

# Stoffeinträge

**Birte Scheler**

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7194175>

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 Hessen wurde bereits 1984 mit der systematischen Erfassung der Stoffeinträge in Buchen- und Fichtenbeständen begonnen, um die Wirkung erhöhter Stoffeinträge sowie damit verbundener Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme beurteilen zu können.

Aktuell wird der Stoffeintrag im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings in zwei Fichten-, sechs Buchen- sowie einem Kiefernbestand erfasst. Jeder Bestandesmessfläche (Kronentraufe) ist eine Freifläche (Freilandniederschlag) zugeordnet. In Buchenbeständen wird zur Erfassung des Bestandesniederschlags neben der Kronentraufe auch der bei dieser Baumart quantitativ bedeutsame Stammablauf gemessen. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdositionsraten berechnet.

Die Höhe der Stoffeinträge wird maßgeblich 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. Dieser Baumarteneffekt zeigt sich sehr gut in Fürth im Odenwald, wo eine Fichten- und eine Buchenfläche in unmittelbarer Nachbarschaft und somit unter gleicher Immissionsbelastung und gleichen klimatischen Bedingungen beobachtet werden. Im Fichtenbestand in Königstein mussten im Jahre 2020 einige Bäume wegen Borkenkäferbefalls gefällt werden, im Spätsommer 2021 musste dann der gesamte Bestand geräumt werden. Die deutliche Abnahme der Stoffeinträge sowie die verringerte Interzeption in diesen beiden Jahren sind durch die veränderte Bestandesstruktur bzw. komplette Räumung des Bestandes bedingt.

## Niederschlag

2021 lagen sowohl der Bestandes- als auch der Freilandniederschlag der untersuchten Monitoringflächen auf dem Niveau des 10-jährigen Mittels der Jahre 2011–2020. Lediglich auf der Fichtenfläche in Königstein wurde durch die Räumung des Bestands im Spätsommer 2021 34 % mehr Niederschlag registriert als im 10-jährigen Mittel.

Der Bestandesniederschlag der Buchenflächen betrug 2021 zwischen 443 mm (Kellerwald) und 807 mm (Spessart). Unter Fichte wurden 657 mm (Fürth im Odenwald) bzw. 804 mm (Königstein) registriert und auf der Kiefernfläche im Hessischen Ried 568 mm. Die Niederschlagsmengen im Freiland lagen zwischen 640 mm (Kellerwald, Hessisches Ried) und 987 mm (Fürth im Odenwald).



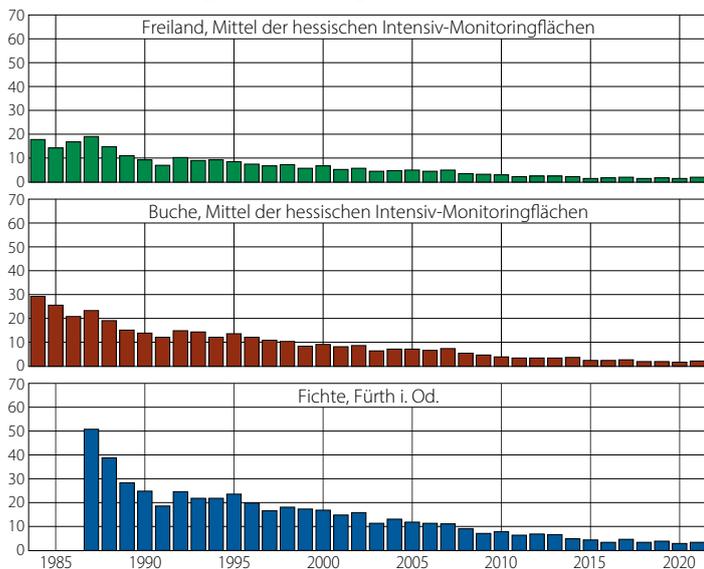
Foto: O. Schwerdtfeger

Messeinrichtung zur Erfassung des Stammablaufs bei Buche auf der Level II-Core-Fäche Spessart

## Schwefeleintrag

Durch die Umsetzung zahlreicher Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung und die Einführung schwefelarmer Kraft- und Brennstoffe seit Mitte der 1980er Jahre wurden die Schwefeldioxidemissionen und in der Folge der Sulfatschwefeleintrag in Wälder wirksam reduziert. Diese deutliche Abnahme hat sich mit Ausnahme beim Freilandeintrag im Hessischen Ried, Krofdorf und Kellerwald trotz des bereits erreichten relativ niedrigen Niveaus zu Beginn der 2000er Jahre in den vergangenen 10 Jahren weiter fortgesetzt. 2021 betrug der Sulfatschwefeleintrag nur noch rund 10 % des Eintrags von 1987 und lag je Hektar unter Buche zwischen 1,5 kg (Krofdorf) und 3,2 kg (Fürth im Odenwald), unter Fichte bei 3,6 kg (Fürth im Odenwald) bzw. 2,3 kg (Königstein) und unter Kiefer (Hessisches Ried) bei 1,8 kg. Im Freiland betrug er im Hessenmittel 1,9 kg je Hektar mit Einträgen zwischen 1,4 (Kellerwald) und 2,4 kg je Hektar (Fürth im Odenwald).

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 Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) haben im Zeitraum 1990 bis 2020 um 66 %, die Ammoniakemissionen um 25 % 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).

In Folge der Reduktion der Emissionen sind die Stickstoffeinträge im Freiland und mit der Gesamtdosition im Beobachtungszeitraum deutlich zurückgegangen.

Bezogen auf das Mittel der Jahre 1989–1991 betrug die Reduktion der Nitrateinträge (Mittel 2019–2021) im Freiland

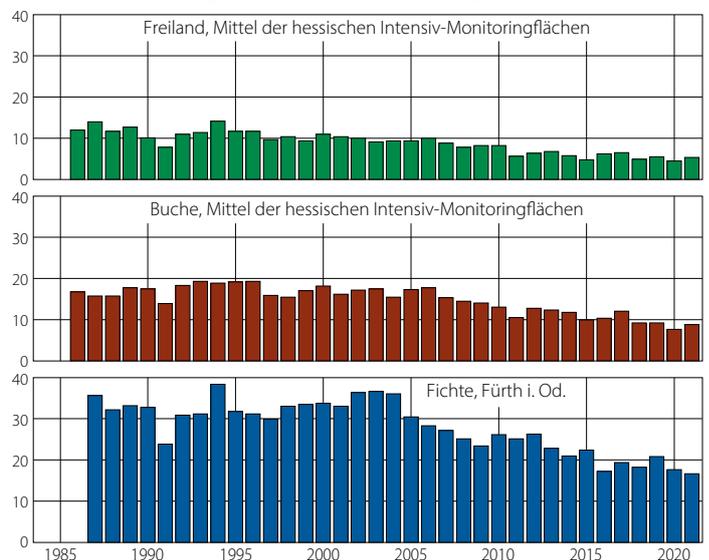
zwischen 48 % (Krofdorf) und 58 % (Spessart). Die Reduktion mit der Gesamtdosition betrug unter Buche zwischen 49 % (Fürth im Odenwald) und 66 % (Krofdorf, Spessart) und unter Fichte 55 % (Fürth im Odenwald) bzw. 57 % (Königstein). Betrachtet man jedoch nur den Zeitraum 2012–2021, zeigt sich ein uneinheitliches Bild: mit Ausnahme der Buchenfläche in Zierenberg hat der Nitratstickstoffeintrag in allen untersuchten Beständen, im Freiland hingegen nur auf vier von sieben Flächen weiter deutlich abgenommen. 2021 betrug er je Hektar unter Buche zwischen 2,3 kg (Hessisches Ried) und 5,9 kg (Fürth im Odenwald), 5,4 kg (Königstein) bzw. 7,5 kg (Fürth im Odenwald) unter Fichte, 2,5 kg unter Kiefer (Hessisches Ried) und zwischen 2 kg (Kellerwald, Hessisches Ried) und 2,9 kg (Fürth im Odenwald) im Freiland.

Die Reduktion der Ammoniuminträge lag im Freiland zwischen 19 % (Krofdorf) und 48 % (Spessart). Bei der Gesamtdosition betrug die Reduktion unter Buche zwischen 11 % (Zierenberg) und 39 % (Spessart) sowie 16 % (Fürth) bzw. 37 % (Königstein) unter Fichte. Entgegen dem Trend wurde auf der Buchenfläche in Fürth im Vergleich zum Mittel der Jahre 1989–1991 keine Reduktion, sondern eine Zunahme der Ammoniumdeposition festgestellt. In den letzten 10 Jahren hat der Ammoniumeintrag nur im Kellerwald unter Buche (Gesamtdosition) sowie in Königstein (Gesamtdosition und Freilandeintrag) weiter abgenommen, auf allen anderen Flächen verharrt der Eintrag von reduziertem Stickstoff mit jährlichen Schwankungen auf einem gleichbleibenden Niveau.

2021 lag der Ammoniumstickstoffeintrag je Hektar unter Buche zwischen 3,1 kg (Krofdorf) und 6,4 kg (Fürth im Odenwald), unter Fichte bei 6,4 kg (Königstein) bzw. 9,2 kg (Fürth im Odenwald), unter Kiefer bei 3,9 kg sowie zwischen 1,9 kg (Spessart) und 3,7 kg (Fürth im Odenwald) im Freiland.

Da die Stickoxidemissionen stärker reduziert werden konnten als die Ammoniakemissionen, hat der relative Anteil des Ammoniums am anorganischen Stickstoffeintrag deutlich zugenommen. Betrug er im Mittel der Jahre 1989–1991 zwischen

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



42 % und 50 % im Freiland, 35 % und 41 % unter Buche sowie 41 % und 51 % unter Fichte, ist er im Jahr 2021 auf Werte zwischen 44 % und 61 % (Freiland), 43 % und 69 % unter Buche bzw. 55 % unter Fichte angestiegen.

Obwohl der anthropogen bedingte anorganische Stickstoffeintrag seit Beginn der Untersuchungen deutlich abgenommen hat, überschreitet er im Mittel der letzten 5 Jahre (2017 bis 2021) mit Werten bis zu 14,1 kg je Hektar und Jahr unter Buche (Zierenberg) und 18,5 kg je Hektar und Jahr unter Fichte (Königstein) 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 Schädlingsbefall, wie aktuell auf der Fläche Königstein, wird der Stickstoff rasch mineralisiert und es kommt zu erhöhten Nitratausträgen. 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.

## 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



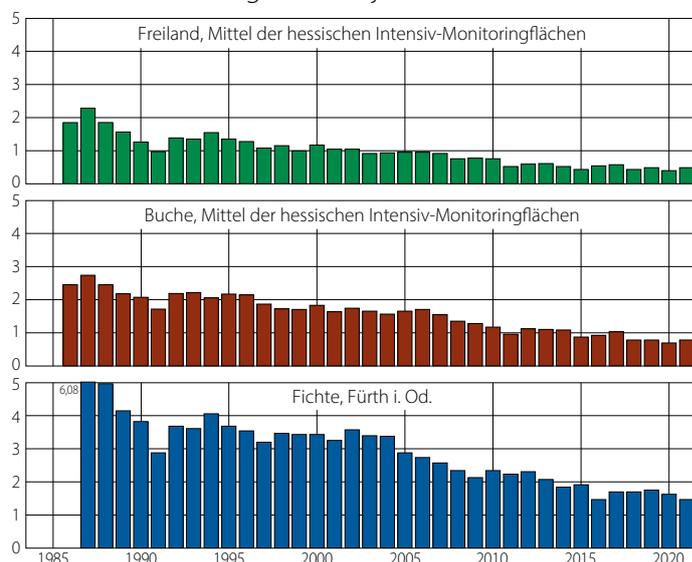
Foto: O. Schwerdtfeger

Erfassung der Kronentraufe auf einer Level II-Fläche

et al. 2002). 2021 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland 0,5 kmol<sub>c</sub> (Hessenmittel), unter Buche (Hessenmittel) 0,8 kmol<sub>c</sub> und unter Fichte 1,5 kmol<sub>c</sub> (Fürth im Odenwald) bzw. 1,0 kmol<sub>c</sub> (Königstein). Besonders hoch war der Gesamtsäureeintrag 2021 auf der Buchenfläche in Fürth im Odenwald mit 1,1 kmol<sub>c</sub> je Hektar. Er lag damit deutlich über dem Buchenmittel des Landes.

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.

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



*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 (2022): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/stickstoffoxid-emissionen#entwicklung-seit-1990>