relative Anteil des Ammoniums am anorganischen Stickstoffeintrag zugenommen. Im Mittel der Jahre 2018–2022 lag sein Anteil zwischen 47 % und 56 % (Freiland), 47 % und 63 % unter Buche bzw. 55 % unter Fichte.

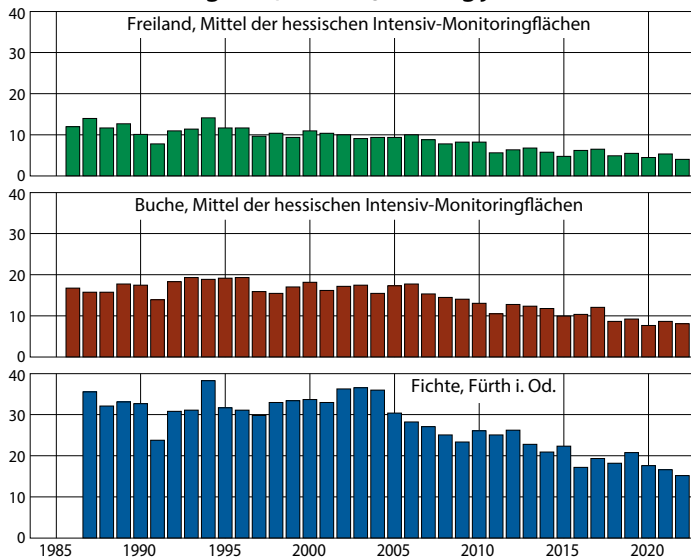
2022 betrug der Nitratstickstoffeintrag je Hektar im Hessenmittel im Freiland 1,8 kg und unter Buche 3,6 kg mit Werten zwischen 2,2 kg (Hessisches Ried) und 4,6 kg (Zierenberg). Im Fichtenbestand in Fürth im Odenwald betrug er 6,7 kg und im Hessischen Ried unter Kiefer 2,2 kg je Hektar.



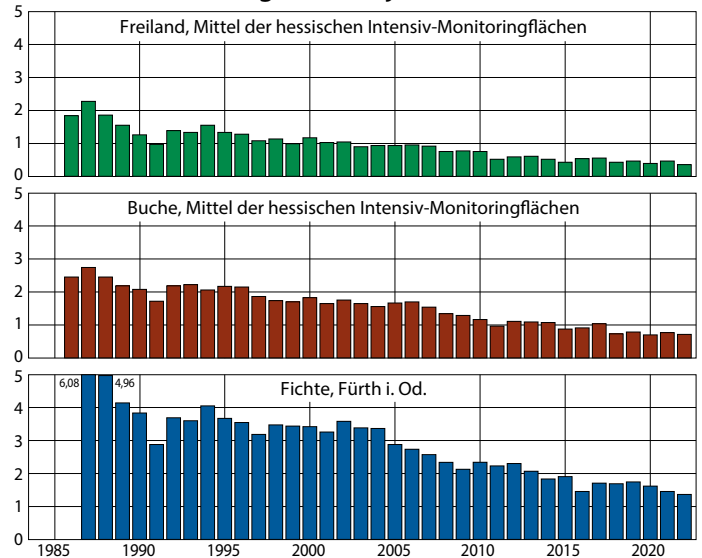
Kippsschale zur Erfassung des Stammablaufs (Zierenberg)

Foto: B. Scheler

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



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



Der Ammoniumstickstoffeintrag je Hektar betrug 2022 im Hessenmittel im Freiland 2,2 kg mit einer Spannweite zwischen 1,2 kg (Spessart) und 3,7 kg (Fürth im Odenwald) und unter Buche 4,5 kg mit Werten zwischen 2,8 kg (Krofdorf) und 6,4 kg (Fürth im Odenwald). Im Fichtenbestand lag er bei 8,5 kg (Fürth im Odenwald) und unter Kiefer bei 2,4 kg je Hektar (Hessisches Ried).

Obwohl der anthropogen bedingte anorganische Stickstoffeintrag seit Beginn der Untersuchungen deutlich abgenommen hat, überschreitet er im Mittel der letzten 5 Jahre (2018–2022) mit Werten bis zu 12,1 kg je Hektar und Jahr unter Buche (Zierenberg) und 17,7 kg je Hektar und Jahr unter Fichte (Fürth im Odenwald) weiterhin 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 Schädlingsbefall, wie sie seit 2018 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 und schädlichen Kationen wie Aluminium begleitet. Dadurch verliert das Ökosystem wichtige Nährstoffe aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden. Angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer werden ggf. durch hohe Nitratausträge gefährdet. Eine weitere Reduktion der Stickstoffemissionen ist zum Schutz der Ökosysteme wichtig.

### Gesamtsäure

Die Emissionen, ausgedrückt als Säure-Äquivalent, konnten, bezogen auf das Jahr 1990, um 78 % reduziert werden. Hauptverursacher waren 2020 die Landwirtschaft (54,3 %), der Verkehr (15 %) sowie die Energiewirtschaft (14 %) (UBA 2022). Der Gesamtsäureeintrag in Ökosysteme berechnet sich als Summe der Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat

und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002). 2022 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland 0,4 kmol<sub>c</sub> (Hessenmittel), unter Buche (Hessenmittel) 0,7 kmol<sub>c</sub> und unter Fichte 1,4 kmol<sub>c</sub> (Fürth im Odenwald). Mit 1,0 kmol<sub>c</sub> (Fürth im Odenwald) bzw. 0,9 kmol<sub>c</sub> je Hektar (Zierenberg) lag der Gesamtsäureeintrag 2022 auf diesen beiden Buchenflächen deutlich über dem Buchenmittel von Hessen. Die Säureneutralisationskapazität durch ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragene Basen und die nachhaltige Säurepufferkapazität aus der Verwitterung reichen auf nährstoffarmen Waldstandorten in der Regel nicht aus, um die Säureinträge 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 GPJ, Bleeker A, Erisman JW, Vermeulen AT und 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 (1991): Beiträge zur Methodik der Waldökosystemforschung. Berichte des Forschungszentrums für Waldökosysteme/Waldsterben. Reihe B, Bd. 24, 204-210

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