

Stoffeinträge

Birte Scheler

Wald filtert durch seine große Kronenoberfläche stärker als alle anderen Landnutzungsformen gas- und partikelförmige Stoffe aus der Luft. Aufgrund dieses Filtereffektes ist das Ökosystem Wald besonders stark durch anthropogene (durch den Menschen verursachte) Stoffeinträge von Sulfatschwefel und Stickstoff (Nitrat und Ammonium) belastet. Bereits 1968 wurde im Solling auf je einer Buchen- und Fichtenfläche mit der systematischen Erfassung der Stoffeinträge begonnen, um die Wirkungen erhöhter Stoffeinträge und damit verbundener Risiken für Wälder, Waldböden und angrenzende Ökosysteme wie beispielsweise das Grundwasser zu untersuchen. Aktuell wird in Niedersachsen der Stoffeintrag in vier Fichten, drei Buchen- sowie jeweils einem Eichen- und einem Kiefernbestand des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings erfasst. Die Stoffeinträge werden jeweils auf einer Freifläche (Freilandniederschlag) und einer Bestandesmessfläche (Bestandesniederschlag) beobachtet. In Buchenbeständen wird auch der dort quantitativ bedeutsame Stammablauf gemessen. Mittels eines Kronenraumbilanzmodells (Ulrich 1991) werden aus den gemessenen Stoffflüssen Gesamtdepositionsraten bestimmt.



Intensiv-Monitoringfläche Solling, Buche

Foto: M. Spielmann

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 im Bergland (Harz und Solling) auf Grund höherer Niederschlagsmengen höher als im niedersächsischen Tiefland. Beim Vergleich der Baumarten sind Fichten- und Douglasienbestände 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 im Solling, wo eine Fichten- und eine Buchenfläche in unmittelbarer Nachbarschaft und somit mit gleichen klimatischen Verhältnissen beobachtet werden.

Niederschlag

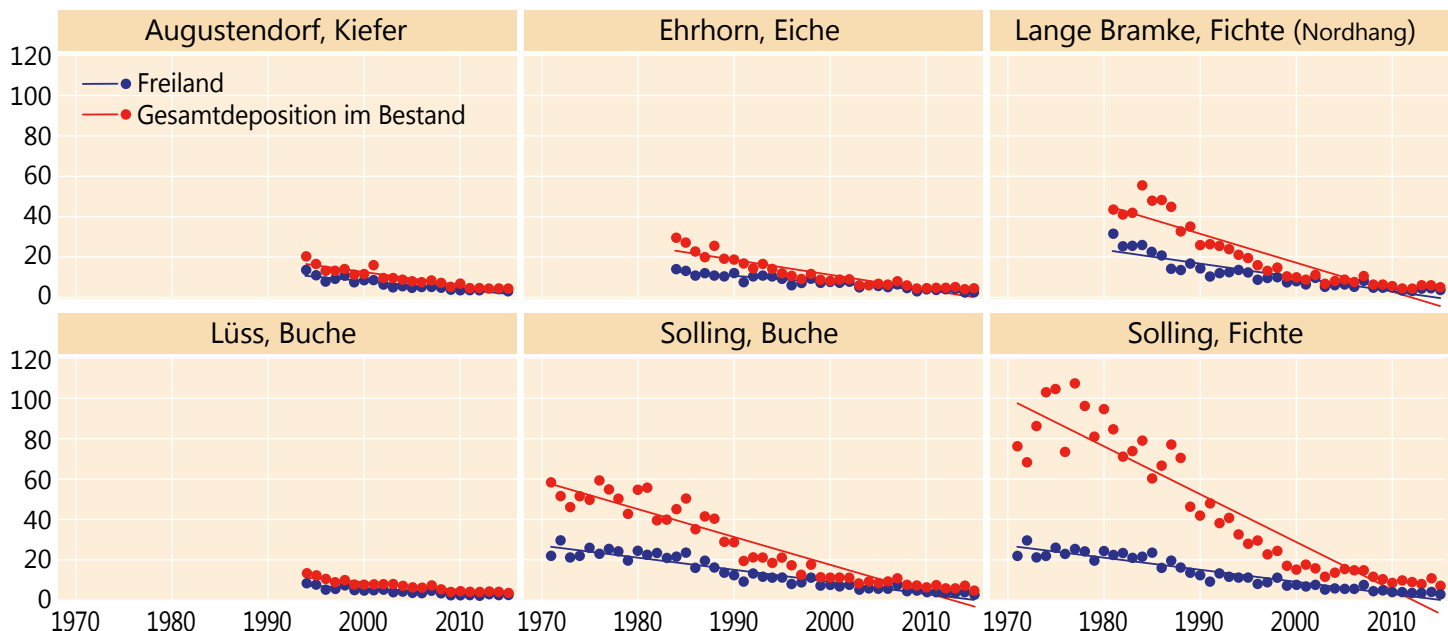
Im Vergleich zum Mittel der Jahre 2010-2014 fielen 2015 auf den Freiland-Messflächen im niedersächsischen Tiefland und im Harz zwischen 11 % und 19 % mehr Niederschlag, während im Solling und Göttinger Wald (Südostniedersachsen) die Niederschlagsmengen dem fünfjährigen Mittel entsprachen.

Der Bestandesniederschlag nahm auf den Flächen Ehrhorn (Eiche), Lange Bramke Nordhang (Fichte) und Lüss (Buche) prozentual um die gleiche Größenordnung zu wie der Freilandniederschlag. Auf allen anderen Flächen fiel die Erhöhung geringer aus als im Freiland bzw. nahm der Bestandesniederschlag bei gleichbleibendem Freilandniederschlag sogar deutlich ab (Solling Fichte: -16 %).

Schwefel

Durch die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung ist der Schwefeleintrag (jeweils gemessen als Sulfatschwefel $\text{SO}_4\text{-S}$) stark zurückgegangen. Er lag 2015 pro Hektar mit dem Bestandesniederschlag zwischen 3,6 kg (Lüss Buche) und 7,2 kg (Solling Fichte). Im Freiland wurden zwischen 2,0 kg (Ehrhorn) und 3,7 kg (Solling) je Hektar eingetragen.

Sulfatschwefel-Eintrag ($\text{SO}_4\text{-S}$) auf ausgewählten Flächen in kg je Hektar und Jahr



Stoffeinträge

Obwohl sich die Schwefeleinträge in den letzten Jahren bereits auf einem relativ niedrigen Niveau bewegten, haben sie 2015 im Vergleich zum Mittel der Jahre 2010–2014 auf allen Flächen nochmals deutlich abgenommen und zwar um bis zu 17 % im Freiland (Göttinger Wald) und zwischen 7 % (Ehrhorn Eiche) und 22 % (Solling Buche und Fichte) mit der Gesamtdeposition. Auf sieben von neun Intensiv-Monitoringflächen wurde 2015 der niedrigste Schwefeleintrag seit Beginn der Messungen registriert. Die Säurebelastung des Ökosystems durch Schwefeleinträge sank damit je Hektar unter Fichte auf Werte zwischen 0,23 kmol_c (Lange Bramke Südhang) und 0,37 kmol_c (Solling), unter Buche auf Werte zwischen 0,18 kmol_c (Lüss) und 0,23 kmol_c (Solling) sowie auf 0,19 kmol_c unter Eiche (Ehrhorn) und 0,16 kmol_c unter Kiefer (Augustendorf).

Stickstoff

Stickstoff, ein Hauptnährstoff der Pflanzen, wird einerseits in oxidierter Form als Nitrat (Quellen: Kfz-Verkehr, Verbrennungsprozesse) andererseits in reduzierter Form als Ammonium (landwirtschaftliche Quellen) in das Ökosystem eingetragen. In Augustendorf (Weser-Ems-Region) betrug der Ammoniumanteil im langjährigen Mittel (1994–2014) 68 % und in Ehrhorn (Lüneburger Heide) 63 %. Auf den anderen Flächen des Intensiven Monitorings lag er zwischen 52 % und 56 %. In dem hohen Ammoniumeintrag in Augustendorf spiegelt sich die intensive Landwirtschaft einschließlich der Intensivtierhaltung dieser Region wider.

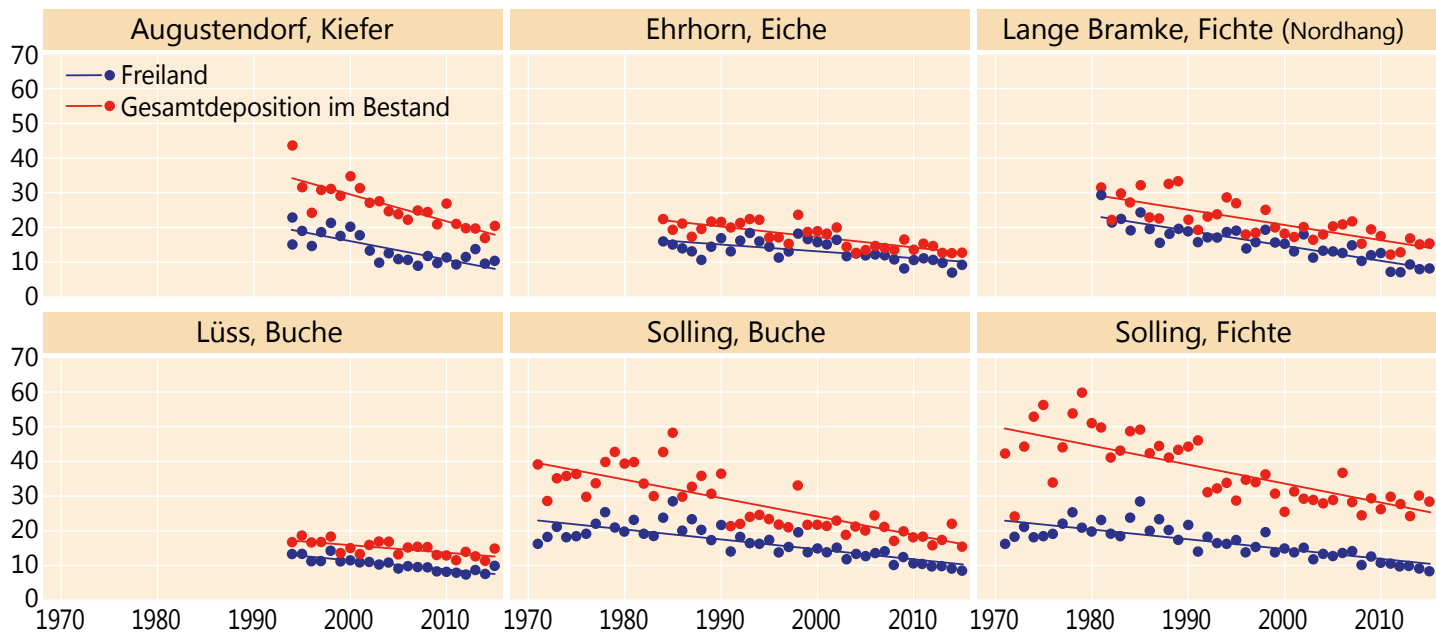
Der Nitratstickstoffeintrag hat im Freiland und in der Gesamtdeposition aller vier Baumarten auf allen untersuchten Flächen seit Untersuchungsbeginn signifikant abgenommen. Er betrug 2015 pro Hektar im Freiland zwischen 2,9 kg (Göttinger Wald) und 3,9 kg (Lange Bramke) und unter Buche (Gesamtdeposition) pro Hektar zwischen 5,2 kg (Lüss) und 7,8 kg (Göttinger Wald). Unter Fichte betrug die Nitratstickstoff-Gesamtdeposition pro Hektar 9,6 kg im Solling und zwischen 6,1 kg und 7,9 kg im Harz. Der Nitratreintrag war damit im vergangenen Jahr um bis zu 22 % geringer als im Vergleich zum Mittel der Jahre 2010–2014.



Intensiv-Monitoringfläche Solling, Fichte

Foto: J. Evers

Stickstoff-Eintrag (NH₄-N + NO₃-N) auf ausgewählten Flächen in kg je Hektar und Jahr



Stoffeinträge

Der Ammoniumstickstoffeintrag hat auf den niedersächsischen Intensiv-Monitoringflächen seit Untersuchungsbeginn ebenfalls signifikant abgenommen. Im Freiland lag er 2015 pro Hektar zwischen 3,1 kg (Göttinger Wald) und 6,6 kg (Augustendorf) und unter Buche zwischen 6,1 kg (Göttinger Wald) und 9,7 kg (Lüss). Unter Fichte betrug er pro Hektar 19 kg im Solling und zwischen 8,3 kg und 10,2 kg in Harz. Auffallend hoch sind die Ammoniumeinträge unter Kiefer mit 14,0 kg je Hektar in Augustendorf, die in der Intensivtierhaltung in dieser Region begründet sind.

Trotz verschiedener Bemühungen zur Reduktion der Stickstoffemissionen und hieraus resultierender rückläufiger Einträge übersteigt der atmosphärische Stickstoffeintrag nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum, was gravierende Konsequenzen für den Wald sowie angrenzende Ökosysteme wie Fließ- und Grundgewässer zur Folge haben kann. Hierzu zählen u. a. ein verändertes Spross-Wurzel-Verhältnis der Bäume mit einem erhöhten Windwurfisiko, Nährstoffungleichgewichte in den Pflanzen, die Ausbreitung stickstoffliebender krautiger Pflanzen sowie die Auswaschung von Nitrat mit dem Sickerwasser Richtung Grundwasser. Der Prozess der Nitratauswaschung ist mit dem Austrag wichtiger Pflanzennährstoffe wie Calcium und Magnesium verbunden, wodurch dem Waldökosystem wichtige Nährstoffe verloren gehen.

Gesamtsäure

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

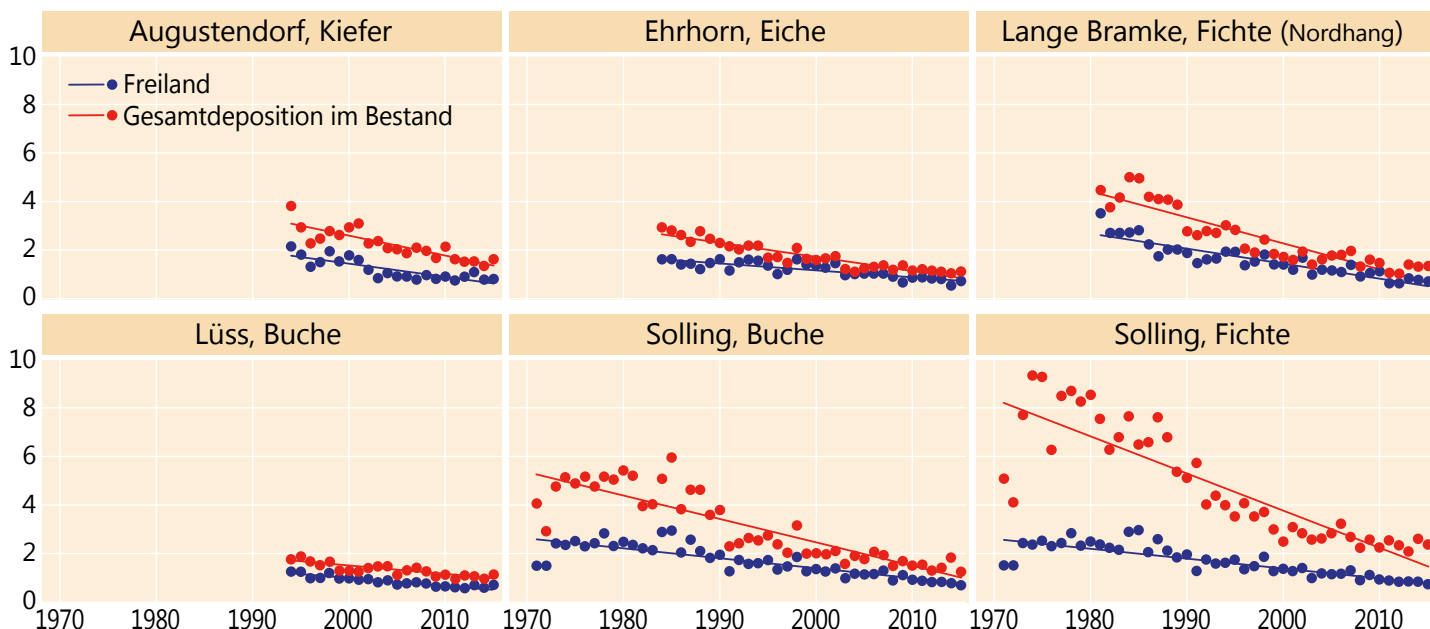
2015 betrug der Gesamtsäureeintrag pro Hektar im Freiland zwischen 0,5 kmol_c (Lüss) und 0,8 kmol_c (Augustendorf), unter Buche zwischen 1,1 kmol_c (Lüss) und 1,3 kmol_c (Solling) sowie bis zu 2,4 kmol_c unter Fichte (Solling). Mit 1,6 kmol_c war der Gesamtsäureeintrag in Augustendorf unter Kiefer höher als auf den Fichtenflächen im Harz. Grund hierfür sind die hohen Ammoniumeinträge auf dieser Fläche.



Intensiv-Monitoringfläche Lüss

Foto: M. Spielmann

Gesamtsäure-Eintrag auf ausgewählten Flächen in kmol_c je Hektar und Jahr



Stoffeinträge

Anteile der Säurebildner

Anhand der sehr langen Beobachtungsreihe im Solling kann eindrucksvoll gezeigt werden, dass sich durch die Reduktion der Schwefeleinträge die Bedeutung der einzelnen Säurebildner am Gesamtsäureeintrag deutlich verschoben hat.

In den 1970er Jahren betrug die jährliche Säurebelastung durch Sulfatschwefel im Solling unter Buche bis zu 3,6 kmol_c (1976) und unter Fichte bis zu 6,6 kmol_c je Hektar (1977). Der Anteil von Schwefel am Gesamtsäureeintrag betrug im Mittel der Jahre 1971-1975 unter Buche 53 % bzw. 62 % unter Fichte. 2015 lag der Anteil unter Buche nur noch bei 17 % (0,23 kmol_c) und unter Fichte bei 15 % (0,37 kmol_c).

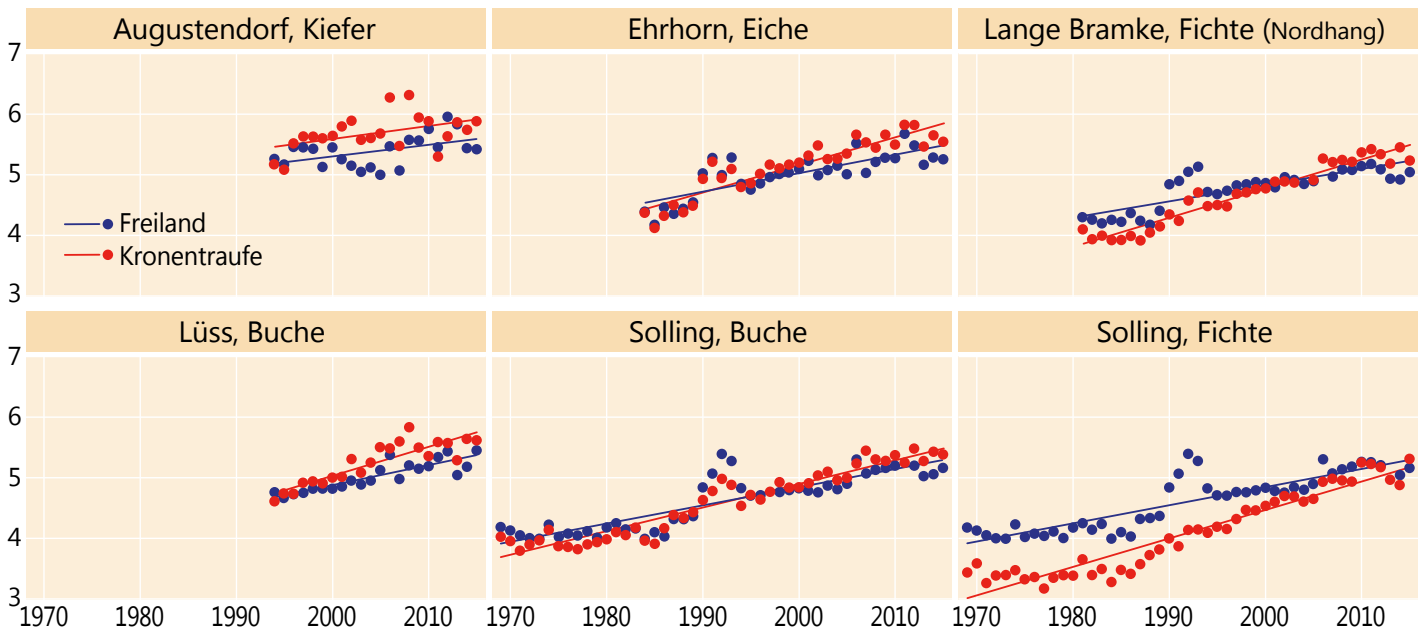
Die Säurebelastung durch Nitrat schwankte unter Buche zwischen maximal 1,6 kmol_c (1985) und 0,5 kmol_c (2015) und unter Fichte zwischen 1,7 kmol_c (1980, 1981) und 0,7 kmol_c (2015) je Hektar. Der relative Anteil von Nitrat am Gesamtsäureeintrag stieg unter Buche von 17 % (1971-75) auf 36 % (2015) und unter Fichte im selben Zeitraum von 15 % auf 28 % (2015). Ammonium ist heute der bedeutendste Säurebildner. Sein Anteil stieg von 25 % (Buche 1971-1975) bzw. 21 % Fichte (1971-1975) auf 46 % im Jahr 2015 unter Buche und 54 % unter Fichte. Auch unter dem Gesichtspunkt Säurebelastung ist eine weitere Reduzierung der Stickstoffeinträge dringend geboten.

Sofern Bestände auf nährstoffarmen, pufferschwachen Waldböden stocken, ist eine standortsangepasste Bodenschutzkalkung zum Schutz der Waldböden und ihrer Filterfunktion nach wie vor angezeigt.

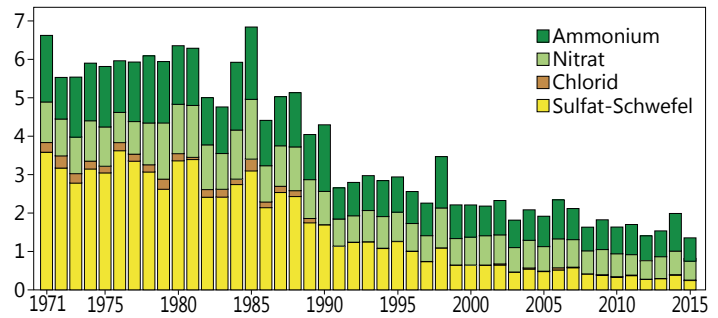
pH-Wert

Erfreulich ist die Entwicklung des pH-Wertes sowohl im Freilandniederschlag als auch in der Kronentraufe. Lag 1971 der mittlere pH-Wert im Solling unter Fichte bei 3,3, unter Buche bei 3,8 und im Freiland bei 4,0, lag er 2015 im Freiland bei 5,2, unter Buche bei 5,4 und unter Fichte bei 5,3. Er hat sich damit weitgehend dem natürlichen, nur durch Kohlensäure beeinflussten pH-Wert im Niederschlag von 5,6 angenähert.

Entwicklung des pH-Wertes in der Kronentraufe und im Freilandniederschlag auf ausgewählten Flächen



Anteile der Säurebildner am Gesamtsäure-Eintrag (kmol_c je Hektar und Jahr) im Solling (Buche)



Streufall- und Depositionssammler

Foto: J. Evers

kmol_c (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_c je Hektar