

# Stoffeinträge

Birte Scheler

<https://doi.org/10.5281/zenodo.5569163>

Mit dem Niederschlag gelangen verschiedene Nähr- und Schadstoffe in gelöster Form in den Wald. Zusätzlich werden diese Stoffe als trockene Deposition (gas- und partikelförmig) 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 so genannte 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 quantitative 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, Kronenrauigkeit oder lokale Emittenten bestimmt. So sind die Stoffeinträge in den niederschlagsreichen Lagen der Mittelgebirge höher als beispielsweise in der Wetterau. Fichten- und Douglasienbestände sind wegen der ganzjährigen und im Vergleich mit



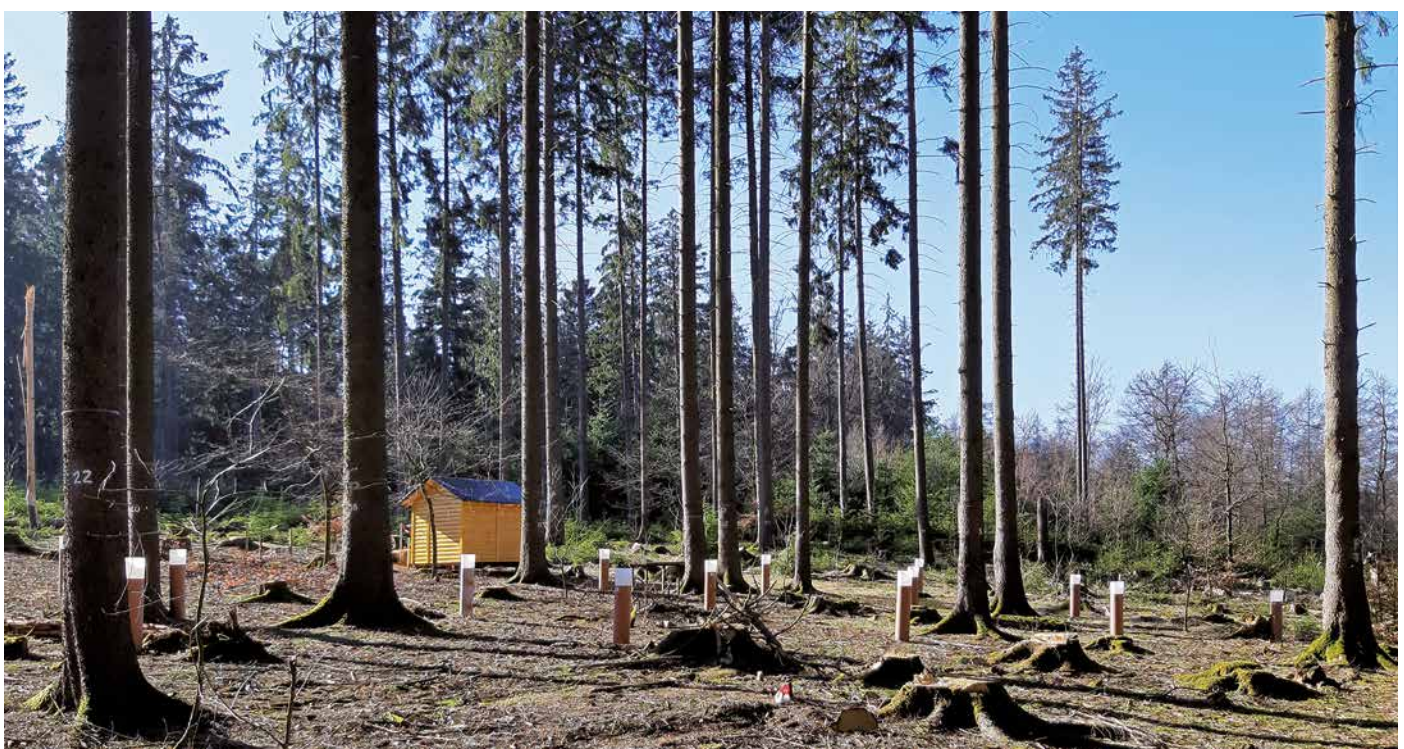
Foto: M. Spielmann

Kiefern dichten 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.

## Niederschlag

Im Vergleich mit dem 10-jährigen Mittel der Jahre 2010-2019 fielen die Niederschläge 2020 geringer aus. Besonders groß waren die Defizite im Freiland im Kellerwald (-158 mm), in Königstein (-151 mm) und im Hess. Ried (-131 mm), weniger ausgeprägt hingegen im Spessart (-59 mm).

Der Bestandesniederschlag der Buchenflächen war 2020 zwischen 21 mm (Zierenberg) und 139 mm (Hess. Ried) geringer als im 10-jährigen Mittel, unter Fichte wurde 52 mm (Fürth i. Od.) bzw. 37 mm (Königstein) weniger Kronentraufe



Intensiv-Monitoringfläche Königstein – starke Auflichtung nach Borkenkäferbefall im März 2021

Foto: NW-FVA

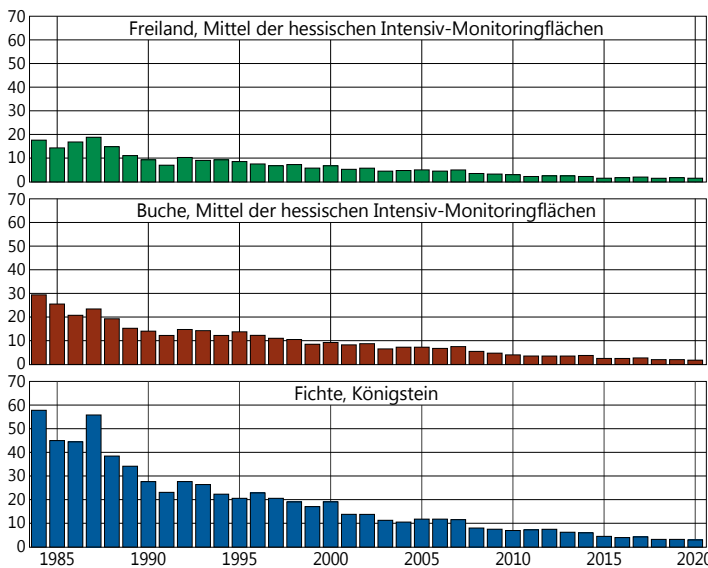
# Stoffeinträge

registriert und auf der Kiefernfläche im Hess. Ried erreichten 131 mm weniger den Waldboden. In Königstein und Zierenberg fielen die Defizite im Bestandesniederschlag deutlich geringer aus als im Freiland. Ursache hierfür sind Störungen in der Bestandesstruktur durch Windwurf (Zierenberg) und Borkenkäferbefall (Königstein).

## Schwefeleintrag

Durch die konsequente Umsetzung von 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. Obwohl er bereits auf einem relativ geringen Niveau lag, hat er 2020 im Vergleich zum Mittel der Jahre 2010-2019 nochmals deutlich abgenommen. 2020 betrug der Sulfatschwefeleintrag mit dem Bestandesniederschlag im Mittel der untersuchten Buchenflächen 1,8 kg je Hektar und war damit 1,2 kg bzw. 40 % geringer als im 10-jährigen Mittel. Die Spannweite der Einträge lag zwischen 1,3 kg (Hess. Ried) und 2,4 kg je

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



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

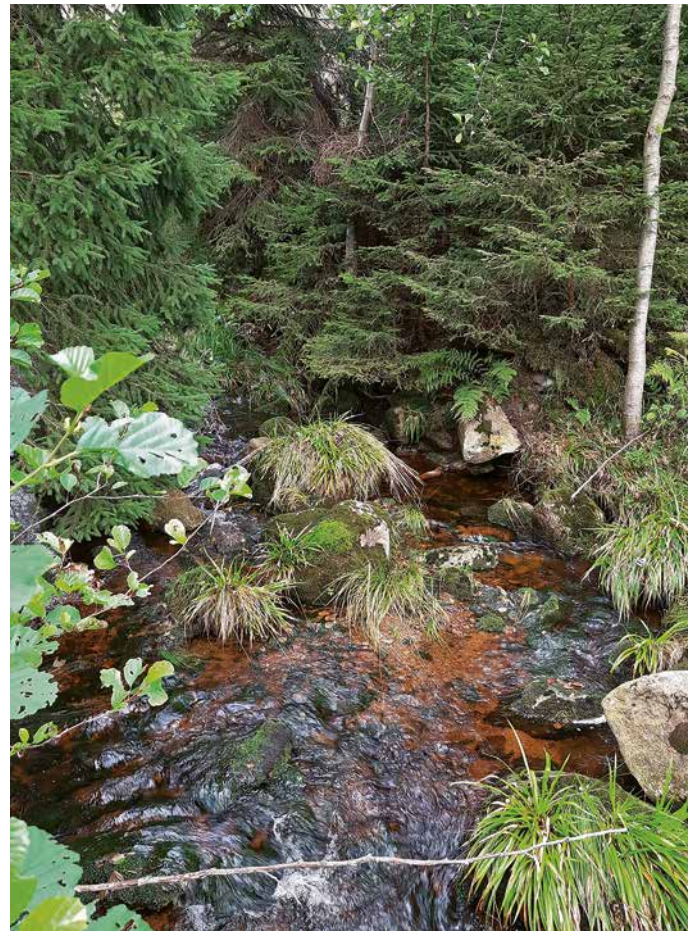
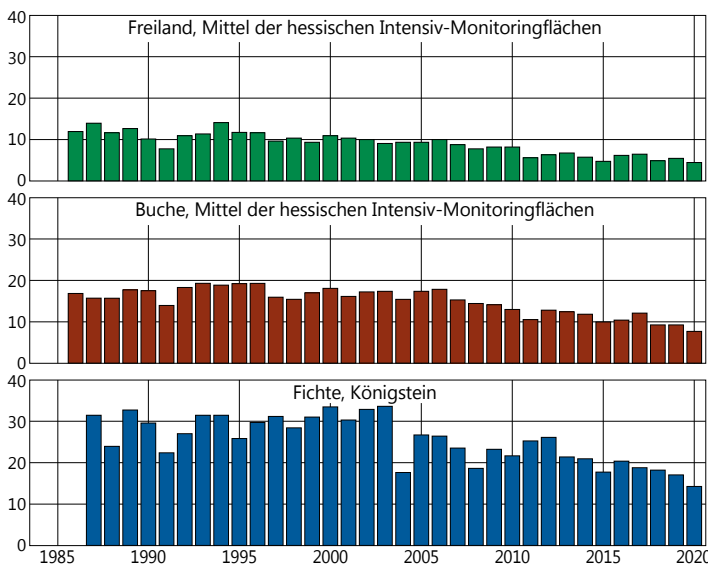


Foto: J. Weymar

Hektar (Fürth i. Od.). Auf den Fichtenflächen in Königstein und Fürth i. Od. betrug er 2,9 kg je Hektar und war damit 45 % bzw. rund 2,5 kg geringer als im Mittel der vergangenen 10 Jahre. Im Freiland lag er im Hessenmittel bei 1,4 kg je Hektar, was einer Abnahme von 0,7 kg bzw. 33 % entspricht.

## Stickstoffeintrag

Stickstoff wird als Nitrat (Quellen: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) und Ammonium (landwirtschaftliche Quellen) in die Ökosysteme eingetragen. In Hessen beträgt der Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag im Freiland und mit dem Bestandesniederschlag (Mittel aller Baumarten) gut 50 % mit einem leicht ansteigenden Trend.

Der Nitratstickstoffeintrag hat im Freiland und der Gesamtd deposition auf allen untersuchten Flächen seit Untersuchungsbeginn signifikant abgenommen. 2020 betrug er je Hektar 2,1 kg (Hessenmittel Freiland) mit Werten zwischen 1,6 kg (Hess. Ried) und 2,7 kg (Fürth i. Od.) sowie 3,2 kg unter Buche (Hessenmittel, Gesamtd deposition mit Stammablauf). Die höchsten Nitratstickstoffeinträge wurden 2020 auf den Buchenflächen in Zierenberg (4,8 kg je Hektar) und Fürth i. Od. (3,6 kg je Hektar) gemessen. Ursache für die hohen Nitratstickstoffeinträge in Zierenberg könnte die Nähe der Fläche zur Autobahn A44 sein, in Fürth ist vermutlich der höhere Niederschlag verantwortlich. Unter Fichte betrug die Gesamtd deposition in Königstein 7,4 kg und in Fürth i. Od. 6,8 kg je Hektar, unter Kiefer im Hess. Ried 2,4 kg je Hektar. Insgesamt war der Nitratstickstoffeintrag im Jahr 2020 mit dem Bestandesniederschlag zwischen 31 % (Fichte Königstein) und 48 % (Buche Spessart) geringer als im Mittel der Jahre 2010-2019.

## Stoffeinträge

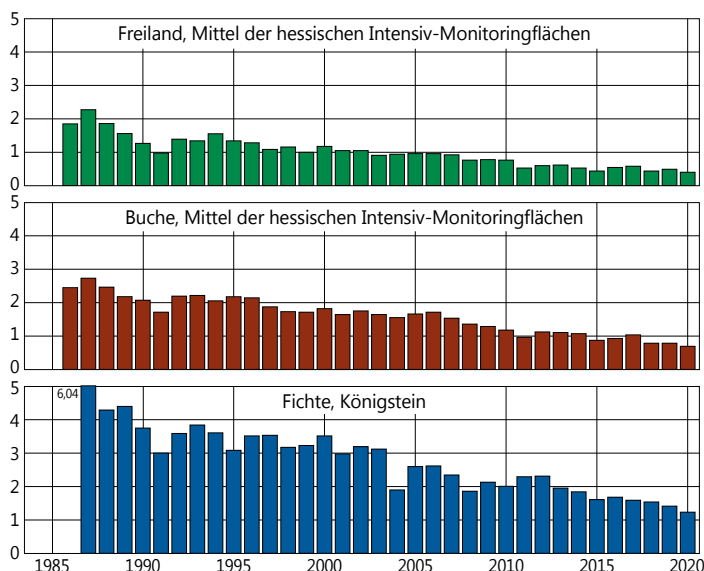
Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf allen hessischen Flächen des Intensiv-Monitorings seit 1994 bzw. seit Untersuchungsbeginn ebenfalls signifikant abgenommen. Betrachtet man jedoch nur den jüngeren Zeitraum seit 2010, ist er nur noch in Königstein (Fichte, Freiland) sowie im Kellerwald und Spessart (jeweils Bestandesniederschlag Buche) sehr deutlich zurückgegangen. 2020 lag er je Hektar bei 2,4 kg im Freiland und 4,5 kg unter Buche (jeweils Hessenmittel). Überdurchschnittlich hohe Einträge wurden mit 6,4 kg bzw. 5,9 kg je Hektar auf den Buchenflächen Zierenberg und Fürth i. Od. gemessen. Unter Fichte betrug der Ammoniumstickstoffeintrag in Fürth i. Od. 10,8 kg und in Königstein 6,8 kg je Hektar, unter Kiefer im Hess. Ried 2,8 kg je Hektar.

Obwohl der anorganische Stickstoffeintrag durch verschiedene Maßnahmen deutlich abgenommen hat, überschreitet der anthropogen bedingte atmosphärische Stickstoffeintrag im Mittel der letzten 5 Jahre (2016–2020) mit Werten bis zu jährlich 15,1 kg je Hektar unter Buche (Zierenberg) und 18,7 kg je Hektar unter Fichte (Fürth i. Od.) nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Dieser überschüssige Stickstoff reichert sich zunächst im Ökosystem an. Wird die Speicherkapazität überschritten oder kommt es zu abrupten Störungen im Ökosystem durch Kalamitäten wie Windwurf oder Schädlingsbefall, wird der Stickstoff rasch mineralisiert. Dieser Prozess hat durch den damit verbundenen Verlust basischer Nährstoffkationen aus den ohnehin meist nährstoffarmen Waldböden gravierende negative Konsequenzen für das Ökosystem Wald. Angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundgewässer werden ggf. durch hohe Nitrat- austräge gefährdet.

## Gesamtsäure

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdosition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002). 2020 betrug der Gesamtsäureeintrag im Freiland 0,4 kmol<sub>c</sub> (Hessenmittel), unter Buche (Hessenmittel) 0,7 kmol<sub>c</sub> und unter Fichte 1,6 kmol<sub>c</sub> (Fürth i. Od.) bzw. 1,2 kmol<sub>c</sub> (Königstein) je Hektar. Wie in den Vorjahren war 2020 der Gesamtsäureeintrag auf der Buchenfläche in Zierenberg mit 1,0 kmol<sub>c</sub> je Hektar

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



Level II-Fläche Hess. Ried

Foto: J. Weymar

tar besonders hoch und lag deutlich über dem Buchenmittel des Landes. Insgesamt war der Gesamtsäureeintrag 2020 unter Buche zwischen 0,2 kmol<sub>c</sub> (Hess. Ried) und 0,4 kmol<sub>c</sub> (Zierenberg, Spessart) je Hektar geringer als im Mittel der Jahre 2010–2019, unter Fichte war er 0,3 kmol<sub>c</sub> (Fürth i. Od.) bzw. 0,6 kmol<sub>c</sub> je Hektar (Königstein) geringer und unter Kiefer 0,3 kmol<sub>c</sub> je Hektar.

Ein Teil des Säureeintrags wird durch ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragene Basen neutralisiert. Diese Säureneutralisationskapazität durch Baseneintrag lag 2020 zwischen gut 0,1 kmol<sub>c</sub> (Krofdorf, Buche) und knapp 0,5 kmol<sub>c</sub> je Hektar (Königstein und Fürth i. Od., Fichte), bzw. zwischen 28 % und 50 % des Säureeintrags. Ein anderer Teil der Gesamtsäure wird im Waldboden durch Basen gepuffert, die durch Verwitterung freigesetzt werden. Der partikuläre Eintrag basischer Stäube spielt nur in Einzelfällen, z. B. in der Nähe von Steinbrüchen, eine größere Rolle. Die nachhaltige Säurepufferkapazität aus Verwitterung reicht auf den oft nährstoffarmen Waldstandorten jedoch auch unter Berücksichtigung der Baseneinträge nicht aus, um die Säureinträge vollständig zu kompensieren. Eine standortsangepasste 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, Nagel HD (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, Band 24, 204–210