

# Stoffeinträge

## Birte Scheler

Nähr- und Schadstoffe werden mit dem Niederschlag in gelöster Form sowie durch den Auskämmeffekt der Baumkronen gas- und partikelförmig in Wälder eingetragen.

Aufgrund der großen Oberflächen der Kronen ist der atmosphärische Stoffeintrag in Wälder im Vergleich der Landnutzungsformen am höchsten. Diese so genannte Immissionschutzfunktion 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.

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

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, 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 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.

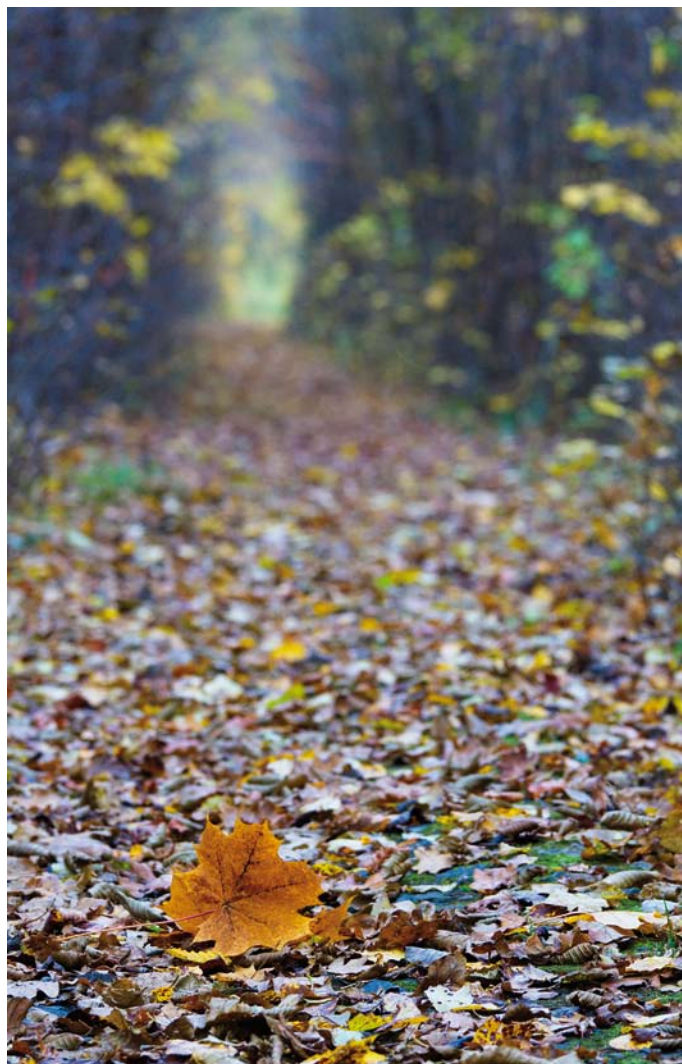


Foto: H. Heinemann

## Niederschlag

2019 wird als weiteres Dürrejahr eingestuft, im Vergleich mit 2018 fiel auf den Freiflächen des Intensiven Monitorings jedoch zwischen 39 mm (Krofdorf) und 340 mm (Fürth i. Od.) mehr Niederschlag als im Vorjahr. Während 2018 in ganz Hessen ein besonders niederschlagsarmes Jahr war, zeigen sich 2019 regionale Unterschiede. Auf den Flächen in Fürth i. Od. (+98 mm), im Hessischen Ried (+26 mm) und in Zierenberg (+21 mm) fiel im Freiland mehr Niederschlag als im Vergleich zum 10-jährigen Mittel der Jahre 2009-2018, im Spessart und im Kellerwald entsprach die Menge dem 10-jährigen Mittel, in Krofdorf (-47 mm) und in Königstein/Ts. (-85 mm) wurde weniger Niederschlag verzeichnet.

Der Bestandesniederschlag war mit Ausnahme der Buchenfläche in Krofdorf (-2 mm) zwischen 101 mm (Zierenberg, Buche) und 274 mm (Fürth i. Od., Buche) höher als 2018, im Vergleich mit dem 10-jährigen Mittel erreichte in Krofdorf (-79 mm), im Kellerwald (Buche: -31 mm), im Hess. Ried (Buche: -40 mm, Kiefer: -26 mm) sowie in Königstein (Fichte: -53 mm) jedoch weniger Niederschlag den Waldboden. Trotz der überdurchschnittlich warmen Jahre und auf einigen Flächen sowohl in 2018 als auch 2019 extrem trockenen Witterungsverhältnisse traten bis Ende 2019 auf den Untersuchungsflächen glücklicherweise keine gravierenden Ausfälle durch Borkenkäfer oder Buchenvitalitätsschwäche auf, die die Stoffeintragsmessungen beeinflusst hätten.



Foto: H. Heinemann

# Stoffeinträge



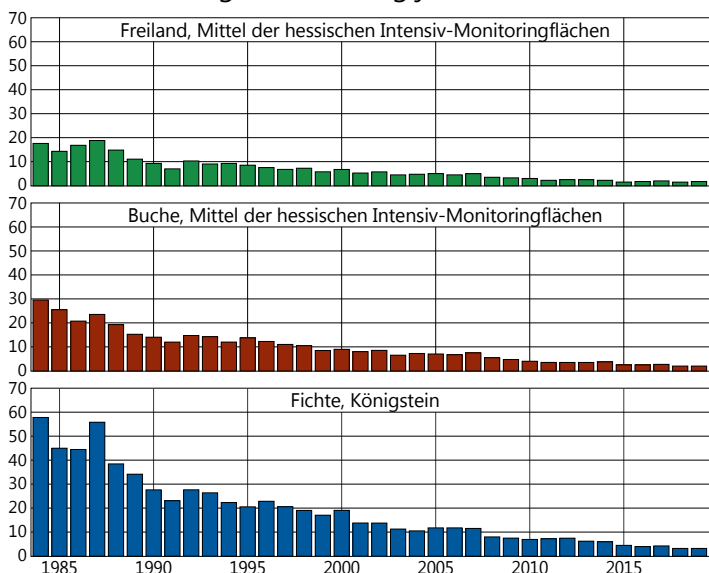
Erfassung der Niederschlagsmenge

Foto: O. Schwerdtfeger

## Schwefeleintrag

Durch die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinigung wie Rauchgasentschwefelung und die Einführung schwefelarmer Kraft- und Brennstoffe konnten die Schwefeldioxidemissionen wirksam reduziert werden. Aufgrund der seit Jahren sehr geringen Schwefeldioxidkonzentration der Luft spielt der gasförmige Eintrag nur noch eine untergeordnete Rolle. Da der Sulfatschwefeleintrag hauptsächlich in gelöster Form mit dem Niederschlag erfolgt, sind die im Vergleich zu 2018 etwas höheren Einträge im Jahr 2019 erwartungsgemäß. Der Sulfatschwefeleintrag mit dem Bestandesniederschlag betrug 2019 im Mittel der untersuchten Buchenflächen 2,1 kg je Hektar, mit einer Spannweite zwischen 1,7 (Kellerwald, Krofdorf) und 2,7 (Zierenberg) kg je Hektar. Unter Fichte lag er je Hektar bei 3,3 kg (Königstein) bzw. 3,9 kg (Fürth i. Od.) und im Freiland zwischen 1,4 (Kellerwald) und 2,1 (Fürth i. Od.) kg je Hektar. Im Hessenmittel betrug der Sulfatschwefeleintrag im Freiland 1,7 kg je Hektar. Trotz der im Vergleich zum Vorjahr leicht gestiegenen Einträge war er im Hessenmittel je Hektar unter Buche mit 1,2 kg, unter Fichte mit 2,1 kg und im Freiland mit 0,5 kg geringer als im 10-jährigen Mittel (2009-2018).

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

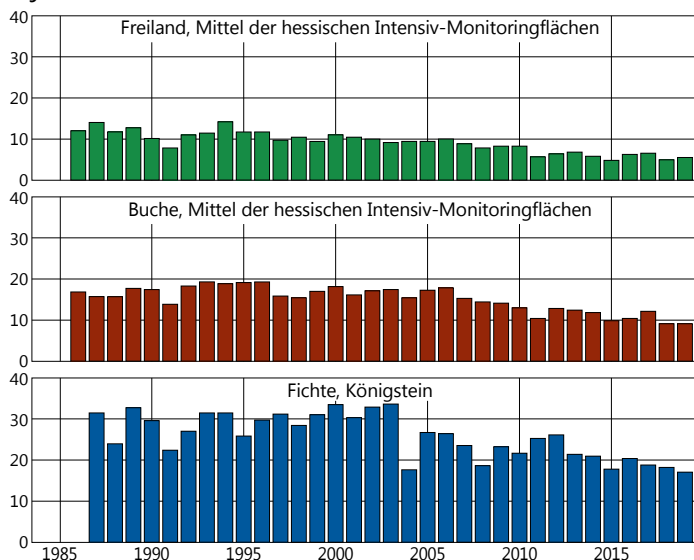


## Stickstoffeintrag

Stickstoff wird einerseits in oxidierter Form als Nitrat (Quellen: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) andererseits in reduzierter Form als Ammonium (landwirtschaftliche Quellen) in das Ökosystem eingetragen. In Hessen beträgt der Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag im Freiland und mit dem Bestandesniederschlag (Mittel aller Baumarten) rund 50 %.

Der Nitratstickstoffeintrag hat im Freiland und der Gesamtdeposition auf allen untersuchten Flächen seit Untersuchungsbeginn signifikant abgenommen. Er betrug 2019 je Hektar 2,6 kg (Hessenmittel Freiland) mit Werten zwischen 2,3 kg (Hess. Ried, Kellerwald, Krofdorf) und 3,1 kg (Fürth i. Od.) je Hektar sowie 4,2 kg je Hektar unter Buche (Hessenmittel, Gesamtdeposition mit Stammablauf). Überdurchschnittlich hohe Nitrat-N-Einträge wurden auf den Buchenflächen in Zierenberg (5,5 kg je Hektar) und Fürth i. Od. (5,0 kg je Hektar) gemessen. Unter Fichte betrug die Gesamtdeposition in Königstein 8,9 und in Fürth i. Od. 9,5 kg je Hektar, unter Kiefer im Hess. Ried 3,5 kg je Hektar.

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



Level II-Fläche Hess. Ried

Foto: J. Weymar

# Stoffeinträge

Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf allen hessischen Intensiv-Monitoringflächen seit 1994 bzw. seit Untersuchungsbeginn mit Ausnahme der Freilandmessflächen im Kellerwald und in Krofdorf signifikant abgenommen. 2019 lag er je Hektar bei 2,9 kg im Freiland und 5 kg unter Buche (jeweils Hessenmittel). Überdurchschnittlich hohe Einträge wurden mit 6,8 kg bzw. 6,1 kg je Hektar auf den Buchenflächen Zierenberg und Fürth i. Od. gemessen. Unter Fichte betrug der Ammoniumstickstoffeintrag in Fürth i. Od. 11,3 und in Königstein 8,1 kg je Hektar. Mit 5,3 kg je Hektar war der Ammoniumeintrag unter Kiefer deutlich geringer als unter Fichte.

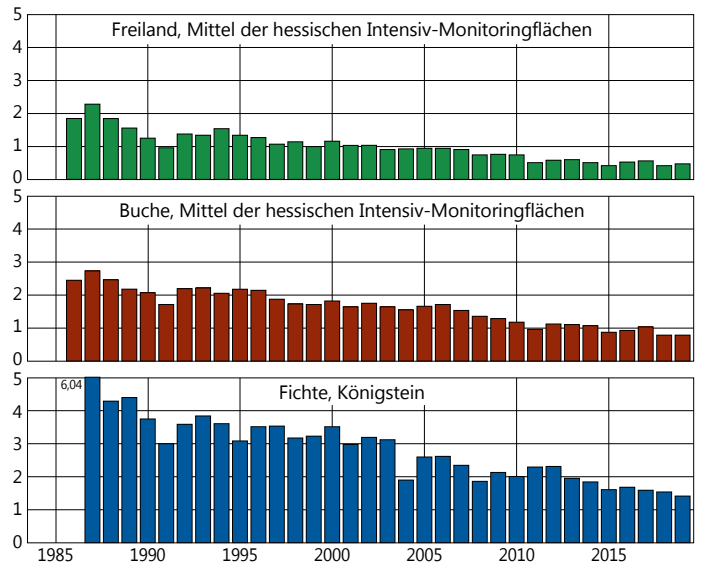
Obwohl der anorganische Stickstoffeintrag durch verschiedene Maßnahmen signifikant abgenommen hat, überschreitet der anthropogen bedingte atmosphärische Stickstoffeintrag im Mittel der letzten 5 Jahre (2015-2019) mit Werten bis zu 15,6 kg je Hektar unter Buche (Zierenberg) und 19,6 kg je Hektar unter 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 Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile, Gauger et al. 2002). 2019 betrug der Gesamtsäureeintrag im Freiland 0,5 (Hessenmittel), unter Buche (Hessenmittel) 0,8 und unter Fichte 1,8 (Fürth i. Od.) bzw. 1,4 (Königstein) kmol<sub>c</sub> je Hektar. Wie in den Vorjahren war der Gesamtsäureeintrag auf der Buchenfläche in Zierenberg mit 1,0 kmol<sub>c</sub> je Hektar besonders hoch und lag deutlich über dem Buchenmittel des Landes.

Ein Teil des Säureeintrags wird durch ebenfalls mit dem Niederschlag eingetragene Basen neutralisiert, ein anderer wird im Waldboden durch Basen, die durch Verwitterung freigesetzt werden, gepuffert. Der Eintrag basischer Stäube spielt nur in Einzelfällen, z. B. in der Nähe von Steinbrüchen, eine 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.

## 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.*



Extraktion von Bodenproben zur Bestimmung der Inhaltsstoffe

Foto: N. König