

# Stoffeinträge

## Birte Scheler

In Wäldern ist der atmosphärische Eintrag für viele Nähr- und Schadstoffe die Haupteintragsquelle. Luftverunreinigungen gelangen in gelöster Form mit dem Niederschlag und zusätzlich durch den Auskämmeffekt der Baumkronen gas- und partikelförmig in das Ökosystem Wald. Aufgrund dieses Filtereffektes ist der Eintrag anthropogen bedingter Schwefel- und Stickstoffverbindungen (Nitrat und Ammonium) im Wald deutlich höher als bei anderen Landnutzungsformen. Diese so genannte Immissionsschutzfunktion des Waldes stellt jedoch für das Ökosystem Wald selbst eine Belastung dar, da Stoffeinträge 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 Wirkungen erhöhter Stoffeinträge und damit verbundener Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme wie beispielsweise das Grundwasser zu untersuchen. Aktuell wird der Stoffeintrag im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings in zwei Fichten-, sechs Buchen-, sowie jeweils einem Eichen- und 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 verschiedene Faktoren wie Niederschlagsmenge 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. Beim Vergleich der Baumarten sind Fichten- und Douglasienbestän-

de 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 gleichen klimatischen Verhältnissen beobachtet werden.

## Niederschlag

In weiten Teilen von Hessen war 2017 ein niederschlagsreiches Jahr. Im Vergleich zum 10-jährigen Mittel der Jahre 2007-2016 fiel im Freiland zwischen 83 mm (Zierenberg) und 255 mm (Spessart) mehr Niederschlag, während im Kellerwald und Hess. Ried die Niederschlagshöhe dem 10-jährigen Mittel entsprach. Der Bestandesniederschlag war zwischen 70 mm (Zierenberg Buche) und 204 mm (Spessart Buche) höher als im Mittel des genannten Zeitraums. In Folge von Durchforstungen war der Niederschlag auf den Bestandesflächen im Hess. Ried trotz durchschnittlicher Freilandniederschläge zwischen 19 mm (Eiche) und 86 mm (Kiefer) höher als im Mittel 2007-2016.

Die größten relativen Abweichungen vom 10-jährigen Mittel gab es im Spessart (+26 % im Freiland, +25 % im Bestand), die geringsten im Kellerwald (+1 % im Freiland, -2 % im Bestandesniederschlag unter Buche). Aufgrund der deutlich höheren Niederschlagsmenge waren die Stoffeinträge 2017 im Vergleich mit 2016 ebenfalls erhöht.

## Schwefeleintrag

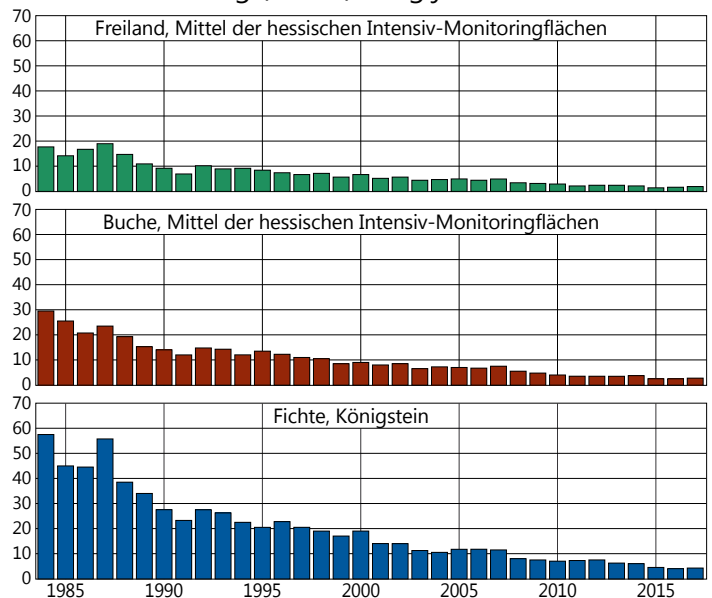
Durch die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie Rauchgasentschwefelung und die Einführung schwefelarmer Kraft- und Brennstoffe konnten die Schwefeldioxidemissionen wirksam reduziert werden. In der Folge ging auch der Schwefeleintrag (gemessen als Sulfatschwefel  $SO_4-S$ ) seit Mitte der 1980er Jahre stark zurück. Die stetige Abnahme der Schwefeleinträge setzte sich auf allen Bestandes- und Freilandmessflächen trotz des bereits zu Beginn der 2000er Jahre erreichten niedrigen Niveaus in den vergangenen 10 Jahren weiter fort. Aufgrund der z. T. deutlich erhöhten Niederschlagsmengen im Jahr 2017 hat



Intensiv-Monitoringfläche Hessisches Ried

Foto: J. Evers

### Schwefel-Eintrag ( $SO_4-S$ ) in kg je Hektar und Jahr



# Stoffeinträge



Intensiv-Monitoringfläche Fürth

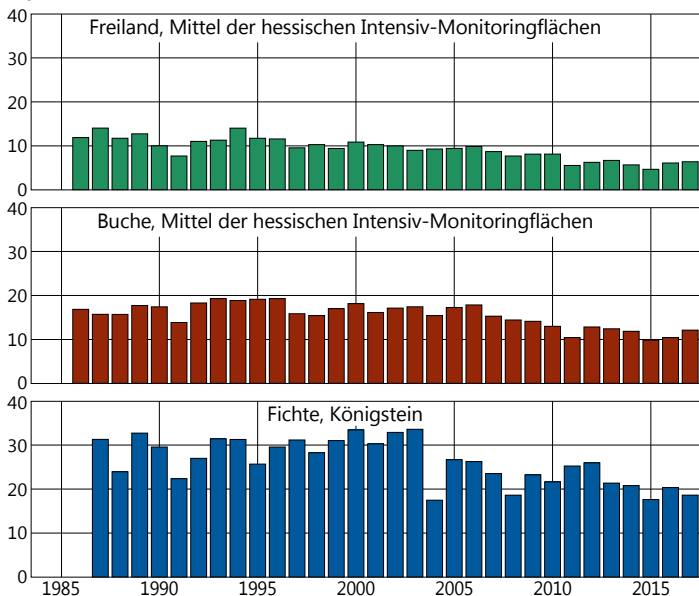
Foto: J. Weymar

sich der Schwefeleintrag im Vergleich zu 2016 mit Ausnahme der Flächen im Hess. Ried wieder leicht erhöht. Er betrug 2017 mit dem Bestandesniederschlag im Mittel der untersuchten Buchenflächen je Hektar 2,8 kg, mit Werten zwischen 2,1 kg (Krofdorf) und 4,1 kg (Fürth). Unter Fichte lag er je Hektar bei 4,2 kg (Königstein) bzw. 4,7 kg (Fürth) und im Freiland zwischen 1,5 kg (Kellerwald) und 2,6 kg (Spessart, Fürth). Im Hessenmittel betrug der Schwefeleintrag im Freiland 2 kg je Hektar.

## 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 betrug der Ammoniumanteil am anorganischen Stickstoffeintrag im 10-jährigen Mittel (2008-2017) im Freiland rund 47 % und mit der Kronentraufe im Mittel aller Baumarten 51 %.

Stickstoff-Eintrag ( $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ ) in kg je Hektar und Jahr



Der Nitratstickstoffeintrag hat im Freiland und der Gesamtdeposition aller vier Baumarten auf allen untersuchten Flächen seit 1994 bzw. seit Untersuchungsbeginn signifikant abgenommen. Im Gegensatz zum Schwefeleintrag ist er in den vergangenen 10 Jahren (2008-2017) auf den meisten Flächen nicht weiter rückläufig, sondern verharbt mit jährlichen Schwankungen auf dem Niveau des letzten Jahrzehnts. Er betrug 2017 je Hektar 3,4 kg (Hessenmittel Freiland) mit Werten zwischen 2,4 kg (Hess. Ried) und 4,4 kg (Spessart) und 6,1 kg unter Buche (Hessenmittel Gesamtdeposition mit Stammablauf). Unter Fichte betrug die Gesamtdeposition 9,3 kg je Hektar in Fürth und 9,6 kg in Königstein. Der insgesamt höchste Nitratstickstoffeintrag wurde 2017 mit 10,8 kg je Hektar in Zierenberg unter Buche gemessen.

Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf den hessischen Intensiv-Monitoringflächen seit 1994 bzw. seit Untersuchungsbeginn auf fünf von sieben Freilandmessflächen, fünf von sechs Buchenflächen, den beiden Fichtenflächen sowie der Kiefernfläche im Hess. Ried signifikant abgenommen. Ähnlich wie beim Nitratreintrag konnte im 10-Jahreszeitraum 2008-2017 jedoch mit Ausnahme der Kiefernfläche im Hess. Ried und den Freiflächen Krofdorf und Spessart keine weitere Abnahme beobachtet werden. Auf der Eichenfläche im Hess. Ried haben die Einträge in den letzten 10 Jahren sogar deutlich zugenommen. 2017 lag der Ammoniumstickstoffeintrag je Hektar bei 3,2 kg im Freiland und 6 kg unter Buche (jeweils Hessenmittel). Unter Fichte betrug er in Fürth 10 kg und in Königstein 9,1 kg je Hektar. Auffallend hoch waren die Ammoniumstickstoffeinträge mit 11,6 kg je Hektar in Zierenberg (Buche).

Verschiedene Bemühungen haben in der Vergangenheit zu einer Reduktion der Stickstoffemissionen und hieraus resultierenden rückläufigen Einträgen geführt. Diese Entwicklung hat sich in den vergangenen Jahren bedauerlicher Weise jedoch nicht im gleichen Maße fortgesetzt. Auf den meisten Flächen überschreitet der anthropogen bedingte atmosphärische Stickstoffeintrag im Mittel der letzten 10 Jahre



Analyse von Wasserproben

Foto: J. Evers

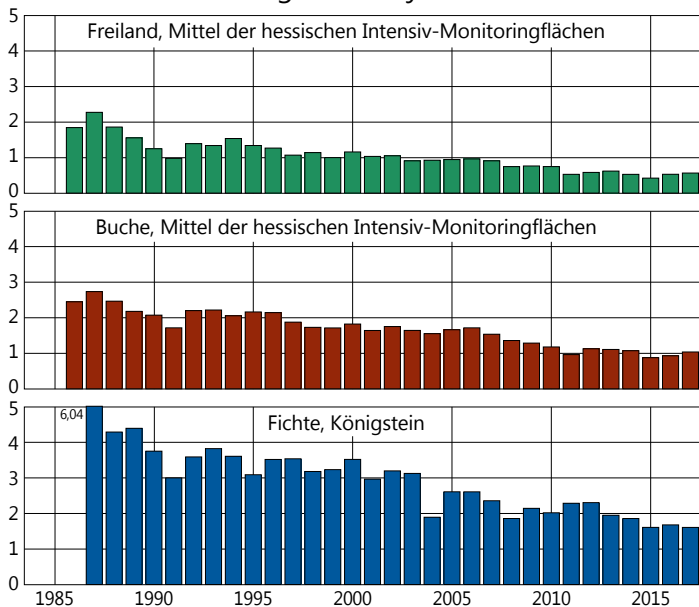
# Stoffeinträge

(2008-2017) mit Werten bis zu 16,5 kg je Hektar unter Buche (Zierenberg) und 23,7 kg unter Fichte (Fürth) nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Stickstoffeinträge, die über dem Bedarf des Ökosystems für das Wachstum liegen, ziehen jedoch – ggf. zeitverzögert – gravierende negative Konsequenzen für den Wald selbst sowie angrenzende Ökosysteme wie Oberflächen- und Grundwässer nach sich.

## Gesamtsäureeintrag

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdosition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile). Der Netto-Gesamtsäureeintrag berechnet sich aus dem Gesamtsäureeintrag abzüglich der mit dem Niederschlag eingetragenen Basen Calcium, Magnesium und Kalium (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile; Gauger et al. 2002).

### Gesamtsäure-Eintrag in kmol<sub>c</sub> je Hektar und Jahr



Intensiv-Monitoringfläche Zierenberg

Foto: J. Weymar

2017 betrug der Gesamtsäureeintrag je Hektar im Freiland 0,6 kmol<sub>c</sub> (Hessenmittel), 1,0 kmol<sub>c</sub> unter Buche (Hessenmittel) und unter Fichte 1,7 kmol<sub>c</sub> (Fürth) bzw. 1,6 kmol<sub>c</sub> (Königstein) je Hektar.

Die Höhe der atmosphärischen Baseneinträge je Hektar lag 2017 zwischen 0,07 kmol<sub>c</sub> (Kellerwald Buche) und 0,19 kmol<sub>c</sub> (Zierenberg Buche). Durch diese basischen Einträge werden auf den Flächen zwischen 8 % (Königstein Fichte) und 16 % (Hess. Ried Kiefer) der Säureeinträge in den Wald neutralisiert. Ein weiterer Teil der Säureeinträge wird auf dem Wege der Basenfreisetzung durch Verwitterung gepuffert. Die nachhaltige Säurepufferkapazität insbesondere nährstoffarmer Waldstandorte reicht jedoch auch unter Berücksichtigung der Baseneinträge nicht zur Kompensation der Säureeinträge aus.

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.*



Stammablauf-Messanlage

Foto: T. Friedhoff