

## Statusbericht Deposition

35 Jahre Niederschlagsmessungen  
in Niedersachsen (1985 bis 2019)





## **Statusbericht Deposition**

**35 Jahre Niederschlagsmessungen  
in Niedersachsen (1985 bis 2019)**



**Niedersachsen**

Herausgeber:

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,  
Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

Direktion

Am Sportplatz 23

26506 Norden

Der vorliegende Bericht wurde erstellt durch:

Anne Keuffel-Türk, NLWKN Betriebsstelle Hannover-Hildesheim

Mit Unterstützung von:

Malte Iltis

Anouchka Jankowski

Hubertus Schültken

Bildnachweis:

Deckblatt: NLWKN Betriebsstelle Hannover-Hildesheim

Deckblatt oben rechts: tawatchi07

1. Auflage Dezember 2022, 250 Stück,

Schutzgebühr 5,00 € zzgl. Versandkostenpauschale

Bezug:

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,  
Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

Veröffentlichungen

Göttinger Chausee76 A

30453 Hannover

<https://nlwkn-webshop.webshopapp.com>



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	2
Tabellenverzeichnis .....	6
Zusammenfassung .....	7
1. Einleitung .....	8
2. Messkonzeption.....	9
2.1 Messstandorte.....	10
2.1.1 Freilandmessstellen.....	11
2.1.2 Bestandsmessstellen .....	13
2.2 Probenahme .....	14
2.3 Analytik.....	14
3. Bewertungsgrundlagen und Auswerteverfahren .....	15
3.1 Bewertungsgrundlagen .....	15
3.2 Routineauswertung Konzentrationen und Frachten.....	16
3.3 Median und Percentile .....	17
3.4 Emissions- und Immissionsdaten des Umweltbundesamtes .....	17
3.5 Säure- und Stickstoffeinträge analog zum Umweltindikator „Säure- und Stickstoffeintrag“ .....	18
3.6 Gesamtstickstoff und Ammonium-Nitrat-Verhältnis .....	19
4. Ergebnisse und Bewertung .....	20
4.1 Parameterbezogene Auswertungen.....	20
4.1.1 Einfluss verschiedener Standortfaktoren.....	20
4.1.2 Niederschlagshöhe .....	26
4.1.3 pH-Wert und Leitfähigkeit.....	28
4.1.4 Stickstoffeintrag .....	30
4.1.5 Sulfat und Phosphat .....	36
4.1.6 Chlorid, Natrium, Magnesium, Kalium, Calcium und Fluorid.....	39
4.1.7 Schwermetalle (Blei, Kupfer, Zink, Chrom, Nickel, Cadmium, Quecksilber) .....	44
4.1.8 Umweltindikator B5 „Säure- und Stickstoffeintrag“ .....	55
4.2 Standortbezogene Auswertungen.....	58
4.2.1 Freiland- und Bestandsmessstellen eines Standortes.....	58
4.2.2 Messstellen verschiedener Regionen.....	66
4.2.3 Vergleich von Standorten in Luv- und Lee-Lage.....	74
5. Fazit und Ausblick .....	79
6. Literatur.....	81
7. Anhang .....	84

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Depositionsmessnetz Niedersachsen, Lage der Niederschlagsmessstellen. ....	11
Abb. 2: Niederschlagssammler im Freiland und schematischer Querschnitt. ....	12
Abb. 3: Niederschlagssammler im Bestand und schematischer Querschnitt. ....	13
Abb. 4: Deposition von Sulfatschwefel von 1996 bis 2019 (Medianwerte aller GÜN-Freiland- und BDF-L-Messstellen). ....	20
Abb. 5: Deposition von Nitrat-, Ammonium- und Gesamt-Stickstoff von 1996 bis 2019 (Medianwerte aller GÜN-Freiland- und BDF-L-Messstellen). ....	21
Abb. 6: Vergleich der Niederschlagshöhen, pH-Werte und Phosphat-Frachten (Medianwerte) von Acker-, Grünland- und Waldstandorten im Zeitraum von 1985 bis 2019. ....	22
Abb. 7: Vergleich der Leitfähigkeit und der Frachten von Sulfat-Schwefel, Nitrat-Stickstoff, Ammonium-Stickstoff, Kalium, Calcium, Kupfer- und Magnesium (Medianwerte) von Acker-, Grünland- und Waldstandorten im Zeitraum von 1985 bis 2019. ....	23
Abb. 8: Vergleich der Blei-, Cadmium- und Fluorid-Frachten (Medianwerte) von Acker-, Grünland- und Waldstandorten im Zeitraum von 1985 bis 2019. ....	24
Abb. 9: Vergleich der Natrium-, Chlorid- und Fluorid-Frachten (Medianwerte) von Acker-, Grünland- und Waldstandorten im Zeitraum von 1985 bis 2019. ....	25
Abb. 10: Mittlere jährliche Niederschlagshöhen in Niedersachsen und Deutschland im Zeitraum von 1985 bis 2019 (Daten aus Deutschland: Website des DWD <a href="https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html">https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html</a> ). ....	27
Abb. 11: Mittlerer Jahresniederschlag in Deutschland seit 1881. Dunkler hervorgehoben ist der Betrachtungszeitraum von 1985 bis 2019 (Website des DWD, <a href="https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html">https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html</a> ). ....	27
Abb. 12: Entwicklung der pH-Werte von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25%- und 75%-Perzentil. ....	28
Abb. 13: Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25%- und 75%-Perzentil. ....	29
Abb. 14: Quellen der Stickstoffoxid-Emission in Deutschland im Jahr 2019 (NO <sub>x</sub> , berechnet als NO <sub>2</sub> ) (Datenquelle: UBA 2021a). ....	30
Abb. 15: Quellen der Ammoniak-Emission in Deutschland im Jahr 2019 (Datenquelle: UBA 2021a). ....	30
Abb. 16: Entwicklung der jährlichen Emissionen von Stickstoffoxid und Ammoniak in Deutschland von 1990 bis 2019 (Datenquelle: UBA 2021a). ....	31
Abb. 17: Entwicklung der Gesamtstickstoff-Fracht von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25%- und 75%-Perzentil. ....	32
Abb. 18: Entwicklung der Nitratstickstoff-Fracht von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25%- und 75%-Perzentil. ....	32
Abb. 19: Entwicklung der Ammoniumstickstoff-Fracht von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25%- und 75%-Perzentil. ....	33
Abb. 20: Entwicklung der Frachten von Ammonium-, Nitrat- und Gesamtstickstoff an Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median. ....	33
Abb. 21: Entwicklung des Verhältnisses der Ammonium-/Nitratstickstoff-Fracht von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. ....	34

Abb. 22: Quellen der Schwefeldioxid-Emission in Deutschland im Jahr 2019 (Datenquelle: UBA 2021a).	36
Abb. 23: Entwicklung der jährlichen Schwefeldioxid-Emissionen in Deutschland von 1990 bis 2019 (Datenquelle: UBA 2021a).	36
Abb. 24: Entwicklung der Sulfat-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25%- und 75%-Perzentil.	37
Abb. 25: Entwicklung der Phosphatphosphor-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.	38
Abb. 26: Entwicklung der Chlorid-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median, das 25%- und 75%-Perzentil.	39
Abb. 27: Entwicklung der Natrium-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median, das 25%- und 75%-Perzentil.	40
Abb. 28: Entwicklung der Magnesium-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1992 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median, das 25%- und 75%-Perzentil.	40
Abb. 29: Entwicklung von Chlorid-, Natrium- und Magnesium-Frachten von Freilandmessstellen im Zeitraum von 1992 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.	41
Abb. 30: Entwicklung der Kalium-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median, das 25%- und 75%-Perzentil.	42
Abb. 31: Entwicklung der Calcium-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1992 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median, das 25%- und 75%-Perzentil.	42
Abb. 32: Entwicklung der Fluorid-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25%- und 75%-Perzentil.	43
Abb. 33: Entwicklung der jährlichen Emissionen von Blei, Kupfer und Zink in Deutschland von 1990 bis 2019 (Datenquelle: UBA 2021b)	45
Abb. 34: Vergleich der bundesweiten Blei-Emission (Datenquelle: UBA 2021b) und Blei-Frachten im Niederschlag Niedersachsens (Mediane) im Zeitraum von 1990 bis 2019. Nicht berücksichtigt wird bei den Freilandmessstellen das Jahr 2002, da nur ein Einzelwert vorliegt (0,018 kg/ha*a).	45
Abb. 35: Entwicklung der Kupfer- und Zink-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.	46
Abb. 36: Entwicklung der jährlichen Emissionen von Chrom und Nickel in Deutschland von 1990 bis 2019 (Datenquelle: UBA 2021b).	47
Abb. 37: Entwicklung der Chrom- und Nickel-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 2005 bzw. 1994 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.	48
Abb. 38: Entwicklung der jährlichen Emissionen von Cadmium und Quecksilber in Deutschland von 1990 bis 2019 (Datenquelle: UBA 2021b).	49
Abb. 39: Entwicklung der Cadmium- und Quecksilber-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bzw. 1992 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.	49
Abb. 40: Zink-, Blei-, Kupfer- und Cadmium-Konzentrationen (Jahresmittelwerte) von Freiland- und Bestandsmessstellen, bezeichnet als Messwert (MW) unter Berücksichtigung von Bestimmungsgrenze (BG) und Schwellenwert (SW).	52
Abb. 41: Nickel-, Chrom- und Quecksilber-Konzentrationen (Jahresmittelwerte) von Freiland- und Bestandsmessstellen, bezeichnet als Messwert (MW) unter Berücksichtigung von Bestimmungsgrenze (BG) und Schwellenwert (SW).	53

Abb. 42: Prozentuale Darstellung der Schwermetall-Konzentrationen (Jahresmittelwerte) bezeichnet als Messwert (MW) im Jahr 2019 unter Berücksichtigung von Bestimmungsgrenze (BG) und Schwellenwert (SW). Die Bestandsmessstellen sind gegenüber den Freilandmessstellen dunkler dargestellt. ....	54
Abb. 43: Säure- und Stickstoffeinträge (beruhend auf Medianwerten) an Freilandmessstellen in Anlehnung an den Umweltindikator B5. ....	55
Abb. 44: Vergleich von Säureeintrag in Niedersachsen in Anlehnung an den Umweltindikator B5, Umweltindikator B5 Niedersachsen und Umweltindikator B5 Deutschland. ....	56
Abb. 45: Vergleich von Stickstoffeintrag in Niedersachsen in Anlehnung an den Umweltindikator B5, Umweltindikator B5 Niedersachsen und Umweltindikator B5 Deutschland. ....	56
Abb. 46: Nitratstickstoff- Ammoniumstickstoff- und Sulfatschwefel-Frachten in niedersächsischen Freilandmessstellen; diese Parameter gehen in die Berechnung des Umweltindikators B5 ein. ....	57
Abb. 47: Regionale Viehdichte 2016 (Deblitz, C. et al., 2021). ....	57
Abb. 48: Lage der für diesen Bericht ausgewählten Depositionsstandorte mit Freiland- und Bestandsmessstellen. ....	59
Abb. 49: Niederschlagshöhen von Freiland- und Bestandsmessstellen an fünf ausgewählten Standorten. ....	60
Abb. 50: Sulfatschwefel-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen an fünf ausgewählten Standorten. ....	61
Abb. 51: Nitratstickstoff-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen an fünf ausgewählten Standorten. ....	62
Abb. 52: Ammoniumstickstoff-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen an fünf ausgewählten Standorten. ....	63
Abb. 53: Frachtenverhältnis Ammonium- zu Nitratstickstoff von Freiland- und Bestandsmessstellen an fünf ausgewählten Standorten. ....	64
Abb. 54: Depositionsmessnetz Niedersachsen, Regionen. ....	66
Abb. 55: Niederschlagshöhen in den Regionen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Mediane im Zeitraum von 1985 bis 2019. ....	67
Abb. 56: Vergleich der Niederschlagshöhen (Medianwerte) ausgewählter Regionen im Betrachtungszeitraum. ....	67
Abb. 57: Chlorid, Natrium- und Magnesium-Frachten (Medianwerte) von Freilandmessstellen ausgewählter Regionen im Betrachtungszeitraum. ....	68
Abb. 58: Frachtenverhältnis von Ammonium- zu Nitratstickstoff in den Regionen. Dargestellt sind die Mittelwerte der ersten und letzten fünf Jahre des Betrachtungszeitraumes. ....	70
Abb. 59: Frachtenverhältnis von Ammonium- zu Nitratstickstoff ausgewählter Regionen im Betrachtungszeitraum. ....	70
Abb. 60: Ammoniumstickstoff-Frachten (Medianwerte) ausgewählter Regionen im Betrachtungszeitraum. ....	71
Abb. 61: Nitratstickstoff-Frachten (Medianwerte) ausgewählter Regionen im Betrachtungszeitraum. ....	71
Abb. 62: Blei-Frachten (Medianwerte) von ausgewählten Regionen im Betrachtungszeitraum. ....	72
Abb. 63: Topografie am Dörenberg und Lage der Messstellenstandorte. ....	74
Abb. 64: Schematische Darstellung der Situation im Bereich des Dörenbergs. ....	75
Abb. 65: Jahresniederschlag am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort. ....	75
Abb. 66: Sulfat-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort. ....	76
Abb. 67: Chlorid-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort. ....	76

Abb. 68: Blei-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort. ....	76
Abb. 69: Ammoniumstickstoff-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort.....	77
Abb. 70: Nitratstickstoff-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort. ....	77
Abb. 71: Frachtenverhältnis Ammoniumstickstoff/Nitratstickstoff am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort. ....	78
Abb. 72: Kalium-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort. ....	78
Abb. 73: Phosphatphosphor-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort.....	78

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Anzahl der Depositionsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. ....	10
Tab. 2: Parameterumfang der Niederschlagsuntersuchung. ....	14
Tab. 3: An der Luftschadstoffemission beteiligte Quellgruppen (UBA 2019, 2020a, leicht verändert). ....	18
Tab. 4: Zulässige zusätzliche jährliche Frachten anSchadstoffen über alle Wirkungspfade nach § 8 Abs. 2 Nr. 2 des Bundes-Bodenschutzgesetzes. ....	44
Tab. 5: Qualitätsnormen einiger Parameter für Grund- und Trinkwasser Trinkwasser (die zur Bewertung herangezogenen Werte sind hervorgehoben). ....	51
Tab. 6: Standorte mit Freiland- und Bestandsmessstellen und deren Untersuchungszeitraum. Grau unterlegt sind die für diesen Bericht ausgewählten Standorte. ....	58

## Zusammenfassung

Der vorliegende Statusbericht gibt einen Überblick über 35 Jahre Niederschlagsmessung in Niedersachsen. In den 1980er Jahren gab es deutschlandweit massive Probleme durch in die Luft eingetragene Schadstoffe, die über den Niederschlag die Erdoberfläche erreichten und insbesondere in den Nadelwäldern als „saurer Regen“ große Schäden anrichteten. Daher rückte im Rahmen der Waldschadensforschung zunehmend die Stoffzusammensetzung des Regenwassers in den Fokus. In Niedersachsen wurde ab 1983 damit begonnen, ein Depositionsmessnetz aufzubauen, mit dem Ziel, die Niederschlagsbeschaffenheit möglichst flächenhaft zu ermitteln und deren längerfristige Entwicklung darzustellen. Das Messnetz umfasst aktuell 53 Messstellen im Freiland und fünf Messstellen im Bestand. Es handelt sich dabei um Sammelsysteme, die den Niederschlag in offenen Gefäßen auffangen.

Im Betrachtungszeitraum von 1985 bis 2019 bewegen sich die mittleren jährlichen Niederschlagshöhen auf einem Niveau um 700 mm.

Die Bestandsmessstellen weisen tendenziell geringere Niederschlagshöhen auf; generell fallen die Unterschiede zwischen Freiland- und Bestandsmessstellen aber gering aus. Bei den Niederschlagsfrachten zeigt sich ein anderes Bild: Die Frachten der Bestandsmessstellen liegen größtenteils über denen der Freilandmessstellen, weil diese zusätzlich zu den im Niederschlag enthaltenen Stoffen auch die bereits auf den Baumbestandteilen adsorbierten und akkumulierten Inhaltsstoffe der Luft beinhalten, die mit dem Regen abgewaschen werden.

Die Niederschlagsfrachten sind in hohem Maße abhängig von den anthropogenen Emissionen in die Atmosphäre. Sehr deutlich zeigt sich dies beim Parameter Schwefel. In den 1980er Jahren waren die deutschlandweiten Schwefeldioxid-Emissionen, die überwiegend durch die

Oxidation von Schwefel in Brennstoffen bei der stationären Verbrennung in Kraft- und Fernheizwerken entstehen, sehr hoch. Ein Teil des Schwefeldioxids reagiert mit der Luft und der Luftfeuchtigkeit zu Schwefelsäure und ist damit hauptverantwortlich für die sauren Niederschläge. Rauchgasentschwefelung, schwefelarme Brennstoffe und die Stilllegung veralteter Betriebe führte bis zur Jahrtausendwende zu einer Reduktion der Schwefeldioxid-Emission um rund 90 %. Diese Entwicklung ist sowohl an den ebenfalls rückläufigen Sulfatschwefel-Frachten aber auch an den ansteigenden pH-Werten der Niederschläge zu verfolgen. Ebenfalls direkt abhängig von den bundesweiten Emissionen sind die im Regenwasser nachgewiesenen Stickstoffverbindungen. Bei den Schwermetallen lässt sich am Parameter Blei beobachten, dass der rasche Rückgang der Emissionen durch das Verbot bleihaltigen Benzins im Jahr 1988 einen sofortigen Effekt auf die Blei-Frachten im Niederschlag hatte.

Regionale Einflüsse können bei der Zuordnung der Messstellen zu neun geografisch abgrenzbaren Bereichen mit für Niedersachsen besonderen Eigenschaften erfasst werden. Am Beispiel der Parameter Niederschlagshöhe, Stickstoff und Blei sowie meeresbürtiger Aerosole werden die Unterschiede verschiedener Regionen dargestellt.

Dass Messstellenpaare eines Standortes lagebedingt Unterschiede aufweisen, wird an einem Vergleich einer Bestands- und einer Freilandmessstelle sowie einer Messstelle in Luv und einer weiteren in Lee dargestellt.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass im Zeitraum von 1985 bis 2019 die Niederschlagsfrachten in Abhängigkeit vom Parameter zurückgegangen oder gleichgeblieben sind und sich aus heutiger Sicht insgesamt auf einem niedrigen Niveau befinden.

# 1. Einleitung

Die Zusammensetzung des Niederschlags wird bestimmt durch die Wechselwirkungen von Wasser mit den natürlichen Bestandteilen der Atmosphäre aber auch durch über anthropogene Emissionen eingetragene Stoffe, die sowohl direkt als auch über die Luft die Erdoberfläche erreichen.

Betreiber von Anlagen, die Schadstoffe in die Atmosphäre emittieren, unterliegen gesetzlichen Regelungen bzw. Auflagen, die für bestimmte Schadstoffe einzuhaltende Grenz- bzw. Zielwerte vorgeben. Das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG, 2013) ist das maßgebende Gesetz zur Luftreinhaltung in der Bundesrepublik Deutschland. Es trat 1974 erstmals in Kraft, da bis dahin geltende Instrumente zur Regulierung (Gewerbeordnung) nicht ausreichend waren, um industrielle Emissionen und deren negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt deutlich zu minimieren.

Die niedersächsische Landesregierung strebt seit vielen Jahren an, die Qualität der Böden und Gewässer zu verbessern. Da die in der Atmosphäre, der Vegetation und in Böden und Gewässern ablaufenden Prozesse vielfältig sind, ist es unerlässlich, Wasser, Boden und Luft mit ihren Wechselwirkungen zu beobachten. Entsprechend ist es Anspruch des Gewässerüberwachungssystems Niedersachsen (GÜN), die Bandbreite der Einflussfaktoren und der bestehenden Immissionen im Niederschlag, in Oberflächengewässern und im Grundwasser zu ermitteln, um bei negativen Auswirkungen über geeignete Maßnahmen gegensteuern sowie deren Erfolg kontrollieren zu können.

Ab 1983 wurde im Rahmen des GÜN ein flächendeckendes Niederschlagsbeschaffenheitsmessnetz (Depositionsmessnetz) geplant und sukzessive eingerichtet. Auslöser waren die in diesen Jahren erheblichen Auswirkungen der sauren Niederschläge, zu denen beispielsweise das Waldsterben und die Versauerung von Gewässern gehörten. Für das Land Niedersachsen wurden aufgrund der hohen Belastungen und

wegen der weit verbreitet anstehenden basenarmen Ausgangsgesteine, mögliche Auswirkungen durch die Deposition von Luftinhaltsstoffen in höherem Ausmaß erwartet.

Das Depositionsmessnetz in Niedersachsen besteht vorwiegend aus Standorten mit Freilandmessstellen; einige Standorte sind zusätzlich mit Bestandsmessstellen ausgestattet. Die eingesetzten Niederschlagssammler sind ständig offene Sammler, sogenannte „Bulk“-Sammler, mit denen sowohl die nasse als auch die trockene Deposition erfasst werden können.

Der Großteil der Niederschlagsmessstellen wird seit 1985 betrieben. Dieser Bericht stellt die Ergebnisse von 35 Jahren Depositionsmessung in Niedersachsen beginnend mit dem Jahr 1985 bis zum Jahr 2019 zusammenfassend dar. Untersucht werden u.a. routinemäßig Nährstoffe (Nitrat, Ammonium, Phosphat), Säurebildner (Sulfat, Nitrat, Ammonium, Chlorid) und einige Schwermetalle (z.B. Blei, Zink, Cadmium), die hinsichtlich der Auswirkungen auf Vegetation, Boden, Gewässer und Grundwasser von hoher Bedeutung sind.

Die Überwachung der Niederschlagsbeschaffenheit hat dabei folgende Ziele:

- Eine annähernd flächendeckende Ermittlung des Stoffeintrages aus der Luft und damit auch in Böden und Gewässer (Zustandsbeschreibung),
- Darstellung der Niederschlagsbeschaffenheit über einen längeren Zeitraum, verbunden mit der Erfassung und Dokumentation von Veränderungen des Stoffeintrages,
- Ermittlung der Einträge in besonders exponierten Regionen und damit die Erfassung landwirtschaftlicher, industrieller oder geografische Einflüsse,
- Erfassung des Erfolgs von Minderungsmaßnahmen.

## 2. Messkonzeption

Atmosphärische Stoffeinträge finden sich im Niederschlag wieder und sind auch über diesen Weg sowohl für Boden- als auch für Gewässersysteme relevant. In den Siebziger und Achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts war beispielsweise das beginnende Waldsterben ein sichtbares Zeichen für die zunehmende Versauerung des Systems Boden – Wasser – Pflanze und hat den Fokus auch auf die Stoffzusammensetzung der Niederschläge gelenkt („saurer Regen“). Überdüngung und Schwermetallakkumulation bzw. sogar -toxizität waren weitere Probleme in Ökosystemen.

Seit 1985 wurde in Niedersachsen sukzessive das Depositionsmessnetz zur Untersuchung der Niederschlagsbeschaffenheit auf Säurebildner, Nährstoffe und Schwermetalle eingerichtet als Teil des vom NLWKN betriebenen Gewässerüberwachungssystems Niedersachsen (GÜN). Ziel ist die möglichst flächenhafte Ermittlung der Niederschlagsbeschaffenheit und die Darstellung längerfristiger Entwicklungen an nicht unmittelbar anthropogen geprägten Standorten. Mit einbezogen werden aber auch besonders exponierte und gefährdete Regionen sowie Standorte, an denen mit einer erhöhten Belastung von Niederschlägen zu rechnen ist.

Von Beginn an lag der Fokus auf der Untersuchung des Freilandniederschlags. Hierzu wurden vorrangig Messstellen auf unbeeinflussten Freiflächen wie in Schonungen von Waldgebieten oder auf größeren Lichtungen eingerichtet. Um Gebiete in der Waldbewirtschaftung mit Kahlschlägen und anschließender Neuaufforstung zu vermeiden, wurden später einige Messstellen auch in Randbereiche nahe Wald verlegt. Nur wenige der Freilandmessstellen wurden auf Acker- bzw. Grünland errichtet. Der Großteil der Niederschlagsmessstellen liegt nicht im unmittelbaren Einflussbereich von Emittenten, sondern es wurde die Nähe zu versauerungsgefährdeten Gewässern oder die Lage in wasserwirtschaftli-

chen Einzugsgebieten angestrebt. Durch punktuelle Untersuchungen sollen Kenntnisse über die örtlich und zeitlich variierende Beschaffenheit der Niederschläge ermittelt werden.

Neben den Untersuchungen im Freiland wurden aufgrund der deutlich höheren Einträge unter Wald von Beginn an auch einige Bestandsmessstellen eingerichtet. Diese Standorte, wurden jeweils parallel mit einer Freiland- und einer Bestandsmessstelle ausgestattet.

Zusätzlich zu den Depositionsmessstellen des GÜN wurden im Rahmen des vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie LBEG betriebenen Bodendauerbeobachtungsprogrammes vom NLWKN von 1995 bis 1999 weitere Freilandmessstellen an landwirtschaftlichen Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF-L) errichtet, die seither durchgängig beprobt werden. Diese befinden sich zumeist in der Umgebung von Acker und Grünland und könnten damit den Einfluss der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung auf diesen Flächen erfassen. Die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) betreibt im BDF-Programm Depositionsmessstellen in Waldökosystemen, die in diesem Bericht aber nicht Gegenstand der Betrachtung sind.

In den ersten Jahren wurde das Depositionsmessnetz in Niedersachsen zentral von der Wasserwirtschaftsverwaltung (zunächst vom Niedersächsischen Landesamt für Wasserwirtschaft NLW, dann vom nachfolgenden Niedersächsischen Landesamt für Wasser und Abfall NLWA) betreut, ab 1991 erfolgte die Dezentralisierung. Hierzu wurde ein Messkonzept veröffentlicht, welches sicherstellen sollte, dass die beteiligten Dienststellen der niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung nach einheitlichen Kriterien die Untersuchungen durchführen (NLÖ, 1993). In dieser Umstellungsphase wurde nur eine Auswahl an Messstellen zentral weiter betreut, bis die Übergabe an alle Dienststellen abgeschlossen war.

Tab. 1: Anzahl der Depositionsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019.

Jahr	Anzahl der Messstellen		
	Freiland		Bestand
	GÜN	BDF	GÜN
1985	40		4
1986	40		4
1987	40		6
1988	40		6
1989	40		6
1990	41		8
1991	42		7
1992	24		6
1993	24		6
1994	38		7
1995	38	4	7
1996	39	12	7
1997	38	14	7
1998	37	14	7
1999	37	20	7
2000	37	20	7
2001	37	20	7
2002	35	20	6
2003	35	20	6
2004	35	20	6
2005	35	20	6
2006	35	20	6
2007	35	20	6
2008	35	20	6
2009	35	20	6
2010	35	20	6
2011	35	20	6
2012	35	20	6
2013	35	19	6
2014	34	19	6
2015	34	19	6
2016	34	19	6
2017	34	19	6
2018	34	19	6
2019	34	19	5

Die Entwicklung der Messstellenanzahl stellt Tabelle 1 dar. Die Umstellung auf dezentrale Messnetzbetreuung im Jahr 1991 und die Einrichtung von Freilandmessstellen an BDF-L ab 1995 sind die Hauptgründe für die wechselnden Messstellenzahlen im Berichtszeitraum.

Zurzeit werden insgesamt 58 Depositionsmessstellen von 10 Betriebsstellen des NLWKN betrieben. Dabei handelt es sich um 53 Freilandmessstellen, von denen 19 Messstellen in das BDF-Programm eingebunden sind und 5 Bestandsmessstellen. Standorte mit einer Bestandsmessstelle sind auch immer mit einer Freilandmessstelle ausgestattet.

## 2.1 Messstandorte

Die Messstandorte des Depositionsmessnetzes wurden so gewählt, dass weitestgehend eine flächendeckende Ermittlung der Niederschlagsbeschaffenheit in Niedersachsen möglich ist. Abbildung 1 stellt die Lage aller Freiland- und Bestandsmessstellen dar, auch die der zwischenzeitlich aufgegebenen Messstellen. Ebenfalls sind die Freilandmessstellen gekennzeichnet, die in das BDF-Programm eingebunden sind. Hier gibt es die Besonderheit, dass nicht an allen

BDF-Standorten Niederschlagsmessungen durchgeführt werden. In diesen Fällen greift man auf die Untersuchungen einer nahegelegenen Freilandmessstelle oder einer anderen BDF-Freilandmessstelle zurück, einer sogenannten Bezugsmessstelle. Diese Messstellen sind in Tabelle 1 nicht als BDF-Messstelle aufgeführt. Weiterhin sind BDF-Freilandmessstellen zu finden, bei denen Sonderuntersuchungen zu einer speziellen Thematik durchgeführt wurden.

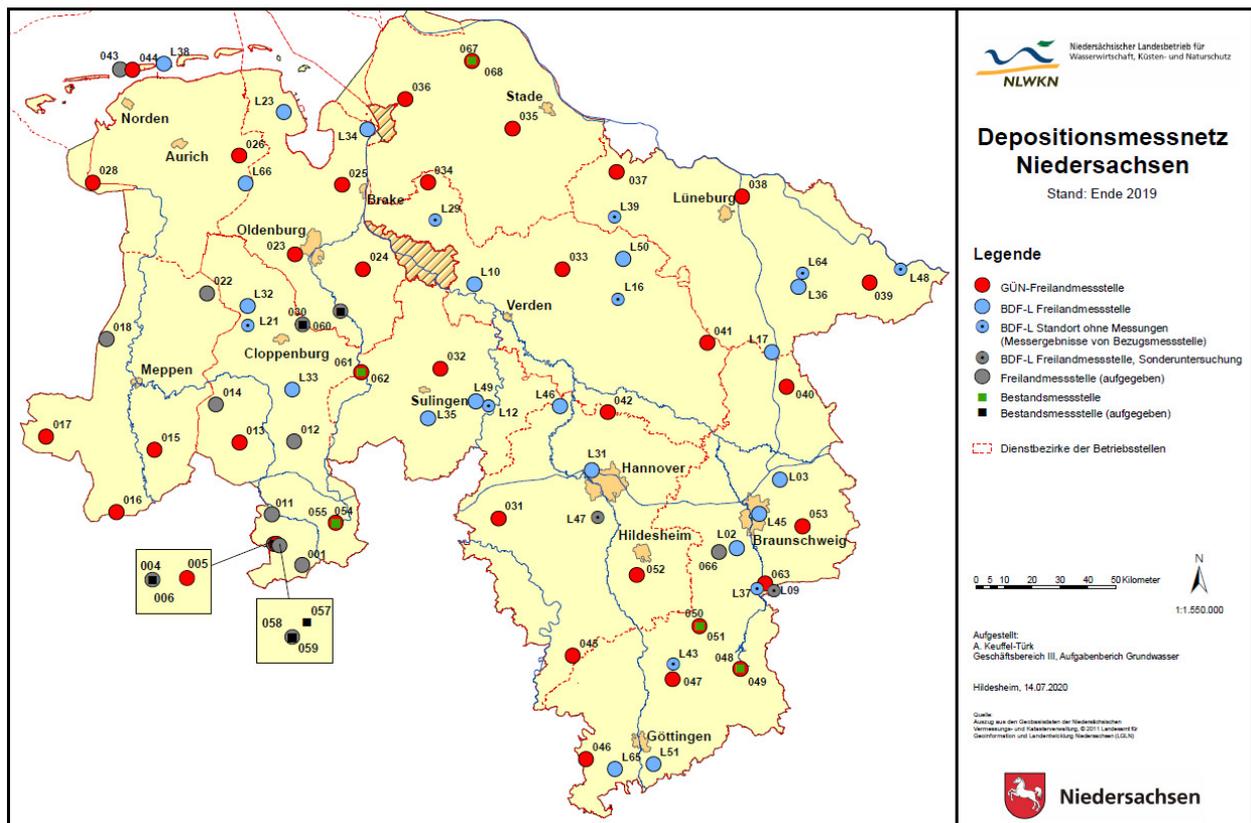


Abb. 1: Depositionsmessnetz Niedersachsen, Lage der Niederschlagsmessstellen.

Die Errichtung des Depositionsmessnetzes erfolgte nach Berücksichtigung der Empfehlungen des NLW (1987) und des DVWK (1984, 1986, 1991).

Bei der Festlegung der Messstandorte sind einige wichtige Punkte zu berücksichtigen. Das Umfeld der Messstelle sollte möglichst homogen gestaltet sein, denn im Einflussbereich von Hindernissen wird das Niederschlagsgeschehen lokal stark geprägt (z.B. Luv-/Lee-Effekt). Wenn nicht gerade solche Effekte von den Messungen erfasst werden sollen, müssen die Standorte möglichst weit von derartig wirksamen Hindernissen gewählt werden. Bergkuppen und Geländekanten sind bei der Standortwahl zu meiden, geeignet sind möglichst gering geneigte Hangflächen oder hochgelegene Ebenen. Ebenso sind kleinräumig auftretende klimatologische Aspekte zu beachten, z.B. können extreme Nebelhäufigkeiten, erhöhte Taubildung oder Stauwolkenbildung in Mittelgebirgslagen die Deposition von Luftinhaltsstoffen beeinflussen. Messstellen sind weiterhin nicht im unmittelbaren Einflussbereich von Emittenten zu errichten. Anzustreben ist dagegen die Nähe zu versauerungsgefährdeten oder versauerten Gewässern und Böden oder in wasserwirtschaftlich bedeutsamen Einzugsgebie-

ten. Forstliche und bodenkundliche Aspekte sollen Berücksichtigung finden, insbesondere auch die Lage der Untersuchungsgebiete des vom LBEG erstellten Programmes „Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF)“.

Der Niederschlag wird mit permanent offenen Sammlern, sogenannten Bulk-Sammlern, aufgefangen (bulk, engl. bedeutet Masse, Menge). Damit wird hauptsächlich nasser Niederschlag erfasst, also die im Regenwasser gelösten Stoffe (Nassdeposition). Darüber hinaus gelangt ein geringer Anteil an Gasen und Aerosolen in das Sammelsystem (Trockendeposition).

### 2.1.1 Freilandmessstellen

Die Freilandmessstellen zeichnen sich dadurch aus, dass der Niederschlag direkt und ohne weitere äußere Einflüsse aufgefangen werden kann, daher befindet sich der größte Teil dieser Messstellen auf Waldlichtungen. Bei der Standortwahl ist eine Mindestentfernung der eineinhalbfachen Baumhöhe einzuhalten sowie die zu erwartende maximale Wuchshöhe zu berücksichtigen. Der Bewuchs in unmittelbarer Nähe der Messstelle sollte kurzgehalten werden, einzelne Sträucher im weiteren Umfeld sind von Vorteil. Sie bieten

Vögeln Sitzmöglichkeiten. Andernfalls werden die Depositionssammler als Sitzplatz benutzt, was zu Verschmutzungen der Messstelle und der Niederschlagsproben führen kann.

Die Freilandmessstellen sind eine Eigenkonstruktion des ehemaligen Niedersächsischen Landesamtes für Wasserwirtschaft NLW. Da sie in der damaligen Außenstelle Osnabrück entwickelt wurden, erhielten sie die Bezeichnung „Osnabrück-Sammler“.

Den Osnabrück-Sammler im Freiland und einen schematischen Querschnitt zeigt Abbildung 2. Der Regen wird von sechs Trichtern mit bekannter Auffangfläche aufgenommen und jeweils über

Schläuche in sechs Polyethylenflaschen geleitet. Diese sind im Inneren einer Kunststofftonne platziert, wo der gesammelte Niederschlag vor Licht und z.T. auch vor Kälte geschützt ist und bis zur Entnahme nach ca. zwei Wochen aufbewahrt wird. Die Auffangflaschen können je nach Gebiet und zu erwartender Regenmenge unterschiedliche Volumina haben. Zum Schutz vor groben partikulären Verunreinigungen werden die Trichter mit einem Filter versehen. Die Tonne selbst wird zur Isolierung gegen Wärmeeinstrahlung und damit zur Verringerung von Verdunstungsverlusten mit einer Schilfmatte umgeben.

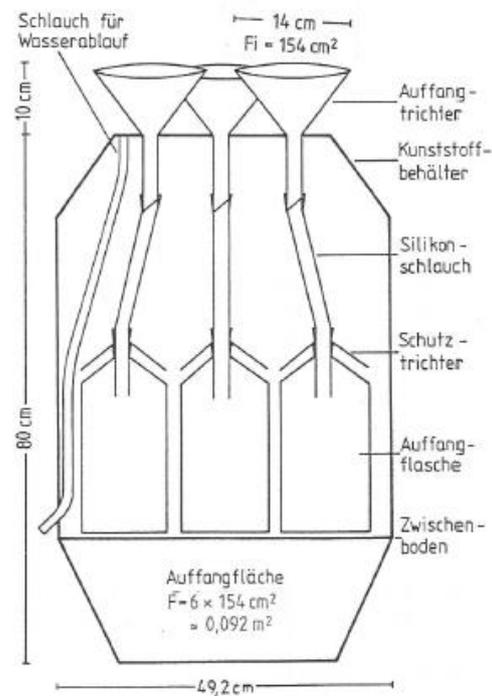


Abb. 2: Niederschlagsammler im Freiland und schematischer Querschnitt.

Neben Freilandmessstellen, die im Rahmen des GÜN betrieben werden, gibt es in Niedersachsen auch solche, die in das BDF-Programm eingebunden sind. Dieses Programm wurde im Jahr 1990 eingeführt. Es verfolgt das Ziel, den Zustand der Böden zu erfassen, seine langfristige Entwicklung zu verfolgen und künftige Entwicklungen zu prognostizieren. Dabei steht der Boden zwar im Mittelpunkt, darf aber nicht isoliert betrachtet werden. Die benachbarten Medien und Kompartimente Luft-Atmosphäre, Wasser-

Gewässer und Vegetation, sowohl als den Boden beeinflussend als auch vom Boden beeinflusst, sind mit zu berücksichtigen. Eine weitere wichtige Rolle spielen Stoffein- und -austräge durch land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung. (LBEG, 2012 und 2021).

Seit 1996 werden Depositionsmessstellen im BDF-Programm betrieben. Es handelt sich um Freilandmessstellen auf landwirtschaftliche Nutzflächen. Somit kann an diesen BDF-Messstellen

der Aspekt der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung mitefassen werden. Erfolgt bspw. auf den Feldern die Ausbringung von Stickstoffdünger, wird so der Niederschlag in unmittelbarer Nähe einer Stickstoff-Emissionsquelle gesammelt.

### 2.1.2 Bestandsmessstellen

Im Gegensatz zu Freilandmessstellen werden Bestandsmessstellen direkt im Wald unter den Bäumen aufgebaut. So gelangt der größte Anteil des Niederschlags zunächst auf die Blätter, Nadeln, Äste und Zweige der Bäume. Dort nimmt er die von den Baumbestandteilen bereits adsorbierten und akkumulierten Inhaltsstoffe der Luft auf. Ist die Regenmenge größer als die Aufnahmekapazität der Bäume, tropft der Niederschlag mit den zusätzlich aufgenommenen Stoffen von den Baumkronen und gelangt erst dann in den Sammler. Generell ist davon auszugehen, dass Bestandsmessstellen höhere Frachten als Messstellen im Freiland aufweisen. Niederschläge im Bestand erfassen eher lokale Effekte, während der Freilandniederschlag durch eine weiträumige Durchmischung des Niederschlages durch den Wind mehr regionale Einflüsse widerspiegelt.

Die Bestandsmessstellen werden vorzugsweise in Beständen mit regionaltypischen Baumarten eingerichtet. In Niedersachsen befinden sich alle Messstellen in Nadelwäldern, größtenteils unter Fichten.

Eine Bestandsmessstelle besteht aus acht einzelnen Sammlern. So können kleinräumige Inhomogenitäten des Stoffeintrages im Bestand ausgeglichen werden. Die Sammelgefäße sind im Abstand von  $\frac{2}{3}$  des mittleren Baumabstandes aufzustellen, bei systematischer Baumverteilung durch Pflanzung ist eine Zufallsverteilung anzustreben.

Beim Einzelsammler für die Bestandsmessstellen handelt es sich um einen Selbstbau der ehemaligen Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt (HFA, 1984) mit der Bezeichnung „Münden 100“ (Abbildung 3). Als Trichter dient eine Polyethylenflasche, die mit einer weiteren Flasche als Speicherbehälter verschraubt ist. Der Niederschlag gelangt durch eine Siebplatte, die mit Filterwatte belegt ist, in die Sammelflasche. Zur Befestigung und zum Schutz gegen direkte Sonneneinstrahlung ist die Messeinheit in einem Kunststoff-Standrohr untergebracht.

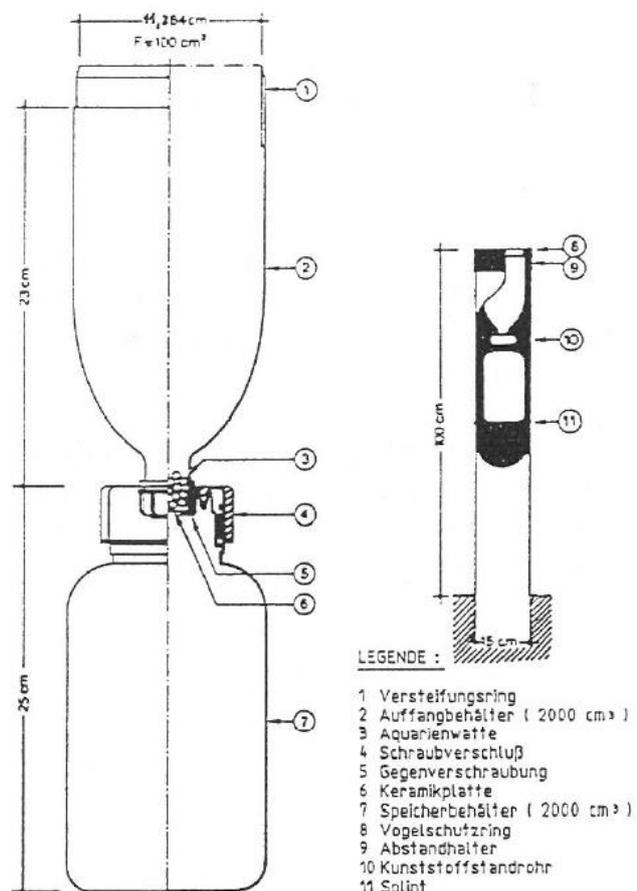


Abb. 3: Niederschlagssammler im Bestand und schematischer Querschnitt.

## 2.2 Probenahme

Ziel ist es, monatlich die Zusammensetzung des Niederschlages zu erfassen. Dazu werden jeweils zwei Halbmonatsproben zu einer Monatsmischprobe vereinigt und anschließend analysiert. Die Niederschlagsproben sollten in der Mitte und am Ende des Monats oder am Anfang des darauffolgenden Monats eingesammelt werden. Die Probe der ersten Monatshälfte wird bis zur Herstellung der Monatsmischprobe, die mengenproportional erfolgt, gekühlt aufbewahrt. Eine Mischprobe über einen Zeitraum von vier Wochen gewährleistet ganzjährig in allen Probenahmeintervallen ausreichende Probenvolumina für die Analysen. Mit der Thematik der Aufenthaltszeit einer Teilprobe im Kühlschrank und der damit verbundenen Reproduzierbarkeit und Stabilität der Untersuchungsparameter befasste sich eine Sonderuntersuchung der Betriebsstelle Cloppenburg des ehemaligen Niedersächsischen Landesamtes für Wasserwirtschaft und Küstenschutz (NLWK, 2001). Weitere Versuche zur Reproduzierbarkeit und Stabilität der Parameter in den Monatsmischproben wurden ebenfalls von der Betriebsstelle Cloppenburg (NLWK, 2002) und vom Staatlichen Amt für Wasser und Abfall Verden (StAWA Verden, 1996) durchgeführt. Anleitungen zur Probenahme sind vom ehemaligen Niedersächsischen Landesamt für Ökologie (NLÖ, 1993) in der Beschreibung des Depositionsmessnetzes im Teil „Messprogramm“ zusammengestellt.

## 2.3 Analytik

Die Niederschlagsmenge wird direkt vor Ort bestimmt (Angabe in ml) und daraus die Niederschlagshöhe in mm errechnet. Die beiden Teilproben werden mengenproportional zu einer Monatsmischprobe vereinigt. Unmittelbar anschließend erfolgt die Probenvorbereitung und Analyse der Parameter, die in Tabelle 2 aufgeführt sind.

Bei der Laboranalytik sind die Verfahren aus den Deutschen Einheitsverfahren (DEV) anzuwenden.

Für den Fall, dass nicht die Möglichkeit besteht, den gesamten Parameterumfang zu untersuchen, kann der Untersuchungsumfang reduziert werden. Dies gilt insbesondere, wenn aufgrund geringer Niederschläge im vorliegenden Beprobungszeitraum das aufgefangene Probenvolumen nicht ausreicht oder einzelne Auffangflaschen eines Sammlers verunreinigt sind. Der Großteil der genannten Parameter wird seit Einführung der Depositionsmessung im Jahr 1985 analysiert. Die Parameter Calcium, Magnesium, Nickel, Chrom und Quecksilber wurden 1992 in das Untersuchungsprogramm aufgenommen.

Tab. 2: Parameterumfang der Niederschlagsuntersuchung.

Parameter	Kürzel	Einheit
Niederschlagshöhe	NS	mm
Niederschlagsmenge	NS_ml	ml
Leitfähigkeit	LF	µS/cm
pH-Wert	pH	
Basekapazität bis pH=5,6	BVB 5,6	mmol/l
Basekapazität bis pH=7,0	BVB 7,0	mmol/l
Sulfat	SO <sub>4</sub>	mg/l
Nitrat	NO <sub>3</sub> N	mg/l N
Ammonium	NH <sub>4</sub> N	mg/l N
Phosphat	oPO <sub>4</sub> P	mg/l P
Chlorid	Cl	mg/l
Fluorid	F	mg/l
Natrium	Na	mg/l
Kalium	K	mg/l
Magnesium	Mg	mg/l
Calcium	Ca	mg/l
Zink	Zn	µg/l
Blei	Pb	µg/l
Kupfer	Cu	µg/l
Cadmium	Cd	µg/l
Nickel	Ni	µg/l
Chrom	Cr	µg/l
Quecksilber	Hg	µg/l

### 3. Bewertungsgrundlagen und Auswerteverfahren

Routinemäßig werden die durch Niederschlagsuntersuchungen erhobenen Daten jährlich hinsichtlich der Konzentrationen und Frachten ausgewertet und landesweit zusammengestellt. Für den vorliegenden Statusbericht erfolgten weitere Auswertungen zu verschiedenen Fragestellungen, deren Methoden in diesem Kapitel beschrieben werden. Weiterhin wird auf die Bewertungsgrundlagen eingegangen, die zur Beurteilung der Depositionsdaten herangezogen wurden.

#### 3.1 Bewertungsgrundlagen

##### Niederschlagskonzentrationen

Da es bisher keine Bewertungsgrundlagen für die Beurteilung von Stoffkonzentrationen in Niederschlagswässern gibt, wird auf entsprechende Veröffentlichungen aus den Bereichen Grund- und Trinkwasser zurückgegriffen.

Herangezogen werden die von der LAWA (2017) erarbeiteten Geringfügigkeitsschwellenwerte für das Grundwasser, die in der Grundwasserverordnung (GrwV, 2010) genannten Schwellenwerte für Grundwasser sowie die Grenzwerte für Trinkwasser, die die Trinkwasserverordnung vorgibt (TrinkwV, 2016). Mit diesen für Grund- und Trinkwasser vorliegenden Qualitätsnormen können die mittleren Jahreskonzentrationen einiger im Niederschlag untersuchter Parameter ansatzweise beurteilt werden.

Niederschlagswasser an sich ist sehr reines Wasser, da es einen natürlichen Destillationsprozess durchlaufen hat. Durch den Kontakt mit der Luft wird es jedoch einerseits mit den gasförmigen Bestandteilen der Luft, die gut wasserlöslich sind (v.a. Sauerstoff und Kohlendioxid), angereichert, andererseits nimmt es auch gelöste und suspendierte Stoffe geogenen und anthropogenen Ursprungs auf. Wenn der Niederschlag die Bodenoberfläche erreicht, durchläuft er als Sickerwasser die wasserungesättigte Zone bis zur Grundwasseroberfläche und wird zu Grundwasser. Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers hängt neben der Beschaffenheit des Niederschlages, des Oberflächen- und Meerwassers von vielen verschiedenen geochemischen Prozessen im Untergrund ab. Diese Vor

gänge können sowohl zu einer Erhöhung als auch zu einer Verringerung von gelösten Bestandteilen im Grundwasser führen (Hütter, 1990; Mattheß, 1990).

Werden Qualitätsnormen, die für das Grundwasser erarbeitet wurden, für die Beurteilung von Niederschlagswasser herangezogen, erhält man einen Anhaltspunkt für die Höhe der Belastung des Grundwassers, die potentiell vom Regenwasser ausgeht, wenn es theoretisch direkt und ohne die ungesättigte Zone zu passieren in das Grundwasser gelangt.

Die LAWA hat mit der Geringfügigkeitsschwelle einen Maßstab entwickelt, der angibt, bis zu welchen Stoffkonzentrationen anthropogene, räumlich begrenzte Änderungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers als geringfügig einzustufen sind, und ab welcher Konzentration eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit des Grundwassers vorliegt. Damit soll das Grundwasser überall für den menschlichen Gebrauch als Trinkwasser nutzbar und als Lebensraum intakt bleiben (LAWA, 2017).

In der Grundwasserverordnung (GrwV, 2010) werden Schwellenwerte für Schadstoffe, Schadstoffgruppen oder Verschmutzungsindikatoren zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt festgelegt. Falls die festgelegten Schwellenwerte überschritten werden, ist der betroffene Grundwasserkörper als gefährdet einzustufen.

Als weitere Qualitätsnorm werden zum Vergleich die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2016) herangezogen. Diese Grenzwerte sollen sicherstellen, dass bei lebenslangem Genuss eine Schädigung der menschlichen Gesundheit nicht zu befürchten ist. Es handelt sich beispielsweise bei den Grenzwerten für Schwermetalle um eine aus toxikologischer Sicht klassische Vorgehensweise. In vielen Fällen wird die TrinkwV auch zur Beurteilung von Grundwasser herangezogen und dient dem Ziel, sauberes Grundwasser zu gewährleisten.

Die hier vorgestellten Qualitätsnormen beurteilen Grund- bzw. Trinkwasser aus verschiedenen Perspektiven und können einen Anhaltspunkt bei der Bewertung von Stoffkonzentrationen im Niederschlag geben.

Im vorliegenden Bericht werden für die meisten Parameter Frachten ermittelt. Dagegen können die Frachten bei Schwermetallen aufgrund geringer bzw. unter der Bestimmungsgrenze liegender Konzentrationen oftmals nicht berechnet werden. Daher wurden für die Schwermetalle Zink, Blei, Kupfer, Cadmium, Nickel, Chrom und Quecksilber Konzentrationsauswertungen vorgenommen und die Ergebnisse mit den genannten Qualitätsnormen verglichen. Zunächst wurden die Schwellenwerte der GrwV herangezogen, für Parameter, die dort nicht aufgeführt sind, wurden die Geringfügigkeitsschwellen der LAWA gewählt. Außerdem erfolgte ein Vergleich mit den Grenzwerten der TrinkwV.

Interessant ist auch der Vergleich der Qualitätsnormen untereinander: Bei einigen der betrachteten Schwermetalle liegen z.B. die Geringfügigkeitsschwellen der LAWA für Grundwasser unter den Grenzwerten der TrinkwV.

### **Niederschlagsfrachten**

Um die Höhe der Schwermetallfrachten im Niederschlag ansatzweise einordnen zu können, wurde die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999) herangezogen. Dort werden im Anhang 2, Punkt 4.1 Vorsorgewerte für Metalle in Böden in Abhängigkeit von der Bodenart definiert. Bei Überschreitung dieser Vorsorgewerte, sind die dort unter Punkt 5 genannten zulässigen zusätzlichen jährlichen Frachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade zu berücksichtigen. Im vorliegenden Bericht wird für die Schwermetalle in Einzelfällen auch deren zulässige zusätzliche jährliche Fracht betrachtet.

## **3.2 Routineauswertung Konzentrationen und Frachten**

Aus der Analyse der Monatsmischprobe, die aus zwei Teilproben besteht, liegen für jeden Untersuchungsparameter und jede Messstelle im Idealfall pro Jahr 12 Messwerte vor (Monatskonzentrationen). Die Voraussetzung dafür ist, dass die Messstelle ganzjährig betrieben wird und dass jeden Monat genügend Niederschlagswas-

ser gesammelt werden kann, um alle Parameter zu analysieren.

Um die stoffliche Zusammensetzung der Niederschläge darzustellen, erfolgt die Auswertung der Messwerte pro Messstelle sowie pro Parameter und Jahr. Es werden Minimal- und Maximalwerte, sowie mittlere Jahreskonzentrationen, gewichtete mittlere Jahreskonzentrationen und Jahresfrachten bestimmt (NLÖ 1993). Weiterhin wird angegeben, wie häufig im Jahr ein Parameter bestimmt wurde (im Regelfall zwölfmal) und, falls ein Monatswert fehlt, in welchem Monat dies der Fall ist.

Mittlere Jahreskonzentrationen werden als Mittelwerte aus den Monatskonzentrationen in mg/l oder µg/l bzw. in mmol/l angegeben. Liegen Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze, so gehen diese mit dem Wert der halben Bestimmungsgrenze in die Mittelwertbildung ein. Liegt der berechnete Mittelwert ebenfalls unterhalb der Bestimmungsgrenze, wird er als < Bestimmungsgrenze angegeben. Die Auswertung erfolgt auch, wenn eine Messstelle z. B. erst in der Jahresmitte in Betrieb genommen wurde.

Gewichtete mittlere Jahreskonzentrationen werden in den gleichen Einheiten wie die Jahreskonzentrationen angegeben. Die Wichtung erfolgt über die Niederschlagshöhe.

Jahresfrachten gibt man in Kilogramm (kg) pro Hektar (ha) und Jahr (a) an; so ist eine Vergleichbarkeit mit landwirtschaftlichen Betrachtungen gewährleistet. Jahresfrachten werden aus der Summe der Monatsfrachten ermittelt. Die Monatsfracht eines Parameters erhält man aus dem Produkt der Parameterkonzentration und der erfassten Niederschlagshöhe des jeweiligen Monats. Jahresfrachten sind nur sinnvoll anzugeben, wenn 50 % der Messwerte, also sechs Messwerte (Monatskonzentrationen), oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen. Frachten werden ebenfalls nicht berechnet, wenn mehr als 20 % der Messwerte fehlen, entsprechend drei oder mehr Monatskonzentrationen.

Die Anzahl der Werte (Niederschlagshöhe, pH-Wert und Leitfähigkeit) und der Jahresfrachten (andere Parameter) entsprechend der Anzahl der Freiland- und Bestandsmessstellen, die pro Jahr in die parameterbezogenen Auswertungen eingegangen sind, stellt Anlage 1 im Anhang dar.

### 3.3 Median und Perzentile

Um einen Überblick über die Zusammensetzung des Niederschlagswassers im Zeitraum von 1985 bis 2019 zu erhalten, werden die Untersuchungsergebnisse aller Freilandmessstellen parameter- und jahresweise betrachtet. Für die Auswertung und Darstellung der Werte werden größtenteils der Median aber auch das 25 %-Perzentil sowie das 75 %-Perzentil gewählt.

Der Median oder Zentralwert ist der Wert in der Mitte einer der Größe nach geordneten Datenreihe. Daher ist er unempfindlich gegenüber Extremwerten und wird im Gegensatz zum Mittelwert von einzelnen Ausreißern nicht beeinträchtigt.

Da 50 % der Daten kleiner als der Median oder gleich dem Median und 50 % der Daten größer als der Median oder gleich dem Median sind, ist der Median somit das 50 %-Perzentil.

Zusätzlich werden noch die 25 %- und 75 %-Perzentile betrachtet, um die Streubreite der Jahreswerte abschätzen zu können. Beim 25 %-Perzentil liegen 25 % aller Werte unterhalb dieses Wertes und 75 % oberhalb, entsprechend liegen beim 75 %-Perzentil 75 % aller Werte unterhalb dieses Wertes und 25 % oberhalb.

Der Median bildet zusammen mit dem 25 %-Perzentil und dem 75 %-Perzentil Quartile, die den Datensatz in vier gleich große Wertebereiche unterteilen.

### 3.4 Emissions- und Immissionsdaten des Umweltbundesamtes

Die Emission von Luftschadstoffen wird auf der Grundlage nationaler, europäischer und internationaler Konventionen und Vereinbarungen erfasst und berechnet. Sie werden in einheitlichen Strukturen, zu festgelegten Terminen und einhergehend mit umfassenden Regelungen zur Dokumentation und Qualitätssicherung und -kontrolle bilanziert. Detaillierte und über die Zeitreihe konsistente Emissionsdaten berichtet das UBA bundesweit seit dem Jahr 1990 (UBA, 2021a, b). In den nationalen Trendtabellen ist die Emissionsentwicklung für klassische Luftschadstoffe, Schwermetalle und persistente organische Schadstoffe dargestellt. Dabei erfolgt eine Differenzierung der Gesamtemission nach verschiedenen Quellgruppen (Tabelle 5)

Die in Niedersachsen errechneten Niederschlagsfrachten werden der bundesweit erhobenen Gesamtemission gegenübergestellt. Es werden sowohl die klassischen Luftschadstoffe Sulfat, Stickoxid und Ammoniak betrachtet, als auch die Schwermetalle Cadmium, Quecksilber, Kupfer, Zink, Blei, Chrom und Nickel.

Tab. 3: An der Luftschadstoffemission beteiligte Quellgruppen (UBA 2021a, 2021b, leicht verändert).

Quellgruppen
<b>1. Energie</b>
<b>A. Verbrennung fossiler Brennstoffe</b>
1. Energiewirtschaft
2. Verarbeitendes Gewerbe
3. Verkehr
<i>davon Straßenverkehr</i>
4. Übrige Feuerungsanlagen
<i>davon Gewerbe, Handel, Dienstleistung</i>
<i>davon Haushalte</i>
5. Sonstige Feuerungsanlagen
<b>B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen</b>
1. Feste Brennstoffe
2. Öl und Erdgas
<b>2. Industrie</b>
<b>A. Mineralverarbeitende Industrie</b>
<b>B. Chemische Industrie</b>
<b>C. Metallindustrie</b>
<b>D. Nichtenergetische Produkte aus Brennstoffen</b>
<b>E. Andere Produktherstellungen und -verwendungen</b>
<b>F. Papier-, Zellstoff-, Lebensmittelindustrie</b>
<b>G. Holzverarbeitung</b>
<b>H. Schüttgüter</b>
<b>3. Landwirtschaft</b>
<b>A. Düngewirtschaft</b>
<b>B. Landwirtschaftliche Bodennutzung</b>
<b>C. Andere</b>
<b>4. Abfall</b>
<b>A. Abfallverbrennung</b>
<b>B. Andere (z.B. Haus-, Fahrzeugbrände)</b>
<b>C. Abfallverbrennung</b>
<b>D. Abwasserbehandlung</b>
<b>E. Andere</b>
<b>5. Internationaler Verkehr</b>
<b>A. Flugverkehr</b>
<b>B. Seeverkehr</b>
<b>6. Waldbrände</b>

### 3.5 Säure- und Stickstoffeinträge analog zum Umweltindikator „Säure- und Stickstoffeintrag“

Säureeinträge erfolgen im Wesentlichen durch Sulfat- und Stickstoffeinträge (Ammonium- und Nitrateinträge) aus der Atmosphäre. Schwefeldioxid als Vorstufe von Sulfat stammt überwiegend aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Ammonium entsteht aus Ammoniak, das z. B. als Folge der Tierhaltung (u. a. Gülle) freigesetzt wird. Nitrat wird in der Atmosphäre aus Stickstoffdioxid-Emissionen verschiedener Quellen, vor allem des Kfz-Verkehrs, gebildet.

Die Länderinitiative Kernindikatoren (LIKI) hat umweltspezifische Nachhaltigkeitsindikatoren erarbeitet. (Link zur Website siehe Literaturverzeichnis).

Die Initiative ist eine Arbeitsgemeinschaft von Umweltfachbehörden, die Kompetenzen der Länder und des Bundes für die Indikatorenarbeit bündelt. Im Auftrag und in enger Zusammenarbeit mit der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Klima, Energie, Mobilität - Nachhaltigkeit (BLAG KliNa) der Umweltministerien ist ihre Aufgabe die Entwicklung und Pflege sowie die Dokumentation der gemeinsamen Indikatoren. Hierbei wird sie vom Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder (AK UGRdL) unterstützt, der z. B. Daten bereitstellt und statistische Analysen durchführt. Mittelpunkt der Indikatorenarbeit ist ein gemeinsamer Satz von 24 umweltspezifischen Nachhaltigkeitsindikatoren (Umweltindikatoren) des Bundes und der Länder, der erstmals im Jahr 2004 von der Umweltministerkonferenz (UMK) beschlossen wurde. Seither werden Weiterentwicklungen, die Anwendung der Indikatoren sowie länderübergreifende Darstellungen der Umweltqualität und zeitliche Trends in regelmäßigen Erfahrungsberichten an die UMK dokumentiert.

Der Umweltindikator „B5: Säure- und Stickstoffeintrag“ beinhaltet die beiden Teilbereiche Säureeintrag aus der Atmosphäre durch nasse Deposition auf Freiflächen im Wald und Stickstoffeintrag aus der Atmosphäre durch nasse Deposition auf Freiflächen im Wald. Der Indikator wird auf der Basis sogenannter bulk- und wet only-Messungen an insgesamt ca. 50 bis 60 Freiflächen im Wald ermittelt und gibt angesichts der Charakteristik der ausgewerteten Messstationen die Hintergrundbelastung durch Säure- und Stickstoffeinträge in Deutschland wieder. Die nasse Deposition ist eine Teilmenge der Gesamtdosition und wird mittels geeigneter Faktoren aus der bulk-Deposition abgeschätzt. Die Daten werden zentral vom Thünen-Institut für Waldökosysteme zur Verfügung gestellt.

Die **Säureinträge** durch Deposition in Niedersachsen werden in Analogie zum Umweltindikator „B5: Säure- und Stickstoffeintrag“ berechnet.

Der Säureeintrag, angegeben als Kiloäquivalent/ha\*a, ergibt sich aus der Summe von Sulfatschwefel (SO<sub>4</sub>-S), Nitratstickstoff (NO<sub>3</sub>-N) und Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>-N) nach folgender Formel (nach Gauger et al., 1997):

$$\text{keq} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1} = (\text{SO}_4^{2-} [\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}] \cdot 0,021) + (\text{NH}_4^+ [\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}] \cdot 0,055) + (\text{NO}_3^- [\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}] \cdot 0,016)$$

Dieser Indikator ist eine Näherung, da lediglich die potentiell versauernden Komponenten verwendet werden. Die Ermittlung der tatsächlichen Säureinträge würde zusätzlich die Berücksichtigung puffernd wirkender Komponenten wie Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> und K<sup>+</sup> erfordern.

Für den **Stickstoffeintrag** (Einheit: kg/ha\*a) wird jeweils aus dem Ammonium- und Nitrateintrag der Elementeintrag berechnet. Der Indikator berücksichtigt nur die anorganischen Stickstoffverbindungen.

$$\text{kg N/ha} \cdot \text{a} = \text{NH}_4^+ [\text{kg/ha} \cdot \text{a}] \cdot 0,777 + \text{NO}_3^- [\text{kg/ha} \cdot \text{a}] \cdot 0,226$$

Ein Überangebot an säurebildenden Stoffen und Nährstoffen verursacht Veränderungen chemischer und biologischer Bodenparameter, die u.a. Vegetation und Grundwasser beeinflussen und damit zu einer Destabilisierung empfindlicher Ökosysteme führen können. In der Folge können Versauerung und Eutrophierung auftreten.

### 3.6 Gesamtstickstoff und Ammonium-Nitrat-Verhältnis

Stickstoff ist ein elementarer Baustein aller Lebewesen, der aber im Übermaß zu Beeinträchtigungen von Umwelt und Gesundheit führen kann. Der Haupteintrag in Deutschland erfolgt über die Landwirtschaft; dazu kommen Einträge durch Industrie, Verkehr und Haushalte. Wird der in der Landwirtschaft ausgebrachte Stickstoffdünger nicht vollständig durch die Pflanzen aufgenommen, kann er in Grund- und Oberflächengewässer oder die Luft ausgetragen werden. Dort gefährdet er als Nitrat das Grundwasser und trägt zur Nährstoffübersorgung (Eutrophierung) von Oberflächengewässern und Landökosystemen bei. Nitrat kann unter bestimmten Bedingungen in das gesundheitlich bedenkliche Nitrit umgewandelt werden. Über die Luft wird Ammoniak in empfindliche Ökosysteme eingetragen, wo es eine eutrophierende und versauernde Wirkung hat.

Bei dem Gesamtstickstoff und Ammonium-Nitrat-Verhältnis handelt es sich um zwei Parameter, die auf Grundlage der Nitratstickstoff- und Ammoniumstickstoff-Konzentrationen des Niederschlages bzw. deren Frachten ermittelt werden. Der Gesamtstickstoff ist ein Summenparameter, der die Belastung eines Mediums mit verschiedenen Stickstoffverbindungen widerspiegelt. In den folgenden Betrachtungen ist unter Gesamtstickstoff die Summe von Nitratstickstoff- und Ammoniumstickstoff-Gehalten zu verstehen. Die Angabe erfolgt als Konzentration in mg/l. Nicht berücksichtigt werden Nitrit und organische Stickstoffverbindungen.

Das Ammonium-Nitrat-Verhältnis ist eine dimensionslose Zahl, die größer als 1 ist, wenn mehr Ammoniumstickstoff als Nitratstickstoff vorhanden ist. Ist die Konzentration von Nitratstickstoff höher als die von Ammoniumstickstoff, liegt der Wert unter 1.

## 4. Ergebnisse und Bewertung

### 4.1 Parameterbezogene Auswertungen

#### 4.1.1 Einfluss verschiedener Standortfaktoren

##### Vergleich von GÜN- und BDF-L-Messstellen

Niederschlagsmessstellen im Freiland werden sowohl im Rahmen des GÜN als auch im BDF-Programm betrieben. Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, war es Ziel bei der Auswahl der Standorte für die GÜN-Messstellen, Niederschlag direkt und möglichst ohne äußere Einflüsse wie z.B. intensive Landwirtschaft oder Straßenverkehr zu erhalten. Dagegen befinden sich die BDF-Freilandmessstellen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen und können eher Auswirkungen landwirtschaftlicher Nutzung miterfassen.

Im Jahr 1996 wurde die Depositionsmessung in das BDF-Programm aufgenommen, so dass über einen Zeitraum von 24 Jahren anhand ausgewählter Parameter ein Vergleich von GÜN- und BDF-L-Messstellen vorgenommen werden

konnte. Die Einträge von Sulfat-Schwefel sind in Abbildung 4 und die von Nitrat-, Ammonium- und Gesamt-Stickstoff in Abbildung 5 dargestellt. Insgesamt liegen die Frachten der GÜN- und BDF-Messstellen relativ nah beieinander. In der ersten Hälfte des Betrachtungszeitraumes fällt auf, dass die Frachten der GÜN-Messstellen an den eher unbeeinflussten Standorten zum größten Teil leicht über denen der BDF-Messstellen liegen. Ab etwa 2007 verliert dieser Effekt an Bedeutung und es sind bis auf wenige Ausnahmen fast keine Unterschiede mehr zwischen den Frachten von GÜN- und BDF-Messstellen zu beobachten. Auf dieser Grundlage wird im vorliegenden Bericht nicht zwischen Standorten des GÜN und solchen des BDF-Programms unterschieden, und es erfolgt die gemeinsame Auswertung der Daten aller Freilandmessstellen.

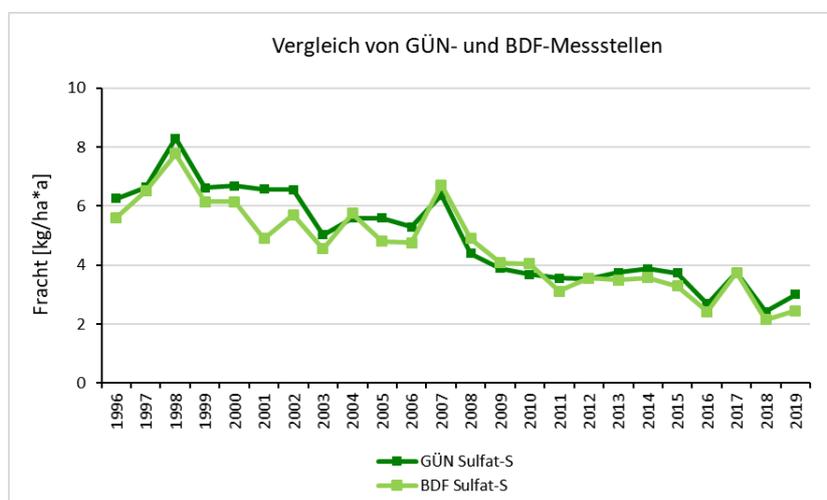


Abb. 4: Deposition von Sulfat-Schwefel von 1996 bis 2019 (Medianwerte aller GÜN-Freiland- und BDF-L-Messstellen).

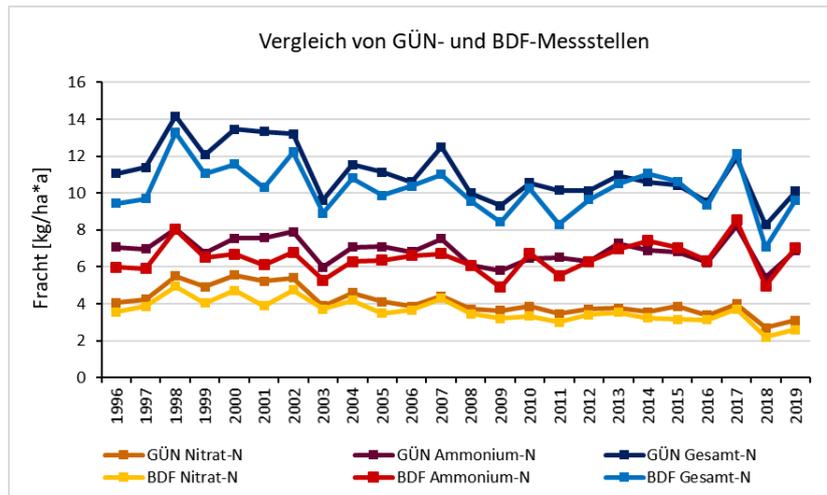


Abb. 5: Deposition von Nitrat-, Ammonium- und Gesamt-Stickstoff von 1996 bis 2019 (Medianwerte aller GÜN-Freiland- und BDF-L-Messstellen).

### Vergleich von Ackerland-, Grünland-, Wald-Standorten

Im Weiteren wird geprüft, ob der Standortfaktor Landnutzung im unmittelbaren Umfeld einer Depositionsmessstelle einen Einfluss auf die Niederschlagsqualität hat.

Daher werden alle Messstellen (GÜN- und BDF-L-Freilandmessstellen sowie Bestandsmessstellen) einer der folgenden aktuellen Nutzungen zugeordnet:

- Ackerland (Freiland)
- Grünland (Freiland)
- Wald (Freiland)
- Wald (Bestand)

Bei den Waldstandorten erfolgt die Unterscheidung zwischen Bestandsmessstellen, die sich direkt unter Bäumen im Wald befinden und die Regentropfen nach der Passage durch die Baumkrone erfassen und Freilandmessstellen in Waldnähe, beispielsweise auf einer Lichtung.

Auf Basis dieser Zuordnung, werden die Untersuchungsergebnisse der vier Standorttypen miteinander verglichen. Dargestellt werden für jeden Parameter die jahresweise ermittelten Medianwerte pro Jahr und Standorttyp. Die Anzahl der Werte (Medianwerte) bzw. Messstellen, die pro Jahr und Parameter jeweils für Acker-, Grünland- und Waldstandorte und waldnahe Standorte vorliegen und ausgewertet werden, sind in Anlage 2 im Anhang zusammengestellt. Das Jahr 1991 fällt auf, da hier vergleichsweise wenig Messstel-

len bei den Auswertungen Berücksichtigung finden. Aufgrund einer behördeninternen Umstrukturierung erfolgte in jenem Jahr die Umstellung von zentraler auf dezentrale Messnetzbetreuung. Daher liegen 1991 keine Daten für Ackerland- und Grünlandstandorte vor, und die Anzahl waldnaher Standorte ist gegenüber den anderen Jahren deutlich geringer. Daher können einzelne (auffällige) Messdaten einen stärkeren Einfluss auf den Jahreswert haben.

Die untersuchten Parameter lassen sich drei Gruppen zuordnen, die sich in Abhängigkeit von der Standortnutzung unterscheiden:

- I. Zwischen den Einträgen der verschiedenen Standorttypen gibt es keine relevanten Unterschiede.
- II. Die Einträge der Waldmessstellen im Bestand liegen deutlich über denen der Freilandstandorte.
- III. Die Einträge der Waldmessstellen im Bestand und die der Freilandmessstellen auf Grünlandstandorten sind größer als die der Freilandmessstellen auf Ackerland und in Waldnähe.

Zu Gruppe I gehören die Parameter Niederschlagshöhe, pH-Wert und Phosphat-Fracht. Diese weisen an allen Standorten ähnliche Größenordnungen innerhalb eines Schwankungsbereichs auf (Abbildung 6).

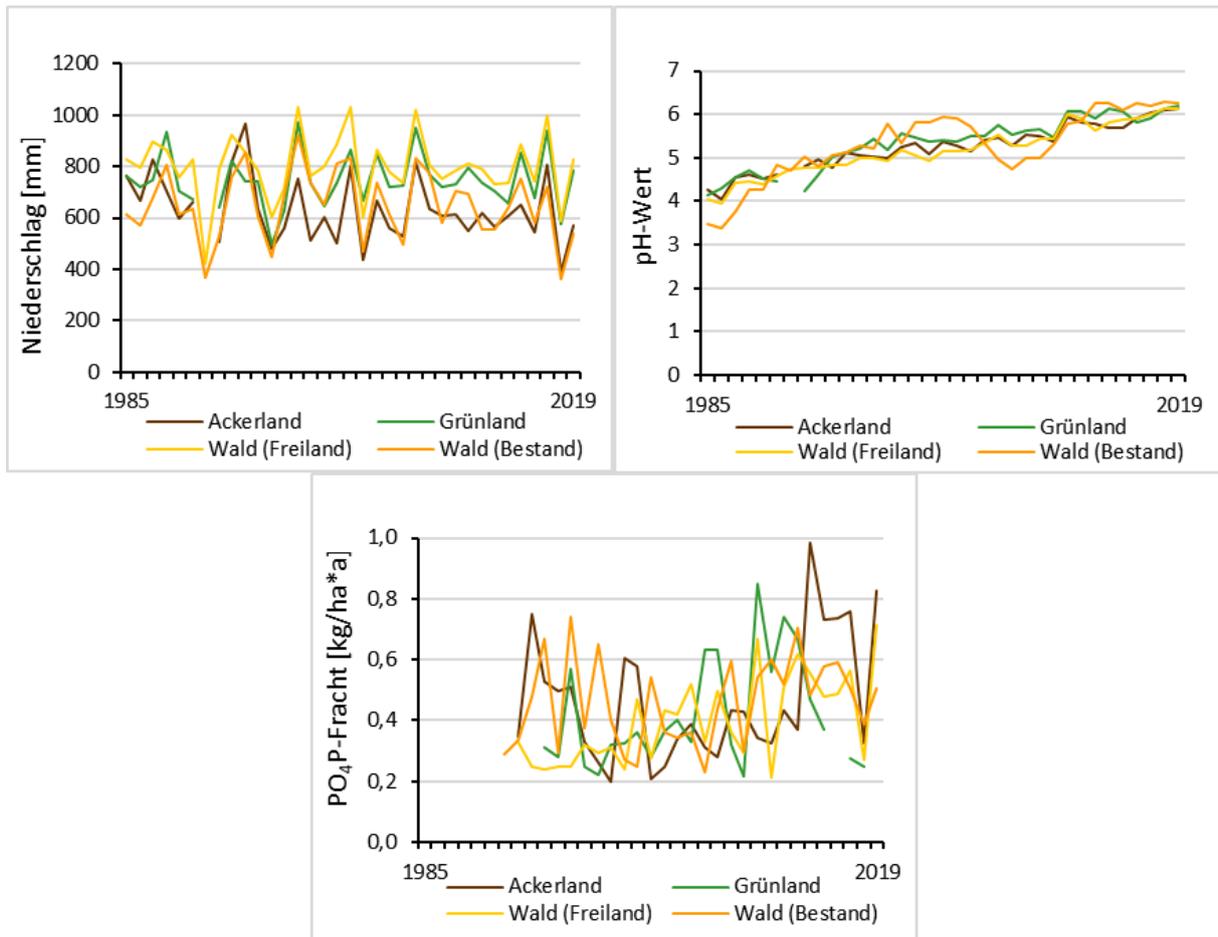


Abb. 6: Vergleich der Niederschlagshöhen, pH-Werte und Phosphat-Frachten (Medianwerte) von Acker-, Grünland- und Waldstandorten im Zeitraum von 1985 bis 2019.

Abbildung 7 zeigt, dass die Parameter Leitfähigkeit, Sulfat-Schwefel, Nitrat- und Ammonium-Stickstoff sowie Kalium, Magnesium, Calcium und Kupfer bei den Bestandsmessstellen, die sich direkt im Wald befinden, einen deutlich höheren Eintrag aufweisen als an allen anderen Standorten. Die Frachten der Acker-, Grünland- und Wald-Messstellen (Freiland) liegen auf ähnlich niedrigem Niveau. Eine weitere Differenzie-

rung aufgrund der unterschiedlichen Landnutzung ist nicht gegeben. Lediglich beim Parameter Magnesium sind die Frachten der Grünlandmessstellen größer als die der Acker- und Waldmessstellen im Freiland, sie liegen aber deutlich unter denen der Waldmessstellen im Bestand. Die genannten Parameter sind der Gruppe II zuzuordnen.

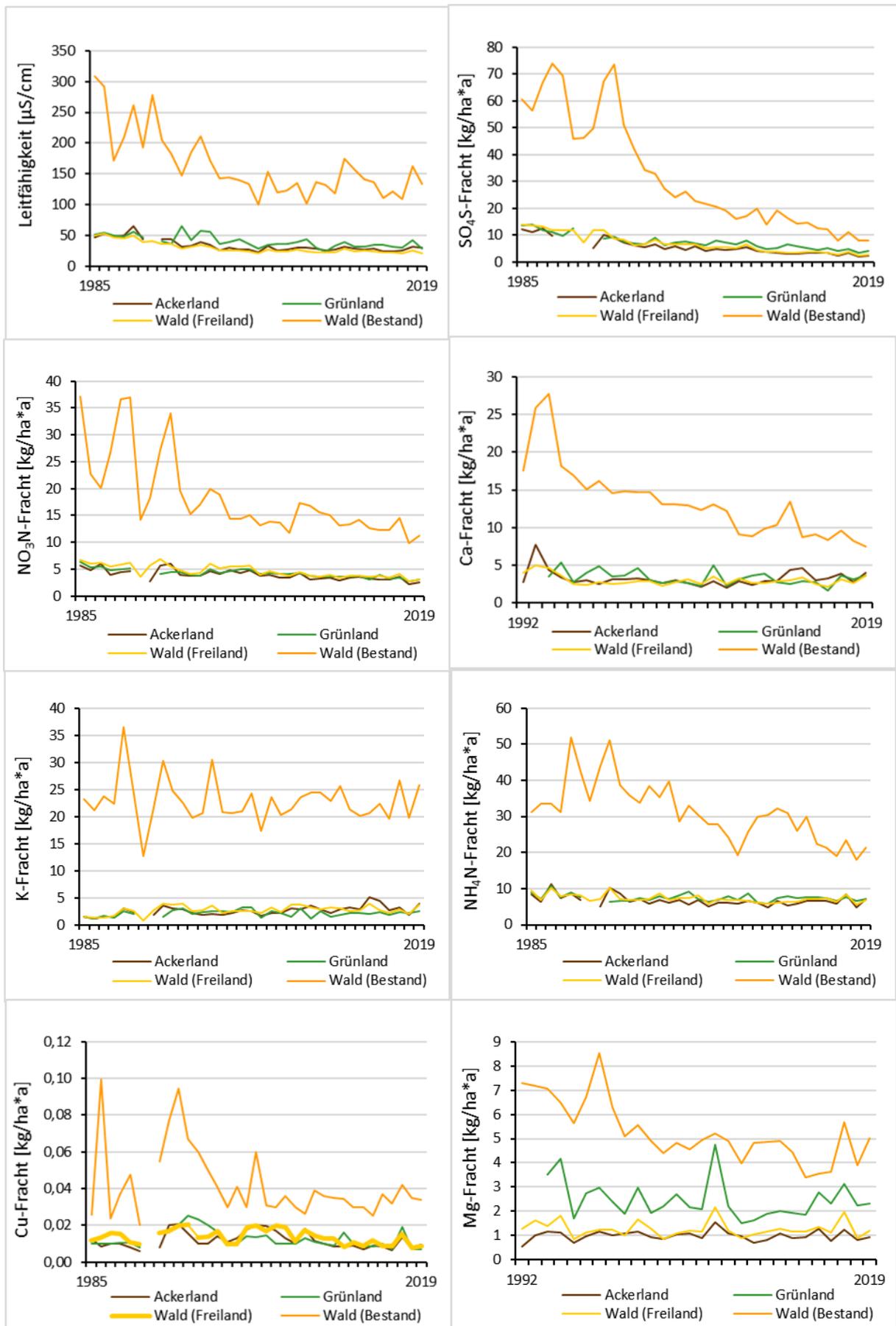


Abb. 7: Vergleich der Leitfähigkeit und der Frachten von Sulfat-Schwefel, Nitrat-Stickstoff, Ammonium-Stickstoff, Kalium, Calcium, Kupfer und Magnesium (Medianwerte) von Acker-, Grünland- und Waldstandorten im Zeitraum von 1985 bis 2019.

Die Blei-, Cadmium- und Zink-Frachten der Waldstandorte im Bestand sind zu Beginn der Untersuchungen ebenfalls deutlich größer als die der anderen drei Standorttypen und sind Gruppe II zuzurechnen. Allerdings sind die Blei- und Cadmium-Frachten in den letzten Jahren so stark zurückgegangen, dass die Unterschiede zwischen den Frachten der einzelnen Standorte sehr gering sind (Abbildung 8). Deutlich ist aber dennoch, dass die Blei- und Cadmium-Einträge an den Waldstandorten im Bestand die höchsten Werte aufweisen. Die Zink-Einträge der Waldstandorte im Bestand sind so zurückgegangen,

dass sie seit ca. 10 Jahren auf dem Niveau der Grünlandstandorte liegen.

Sind in einem Jahr nicht genug Daten vorhanden, da viele Messwerte unter der Bestimmungsgrenze liegen, ist eine jahresweise Frachtenermittlung nicht möglich. Dies war teilweise bei Blei und Cadmium der Fall, in besonderem Maß trifft es für die Parameter Nickel, Chrom und Quecksilber zu. Da nur sehr wenige Frachten für diese Parameter im Betrachtungszeitraum berechnet werden können, wird auf eine grafische Darstellung verzichtet.

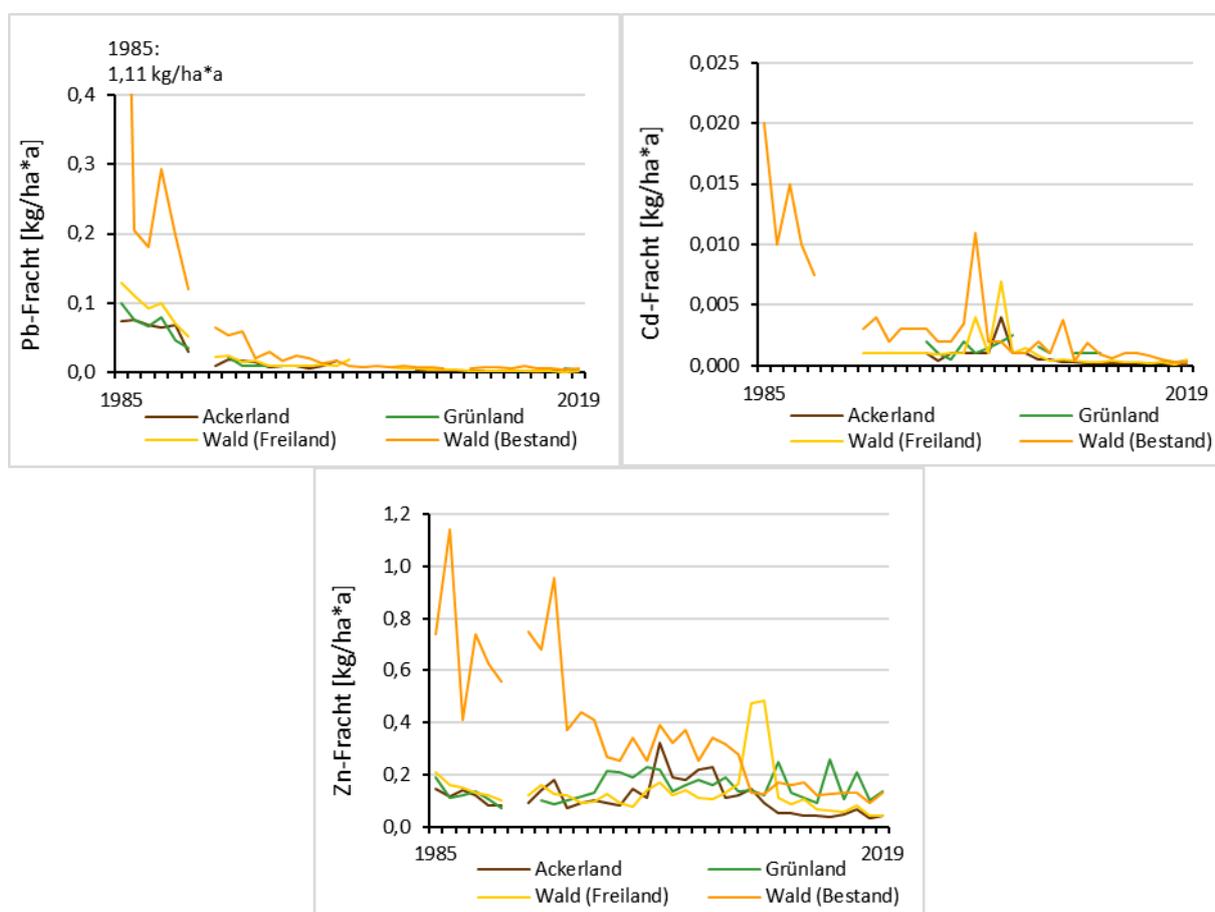


Abb. 8: Vergleich der Blei-, Cadmium- und Fluorid-Frachten (Medianwerte) von Acker-, Grünland- und Waldstandorten im Zeitraum von 1985 bis 2019.

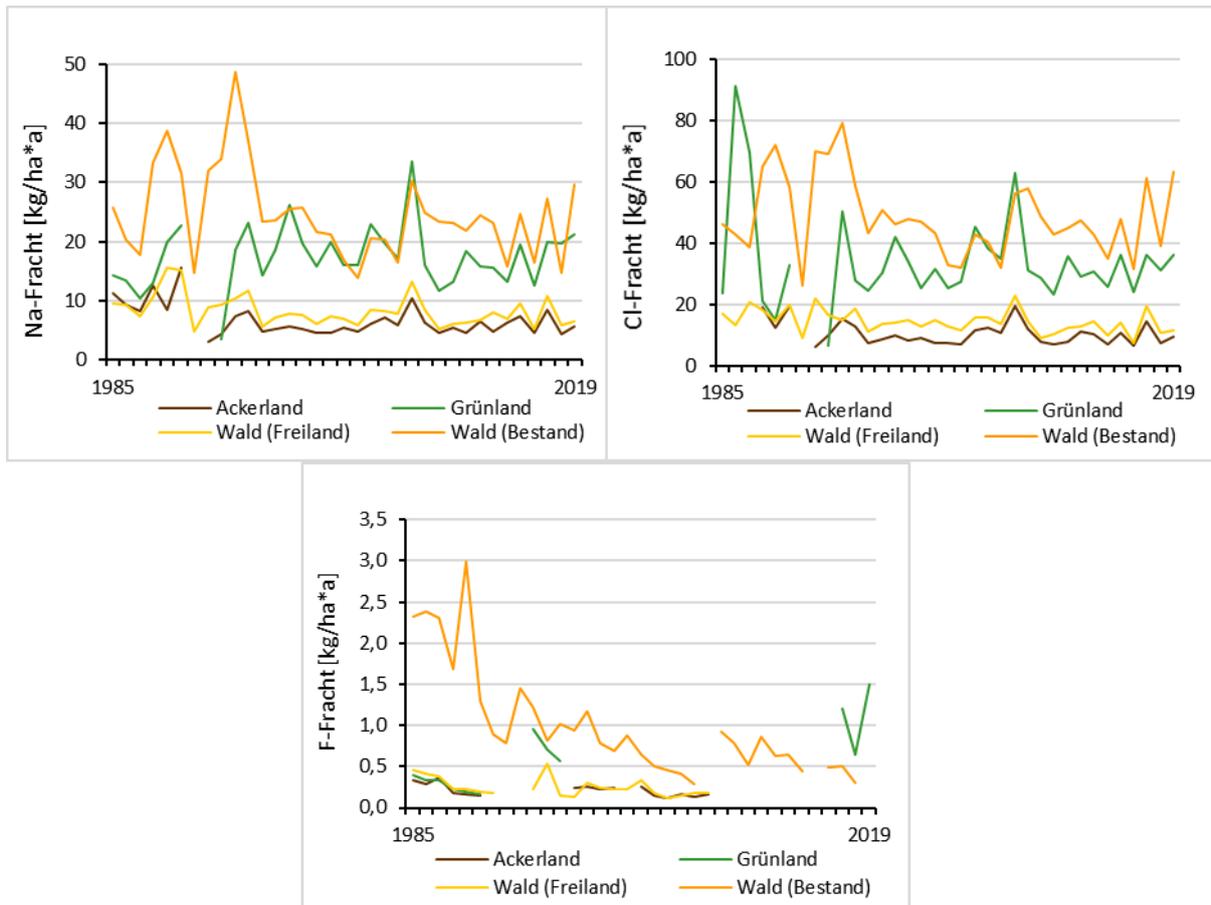


Abb. 9: Vergleich der Natrium-, Chlorid- und Fluorid-Frachten (Medianwerte) von Acker-, Grünland- und Waldstandorten im Zeitraum von 1985 bis 2019.

Abbildung 9 stellt die Parameter der Gruppe III dar: Chlorid, Natrium und z.T. auch Fluorid fallen auf, da die Grünlandfrachten in einigen Jahren eine ähnliche Größenordnung wie die der Waldstandorte im Bestand aufweisen oder sogar darüber liegen. Die Frachten von Ackerland und waldnahen Standorten liegen bis auf wenige Ausnahmen darunter. Insbesondere Chlorid und Natrium treten als Bestandteil von Seaspray in küstennahen Bereichen auf. Sind hier anteilig mehr Grünlandstandorte zu finden, weisen diese auch höhere Natrium- und Chlorid-Frachten auf. Die auffälligen Fluorid-Frachten in den Jahren 2014, 2017, 2018 und 2019 beruhen auf den Messwerten nur einer Messstelle, da bei allen anderen Messstellen eine Frachtenberechnung nicht erfolgen kann, da pro Jahr zu wenig Messwerte vorhanden sind bzw. zu viele Werte unter der Bestimmungsgrenze liegen.

Die Auswertung auf Grundlage verschiedener Standortfaktoren ergibt, dass die Waldmessstellen, die sich direkt im Bestand befinden, bis auf wenige Ausnahmen, deutlich höhere Frachten

aufweisen als die Acker-, Grünland- und waldnahen Standorte. Die Daten von Acker-, Grünland- und waldnahen Messstellen liegen zum allergrößten Teil auf vergleichbarem Niveau. Daher werden im Folgenden alle Freilandmessstellen gemeinsam ausgewertet und den Ergebnissen der Bestandsmessstellen gegenübergestellt (Kapitel 4.1.2 bis 4.1.8).

Eine Zusammenstellung der Anzahl der Werte (Medianwerte) bzw. Messstellen, die pro Jahr und Parameter für Freiland- und Bestandsstandorte vorliegen und ausgewertet werden, ist in Anlage 2 zu finden. Die Zahlen der Freilandmessstellen können sich geringfügig von denen in Anlage 1 unterscheiden, denn nicht bei allen Freilandmessstellen ist eine Zuordnung zu Acker-, Grünland oder waldnahen Standorten möglich. Ebenso kann eine Zuordnung bei bereits aufgegebenen Standorten nicht erfolgen.

Auch in Anlage 2 ist das Jahr 1991 auffällig, da hier vergleichsweise wenig Messstellen bei den Auswertungen berücksichtigt werden. Grund ist auch hier die behördliche Umstrukturierung und

die damit verbundene Umstellung von zentraler auf dezentrale Messnetzbetreuung in jenem Jahr. Insbesondere die Anzahl der Freilandstandorte ist 1991 gegenüber den anderen Jahren deutlich geringer. Das kann dazu führen, dass einzelne (auffällige) Messdaten einen stärkeren Einfluss auf den Jahreswert haben. Dieses

Phänomen ist bei den Bestandsmessstellen ebenfalls zu beobachten, denn deren Anzahl ist deutlich geringer (Kap. 2, Tab. 2.1). Daher ist bei den Bestandsmessstellen generell mit einer größeren Schwankungsbreite der ausgewerteten Daten zu rechnen.

Welchen Standortfaktoren wirken sich auf die Qualität des Niederschlags aus?

Die Frachten von weitgehend unbeeinflussten Freilandmessstellen (GÜN-Messstellen) und denen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (BDF-Messstellen) weisen keine deutlichen Unterschiede auf. Dieses zeigen Untersuchungen am Beispiel von Sulfat und Stickstoffparametern.

Ordnet man alle Freilandmessstellen (GÜN und BDF) einer der vier Landnutzungen Ackerland, Grünland, Wald (Freiland, d.h. in Waldnähe) und Wald (Bestand) zu, fallen bis auf wenige Ausnahmen die deutlich höheren Frachten der Bestandsmessstellen auf. Die Frachten von Ackerland-, Grünland- und waldnahen Standorten befinden sich größtenteils auf einem ähnlichen aber deutlich niedrigerem Niveau.

Aufgrund dieser Erkenntnisse werden im Folgenden alle Freilandmessstellen gemeinsam ausgewertet und den Ergebnissen der Bestandsmessstellen gegenübergestellt.

#### 4.1.2 Niederschlagshöhe

Die monatlich ermittelten Niederschlagshöhen sind wichtige Parameter für die Charakterisierung der Monatsmischproben einer Messstelle. Die Summe der monatlichen Niederschlagshöhen einer Messstelle eines Jahres ergibt die Jahresniederschlagshöhe an dieser Messstelle. Die Summe der Mittelwerte der monatlichen Niederschlagshöhen wiederum ergibt die mittlere monatliche Jahresniederschlagshöhe dieser Messstelle.

Die Niederschlagshöhen gehen als Faktoren in die Frachtenermittlung der anderen Parameter ein.

Die mittleren jährlichen Niederschlagshöhen von Freiland- und Bestandsmessstellen in Niedersachsen sind in Abbildung 10 denen von ganz Deutschland gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass ungefähr bis zur Jahrtausendwende die Jahresniederschläge der niedersächsischen Freiland- und Bestandsmessstellen den Schwankungen der für Deutschland ermittelten Niederschlagshöhe folgen; dabei zeigen die Niederschläge in Niedersachsen zunächst eine größere Amplitude. Von 2000 bis 2013 liegen die durchschnittlichen Niederschlagshöhen deutschlandweit über den in Niedersachsen ermittelten Werten. Ab 2014 gleichen sich die Niederschlagshöhen in Niedersachsen und Deutschland wieder an. Über den gesamten Betrachtungszeitraum

von 35 Jahren beträgt die mittlere Niederschlagshöhe in Deutschland 795 mm, in Niedersachsens Freilandmessstellen wurden durchschnittlich rund 750 mm gemessen und in den Bestandsmessstellen 700 mm. Tendenziell sind insbesondere bei den Bestandsmessstellen die Niederschlagshöhen im Betrachtungszeitraum leicht rückläufig. Dieser Trend ist bei den deutschlandweit erhobenen Daten nicht bzw. kaum zu beobachten. Die Niederschlagshöhen werden in Deutschland schon über einen sehr langen Zeitraum erfasst. Der seit Aufzeichnungsbeginn im Jahr 1881 zu beobachtende Trend zeigt bis zum Jahr 2019 leicht ansteigende Niederschlagshöhen (Abbildung 11).

Zwischen den Niederschlagshöhen von Freiland- und Bestandsmessstellen ist bis zum Jahr 2001 kein deutlicher Unterschied festzustellen; mal weisen die Bestands- und mal die Freilandmessstellen die höheren Jahresniederschläge auf. Ab 2002 ändert sich dieses und die jährlichen Niederschlagshöhen im Bestand liegen bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes unter denen im Freiland. Dies ist im Idealfall auch zu erwarten, denn aufgrund der Interzeption, d.h. der Aufnahme von Regen durch die Vegetation, erreicht weniger Niederschlag die Messeinrichtung. Die Interzeption kann je nach Art der Vegetation unterschiedlich groß sein. Weitere Einflussgrößen

auf die ermittelten Niederschlagshöhen sind die Verteilung der Niederschläge (durch Starkregen geringere Interzeption und größere Regenmengen im Sammler), anhaltende Schneefälle (auflagernder Schnee fällt kompakt zu Boden und führt zu ungleichmäßiger Verteilung in Sammlern) und nebelreiche Gebiete (Nebel tropft von Vegetation in Sammler, während z.B. im Freiland kein Niederschlag fällt) (Hug, R. et al., 2005). Weiterhin

können die Verhältnisse am einzelnen Messstellenstandort (z.B. Höhenlage, vorherrschende Windrichtung) Auswirkungen auf die Niederschlagshöhe haben. Berücksichtigt werden muss zudem, dass in Niedersachsen die Zahl der Bestandsmessstellen deutlich geringer als die der Freilandmessstellen ist und damit o.g. Faktoren einen stärkeren Einfluss haben können.

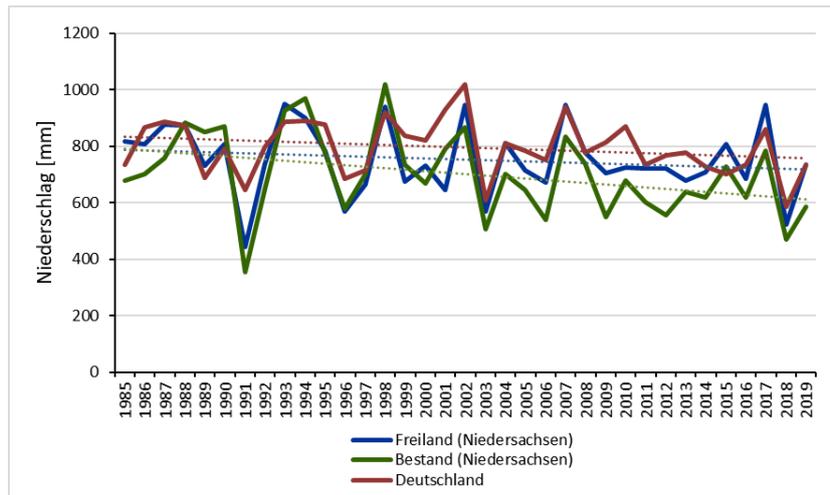


Abb. 10: Mittlere jährliche Niederschlagshöhen in Niedersachsen und Deutschland im Zeitraum von 1985 bis 2019 (Daten aus Deutschland: Website des DWD <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>).

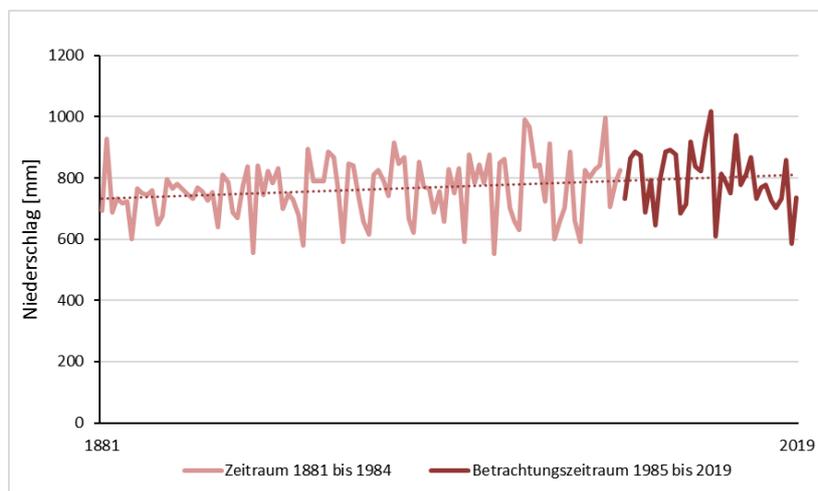


Abb. 11: Mittlerer Jahresniederschlag in Deutschland seit 1881. Dunkler hervorgehoben ist der Betrachtungszeitraum von 1985 bis 2019 (Website des DWD, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>).

Im Betrachtungszeitraum gehen in Deutschland und auch in Niedersachsen die Niederschlagshöhen tendenziell leicht zurück. Im Mittel sind sie in Niedersachsen etwas geringer als deutschlandweit, wobei die Messstellen im Bestand durch die Aufnahme der Regentropfen durch die Vegetation die geringsten Niederschlagshöhe aufweisen. Da die Niederschlagshöhen als Faktor in Frachtenberechnung der anderen Parameter eingehen, haben sie einen deutlichen Einfluss auf die Frachten.

### 4.1.3 pH-Wert und Leitfähigkeit

Der **pH-Wert** gibt die Konzentration der Hydroniumionen ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) im Wasser an. Er ist der negative dekadische Logarithmus der Aktivität der Hydroniumionen. Reines Wasser hat die Aktivität  $10^{-7}$  mol/l, angegeben als pH-Wert 7 bei 22 °C. Geringe Mengen von Sauerstoff beeinflussen ihn. Der theoretische natürliche pH-Wert von Regenwasser liegt bei ca. 5,6. Er lässt sich aus der Gleichgewichtseinstellung von reinem Wasser mit dem  $\text{CO}_2$ -Partialdruck der Atmosphäre berechnen. In der Natur sind pH-Werte zwischen 3,0 und 9,8 bekannt. (Carroll 1962, Lerman 1979).

Die pH-Wert-Entwicklung in den Jahren 1985 bis 2019 der niedersächsischen Niederschläge stellt Abbildung 12 dar. Sowohl die Medianwerte von Freiland- als auch Bestandsmessstellen weisen über die Jahre zunehmende pH-Werte auf, wobei die Bestandsmessstellen z.T. sehr große Schwankungen der Medianwerte und auch der 25 %- und 75 %-Perzentile zeigen. Hauptgrund dafür ist die deutlich niedrigere Anzahl der Bestandsmessstellen gegenüber den Freilandmessstellen (Anlage 1). Der pH-Wert der Freilandmessstellen beträgt im Jahr 1985 noch ca. 4,1 und liegt 2019 bei ca. 6,2. Noch deutlicher fällt der Anstieg des pH-Wertes von ca. 3,5 auf einen Wert von 6,3 in den Bestandsmessstellen aus.

Der Einfluss von versauernden Faktoren (Sulfat,

Nitrat, Ammonium, siehe Kapitel 4.1.4, 4.1.5 und 4.1.8) nimmt mit der Zeit immer weiter ab. Betrachtet man die Medianwerte, wird der theoretische natürliche pH-Wert von ca. 5,6 im Jahr 2011 erreicht, d.h. 50 % der pH-Werte aller Freiland- und Bestandsmessstellen liegen zu diesem Zeitpunkt und danach über dem Wert von 5,6 und zeigen somit keinen Einfluss durch Säurebildner.

Die **elektrische Leitfähigkeit** von Wasser ist mit 0,1 mS/m (entsprechend 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) sehr niedrig. Erst durch die im Wasser gelösten Ionen wird die Leitfähigkeit erheblich erhöht. Die Leitfähigkeit ist daher ein Maß für die im Niederschlag vorhandenen Anionen und Kationen geogenen und anthropogenen Ursprungs. Alle Messstellen haben seit Beginn der Untersuchungen im Jahr 1985 einen Rückgang der Leitfähigkeit erfahren (Abbildung 13). Sie ist bei den Freilandmessstellen von 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  etwa um die Hälfte auf ca. 24  $\mu\text{S}/\text{cm}$  zurückgegangen. Bei den Bestandsmessstellen, die aber generell auch eine wesentlich höhere Leitfähigkeit aufweisen, ist die Abnahme der Leitfähigkeiten noch ausgeprägter: 2019 wird mit ca. 134  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Median) nur noch etwa 43 % der 1985 gemessenen Leitfähigkeit von ca. 310  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Median) erreicht. Der Rückgang der elektrischen Leitfähigkeit dürfte vorrangig auf zurückgehende anthropogene Emissionen zurückzuführen sein.

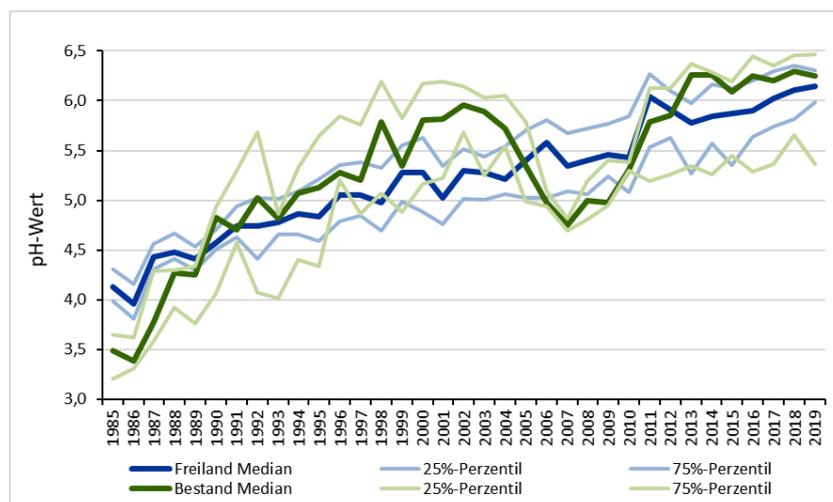


Abb. 12: Entwicklung der pH-Werte von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25 %- und 75 %-Perzentil.

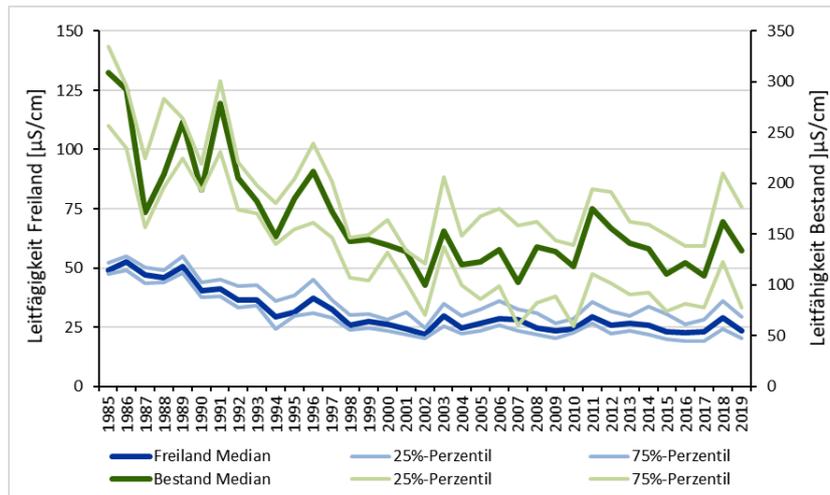


Abb. 13: Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25 %- und 75 %-Perzentil.

Ansteigende pH-Werte und eine Abnahme der Leitfähigkeit sind ab 1982 auch an allen Stationen des Luftmessnetzes des Umweltbundesamtes gemessen worden, an denen die nasse Deposition erfasst wird (UBA, 2020b, 2020c). Die Standorte befinden sich in ganz Deutschland außerhalb von Ballungsgebieten und Städten. Die im östlichen Niedersachsen in der Lüneburger Heide gelegene UBA-Messstelle Waldhof reprä-

sentiert die Hintergrundbelastung des norddeutschen Flachlandes. Die pH-Werte steigen im Zeitraum von 1982 bis 2018 von ca. 4,1 auf ca. 5,4 und entsprechen damit dem Median aller Freilandmessstellen. Die Leitfähigkeit lag in den 1980er Jahren zwischen 38 und ca. 46  $\mu\text{S}/\text{cm}$  um bis 2018 auf ca. 13  $\mu\text{S}/\text{cm}$  zurückzugehen und ist damit etwas geringer als der Median der Freilandmessstellen.

Seit Untersuchungsbeginn steigen die pH-Werte im Regenwasser kontinuierlich an, und der Einfluss versauernder Faktoren geht immer weiter zurück. Auch die elektrische Leitfähigkeit als Maß für die im Niederschlag vorhandenen An- und Kationen geogenen und anthropogenen Ursprungs ist als Folge sinkender Emissionen rückläufig.

#### 4.1.4 Stickstoffeintrag

Stickstoffeinträge in die Luft erfolgen größtenteils durch die Emission von Stickstoffoxid und Ammoniak.

**Stickstoffoxide** entstehen hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen in Anlagen und Motoren. Der größte Emittent war nach Datenzusammenstellung des UBA (2021a) im Jahr 2019 mit 42,7 % der Straßenverkehr, gefolgt von der Energiewirtschaft mit 21 %. Geringere Emissionen entstehen in Industrie und Gewerbe, in Haushalten sowie in der Landwirtschaft (Abbildung 14).

Hauptemittent des Luftschadstoffs **Ammoniak**

war 2019 in Deutschland die Landwirtschaft mit einem Anteil von 95,1 % (Abbildung 15). Der überwiegende Teil der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen entsteht durch Tierhaltung, weiterhin gelangt Ammoniak durch die Verwendung von Düngemitteln und die Lagerung/Ausbringung von Gärresten der Biogasproduktion in die Atmosphäre. Von geringerer Bedeutung sind industrielle Prozesse wie beispielsweise die Herstellung von Ammoniak und stickstoffhaltigen Düngemitteln, Katalysatoren in Kraftfahrzeugen, Feuerungsprozesse sowie Anlagen zur Rauchgasentstickung. (UBA, 2020d).

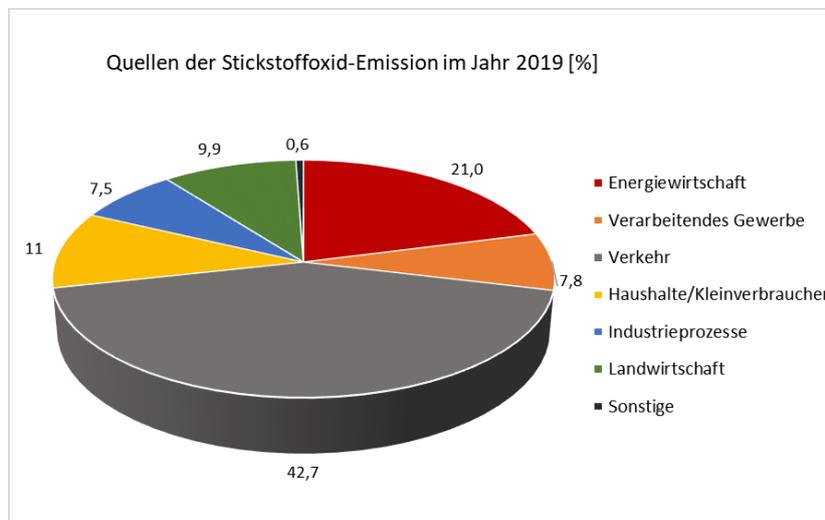


Abb. 14: Quellen der Stickstoffoxid-Emission in Deutschland im Jahr 2019 (NO<sub>x</sub>, berechnet als NO<sub>2</sub>) (Datenquelle: UBA 2021a).

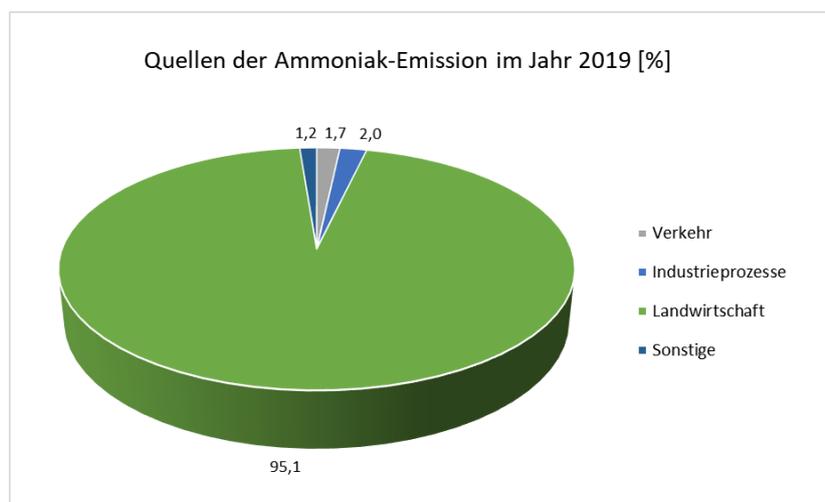


Abb. 15: Quellen der Ammoniak-Emission in Deutschland im Jahr 2019 (Datenquelle: UBA 2021a).

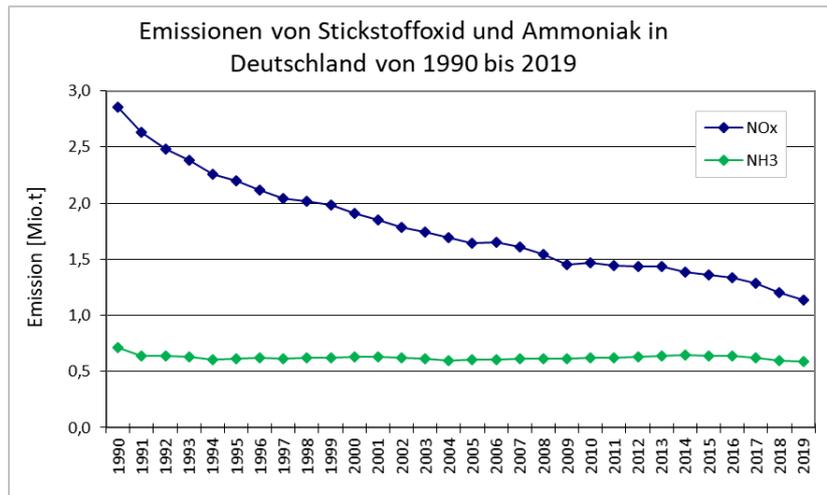


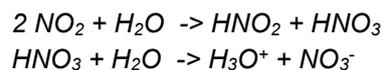
Abb. 16: Entwicklung der jährlichen Emissionen von Stickstoffoxid und Ammoniak in Deutschland von 1990 bis 2019 (Datenquelle: UBA 2021a).

Die Entwicklung der Stickstoffemissionen in Deutschland seit 1990 ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Emissionen der Stickstoffoxide gehen zwischen 1990 und 2019 um ca. 60 % zurück. Da die stationären und mobilen Verbrennungsprozesse den Großteil der Emissionen ausmachen, beeinflussen insbesondere die Emissionsminderungen des Verkehrs aufgrund strikterer Gesetze und besserer Kraftstoffe den Trend maßgeblich. (UBA 2020d). Die Ammoniak-Emissionen sinken zunächst in nur einem Jahr - nämlich von 1990 bis 1991 - von 0,72 auf 0,64 Mio. t um fast 12 % und bleiben in den darauffolgenden Jahren auf ähnlichem Niveau. Im Jahr 2018 wurden in Deutschland 0,64 Mio. t Ammoniak emittiert.

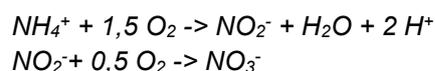
In Niedersachsen werden im Niederschlagswasser die Stickstoffverbindungen der Luft als Einzelverbindungen Nitratstickstoff und Ammoniumstickstoff und als Summenparameter Gesamtstickstoff angegeben. Definitionsgemäß erfasst der Parameter Gesamtstickstoff alle Stickstoffverbindungen, neben Nitrat und Ammonium auch Nitrit und organische Stickstoffverbindungen. Da Letztere nur in sehr geringen Konzentrationen im Regenwasser vorhanden sind, entspricht die Gesamtstickstoff-Fracht praktisch der Summe von Ammonium- und Nitrat-Stickstoff und kann rechnerisch ermittelt werden.

**Nitrat** im Regenwasser stammt aus der Reaktion des Regenwassers mit Stickstoffoxiden. Bei der Verbrennung entsteht zunächst vorwiegend Stickstoffmonoxid (NO), das in der Atmosphäre schnell zu Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) oxidiert wird. NO<sub>2</sub> wird in der feuchten Atmosphäre mit Was-

serdampf zu Salpetersäure oxidiert. Die Säure liegt dann gelöst in der Luft vor und regnet mit dem Niederschlag ab (Nassdeposition) (NLWKN Cloppenburg, 2005).



**Ammonium** wird im Niederschlagswasser durch Auswaschung von Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) aus der Luft angereichert. Ammoniak wird im Stallbereich, bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern und Gülle sowie bei der Weidewirtschaft freigesetzt. Aus dem Harnstoff der Tierfäkalien wird mikrobiell neben Kohlendioxid auch Ammonium gebildet, das teilweise als Ammoniak gasförmig entweicht. Anders als bei der Reaktion des Regenwassers mit SO<sub>2</sub> oder NO<sub>x</sub> ist die Säurewirkung von NH<sub>3</sub> bzw. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> im Regenwasser nicht am pH-Wert zu erkennen. Die versauernde Wirkung wird erst im Boden aufgrund von bodenchemischen Vorgängen induziert (StAWA Stade, 1997). Bei der Nährstoffaufnahme von Ammonium durch die Pflanzen werden pro Mol Ammonium 1 Mol Wasserstoffionen freigesetzt. Bei der Nitrifikation sind es pro Mol Ammonium 2 Mol Wasserstoffionen:



Das gebildete Nitrat wird in Grund- und Oberflächengewässer ausgewaschen oder zu Lachgas (N<sub>2</sub>O) oder elementarem Stickstoff (N<sub>2</sub>) denitrifiziert (NLWKN Cloppenburg, 2005).

### Frachten-Verhältnis Ammonium-/Nitrat-Stickstoff

Ammonium-Frachten im Niederschlag stammen überwiegend aus Regionen, in denen intensive Tierhaltung betrieben wird, während Nitrat-Frachten größtenteils auf die Stickstoffemissionen aus Straßenverkehr und Energiewirtschaft zurückzuführen und eher überregional verbreitet sind. Um die Stickstoffbelastung eines Standortes zu charakterisieren, wird das Verhältnis von Ammonium- zu Nitrat-Stickstoff gebildet. Das Verhältnis kann erste Hinweise auf die Herkunft der Stickstoff-Einträge geben.

Ob sich die Stickstoff-Emissionen in den Niederschlagsfrachten widerspiegeln, welche Größenordnung die Stickstoff-Frachten aufweisen und wie sie sich im Betrachtungszeitraum entwickeln,

wird im Folgenden dargestellt.

Zunächst wird die **Gesamtstickstoff-Fracht** betrachtet, die sich aus der Summe der Frachten von Ammoniumstickstoff und Nitratstickstoff zusammensetzt. Die Bestandsmessstellen weisen im direkten Vergleich deutlich höhere Frachten als die Freilandmessstellen auf (Abbildung 17). Sie gehen im Laufe der Jahre allerdings mit großen Schwankungen um etwa 50 % auf 35 bis 40 kg Gesamtstickstoff/ha\*a zurück, während sich die Frachten der Freilandmessstellen auf einem deutlich niedrigeren Niveau befinden. Die Gesamtstickstoff-Frachten der Freilandmessstellen fallen bis zum Jahr 2002 etwa um 30%, um sich dann auf einem Niveau von ca. 11 kg/ha\*a einzupendeln.

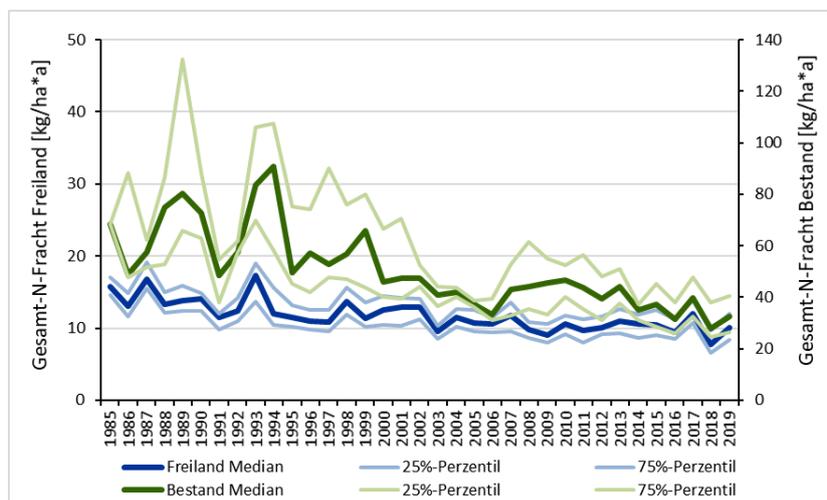


Abb. 17: Entwicklung der Gesamtstickstoff-Fracht von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25 %- und 75 %-Perzentil.

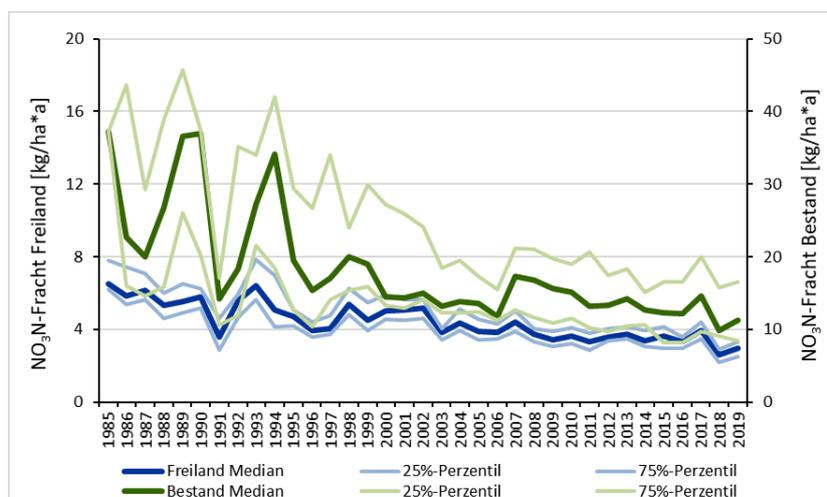


Abb. 18: Entwicklung der Nitratstickstoff-Fracht von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25 %- und 75 %-Perzentil.

Die Entwicklung der **Nitratstickstoff-Fracht** im Betrachtungszeitraum ist insbesondere bei den Bestandsmessstellen starken Schwankungen unterworfen, generell ist aber sowohl bei den Bestandsmessstellen als auch bei den Freilandmessstellen ein Rückgang von mindestens 50 % zu beobachten (Abbildung 18). Bestandsfrachten fallen von ca. 30 auf 11 kg Nitratstickstoff/ha\*a und Freilandfrachten von ca. 6 auf 3 kg Nitratstickstoff/ha\*a. Das niedrige Niveau wird bei den Bestandsmessstellen ab dem Jahr 2000 und bei den Freilandmessstellen ab 2009 gehalten.

Die **Ammoniumstickstoff-Fracht** der Bestandsmessstellen ist ebenfalls starken Schwankungen unterworfen (Abbildung 19). Bis 1999 liegen die Frachten um 38 kg/ha\*a, während sie danach um einen mittleren Medianwert von knapp 26 kg Ammoniumstickstoff /ha\*a schwanken und damit um etwa 30 % zurückgehen. Bei den Freilandmessstellen liegt der Mittelwert der Mediane bei 7,2 kg Ammoniumstickstoff/ ha\*a, wobei dieser Wert in den ersten Jahren der Untersuchung meist überschritten und seit 1994 bis auf wenige Ausnahmen unterschritten wird.

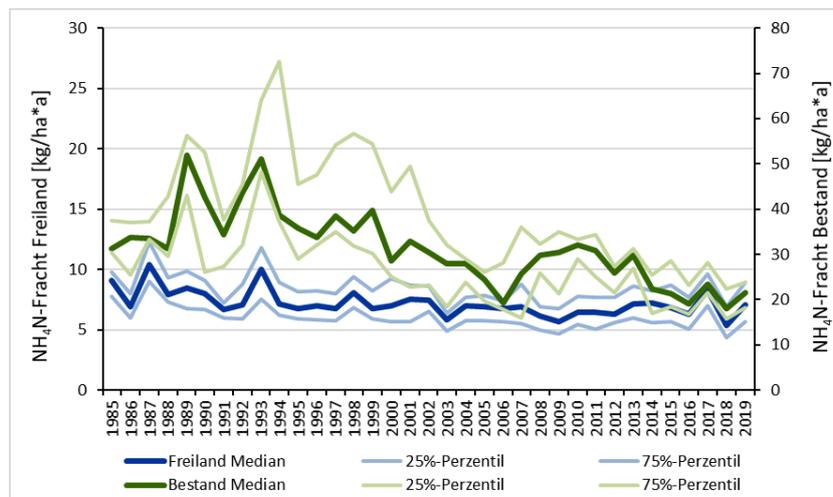


Abb. 19: Entwicklung der Ammoniumstickstoff-Fracht von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25 %- und 75 %-Perzentil.

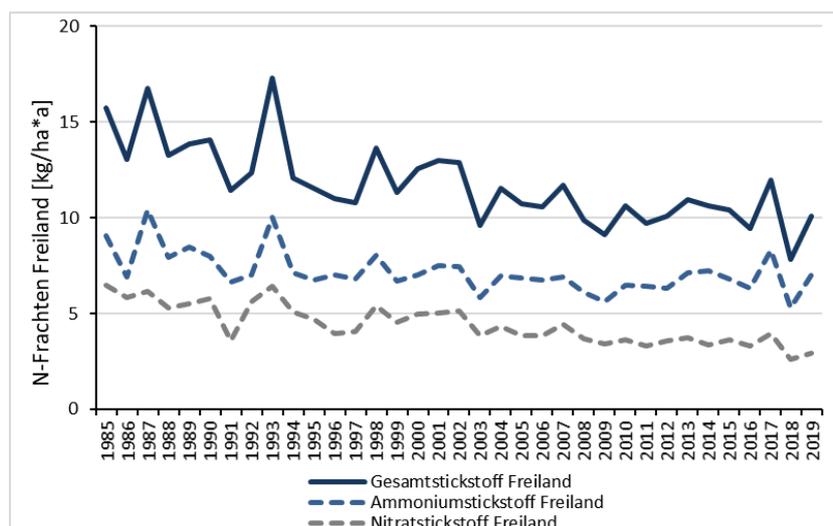


Abb. 20: Entwicklung der Frachten von Ammonium-, Nitrat- und Gesamtstickstoff an Freilandmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.

Zusammenfassend stellt Abbildung 20 die Entwicklung der Stickstoff-Frachten im Freiland zwischen 1985 und 2019 dar. Die Gesamtstickstoff-Frachten gehen insgesamt zurück. Ein Grund sind die ebenfalls in Abhängigkeit von der Stickstoffoxid-Emission in Deutschland (Abbildung 16) rückläufigen Nitratstickstoff-Frachten. Die Ammoniumstickstoff-Frachten sinken in diesem Zeitraum weniger.

Die Höhe und die Entwicklung der Stickstoff-Einträge in Niedersachsen ist mit denen in anderen Bundesländern vergleichbar. Die Niederschlags-

frachten bewegen sich in ausgewählten Freilandmessstellen Bayerns im Zeitraum von 1985 bis 2018 von ca. 7 auf ca. 3 kg/ha\*a Nitratstickstoff und von ca. 9 auf ca. 6 kg/ha\*a Ammoniumstickstoff (LfU Bayern, 2020).

In Schleswig-Holstein liegen Daten von 8 Depositionsmessstellen für den Zeitraum von 1988 bis 2009 vor. Die Nitratstickstoff-Frachten gehen hier von ca. 6 auf ca. 3 kg/ha\*a zurück, die Ammoniumstickstoff-Frachten von ca. 10 auf ca. 5 kg/ha\*a (LANU S.-H. 2010).

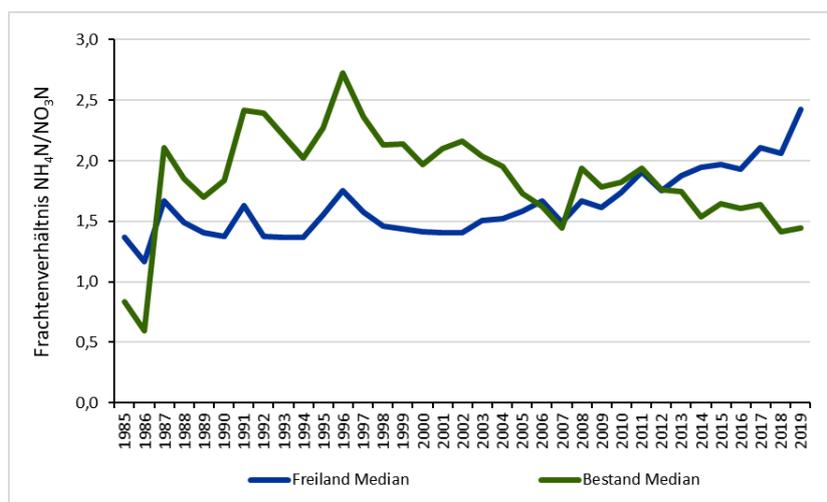


Abb. 21: Entwicklung des Verhältnisses der Ammonium-/Nitratstickstoff-Fracht von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019.

Das **Verhältnis** zwischen **Ammonium-** und **Nitratstickstoff-Fracht** kann einen Hinweis auf die Herkunft der Stickstoff-Fracht im Niederschlag geben. Ist das Verhältnis 1, hält sich die Belastung mit Ammonium- und Nitratstickstoff die Waage. Je größer der Wert jedoch ist, desto weiter verschiebt sich das Verhältnis in Richtung Ammoniumstickstoff. Es kann auf einen zunehmenden landwirtschaftlichen Einfluss durch intensive Tierhaltung hindeuten (NLÖ 1992, NLWKN Cloppenburg 2005).

Die Summe aller Freilandmessstellen in Niedersachsen zeigt seit 1985 ein ansteigendes Verhältnis von Ammonium- zu Nitratstickstoff-Fracht und damit einen größeren Einfluss der Landwirtschaft gegenüber den Einträgen aus Straßenverkehr und Energiewirtschaft (Abbildung 21). Dieses geht allerdings sowohl mit rückläufigen Ammonium- als auch Nitratstickstoff-Frachten einher (Abbildungen 4.15 bis 4.17). Das Verhältnis der Ammonium- zu Nitratstickstoff-Fracht der Be-

standsmessstellen liegt in den Jahren 1985 und 1986 zunächst unter eins und zeigt damit einen größeren Einfluss von Nitratstickstoff aus Energiewirtschaft und Verkehr auf. In den folgenden 10 Jahren steigt es auf über 2,5 und spiegelt eine abnehmende Bedeutung von Nitratstickstoff und im Gegenzug einen zunehmenden Einfluss von Ammoniumnitrat und damit landwirtschaftlicher Nutzung wider. Ab 1996 zeigen die Bestandsmessstellen ein rückläufiges Ammonium-/Nitratstickstoff-Verhältnis, das 2019 einen Wert von 1,4 erreicht. Die Freilandmessstellen weisen dagegen zunächst bis auf wenige Ausnahmen mit 1,5 ein geringeres Frachtenverhältnis auf, seit 2013 liegt es aber deutlich über dem der Bestandsmessstellen. Im Jahr 2019 wird mit 2,4 der bisher höchste Wert im Freiland erreicht. Die Ursache ist darin zu suchen, dass die Ammoniumstickstoff-Frachten im Bestand rückläufig sind, während sie im Freiland auf einem Niveau verharren.

Stickstoffeinträge in die Luft erfolgen durch die Emission von Stickstoffoxiden und Ammoniak. Stickstoffoxide entstehen hauptsächlich durch den Straßenverkehr und die Energiewirtschaft, ihre Emissionen sind deutschlandweit rückläufig. Diese Entwicklung ist in den Depositionsmessstellen anhand sinkender Nitratstickstoff-Frachten nachzuvollziehen.

Ammoniak wird fast ausschließlich durch die Landwirtschaft freigesetzt. Die Emissionen in Deutschland befinden sich seit 1990 auf gleichbleibenden Niveau. In Niedersachsen findet man im Niederschlag nur leicht zurückgehende Ammoniumnitrat-Frachten. Das Verhältnis Ammonium- zu Nitratstickstoff liegt ab 1987 in allen Messstellen über eins und ist damit in Richtung Ammoniumstickstoff verschoben.

Die Höhe und die Entwicklung der Stickstoff-Einträge in Niedersachsen ist mit denen in anderen Bundesländern vergleichbar.

### 4.1.5 Sulfat und Phosphat

**Sulfate** sind Reaktionsprodukte aus dem in die Atmosphäre emittierten Schadgas Schwefeldioxid. Die Oxidation erfolgt in einem Zeitraum von einigen Tagen, so dass die Bildung und auch der weitere Transport der Reaktionsprodukte großräumig stattfinden kann.

Im Jahr 2019 sind die stationären Feuerungsanlagen der Kraft- und Fernheizwerke der Energiewirtschaft mit einem Anteil von 53,6 % an den Gesamtemissionen Hauptverursacher der Schwefeldioxid-Emissionen (Abbildung 22). Es folgen die Emissionen aus Industrieprozessen mit 25,8 % und die Industriefeuerungen des Verarbeitenden Gewerbes mit 12,6 %. Die Emissionen aus Haushalten spielen mit 4,8 % nur eine untergeordnete Rolle.

Die Entwicklung der Schwefeldioxid-Emission in Deutschland von 1990 bis 2019 ist in Abbildung 23 dargestellt. In diesem Zeitraum ist ein

Rückgang der Emissionen von 5,47 auf 0,26 Millionen Tonnen zu verzeichnen, das einem Minus von mehr als 95 % entspricht.

Da die größte Quelle für die Emissionen die Oxidation von Schwefel in Brennstoffen bei der stationären Verbrennung ist, führten einerseits zunehmend strikte nationale Gesetze zu technischen Minderungsmaßnahmen (Stichwort „Rauchgasentschwefelung“), andererseits wurde ein Wechsel weg von schwefelhaltigen festen Brennstoffen hin zu schwefelarmen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen eingeleitet (UBA, 2020d). Zudem sind nach der deutschen Wiedervereinigung 1989 in den neuen Bundesländern zahlreiche Betriebe stillgelegt oder technisch nachgerüstet worden. Seit ca. 15 Jahren befinden sich die Schwefeldioxid-Emissionen auf einem sehr niedrigen Niveau mit weiterhin leicht rückläufigen Emissionsmengen.

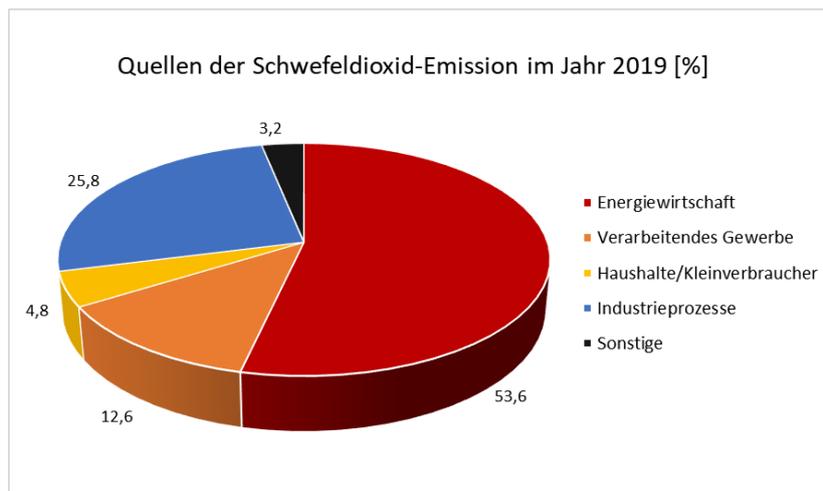


Abb. 22: Quellen der Schwefeldioxid-Emission in Deutschland im Jahr 2019 (Datenquelle: UBA 2021a).

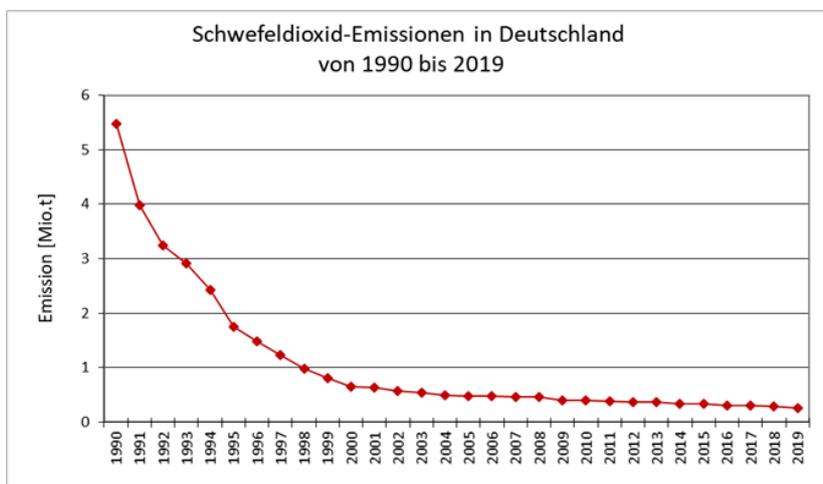


Abb. 23: Entwicklung der jährlichen Schwefeldioxid-Emissionen in Deutschland von 1990 bis 2018 (Datenquelle: UBA 2021a).

Ein Teil des emittierten Schwefeldioxids wird trocken an der Erdoberfläche deponiert, ein anderer Teil wird durch Sauerstoff zu Schwefeltrioxid ( $\text{SO}_3$ ) oxidiert und als Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) mit dem Regen ausgespült. Daraus ergibt sich ein weiteres Problem, da die Schwefelsäure als Bestandteil des sauren Regens zur Versauerung der Böden beiträgt (Holleman et al., 1995). Die Salze der Schwefelsäure, die Sulfate, werden im Rahmen der Depositionsuntersuchungen in Niedersachsen ermittelt. Die Entwicklung der Sulfatschwefel-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Betrachtungszeitraum stellt Abbildung 24 dar. Analog zur Entwicklung der deutschlandweiten Schwefeldioxid-Emission zeigen die niedersächsischen Depositionsmessstellen stark zurückgehende Sulfat-Frachten im Niederschlag. Die deutlich gegenüber den Freiland-Frachten höheren Frachten der Bestands-

messstellen gehen um fast 90 % zurück (Median-Werte, ausgehend von den 1988 und 1994 ermittelten Maximalwerten von ca. 74  $\text{kg}/\text{ha}^*\text{a}$ ). Die Median-Werte der Freilandmessstellen weisen ebenfalls einen Rückgang der Sulfatschwefel-Frachten um ca. 80 % auf und liegen seit 2009 unter 4  $\text{kg}/\text{ha}^*\text{a}$  Sulfatschwefel. Im Jahr 2019 beträgt der Eintrag nur noch 2,6  $\text{kg}/\text{ha}^*\text{a}$ . Auch in verschiedenen Regionen Baden-Württembergs werden im Jahr 2016 im Mittel Depositionsfrachten zwischen 1,7 und 4,7  $\text{kg}/\text{ha}^*\text{a}$  Sulfatschwefel erreicht (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, LUBW, 2018). Eine ähnliche Entwicklung ist bei den 8 in Schleswig-Holstein von 1988 bis 2009 betriebenen Niederschlagsmessstellen zu beobachten. Die Sulfatschwefel-Frachten gehen in diesem Zeitraum von ca. 13 auf 3,5  $\text{kg}/\text{ha}^*\text{a}$  zurück (LANU S.-H., 2010).

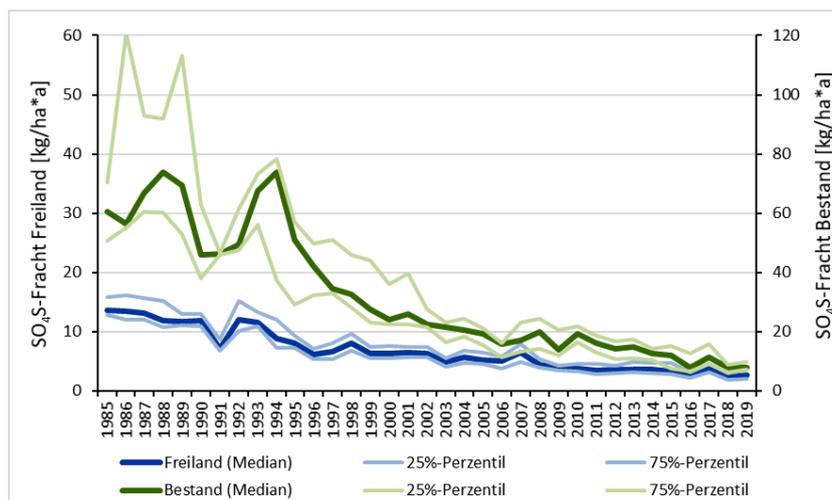


Abb. 24: Entwicklung der Sulfat-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25 %- und 75 %-Perzentil.

**Phosphate** kommen in erster Linie als Dünger zum Einsatz. Sie finden aber auch als Waschmittelzusatz, Lebensmittelzusatzstoff sowie als Futtermittel, Korrosionsschutz- und Flammenschutzmittel Verwendung. Der gesamte Phosphattransport erfolgt entweder in wässriger Lösung oder adsorbiert an Partikeln. Phosphat-Verbindungen geraten v. a. durch Verbrennungsprozesse, Winderosion, landwirtschaftliche Tätigkeiten, Düngemittelproduktion und Pollenstäube in die bodennahe Luftschicht. (Möller, D., 2003). Während sich die Frachten der Bestandsmessstellen mit z.T. größeren Schwankungen auf einem Niveau bewegen, ist bei den Phosphatphosphor-Frachten im Freiland eine Zunahme innerhalb des Betrachtungszeitraums zu beobachten,

über deren Ursache auf Grundlage der vorliegenden Daten keine Aussage getroffen werden kann. In den letzten Jahren hat eine Angleichung der Höhe der Frachten stattgefunden, so dass zwischen Freiland- und Bestandsmessstellen nur geringe Unterschiede auszumachen sind, im Jahr 2019 übertreffen die Freilandwerte sogar die der Bestandsmessstellen um 50% (Abbildung 25). Die an 13 Depositionsmessstellen in den Jahren 1998 und 1999 in Mecklenburg-Vorpommern erhobenen Phosphor-Einträge liegen zwischen 0,2 und 0,7 kg/ha\*a und weisen damit eine ähnliche Größenordnung auf wie die Frachten, die zu dieser Zeit in Niedersachsen auftraten (LUNG M.-P., 2002).

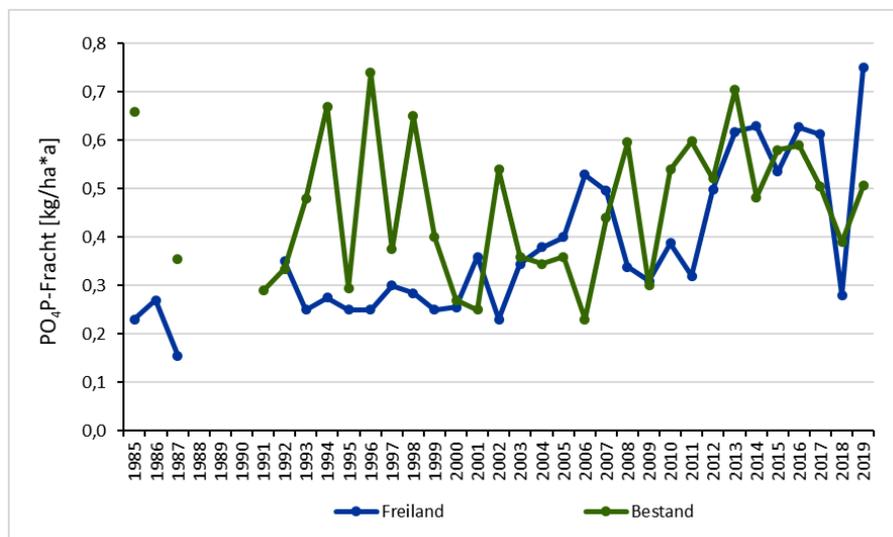


Abb. 25: Entwicklung der Phosphatphosphor-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.

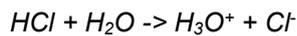
Die größte Emissionsquelle für Schwefeldioxid sind die Feuerungsanlagen der Kraft- und Fernheizwerke der Energiewirtschaft. Durch Emissionsminderungsmaßnahmen sowie dem Wechsel weg von schwefelhaltigen festen hin zu schwefelarmen flüssigen Brennstoffen wurde in Deutschland ein Rückgang des Schwefeldioxid-Ausstoßes von ca. 95% in knapp 30 Jahren erreicht. Die rückläufigen Schwefeldioxid-Emissionen führen im Betrachtungszeitraum zu deutlichen Abnahmen der Sulfatschwefel-Frachten um ca. 90 % im Bestand und ca. 80 % im Freiland.

Die Phosphatphosphor-Frachten in Freiland-Messstellen zeigen eine leicht ansteigende Tendenz und befinden sich in den letzten Jahren auf dem Niveau der Messstellen im Bestand, deren Frachten allerdings eine hohe Schwankungsbreite aufweisen.

#### 4.1.6 Chlorid, Natrium, Magnesium, Kalium, Calcium und Fluorid

**Chlorid** im Regenwasser ist, ebenso wie **Natrium** und **Magnesium**, in küstennahen Regionen praktisch vollständig maritimen Ursprungs. Dort erfolgt der Eintrag über Seaspray, d.h. über meerwasserhaltige Aerosole. Regionale Unterschiede der Frachten der genannten Parameter werden in Kapitel 4.2.2 aufgezeigt.

Als anthropogen beeinflusste Chlorid-Quelle ist die Zementfabrikation, aber auch die Verbrennung von Kunststoffen, insbesondere Polyvinylchlorid (PVC), zu nennen. PVC wurde in den vergangenen Jahrzehnten in großen Mengen zur Herstellung von Fenstern, Fußböden und vielen anderen Gegenständen verwendet. Bei der Verbrennung entsteht Chlorwasserstoff (HCl). HCl ist gasförmig und bildet mit dem Niederschlagswasser Salzsäure (Wiberg, N. et al., 1995).



Die Chlorid-Frachten der Depositionsmessstellen im Bestand sind fast dreimal höher als die der Freilandmessstellen und unterliegen größeren Schwankungen (Abbildung 26). Keine der Bestandsmessstellen befindet sich in Küstennähe. Beim Parameter Chlorid ist der Messstellen-

standort von besonderer Bedeutung, da die Frachten deutlich von der Entfernung zur Nordsee abhängen (siehe Kapitel 4.2.2). Daher können die Chlorid-Frachten in Abhängigkeit der untersuchten Messstellen, die in die Auswertung einfließen, stark von Jahr zu Jahr variieren. Deutlich wird dieses bei den Freilandmessstellen im Jahr 1986: Hier gingen nur fünf Messstellen in die Betrachtung ein (Anlage 2), von denen sich zwei auf Norderney und eine bei Emden befinden und daher sehr hohe Chlorid-Frachten aufweisen, die den Median damit bestimmten. Der maritime Einfluss zeigt sich auch in Daten aus Schleswig-Holstein, da weite Teile des Bundeslandes vom über die Nordsee kommenden Westwind erreicht werden. Im Zeitraum zwischen 1988 und 2009 wiesen die 8 dort betriebenen Freilandmessstellen des Depositionsmessnetzes im Durchschnitt ca. 27 kg Chlorid/ha\*a auf (LANU S.-H., 2010). In Mecklenburg-Vorpommern sind die Niederschläge deutlich weniger von Meeresaerosolen beeinflusst. In den Jahren 1998 bis 2000 liegen die Chlorid-Frachten zwischen 5 und 18 kg/ha\*a und damit auf ähnlichem Niveau wie Niedersachsen (LUNG M.-V.- 2002).

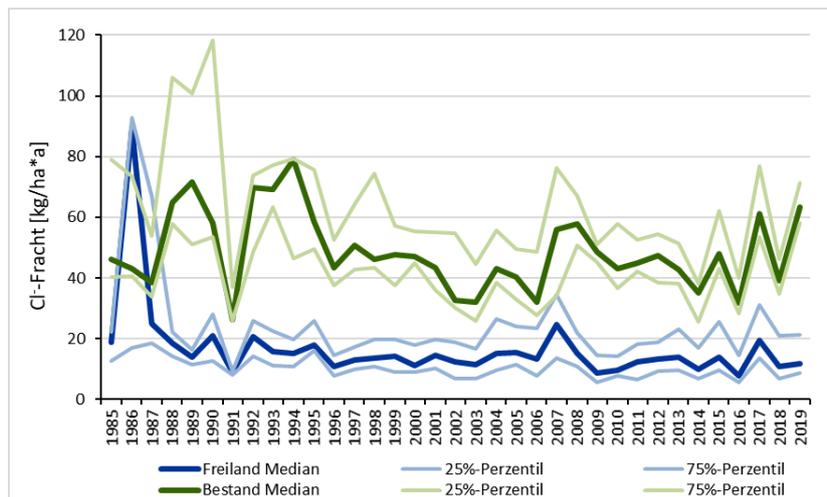


Abb. 26: Entwicklung der Chlorid-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median, das 25 %- und 75 %-Perzentil.

Die Einträge von **Natrium** und **Magnesium** in Niedersachsen befinden sich mit mehr oder weniger großen Schwankungen auf einem jeweils gleichbleibenden Niveau, wobei die Bestandsfrachten bei Natrium im Durchschnitt dreimal und bei Magnesium fast fünfmal höher ausfallen als die Frachten im Freiland (Abbildungen 27 und 28). Im Durchschnitt betragen die Frachten im Freiland ca. 8 kg Na/ha\*a und ca. 1,3 kg Mg/ha\*a. Im Vergleich fallen die Natrium- und Magnesium-Einträge in den Freilandmessstellen Schleswig-Holsteins im Zeitraum von 1988 bis 2009 mit ca. 15,9 kg Na/ha\*a und ca. 1,9 kg Mg/ha\*a etwas höher aus. Dies könnte auf den

Einfluss des Meeres hinweisen (LANU S.-H., 2010).

Dass der größte Anteil der Magnesium-Frachten seinen Ursprung in den meeresbürtigen Aerosolen hat, zeigt Abbildung 29, in der die Frachten von Chlorid, Natrium und Magnesium aller Freilandmessstellen im Vergleich dargestellt sind. Im Zeitraum von 1992, als mit der Untersuchung von Magnesium begonnen wurde, bis 2019 entwickeln sich die Magnesium-Frachten ähnlich wie die von Chlorid und Natrium. Dies gilt auch für die Frachten der Bestandsmessstellen, allerdings sind die Übereinstimmungen aufgrund der geringen Messstellenzahl nicht ganz so deutlich.

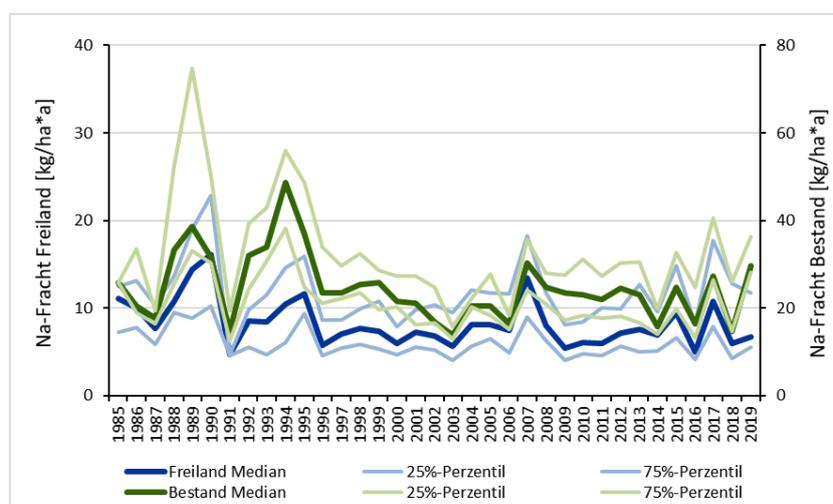


Abb. 27: Entwicklung der Natrium-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median, das 25 %- und 75 %-Perzentil.

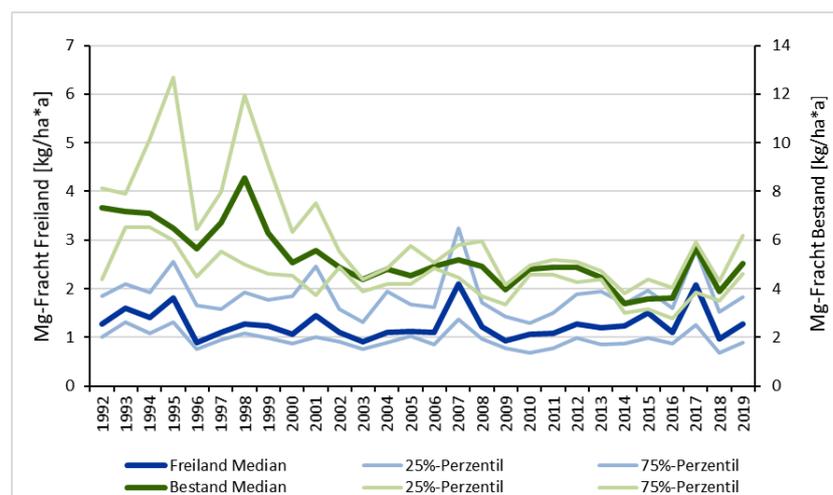


Abb. 28: Entwicklung der Magnesium-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1992 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median, das 25 %- und 75 %-Perzentil.

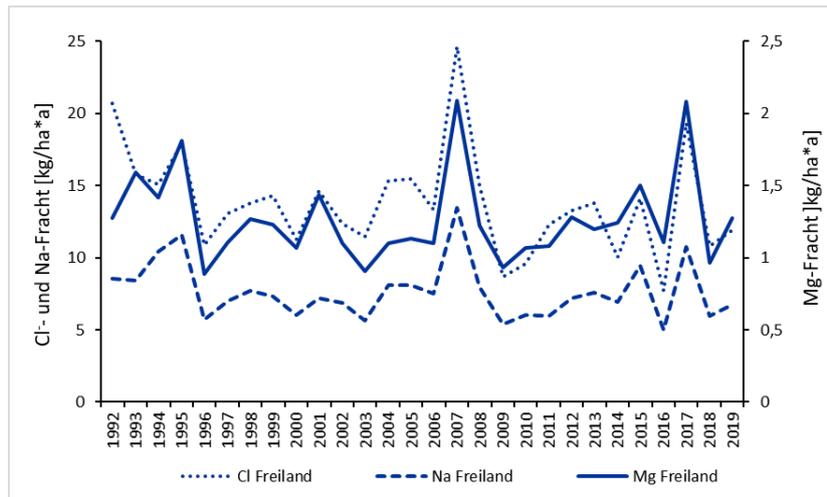


Abb. 29: Entwicklung von Chlorid-, Natrium- und Magnesium-Frachten von Freilandmessstellen im Zeitraum von 1992 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.

**Magnesium, Kalium und Calcium** sind wichtige Pflanzennährstoffe. Diese gelangen natürlicherweise im Fall von Magnesium zum größten Teil durch Seaspray aber auch durch Verwitterung der Ausgangsgesteine in die Bodenlösung. Eine anthropogene Magnesium-Quelle ist die Kalkung von Acker- und Grünlandflächen, bei der Magnesium in Form von Magnesiumoxid oder Magnesiumcarbonat angewandt wird, um den Magnesiummangel des Bodens durch die Pflanzen wieder auszugleichen. Kalium wird in Form wasserlöslicher Kaliumsalze als Düngemittel verwendet, da Pflanzen das in Böden vorkommende Kalium, das überwiegend in silikatischer Form vorliegt, schlecht aufschließen können. Calcium-Mangel tritt in Ackerböden eher selten auf, falls notwendig wird z.B. mit Calciumcarbonat, -sulfat oder -nitrat gedüngt. Eine Calcium-Düngung kann auch zur Verbesserung des Bodengefüges erfolgen (Scheffer et al., 2010).

Die Kalium-Frachten im Niederschlag befinden sich zwischen 1985 und 2019 mit mehr oder weniger großen Schwankungen auf demselben Ni-

veau (Abbildung 30). Die Frachten der Bestandsmessstellen bewegen sich um einen Wert von ungefähr 23 kg Kalium/ha\*a, während die Frachten der Freilandmessstellen mit einem Mittelwert von 2,6 kg Kalium /ha\*a deutlich niedriger ausfallen (jeweils bezogen auf den Median).

Calcium, das im Jahr 1992 in das Untersuchungsprogramm aufgenommen wurde, weist anfangs in den Bestandsmessstellen recht hohe Frachten auf, die dann aber zurückgehen und sich seit 2015 um einen Wert unter 10 kg Calcium /ha\*a einpendeln. Die Calcium-Einträge der Freilandmessstellen lagen in den ersten Jahren des Beobachtungszeitraumes um 5 kg/ha\*a und bleiben seit 1996 auf einem Niveau von ca. 3 kg Calcium /ha\*a (bezogen auf die Median-Werte) (Abbildung 31).

Etwas geringere Kalium- und Calcium-Frachten wurden mit 1,2 kg K/ha\*a bzw. 1,8 kg Ca/ha\*a durchschnittlich an den 8 Freilandmessstellen in Schleswig-Holstein im Untersuchungszeitraum von 1985 bis 2005 ermittelt (LANU S.-H., 2010).

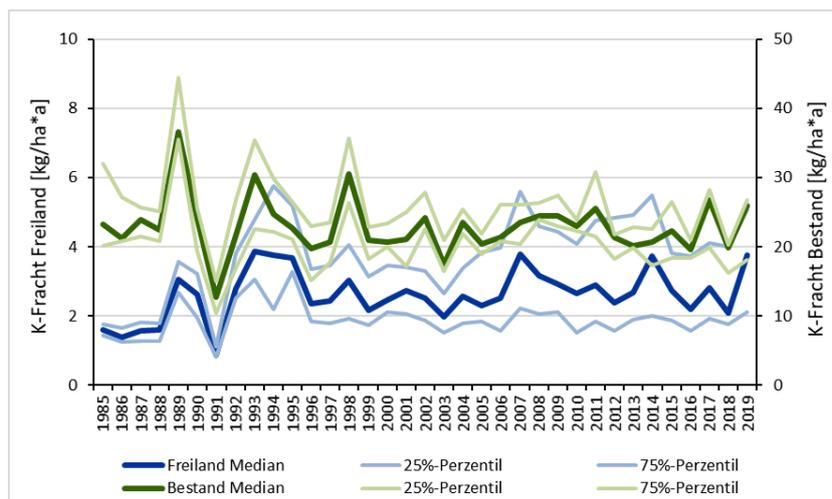


Abb. 30: Entwicklung der Kalium-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median, das 25 %- und 75 %-Perzentil.

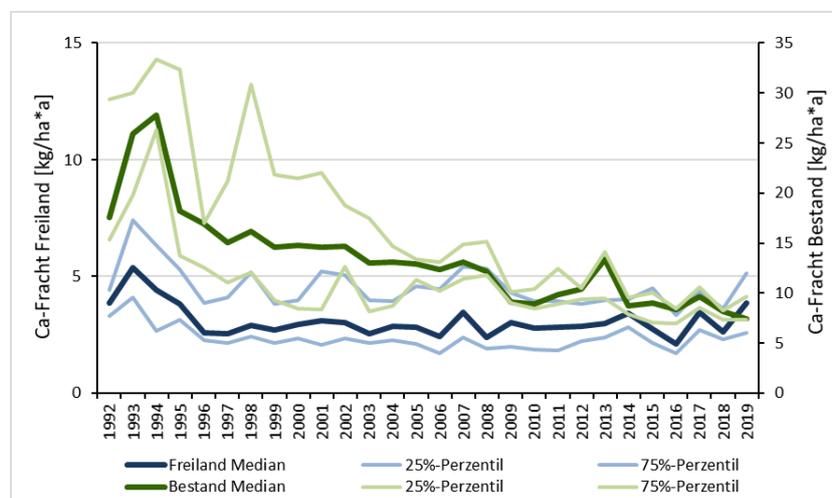


Abb. 31: Entwicklung der Calcium-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1992 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median, das 25 %- und 75 %-Perzentil.

**Fluorid** wird vor allem durch die Aluminiumproduktion, Steine- und Erdenindustrie, Müllverbrennungsanlagen sowie konventionelle Energiegewinnungsanlagen mit Kohle-, Erdöl- oder Erdgasverbrennung emittiert (Scheffer et al., 2010). Eine besondere Rolle spielt Fluor in den Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW), die als Kältemittel in Kühlschränken und Klimaanlage sowie als Lösemittel eingesetzt werden. Im Laufe der 1970er und 1980er Jahre stellt sich heraus, dass die Freisetzung von FCKW in die Atmosphäre in erheblichem Maße für den Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre („Ozonloch“) verantwortlich ist und daher wird ab 1987 begonnen, die Herstellung von FCKW zurückzufahren. Verwendungsbeschränkungen und -verbote für Halogenkohlenwasserstoffe regelt ab 1991 die FCKW-Halon-Verbots-Verordnung (FCKWHalon-VerbV, 1991). Heute ist der Einsatz von FCKW in

vielen Anwendungsbereichen verboten. Die Beschränkung des FCKW-Einsatzes kann besonders an den Fluorid-Frachten der Bestandsmessstellen nachvollzogen werden (Abbildung 32). Sie sind von ca. 2,5 auf 0,3 kg/ha\*a zurückgegangen. Auch in den Freilandmessstellen sind bis 1990 noch an fast allen Messstellen zurückgehende Fluorid-Frachten zu ermitteln, aber ab 1990 können deutlich weniger Frachten berechnet werden, da immer mehr Fluoridkonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze liegen. So fließen deutlich weniger Werte bzw. Messstellen in die Auswertung ein (siehe Anlage 1). Ab 2008 sind fast alle Jahresmittelwerte kleiner als die bestehende Bestimmungsgrenze. Eine Ausnahme bilden die Jahre 2017, 2018 und 2019, in denen es lediglich eine Messstelle mit Fluoridkonzentrationen gibt, die eine Frachtenberechnung zulassen. Es handelt sich um die

Messstelle Emden-Knock, die westlich von Emden direkt an der Ems liegt. Auf der gegenüberliegenden Flussseite, in den Niederlanden, befindet

et sich ein Industriegebiet, dessen Emissionen eventuell einen Einfluss auf die Depositionsmessstelle haben könnten.

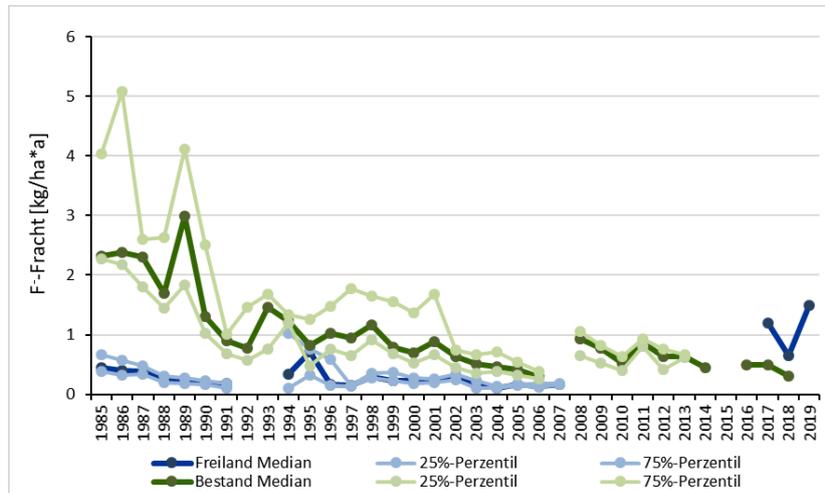


Abb. 32: Entwicklung der Fluorid-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median sowie das 25 %- und 75 %-Perzentil.

Chlorid, Natrium und Magnesium im Niederschlag sind in Küstennähe fast vollständig maritimen Ursprungs. Der Einfluss meerwasserhaltiger Aerosole ist auch bei der gemeinsamen Auswertung aller Freilandmessstellen noch deutlich. Die Frachten bewegen sich mit z.T. großen Schwankungen auf einem Niveau. Neben Magnesium sind Kalium und Calcium wichtige Pflanzennährstoffe, die durch Kalkung und Düngung in Land- und Forstwirtschaft zugeführt werden. Im Betrachtungszeitraum sind bei den Kalium-Frachten kaum Veränderungen zu beobachten, während die Calcium-Frachten leicht zurückgehen. Anthropogene Fluorid-Quellen sind vielfältig. Die Beschränkung des Einsatzes von Fluorkohlenwasserstoff FCKW seit Ende der 1980er Jahre hat zu einer Abnahme von Fluorid in den Niederschlagsfrachten geführt.

#### 4.1.7 Schwermetalle (Blei, Kupfer, Zink, Chrom, Nickel, Cadmium, Quecksilber)

Schwermetalle im Niederschlag sind zum größten Teil anthropogenen Ursprungs.

Die größte Quelle für Bleistäube in der Luft ist bis vor einigen Jahren die Verbrennung bleihaltiger Kraftstoffe in Automotoren gewesen. In Deutschland wurde im Jahr 1988 verbleites Benzin verboten, daher ist die Luftbelastung durch Blei in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen. Inzwischen sind die Hauptquellen für Bleiemissionen die bleierzeugende Industrie und die Kohleverbrennung.

Der Verkehrssektor setzt auch die größten Anteile von Kupfer und Zink frei. Die Kupfer-Emissionen folgen wie auch die von Zink im Wesentlichen der Entwicklung der Fahrleistungen im Verkehrsbereich, und beruhen auf dem Abrieb von Bremsen und Reifen. Weitere Kupferquellen sind Feuerungsanlagen und Produktionsprozesse (insbesondere Elektrostahlwerke); bei Zink trägt auch die Metallproduktion zu Emissionen bei. Hauptemittent von Cadmium, Quecksilber und Nickel ist in Deutschland die Energiewirtschaft. Diese Schwermetalle gelangen in erster Linie durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe in Kohlekraftwerken in die Atmosphäre. Eine weitere Quelle für Cadmium stellt die Metallverhüttung dar, während Quecksilber noch bei der Chlorproduktion, durch Zementwerke sowie durch Stahlerzeugung und die kleingewerbliche Goldgewinnung frei wird. Chrom wird ebenfalls durch die Stahlindustrie, die Verbrennung von Kohle aber auch durch den Autoverkehr in die Atmosphäre emittiert.

Um die Höhe der Schwermetall-Frachten im Niederschlag ansatzweise einordnen zu können, wird die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999) herangezogen. Im Anhang 2, Punkt 4.1 werden Vorsorgewerte für Metalle in Böden in Abhängigkeit von der Bodenart definiert. Bei Überschreitung dieser Vorsorgewerte, sind die dort unter Punkt 5 genannten zulässigen zusätzlichen jährlichen Frachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade zu berücksichtigen. Im vorliegenden Bericht wurden für die Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink auch deren zulässige zusätzliche jährliche Fracht herangezogen (Tabelle 4).

Tab. 4: Zulässige zusätzliche jährliche Frachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade nach § 8 Abs. 2 Nr. 2 des Bundes-Bodenschutzgesetzes.

Element	Zulässige zusätzliche jährliche Fracht [g/ha]
Blei	400
Cadmium	6
Chrom	300
Kupfer	360
Nickel	100
Quecksilber	1,5
Zink	1200

#### Schwermetallbelastung durch Blei-, Kupfer- und Zink-Frachten

Betrachtet man die Entwicklung der bundesweiten Emissionen von Blei, Kupfer und Zink ab 1990 ergibt sich das in Abbildung 33 dargestellte Bild, das auf Grundlage von Daten des UBA (2021b) erstellt wurde.

Beim Parameter **Blei** ist ein starker Rückgang der Emission zu beobachten. Zunächst nimmt die Freisetzung von Blei deutlich von 1915 t im Jahr 1990 bis auf ca. 417 t im Jahr 1997 ab. Seitdem ist die Emission zwar langsamer aber stetig rückläufig und liegt seit 2008 bei ca. 161 t. Das entspricht einem Rückgang von über 90 % im Betrachtungszeitraum. Bis Ende der 1980er Jahre gelangten durch den Straßenverkehr erhebliche Bleimengen durch bleihaltige Kraftstoffe in die Atmosphäre. Nach deren Verbot im Jahr 1988 kann in den 1990er Jahren ein sofortiger starker Rückgang bei den Blei-Emissionen verzeichnet werden.

Zwischen der bundesweiten Blei-Emission und den Blei-Frachten im Niederschlag niedersächsischer Messstellen ist, wie bei anderen Untersuchungsparametern auch, ein deutlicher Zusammenhang zu verzeichnen. In Abbildung 34 sind Depositionsfrachten von Freiland- und Bestandsmessstellen von 1985 bis 2019 den Emissionen, die ab 1990 erhoben wurden, gegenübergestellt. Der Kurvenverlauf der Blei-Frachten im Niederschlag folgt eindeutig dem der bundesweit rückläufigen Blei-Emission, wobei die Bestandsmessstellen insbesondere in den achtziger Jahren bis

Mitte der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts deutlich höhere Einträge als die Freilandmessstellen aufweisen. 1985 betrug der Median bei den Bestandsmessstellen 1,11 kg Pb/ha (basierend auf nur drei Werten) und überschritt damit die zulässige zusätzliche jährliche Fracht von 0,4 kg/ha\*a um ein Mehrfaches. Diese wird später nur noch einmal im Jahr 1988 vom 75 %-Perzentil der Bestandsmessstellen erreicht. Der höchste Blei-Eintrag im Freiland wird im Jahr 1985 gemessen und beträgt 0,11 kg/ha. Aktuell sind die Blei-Frachten der Freiland- und Bestandsmessstellen mit 0,0009 bzw. 0,004 kg/ha (2018) bzw. 0,002 und 0,007 kg/ha (2019) bezogen auf den Median sehr gering und liegen weit unter der zulässigen zusätzlichen jährlichen

Fracht. Dass die Blei-Belastung durch anthropogene Einflüsse immer weiter an Bedeutung verliert, wird auch am Beispiel von Daten der Messstation Waldhof, die unabhängig vom niedersächsischen Depositionsmessnetz, als Teil des bundesweiten Luftmessnetzes vom UBA betrieben wird, deutlich. Sie liegt im Osten der Lüneburger Heide und repräsentiert die Hintergrundbelastung des norddeutschen Flachlandes. Im Jahr 2018 betrug dort die Blei-Deposition 0,0023 kg/ha. Die durchschnittliche Blei-Fracht von insgesamt sechs vom UBA betriebenen Freilandmessstellen in Deutschland wird für das Jahr 2018 mit 0,003 kg/ha angegeben (UBA 2020e). Diese Einträge werden z.Zt. von den niedersächsischen Freilandmessstellen noch unterschritten.

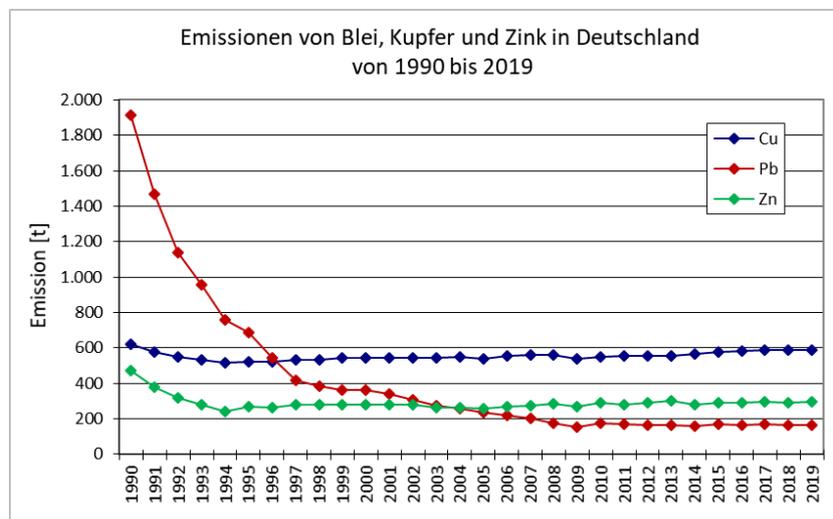


Abb. 33: Entwicklung der jährlichen Emissionen von Blei, Kupfer und Zink in Deutschland von 1990 bis 2019 (Datenquelle: UBA 2021b)

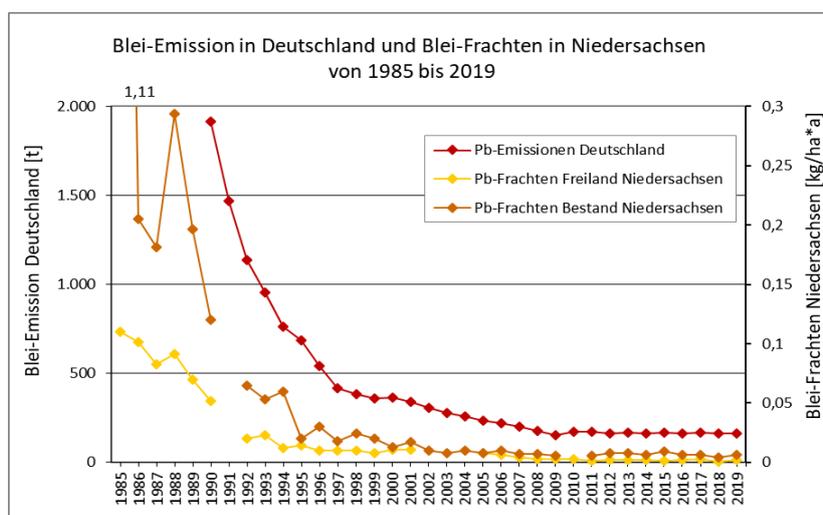


Abb. 34: Vergleich der bundesweiten Blei-Emission (Datenquelle: UBA 2021b) und Blei-Frachten im Niederschlag Niedersachsens (Mediane) im Zeitraum von 1990 bis 2019. Nicht berücksichtigt wird bei den Freilandmessstellen das Jahr 2002, da nur ein Einzelwert vorliegt (0,018 kg/ha\*a).

Die **Kupfer-** und **Zink-**Emissionen in Deutschland liegen im Zeitraum von 1990 bis 2019 jeweils auf ähnlichem Niveau (Abbildung 33). Die Kupfer-Emission beträgt jährlich etwa 550 t, wobei in den letzten Jahren ein leichter Anstieg zu verzeichnen ist. Die Zink-Emission liegt im Jahr 1990 zunächst bei 475 t, geht innerhalb von drei Jahren um mehr als 40 % zurück und bleibt dann relativ konstant bei einer Emission von 280 t. Die Niederschläge in Niedersachsen weisen insbesondere in Bestandsmessstellen große Schwankungen der Kuper- und Zink-Frachten auf. Im Gegensatz zu den bundesweiten Emissionen, bei denen der Ausstoß von Zink durchschnittlich um 50 % unter dem von Kupfer liegt, sind die Zink-Frachten im Regenwasser zehnfach höher als die von Kupfer (Abbildung 35). Untersuchungen der Forstlichen Versuchsanstalt Baden-Württemberg ergeben im Zeitraum von 1984 bis 2000 Zink-Einträge in ähnlicher Größenordnung wie die niedersächsischer Depositionsmessstellen im selben Zeitraum. Zink-Frachten von Freilandmessstellen liegen bei ca. 0,2 kg/ha\*a, die Bestandsmessstellen weisen - bis auf eine Messstelle mit lagebedingt deutlich höherer Frachten - Einträge bis zu 0,4 kg/ha\*a auf (Hug, R. et al. 2005). Ausgewertet wurden jeweils acht Freiland- und Bestandsmessstellen in Baden-Württemberg.

Auch die im Rahmen des Luftmessnetzes des UBA im Jahr 2018 am Beispiel von sechs Messstellen im Bundesgebiet ermittelten Niederschlagsdaten, weisen gegenüber Kupfer um ein Mehrfaches höhere Zink-Frachten auf (UBA 2020e). Die vom UBA erhobenen Zink-Einträge weisen mit durchschnittlich mit 0,03 kg/ha eine

ähnliche Größenordnung wie die in Niedersachsen ermittelten Frachten im Freiland auf, die im Jahr 2018 0,04 kg/ha und 2019 0,05 kg/ha betragen. Die Frachten im Bestand liegen bei 0,09 kg/ha (2018) bzw. 0,13 kg/ha (2019). Im Betrachtungszeitraum ist in den letzten Jahren insbesondere bei den Bestandsmessstellen ein deutlicher Rückgang der Zink-Frachten festzustellen. Die Kupfer-Einträge bewegen sich unter großen Schwankungen auf ähnlichem Niveau. Die im Jahr 2018 im Rahmen des Luftmessnetzes vom UBA erhobenen Kupfer-Einträge für Deutschland liegen bei 0,005 kg/ha (UBA 2020e). Die Frachten niedersächsischer Freilandmessstellen befinden sich mit 0,008 kg/ha (2018) und 0,009 kg/ha (2019) in einem ähnlichen Bereich. Im Bestand werden in beiden Jahren 0.03 kg Cu/ha gemessen. Wie zu erwarten, liegen die Zink- und Kupfer-Frachten der Bestandsmessstellen über denen der Freilandmessstellen. Beim Parameter Zink bilden die Jahre 2009 und 2010 eine Ausnahme: hier sind die Einträge im Bestand kleiner als im Freiland.

Legt man die zulässigen zusätzlichen jährlichen Frachten an Schadstoffen zugrunde, die in der BBodSchV genannt sind, zeigt sich, dass die Kupfer-Frachten in Niedersachsen insgesamt alle weit unter dem festgelegten Wert von 0,36 kg Cu/ha\*a liegen. Auch die Zink-Frachten im Niederschlag erreichen größtenteils den Wert von 1,2 kg Zn/ha\*a nicht. Lediglich das 75 %-Perzentil der Bestandsmessstellen liegt im Jahr 1986 mit 1,7 kg/ha\*a über und in den Jahren 1985, 1988, 1992 und 1994 im Bereich der zulässigen zusätzlichen jährlichen Fracht.

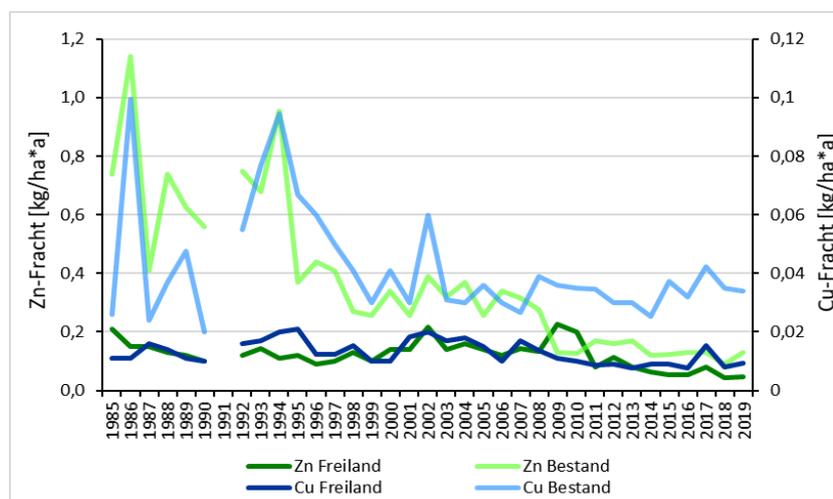


Abb.35: Entwicklung der Kupfer- und Zink-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.

### Schwermetallbelastung durch Chrom- und Nickel-Frachten

Bei den Schwermetallen **Chrom** und **Nickel** gleichen sich die Entwicklungen der Emissionen in Deutschland im Zeitraum von 1990 bis 2019 (UBA, 2021b). Zunächst sind die Emissionen rückläufig, um sich dann auf einem Niveau zu halten, wobei Nickel im Verlauf deutliche Schwankungen aufweist (Abb. 36).

Die Chrom-Emission ist in den Jahren von 1990 bis 1996 von ca. 166 t auf ca. 87 t zunächst

deutlich zurückgegangen, dann erfolgt bis 2018 langsam eine stetige Abnahme auf 71 t. Insgesamt ist die Emission damit im Betrachtungszeitraum um ca. 57 % gesunken. Die Nickel-Emission geht um ca. 59 % zurück. Sie nimmt ähnlich der Emission von Chrom von 1990 bis 1996 zunächst deutlich von ca. 340 t auf ca. 195 t ab. Mit mehreren Schwankungen im Verlauf der Jahre erreicht die Nickel-Emission 2019 einen Wert von 139 kg/ha\*a.

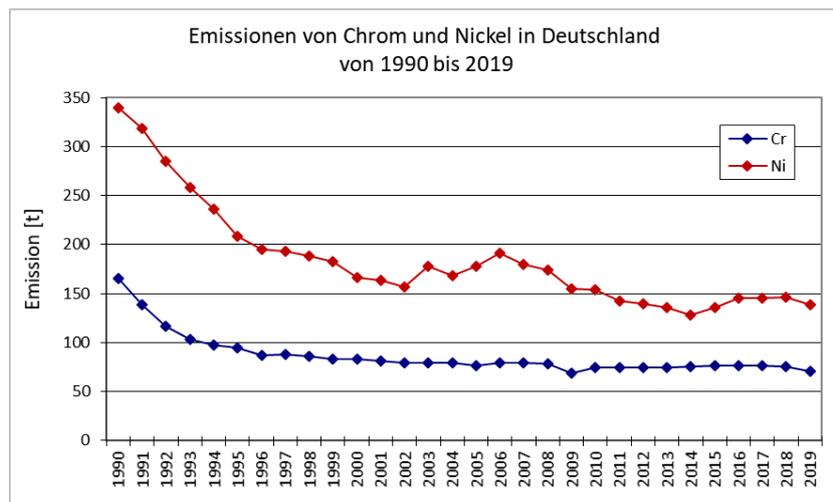


Abb.36: Entwicklung der jährlichen Emissionen von Chrom und Nickel in Deutschland von 1990 bis 2019 (Datenquelle: UBA 2021b).

Chrom und Nickel wurden in Niedersachsen im Jahr 1992 in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Aus verschiedenen Gründen liegen dennoch nicht in jedem Jahr Frachten vor, da Schwermetallfrachten nicht berechnet werden können, wenn zu wenig Monatswerte vorhanden sind oder wenn zu viele Monatswerte unter der Bestimmungsgrenze liegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Bestimmungsgrenzen im Laufe der Jahre immer weiter hin zu geringeren Konzentrationen verschieben, d.h. Konzentrationen, die aktuell gemessen werden, lagen beispielsweise in den 1980er Jahren noch unter der Bestimmungsgrenze, und traten als Messwert gar nicht in Erscheinung. Daher werden hier beim Parameter Chrom erst ab 2005 Frachtenberechnungen vorgenommen.

Sowohl die Chrom- als auch die Nickel-Frachten im Niederschlag sind sehr gering und liegen weit

unterhalb der zulässigen zusätzlichen jährlichen Fracht, die bei Chrom 0,3 und bei Nickel 0,1 kg/ha\*a beträgt (Abbildung 37). Während sich die Chrom-Frachten der Freilandmessstellen seit 2011 unter oder bei 0,001 kg/ha\*a bewegen, sind die Frachten der Bestandsmessstellen größeren Schwankungen unterworfen und weisen 2019 ca. 0,0016 kg/ha\*a auf.

Bei der Höhe der Nickel-Frachten sind keine deutlichen Unterschiede zwischen Freiland- und Bestandsmessstellen zu erkennen, wobei die Freilandmessstellen etwas weiter streuen. Generell liegen alle Frachten ab 2005 bei oder unter 0,015 kg Ni/ha\*a.

Die vom UBA deutschlandweit erhobenen Daten an sechs Depositionsmessstellen weisen 2018 mit durchschnittlich 0,0006 kg Cr/ha und 0,0013 kg Ni/ha noch niedrigere Werte auf (UBA 2020e).

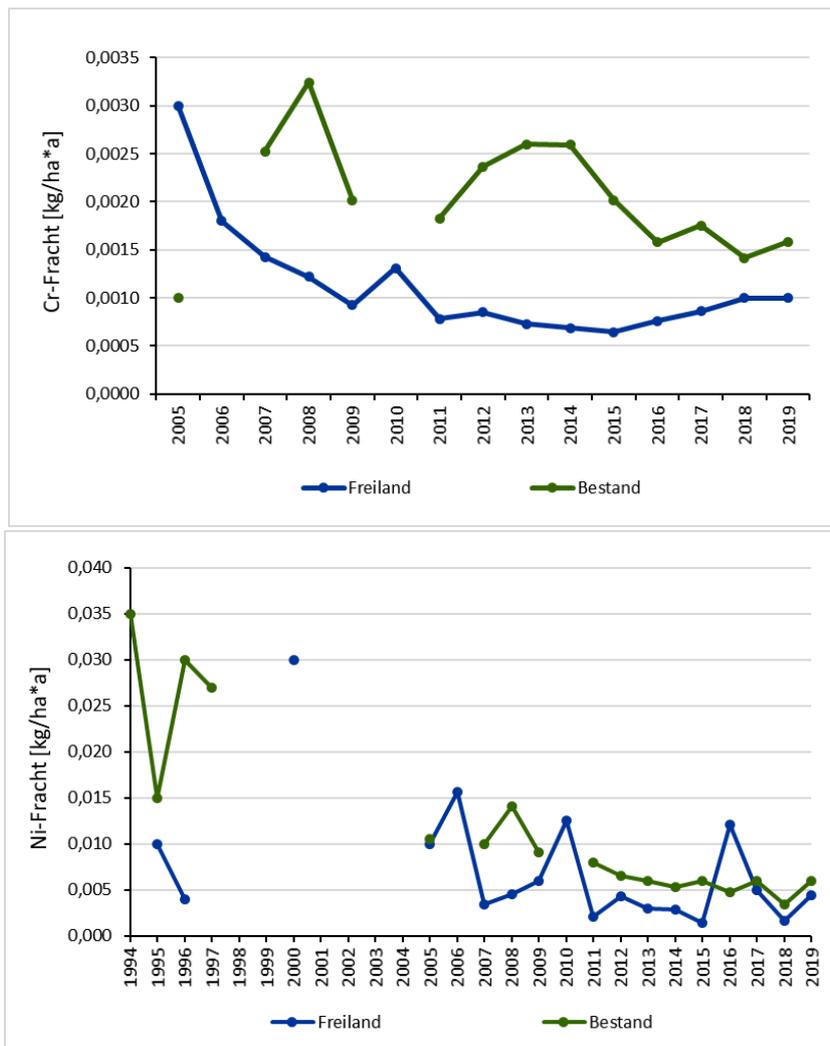


Abb. 37: Entwicklung der Chrom- und Nickel-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 2005 bzw. 1994 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.

### Schwermetallbelastung durch Cadmium- und Quecksilber-Frachten

Die Entwicklung der Cadmium- und Quecksilber-Emissionen in Deutschland ist in Abbildung 38 dargestellt. Die Emission beider Schwermetalle ist zwischen 1990 und 2019 rückläufig. Bei Quecksilber ist der Rückgang größer und kontinuierlicher, während die Cadmium-Emission auch Zeiträume aufweist, in denen sie auf einem Niveau stagniert. Von 1990 bis 1996 erfolgt zunächst ein deutlicher Rückgang der Emissionen von ca. 30 t bei Cadmium und ca. 36 t bei Quecksilber auf jeweils ca. 20 t, entsprechend

ungefähr 35 % bzw. 43 %. Danach gehen die Emissionen langsam mit leichten Schwankungen weiter zurück, bis sie im Jahr 2019 10,8 t Cd/ha\*a und 7,2 t Hg/ha\*a erreichen. Im Betrachtungszeitraum haben sich die Emissionen von Cadmium um ca. 63 % und von Quecksilber um ca. 80 % verringert. In Niedersachsen wird Cadmium bereits seit 1985 im Niederschlag untersucht, während die Aufnahme von Quecksilber in das Untersuchungsprogramm im Jahr 1992 erfolgte. Abbildung 39 stellt die Niederschlagsfrachten dieser beiden Parameter im Beobachtungszeitraum dar.

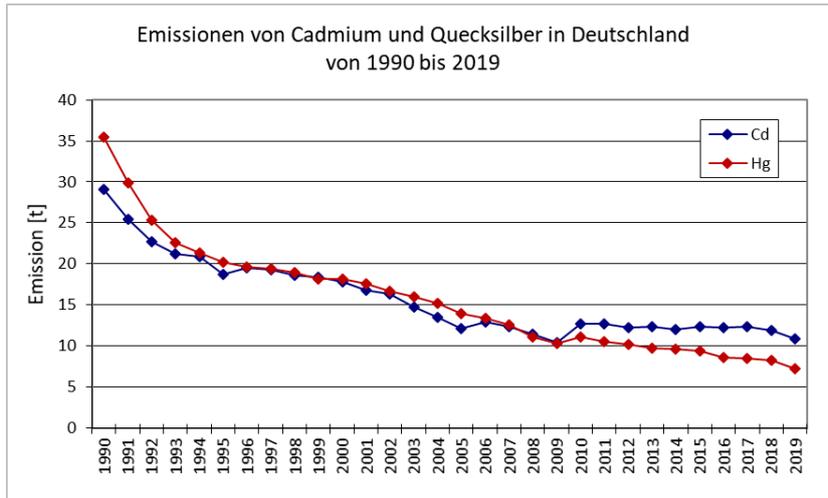


Abb. 38: Entwicklung der jährlichen Emissionen von Cadmium und Quecksilber in Deutschland von 1990 bis 2019 (Datenquelle: UBA 2021b).

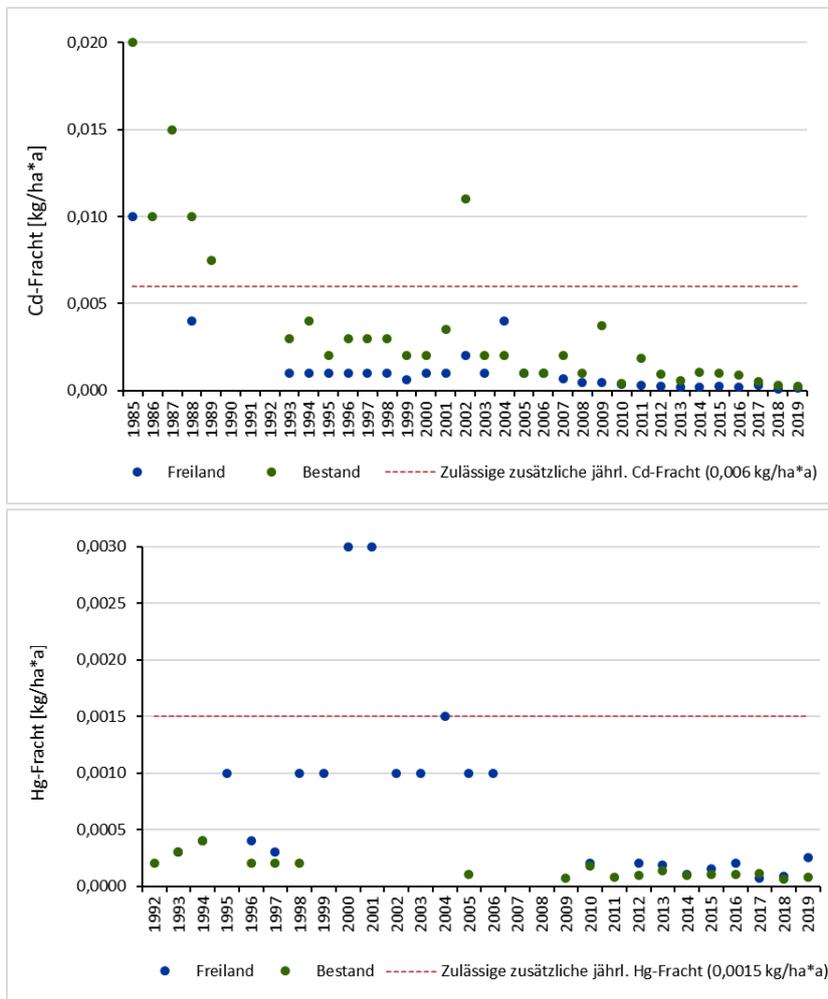


Abb.39: Entwicklung der Cadmium- und Quecksilber-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen im Zeitraum von 1985 bzw. 1992 bis 2019. Dargestellt ist jeweils der Median.

Die **Cadmium**-Frachten in Niedersachsen sind seit Jahren sehr gering. In der Anfangszeit der Untersuchung von 1985 bis 1989 überschreiten die Frachten aller Bestandsmessstellen den Wert der zulässigen zusätzlichen jährlichen Fracht gemäß BBSchV von 0,006 g/ha\*a. Der höchste Eintrag beträgt 0,02 kg Cd/ha\*a im Jahr 1985. Die höchste Cadmium-Fracht im Freiland tritt mit 0,01 kg/ha\*a ebenfalls 1985 auf. Seit 1993 sind alle Einträge geringer als 0,004 kg/ha\*a. Die Frachten der Freilandmessstellen liegen ab 2010 im Durchschnitt bei 0,0002 kg Cd/ha\*a. In den Jahren 2018 und 2019 wurden lediglich durchschnittlich 0,0001 kg Cd/kg\*a eingetragen. Dies entspricht den Depositionssummen, die durch das UBA im Jahr 2018 an sechs Messstellen in Deutschland erhoben wurden und ebenfalls durchschnittlich 0,0001 kg/ha betragen (UBA 2020e). Die Frachten der Bestandsmessstellen sind mit einem Durchschnittswert von 0,0008 kg Cd/ha\*a ab 2010 ebenfalls niedrig. In den Jahren 2018 und 2019 erreichen die Einträge im Bestand lediglich noch Werte von 0,0003 kg/ha. Eine Ausnahme bilden die Jahre 2002 (Freiland: 0,002 kg/ha und Bestand: 0,011 kg/ha) sowie 2004 (Freiland: 0,004 kg/a) mit deutlich höheren Frachten. Diese Cadmium-Einträge sind regional begrenzt, denn sie lassen sich auf wenige Messstellen zurückführen. Über die Ursache dieser hohen Werte liegen keine Erkenntnisse vor. Die Frachten der Bestandsmessstellen sind größtenteils höher als die der Freilandmessstellen. Tendenziell sind insbesondere bei den Freilandmessstellen in den letzten 10 Jahren gleichbleibend niedrige Cadmiumfrachten zu beobachten und es lässt sich damit eine Analogie zur Emissionssituation ziehen. Aufgrund der geringen Messstellen- und damit Frachtenanzahl ist die Streubreite bei den Bestandsmessstellen größer (Anlage 1 im Anhang).

**Quecksilber** ist 1992 in das Untersuchungsprogramm aufgenommen worden. Bei der Probenahme in offenen Sammelsystemen sind bestimmte Eigenschaften von Quecksilber, wie z. B. seine Leichtflüchtigkeit und deren Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen. Bei Quecksilber ist die Anzahl der Frachten gering, da die meisten Monatskonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze liegen, so dass eine Frachtenberechnung nicht erfolgen kann. Bei den Bestandsmessstellen gibt es oft nur einen einzigen Wert. Die Quecksilber-Frachten sind ab

2009 niedriger als in den Jahren davor und bewegen sich sowohl bei den Freiland- als auch bei den Bestandsmessstellen in einem Bereich bis zu 0,0002 kg Hg/kg\*a. Die Quecksilber-Deposition, die vom UBA 2018 an 5 Messstellen im Rahmen des Luftmessnetzes in Deutschland erhoben wurde, beträgt im Durchschnitt 0,00004 kg/ha (UBA 2020e). In Niedersachsen liegen die Frachten im selben Jahr bei 0,00009 kg/ha (Freiland und 0,00006 kg/a (Bestand)). 2019 werden 0,0003 kg/a im Freiland und 0,00008 kg/ha im Bestand ermittelt. Interessant ist, dass die Freilandmessstellen bis auf wenige Ausnahmen höhere Frachten als die Bestandsmessstellen aufweisen und erreichen bzw. überschreiten in den Jahren 2000, 2001 und 2004 sogar den Wert von 0,0015 kg Hg/ha\*a für die zulässige zusätzliche jährliche Fracht. Ein wichtiger Faktor hierbei ist neben der Lage der Messstellen auch die Verteilung der Einträge innerhalb der Messstellen. Bei den Freilandmessstellen beeinflussen nur wenige Messstellen mit relativ hohen Quecksilber-Frachten die Gesamtfracht. Diese liegen alle in einer Region, in der sich aber keine Bestandsmessstelle befindet (siehe Kapitel 4.2.2).

### **Schwermetallkonzentrationen im Niederschlag**

Die vorliegenden Schwermetallfrachten wurden zunächst über die zulässige zusätzliche jährliche Fracht einer ersten Bewertung unterzogen. Da viele Schwermetallkonzentrationen allerdings unter der Bestimmungsgrenze (BG) liegen und damit eine Frachtenberechnung oft nicht möglich ist, werden im Folgenden messstellenbezogene Jahresmittelwerte (JMW) der Schwermetallkonzentrationen ausgewertet. Datengrundlage für diese Auswertungen sind alle im Zeitraum 1985 bis 2019 an allen Messstellen in Niedersachsen ermittelten Schwermetallkonzentrationen. Bewertungsgrundlagen für die Beurteilung von Schwermetallkonzentrationen in Niederschlagswässern stehen bisher nicht zur Verfügung. Daher wird auf entsprechende Veröffentlichungen aus dem Bereich Grundwasser zurückgegriffen. Die Schwellenwerte, die zur Bewertung der Niederschläge herangezogen werden, sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die Bewertung für Blei, Cadmium und Quecksilber erfolgt anhand der Schwellenwerte der Grundwasserverordnung (GRWV, 2010). Für Kupfer, Zink, Chrom und Nickel sieht die Grundwasserverordnung keine Schwellenwerte (SW) vor. Hier werden die von

der LAWA veröffentlichten Geringfügigkeits-schwellenwerte (LAWA, 2017) als SW herangezogen. Zum Vergleich sind die entsprechenden Grenzwerte der Trinkwasserverordnung aufgeführt.

Tab. 5: Qualitätsnormen ausgewählter Parameter für Grund- und Trinkwasser (die zur Bewertung herangezogenen Werte sind hervorgehoben).

Parameter [µg/l]	Schwellenwert GrwV 2010	Geringfügigkeits-schwelle LAWA 2016	Grenzwert TrinkwV 2016
Zink		<b>60</b>	
Blei	<b>10</b>	1,2	10
Kupfer		<b>5,4</b>	2000
Cadmium	<b>0,5</b>	0,3	3
Nickel		<b>7</b>	20
Chrom		<b>3,4</b>	50
Quecksilber	<b>0,2</b>	0,1	1

Ausgewertet werden die Jahresmittelwerte aller Schwermetallkonzentrationen von Freiland- und Bestandsmessstellen unter Berücksichtigung von BG und SW. Nicht in die Auswertung mit eingegangen sind Werte unter der BG, wenn die BG größer als der SW ist oder wenn BG und SW gleich sind. Dies tritt insbesondere in den weiter zurückliegenden Jahren in Abhängigkeit von der Analysenmethode auf. Beispielsweise liegt die Bestimmungsgrenze für Cadmium im Jahr 1987 methodisch bedingt bei 1 µg/l. Der SW der GRWV beträgt 0,5 µg/l. Ein Wert <1 µg wird daher bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Gerade in den Anfangsjahren werden für einen Parameter verschiedene Bestimmungsgrenzen angegeben. In diesen Fällen wird die mit dem höchsten Wert gewählt. Messwerte, die unter

dem Wert der BG liegen, werden als <BG gewertet.

Ändert sich die Bestimmungsgrenze von einem Jahr zum darauffolgenden, kann dies Sprünge in der Zuordnung zu den Konzentrationsklassen nach sich ziehen. Dies ist beim Parameter Cadmium zu beobachten: Im Jahr 1991 liegt die BG bei 1 µg/l, mit der Folge, dass alle Jahresmittelwerte über dem Schwellenwert von 0,5 µg/l einzuordnen sind. 1992 sinkt die BG auf 0,1 µg/l und dementsprechend weisen die Messstellen Werte in allen Konzentrationsklassen auf, ohne dass dies zwangsläufig mit rückläufigen Konzentrationen im Niederschlag einhergehen muss. Dennoch lassen sich in den Abbildungen 40 und 41 einige Zusammenhänge sofort erkennen. Freilandmessstellen weisen geringere Schwermetallkonzentrationen auf und gegenüber den Bestandsmessstellen überwiegen die blauen Bereiche mit Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze. Im Beobachtungszeitraum spielen Konzentrationen, die den jeweiligen Schwellenwert erreichen oder überschreiten (rote Bereiche), eine immer geringere Rolle. Eine Ausnahme bildet Kupfer. In fast allen Bestandsmessstellen kann Kupfer nachgewiesen werden und durchschnittlich 60 % der Jahresmittelwerte überschreiten jährlich die Geringfügigkeits-schwelle von 5,4 µg/l. Auch bei den Freilandmessstellen liegt ein geringer Prozentsatz der Jahresmittelwerte regelmäßig über diesem Wert. Verglichen mit dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung, der 2000 µg Cu/l beträgt, nimmt sich dieser Schwellenwert aber extrem niedrig aus.

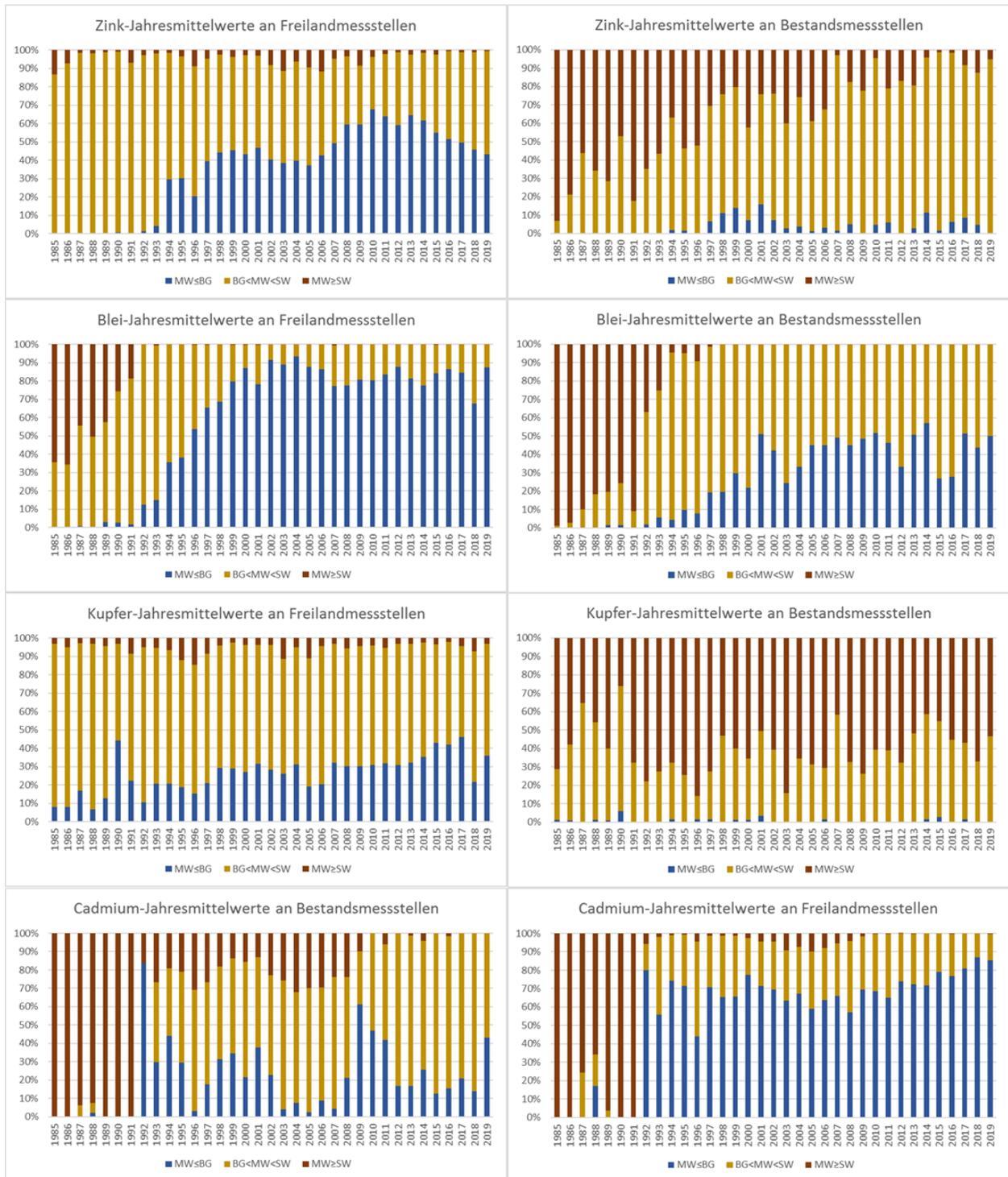


Abb. 40: Zink-, Blei-, Kupfer- und Cadmium-Konzentrationen (Jahresmittelwerte) von Freiland- und Bestandsmessstellen, bezeichnet als Messwert (MW) unter Berücksichtigung von Bestimmungsgrenze (BG) und Schwellenwert (SW).



Abb. 41: Nickel-, Chrom- und Quecksilber-Konzentrationen (Jahresmittelwerte) von Freiland- und Bestandsmessstellen, bezeichnet als Messwert (MW) unter Berücksichtigung von Bestimmungsgrenze (BG) und Schwellenwert (SW).

Die aktuelle Belastung der Niederschläge mit Schwermetallen geben die Untersuchungen des Jahres 2019 wieder (Abbildung 42). Die Konzentrationen der untersuchten Schwermetalle sind in den Freilandmessstellen äußerst gering. Bei den Parametern Blei, Chrom, Nickel und Cadmium liegen keine Jahresmittelwerte über den jeweiligen Schwellenwerten. Den Schwellenwert überschreiten bei Kupfer 3 % und bei Zink und Quecksilber nur ca. 1 % der Werte. Außer bei Kupfer und Zink weisen 79 % bis 89 % der Schwermetalle Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze auf, entsprechend sind Messwerte zwischen der Bestimmungsgrenze und dem Schwellenwert bei unter 21 % der Jahresmittelwerte aufgetreten. Dagegen liegen 36 % der Kupfer- und 43 % der Zink-Konzentrationen

zwischen Bestimmungsgrenze und Schwellenwert. Die Bestandsmessstellen weisen im Vergleich mit den Freilandstandorten weniger Messwerte unter der Bestimmungsgrenze auf und dafür einen höheren Prozentsatz in der Konzentrationsklasse zwischen Bestimmungsgrenze und Schwellenwert.

Die Schwermetalle Kupfer, Zink, Chrom und Quecksilber sind auch in Konzentrationen, die über dem jeweiligen Schwellenwert liegen, zu finden. Kupfer ist auffällig, da 67 % der Werte über dem Schwellenwert liegen. Die Geringfügigkeitschwelle der LAWA für Kupfer ist mit 5,4 µg/l verglichen mit dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 2000 µg/l allerdings auch extrem niedrig.

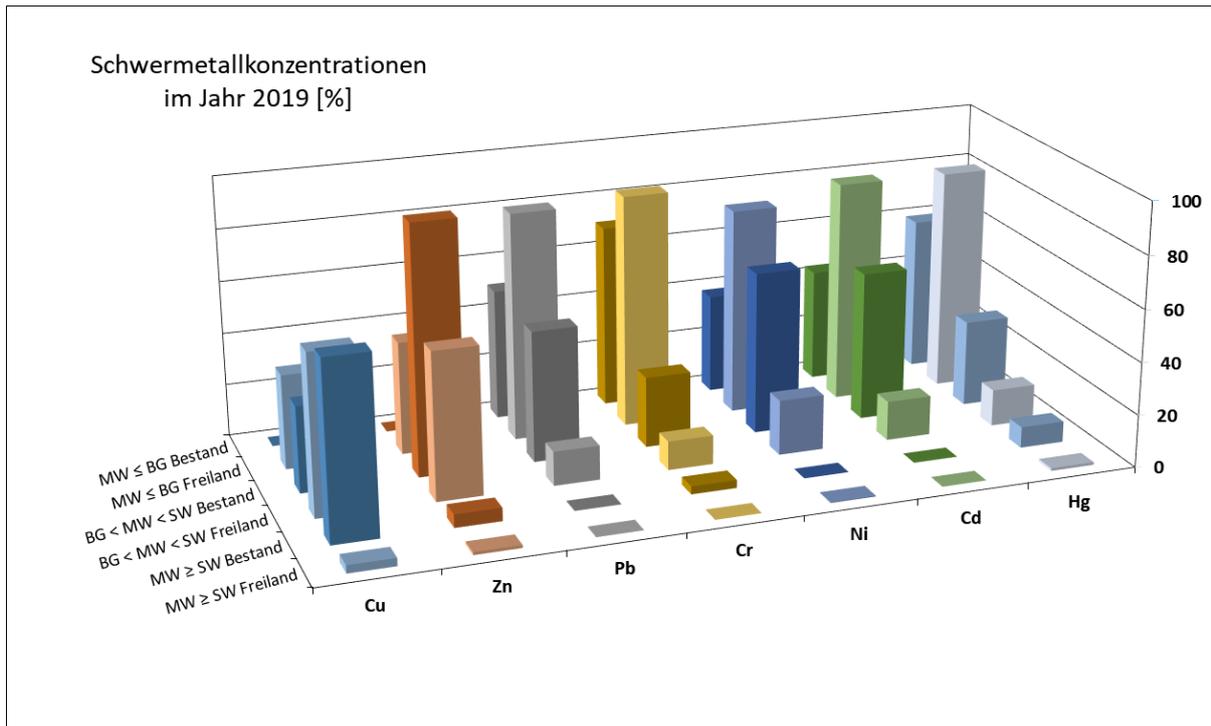


Abb.42: Prozentuale Darstellung der Schwermetall-Konzentrationen (Jahresmittelwerte) bezeichnet als Messwert (MW) im Jahr 2019 unter Berücksichtigung von Bestimmungsgrenze (BG) und Schwellenwert (SW). Die Bestandsmessstellen sind gegenüber den Freilandmessstellen dunkler dargestellt.

Schwermetalle sind größtenteils anthropogener Herkunft und gelangen über Emissionen in die Luft und damit in den Niederschlag. In den letzten 30 Jahren sind die deutschlandweiten Emissionen der hier betrachteten Schwermetalle Blei, Kupfer, Zink, Chrom, Nickel, Cadmium und Quecksilber durch Maßnahmen bei Energiegewinnung und Industrieprozessen z.T. stark zurückgegangen oder zumindest auf einem ähnlichen Niveau geblieben. Diese Entwicklung spiegeln die Frachten im Niederschlag niedersächsischer Messstellen wider. Besonders eindrucksvoll ist der Rückgang der Blei-Emission durch das Verbot bleihaltiger Kraftstoffe im Jahr 1988, was sofort zu einer ebenfalls deutlich geringeren Blei-Fracht der Depositionsmessstellen führte.

Generell sind die Schwermetall-Frachten der Niederschläge im Betrachtungszeitraum als gering einzustufen. Sie liegen bei Blei, Kupfer, Chrom und Nickel weit unter der zulässigen zusätzlichen Fracht, die in der BBodSchV von 1999 genannt wird, wenn Vorsorgewerte für Metalle in Böden überschritten werden. Bei Zink, Cadmium und Quecksilber ist dies in den letzten 15 Jahren ebenso der Fall, davor erreichen einzelne Jahresfrachten die zulässige zusätzliche Fracht bzw. überschreiten sie.

Oft liegen die Schwermetallkonzentrationen allerdings unter der Bestimmungsgrenze und daher kann in vielen Fällen keine Frachtenberechnung erfolgen. Da Bewertungsgrundlagen für Schwermetall-Konzentrationen im Niederschlagswasser nicht zur Verfügung stehen, wurde ein Abgleich mit Qualitätsnormen für Grund- und Trinkwasser vorgenommen. Im Untersuchungszeitraum erreichen oder überschreiten immer weniger Jahresmittelwerte, mit Ausnahme der Kupferwerte, den jeweiligen Schwellenwert.

#### 4.1.8 Umweltindikator B5 "Säure- und Stickstoffeintrag"

Der Umweltindikator B5 „Säure- und Stickstoffeintrag“ ist einer der von der Länderinitiative Kernindikatoren erarbeiteten umweltspezifischen Nachhaltigkeitsindikatoren (siehe Kapitel 3.5). Dieser berücksichtigt Säure- und Stickstoffeinträge aus der Atmosphäre durch nasse Deposition auf Freiflächen im Wald und gibt aufgrund der Charakteristik der ausgewerteten Messstationen die Hintergrundbelastung durch diese Einträge wieder. Dabei werden Daten aus dem forstlichen Umweltmonitoring verwendet, die das Thünen-Institut für Waldökosysteme an eigenen Messstationen in allen Bundesländern ermittelt. Es handelt sich dabei um Freilandmessstellen im Wald. Um den Umweltindikator B5 für Deutschland zu erhalten, werden die Daten aller Bundesländer gemittelt. Die Daten aus Freilandmessstellen der Depositionsmessnetze, die einzelne

Bundesländer betreiben, fließen z.Zt. nicht in die Berechnung des Umweltindikators B5 ein. Weitere Informationen sind auf der Website der deutschen Länderinitiative Kernindikatoren (LIKI) zu finden.

Wertet man die Frachten aller vom NLWKN betriebenen Freilandmessstellen in Anlehnung an den Umweltindikator B5 aus, ergibt sich das in Abbildung 43 dargestellte Bild. Der Säureeintrag, der die Parameter Sulfatschwefel, Nitrat- und Ammoniumstickstoff berücksichtigt, geht um etwa ein Drittel zurück und auch beim Stickstoffeintrag ist ein - wenn auch weniger ausgeprägter - Rückgang im Betrachtungszeitraum zu verzeichnen. Allerdings zeigen die letzten Jahre eher ein Verbleiben der Frachten auf gleichbleibenden Niveau.

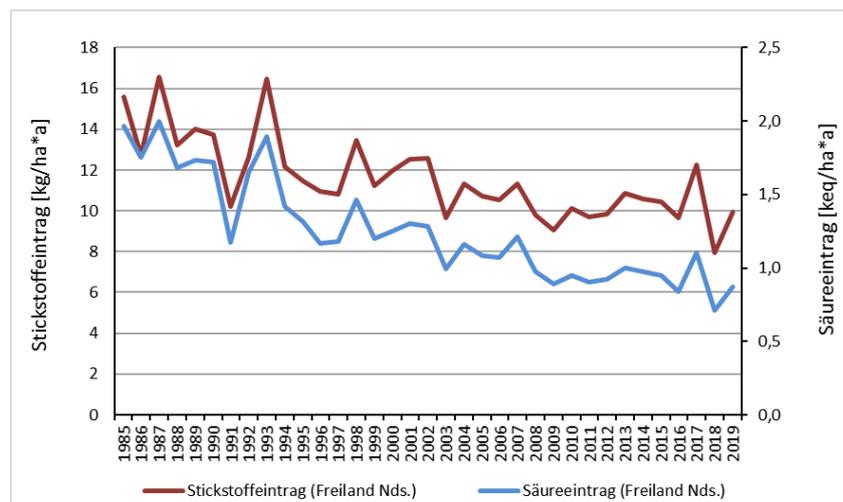


Abb. 43: Säure- und Stickstoffeinträge (beruhend auf Medianwerten) an Freilandmessstellen in Anlehnung an den Umweltindikator B5.

Werden die Frachten der niedersächsischen Freilandmessstellen den Einträgen der Freiflächen im Forst in Niedersachsen (Umweltindikator 5) und in Deutschland (Umweltindikator 5) gegenübergestellt, ergeben sich für den Säureeintrag (Abbildung 44) und den Stickstoffeintrag (Abbildung 45) folgende Aussagen:

Wie die Freilandmessstellen weisen auch die Umweltindikatoren B5 Säureeintrag und B5 Stickstoffeintrag, die für den Zeitraum von 1994 bis 2018 vorliegen, sowohl in Niedersachsen als auch bundesweit rückläufige Tendenzen auf. Der

Säure- und der Stickstoffeintrag der Freilandmessstellen des Depositionsmessnetzes ist zunächst geringer als der der forstlichen Freiflächen im Wald (B5). Ab 2004 (Säureeintrag) bzw. 2007 (Stickstoffeintrag) weisen sie dann höhere Frachten als die forstlichen Messstellen auf. Generell sind die Einträge in Niedersachsen höher als im bundesweiten Durchschnitt. Lediglich in den Jahren 1994, 1995, 1996, 1997 und 2009 liegen die Stickstoff-Frachten in niedersächsischen Freilandmessstellen unter oder nahe an den für Deutschland (B5) ermittelten Einträgen.

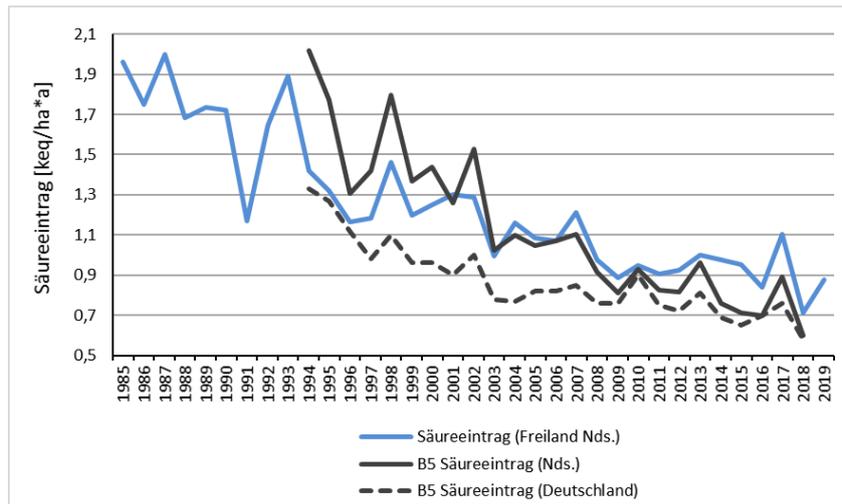


Abb. 44: Vergleich von Säureeintrag in Niedersachsen (in Anlehnung an den Umweltindikator B5), Umweltindikator B5 Niedersachsen und Umweltindikator B5 Deutschland.

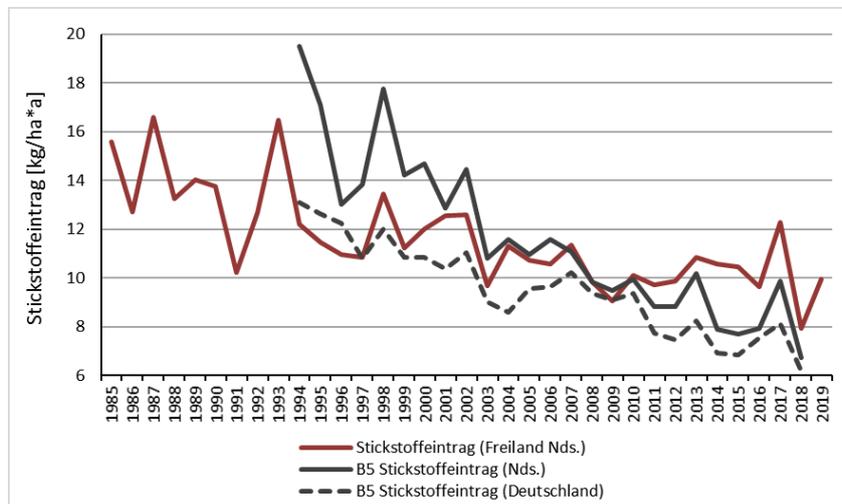


Abb. 45: Vergleich von Stickstoffeintrag in Niedersachsen (in Anlehnung an den Umweltindikator B5), Umweltindikator B5 Niedersachsen und Umweltindikator B5 Deutschland.

In die Berechnung des Umweltindikators Stickstoffeintrag gehen die Parameter Nitrat- und Ammoniumstickstoff ein, der Umweltindikator Säureeintrag berücksichtigt zusätzlich den Parameter Sulfatschwefel. Wie sich die Frachten in den vom NLWKN betriebenen Freilandmessstellen seit 1985 entwickelt haben, stellt Abbildung 46 dar. Nitratstickstoff- und Sulfatschwefel-Frachten zeigen mit Schwankungen eine abnehmende Tendenz, während die Ammoniumstickstoff-Frachten seit Anfang der 1990er Jahre eher auf einem Niveau verharren. Da Ammonium im Niederschlag fast ausschließlich aus Ammonium stammt, das als Folge intensiver Tierhaltung freigesetzt wird, deutet dies auf einen unverminderten landwirtschaftlichen Einfluss hin, der sowohl beim Umweltindikator Stickstoffeintrag als auch etwas weniger deutlich beim Säureeintrag wahrzunehmen

ist. Die deutschlandweiten Säure- und Stickstoffeinträge liegen bis auf wenige Ausnahmen unter denen in Niedersachsen. Sicher spielt auch hier eine Rolle, dass in Niedersachsen mit seinen intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen und Veredelungsbetrieben die Ammoniumstickstoff-Fracht höher als in anderen Teilen Deutschlands ist (Abbildung 47). Die Viehdichte ist im Nordwesten Deutschlands am höchsten. In Niedersachsen liegt neben Nordrhein-Westfalen das Zentrum der Schweine- und Geflügelhaltung. Rinderhaltung wird schwerpunktmäßig ebenfalls in Niedersachsen, aber auch in Schleswig-Holstein und Bayern betrieben (Deblitz, C. et al., 2021). In Niedersachsen selbst zeigen die Einträge von Ammonium-Stickstoff durch den Niederschlag regionale Unterschiede (siehe Kapitel 4.2.2).

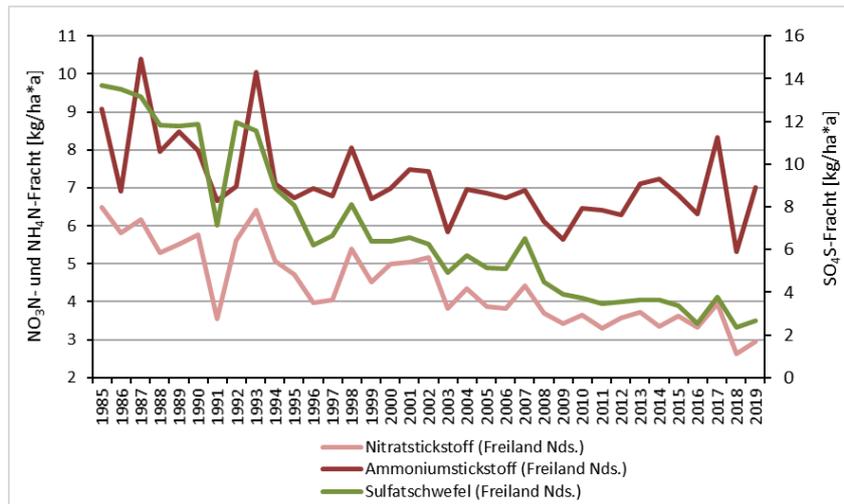


Abb. 46: Nitratstickstoff-, Ammoniumstickstoff- und Sulfatschwefel-Frachten in niedersächsischen Freilandmessstellen; diese Parameter gehen in die Berechnung des Umweltindikators B5 ein.

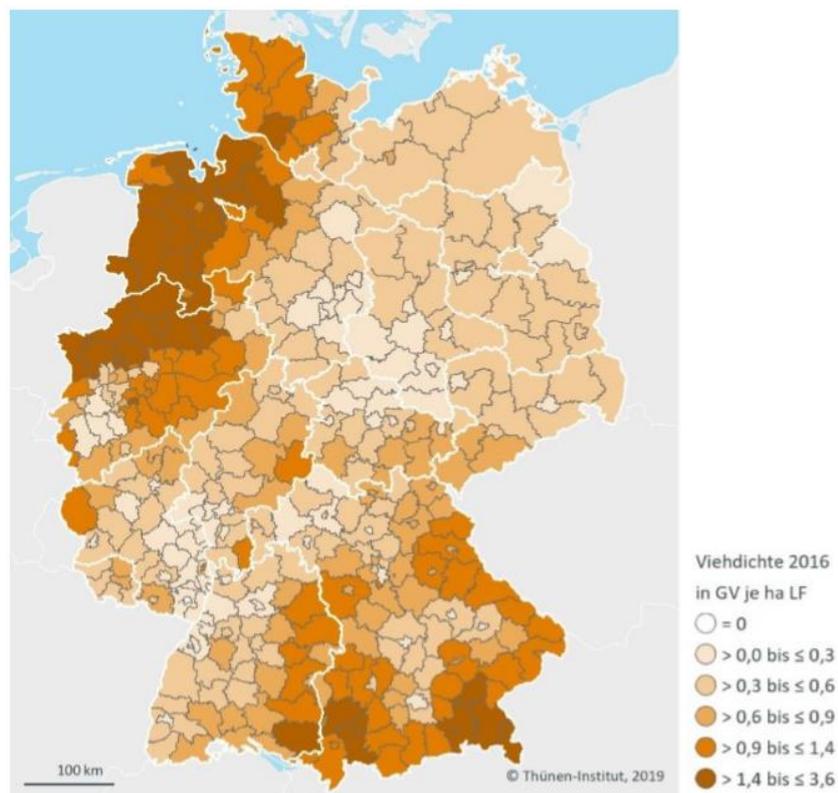


Abb. 47: Regionale Viehdichte 2016 (Deblitz, C. et al., 2021)

Der Umweltindikator B5 „Säure- und Stickstoffeintrag“ gibt die Hintergrundbelastung auf Freiflächen im Wald an und wird sowohl für jedes Bundesland als auch deutschlandweit errechnet. Diese Einträge, die bei einem Überangebot zu Versauerung und Eutrophierung führen können, gehen im Auswertungszeitraum von zurück. Auch die niedersächsischen Freilandmessstellen weisen rückläufige Säure- und Stickstoff-Einträge auf, die aber über den Frachten in Deutschland liegen. Dabei spielen die Ammoniumstickstoff-Einträge, die in den Umweltindikator B5 eingehen, eine besondere Rolle, da diese in Niedersachsen aufgrund intensiver Landwirtschaft (Viehhaltung) auf einem höheren Niveau liegen.

## 4.2 Standortbezogene Auswertungen

### 4.2.1 Freiland- und Bestandsmessstellen eines Standortes

Der überwiegende Teil der Depositionsmessstellen des Messnetzes sind Freilandmessstellen. Um einen Vergleich mit den Einträgen unter Wald ziehen zu können, wurden einige Standorte zusätzlich mit einer Messstelle im nahen Bestand ausgestattet. Bei allen Waldstandorten handelt es sich um Fichtenbestände. In Tabelle 6 sind die Standorte aufgeführt, denen sowohl eine Freiland- als auch eine Bestandsmessstelle zugeordnet sind, außerdem deren Untersuchungszeitraum. Gegenstand der folgenden Betrachtungen sind fünf Standorte, die in der Tabelle grau unterlegt sind. Ihre Lage ist Abbildung 48 zu entnehmen. Im nördlichen Niedersachsen nahe der Elbmündung liegt der Standort Wingst auf dem Geestrücken. Die Freilandmessstelle befindet

sich auf einer Höhe von 15 m üNN, die Bestandsmessstelle auf 33 m üNN. Ebenfalls auf 30 m üNN in ebenen Gelände wurden beide Messstellen des Standortes Goldenstedt im Bereich der Hunte errichtet. Weiter im Süden liegt östlich von Osnabrück der Standort Buer-Ostenwalde. Die beiden Niederschlagssammler wurden an einem Nordost-Hang in einer Höhe von ca. 200 m üNN aufgestellt. Die beiden im Süden von Niedersachsen liegenden Standorte gehören zum Bereich des Harzes bzw. des Harzvorlandes. Die Freiland- und die Bestandsmessstelle des Standortes Seesen-Hohestein befinden sich an einem Südwest-Hang in einer Höhe von ungefähr 520 m üNN. Die größte Höhenlage mit ca. 760 m üNN weist der an einem Nordwest-Hang platzierte Standort Riefensbeek auf.

Tab. 6: Standorte mit Freiland- und Bestandsmessstellen und deren Untersuchungszeitraum. Grau unterlegt sind die für diesen Bericht ausgewählten Standorte.

<b>Messstellen</b> F= Freiland B=Bestand	<b>Messstellennummern</b>	<b>Untersuchungszeitraum</b>
Wingst (F) und (B)	067 und 068	2002- heute
Ahlhorn (F) und (B)	030 und 060	1991-2001
Goldenstedt (F) und (B)	061 und 062	1991- heute
Buer-Ostenwalde (F) und (B)	054 und 055	1985- heute
Dörenberg II Süd (F) und (B)	059 und 058	1987-2001
Dörenberg I Kuppe (F) und II Nord (B)	005 und 057	1985- heute
Dörenberg I Hang (F) und (B)	004 und 006	1985-1997 (F) und 1985-1989 (B)
Seesen-Hohestein (F) und (B)	050 und 051	1985- heute
Riefensbeek (F) und (B)	048 und 049	1985- heute

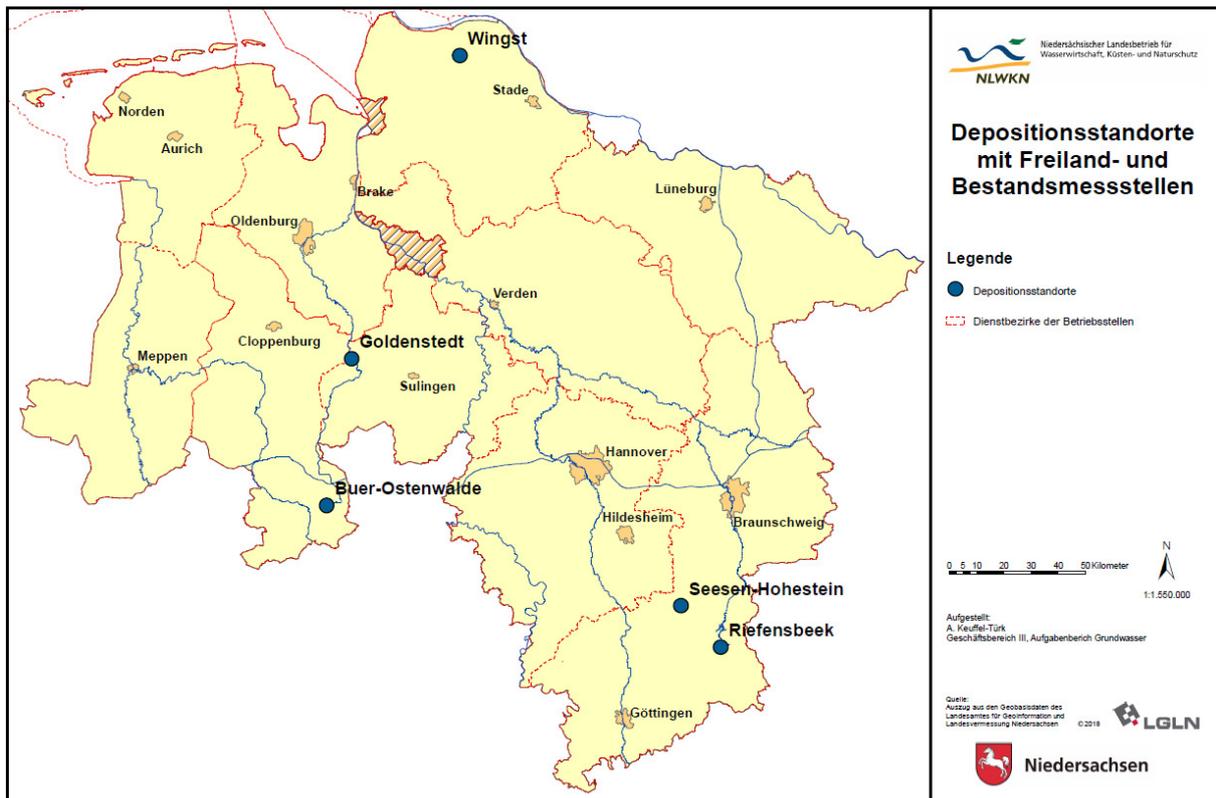


Abb. 48: Lage der fünf ausgewählten Depositionsstandorte mit Freiland- und Bestandsmessstelle.

### Niederschlagshöhe

Die in den Messstellen ermittelten Niederschlagshöhen sind von verschiedenen Faktoren, wie z.B. Höhenlage, Windrichtung und Windgeschwindigkeit abhängig. Bei Bestandsmessstellen spielt außerdem der in den Baumkronen zurückgehaltene Niederschlag, die Interzeption, eine Rolle. Sie wird beeinflusst von der Baumart, dem Bestockungsgrad und der Kronenoberfläche der Bestände. In niedersächsischen Fichtenbeständen wurden Interzeptionsraten zwischen 14 % und 31 % ermittelt (LBEG 2012, 2021). So zeigen auch die Niederschlagshöhen an den Standorten Wingst, Goldenstedt und Buer-Ostenwälder deutliche Unterschiede zwischen Freiland- und Bestandsmessstellen (Abb. 49). Im Freiland sind die gesammelten Regenmengen durchweg höher, während im Bestand Verluste durch Interzeption entstehen. Die Freilandniederschläge liegen zwischen ca. 700 und 900 mm, die im Bestand zwischen ca. 350 und 550 mm. Bei den Standorten Seesen-Hohestein und Riefensbeek, die sich im Mittelgebirge in einer Höhe

von ca. 520 bzw. 760 m üNN befinden, ist die Differenz zwischen Freiland- und Bestandsniederschlägen nicht so ausgeprägt. In manchen Jahren liegt die Niederschlagshöhe im Bestand sogar über der im Freiland. Ein Grund ist sicherlich die Höhenlage der Standorte. Der hier öfter auftretende Nebel wird von der Vegetation ausgekämmt und tropft als Niederschlag in den Sammler, während im Freiland kein Regen fällt. In den Höhenlagen schneit es öfter und langanhaltender, der Schnee liegt auf dem Bestand und fällt als kompaktes Paket auf bzw. in den Sammler. Bei Starkregenereignissen nimmt der Anteil der Interzeption ab und die aufgefangenen Niederschlagsmengen sind größer. Der Standort Riefensbeek weist aufgrund seiner Lage im Bereich der Steigungsregen des Harzes mit ca. 1100 mm im Freiland und ca. 1200 mm im Bestand die größten Niederschlagshöhen auf. Wälder filtern Stäube und Aerosole aus der Luft, die durch auftreffende Regentropfen aufgenommen und abgewaschen werden.

## Jahresniederschläge [mm]

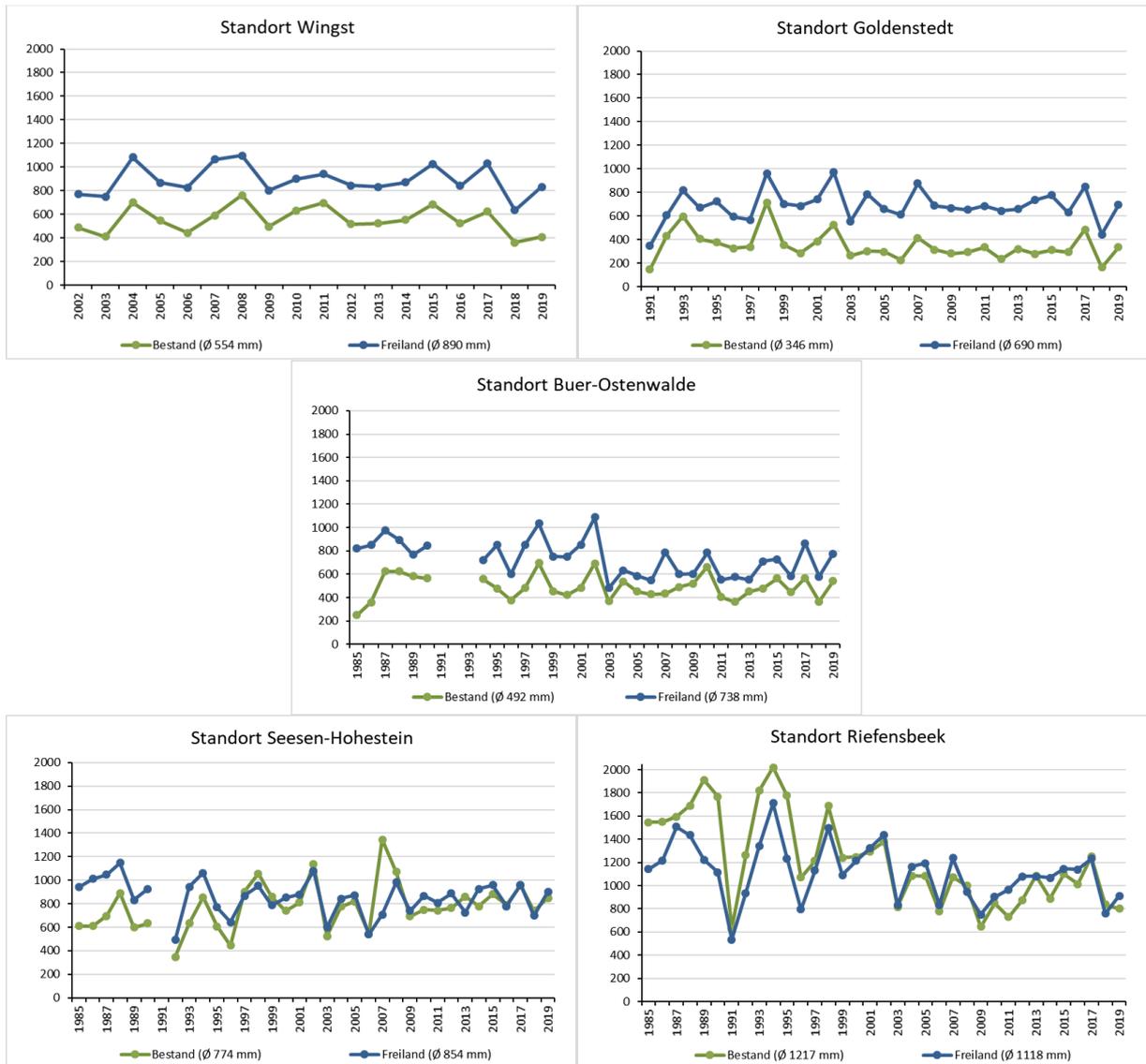


Abb. 49: Niederschlagshöhen von Freiland- und Bestandsmessstellen an fünf ausgewählten Standorten.

### Sulfatschwefel

Sulfatschwefel-Frachten sind an allen Standorten im Bestand generell höher als im Freiland (Abbildung 50). Der Bestand stellt dabei für Sulfat weder eine Quelle noch eine Senke dar und der im Kronendach akkumulierte Sulfatschwefel kann in vollem Umfang vom Sammler aufgenommen werden (Hug, R. et al., 2005). Da die Verursacher der Schwefeldioxid-Emission Feuerungsanlagen der Energiewirtschaft, der Industrie und des Verarbeitenden Gewerbes sind, findet man höhere Sulfat-Frachten (Sulfat als Reaktionspro-

dukt) eher in der Nähe dieser Emittenten. Insbesondere in den ersten Jahren der Niederschlagsuntersuchung, vor Einführung der Rauchgasentschwefelung und dem Einsatz schwefelarmer Brennstoffe, sind die Frachten an den Standorten Seesen-Hohestein und Riefensbeek insbesondere im Bestand deutlich erhöht. Eine Ursache kann die Nähe zum Großraum Braunschweig-Salzgitter-Wolfsburg sein, aber auch die angrenzenden neuen Bundesländer, in denen erst nach 1985 zahlreiche Betriebe technisch nachgerüstet oder stillgelegt wurden.

Sulfatschwefel-Frachten [kg/ha\*a]



Abb. 50: Sulfatschwefel-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen an fünf ausgewählten Standorten.

## Nitratstickstoff

Ein ähnliches Bild wie die Sulfatschwefel-Fracht zeigt die Entwicklung der Nitratstickstoff-Fracht im Beobachtungszeitraum (Abbildung 51). Nitrat im Niederschlag stammt aus der Reaktion des Niederschlagswassers mit Stickstoffoxiden, deren größte Emittenten der Straßenverkehr und die Energiewirtschaft sind. Daher ist auch hier mit den höchsten Frachten in städtisch/industriell

geprägten Regionen zu rechnen. Nitrat wird von den Baumkronen aufgenommen, die als Senke fungieren (Hug. R. et al., 2005). Es ist davon auszugehen, dass die Nitratstickstoff-Fracht tatsächlich etwas höher ist, als die in den Bestandsmessstellen ermittelten Werte. Der Anteil, der von der Krone aufgenommen wird, kann mit den vorliegenden Daten nicht bestimmt werden.

Nitratstickstoff-Frachten [kg/ha\*a]



Abb. 51: Nitratstickstoff-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen an fünf ausgewählten Standorten.

## Ammoniumstickstoff

Die Ammoniumstickstoff-Frachten der Bestandsmessstellen sind an allen Standorten deutlich höher als die der Freilandmessstellen, lediglich am Standort Riefensbeek ist in den letzten 20 Jahren ein starker Rückgang der Bestandsfrachten zu verzeichnen (Abbildung 52). Die Freilandfrachten liegen in Goldenstedt, Buer-Ostenwalde, Seesen-Hohestein und Riefensbeek um die 7,6 kg NH<sub>4</sub>N/ha\*a, nur der Standort Wingst weist mit ca. 6,1 kg NH<sub>4</sub>N/ha\*a einen geringeren Durchschnittswert auf. Quelle des Ammoniumstickstoffs ist in erster Linie Ammoniak, das fast ausschließlich durch die Landwirtschaft freigesetzt wird. Einen auffällig hohe Ammoniumstickstoff-Eintrag weist die Freilandmessstelle am Standort Seesen-Hohestein im Jahr 2019 auf,

der maßgeblich zu einem außergewöhnlich hohen Frachtenverhältnis von Ammonium- zu Nitratstickstoff führt (s.u.).

Im Bestand kann Ammonium durch die Krone aufgenommen werden. Andererseits kann es zusätzlich durch Vogelkot eingetragen werden. Während bei Freilandmessstellen die eindeutig verunreinigten Niederschlagsproben verworfen werden können und gar nicht erst in die Mischprobe gelangen und untersucht werden, ist die Situation an Bestandsmessstellen eine andere. Hier kann eine diffuse Belastung über das Abwaschen von an Laub und Nadeln haftendem Vogelkot zu erhöhten Ammoniumeinträgen führen (Hug, R. et al., 2005). Beide Effekte können anteilmäßig nicht abgeschätzt werden.

Ammoniumstickstoff-Frachten [kg/ha\*a]



Abb. 52: Ammoniumstickstoff-Frachten von Freiland- und Bestandsmessstellen an fünf ausgewählten Standorten.

## Frachten-Verhältnis Ammonium- zu Nitratstickstoff

Ist der Wert des Frachten-Verhältnisses Ammonium- zu Nitratstickstoff eins, ist die Eintrag von Ammonium- und Nitratstickstoff ausgeglichen; je größer der Wert, desto mehr verschiebt sich das Verhältnis zu Ammoniumstickstoff und deutet auf einen Einfluss der Landwirtschaft hin. Dies ist an den Standorten Wingst, Goldenstedt und Buer-Ostenwalde zu beobachten, deren Freilandmessstellen Frachtenverhältnisse zwischen ca. 1,5 und 2,5 aufweisen, die Bestandsmessstellen erreichen teilweise einen Wert von fast vier (Abbildung 53). Der landwirtschaftliche Einfluss im Bestand der Standorte Goldenstedt und Buer-Ostenwalde geht im Betrachtungszeitraum zurück, während er im Freiland eher zunimmt und z.T. über dem der Bestandsmessstellen liegt. Die beiden südlich gelegenen Standorte Seesen-

Hohestein und Riefensbeek sind bis zum Jahr 2008 deutlich weniger vom Ammoniumstickstoff beeinflusst. Das Frachtenverhältnis im Bestand ist sogar kleiner als eins und weist damit auf eine höhere Nitratstickstoff-Belastung und damit einen verhältnismäßig größeren Einfluss von Straßenverkehr und Energiewirtschaft hin. Seit 2011 zeigt sich aber auch in Seesen-Hohestein (Freiland) und in Riefensbeek (Freiland und Bestand) die gegenüber Nitratstickstoff erhöhte Ammoniumstickstoff-Fracht. Ein über die Jahre ansteigendes Frachtenverhältnis kann sowohl auf ansteigende Ammoniumstickstoff-Frachten als auch auf rückläufige Nitratstickstoff-Frachten zurückgeführt werden. Eine Ausnahme bildet die Freilandmessstelle am Standort Seesen-Hohestein im Jahr 2019. Dort weist das das Frachtenverhältnis aufgrund einer auffällig hohen Ammoniumstickstoff-Fracht einen Wert von 5,4 auf.

Frachtenverhältnis Ammonium- zu Nitratstickstoff

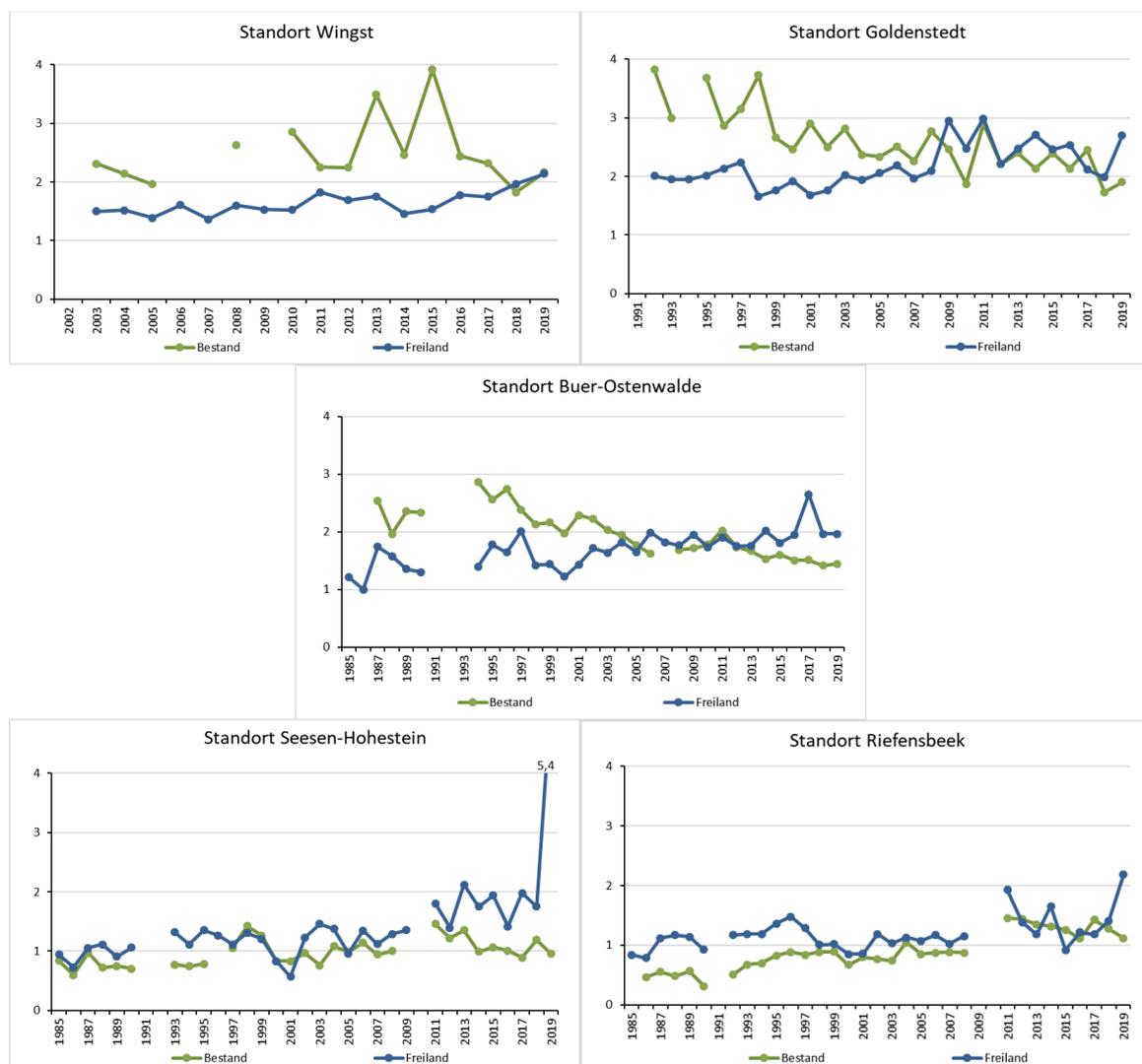


Abb. 53: Frachten-Verhältnis Ammonium- zu Nitratstickstoff von Freiland- und Bestandsmessstellen an fünf ausgewählten Standorten.

Der Vergleich ausgewählter Parameter an fünf Standorten ergab deutliche Unterschiede zwischen Freiland- und Bestandsmessstellen. Die Niederschlagshöhen im Freiland sind höher als im Bestand, da der Niederschlag in den Kronen zurückgehalten wird. Die Differenz ist in den höher gelegenen Standorten nicht so groß, da weitere Effekte wie z.B. das Auskämmen von Nebel die Niederschlagsmenge in den Bestandsmessstellen erhöhen. Die Sulfatschwefel- und Stickstoff-Einträge sind an allen Standorten im Bestand höher als im Freiland. Die rückläufigen Emissionen von Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden durch Energiewirtschaft und Verkehr spiegeln sich besonders in den Sulfatschwefel- und Stickstoff-Frachten der Bestandsmessstellen in den städtisch/industriell geprägten Regionen wider. Das Frachtenverhältnis Ammonium- zu Nitratstickstoff liegt in den ländlichen Gebieten deutlich über eins und deutet, da im Vergleich mehr Ammoniumstickstoff als Nitratstickstoff eingetragen wird, auf landwirtschaftlichen Einfluss hin. Die beiden Standorte im Mittelgebirge Riefensbeek und Seesen-Hohestein weisen geringere Frachtenverhältnisse auf, die z.T. kleiner als eins sind, d.h. der landwirtschaftliche Einfluss ist geringer als der durch Industrie/Verkehr. Die Frachtenverhältnisse der Bestandsmessstellen liegen in den letzten Jahren überwiegend unter denen der Messstellen im Freiland.

## 4.2.2 Messstellen verschiedener Regionen

Um regionale Aspekte bei der Auswertung der Niederschlagsdaten berücksichtigen zu können, wurden einige Bereiche mit für Niedersachsen besonderen Eigenschaften ausgewählt. So sind

acht verschiedenen Regionen mit jeweils drei bis sieben Freilandmessstellen gebildet worden (Abbildung 54).

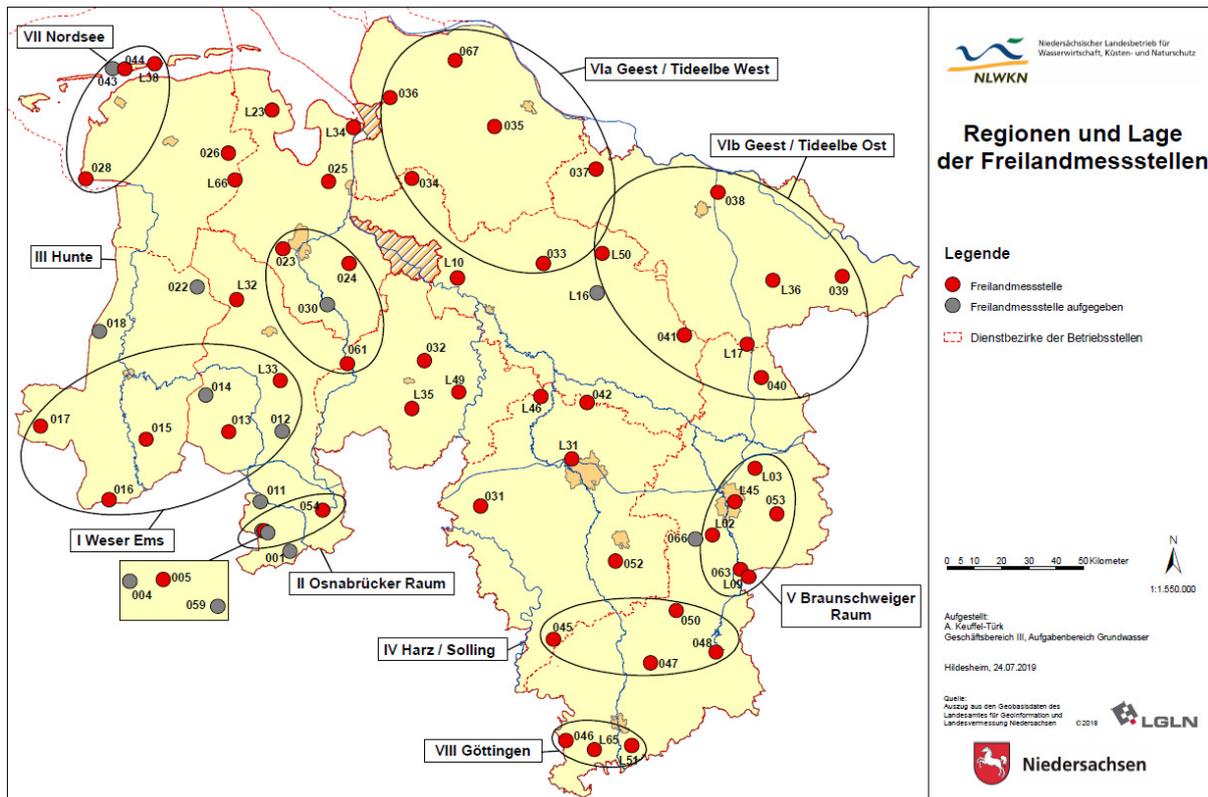


Abb. 23: Depositionsmessnetz Niedersachsen, Regionen.

Die Region **I Weser/Ems** befindet sich im westlichen Niedersachsen und repräsentiert Gebiete mit intensiver Tierhaltung. Im Süden schließt sich daran die Region **II Osnabrücker Raum** mit dem Mittelgebirge Teutoburger Wald und dem Dörenberg an. Nördlich befindet sich die Region **III Hunte**, die ebenfalls landwirtschaftlich geprägt ist. Den Bereich der Mittelgebirge und damit der höher gelegenen Messstellen in waldreichen Gebieten erfasst die Region **IV Harz/Solling**. Nördlich des Harzes werden die Messstellen in und um Braunschweig, in der Region **V Braunschweiger Raum**, zusammengefasst, einem Bereich mit vergleichsweise größerer Besiedlungsdichte. Im Nordosten Niedersachsens bildet der an die Tideelbe angrenzende Bereich zusammen mit dem Geestrücken einen großflächigen Naturraum der überwiegend forstwirtschaftlich, zur Haltung von Milchvieh und zum Anbau genügsamer Kulturen wie Kartoffeln, Roggen und Mais genutzt wird. Hier liegen die Regionen

**Vla Geest/Tideelbe West** und **Vlb Geest/Tideelbe Ost**. Die Region **VII Nordsee** befindet sich im Nordwesten im Bereich der Küste und der vorgelagerten Inseln und spiegelt den Einfluss der Nordsee wider. Ganz im Süden Niedersachsens sind in der Region **VIII Göttingen** die südlich von Göttingen gelegenen Depositionsmessstellen zusammengefasst.

### Niederschlagshöhe

Der Jahresniederschlag ist von Jahr zu Jahr in allen Regionen z.T. großen Schwankungen unterworfen. Die jährlichen Niederschlagshöhen bewegen sich im Betrachtungszeitraum zwischen ca. 400 und 1250 mm.

Da die Höhe der Niederschläge im Freiland von verschiedenen Faktoren abhängig ist und z. B. je nach Höhenlage und Exposition variiert, lassen sich Unterschiede zwischen einzelnen Regionen erkennen (Abbildungen 55 und 56). Die mit durchschnittlich ca. 480 m üNN mit Abstand am

höchsten gelegenen Messstandorte befinden sich in der Region IV Harz/Solling. Diese weisen aufgrund häufiger Steigungsregen auch die größten Niederschlagshöhen auf. Der maritime Einfluss der Nordsee bei vorherrschender Windrichtung aus NW sorgt für vergleichsweise höhere Niederschläge in der Region VIa Geest/Tideelbe

West. Die Messstellen in der Region V Braunschweiger Raum weisen die geringsten Niederschlagshöhen auf. In dieser Region sind bereits die Ausläufer des sich im Osten anschließenden kontinental geprägten mitteldeutschen Trockengebietes spürbar.

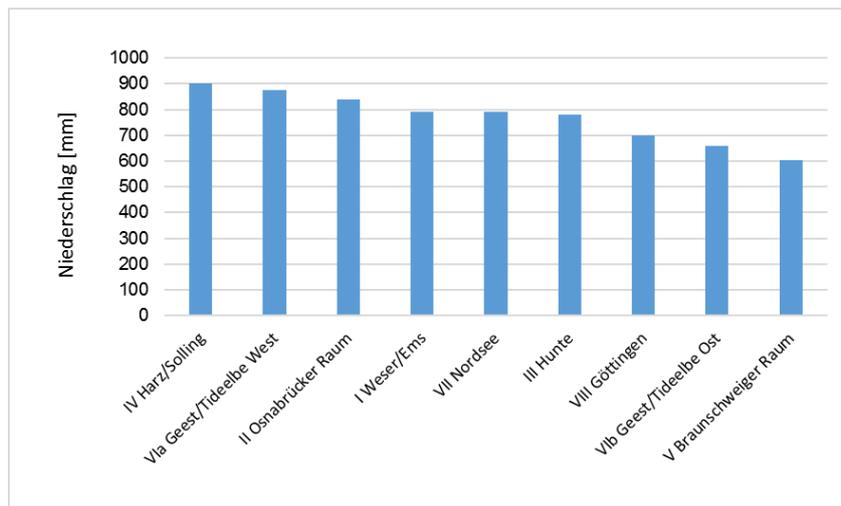


Abb.55: Niederschlagshöhen in den Regionen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Mediane im Zeitraum von 1985 bis 2019.

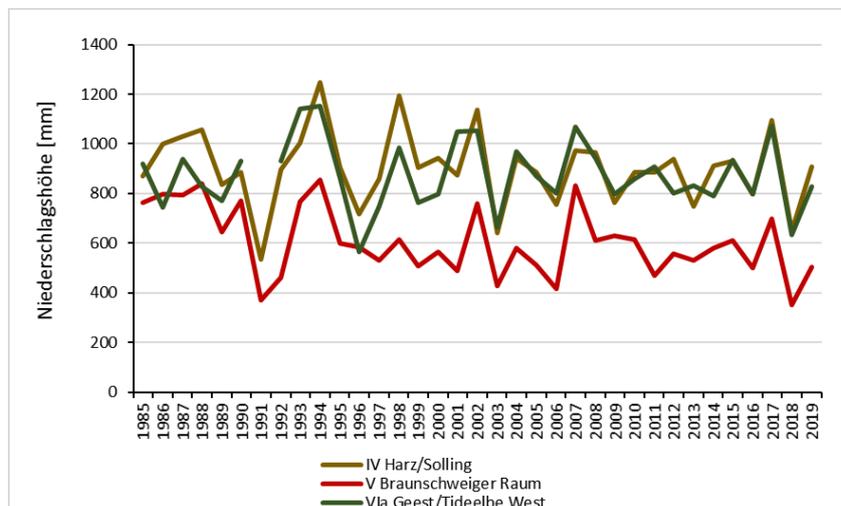


Abb. 56: Vergleich der Niederschlagshöhen (Medianwerte) ausgewählter Regionen im Betrachtungszeitraum.

## Seaspray

Brechende Wellen und Gischt auf den Ozeanen führen zur Freisetzung kleiner und kleinster Tröpfchen in der Luft, dem Seaspray. Wesentliche Anteile davon werden durch die Turbulenz der marinen Grenzschicht nach oben transpor-

tiert und können teilweise trocknen. Dadurch entstehen die Seesalzaerosolpartikel. Die Meere stellen neben mineralischem Staub über großen Landflächen und über Wüstengebieten die größte Quelle für natürliches Aerosol in der Atmosphäre dar.

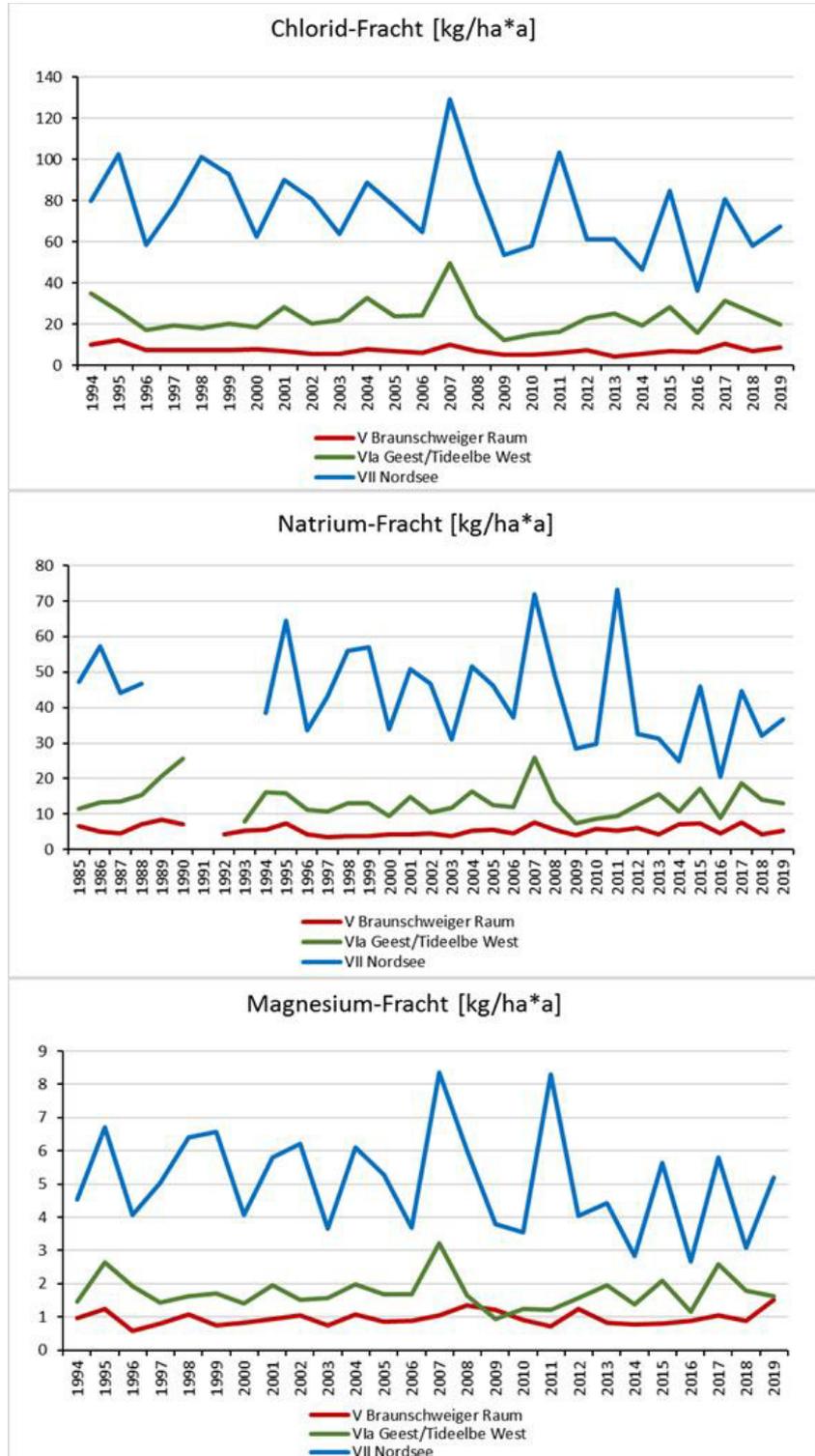


Abb. 57: Chlorid, Natrium- und Magnesium-Frachten (Medianwerte) von Freilandmessstellen ausgewählter Regionen im Betrachtungszeitraum.

In Seesalzpartikeln liegen nach der Verdunstung über dem Meer bereits andere Ionenverhältnisse als in der Salz-Zusammensetzung des Meeres vor. Natriumchlorid, Hauptbestandteil der Aerosole, weist in Meeresnähe ein höheres Chlorid-Natrium Verhältnis als im Binnenland auf. So sinkt das Verhältnis, wenn Chlor durch Ansäuerung aus dem Tropfen herausgetrieben wird, z. B. wenn Schwefelsäure aus der Atmosphäre auf das Aerosol einwirkt und daraufhin Salzsäure in die Atmosphäre entweicht. (Matteß, 1990). Neben Chlorid und Natrium ist auch Magnesium ein Parameter, der durch Seaspray in den Niederschlag gelangt. In Abbildung 57 werden die Regionen VII Nordsee, VIa Geest/Tideelbe West und V Braunschweiger Raum betrachtet. Dargestellt sind die Frachten ab 1996, da ab diesem Zeitpunkt für alle drei Parameter Daten in den ausgewählten Regionen vorliegen. Wie zu erwarten ist, weisen die küstennahen Messstellen der Region VII Nordsee die höchsten Frachten auf, da sie unmittelbar vom Seaspray beeinflusst werden. Es folgt mit deutlichem Abstand die östlich liegende Region VIa Geest/Tideelbe West, deren nördliche Messstellen sich auch im Einzugsbereich der Nordsee befinden. In beiden Regionen ist das Verhältnis von Chlorid zu Natrium 1,8. Die geringsten Chlorid-, Natrium- und Magnesium-Frachten sind in der Region V Braunschweiger Raum zu finden. Der Einfluss meeresbürtiger Aerosole ist geringer, auch erkennbar am kleineren Chlorid-Natrium-Verhältnis von 1,4. Die Frachten in den anderen Regionen liegen zum allergrößten Teil zwischen denen der Regionen VIa Geest/Tideelbe West und V Braunschweiger Raum.

## Stickstoff

Regionale Unterschiede lassen sich auch bei den Parametern Nitrat- und Ammoniumstickstoff feststellen. Das **Frachten-Verhältnis zwischen Ammonium- und Nitratstickstoff** kann einen Hinweis auf die Herkunft der Stickstoff-Frachten im Niederschlag geben. Ist das Verhältnis eins, hält sich die Belastung mit Ammonium- und Nitratstickstoff die Waage. Je größer der Wert jedoch ist, desto weiter verschiebt sich das Verhältnis in Richtung Ammoniumstickstoff und kann auf einen zunehmenden landwirtschaftlichen Einfluss hindeuten. Wertet man die Frachtenverhältnisse aller Freilandmessstellen der fünf ersten und der fünf letzten Jahre des Betrachtungszeitraumes regionsweise aus, werden sowohl zwischen den Regionen als auch den Zeiträumen Unterschiede deutlich (Abbildung 58). Alle Regionen weisen im Zeitraum von 1985 bis 1989 ein deutlich kleineres Frachtenverhältnis auf als im Zeitraum von 2015 bis 2019. Mit einem Wert um 1 ist es in den 1980er Jahren in den Regionen IV Harz/Solling, V Braunschweiger Raum und VIII Göttingen am geringsten. Die Frachtenverhältnisse im Zeitraum von 2014 bis 2019 bewegen sich zwischen ca. 1,6 und 2,5. Die beiden Gebiete, deren Frachtenverhältnis am größten und damit am weitesten Richtung Ammoniumstickstoff verschoben ist, sind die beiden durch Landwirtschaft, insbesondere Tierhaltung, geprägten Regionen I Weser/Ems und III Hunte. Hier befinden sich die Landkreise Cloppenburg, Oldenburg, Vechta, Osnabrück (nördlicher Bereich), Emsland und Grafschaft Bentheim, die deutschlandweit die höchsten Schweine- und Geflügelbestände aufweisen (siehe Kapitel 4.1.8).

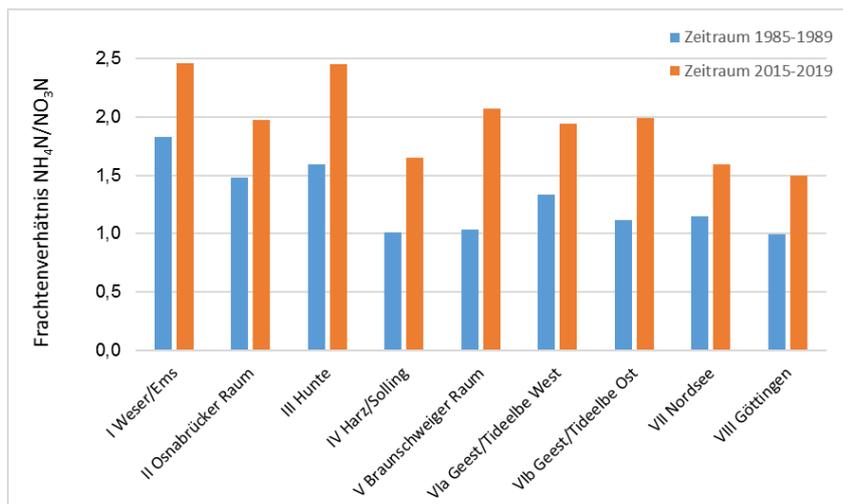


Abb. 58: Frachtenverhältnis von Ammonium- zu Nitratstickstoff in den Regionen. Dargestellt sind die Mittelwerte der ersten und letzten fünf Jahre des Betrachtungszeitraumes.

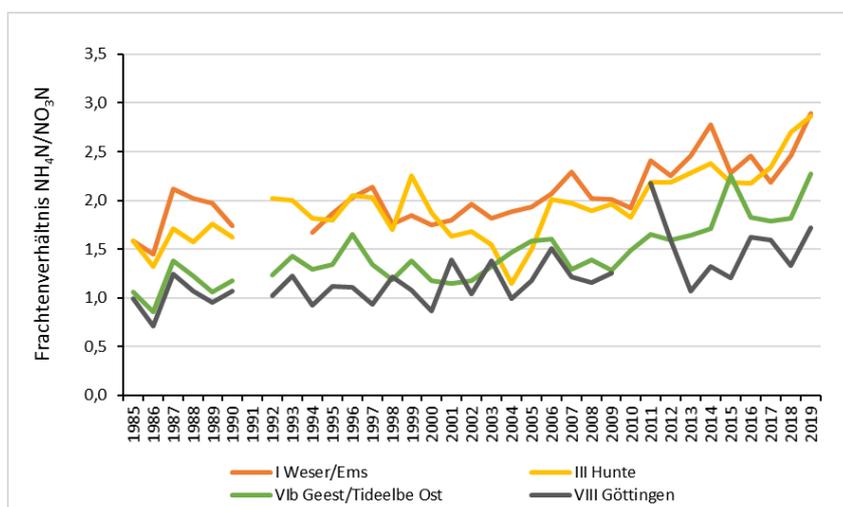


Abb. 59: Frachtenverhältnis von Ammonium- zu Nitratstickstoff ausgewählter Regionen im Betrachtungszeitraum.

Die beiden Regionen I Weser/Ems und III Hunte werden den Regionen VIb Geest/Tideelbe Ost und VIII Göttingen in Abbildung 59 gegenübergestellt. Die Region VIb Geest/Tideelbe Ost ist ein eher großflächiger Raum mit forstwirtschaftlicher oder extensiver landwirtschaftlicher Nutzung, während die Region VIII Göttingen einen Raum mit höherer Siedlungsdichte repräsentiert. Seit 1985 ist in den vier Regionen eine Zunahme des Frachtenverhältnisses zu beobachten, wobei die Regionen I Weser/Ems und III Hunte bis auf wenige Ausnahmen deutlich über den beiden anderen Regionen liegen. Neben der Region

VIb Geest/Tideelbe Ost in den Jahren 1985 und 1986 weist lediglich die Region VIII Göttingen bis zur Jahrtausendwende ein größtenteils ausgewogenes Verhältnis von Ammonium- zu Nitratstickstoff auf. Danach verschiebt es sich wie in den drei anderen Regionen zu Gunsten von Ammoniumstickstoff.

Die Ursache für den Anstieg des Frachtenverhältnisses wird deutlich, wenn man die in das Verhältnis eingehenden Parameter Ammonium- und Nitrat-Stickstoff betrachtet, deren Frachten in den Abbildungen 60 und 61 dargestellt werden.

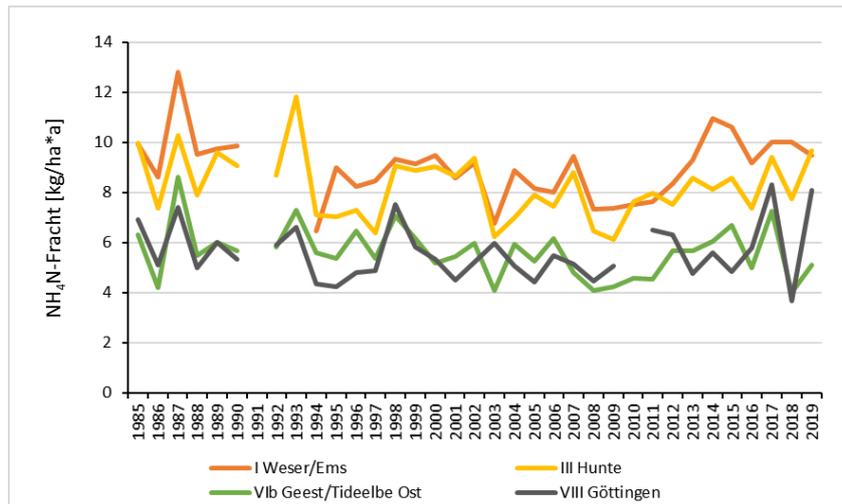


Abb. 60: Ammoniumstickstoff-Frachten (Medianwerte) ausgewählter Regionen im Betrachtungszeitraum.

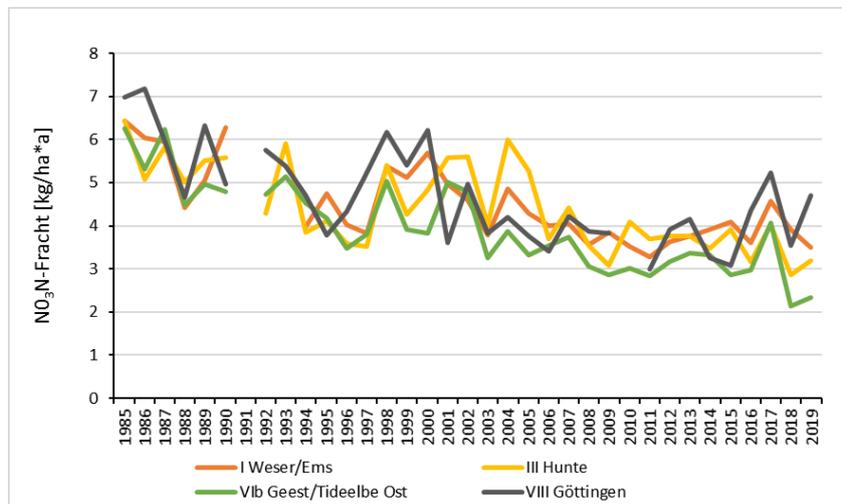


Abb. 61: Nitratstickstoff-Frachten (Medianwerte) ausgewählter Regionen im Betrachtungszeitraum.

Die auf die Landwirtschaft zurückzuführenden Ammoniak-Emissionen befinden sich deutschlandweit seit Jahrzehnten weitgehend auf demselben Niveau (Kapitel 4.1.4), was sich auch bei den Ammonium-Frachten der ausgewählten Regionen widerspiegelt. In den viehstarken Regionen I Weser/Ems und III Hunte sind die Einträge erwartungsgemäß höher als im Bereich VIb Geest/Tideelbe Ost und VIII Göttingen. Sie liegen im Mittel in der Region I Weser/Ems bei 9,0 kg/ha\*a und in der Region III Hunte bei 8,2 kg/ha\*a. Die Region VIII Göttingen mit höherer Siedlungsdichte aber auch die eher forstwirtschaftlich geprägte Region VIb Geest/Tideelbe Ost weisen aufgrund fehlender intensiver landwirtschaftlicher Nutzung niedrigere Ammoniumstickstoff-Frachten auf (Mittelwert von 1985 bis 2019: 5,5 bzw. 5,6 kg/ha\*a). Dagegen gehen die

Nitratstickstoff-Frachten als Folge von Emissionsminderungsmaßnahmen bei Stickoxiden in allen Regionen zurück, wenn auch mit z.T. großen Schwankungen. Die Unterschiede zwischen den Regionen sind erkennbar, fallen aber nicht besonders deutlich aus. Die niedrigsten Nitratstickstoff-Frachten sind vorwiegend in der strukturschwachen Region VIb Geest/Tideelbe Ost mit geringer Siedlungsdichte ermittelt worden (Mittelwert der Medianwerte von 1985 bis 2019: 4,0 kg/ha\*a). Die Frachten im eher städtisch geprägten Raum VIII Göttingen liegen in den meisten Jahren darüber (Mittelwert der Medianwerte von 1985 bis 2019: 4,7 kg/ha\*a). Ähnliche Frachten wurden auch in der Region I Weser/Ems und III Hunte erreicht (Mittelwert von 1985 bis 2019: jeweils 4,5 kg/ha\*a).

Der Anstieg des Frachtenverhältnisses von Ammonium- zu Nitrat-Stickstoff im Zeitraum 1985 bis 2019 ist nicht auf zunehmende Ammonium-Stickstoff-Frachten, sondern auf den Rückgang der Nitrat-Stickstoff-Frachten zurückzuführen. Das außergewöhnlich hohe Ammonium-Nitrat-Verhältnis von fast 2,2, das im Jahr 2011 in der Region VIII Göttingen auffällt, ist auf eine in diesem Jahr relativ hohe Ammonium-Fracht bei gleichzeitig aber relativ niedriger Nitrat-Fracht zurückzuführen. Dagegen weist das Ammonium-Nitrat-Verhältnis der Region III Hunte im Jahr 2004 einen untypisch niedrigen Wert auf. In diesem Fall wurde eine außerordentlich hohe Nitratstickstoff-Fracht ermittelt.

### Blei

Da die Bleiemissionen zum Großteil durch die Verbrennung bleihaltigen Benzins und damit durch den Autoverkehr bestimmt wurden, ist nach dem Verbot verbleiten Benzins im Jahr 1988 auch ein deutlicher Rückgang der Bleifrachten im Niederschlag zu verzeichnen. Die Entwicklung stellt Abbildung 62 an ausgewählten Regionen dar. Die höchsten Bleifrachten treten Mitte der 1980er Jahre in den Regionen II, IV, V und VIII auf. Die Regionen V Braunschweiger Raum und VIII Göttingen weisen mit den Städten Braunschweig, Salzgitter, Wolfenbüttel und Göttingen eine höhere Besiedlungsdichte und damit verbunden erhöhten Kraftfahrzeugverkehr auf. Auch in der Region II Osnabrücker Raum wird nicht nur der Einfluss der Stadt Osnabrück, sondern auch die Nähe zum Ruhrgebiet deutlich.

Die geringsten Bleifrachten wurden in den Regionen VII Nordsee und III Hunte ermittelt. Bereits Anfang der 1990er Jahre werden stark rückläufige Frachten im Niederschlag nachgewiesen: Beispielsweise gingen bis 1992 im Osnabrücker Raum die Frachten um ca. 87 % zurück, im Raum Hunte waren belief sich der Rückgang auf 90 %.

Im Gegensatz zu allen anderen Regionen weist die Region IV Harz/Solling eine Besonderheit auf, denn hier ist neben der Verbrennung bleihaltiger Kraftstoffe eine weitere Blei-Quelle relevant: Mit ausschlaggebend für die Blei-Frachten ist in dieser Region die historische Bergbautätigkeit im Oberharz. Ab dem 16. Jahrhundert diente der Bergbau der Gewinnung von Silber, Blei, Kupfer und Zink. Das letzte Bergwerk, ein Blei-Zink-Bergwerk in Bad Grund, wurde 1992 geschlossen. Es war das letzte Metallerzbergwerk in der Bundesrepublik Deutschland (Liessmann, 2010). Bis heute ist der Einfluss der Bergbautätigkeit im Harz vor allem in Böden und Oberflächengewässern nachzuweisen.

Die Region IV Harz/Solling gehört neben den beiden städtisch geprägten Räumen, Braunschweig und Göttingen, zu den Regionen, bei denen Blei-Frachten in den letzten Jahren überhaupt noch regelmäßig ermittelt werden konnten. Diese sind allerdings inzwischen mit Werten unter  $0,002 \text{ kg Pb/ha*a}$  sehr gering und liegen weit unterhalb der zulässigen zusätzlichen Fracht, die  $0,4 \text{ kg/ha*a}$  beträgt (siehe Kapitel 4.17). In allen anderen Regionen erfolgt keine Frachtenberechnung mehr, da die Blei-Konzentrationen größtenteils unter der Bestimmungsgrenze liegen.

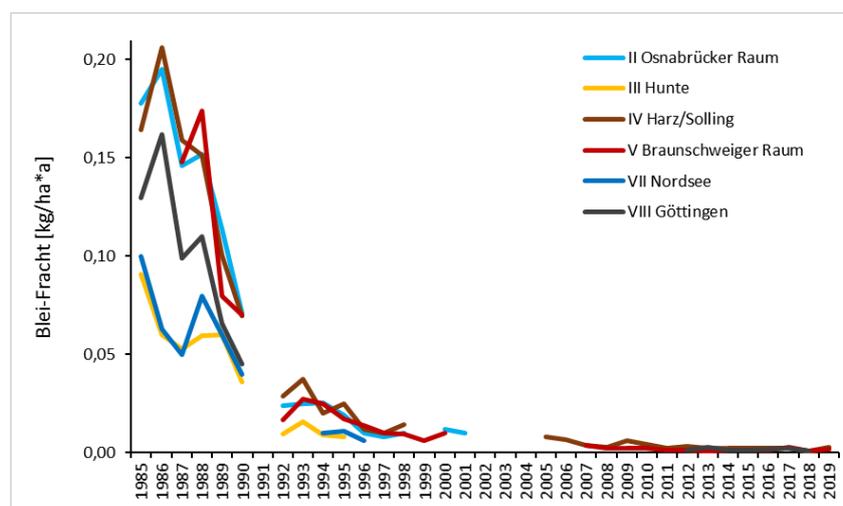


Abb. 62: Blei-Frachten (Medianwerte) von ausgewählten Regionen im Betrachtungszeitraum

Um regionale Aspekte zu berücksichtigen, wurden Freilandmessstellen aus acht Bereichen mit für Niedersachsen besonderen Eigenschaften ausgewählt und deren Depositionsdaten verglichen. Messstellen in der Region IV Harz/Solling weisen aufgrund der Höhenlage die größten Niederschlagshöhen auf, während der Braunschweiger Raum (Region V) mit geringeren Niederschlägen eher kontinental geprägt ist.

Die Nordsee ist eine Quelle für Seesalzaerosole. Seaspray beinhaltet hauptsächlich Natrium und Chlorid, nachgeordnet auch Magnesium. Hohe Frachten dieser Parameter findet man insbesondere an den Standorten in der Region VII Nordsee. Je weiter sich die Messstellen im Landesinneren befinden, desto geringer wird der Einfluss meeresbürtiger Aerosole.

Stickstoffverbindungen im Niederschlag sind unterschiedlicher Herkunft. Ammoniumstickstoff wird fast ausschließlich durch intensive Landwirtschaft eingetragen. In der Folge sind die Frachten in den Regionen I Weser/Ems und III Hunte im Vergleich am höchsten. Geringere Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen lassen sich bei den Nitrat-Frachten feststellen. Maßnahmen wie z.B. Rauchgasentschwefelung führen im Betrachtungszeitraum aber zu rückläufigen Einträgen in allen Regionen. Daher steigt das Verhältnis Ammonium- zu Nitratstickstoff-Fracht an, es ist in den Regionen I Weser/Ems und III Hunte am größten.

Nach der Einführung des bleifreien Benzins im Jahr 1988 sind die Blei-Frachten schon Anfang der 1990er Jahre stark zurückgegangen. Die geringsten Einträge sind in den Regionen VII Nordsee und III Hunte zu verzeichnen. Höhere Frachten findet man in den eher städtisch geprägten Gebieten um Braunschweig, Osnabrück und Göttingen. Die Region IV Harz/Solling hat, bedingt durch den Bergbau im Harz, ebenfalls höhere Frachten aufzuweisen. Inzwischen liegt der Großteil der Bleikonzentrationen jedoch unter der Bestimmungsgrenze.

### 4.2.3 Vergleich von Standorten in Luv- und Lee-Lage

Zwei Messstellen im Teutoburger Wald sind geeignet, um den Einfluss auf die Zusammensetzung des Niederschlages durch die Lage auf der windzugewandten Seite in Luv und der windabgewandten Seite in Lee aufzuzeigen. Man spricht vom Luv-Lee-Effekt, wenn die Luftströmung durch geografische Erhebungen beeinflusst wird, und es zu Folgen bei anderen Klimaparametern kommt. Gebirge wirken je nach Höhe auf die Luftströmung ablenkend, behindernd oder – bei Hochgebirgen – sperrend. Neben einer horizontalen Umströmung kommt es zu einer reliefbedingten Hebung der Luft. In der Folge nimmt die Temperatur ab, und es kommt bei Erreichen des Kondensationsniveaus zu Wolkenbildung und Niederschlag. Dadurch sind die zur Hauptwindrichtung exponierten Gebirgstelle in Luv-Lage wolken- und niederschlagsreicher und relativ kühler. Die Lee-Seiten hingegen sind sonnenscheinreicher, trockener und wärmer. Luv-Lee-Effekte treten nicht nur bei Gebirgen auf, welche die Höhe des Kondensationsniveaus erreichen, sondern auch bei wesentlich kleineren Höhenunterschieden. Sie sind vor allem für Wetterlagen typisch, bei denen Luftmassen waagrecht heranströmen (Advektion).

Der Dörenberg im Teutoburger Wald (Landkreis Osnabrück) erreicht im Bereich der Depositionsmessstellen eine Höhe von etwa 327 m üNN. Der Standort ist mit zwei Bestandsmessstellen im Fichtenforst und einer Freilandmessstelle ausgestattet (Abbildung 63). Die Bestandsmessstelle 057 befindet sich in einer Höhe von ca. 322 m üNN auf der nördlichen Seite des Dörenbergs und damit aufgrund regionaler Gegebenheiten im Windschatten der Hauptwindrichtung (Lee-Seite des Dörenbergs). Am Südhang auf der eher windzugewandten Luv-Seite liegt sowohl die Bestandsmessstelle 058 ebenfalls auf ca. 322 m üNN und die Freilandmessstelle 059 auf ca. 315 m üNN. Eine schematische Darstellung der Lage der Messstellen zeigt Abbildung 64.

Die Bestandsmessstelle 057 wird aktuell noch betrieben, aber da der Betrieb der Messstellen 058 (Bestand) und 059 (Freiland) ab 2001 eingestellt wurde und die Frachten für die überwiegende Anzahl der Parameter erst ab 1988 ermittelt werden können, stehen Datenreihen über 14 Jahre zur Verfügung. Die Parameter Calcium und Magnesium wurden erst 1992 in das Untersuchungsprogramm aufgenommen (Kapitel 2.3).

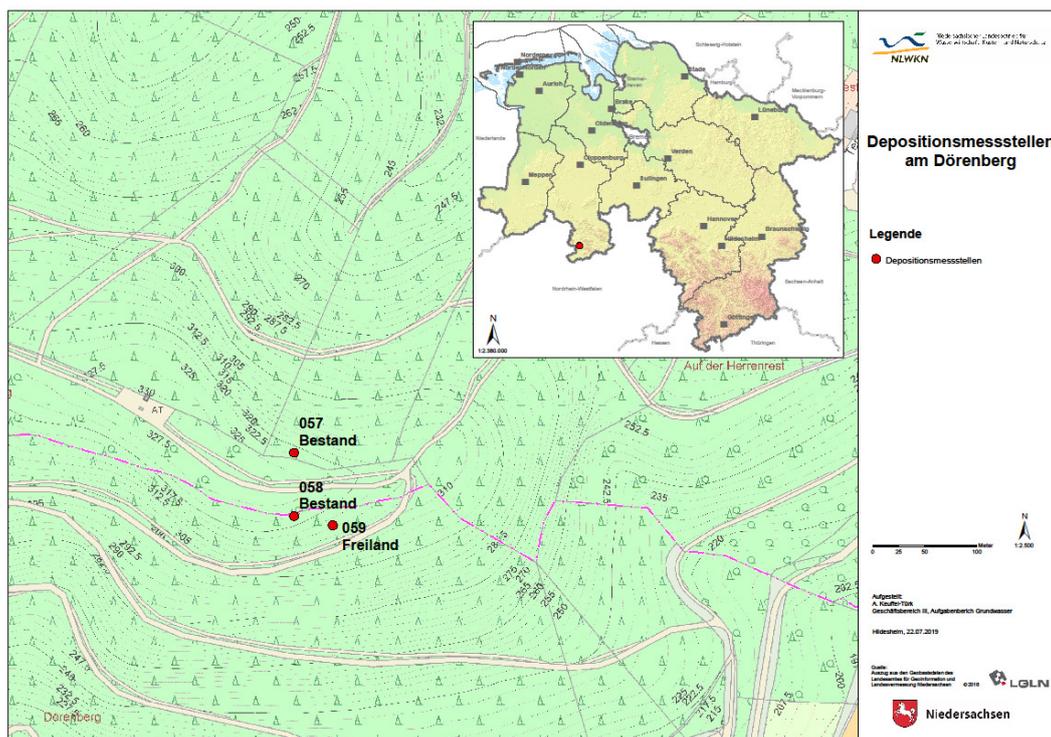


Abb. 63: Topografie am Dörenberg und Lage der Messstellenstandorte.

Betrachtet man die Niederschlagshöhen, wird deutlich, dass die Bestandsmessstelle 058 im Luv-Bereich vom Steigungsregen profitiert und erwartungsgemäß höhere Niederschläge als die windabgewandte Bestandsmessstelle 057 verzeichnet (Abbildung 65). Eine Ausnahme bildet das Trockenjahr 1991, in dem der Jahresniederschlag aller drei Messstellen mit ca. 400 mm auf einem sehr niedrigen Niveau liegt. Auch die Niederschläge der Freilandmessstelle 059 auf der Luv-Seite weisen, bis auf eine Ausnahme im Jahr 1997, höhere Niederschläge auf als die Bestandsmessstelle 057 auf der windabgewandten Seite.

Dass luvseitig an der Freilandmessstelle in den meisten Jahren des Beobachtungszeitraumes geringere Niederschläge als an der Bestandsmessstelle gemessen wurden, ist bemerkenswert, da im Bestand durch Interzeption geringere Niederschlagshöhen zu erwarten wären. Im Einzelfall können neben der Vegetationsdichte aber

auch verschiedene andere Einflussfaktoren eine Rolle spielen (siehe Kapitel 4.1.2). Da die Niederschlagshöhe als Faktor in die Berechnung der Frachten eingeht, hat sie großen Einfluss auf deren Höhe.

In Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe weist die Bestandsmessstelle in Luv-Lage zum größten Teil höhere Frachten als die leeseitige Messstelle auf. Dies gilt, bis auf wenige Jahre, in denen die Frachten der Lee-Messstelle über denen der Luv-Messstelle liegen, sowohl für Sulfat- und Stickstoff-Frachten als auch für die Parameter Chlorid, Fluorid, Natrium, Magnesium, Calcium und die Schwermetalle Zink, Blei, Kupfer und Cadmium. Die Konzentrationen von Nickel, Chrom und Quecksilber sind so gering, dass eine Frachtenermittlung nicht vorgenommen werden kann. Beispielhaft sind in den Abbildungen 66, 67 und 68 die Einträge von Sulfat, Chlorid und Blei dargestellt.

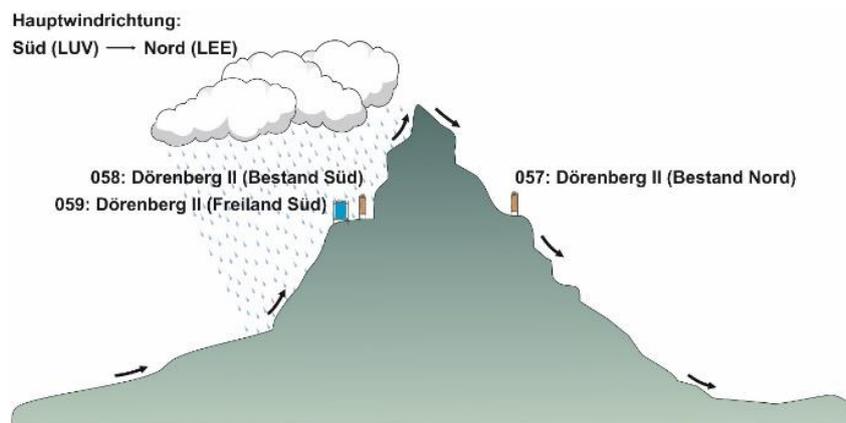


Abb. 64: Schematische Darstellung der Situation im Bereich des Dörenbergs.

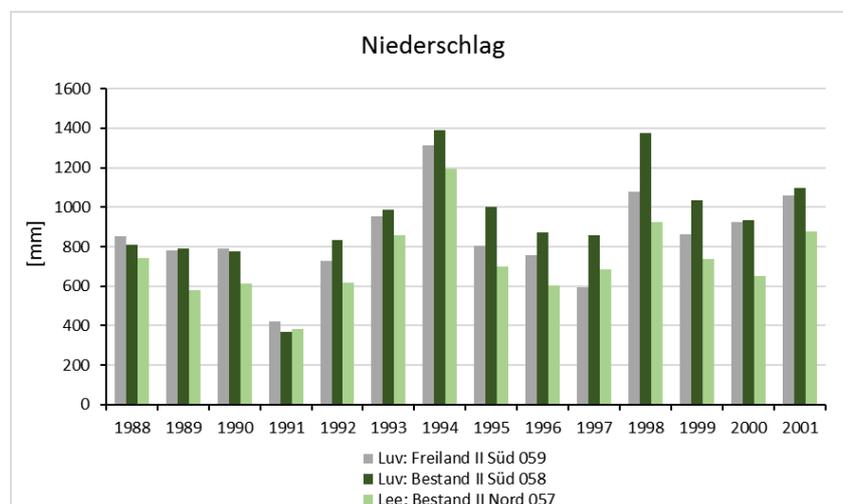


Abb. 65: Jahresniederschlag am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort.

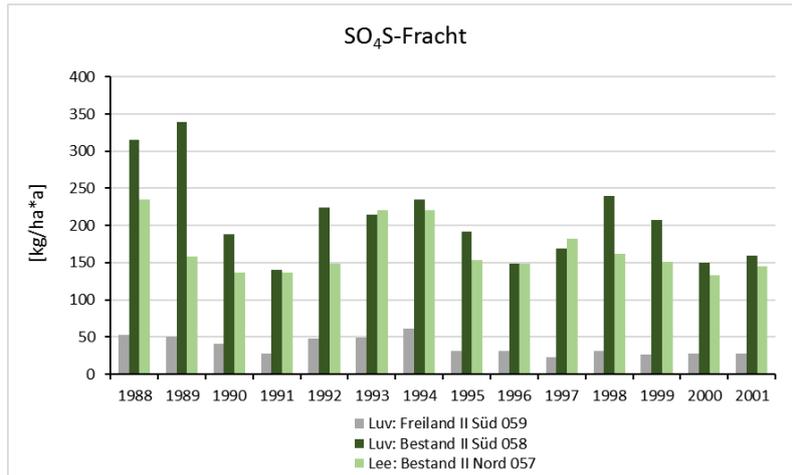


Abb. 66: Sulfat-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort.

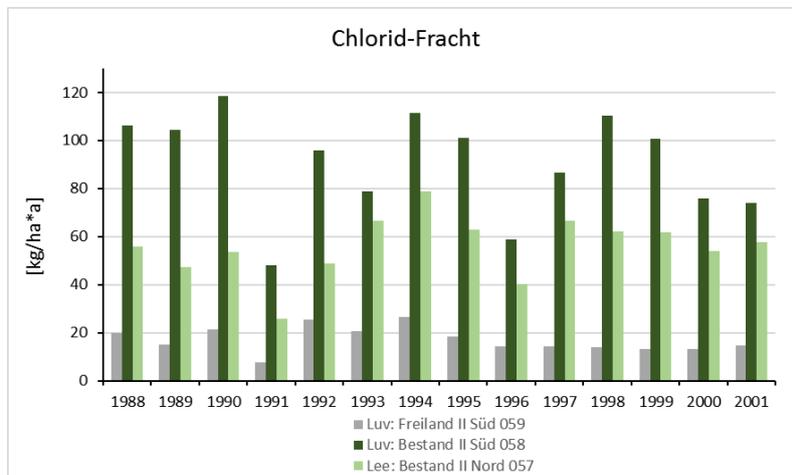


Abb. 67: Chlorid-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort.

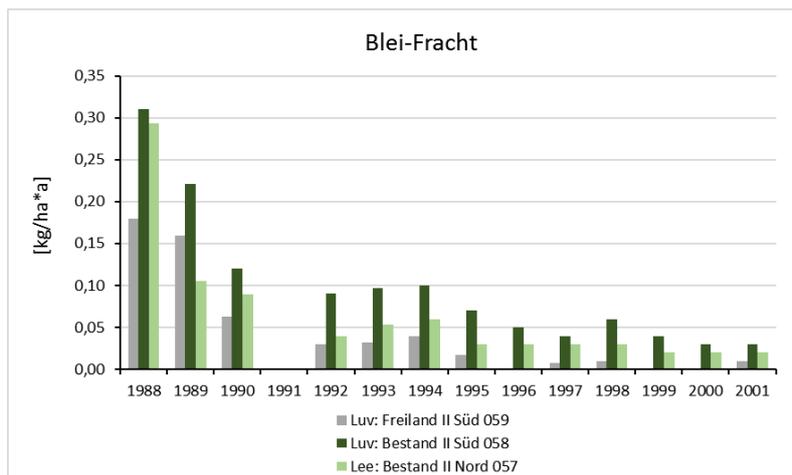


Abb.68: Blei-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort.

Die Stickstoff-Frachten sind in der Luv-Messstelle ebenfalls größer als in Lee-Lage. Dies gilt sowohl für die Ammonium- als auch für die Nitratstickstoff-Frachten (Abbildungen 69 und 70). Das Frachtenverhältnis Ammoniumstickstoff zu Nitratstickstoff ist im Betrachtungszeitraum in allen Messstellen größer als eins. Die höchsten Werte und damit die weiteste Verschiebung in Richtung Ammoniumstickstoff weist die Bestandsmessstelle 058 auf der windabgewandten Seite des Dörenbergs auf (Abbildung 71). Da die im Verhältnis höheren Ammoniumstickstoff-Frachten auf einen landwirtschaftlichen Einfluss hindeuten können, ist dieser auf der Lee-Seite ausgeprägter als auf der Luv-Seite. Ebenfalls auf der Lee-Seite sind die höchsten

Frachten der Parameter Kalium und Phosphor zu verzeichnen (Abbildungen 72 und 73). Die Kalium-Frachten der Bestandsmessstellen unterscheiden sich besonders stark ab dem Jahr 1993; hier sind einzelne Frachten des Lee-Standes fast doppelt so hoch wie die auf der Luv-Seite. Die Berechnung der Phosphatphosphor-Frachten ist ab 1991 möglich. Bis auf das Jahr 1994 sind auch bei diesem Parameter die Frachten der Lee-Messstelle auffallend hoch. Da Kalium und Phosphor Bestandteil von Wirtschaftsdüngern sind, liegt auch hier die Vermutung nahe, dass eventuell landwirtschaftliche Nutzungen im Umfeld oder forstwirtschaftliche Maßnahmen eine Rolle spielen.

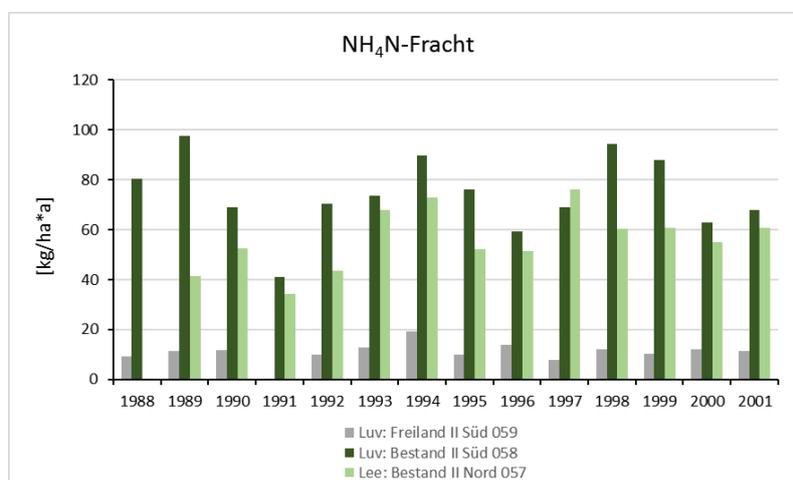


Abb. 69: Ammoniumstickstoff-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort.

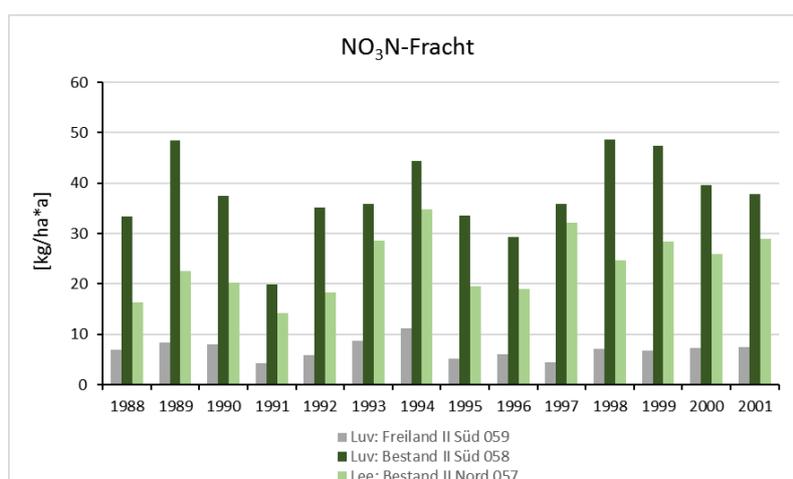


Abb. 70: Nitratstickstoff-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort.

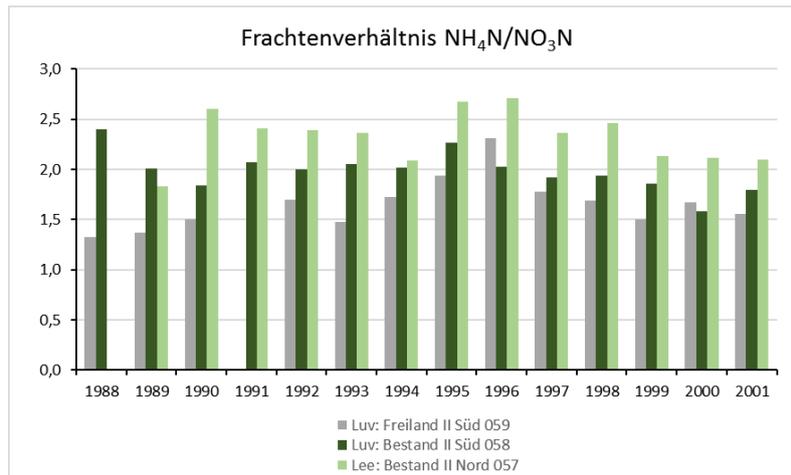


Abb. 71: Frachtenverhältnis Ammoniumstickstoff/Nitratstickstoff am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort.

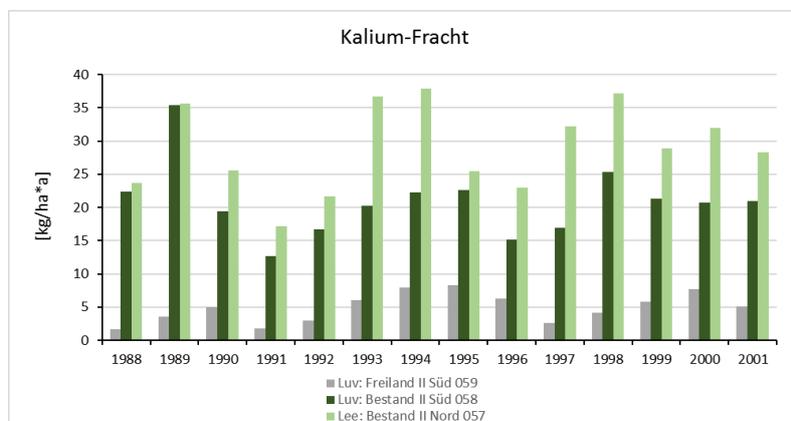


Abb. 24: Kalium-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Standort.

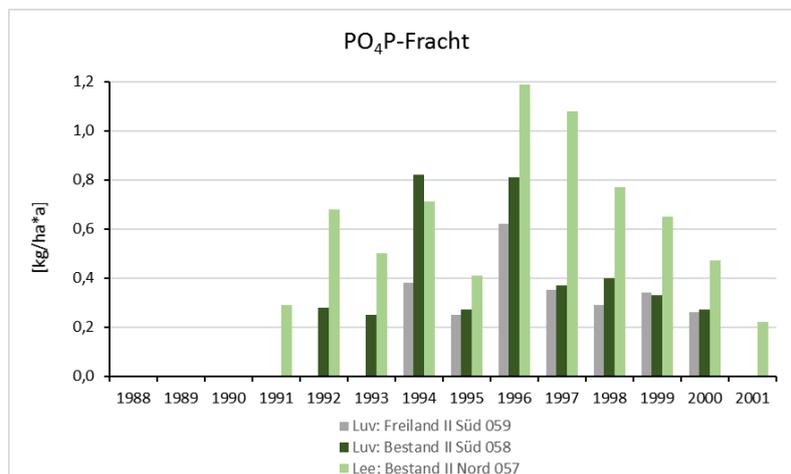


Abb. 73: Phosphatphosphor-Fracht am Dörenberg von 1988 bis 2001. Vergleich von Luv- und Lee-Stand

Der Standort Dörenberg ist mit zwei Bestandsmessstellen ausgestattet, von denen sich eine in Luv- und die andere in Lee-Lage befindet, weiterhin gibt es luvseitig noch eine Freilandmessstelle. Die Jahresniederschläge im Bestand sind mit Ausnahme eines Trockenjahres durch den Effekt des Steigungsregen luvseitig höher als in Lee-Lage. Folglich sind auch die Niederschlagsfrachten der meisten Parameter mit wenigen Ausnahmen auf der Luv-Seite höher. Dagegen weisen Kalium und Phosphat in der Bestandsmessstelle leeseitig die höchsten Frachten auf, was mit land- und forstwirtschaftlicher Nutzung im Zusammenhang stehen kann. Auch die Frachtenverhältnisse Ammonium- zu Nitratstickstoff dieser Messstelle sind auf der Lee-Seite größer als auf der Luv-Seite.

## 5. Fazit und Ausblick

Ab 1985 wurde in Niedersachsen ein Depositionsmessnetz aufgebaut, um die Niederschläge quantitativ und qualitativ zu untersuchen. Die Frachten der Bestandsmessstellen beinhalten die von der Vegetation adsorbierten und akkumulierten und anschließend vom Regen abgewaschenen Inhaltsstoffe der Luft und sind daher bis auf einige Ausnahmen höher als die der Freilandmessstellen. Generell gehen die Stoffeinträge im Niederschlag im Zeitraum von 1985 bis 2019 zurück, erkennbar an steigenden pH-Werten und sinkenden elektrischen Leitfähigkeiten. Den größten Einfluss auf den Rückgang der versauernden Faktoren und die Anzahl von An- und Kationen haben die Parameter Sulfatschwefel und Nitratstickstoff. In Abhängigkeit von der deutschlandweiten Schwefeldioxid- und Stickoxid-Emission gehen die Frachten von Sulfatschwefel und Nitratstickstoff zwischen 1985 und 2019 in Freilandmessstellen um etwa 90% bzw. 50% zurück. Ursache dafür sind Emissionsminderungsmaßnahmen in Energiewirtschaft und Verkehr. Einen Rückgang verzeichnen auch die Fluorid-Frachten, der auf die Beschränkung des FCKW-Einsatzes zurückzuführen ist. Auf einem mit Schwankungen gleichbleibendem Niveau befinden sich die Einträge von Ammoniumnitrat, Chlorid, Natrium, Magnesium, Kalium und Calcium. Die Phosphat-Frachten sind leicht ansteigend.

Schwermetalle im Niederschlag sind zum größten Teil anthropogen bedingt. Da Emissionen von Blei, Kupfer, Zink, Chrom, Nickel, Cadmium und Quecksilber in Deutschland abnehmen oder zumindest auf gleichem Niveau bleiben, verhalten sich auch die Schwermetall-Einträge im Niederschlag ähnlich. Besonders deutlich ist der Rückgang der Blei-Fracht nach Einführung des bleifreien Benzins im Jahr 1988. In vielen Fällen können keine Schwermetall-Frachten ermittelt werden, da die Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze liegen. Gleicht man die Schwermetall-Konzentrationen mit Qualitätsnormen für Grund- und Trinkwasser ab, überschreiten im Untersuchungszeitraum immer weniger Parameter mit Ausnahme von Kupfer die jeweiligen Schwellenwerte.

Werden die Freilandmessstellen verschiedenen für Niedersachsen typischen Regionen zugeord-

net, lassen sich Unterschiede bei den Depositionsdaten feststellen. Die größten Niederschlagshöhen findet man in der Region Harz/Solling, die vom Steigungsregen profitiert, geringe Niederschläge weist dagegen der eher kontinental geprägte Braunschweiger Raum auf. In der Region Nordsee sind die höchsten Chlorid-, Natrium- und auch Magnesium-Frachten als Bestandteil des Seasprays zu finden.

Stickstoff wird im Niederschlag in Form von Ammonium- und Nitratstickstoff untersucht. Die Ammoniumstickstoff-Frachten, deren Quelle fast ausschließlich die Landwirtschaft darstellt, weisen die höchsten Frachten in den Regionen Weser/Ems und Hunte mit intensiver Viehhaltung auf. Die geringsten Frachten dagegen sind im Raum Göttingen und in der eher forstwirtschaftlich geprägten Region Vlb Geest/Tideelbe Ost zu finden. Keine großen Unterschiede zwischen den Regionen zeigen die Nitratstickstoff-Frachten. Das Frachten-Verhältnis Ammoniumstickstoff zu Nitratstickstoff ist aufgrund der höheren Ammoniumstickstoff-Frachten ebenfalls in den Regionen Weser/Ems und Hunte am größten. Es steigt im Betrachtungszeitraum aufgrund rückläufiger Nitratstickstoff-Frachten an, ist aber größer als eins und damit Richtung Ammoniumstickstoff verschoben.

Die vom bleihaltigen Kraftstoff beeinflussten Blei-Frachten sind in den eher städtisch geprägten Gebieten am höchsten. Ebenfalls höhere Frachten weist die Region Harz/Solling, bedingt durch den historischen Bergbau im Harz, auf. Inzwischen liegen die meisten Bleikonzentrationen aber unter der Bestimmungsgrenze.

Am Dörenberg im Landkreis Osnabrück ist ein Standort mit je einer Bestandsmessstelle in Luv- und einer in Lee-Lage ausgestattet, die von 1988 bis 2001 betrieben wurde. Deutlich wird, dass die Niederschlagshöhen aufgrund von Steigungsregen bis auf eine Ausnahme auf der Luv-Seite höher sind als die Messstelle in Lee-Lage. Bis auf Kalium und Phosphat sind folglich fast alle anderen Niederschlagsfrachten luvseitig höher.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Frachten der Depositionsmessstellen im Betrachtungszeitraum von 1985 bis 2019 in Abhängigkeit von den deutschlandweiten Emissionen zurückgegangen oder gleichgeblieben sind.

Aktuell liegen die ermittelten Frachten auf einem niedrigen Niveau. Das Depositionsmessnetz wird weiter betrieben, um Niederschlagshöhe und Stoffeinträge zu ermitteln. Vor dem Hintergrund sich verändernder Wetter- und Klimabedingungen erlangt die Dokumentation und Weiterfüh-

rung der Depositionsdaten im Rahmen des Gewässerüberwachungssystems Niedersachsen eine zunehmende Bedeutung. Das Messnetz kann hinsichtlich der Depositionsstandorte und Untersuchungsparameter je nach Bedarf an aktuelle Fragestellungen angepasst werden.

## 6. Literatur

BBSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt aktualisiert durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I 1328).

BImSchG (2013): Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), zuletzt geändert durch Artikel 3 vom 8. Juli 2022 (BGBl. I S. 1054).

Carroll, D. (1962): Rainwater as a chemical agent of geologic processes – a review. Geolog. Surv. Water-Supply Paper 1535-G.

Deblitz, C., Agethen, K., Thobe, P. (2021): Steckbriefe zur Tierhaltung in Deutschland: Ein Überblick. Braunschweig, Thünen-Institut für Betriebswirtschaft, 17 S.

DEV (Deutsche Einheitsverfahren) zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Wasserchemische Gesellschaft in der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.). Loseblattwerk.

DVWK (1984): Ermittlung der Stoffdeposition in Waldökosystemen, DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 122. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Parey-Verlag, Hamburg und Berlin.

DVWK (1986): Ermittlung des Interzeptionsverlustes in Waldbeständen bei Regen, DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 211. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Parey-Verlag, Hamburg und Berlin.

DVWK (1991): Grundsätze zur Ermittlung der Stoffdeposition, vorläufige Fassung des DVWK-Merkblattes. Empfehlungen des DVWK-Fachausschusses 1.12 „Inhaltsstoffe des Niederschlags“. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Stand Juli 1991.

DWD (Deutscher Wetterdienst):  
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>

FCKWHalonVerbV (1991): Verordnung zum Verbot von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen) vom 6. Mai 1991 (BGBl. I S. 1090). FNA 8053-6-17. Außerkraft getreten am 1. Dezember 2006 (§ 9 Chemikalien-Ozonschicht VO vom 13. November 2006, BGBl. I S. 2638, 2641).

Gauger et al. (1997): Kartierung kritischer Belastungskonzentrationen und-raten für empfindliche Ökosysteme in der Bundesrepublik Deutschland und anderen ECE-Ländern. Endbericht zum UBA-Forschungsvorhaben 106 01 061.

GrwV (2010): Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung GrwV) vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), zuletzt geändert durch Artikel 1 vom 04.05.2017 (BGBl. I S. 1044).

HFA (1984): Institut für Forsthydrologie, Messanleitung Nr. 3: Aufstellung und Betreuung des Niederschlagssammlers „Münden“. Hessische Forstliche Versuchsanstalt, Hann.-Münden (Selbstverlag).

Hollemann, A.F., Wiberg, E., Wiberg, N. (1995): Lehrbuch der Anorganischen Chemie. Walter de Gruyter, Berlin, 101. Auflage, S. 549.

Hug, R., Hepp, R. & von Wilpert, K., Forstliche Fakultät der Universität Freiburg und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.) (2005): 18 Jahre Depositionsmessnetz der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 59.

Hütter, L. A. (1990): Wasser und Wasseruntersuchung. Otto Salle Verlag, Frankfurt am Main.

LANU S.-H. (2010): Atmosphärische Stoffeinträge in Schleswig-Holstein 2009. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Lufthygienische Überwachung.

LAWA (2017): Ableitung von Geringfügigkeits-schwellenwerten für das Grundwasser. Aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016, Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Stuttgart

LBEG (2012): Tagungsband 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen, Geoberichte 23. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover.

LBEG (2021): 30 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen, Geoberichte 39. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover.

Lerman, A. (1979): Geochemical processes – Water and sediment environments. John Wiley Sons, New York, 481 S.

LIKI (Länderinitiative Kernindikatoren):  
<https://www.lanuv.nrw.de/liki/index.php>

Liessmann, Wilfried (2010): Historischer Bergbau im Harz. 3. Auflage. Springer, Berlin, Heidelberg.

LfU Bayern (2020): Niederschlagsuntersuchungen, Zeitreihe des Stickstoffeintrags im Niederschlag an ausgewählten Messstellen seit 1994. Bayerisches Landesamt für Umwelt.

LUNG M.-P. (2002): Bodenbericht des Landes Mecklenburg-Vorpommern; Phase 1 des Bodenschutzprogramms Mecklenburg-Vorpommern. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow.

Mattheß, G. (Hrsg.) (1990): Lehrbuch der Hydrologie, Band 2, Die Beschaffenheit des Grundwassers. Gebrüder Borntraeger, Berlin – Stuttgart.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, LUBW (Hrsg.) (2018): Umweltdaten 2018 Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

Möller, D. (2003): Luft – Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht. Berlin, New York.

NLÖ (1992): Untersuchung von Niederschlagswasser 1988 bis 1990. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hildesheim.

NLÖ (1993): Belastung von Wasser und Boden

durch Schadstoffe in Luft und Niederschlägen, Messprogramm Niederschlagsbeschaffenheit. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hildesheim.

NLW (1987): Belastung von Wasser und Boden durch Schadstoffe in Luft und Niederschlägen – Bestandsaufnahme und Konzept für ein Untersuchungs- und Forschungsprogramm. Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Hildesheim.

NLWK (2001): Sondermessprogramm Deposition 1999/2000, Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Betriebsstelle Cloppenburg.

NLWK (2002): Vergleichende pH-Wert-Bestimmungen an Regenwasserproben. Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Betriebsstelle Cloppenburg.

NLWKN Cloppenburg (2005): Beschaffenheit des Niederschlags in Südoldenburg und im Osnabrücker Land. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Betriebsstelle Cloppenburg

Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmner, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Springer, Heidelberg.

StAWA Verden (1996): Untersuchungen der Niederschlagsbeschaffenheit im Bestand und im Freiland in Abhängigkeit von der Beprobungsdichte. Staatliches Amt für Wasser und Abfall, Verden.

StAWA Stade (1997): Die Beschaffenheit des Niederschlags im Elbe-Weser-Dreieck. Staatliches Amt für Wasser und Abfall, Stade.

UBA (Hrsg.) (2021a): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen, 1990 – 2019, Endstand 08.01.2021. Umweltbundesamt.

UBA (Hrsg.) (2021b): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen (Schwermetalle), 1990 – 2019, Endstand 08.01.2021. Umweltbundesamt.

UBA (2020b): Luftmessnetz des Umweltbundes-

amtes, Entwicklung des pH-Wertes im Niederschlag an den Messstationen des UBA-Luftmessnetzes. Website des Umweltbundesamtes.

UBA (2020c): Luftmessnetz des Umweltbundesamtes, Entwicklung der Leitfähigkeit im Niederschlag an den Messstationen des UBA-Luftmessnetzes. Website des Umweltbundesamtes.

UBA (2020d): Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland. Website des Umweltbundesamtes.

UBA (2020e): Luftmessnetz des Umweltbundesamtes, Nasse Jahresdepositionssummen von Schwermetallen und Halbmetallen im Luftmessnetz des Umweltbundesamtes 2018. Website des Umweltbundesamtes.

Wiberg, N., Wiberg, E., Holleman, A. F. (1995): Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 101. Auflage. Gruyter 1995.

TrinkwV (2016): Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. September 2021 (BGBl. I S. 4343).

## 7. Anhang

Anlage 1: Anzahl der Medianwerte/Messstellen im Betrachtungszeitraum von 1985 bis 2019 unter Berücksichtigung von Freiland- und Bestandsmessstellen

Blatt 1

Anzahl Medianwerte bzw. Messstellen		1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Niederschlagshöhe	Freiland	37	39	40	40	39	40	9	23	23	38	38	48	52	51	57	57	57
	Bestand	5	5	7	7	6	5	5	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
pH-Wert	Freiland	37	39	40	40	39	40	9	24	24	38	38	43	52	51	57	57	57
	Bestand	5	5	7	7	6	5	5	6	6	7	7	6	7	7	7	7	7
Leitfähigkeit	Freiland	37	39	40	40	39	40	9	24	24	38	38	48	52	51	57	57	57
	Bestand	5	5	7	7	6	5	5	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
Ammoniumstickstoff (Fracht)	Freiland	37	39	39	37	38	40	3	18	23	34	38	47	48	50	51	56	42
	Bestand	3	3	5	6	6	5	3	5	6	5	7	6	7	7	7	7	7
Nitratstickstoff (Fracht)	Freiland	37	39	39	37	39	40	6	18	23	34	38	47	49	50	51	56	40
	Bestand	1	4	5	7	6	5	3	5	6	6	7	6	7	7	7	7	7
Gesamtstickstoff (Fracht)	Freiland	37	39	39	37	38	40	3	18	23	34	38	46	49	50	51	56	40
	Bestand	1	3	5	6	6	5	3	5	6	5	7	6	7	7	7	7	7
Ammonium-Nitrat-Verhältnis	Freiland	37	39	39	37	38	40	3	18	23	34	38	46	48	50	51	56	40
	Bestand	1	3	5	6	6	5	3	5	6	5	7	6	7	7	7	7	7
Sulfat (Fracht)	Freiland	37	39	39	37	29	40	6	14	21	34	38	47	49	50	47	56	42
	Bestand	2	3	4	7	5	5	2	5	6	5	7	6	7	7	7	7	7
Phosphat (Fracht)	Freiland	37	35	38					11	6	18	13	37	25	14	20	20	10
	Bestand	3		2				1	4	5	5	6	6	6	7	7	7	4
Chlorid (Fracht)	Freiland	37	5	8	37	36	40	5	16	23	33	38	47	48	50	51	56	42
	Bestand	3	3	4	7	6	5	3	5	6	5	7	6	7	7	7	7	7
Fluorid (Fracht)	Freiland	37	39	37	35	38	33	5			7	5	9	6	9	10	10	8
	Bestand	3	3	5	7	6	5	3	5	5	5	6	6	5	5	5	5	5
Natrium (Fracht)	Freiland	37	39	39	37	36	40	5	16	21	27	37	46	48	50	50	56	42
	Bestand	1	4	5	7	6	5	3	5	6	4	7	5	7	7	7	7	7
Kalium (Fracht)	Freiland	37	37	38	28	36	38	4	14	19	22	29	33	28	23	29	30	15
	Bestand	4	3	5	7	6	5	3	5	6	4	7	5	7	7	7	7	7
Calcium (Fracht)	Freiland								17	18	28	29	46	48	50	49	53	39
	Bestand								5	6	5	7	5	7	7	7	7	7
Magnesium (Fracht)	Freiland								12	11	26	31	37	41	44	45	51	37
	Bestand								5	6	5	7	5	7	7	7	7	7
Kupfer (Fracht)	Freiland	37	38	37	37	39	19		13	14	29	30	42	42	38	41	48	32
	Bestand	3	2	3	7	6	5		4	5	4	7	5	7	7	7	7	7
Zink (Fracht)	Freiland	37	38	39	37	39	40		13	17	21	28	37	33	27	27	28	17
	Bestand	3	3	5	7	6	5		4	5	4	6	5	7	6	6	7	6
Blei (Fracht)	Freiland	37	38	39	37	37	40		13	17	25	25	17	9	11	2	2	6
	Bestand	3	1	4	7	6	5		4	5	5	7	5	6	6	5	7	4
Chrom (Fracht)	Freiland																	
	Bestand																	
Nickel (Fracht)	Freiland											3	5				2	
	Bestand										2	2	5	1				
Cadmium (Fracht)	Freiland	37			1					8	2	5	23	11	13	10	10	9
	Bestand	3	3	2	5	2				5	3	7	5	6	4	5	5	4
Quecksilber (Fracht)	Freiland									1	2	3	5	4	5	6	4	3
	Bestand								1	2	1		1	3	1			

Anzahl Medianwerte bzw. Messstellen		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Niederschlagshöhe	Freiland	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	54	53	53	53	53	53	53
	Bestand	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
pH-Wert	Freiland	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	54	53	53	53	53	53	53
	Bestand	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Leitfähigkeit	Freiland	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	54	53	53	53	53	53	53
	Bestand	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Ammoniumstickstoff (Fracht)	Freiland	50	55	55	55	55	55	55	54	47	51	55	52	53	48	53	53	51	51
	Bestand	5	6	6	6	5	4	6	4	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Nitratstickstoff (Fracht)	Freiland	50	55	55	55	55	55	55	54	47	53	55	52	53	48	53	53	52	52
	Bestand	5	6	6	6	5	4	6	5	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Gesamtstickstoff (Fracht)	Freiland	50	55	55	55	55	55	55	54	47	53	55	52	53	48	53	53	51	51
	Bestand	5	6	6	6	5	4	6	4	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Ammonium-Nitrat Verhältnis	Freiland	50	55	55	55	55	55	55	54	47	51	55	52	53	48	53	53	51	51
	Bestand	5	6	6	6	5	4	6	4	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Sulfat (Fracht)	Freiland	50	55	55	55	55	55	55	53	47	51	48	46	53	48	52	52	52	50
	Bestand	5	6	6	6	5	4	6	5	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Phosphat (Fracht)	Freiland	16	24	15	19	17	7	6	19	12	19	18	19	23	16	16	17	27	21
	Bestand	5	5	6	3	5	4	3	2	3	5	6	4	4	3	5	4	5	4
Chlorid (Fracht)	Freiland	51	55	55	55	55	55	55	51	46	53	55	51	53	48	50	52	52	48
	Bestand	5	5	6	6	5	4	6	5	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Fluorid (Fracht)	Freiland	9	12	5	6	9	5							1			1	1	1
	Bestand	5	6	5	6	5		3	3	2	2	3	2	1		1	1	1	
Natrium (Fracht)	Freiland	49	55	55	55	55	54	55	50	47	52	55	48	51	48	51	50	46	48
	Bestand	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	6	5	6	6	5	6	5	5
Kalium (Fracht)	Freiland	19	35	31	35	39	33	37	43	42	45	50	46	47	38	43	43	40	47
	Bestand	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	5	6	6	5	6	5	5
Calcium (Fracht)	Freiland	48	52	52	47	52	52	52	44	33	40	40	37	41	32	38	36	37	37
	Bestand	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	5	6	6	5	6	5	5
Magnesium (Fracht)	Freiland	40	52	47	49	51	45	47	38	38	48	47	40	40	43	29	31	46	44
	Bestand	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	5	6	6	5	6	5	5
Kupfer (Fracht)	Freiland	39	35	40	47	49	35	37	32	29	28	31	30	33	19	29	26	36	34
	Bestand	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	5	6	6	5	6	5	5
Zink (Fracht)	Freiland	28	37	31	33	32	32	19	19	11	11	22	19	19	19	23	27	29	26
	Bestand	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	5	6	6	5	6	5	5
Blei (Fracht)	Freiland	1			5	5	15	13	12	9	11	6	12	15	8	6	6	14	5
	Bestand	3	4	3	3	2	2	3	2		2	2	2	2	3	4	3	3	2
Chrom (Fracht)	Freiland				5	6	10	12	10	6	8	11	12	6	4	5	6	9	8
	Bestand				1		2	2	1		2	2	2	2	2	2	2	2	2
Nickel (Fracht)	Freiland				5	5	17	17	14	9	17	12	11	13	4	9	10	16	10
	Bestand				1		2	2	1		5	4	4	4	5	3	4	5	3
Cadmium (Fracht)	Freiland	13	19	12	20	19	18	18	16	10	18	16	14	15	4	7	8	6	5
	Bestand	3	5	5	6	5	5	5	2	1	2	4	5	3	3	3	4	3	4
Quecksilber (Fracht)	Freiland	5	6	5	8	5				5	5	6	5	6	6	7	8	5	5
	Bestand				1				1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1

Anlage 2: Anzahl der Medianwerte bzw. Messstellen im Betrachtungszeitraum von 1985 bis 2019 unter Berücksichtigung der Standortfaktoren Ackerland, Grünland, Wald (Freiland) und Wald (Bestand). Blatt 1

Anzahl Medianwerte bzw. Messstellen		1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Niederschlagshöhe	Ackerland	2	2	2	2	2	2		2	2	2	2	6	10	10	15	15	15
	Grünland	5	5	5	5	4	5		1	1	5	5	8	8	8	9	9	9
	Wald (Freiland)	27	30	31	31	31	31	9	20	20	31	31	33	33	32	32	32	32
	Wald (Bestand)	5	5	7	7	6	5	5	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
pH-Wert	Ackerland	2	2	2	2	2	2		2	2	2	2	6	10	10	15	15	15
	Grünland	5	5	5	5	4	5		1	1	5	5	8	8	8	9	9	9
	Wald (Freiland)	27	30	31	31	31	31	9	21	21	31	31	28	33	32	32	32	32
	Wald (Bestand)	5	5	7	7	6	5	5	6	6	7	7	6	7	7	7	7	7
Leitfähigkeit	Ackerland	2	2	2	2	2	2		2	2	2	2	6	10	10	15	15	15
	Grünland	5	5	5	5	4	5		1	1	5	5	8	8	8	9	9	9
	Wald (Freiland)	27	30	31	31	31	31	9	21	21	31	31	33	33	32	32	32	32
	Wald (Bestand)	5	5	7	7	6	5	5	6	6	7	7	6	7	7	7	7	7
Ammoniumstickstoff (Fracht)	Ackerland	2	2	2	2	2	2		1	2	2	2	6	8	10	12	15	7
	Grünland	5	5	5	4	4	5			1	4	5	8	7	8	8	8	5
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	31	31	3	17	20	28	31	32	33	32	31	32	30
	Wald (Bestand)	3	3	5	6	6	5	3	5	6	5	7	6	7	7	7	7	7
Nitratstickstoff (Fracht)	Ackerland	2	2	2	2	2	2		1	2	2	2	6	9	10	12	15	7
	Grünland	5	5	5	4	4	5			1	4	5	7	7	8	8	8	5
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	31	31	6	17	20	28	31	33	33	32	31	32	28
	Wald (Bestand)	1	4	5	7	6	5	3	5	6	6	7	6	7	7	7	7	7
Gesamtstickstoff (Fracht)	Ackerland	2	2	2	2	2	2		1	2	2	2	6	8	10	12	15	7
	Grünland	5	5	5	4	4	5			1	4	5	7	7	8	8	8	5
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	31	31	4	17	20	28	31	32	33	32	31	32	28
	Wald (Bestand)	1	3	5	6	6	5	3	5	6	5	7	6	7	7	7	7	7
Ammonium-Nitrat-Verhältnis	Ackerland	2	2	2	2	2	2		1	2	2	2	6	8	10	12	15	7
	Grünland	5	5	5	4	4	5			1	4	5	7	7	8	8	8	5
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	31	31	4	17	20	28	31	32	33	32	31	32	28
	Wald (Bestand)	1	3	5	6	6	5	3	5	6	5	7	6	7	7	7	7	7
Sulfatschwefel (Fracht)	Ackerland	2	2	2	2	2	2		1	2	2	2	6	9	10	10	15	7
	Grünland	5	5	5	5	4	5		1	1	5	5	8	8	8	9	9	9
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	31	31	6	13	18	28	31	33	33	32	29	32	30
	Wald (Bestand)	2	3	4	7	5	5	2	5	6	5	7	6	7	7	7	7	7
Phosphatphosphor (Fracht)	Ackerland	2	2	2					1	2	1	2	6	5	3	7	4	2
	Grünland	5	5	5						4	3	5	5	1	4	4	4	4
	Wald (Freiland)	27	27	29					10	4	13	8	25	15	10	9	12	4
	Wald (Bestand)	3		2					1	4	5	5	6	6	6	7	7	4
Chlorid (Fracht)	Ackerland	2			2	1	2		1	2	2	2	6	8	10	12	15	7
	Grünland	5	2	2	4	3	5			1	4	5	7	7	8	8	8	5
	Wald (Freiland)	27	2	5	30	31	31	5	15	20	27	31	33	33	32	31	32	30
	Wald (Bestand)	3	3	4	7	6	5	3	5	6	5	7	6	7	7	7	7	7
Fluorid (Fracht)	Ackerland	2	2	2	2	2	2							1	1	2	2	
	Grünland	5	5	5	4	3	4				1	1	2			1		
	Wald (Freiland)	27	30	28	28	31	25	5			6	4	7	5	8	7	8	8
	Wald (Bestand)	3	3	5	7	6	5	3	5	5	5	6	6	5	5	5	5	5
Natrium (Fracht)	Ackerland	2	2	2	2	2	2		2	2	2	2	6	10	10	15	15	15
	Grünland	5	5	5	4	3	5			1	3	5	8	7	8	8	8	5
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	31	31	5	15	18	22	30	31	33	32	30	32	30
	Wald (Bestand)	1	4	5	7	6	5	3	5	6	4	7	5	7	7	7	7	7
Kalium (Fracht)	Ackerland	2	2	2	2	2	2		1	2	2	2	6	4	4	7	10	3
	Grünland	5	5	5	4	3	5			1	3	5	8	7	8	8	8	5
	Wald (Freiland)	27	28	29	21	29	29	4	13	16	17	23	18	18	15	16	15	9
	Wald (Bestand)	4	3	5	7	6	5	3	5	6	4	7	5	7	7	7	7	7
Calcium (Fracht)	Ackerland								2	1	2	2	6	8	10	10	15	7
	Grünland								1		4	4	8	7	8	8	7	4
	Wald (Freiland)								14	17	22	23	31	33	32	31	30	28
	Wald (Bestand)								5	6	5	7	5	7	7	7	7	7
Magnesium (Fracht)	Ackerland								1	1	2	2	5	8	9	11	13	7
	Grünland										4	4	8	7	8	8	8	4
	Wald (Freiland)								11	10	20	25	23	26	27	26	29	26
	Wald (Bestand)								5	6	5	7	5	7	7	7	7	7
Kupfer (Fracht)	Ackerland	2	2	2	2	2	1		1	1	1	2	5	7	8	9	13	6
	Grünland	5	5	5	4	4	2				1	2	8	6	4	7	7	3
	Wald (Freiland)	27	30	29	30	31	14		12	13	27	26	28	29	26	25	27	23
	Wald (Bestand)	3	2	3	7	6	5		4	5	4	7	5	7	7	7	7	7
Zink (Fracht)	Ackerland	2	2	2	2	2	2		1	2	1	1	5	4	5	3	4	3
	Grünland	5	4	5	4	4	5			1	2	5	8	7	8	7	7	3
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	31	31		12	14	18	22	23	22	14	17	16	11
	Wald (Bestand)	3	3	5	7	6	5		4	5	4	6	5	7	6	6	7	6
Blei (Fracht)	Ackerland	2	2	2	2	1	2		1	2	2	1	1	3	2	1	1	1
	Grünland	5	5	5	4	3	5			1	2	3	3					
	Wald (Freiland)	27	29	30	30	31	31		12	14	21	21	13	6	9	1	1	5
	Wald (Bestand)	3	1	4	7	6	5		4	5	5	7	5	6	6	5	7	4
Chrom (Fracht)	Ackerland																	
	Grünland	5											3		3	3	1	1
	Wald (Freiland)																	
	Wald (Bestand)																	
Nickel (Fracht)	Ackerland												1	2				
	Grünland												1	1				
	Wald (Freiland)												1	2				
	Wald (Bestand)										2	2	5	1				
Cadmium (Fracht)	Ackerland	2								1			1	3	4	3	4	3
	Grünland																	
	Wald (Freiland)	27			1					7	2	5	18	8	6	4	5	5
	Wald (Bestand)	3	3	2	5	2				5	3	7	5	6	4	5	5	4
Quecksilber (Fracht)	Ackerland												1	3	2	3	3	2
	Grünland																	
	Wald (Freiland)									1	2	2	2	2	2	3	2	2
	Wald (Bestand)									1	2	1	1	3	1			

Anzahl Medianwerte bzw. Messstellen		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Niederschlagshöhe	Ackerland	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
	Grünland	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Wald (Freiland)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	29	29	29	29	29
	Wald (Bestand)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5
pH-Wert	Ackerland	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
	Grünland	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Wald (Freiland)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	29	29	29	29	29
	Wald (Bestand)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5
Leitfähigkeit	Ackerland	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
	Grünland	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Wald (Freiland)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	29	29	29	29	29
	Wald (Bestand)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5
Ammoniumstickstoff (Fracht)	Ackerland	14	15	15	15	15	15	15	15	13	14	15	14	14	13	14	14	14	14
	Grünland	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	7	10	10	10	10	10	10	9
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	30	30	30	29	24	30	30	28	29	25	29	29	29	28
	Wald (Bestand)	5	6	6	6	5	4	6	4	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Nitratstickstoff (Fracht)	Ackerland	14	15	15	15	15	15	15	15	13	14	15	14	14	13	14	14	14	14
	Grünland	9	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10	10	10	10	10	10	9
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	30	30	30	29	24	30	30	28	29	25	29	29	29	29
	Wald (Bestand)	5	6	6	6	5	4	6	5	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Gesamtstickstoff (Fracht)	Ackerland	14	15	15	15	15	15	15	15	13	14	15	14	14	13	14	14	14	14
	Grünland	9	10	10	10	10	10	10	10	10	7	10	10	10	10	10	10	10	9
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	30	30	30	29	24	30	30	28	29	25	29	29	29	28
	Wald (Bestand)	5	6	6	6	5	4	6	4	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Ammonium-Nitrat-Verhältnis	Ackerland	14	15	15	15	15	15	15	15	13	14	15	14	14	13	14	14	14	14
	Grünland	9	10	10	10	10	10	10	10	10	7	10	10	10	10	10	10	10	9
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	30	30	30	29	24	30	30	28	29	25	29	29	29	28
	Wald (Bestand)	5	6	6	6	5	4	6	4	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Sulfatschwefel (Fracht)	Ackerland	14	15	15	15	15	15	15	15	13	13	13	14	14	13	14	14	14	14
	Grünland	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9
	Wald (Freiland)	27	30	30	30	30	30	30	28	24	29	26	23	29	25	29	29	29	27
	Wald (Bestand)	5	6	6	6	5	4	6	5	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Phosphatphosphor (Fracht)	Ackerland	5	8	5	9	5	1	4	8	6	9	9	10	10	8	7	9	9	9
	Grünland	5	6	3	2	3	1	1	2	1	3	2	3	3	2		1	1	
	Wald (Freiland)	6	10	7	8	9	5	1	9	5	7	7	6	10	6	9	7	7	12
	Wald (Bestand)	5	5	6	3	5	4	3	2	3	5	6	4	4	3	5	4	5	4
Chlorid (Fracht)	Ackerland	14	15	15	15	15	15	15	15	13	14	15	14	14	13	14	14	14	14
	Grünland	9	10	10	10	10	10	10	9	9	9	10	10	10	10	10	10	10	9
	Wald (Freiland)	28	30	30	30	30	30	30	27	24	30	30	27	29	25	26	28	28	25
	Wald (Bestand)	5	5	6	6	5	4	6	5	4	6	6	6	6	6	6	6	5	5
Fluorid (Fracht)	Ackerland	4	6	4	4	6	3												
	Grünland	1													1			1	1
	Wald (Freiland)	5	5	1	2	3	2												
	Wald (Bestand)	5	6	5	6	5		3	3	2	2	3	2	1		1	1	1	
Natrium (Fracht)	Ackerland	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
	Grünland	9	10	10	10	10	10	10	9	10	8	10	10	10	10	10	10	10	9
	Wald (Freiland)	26	30	30	30	30	29	30	26	24	30	30	24	27	25	28	26	26	25
	Wald (Bestand)	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	6	5	6	5	6	5	5
Kalium (Fracht)	Ackerland	7	13	11	12	11	11	14	15	13	13	15	14	13	10	12	12	12	14
	Grünland	9	10	10	10	10	10	10	9	10	8	10	10	10	10	10	10	9	8
	Wald (Freiland)	7	17	15	17	21	17	21	23	20	25	26	23	24	19	22	22	22	25
	Wald (Bestand)	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	5	6	6	5	6	5	5
Calcium (Fracht)	Ackerland	14	15	15	15	15	15	15	13	11	12	13	12	12	11	11	12	12	12
	Grünland	8	9	9	6	9	9	9	9	6	7	6	6	6	8	5	6	6	6
	Wald (Freiland)	26	28	28	26	28	28	28	22	16	21	21	19	21	16	21	18	18	19
	Wald (Bestand)	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	5	6	6	5	6	5	5
Magnesium (Fracht)	Ackerland	13	15	14	15	15	14	13	12	13	13	15	12	13	13	10	11	11	13
	Grünland	8	9	9	9	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	7	8	8	9
	Wald (Freiland)	19	28	24	25	26	22	25	17	16	26	23	19	18	21	12	12	12	22
	Wald (Bestand)	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	5	6	6	5	6	5	5
Kupfer (Fracht)	Ackerland	11	12	11	13	14	9	10	11	8	9	11	10	10	7	8	8	8	8
	Grünland	6	2	6	8	9	6	6	5	6	1	3	4	5	3	4	2	2	7
	Wald (Freiland)	22	21	23	26	26	20	21	16	15	18	17	16	18	9	17	16	16	19
	Wald (Bestand)	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	5	6	6	5	6	5	5
Zink (Fracht)	Ackerland	8	10	7	8	9	9	4	5	4	5	6	7	7	6	7	7	7	7
	Grünland	7	8	9	8	7	8	4	6	3	2	5	3	2	5	5	7	7	6
	Wald (Freiland)	13	19	15	17	16	15	11	8	4	4	11	9	10	8	11	13	13	13
	Wald (Bestand)	5	5	5	6	5	4	5	5	4	6	5	5	6	6	5	6	5	5
Blei (Fracht)	Ackerland				1	1	5	5	5	5	4	1	5	5	3	1	3	3	1
	Grünland																		1
	Wald (Freiland)	1			4	4	10	8	7	4	7	5	7	10	5	5	3	3	3
	Wald (Bestand)	3	4	3	3	2	2	3	2		2	2	2	2	3	4	3	3	2
Chrom (Fracht)	Ackerland				1	1	4	6	4	3	4	5	2	3	2	4	4	2	
	Grünland	3	4	1	2		1	1	1	1	1	1					1		3
	Wald (Freiland)				4	5	6	6	6	3	4	6	7	4	1	3	2	2	3
	Wald (Bestand)				1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Nickel (Fracht)	Ackerland				1	1	7	7	7	5	7	4	5	5	3	3	4	4	5
	Grünland																		
	Wald (Freiland)				4	4	10	10	7	4	10	8	6	8	1	6	6	6	5
	Wald (Bestand)				1	2	2	1			5	4	4	4	5	3	4	5	3
Cadmium (Fracht)	Ackerland	3	6	5	7	7	7	7	7	5	7	7	6	6	2	4	4	4	2
	Grünland																		1
	Wald (Freiland)	7	9	6	11	12	10	10	9	4	10	8	8	9	2	3	3	3	2
	Wald (Bestand)	2	5	5	6	5	5	5	2	1	2	4	5	3	3	3	4	3	4
Quecksilber (Fracht)	Ackerland									2									
	Grünland	3	3	3	3	3				1		3	3	3	3	3	4	4	2
	Wald (Freiland)	2	3	2	5	2				2		2	3	2	3	3	3	3	3
	Wald (Bestand)								1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1