

TEXTE

12/2026

Abschlussbericht

Entwicklung einer nationalen und regional aufgelösten Obergrenze für reaktiven Stickstoff

von:

Martin Bach

Gesellschaft für Boden- und Gewässerschutz e.V.,
Wettenberg

Eddie Griesse, Angela Schlutow, Timothy Kappauf
Ingenieurbüro Dr. Eckhof GmbH (IBE), Ahrensfelde

Stephan Hannappel, Sophie Borrmann
HYDOR Consult GmbH, Berlin

Karoline Morling, Stephan Fuchs
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung,
KIT Karlsruhe

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 12/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3722 63 288 0
FB001703

Abschlussbericht

Entwicklung einer nationalen und regional aufgelösten Obergrenze für reaktiven Stick- stoff

von

Martin Bach

Gesellschaft für Boden- und Gewässerschutz e.V.,
Wettenberg

Eddie Griesse, Angela Schlutow, Timothy Kappauf
Ingenieurbüro Dr. Eckhof GmbH (IBE), Ahrensfelde

Stephan Hannappel, Sophie Borrmann
HYDOR Consult GmbH, Berlin

Karoline Morling, Stephan Fuchs
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung,
KIT Karlsruhe

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Gesellschaft für Boden- und Gewässerschutz e.V.
Hainerweg 33
35435 Wettenberg

Abschlussdatum:

April 2025

Redaktion:

Fachgebiet II 4.3 Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme
Markus Geupel

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7843>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Entwicklung einer nationalen und regional aufgelösten Obergrenze für reaktiven Stickstoff

Auch bei Einhaltung der Obergrenze der zulässigen Emissionen von reaktiven Stickstoffverbindungen auf der nationalen Ebene können bei regionaler Betrachtung ökologischer Qualitätsziele verletzt werden. Bei der Aggregation auf der nationalen Ebene werden diese lokalen Überschreitungen kompensiert durch Regionen mit nur geringer Belastung. Der nationale Stickstoff-Indikator des DESTINO-Projekts (Heldstab et al. 2020) wird daher erweitert durch eine räumlich höher aufgelöste Ermittlung der Einhaltung bzw. Überschreitungen von Qualitätszielen. Dafür werden für sieben ökologische Schutzgüter deren Qualitätsziele zum Schutz vor verschiedenen Stickstoffverbindungen ausgewertet: Eutrophierung terrestrischer und mariner Ökosysteme (Critical Load, kritischer atmosphärischer Input in die Küstenzone, N-Deposition), Oberflächengewässer (wasserbürtiger N-Eintrag in Nordsee und Ostsee), Grundwasserqualität (Nitratkonzentration), Klima (N_2O -Emission), Vegetation (NH_3 -Konzentration) sowie menschliche Gesundheit (NO_2 -Konzentration). Aus den Qualitätszielen werden die zulässigen Mengen der NH_3 -, N_2O -, NO_x - und $\text{N}(\text{ges})$ -Emissionen und des hydrosphärische N-Überschuss abgeleitet, die in allen räumlichen Betrachtungseinheiten nicht überschritten werden dürfen, damit die betreffenden Schutzgüter vor schädlichen Einwirkungen durch N-Verbindungen geschützt sind. Für die Emissionen, Deposition und Konzentration von NH_3 , N_2O und NO_2 werden Daten des PINETI-4 Projektes sowie mit dem Gridding Emission Tool for ArcGIS (GRETA) räumlich verteilte Emissionsdaten herangezogen. Das Vorkommen von empfindlichen Ökosystemen und von N-sensiblen Flechten und Moosen (Kryptogamen) basiert auf der Karte der Critical Loads. Die Einträge in Oberflächengewässer werden mit dem Modell MoRE geschätzt. Für die Grundwasserbelastung wird die Nitratkonzentration im Sickerwasser als Proxygröße betrachtet. Die Berechnungen erfolgen im 1 km^2 -Raster des GeoGitterDE, die Überschreitungen der Obergrenze und der Minderungsbedarf werden für 302 Kreisregionen aggregiert dargestellt. Mit diesen Ansätzen wird eine Emission von insgesamt 2.064 kt reaktiven N-Verbindungen pro Jahr berechnet, das Bezugsjahr für die meisten Schutzgüter ist 2019. Die ökologisch zulässige Emissionsmenge beträgt 932 kt N, als Minderungsbedarf in der Summe über alle Kreisregionen ergeben sich 1.136 kt N. Für die Ebene der Kreisregionen zeigt sich, dass in allen Kreisregionen Handlungsbedarf erforderlich ist und Minderungsbeiträge geleistet werden müssten. In den meisten Kreisregionen (ca. 80% der Fläche Deutschlands) ist die flächenbezogene Gesamt-Minderungserfordernis dabei eher gering ($<40 \text{ kg N ha}^{-1}$). Für 16 Kreisregionen zeigt sich hingegen ein hoher flächenbezogener Minderungsbedarf von mehr als 80 kg N ha^{-1} . Für die NH_3 -Emissionen kann der Minderungsbedarf nicht ausschließlich im Inland erbracht werden, in einigen Kreisregionen ist erforderliche Verminderung sogar größer als die aktuelle Emission.

Abstract: Development of national and regionally limits for reactive nitrogen

Even if the target values for emissions of reactive nitrogen compounds at the national level, environmental protection targets may be violated. When aggregated at national level, these local exceedances are compensated for by regions with only low pollution. The national nitrogen indicator of the DESTINO project (Heldstab et al. 2020) is therefore extended by a spatially higher-resolution determination of compliance with or exceedance of environmental targets. For this purpose the quality targets are evaluated for seven environmental goods: Eutrophication of terrestrial and marine ecosystems (critical load, critical atmospheric input into the coastal zone), surface waters (N input into the North Sea and Baltic Sea), groundwater quality (nitrate concentration), climate (N_2O emissions), vegetation (NH_3 concentration) and human health (NO_2 concentration). From the quality targets the tolerable quantities of NH_3 , N_2O , NO_2 and $\text{N}(\text{ges})$ emissions and the hydrospheric N surplus are derived. The tolerable quantities must be complied with in all spatial units so that the relevant ecological good is protected from harmful effects caused by

reactive N species. For emissions, deposition and concentration of NH_3 , N_2O and NO_2 , the PI-NETI-4 maps and emission data spatially distributed with the Gridding Emission Tool for ArcGIS (GRETA) are used. The occurrence of sensitive ecosystems and N-sensitive lichens and bryophytes (cryptogams) is based on the critical load map. The input to surface waters are estimated using the MoRE model. For groundwater pollution, the nitrate concentration in the leachate is considered as a proxy variable. The calculations are carried out on a 1 km^2 grid of GeoGitterDE, the exceedances of the target values and the need for reduction are aggregated for 302 districts. Based on these approaches a total emission of 2,064 kt of reactive N-compounds is calculated, reference year mostly is 2019. The ecologically tolerable emission quantity is 932 kt N, so that the total reduction requirement in Germany accounts to 1.136 kt N across all districts. At the district level, it is clear that action is needed in all districts. In most district regions (approx. 80% of Germany's area), the total reduction requirement per unit area is rather low ($<40 \text{ kg N ha}^{-1}$). In contrast, 16 district regions show a high reduction requirement per unit area of more than 80 kg N ha^{-1} . The reduction requirement for NH_3 emissions cannot be achieved exclusively domestically; in some district regions, the required reduction is even greater than the current emissions.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis	15
Abkürzungsverzeichnis	19
Zusammenfassung.....	22
Summary	28
1 Einleitung.....	33
1.1 Ausgangssituation	33
1.2 Aufgabenstellung und Ansatz	34
2 Schutzgut terrestrische und marine Ökosysteme - Eutrophierung durch Stickstoff-Deposition..	39
2.1 Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren	39
2.2 Methodik.....	39
2.3 Ergebnisse	47
2.4 Fazit und Anmerkungen	50
3 Schutzgut Oberflächengewässer - Eutrophierung von Küstengewässern	52
3.1 Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren	52
3.2 Modellierung der N-Einträge und N-Konzentration	52
3.2.1 Modellinstrument MoRE	52
3.2.2 Modellerte N(ges)-Einträge	55
3.2.3 Modellierung der N-Gewässerfrachten	56
3.2.4 Modellierung der N-Gewässerkonzentrationen mit MoRE	59
3.3 Ermittlung des Minderungsbedarfs	60
3.3.1 Szenario A: Meeresökologische Qualitätsziele gelten für alle Analysegebiete	61
3.3.2 Szenario B: Meeresökologische Qualitätsziele gelten für die Analysegebiete mit Berücksichtigung der kumulativen Retention im Binnenland	63
3.3.3 Szenario C: Meeresökologische Qualitätsziele gelten für die Analysegebiete mit Berücksichtigung der kumulativen Retention und der Verdünnung entlang des Abflussbaums.....	68
3.3.4 Ergebnisse der Szenarien im Vergleich	71
3.3.5 Vergleich mit Gütemessungen.....	73
3.3.6 Ermittlung der regionalen Obergrenzen.....	77
3.4 Fazit und Anmerkungen	80
4 Schutzgut Grundwasserqualität - Nitrateintrag	82
4.1 Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren	82

4.2	Ansatz I: Potenzielle Nitratkonzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung.....	83
4.2.1	Methodik.....	83
4.2.2	Ergebnisse.....	90
4.3	Ansatz II: Nitratkonzentration im Grundwasser	93
4.4	Ansatz III: Nitratkonzentration im Grundwasser mit Denitrifikationswert.....	98
4.5	Fazit und Anmerkungen.....	101
5	Schutzgut Klima - Lachgas-Emissionen.....	105
5.1	Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren	105
5.2	Ableitung Sektor-spezifischer N ₂ O-Minderungsziele für 2030	105
5.3	Ermittlung der N ₂ O-Emissionsminderungen auf Kreisebene.....	108
5.4	Ergebnis.....	109
5.5	Fazit und Anmerkungen	111
6	Schutzgut Vegetation - Ammoniak-Konzentration (Luft).....	113
6.1	Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren	113
6.2	Methodik.....	113
6.3	Ergebnisse	121
6.4	Fazit und Anmerkungen	123
7	Schutzgut Menschliche Gesundheit - Stickstoffdioxid- Konzentration	124
7.1	Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren	124
7.2	Methodik.....	124
7.3	Ergebnisse	127
7.4	Fazit und Anmerkungen	129
8	Unsicherheit der Ergebnisse.....	131
9	Nationale Stickstoff-Obergrenze	136
10	Quellenverzeichnis	147
A	Anhänge.....	152
A.1	Anhang zu Aufgabenstellung und Ansatz	152
A.2	Anhang zu Schutzgut terrestrische und marine Ökosysteme	160
A.3	Anhang zu Schutzgut Oberflächengewässer.....	190
A.3.1	Gütedaten an der Messstelle Kleve-Bimmen (NW02).....	190
A.3.2	Minderungsbedarf für die Szenarien A bis C mit Einbezug der FGE Rhein.....	193
A.3.3	Vergleich mit Gütemessungen.....	207
A.3.4	Sensitivitätsanalyse für Schutzgut Oberflächengewässer	213

A.4	Anhang zu Schutzgut Grundwasser	218
A.5	Anhang zu Schutzgut Klima.....	234
A.6	Anhang zu Schutzgut Vegetation	244
A.7	Anhang zu Schutzgut Menschliche Gesundheit.....	261
A.8	Anhang Nationale Stickstoff-Obergrenze	271

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Kleinste Critical Load (CLEutN)-Wert zum Schutz terrestrischer Ökosysteme vor Eutrophierung (Schlutow et al. 2018) in den Rasterzellen des GeoGitterDE (BKG 2020).....	41
Abbildung 2:	NO _y - und NH _x -Deposition im Mittel der Kreisregionen 2019 (n. PINETI-4, Kranenburg et al. 2024).....	42
Abbildung 3:	Überschreitung der Critical Load (CLEutN) zum Schutz terrestrischer Ökosysteme vor Eutrophierung (UBA 2015, Schlutow et al. 2018) durch die atmosphärische N-Deposition (NH _x -N und NO _y -N, n. PINETI-4, Jahr 2019, Kranenburg et al. 2024) in Deutschland.....	43
Abbildung 4:	Erforderliche Reduzierung der NO _y - und NH _x -Deposition im Mittel der Kreisregionen zur Einhaltung der Critical Load-Werte zum Schutz terrestrischer Ökosysteme für Anforderungsniveau 90-Perzentil.	44
Abbildung 5:	NO _x - und NH ₃ -Emission im Mittel der Kreisregionen 2019 (n. GRETA, UBA 2016).....	46
Abbildung 6:	Erforderliche Verminderung der NO _x - und NH ₃ -Emissionen (mit Einbezug von Emissionsminderung im Ausland) in den Kreisregionen zur Reduzierung der NO _y - und NH _x -Deposition zur Einhaltung der Critical Load-Werte zum Schutz terrestrischer Ökosysteme (Anforderungsniveau 90-Perzentil)	49
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der in MoRE berücksichtigten Pfade für die Modellierung von Stoffeinträgen in Gewässer.....	53
Abbildung 8:	Flusseinzugsgebiete und Analysegebiete des Stoffeintragsmodells MoRE (Modellierung für das Bundesgebiet).....	54
Abbildung 9:	Modellierte N(ges)-Einträge in Oberflächengewässer über alle Eintragspfade in den MoRE-Analysegebieten (Mittel 2016 – 2018).	56
Abbildung 10:	Gegenüberstellung modellierter und beobachteter Stickstoff-Gewässerfrachten an Gewässergütemessstellen in Deutschland für die Jahre 2016 bis 2018 (n = 132).	59
Abbildung 11:	Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge aus den MoRE-Analysegebieten in die Oberflächengewässer in Deutschland zur Einhaltung des meeresökologischen Qualitätsziels in allen Analysegebieten (Szenario A), Mittel 2016 – 2018.	62
Abbildung 12:	Kumulative Stickstoff-Retention im Gewässer zwischen den Analysegebieten (Gebietsauslass) bis zum Übergangspunkt limnisch-marin bzw. bis zum Grenzpunkt in Deutschland nach MoRE-Modellierung (Mittel 2016 – 2018).....	64
Abbildung 13:	Zulässige N(ges)-Konzentrationen im Binnenland (Jahresmittel) auf Ebene der deutschen MoRE-Analysegebiete (Mittel 2016 – 2018) mit Berücksichtigung der kumulativen N-Retention.....	65
Abbildung 14:	Zulässige N(ges)-Konzentrationen im Binnenland (Jahresmittel) mit Berücksichtigung der kumulativen N-Retention in den MoRE-Analysegebieten, Box-Plot-Verteilungen in den Flussgebietseinheiten.	66

Abbildung 15:	Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge aus den MoRE-Analysegebieten in die Oberflächengewässer in Deutschland zur Einhaltung des meeresökologischen Qualitätsziels, mit Berücksichtigung der kumulativen Retention (Szenario B), Mittel 2016 – 2018. ...	67
Abbildung 16:	Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge aus den MoRE-Analysegebieten in die Oberflächengewässer in Deutschland zur Einhaltung des meeresökologischen Qualitätsziels, mit Berücksichtigung der kumulativen Retention und der Verdünnung entlang des Abflussbaums (Szenario C), Mittel 2016 – 2018.....	70
Abbildung 17:	Jahresmittelkonzentrationen an Gütemessstellen in Bezug zu den berechneten zulässigen N(ges)-Konzentrationen (Mittel 2016 – 2018).	74
Abbildung 18:	Modellierter relativer Minderungsbedarf im Einzugsgebiet im Vergleich zu der Kategorisierung der Gütemessstellen aus Abbildung 17	75
Abbildung 19:	Obergrenzen der N(ges)-Einträge in Oberflächengewässer im Szenario B (zulässige Konzentrationen im Binnenland) auf Ebene der Kreisregionen (Mittel 2016 - 2018), ohne Berücksichtigung der FGE Rhein.	79
Abbildung 20:	Erforderliche Minderung der N(ges)-Einträge in Oberflächengewässer im Szenario B (zulässige Konzentrationen im Binnenland) auf Ebene der Kreisregionen (Mittel 2016 - 2018), ohne Berücksichtigung der FGE Rhein.	80
Abbildung 21:	Jährliche Sickerwasserrate und jährliche Grundwasserneubildung, Mittel 1961 - 1990 (Hydrologischer Atlas Deutschland 2003).	84
Abbildung 22:	N-Überschuss und hydrosphärischer N-Überschuss 2010 - 2019 (Häußermann et al. 2019) in den Kreisregionen und N-Überschuss nach RAUMIS 2014 - 2016 (Zinnbauer et al. 2023) in den Gemeinden in Deutschland.	86
Abbildung 23:	Potenzielle Nitratkonzentration im Sickerwasser, berechnet mit dem hydrosphärischen N-Überschuss 2010-2019 und mit RAUMIS-N-Überschuss als Eintrag aus Landwirtschaftsflächen sowie jeweils 5 kg N ha ⁻¹ Eintrag aus den übrigen Flächen.	89
Abbildung 24:	Erforderliche Verminderung des N-Überschuss (zwei Ansätze) auf der Landwirtschaftsfläche in den Kreisregionen zur Einhaltung einer potenziellen Nitratkonzentration im Sickerwasser von 50 mg NO ₃ L ⁻¹	92
Abbildung 25:	Ausgewertete Messstellen nach Nitratkonzentration (Mittelwert 2016 - 2021) der Messstelle	95
Abbildung 26:	Nitratkonzentration im Grundwasser (ohne Denitrifikationswert) in Deutschland modelliert mit Random Forest-Verfahren.....	97
Abbildung 27:	Nitratkonzentration im Grundwasser ohne und mit Denitrifikationswert (1898 Messstellen).	99
Abbildung 28:	Nitratkonzentration im Grundwasser mit Denitrifikationswert modelliert mit Random Forest-Verfahren.....	100
Abbildung 29:	N ₂ O-Emissionen in Deutschland 2020 nach GRETA.	108
Abbildung 30:	Zulässige N ₂ O-Emissionen (Obergrenzen) für 2030 in Deutschland zur Einhaltung der THG-Minderungsverpflichtung des Klimaschutzgesetzes.....	110

Abbildung 31:	Erforderliche Verminderung der N ₂ O-Emissionen in den Kreisregionen bis 2030 zur Einhaltung der THG-Minderungsverpflichtung des Klimaschutzgesetzes für 2030.	111
Abbildung 32:	Critical Level der NH ₃ -Konzentration in der Luft (Jahresmittel) der Pflanzengesellschaften in Deutschland (n. BERN-Datenbank, Schlutow et al. 2024).....	115
Abbildung 33:	Qualitätsziele der NH ₃ -Konzentration (Anforderungsniveau 90-Perzentil) auf der Ebene der Kreisregionen.....	116
Abbildung 34:	NH ₃ -Konzentration (Jahresmittel) in Deutschland 2019 (PINETI-4)	117
Abbildung 35:	Erforderliche Verminderung der NH ₃ -Emissionen in den Kreisregionen (2019) zur Einhaltung des Qualitätsziels (Anforderungsniveau 90-Perzentil) der NH ₃ -Konzentration.	122
Abbildung 36:	Modellierte Jahresmittelwerte der NO ₂ -Konzentration in der Außenluft in Deutschland 2020 nach Optimaler Interpolation (OI; UBA 2023a).....	125
Abbildung 37:	NO _x -Emissionen in den Kreisregionen in Deutschland 2020 (GRETA).....	126
Abbildung 38:	Regression zwischen der jährlichen NO _x -Emission (gemittelt über die Fläche der Kreisregionen) und der maximalen NO ₂ -Konzentration in der Außenluft (Jahresmittel 2020) in den Kreisregionen.	127
Abbildung 39:	Erforderliche Verminderung der NO _x -Emission in den Kreisregionen zur rechnerischen Einhaltung des WHO-Richtwerts der Konzentration von 10 µg NO ₂ m ⁻³ Luft (Jahresmittelwert) in der gesamten Fläche der Kreisregionen.....	128
Abbildung 40:	Emissionen (Ist-Situation), zulässige Emissionen (Obergrenzen) und erforderliche Verminderung der Emissionen in den Kreisregionen zur Einhaltung der Qualitätsziele der Schutzgüter - Summe der reaktiven Stickstoff-Verbindungen.....	142
Abbildung 41:	Zusammenhang zwischen der Emission (n. GRETA) und der N-Deposition (n. PINETI-4) in den Kreisregionen für NH ₃ -N (linke Graphik) und NO _x -N (rechte Graphik), Jahr 2019.....	164
Abbildung 42:	Source-Receptor-Tables der NO _y -Deposition (Jahr 2019) für die Bundesländer und die Küstenzonen von Nordsee und Ostsee, a) ohne und b) mit Berücksichtigung der Deposition aus dem Ausland (Kranenburg et al. 2024).....	166
Abbildung 43:	Source-Receptor-Tables der NH _x -Deposition (Jahr 2019) für die Bundesländer und die Küstenzonen von Nordsee und Ostsee, a) ohne und b) mit Berücksichtigung der Deposition aus dem Ausland (Kranenburg et al. 2024).....	167
Abbildung 44:	N(ges)-Konzentration (Einzelmessungen 2006 bis 2020) im Rhein an der Gütemessstelle Kleve/Bimmen. Die horizontale Linie markiert das meeresökologische Qualitätsziel für die Nordsee (2,8 mg N L ⁻¹).	190
Abbildung 45:	Jahresmittel der N(ges)-Konzentration im Rhein 2006 bis 2020 an der Gütemessstelle Kleve/Bimmen. Die horizontale Linie markiert das meeresökologische Qualitätsziel für die Nordsee (2,8 mg N L ⁻¹).	191

Abbildung 46:	Verteilung der N(ges)-Konzentrationen nach Jahren (Einzelmessungen 2006 bis 2020) im Rhein an der Gütemessstelle Kleve/Bimmen. Boxplot-Whiskers reichen von Minimum bis Maximum.	191
Abbildung 47:	N(ges)-Konzentrationen (Einzelmessungen 2006 bis 2020) im Rhein an der Gütemessstelle Kleve/Bimmen in Abhängigkeit vom Abfluss (Pegel Rees), logarithmische Achseneinteilung	192
Abbildung 48:	Abfluss im Rhein am Pegel Rees (Tagesmittelwerte) für den Zeitraum 2006 bis 2020 mit Glättungsfunktion zur Verdeutlichung des Trends, logarithmische Darstellung	192
Abbildung 49:	Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands zur Einhaltung der meeresökologisch zulässigen Konzentrationen in allen MoRE-Analysegebieten (Szenario A), Mittel 2016 bis 2018, mit Einbezug der FGE Rhein.....	195
Abbildung 50:	Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands zur Einhaltung der zulässigen Konzentrationen im Binnenland (Szenario B), Mittel 2016 bis 2018, mit Einbezug der FGE Rhein.	196
Abbildung 51:	Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands zur Einhaltung der flussabwärts gerichteten zulässigen Konzentrationen im Binnenland (Szenario C), Mittel 2016 bis 2018, mit Einbezug der FGE Rhein.....	197
Abbildung 52:	Jahresmittelkonzentrationen an Gütemessstellen in Bezug zu den ins Binnenland übertragenen zulässigen N(ges)-Konzentrationen für die Jahre 2016 bis 2018 (mit Einbezug der FGE Rhein).....	207
Abbildung 53:	Modellierter relativer Minderungsbedarf im Einzugsgebiet im Vergleich zu der Kategorisierung der Gütemessstellen aus Abbildung 17.	213
Abbildung 54:	Variation der N(ges)-Einträge und der Minderungsbedarfe (s. Fehlerbalken) für Szenario B bei Variation der Eingangsdaten zu N-Überschüssen und Grundwasserkonzentrationen (Mittel 2016 - 2018) um +/- 10 %, ohne FGE Donau.	214
Abbildung 55:	Mittlere Variation des flächenbezogenen Minderungsbedarfs der N(ges)-Einträge in den MoRE-Analysegebieten im Szenario B bei Variation der Eingangsdaten zu N-Überschüssen und Grundwasserkonzentrationen um +/- 10 % (Mittel 2016 – 2018).	217
Abbildung 56:	Ausgewertete Messstellen nach Art der Messstelle	220
Abbildung 57:	Gemessene und mit Random Forest modellierte NO ₃ -Konzentration (ohne Denitrifikationswert) in den 7405 Messstellen, mit denen das Modell trainiert wurde.....	222
Abbildung 58:	Signifikanz der Prädiktoren (Ranking) im Random Forest Modell zur Regionalisierung der Nitratkonzentration (ohne Denitrifikationswert) im Grundwasser.....	222

Abbildung 59:	Gemessene und mit Random Forest modellierte NO_3 -Konzentration mit Denitrifikationswert im Grundwasser in den 2112 Messstellen, mit denen das Modell trainiert wurde.	223
Abbildung 60:	Signifikanz der Prädiktoren (Ranking) im Random Forest Modell zur Regionalisierung der Nitratkonzentration mit Denitrifikationswert im Grundwasser.....	223
Abbildung 61:	Source-Receptor-Table der NH_3 -Menge, die in einer Höhe von 2,5 m über dem Erdboden als Konzentration (im Receptor-Bundesland) modelliert wurde (Kranenburg et al. 2024).....	247
Abbildung 62:	Erforderliche Verminderung der NH_3 -Emissionen in den Kreisregionen (2019) zur Einhaltung des Qualitätsziels der NH_3 -Konzentration für maximalen Schutz (Anforderungsniveau 100-Perzentil) der Vegetation.	251
Abbildung 63:	Korrelation zwischen der NO_2 -Konzentration (Jahresmittel) und NO_x -Emissionen 2020 in den 361.166 Rasterzellen des GeoGitterDE	261

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der sieben Umweltbereiche bzw. Schutzgüter sowie deren Qualitätsziele und Wirkungsindikatoren, die bei der Entwicklung von regionalen Obergrenzen für die Emissionen von N_r einbezogen werden.....	36
Tabelle 2:	Ökologisch erforderliche Reduzierung der Emission und dafür erforderliche Brutto-Verminderung der NH_3 - und NO_x -Emissionen (2019) inkl. Überhöhung zur Einhaltung der Critical Load (CLEUTN) für terrestrische Ökosysteme (für drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels) und der CAI für marine Ökosysteme, mit und ohne Beitrag der Emissionsminderung im Ausland.	47
Tabelle 3:	Mit dem Modellinstrument MoRE berechnete N(ges)-Einträge in die Oberflächengewässer in Deutschland über alle Pfade, Jahre 2016 bis 2018 und Mittelwert, sowie die Anteile an den Gesamteinträgen (Werte gerundet) ...	55
Tabelle 4:	Absoluter und relativer Minderungsbedarf der N-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands für drei Szenarien zur Einhaltung der meeresökologischen Qualitätsziele für Nord- und Ostsee, Mittel 2016 – 2018, Werte gerundet.	71
Tabelle 5:	Vergleich der Szenarien für die Ermittlung des Minderungsbedarfs.	72
Tabelle 6:	Relativer Minderungsbedarf der N-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands aufgeschlüsselt nach Eintragsquellen (Landwirtschaft vs. Abwasserbewirtschaftung) für drei Szenarien (Mittel 2016 – 2018, Werte gerundet).	73
Tabelle 7:	Ergebnisse der MoRE-Modellierung zu N-Einträgen und N-Frachten sowie Minderungsbedarf zur Einhaltung der meeresökologischen Qualitätsziele im Vergleich zu den Ergebnissen des AGRUM-DE-Projekts (Zinnbauer et al. 2023)...	76
Tabelle 8:	Vergleich des mit MoRE (Szenario B) und mit AGRUM-DE (Zinnbauer et al. 2023) modellierten Minderungsbedarfs der N-Einträge in Oberflächengewässer in den FGE.....	77
Tabelle 9:	N-Überschuss (in $kt\ N\ a^{-1}$) in Deutschland nach verschiedenen Ansätzen und für unterschiedliche Zeiträume.	87
Tabelle 10:	Mittlere potentielle Nitratkonzentration im Sickerwasser (SWR) bzw. in der Grundwasserneubildung (GWN) und Anteil der Raster $>50\ mg\ NO_3\ L^{-1}$ für fünf Varianten des N-Überschuss und zwei Bezugsflächen des N-Eintrags.....	88
Tabelle 11:	Erforderliche Verminderung des N-Eintrags aus Landwirtschaftsflächen in das Sickerwasser (SWR) bzw. in die Grundwasserneubildung (GWN) zur Einhaltung einer potenziellen Nitratkonzentration von $50\ mg\ L^{-1}$ in SWR bzw. GWN in Deutschland für fünf Varianten des N-Überschuss und zwei Bezugsflächen des N-Eintrags.....	91
Tabelle 12:	Häufigkeitsverteilung der Nitratgehalte (Mittel 2016 - 2021) in den ausgewerteten Messstellen.	94
Tabelle 13:	Häufigkeitsverteilung der Nitratgehalte im Grundwasser in Deutschland modelliert mit dem Random Forest-Verfahren.....	98

Tabelle 14:	Häufigkeitsverteilung der Nitratgehalte im Grundwasser mit und ohne Denitrifikationswert modelliert mit dem Random Forest-Verfahren für acht Bundesländer.....	100
Tabelle 15:	Ableitung prozentualer N ₂ O-Minderungsziele 2030 für Sektor Landwirtschaft und die übrigen Sektoren (zusammengefasst) gegenüber 2020; ausgehend vom Klimaschutzgesetz (KSG, v. 18. August 2021).....	107
Tabelle 16:	NH ₃ -N-Menge in der Atmosphäre (Bundesländer, Jahr 2019), die gemäß S-R-Tables aus Deutschland und aus dem Ausland stammt, sowie zulässige Emissionsmengen (für Anforderungsniveau 90-Perzentil).....	119
Tabelle 17:	Maximal zulässige Emissionen der Bundesländer zur Einhaltung des Qualitätsziels (Anforderungsniveau 90-Perzentil).....	121
Tabelle 18:	NH ₃ - und NO _x -Emissionen sowie NH _x - und NO _y -Depositionen 2019 in Deutschland nach GRETA bzw. PINETI-4 im Vergleich zur Modellierung des MSC-W (S-R-Table-Werte).....	133
Tabelle 19:	Qualitätsziele, Wirkungsindikatoren und Obergrenzen für die Emissionen von reaktivem Stickstoff zur Einhaltung der Qualitätsziele für die sieben Schutzgüter.....	137
Tabelle 20:	Nationale Stickstoff-Obergrenze: Ist-Situation, Obergrenzen und erforderliche Verminderung der Emissionen von reaktiven Stickstoff-Verbindungen in Deutschland zur Einhaltung der Qualitätsziele der Schutzgüter mit regionalisierter Ermittlung.	139
Tabelle 21:	Ergebnisse des nationalen Stickstoffindikators im DESTINO-Projekt: Ist-Zustand und niedrigster Zielwert der Emissionen von reaktiven Stickstoff-Verbindungen in Deutschland (Bezugsjahr 2015; Heldstab et al. 2020, Tabelle 12).....	144
Tabelle 22:	Zuordnung der Kreise und Kreisfreien Städte zu Kreisregionen in Deutschland (Erläuterung s. Kapitel 1.2)	152
Tabelle 23:	Anteil der NH ₃ - bzw. NO _x -Emission eines Bundeslandes, der nach S-R-Tables außerhalb der Fläche Deutschlands im Ausland deponiert (PINETI-4, Kranenburg et al. 2024).....	169
Tabelle 24:	Ökologisch erforderliche Reduzierung und erforderliche Brutto-Verminderung (Überhöhung) der nationalen NH ₃ -Emissionen in Deutschland (insgesamt und verteilt auf die Bundesländer) sowie erforderliche ausländische Beiträge (Jahr 2019) für drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels.	171
Tabelle 25:	Ökologisch erforderliche Reduzierung und erforderliche Brutto-Verminderung (Überhöhung) der nationalen NO _x -Emissionen in Deutschland (insgesamt und verteilt auf die Bundesländer) sowie erforderliche ausländische Beiträge (Jahr 2019) für drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels.	172
Tabelle 26:	Ökologisch erforderliche Reduzierung und erforderliche Brutto-Verminderung (Überhöhung) der nationalen NH ₃ -Emissionen in Deutschland (insgesamt und verteilt auf die Bundesländer) - ohne Beiträge zur Emissionsminderung aus dem Ausland - für drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels.	173

Tabelle 27:	Ökologisch erforderliche Reduzierung und erforderliche Brutto-Verminderung (Überhöhung) der nationalen NO _x -Emissionen in Deutschland (insgesamt und verteilt auf die Bundesländer) - ohne Beiträge zur Emissionsminderung aus dem Ausland - für drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels.	174
Tabelle 28:	NH _x - und NO _y -Deposition sowie NH ₃ - und NO _x -Emissionen 2020, Überschreitung der Critical Load und erforderliche Minderung von NH _x - und NO _y -Deposition zum Schutz der terrestrischen Ökosysteme in den Kreisregionen und der marinen Ökosysteme in den Küstenzonen vor Eutrophierung durch Stickstoff.	175
Tabelle 29:	Absoluter und relativer Minderungsbedarf der Stickstoff-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands für drei Szenarien zur Einhaltung der meeresökologischen Qualitätsziele für Nordsee und Ostsee, mit Einbezug FGE Rhein (Mittel 2016 bis 2018), Werte gerundet.	193
Tabelle 30:	Relativer Minderungsbedarf der Stickstoff-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands aufgeschlüsselt nach Quellen (Landwirtschaft bzw. Abwasserwirtschaft) für drei Szenarien, mit Einbezug FGE Rhein (Mittel 2016 bis 2018).	194
Tabelle 31:	Zulässige N(ges)-Einträge) in die Oberflächengewässer (Obergrenzen) nach MoRE-Modellierung (Mittel 2016 - 2018) und erforderlicher Minderungsbedarf in den Kreisregionen (mit und ohne Einbezug der FGE Rhein) zur Einhaltung der meeresökologischen Qualitätsziele.	198
Tabelle 32:	Mittlere zulässige N(ges)-Konzentrationen in den Analysegebieten (Abbildung 8), in denen die ausgewählten Gütemessstellen liegen und Angabe, ob die Jahresmittelwerte der gemessenen N(ges)-Konzentrationen das Ziel unterschreiten (↓), überschreiten (↑) oder sich abwechseln (↑↓).	208
Tabelle 33:	Modellsensitivität der Stickstoff-Gesamteinträge in die Oberflächengewässer in den Flussgebieten (Mittel 2016 - 2018) bei Variation der Eingangsdaten zu N-Überschüssen und Grundwasserkonzentrationen um +/- 10 % (Werte gerundet)	215
Tabelle 34:	Modellsensitivität der Stickstoff-Minderungsbedarfe in den Flussgebieten (Mittel 2016 - 2018) bei Variation der Eingangsdaten zu N-Überschüssen und Grundwasserkonzentrationen um +/- 10 % (Werte gerundet).	216
Tabelle 35:	Übersicht zur Anzahl der Messstellen insgesamt und nach Selektion.	218
Tabelle 36:	Hydrosphärischer N-Überschuss 2010-2019, 2019-2021 und N-Überschuss nach RAUMIS sowie Minderungsbedarf des jeweiligen N-Überschuss in den Kreisregionen zur Einhaltung einer potenziellen Nitratkonzentration im Sickerwasser von 50 mg NO ₃ L ⁻¹	224
Tabelle 37:	N ₂ O-Emissionen 2020 (aus der Landwirtschaft und aus sonstigen Quellen), zulässige Emissionsmenge 2030 und erforderliche Verminderung in den Kreisregionen zur Einhaltung der Vorgaben des Klimaschutzgesetzes.	234
Tabelle 38:	Flechten- und Moosarten (Kryptogamenarten) und zugehörige Pflanzengesellschaften, deren Critical Level für Ammoniakkonzentration 1 µg m ⁻³ entspricht.	244

Tabelle 39:	Verteilung der zulässigen NH ₃ -Emissionsmengen [kg NH ₃] auf die Quellenbundesländern unter der Annahme der S-R Tabellen aus PINETI-4. In der letzten Spalte sind die insgesamt zulässigen NH ₃ -Mengen aus den jeweiligen Quellenbundesländern aufgeführt.	248
Tabelle 40:	NH ₃ -N-Menge in der Atmosphäre (Bundesländer, Jahr 2019), die gemäß Source-Receptor-Tables aus Deutschland und aus dem Ausland stammt, sowie zulässige Emissionsmengen unter der Annahme eines maximalen Schutzes (Anforderungsniveau 100-Perzentil) der empfindlichen Pflanzengesellschaften.	249
Tabelle 41:	Anteile der Emissionen der Bundesländer, die in Deutschland wieder als Konzentration erfasst werden, für Anforderungsniveau 100-Perzentil (maximaler Schutz der Vegetation).	250
Tabelle 42:	Critical Level-Qualitätsziel und Jahresmittelwerte 2019 der NH ₃ -Konzentration sowie NH ₃ -Emission (n. GRETA) und Minderungserfordernis zur Einhaltung der Critical Level von 3 bzw. 1 µg m ³ (für Anforderungsniveaus 90- und 100-Perzentil) in den Kreisregionen.	252
Tabelle 43:	Erforderliche Verminderung der NO _x -Emission in den Kreisregionen zur Einhaltung des WHO-Richtwerts von 10 µg NO ₂ m ⁻³ Luft, berechnet mit Regressionsfunktion der NO ₂ -Konzentrationen der Kreisregionen.	262
Tabelle 44:	Nationale Stickstoff-Obergrenze: Ist-Emissionen, zulässige Emissionen (Obergrenzen) und erforderliche Verminderung der Emissionen von reaktiven Stickstoff-Verbindungen in den Kreisregionen zur Einhaltung der Qualitätsziele der Schutzgüter.	271
Tabelle 45:	Flächenbezogener Minderungsbedarf (in kg N ha ⁻¹) für reaktive Stickstoff-Verbindungen nach Hauptbelastungsquellen in den Kreisen/Kreisregionen mit dem höchsten Minderungsbedarf.	290

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AGRUM	Analyse von Agrar- und Umweltmaßnahmen (Modellverbund im Bereich des landwirtschaftlichen Gewässerschutzes)
AGS	Amtlicher Gebietsschlüssel
AU	Analytical Unit (kleinste räumliche Betrachtungseinheit des Modells MoRE)
BB	Brandenburg
BE	Berlin
BG	Bestimmungsgrenze
BL	Bundesland
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
CAI	Kritische atmosphärische Inputs
CL	Critical Load
CLC	CORINE Land Cover (Geodatensatz Landnutzung)
CLeutN	Critical Load (Eutrophierung durch Stickstoff)
CLvl	Critical Level
CS	Critical Surplus
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DESTINO	DEutsche STickstoffflüsse, Indikatoren und Objectives
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Wettervorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes DWD)
EW	Einwohnerwerte
EXT	Extern (Ausland)
EZG	Einzugsgebiet
FGE	Flussgebietseinheit
GRETA	Gridding Emission Tool for ArcGIS
GW	Grundwasser
GWM	Grundwassermessstelle
GWN	Grundwasserneubildungsrate
HB	Bremen
HE	Hessen
HELCOM	Baltic Marine Environment Protection Commission (Helsinki Commission)
HH	Hamburg
HL	Hydraulische Belastung
IWU-WG	Institut für Wasser und Umwelt, Fachbereich Wassergütewirtschaft des Karlsruhe Institut für Technologie

Abkürzung	Erläuterung
ILR-JLU	Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement der Justus Liebig-Universität Gießen
KR	Kreisregion
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LF	Landwirtschaftliche genutzte Fläche
MONERIS	Modelling Nutrient Emissions in River Systems
MoRE	Stoffeintragsmodell (Modeling of Regionalized Emissions)
MSRL	Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie
MV	Mecklenburg-Vorpommern
N	Stickstoff
N(ges)	Stickstoff, gesamt
N₂O	Distickstoffmonoxid, Lachgas
NH₃	Ammoniak
NH_x	Ammoniak und Ammonium
NI	Niedersachsen
NO	Stickstoffmonoxid
NO₂	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickstoffoxide (NO und NO ₂)
NO₃	Nitrat
N_r	Reaktiver Stickstoff
NUTS	Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques
NW	Nordrhein-Westfalen
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
OI	Optimale Interpolation
PINETI	Pollutant Input and Ecosystem Impact
RF	Random Forest (Modell, Verfahren)
RP	Rheinland-Pfalz
S-R-Table	Source-Receptor-Tabelle (Quellen-Senken-Beziehung)
SL	Saarland
SH	Schleswig-Holstein
SN	Sachsen
ST	Sachsen-Anhalt
SWR	Sickerwasserrate
T	Temperatur
TH	Thüringen
THG	Treibhausgas
THL	THL-Ansatz (gewässerinterne Retention in Abhängigkeit von der hydraulischen Belastung (HL) und der Wassertemperatur (T))

Abkürzung	Erläuterung
UBA	Umweltbundesamt
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

Zusammenfassung

Der übermäßige Eintrag von Stickstoff (N) in Böden, Luft und Wasser hat sich zu einem der drängendsten Umweltprobleme entwickelt. Dazu gehören der Verlust von aquatischer und terrestrischer Biodiversität, die Beeinträchtigung der Luftqualität und der menschlichen Gesundheit, die erhöhte Freisetzung von klimarelevanten Stickstoffgasen, die Eutrophierung der Meere und die Beeinträchtigung der Nutzbarkeit des Grundwassers. Im UBA-Vorhaben DESTINO wurde ein integrierter nationaler Stickstoffindikator entwickelt, der sektor- und medienübergreifend die maximalen zulässigen Emissionen von reaktiven Stickstoff-Verbindungen (N_r) in Deutschland beziffert (Heldstab et al. 2020).

Diese nationale Stickstoffobergrenze beinhaltet allerdings ein konzeptionelles Problem: Auch bei Einhaltung der nationalen Obergrenzen der N_r -Emissionen können lokal Überschreitungen von zulässigen N_r -Emissionen und der daraus resultierenden Immissionen auftreten, wodurch in den betreffenden Gebieten die Qualitätsziele für einzelne Schutzgüter nicht eingehalten werden. Bei der Aggregation auf der nationalen Ebene werden diese Überschreitungen möglicherweise kompensiert durch Regionen, die nur einer geringen Belastung ausgesetzt sind. Derartige Überschreitungen können nur durch regionalisierte (räumlich höher aufgelöste) Obergrenzen abgebildet werden. Deren Einführung bedeutet daher eine unabdingbare Ergänzung des nationalen Stickstoffindikators. Das vorliegende Projekt setzt an diesem Punkt an.

Für jedes Schutzgut wird ein Qualitätsziel festgelegt, das heißt ein Immissionsgrenzwert (Atmosphärenkonzentration, terrestrische Deposition, Gewässerkonzentration), bei dessen Einhaltung das betreffende Schutzgut (menschliche Gesundheit, Ökosysteme, N-sensible Vegetation, Küstengewässer, Grundwasser, Klima) vor schädlichen Einwirkungen durch N_r -Verbindungen geschützt ist. Über Wirkungsindikatoren werden die Qualitätsziele mit den N_r -Emissionen verknüpft. Aus den Immissionsgrenzwerten werden Obergrenzen im Sinne maximal zulässiger Emissionsmengen für die einzelnen N_r -Verbindungen abgeleitet, die in allen räumlichen Betrachtungseinheiten eingehalten werden müssen, damit der "gute Zustand" der betroffenen Schutzgüter gewährleistet ist. Aus der Differenz zwischen den aktuellen Emissionsmengen von N_r -Verbindungen und den zulässigen Emissionen ergibt sich der Minderungsbedarf. Die Berechnungen erfolgen zunächst mit räumlicher Auflösung des GeoGitterDE (1 km²-Raster), die Überschreitungen der Obergrenzen und der Minderungsbedarf werden anschließend für 302 Kreise bzw. Kreisregionen und für Deutschland insgesamt aggregiert. Prämisse ist dabei, dass die erforderliche Emissionsminderung zur Einhaltung der Qualitätsziele im Sinne einer nationalen Herangehensweise - soweit möglich - ausschließlich in Deutschland geleistet wird.

Schutzgut terrestrische und marine Ökosysteme - Eutrophierung durch Stickstoff-Deposition

Als Qualitätsziel für die terrestrischen Ökosysteme wird die Einhaltung von ökosystemspezifische Critical Loads zum Schutz vor Eutrophierung durch Stickstoff (CL_{eutN}) festgelegt. Als Immissionsgrenzwert für die marinen Ökosysteme in den Küstenzonen - also innerhalb der 1-nautischen Meilen-Zone - wird je ein Critical Atmospheric Input-Wert für die Nord- und für die Ostsee verwendet. Die NH_x - und NO_y -Depositionsraten werden aus den UBA-Daten zur Deposition (PINETI-4) übernommen und die NH_3 - und NO_x -Emissionsraten (2019) vom gridding-tool des UBA (GRETA) bereitgestellt. Von GRETA wurden Daten nach dem Inlandsprinzip für die Jahre 2015 – 2020 nach Berichterstattung 2022, GRETA-Version 1.2.0.1 verwendet. Aus dem Critical Loads-Datensatz von Schlutow et al. (2018) werden die niedrigsten CL_{eutN} -Werte für die empfindlichste naturnahe/ halbnatürliche Ökosystem-Fläche auf Kreis- bzw. Kreislängenebene ausgewertet und mit der Ist-Deposition verglichen, wobei drei verschiedene Anforderungsniveaus an

die flächenhafte Zielerfüllung (Median, 90-Perzentil, 100-Perzentil) des Qualitätsziels untersucht werden.

Für die Ermittlung der erforderlichen regionalen NH_3 - und NO_x -Emissionsminderungen müssen die atmosphärischen Transportvorgänge berücksichtigt werden. Die großräumigen Quellen-Senken-Beziehungen zwischen den NO_x - und NH_3 -Emissionen und den NO_y - und NH_3 -Depositionen werden mit dem PINETI-4 Modell abgebildet und in Form von Source-Receptor-Tables (S-R-Tables) dargestellt (Kranenburg et al. 2024). Mittels der S-R-Tables wird auf der Ebene der Bundesländer berechnet, in welchem Umfang die Emissionen in allen Kreisen in Deutschland und, wenn die Minderung im Inland nicht ausreicht, zusätzlich auch im Ausland gemindert werden müssen, damit die ökologisch erforderliche Reduzierung der Deposition im jeweils betrachteten Kreis und in den Küstenzonen erreicht wird. Für das Anforderungsniveau 90-Perzentil, d.h. der Critical Load wird in jeder Kreisregion auf 90 % der Rasterzellen eingehalten, die mit einem CL_{eutN} -Wert belegt sind, ergibt sich ein Minderungsbedarf der NH_3 -Emissionen von 326 kt N a^{-1} und der NO_x -Emission von 258 kt N a^{-1} . Die erforderlichen Emissionsminderungen sind größer als die ökologisch erforderlichen Depositions-Reduzierungen, da ein - teilweise beträchtlicher - Anteil der nationalen Emissionen nicht in Deutschland selbst, sondern im Ausland deponiert. In den Kreisregionen von zwei Bundesländern ist die erforderliche Verminderung der NH_3 -Emission rechnerisch größer als die aktuelle Emission. Die Berechnungen verdeutlichen, dass die ökologischen Anforderungen zum Schutz terrestrischer und mariner Ökosysteme vor Stickstoffdeposition allein durch nationale Bemühungen nicht erreicht werden können, sondern dass zusätzlich auch Emissionsminderungen im europäischen Ausland erforderlich sind.

Schutzgut Oberflächengewässer - Eutrophierung von Küstengewässern

Qualitätsziele sind die Gesamt-Stickstoff-Konzentrationen am Übergangspunkt limnisch-marin bzw. Grenzübergangspunkt als arithmetisches Jahresmittel in den Zuflüssen zur Nordsee von 2,8 mg N(ges) L^{-1} und zur Ostsee von 2,6 mg N(ges) L^{-1} . Für die Donau ist kein Qualitätsziel festgelegt. Die N(ges)-Konzentration und N(ges)-Fracht in den Oberflächengewässern sowie die N(ges)-Einträge in den Flussgebieten werden mit dem Modell MoRE berechnet. Es werden drei Szenarien zur Ausweisung der Minderungsanforderungen ausgewertet. Das Flussgebiet des Rheins wird für die Berechnung des nationalen und der regionalen Minderungsbedarfe nicht betrachtet, da der Rhein an der Grenze zu den Niederlanden das meeresökologische Qualitätsziel von 2,8 mg N L^{-1} seit mehreren Jahren einhält. Für die übrigen Flussgebiete wird auf der Ebene der Kreisregionen ein Minderungsbedarf der N-Einträge von 77 kt N a^{-1} berechnet, was 36 % der N-Einträge (Mittel 2016 - 2018) entspricht.

Schutzgut Grundwasserqualität - Nitrateintrag

Als Qualitätsziel muss ein Nitratgehalt von 50 mg NO_3 L^{-1} an allen Messstellen bzw. flächendeckend im Grundwasser eingehalten werden. Mangels einer Karte der Nitratkonzentration im Grundwasser in Deutschland wird als Proxy-Größe die NO_3 -Konzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung als Bewertungsgröße berechnet. Mit zwei Größen zum Wasserfluss aus dem Boden in das Grundwasser (Sickerwasserrate, Grundwasserneubildung), fünf verschiedenen Ansätzen zum Überschuss der Stickstoff-Flächenbilanz der Landwirtschaft und zwei verschiedenen Flächenbezügen (nur Landwirtschaftsfläche, gesamte Fläche) werden insgesamt 20 Varianten der NO_3 -Konzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung berechnet. Für die Variante, die als Komponente der nationalen N-Obergrenze gewählt wird, ergibt sich ein Minderungsbedarf für den hydrosphärischen N-Überschuss auf Landwirtschaftsflächen (Mittel 2010 - 2019) von 374 kt N a^{-1} (38 % des N-Überschuss).

Schutzgut Klima - Lachgas-Emissionen

Das Qualitätsziel wird aus den Minderungszielen des Klimaschutzgesetzes in der Fassung v. 18. August 2021 für die sechs Sektoren Industrie, Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft bis zum Jahr 2030 abgeleitet, gewichtet mit den Anteilen der Sektoren an der gesamten N_2O -Emission. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Ziel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist kein Qualitätsziel im engeren Sinne ist, sondern ein Umwelthandlungsziel. Als sektorspezifische Minderungsziele der N_2O -Emission ergeben sich damit 16,5 % für Sektor Landwirtschaft und 44,0 % für die übrigen fünf Sektoren. Die räumliche Verteilung der N_2O -Emissionen erfolgt über GRETA. Der Minderungsbedarf beträgt insgesamt 14 kt N (23 %).

Schutzgut Vegetation - Ammoniak-Konzentration in der Luft

Als Qualitätsziel gelten Critical Level von maximal $3 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft für höhere Pflanzen und maximal $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft für N-empfindliche Flechten und Moose (Kryptogamen), die im Jahresmittel nicht überschritten werden sollen. Die NH_3 -Konzentration (2019) für die Modellhöhe von 2,5 m über der Bodenoberfläche wird aus PINETI-4, die NH_3 -Emission (2019) aus GRETA übernommen. Der Critical Level von $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ wird entsprechend einer deutschlandweiten Karte der N-empfindlichen Ökosystemtypen, basierend auf der BERN-Datenbank (Bioindication for Ecosystem Regeneration towards Natural conditions; Schlutow et al. 2018), denjenigen Ökosystemen zugeordnet, die von empfindlichen Flechten und Moosen (Kryptogamen) charakterisiert sind. Das Qualitätsziel von $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft gilt dann für diejenigen Kreisregionen, in denen empfindliche Vegetation auf mehr als 10 % der Rasterzellen vorkommt. Die erforderliche Verminderung der NH_3 -Emissionen wird ebenfalls mit Hilfe der S-R-Tables auf die Kreise verteilt. Für das Bundesgebiet insgesamt ergibt sich ein Minderungsbedarf von 354 kt N (75 % der NH_3 -Emissionen in 2019).

Schutzgut Menschliche Gesundheit - Stickstoffdioxid-Konzentration in der Luft

Als Qualitätsziel für die menschliche Gesundheit wird der WHO-Richtwert von $10 \mu\text{g NO}_2 \text{ m}^{-3}$ Luft im Jahresmittel (WHO 2021) herangezogen. Flächenhafte Daten der NO_2 -Konzentration werden durch die Optimale Interpolation (UBA 2023a) bereitgestellt und NO_x -Emissionen (2020) werden aus GRETA (nach Inlandsprinzip für die Jahre 2015 – 2020 nach Berichterstattung 2022, GRETA-Version 1.2.0.1) übernommen. Die Emissions-Konzentrations-Beziehung wird als Regressionsfunktion zwischen den NO_x -Emissionen und der NO_2 -Konzentration (jeweils gemittelt über die Fläche der Kreisregionen) ermittelt. Für insgesamt 250 der 302 Kreisregionen ergibt sich ein Minderungsbedarf von zusammen 211 kt $\text{NO}_x\text{-N}$ (61 % der NO_x -Emissionsmenge in Deutschland). In 50 Kreisregionen wird das Qualitätsziel bereits jetzt eingehalten, das heißt es besteht kein Minderungsbedarf, obwohl die berechnete zulässige Emission niedriger liegt als die Ist-Emission. Diese Überschreitung wird aber nicht als erforderliche Verminderung betrachtet, da in diesen Kreisregionen der Wert des Wirkungsindikator NO_2 -Konzentration keinen Minderungsbedarf begründet. In zwei Kreisregionen ist der Ist-Wert der NO_x -Emission niedriger als die berechnete zulässige Emission; in diesen Fällen wird der Ist-Wert als zulässige Emission übernommen (Verschlechterungsverbot).

Nationale Stickstoff Obergrenze und regionaler Minderungsbedarf

Um alle berücksichtigten Qualitätsziele zum Schutz von Umwelt und Gesundheit einhalten zu können, sind die Stickstoffemission um insgesamt 55 %, d.h. um $1.136 \text{ kt N a}^{-1}$ zu reduzieren. Die maximal zulässige Emission, d. h. die resultierende Obergrenze für die Stickstofffreisetzung in Deutschland beträgt 932 kt N a^{-1} .

Gegenüber dem Vorläuferprojekt DESTINO, in dem der nationale Stickstoff-Indikator ohne regionalisierte Obergrenzen berechnet wurde, sind deutliche Unterschiede in den Ergebnissen festzustellen. Mit 2.064 kt N ist die Ist-Emission nach dem hier durchgeführten Ansatz rund 30 % höher als in DESTINO. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, dass in DESTINO für das Schutzgut Grundwasser die Ist-Emission aus der Landwirtschaft nur als N-Überschuss in denjenigen Rasterzellen berücksichtigt wurde, in denen eine Überschreitung der Nitratkonzentration im Sickerwasser auftrat, während im vorliegenden Projekt die Ist-Emission der Landwirtschaft als hydrosphärischer N-Überschuss auf der gesamten Landwirtschaftsfläche in die nationale Emissionssumme aufgenommen wird. Umgekehrt wurde in DESTINO beim Schutzgut Oberflächengewässer das Flussgebiet Rhein noch einbezogen, während im vorliegenden Ansatz für diese FGE kein Minderungsbedarf mehr auftritt. Die Emissionsmengen der Luft-getragenen N-Verbindungen sind zwischen dem DESTINO-Bezugsjahr (NH_3 , N_2O und NO_x : Jahr 2015) und der hier vorgestellten Berechnung (Bezugsjahre 2019 bzw. 2020) bereits weiter zurückgegangen.

Mit Blick auf die einzelnen Stickstoffverbindungen ergibt sich für Ammoniak ein Minderungsbedarf in Höhe von 391 kt NH_3 -N, welcher aus den Qualitätszielen für die Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme (Critical Loads) und Vegetation (Critical Level) resultiert. Für Stickstoffoxide besteht ein Minderungsbedarf von 281 kt NO_x -N, der sich aus den Qualitätszielen für die Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme (Critical Loads) und Gesundheit (NO_2 -Konzentration) ergibt. Diese beiden Werte sind im Gegensatz zur Projekt-Prämisse, die erforderlichen Emissionsminderungen allein mit nationalen Anstrengungen zu erreichen, bereits mit Einbezug von Emissionsminderungen im Ausland berechnet. Trotzdem kann die erforderliche Verminderung nicht vollständig erreicht werden, selbst bei Annahme von Null-Emission im Inland. Für NH_3 verbleiben dann immer noch 16 Kreisregionen, in denen der erforderliche Minderungsbetrag größer ist als die Ist-Emission. Diese "negativen" Minderungsbeträge, das heißt die erforderlichen Minderungsmengen sind größer als die Ist-Emissionen in den 16 Kreisregionen, summieren sich auf 4,4 kt N für NH_3 .

Für die übrigen Schutzgüter kann die erforderliche Verminderung durch Reduktion der Emissionen ausschließlich im Inland geleistet werden. Mit 973 kt N entsprechend rund 47 % der gesamten nationalen Emission von reaktiven N-Verbindungen stellt der hydrosphärische N-Überschuss der Landwirtschaftsflächen die größte Emissionsquelle dar. Zur Einhaltung einer potenziellen NO_3 -Konzentration im Sickerwasser von 50 mg NO_3 L-1 muss dieser N-Überschuss um 374 kt N (38 %) vermindert werden.

Mit rund 36 % liegt der relative Minderungsbedarf der N(ges)-Fracht in Oberflächengewässern in einer ähnlichen Größenordnung. Da das Qualitätsziel der N(ges)-Konzentration im Rhein bereits eingehalten wird und für die Donau kein Qualitätsziel festgelegt ist, betrifft die Minderungserfordernis nur die übrigen Flussgebiete in Deutschland mit einer Fläche von zusammen rund 194.200 km² (125 Kreisregionen), in denen der N(ges)-Eintrag um zusammen 77 kt N zurückgehen muss.

Der geringste absolute und relative Minderungsbedarf besteht für Schutzgut Klima, zur Einhaltung der sektorbezogenen Vorgabe des Klimaschutzgesetzes müssen die N_2O -Emissionen nur um rund 23 % entsprechend 14 kt N gesenkt werden.

Für das Schutzgut Menschliche Gesundheit wird der Minderungsbedarf in den meisten Kreisregionen bereits durch die Minderung für die Terrestrischen Ökosysteme abgedeckt.

Für NH_3 und NO_x werden jeweils zwei Werte der zulässigen Emission und der erforderlichen Verminderung berechnet, für NH_3 für die Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme und Vegetation, für NO_x für die Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme und menschliche Gesundheit. Damit in der nationalen N-Obergrenze Emissionen und Minderungsbedarf für N-Verbindungen nicht doppelt

gezählt werden, wird bei der Summation für die Kreisregionen nur der jeweils niedrigere der beiden Werte der zulässigen NH_3 - bzw. NO_x -Emission und der höhere Wert der erforderlichen Verminderung berücksichtigt. Für NH_3 wird die erforderliche Minderung in 192 Kreisregionen von der höheren Anforderung an das Schutzgut Vegetation bestimmt, in 110 Kreisregionen durch die Anforderung des Schutzgutes Terrestrische Ökosysteme. Die erforderliche Verminderung für NO_x ergibt sich überwiegend durch das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme (231 Kreisregionen), nur in 71 Kreisregionen ist die Anforderung an das Schutzgut menschliche Gesundheit höher.

Aufgrund des Verschlechterungsverbots wird in denjenigen Kreisregionen, in denen der Ist-Wert der Emission einer N-Verbindung schon niedriger ist als die berechnete zulässige Emission, der Ist-Wert als zulässige Emission übernommen. Dies betrifft für den N-Überschuss neun Kreisregionen, für NO_2 in Bezug auf das Schutzgut Menschliche Gesundheit zwei Kreise und für die N(ges)-Fracht einen Kreis.

Zusammenfassend zeigt sich, dass in allen Kreisregionen Handlungsbedarf erforderlich ist und Minderungsbeiträge geleistet werden müssten. In den meisten Kreisregionen (ca. 80% der Fläche Deutschlands) ist die flächenbezogene Gesamt-Minderungserfordernis dabei eher gering ($<40 \text{ kg N ha}^{-1}$). Für 16 Kreisregionen zeigt sich hingegen ein hoher flächenbezogener Minderungsbedarf von mehr als 80 kg N ha^{-1} . Neun der Kreisregionen mit hohem Minderungsbedarf sind hauptsächlich landwirtschaftlich geprägt, sieben hingegen haben eher urbane Prägung. In den landwirtschaftlich geprägten Kreisen mit hoher Viehbesatzdichte bilden die Beeinträchtigungen der Schutzgüter Ökosysteme, Vegetation und Grundwasser die Hauptbelastungen. Die Kreisregion Vechta weist dabei mit 169 kg N ha^{-1} den größten flächenbezogenen Minderungsbedarf in Deutschland auf, wovon 59 % auf die Verminderung der Ammoniak-Emission und 30 % auf die Reduzierung des Nitratüberschuss entfallen. Auch in den weiteren landwirtschaftlich geprägten Kreisregionen mit hohem Minderungsbedarf (Cloppenburg, Grafschaft Bentheim, Oldenburg, Emsland, Borken, Wesermarsch, Cuxhaven und Warendorf) dominieren die Ammoniak- und Nitrat-Emissionen den Gesamt-Minderungsbedarf. Die Großstädte bzw. urban geprägten Kreisregionen mit hohem flächenbezogenen Minderungsbedarf sind Hamburg, Bremen, Rhein-Pfalz-Kreis mit Stadt Ludwigshafen, Berlin, Neuss und Rhein-Erft-Kreis sowie die Stadt Köln. Der erforderliche Minderungsbedarf in diesen Regionen liegt vor allem in den Stickstoffoxidemissionen aus Verkehr und Industrie bzw. den Stickstofffrachten aus der Siedlungswasserwirtschaft.

Eine systematische Analyse der Unsicherheiten der Ergebnisse zu den Obergrenzen der regionalen Emissionen und den erforderlichen Minderungen ist nur begrenzt möglich. Dafür fehlen für die Berechnungsverfahren der meisten Schutzgüter sowohl Informationen zur Unsicherheit der Modellstruktur und Modellparameter als auch zur Variabilität der Inputgrößen. In einer qualitativen Bewertung wird aufgezeigt, dass alle Wirkungsindikatoren und Emissionen mit Unsicherheiten behaftet sind, jedoch ohne dass deren Größenordnung näher beziffert werden könnte. Für den Ist-Wert des nationalen integrierten Stickstoffindikators des DESTINO-Projekts schätzten Heldstab et al. (2020) einen Unsicherheitsbereich von $\pm 25 \%$ bis $\pm 30 \%$. Für die Ergebnisse zu den einzelnen Schutzgütern sowie für das nationale Aggregat im hier vorliegenden Projekt ist von einer Unsicherheit in einem vergleichbaren Bereich auszugehen.

Mit der Entwicklung einer nationalen und regional aufgelösten Obergrenze für reaktiven Stickstoff wurde zum Teil methodisches Neuland betreten. Nach Kenntnisstand der Autorinnen und Autoren ist dies international der erste Versuch, in einer gemeinsamen Auswertung für alle N-sensiblen Schutzgüter und alle relevanten N-Verbindungen die Höhe und die räumliche Verteilung der Überschreitung der Qualitätsziele dieser Schutzgüter mit hoher räumlicher Auflösung

darzustellen. Auch die Ableitung regionaler Obergrenzen für Stickstoff, die alle relevanten Stickstoffverbindungen gleichermaßen einbeziehen, ist mit diesem Projekt erstmalig erfolgt. Infolge der kurzen Projektlaufzeit, der methodischen Einschränkungen und der begrenzten Datenverfügbarkeit bestehen in einigen Bereichen durchaus Ansätze für weitere Verbesserungen.

Summary

The excessive input of N into soil, air and water has become one of the most pressing environmental problems. These include the loss of aquatic and terrestrial biodiversity, the impairment of air quality and human health, the increased release of climate-relevant nitrogen gases, the eutrophication of the oceans and the impairment of the usability of groundwater. In the UBA project DESTINO, an integrated national nitrogen indicator was developed that quantifies the maximum permissible emissions of reactive nitrogen compounds (N_r) in Germany across all sectors and media (Heldstab et al. 2020).

However, the national nitrogen indicator implies a conceptual problem: even if the emissions ceilings for reactive nitrogen compounds are met at the national level, environmental quality targets can still be violated from a regional perspective. This is where the present project comes in: Even if the national quality targets for N_r emissions are adhered to, local exceedances of tolerable N_r emissions and the resulting immissions can occur, which means that environmental quality targets are violated in the areas concerned. When aggregated at national level, these exceedances may be compensated for by regions that are only exposed to low levels of pollution. Such exceedances can only be mapped using regionalised indicators with higher spatial resolution. Their introduction is therefore an indispensable extension of the national nitrogen indicator.

A quality target is defined for each environmental resource, i.e. an immission limit value (atmospheric concentration, terrestrial deposition, water concentration), compliance with which protects the relevant environmental good (human health, ecosystems, N-sensitive vegetation, coastal waters, groundwater, climate) from harmful effects of N_r compounds. Impact indicators are used to link the quality targets with the N_r emissions. The immission values are then used to derive boundaries (synonym: tolerable emissions) for the individual N_r emissions, which must be complied with in all spatial units in order to ensure the 'good status' of the environmental goods concerned. The reduction requirement is derived from the difference between the current emission quantities of N_r compounds and the tolerable emissions. The calculations are first carried out with a spatial resolution of the GeoGitterDE (1 km² grid), the exceedances of the emission ceilings and the reduction requirement are then aggregated to N boundaries for 302 district regions and for Germany as a whole. The premise here was that the necessary reduction in emissions to meet the quality targets in the sense of a national approach should - as far as possible - be achieved exclusively in Germany.

Terrestrial and marine ecosystems - Eutrophication by nitrogen deposition

Compliance with ecosystem-specific critical loads for protection against eutrophication by nitrogen (CLeutN) is set as the quality target for terrestrial ecosystems. A Critical Atmospheric Input value for the North Sea and for the Baltic Sea is used as the tolerable immission for marine ecosystems in the coastal zones (within the 1-nautical mile zone). The NH_x and NO_y deposition rates are taken from the UBA deposition modelling (PINETI-4) and the NH_3 and NO_x emission rates (2019) were taken from the UBA gridding tool (GRETA). Emission was used according to the domestic principle for the years 2015 – 2020 after reporting 2022 with GRETA version 1.2.0.1. From the critical loads dataset by Schlutow et al. (2018), the lowest CLeutN values for the most sensitive natural/semi-natural ecosystem area are analysed at district level and compared with the current deposition, whereby three different requirement levels for the area-based target fulfilment (median, 90th percentile, 100th percentile) of the quality target are examined.

To determine the regional NH_3 and NO_x emission reductions, the atmospheric transport processes must be taken into account. The large-scale source-sink relationships between emissions

of NO_x and NH_3 and depositions of NO_y and NH_3 are mapped using the PINETI-4 model and presented in the form of source-receptor tables (S-R tables) (Kranenburg et al. 2024). The S-R tables are used to calculate the extent to which emissions must be reduced in all districts and district regions in Germany and abroad in order to achieve the ecologically required reduction in deposition in the respective district under consideration (and in the coastal zones). For the 90th percentile requirement level (the critical load is complied with in 90% of the grid cells that are assigned a CL_{eutN} value in each district region), assuming emission reductions abroad as well, this results in a reduction requirement for NH_3 emissions of 326 kt N a^{-1} and for NO_x emissions of 258 kt N a^{-1} . The required emission reductions are greater than the ecologically necessary deposition reductions, as a (sometimes considerable) proportion of national emissions are not deposited in Germany itself, but abroad. In the district regions of two federal states, the required reduction in NH_3 emissions is calculatory greater than the current emissions. The calculations make it clear that the ecological requirements for protecting terrestrial and marine ecosystems from nitrogen deposition cannot be achieved by national efforts alone, but that additional emission reductions are also required in other European countries.

Surface waters - Eutrophication of coastal waters

The quality target are total nitrogen concentrations (annual mean value, arithmetically averaged) in the tributaries to the North Sea of $2.8 \text{ mg N(total) L}^{-1}$ and to the Baltic Sea of $2.6 \text{ mg N(total) L}^{-1}$ in the limnic-marine transition points or border crossing points. No quality target applies to the Danube. The N(total) concentration and N(total) load in the surface waters and the N(total) inputs in the river basins are calculated using the MoRE model. Three scenarios are analysed, with which the requirement for the N(total) concentration at the transition point is calculated back to the concentrations in the sub-catchments. The Rhine river basin is not considered calculating the national and regional reduction requirements, as the Rhine at the border with the Netherlands has complied with the marine ecology requirement of 2.8 mg N L^{-1} for several years. For the other river basins, a reduction requirement for N inputs of 77 kt N a^{-1} is calculated (summed up over the regional districts), which corresponds to 36 % of N inputs (mean 2016 - 2018).

Groundwater quality - Nitrate pollution

As a quality target, a nitrate content of $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ must be complied with at all measuring points or over the entire area of the groundwater. In the absence of a map of nitrate concentrations in groundwater in Germany, the NO_3 concentration in seepage water or in groundwater recharge is calculated as a proxy parameter for the assessment. Using two variables for the water flow from the soil into the groundwater (seepage water rate, groundwater recharge), five different approaches for the surplus of the nitrogen soil surface balance of agriculture and two different area references (only agricultural land, total area), a total of 20 variants of the NO_3 concentration in the seepage water or in the groundwater recharge are calculated. For the variant selected as a component of the national N boundary, this results in a reduction requirement for the hydrospheric N surplus on agricultural land (average 2010 - 2019) of 374 kt N a^{-1} (38 % of the N surplus).

Climate - Nitrous oxide emissions

The quality target is derived from the greenhouse gas reduction targets of the German Climate Protection Act (as amended on 18 August 2021) for the six sectors (industry, energy production, residential, transport, agriculture, waste) by 2030, weighted by the sectors' shares of total N_2O emissions. Note: the GHG reduction target is not a quality target in a strikt sense, but an environmental action target. This results in sector-specific reduction targets for N_2O emissions of 16.5 %

for the agriculture sector and 44.0 % for the other five sectors. The spatial distribution is based on the map of N₂O emissions data spatially distributed with the Gridding Emission Tool for ArcGIS (GRETA). The reduction requirement totals to 14 kt N (23 %).

Vegetation - Ammonia concentration in the air

The quality target is an annual average NH₃ concentration (air) (NH₃ critical level) of a maximum of 3 µg NH₃ m⁻³ air for higher plants and a maximum of 1 µg NH₃ m⁻³ air for sensitive bryophytes and lichens (cryptogams). The NH₃ concentration (2019) for the model height of 2.5 m above the ground surface is taken from PINETI-4 model, the NH₃ emission data (2019) from the UBA gridding tool (GRETA). The critical level of 1 µg NH₃ m³ is assigned to ecosystems characterised by lichens and bryophytes (cryptogams) according to a Germany-wide map of N-sensitive ecosystem types based on the BERN database (Bioindication for Ecosystem Regeneration towards Natural conditions; Schlutow et al. 2018). The quality target of 1 µg NH₃ m⁻³ air then applies to those district regions in which sensitive vegetation occurs in more than 10 % of the grid cells. The required reduction in NH₃ emissions is also distributed among the districts using the S-R tables. For the federal territory as a whole, this results in a reduction requirement of 354 kt N (75 % of NH₃ emissions in 2019).

Human health - Nitrogen dioxide concentration in the air

The WHO guideline value for NO₂ concentration of 10 µg NO₂ m⁻³ air as an annual average WHO (2021) is used as the quality target for human health. NO₂ exposure and NO_x emission data (2020) are spatially distributed with the Gridding Emission Tool for ArcGIS (GRETA). The emission-concentration relation is determined as a regression function between the NO_x emissions and the NO₂ concentration, each averaged over the area of the district regions. For a total of 250 out of 302 district regions, this results in a reduction requirement totalling 211 kt N (61% of the NO_x emissions in Germany). In 50 district regions, the quality target is already being met, i.e. there is no need for a reduction, although the tolerable emission calculated using the methodology applied here is lower than the actual emission. However, this difference is not listed as a necessary reduction, as the value of the NO₂ concentration impact indicator in these district regions does not justify a need for reduction. In two district regions, the actual value of the NO_x emission is lower than the calculated tolerable emission; in these cases, the actual value is adopted as the tolerable emission (prohibition of deterioration).

National nitrogen boundary and regional reduction requirements

To comply with all the environmental quality and health protection targets, nitrogen emissions must be reduced by a total of 55 %, i.e. by 1,136 kt N a⁻¹. The maximum tolerable emission, i.e. the resulting limit for the release of nitrogen into the environment in Germany, is 932 kt N a⁻¹. Compared to the national nitrogen indicator of the DESTINO project - i.e. without regionalised quality targets - there are clear differences in the results. At 2,064 kt N, the current emission according to the approach used here is around 30 % higher than in DESTINO. This is mainly due to the fact that in DESTINO the actual emissions from agriculture were only considered as N surplus in those grid cells where the nitrate concentration in the leachate was exceeded, whereas in the present project the actual emissions from agriculture are included in the national emission sum as the hydrospheric N surplus on the entire agricultural area. Conversely, the Rhine river basin was still included in DESTINO for surface waters, whereas in the present approach there is no longer a need for reduction for this catchment. The emission quantities of airborne N-compounds have already decreased further between the DESTINO reference year (NH₃, N₂O and NO_x: year 2015) and the calculation presented here (reference years 2019 or 2020).

Evaluating the single nitrogen species there is a reduction requirement of 391 kt N for NH_3 emissions, which results from the quality targets (critical loads, -levels and -atmospheric inputs) for terrestrial and marine ecosystems and vegetation. For NO_x emission a reduction requirement of 281 kt $\text{NO}_x\text{-N}$ was calculated, which results from a combination of the quality targets for terrestrial and marine ecosystems and human health. In contrast to the project premise of achieving the necessary emission reductions with national efforts alone, these two values are already calculated with the inclusion of needed emission reductions abroad. Nevertheless, the required reduction calculated with the existing methodology cannot be achieved in full, even assuming zero domestic emissions. For NH_3 there are still 16 district regions in which the required reduction amount is greater than the current emission. These 'negative' reduction amounts, i.e. the required reduction quantities are greater than the current emissions in the 16 district regions, add up to 4,4 kt N for NH_3 .

For the other environmental goods, the required reduction can be achieved by reducing emissions domestically. At 973 kt N, corresponding to around 47 % of total national emissions of reactive N compounds, the hydrospheric N surplus from agricultural land is the largest source of emissions. To maintain a potential NO_3 concentration in the leachate of $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$, this N surplus must be reduced by 374 kt N (38 %).

At around 36 %, the relative reduction requirement for the N(total) load in surface waters is of a similar order of magnitude. As the quality target for N(total) concentrations in the river Rhine is already complied with and no quality target has been set for the river Danube the reduction requirement only affects the other river basins in Germany with an area of around $194,200 \text{ km}^2$ (125 district regions), in which the N(total) input must be reduced by a total of 77 kt N.

The lowest absolute and relative reduction requirement is for climate protection; to comply with the sector-related target of the Climate Protection Act, N_2O emissions only need to be reduced by around 23 %, corresponding to 14 kt N. The reduction requirement for human health is already covered by the reduction for terrestrial ecosystems in most of the district regions.

For NH_3 and NO_x , two values of the tolerable emission and the required reduction are calculated in each case, for NH_3 for the protected goods terrestrial ecosystems (critical loads) and vegetation (NH_3 concentration), for NO_x for the protected goods terrestrial ecosystems (critical loads) and human health (NO_2 concentration). To ensure that emissions and reduction requirements for N compounds are not counted twice in the national N indicator, only the lower of the two values for tolerable NH_3 and NO_x emissions and the higher value for the required reduction are taken into account in the summation for the district regions. For NH_3 , the required reduction in 192 district regions is determined by the higher requirement for the environmental good vegetation, and in 110 district regions by the requirement for the terrestrial ecosystems. The reduction requirement for NO_x is predominantly determined by the protected resource terrestrial ecosystems; only in 71 district regions the requirement for the environmental good human health is higher.

Due to the prohibition of deterioration, in those district regions in which the actual value of the emission of an N compound is already lower than the calculated tolerable emission, the actual value is adopted as the tolerable emission. This applies to nine districts for the N-surplus, two districts for NO_2 with respect to human health, and one district for the N(total) load.

In summary, it is clear that action is needed in all district regions and that reduction contributions must be made. In most district regions (approx. 80% of Germany's area), the total reduction requirement per unit area is rather low ($<40 \text{ kg N ha}^{-1}$). In contrast, 16 district regions show a high area-related reduction requirement of more than 80 kg N ha^{-1} . Nine of the district regions

with high reduction requirements are mainly agricultural, while seven are more urban in character. In the agricultural districts with high livestock densities, the main pressures are the adverse effects on ecosystems, vegetation and groundwater. The district region of Vechta has the highest area-related reduction requirement in Germany at 169 kg N ha^{-1} , of which 59% is attributable to the reduction of ammonia emissions and 30% to the reduction of nitrate surplus. In other agricultural districts with high reduction requirements (Cloppenburg, Grafschaft Bentheim, Oldenburg, Emsland, Borken, Wesermarsch, Cuxhaven and Warendorf), ammonia and nitrate emissions also dominate the total reduction requirement. The large cities and urban districts with high area-related reduction requirements are Hamburg, Bremen, the Rhine-Palatinate district with the city of Ludwigshafen, Berlin, Neuss and the Rhine-Erft district, as well as the city of Cologne. The reduction requirements in these regions mainly relate to nitrogen oxide emissions from transport and industry and nitrogen loads from urban water management.

A systematic analysis of the uncertainties of the results on the tolerable regional emissions and required reductions is only possible to a limited extent. Information on the uncertainty of the model structure and model parameters as well as on the variability of the input variables is missing for the calculation methods of most of the environmental goods. A qualitative assessment shows that all impact indicators and emissions are subject to considerable uncertainties in some cases, but without being able to quantify their magnitude in more detail. For the results of the national integrated nitrogen indicator of the DESTINO project, Heldstab et al. (2020) estimated an uncertainty range of $\pm 25 \%$ to $\pm 30 \%$. The results for the individual environmental goods and for the national aggregate in this project can be assumed to have an uncertainty in a comparable range.

The development of a national and regionally resolved limit for reactive nitrogen broke new methodological ground. As far as the authors are aware, this is the first international attempt to present the level and spatial distribution of exceedances of the quality targets of these protected goods at a high spatial resolution in a joint evaluation for all N-sensitive environmental goods and all relevant N compounds. This project also marked the first time that regional upper limits for reactive nitrogen were derived, taking all relevant nitrogen compounds into account equally. Due to the short project timeline, methodological limitations and limited data availability, there is certainly room for further improvements.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts hat der Mensch den globalen Stickstoff-(N)-Kreislauf durch die Herstellung von N-haltigem Mineraldünger mittels des Haber-Bosch-Verfahrens, durch den Anbau von N-fixierenden Pflanzen und durch die erhebliche Ausweitung von Hochtemperatur-Verbrennungsprozessen massiv verändert. Der übermäßige Eintrag von N in Böden, Luft und Wasser hat sich, neben der Emission von Treibhausgasen (THG), zu einem der drängendsten Umweltprobleme entwickelt. Dazu gehören der Verlust von aquatischer und terrestrischer Biodiversität, die Beeinträchtigung der Luftqualität und der menschlichen Gesundheit, die erhöhte Freisetzung von klimarelevanten Stickstoffgasen, die Eutrophierung der Meere und die Beeinträchtigung der Nutzbarkeit des Grundwassers.

Bei vielen dieser Umweltprobleme sind in Deutschland nach wie vor keine oder nur geringe positive Entwicklungen erkennbar (Aubrecht et al. 2021, Bach et al. 2025). 68 % der Fläche empfindlicher Ökosysteme Deutschlands waren 2015 durch zu hohe Stickstoffeinträge bedroht (UBA 2021). Der Grenzwert von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ im Grundwasser wird seit 2008 jedes Jahr nahezu unverändert an etwa jeder sechsten Messstelle in Deutschland überschritten, wie die vierjährlich veröffentlichten Nitratberichte der Bundesregierung belegen (Bach 2020). Das Ziel, den N-Überschuss der Landwirtschaft (Gesamtbilanz) im Mittel der Jahre 2028 bis 2032 auf 70 kg N ha^{-1} landwirtschaftlich genutzter Fläche (LF) zu vermindern, wird nach dem derzeitigen Trend (Stand bis 2019) nicht erreicht (Aubrecht et al. 2021, Häußermann et al. 2019). Der Anteil der Landwirtschaft an der Emission von THG insgesamt beträgt in Deutschland rund 7 %, von den Lachgas-(N_2O -)Emissionen entfallen rund zwei Drittel auf die Landwirtschaft. Der Critical Level der Ammoniak(NH_3)-Konzentration in der Luft für N-empfindliche Flechten und Moose (Kryptogamen) von $1 \text{ } \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft wird auf mehr als 99 % der Flächen in Deutschland mit Vorkommen dieser Pflanzen überschritten (Kapitel 6.1). Zum Schutz der menschlichen Gesundheit hat die WHO (2021) den Richtwert für die Stickstoffdioxid(NO_2)-Konzentration in der Luft auf $10 \text{ } \mu\text{g NO}_2 \text{ m}^{-3}$ Luft abgesenkt, der auch in eine EU-Richtlinie übernommen werden soll.

Angesichts dieser erheblichen und weit verbreiteten Umweltbelastungen durch die Emission von reaktiven N-Verbindungen (N_r) hat der Sachverständigenrat für Umweltfragen bereits 2015 gefordert, eine N-Minderungsstrategie für Deutschland zu entwickeln und umzusetzen (SRU 2015). Die Bundesregierung hat mit ihrem ersten Stickstoff-Bericht (2017) auf die Dringlichkeit des Problems und den Ressort-übergreifenden Handlungsbedarf aufmerksam gemacht (BMUB 2017). Als ein Schritt auf diesem Weg wurde mit dem UBA-Vorhaben DESTINO (DEutsche STickstoffflüsse, INdikatoren und Objectives) dazu unter anderem ein integrierter nationaler Stickstoffindikator entwickelt, der sektor- und medienübergreifend die maximale Belastungsgrenze für den N_r -Gesamteintrag bzw. die N_r -Gesamtemissionen an n Deutschland beziffert (Bach et al. 2020, Heldstab et al. 2020, Geupel et al. 2021). Dieses nationale Stickstoffziel errechnet sich als Summe der maximal zulässigen NO_x -, NH_3 - und N_2O -Emissionen in die Atmosphäre sowie des Nitrat-Überschuss in der Landwirtschaft, womit die Qualitätsziele für die sechs N-sensiblen Schutzgüter eingehalten würden. DESTINO zufolge betrug der Wert des integrierten nationalen Stickstoffindikators im Ist-Zustand $1.574 \text{ kt N a}^{-1}$ (Bezugsjahr 2015), als ökologisch zulässige Emissionsmenge wurden $1.058 \text{ kt N a}^{-1}$ ermittelt (Mittel 2016 – 2018; Heldstab et al. 2020).

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Projekte unterstreicht das Umweltbundesamt die Notwendigkeit einer übergreifenden Betrachtung des N-Kreislaufs und betont die Bedeutung eines integrierten Stickstoffziels als Leitlinie für die zukünftige Stickstoffpolitik in Deutschland (UBA 2021, Oelmann et al. 2021).

Der nationale Stickstoffindikator beinhaltet allerdings ein konzeptionelles Problem, worauf auch im DESTINO-Bericht hingewiesen wird: die meisten Teilziele werden aus Daten hochgerechnet bzw. abgeleitet, die nur für das Bundesgebiet als Ganzes vorliegen oder die überhaupt keinen Raumbezug aufweisen. Mit diesem Konzept sind Emissionskonstellationen möglich, mit denen zwar das nationale Stickstoffziel in der Summe bzw. im Mittel für Deutschland eingehalten wird, in einzelnen Regionen jedoch weiterhin Überschreitungen von Umweltqualitätszielen vorkommen (Heldstab et al. 2020). Mit anderen Worten: Für die flächendeckende Einhaltung der Qualitätsziele ist die Erreichung des Zielwerts des integrierten Stickstoffindikators zwar eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung. Aus dem Erreichen des nationalen Zielwerts kann deshalb nicht geschlossen werden, dass die Qualitätsziele überall (flächendeckend) eingehalten werden, sondern nur im räumlichen Mittel.

Die Problematik der Bewertung anhand eines Fracht-bezogenen im Vergleich zu einem Flächen-bezogenen Indikator wird von Heldstab et al. (2020) am Beispiel der Eutrophierung terrestrischer Ökosysteme durch NH_3 verdeutlicht. Mit den PINETI-3-Daten (Schaap et al. 2018) zur NH_x -Deposition liegt dafür auch ein flächenbezogener Indikator vor, demzufolge im Jahr 2015 68 % aller Flächen in Deutschland mit definierter Belastungsgrenze über dem kritischen Eintragswert (Critical Load) lagen. Ein Indikator mit Flächenbezug würde damit als Wert der Zielüberschreitung 312 % (berechnet als $100 \% / [1 - 0,68]$) ausweisen, was erheblich höher ist als der Wert von 141 % für den frachtbezogenen Indikator.

Das Thema Regionalisierung von Qualitätszielen für N-sensible Umweltgüter in Verbindung mit der Abschätzung der Belastungssituation, integrierend für mehrere Schutzgüter und Emissionsbereiche, ist nach Kenntnisstand der Autor*innen in der Literatur bislang kaum vertreten. Von Vries et al. (2021) wurde erstmalig ein Ansatz vorgestellt, mit dem räumlich differenzierte Obergrenzen für den landwirtschaftlichen N-Überschuss in Bezug auf die drei Wirkungsbereiche terrestrische Biodiversität, Eutrophierung von Oberflächengewässern und NO_3 -Belastung des Grundwassers in der EU ermittelt wurden. Die N-Bilanzen und N-Obergrenzen wurden dort zunächst separat für rund 40.000 Boden-Klima-Hangneigungs-Kombinationen in der EU berechnet und anschließend zur Darstellung und Interpretation der Ergebnisse auf NUTS3-Ebene¹ aggregiert. Die Emission der relevanten N_r -Verbindungen aus der Landwirtschaft wurde dabei (mit zum Teil stark vereinfachenden Annahmen) mit dem Modell MITERRA-EUROPE (Velthof et al. 2009) berechnet. Vom Bund-Länder-Fachgespräch N-Bilanz (FGNB 2017) wird die Verknüpfung von Critical Surplus (CS; kritischen Überschüssen) mit Critical Levels (CL_{vl}; maximal zulässige Konzentrationen) bzw. Critical Loads (CL; kritische Eintragsraten bzw. Depositionen) systematisiert. Der Bericht beschränkt sich allerdings auf die grundlegenden Zusammenhänge, eine Methodik zur Erfassung und Bewertung der einzelnen Größen wird nicht vorgeschlagen.

1.2 Aufgabenstellung und Ansatz

Der integrierte (nationale) Stickstoffindikator und die Überschreitung der Obergrenzen der N_r -Emissionen wurden im DESTINO-Projekt ohne Flächenbezug der Indikatoren bzw. ohne regionale Differenzierung innerhalb des Bundesgebietes ermittelt. Im Abschlussbericht zum DESTINO-Projekt (Heldstab et al. 2020) wurde darauf hingewiesen, dass der Einbezug der räumlichen Komponente für die Weiterentwicklung der nationalen Indikatoren für stickstoffbezogene Schutzgüter unerlässlich ist.

¹ NUTS: Systematik zur Klassifizierung der räumlichen Bezugseinheiten der amtlichen Statistik in der EU, orientiert an der Verwaltungsgliederung in den einzelnen Mitgliedsstaaten; NUTS3 entspricht "small regions" (kleinere Regionen, teilweise Großstädte), in Deutschland sind das die Kreise und kreisfreien Städte.

Das vorliegende Projekt setzt an diesem Punkt an: Auch bei Einhaltung der *nationalen* Obergrenzen der N_r -Emissionen können trotzdem *lokal* die zulässigen Emissionsmengen einzelner N_r -Verbindungen überschritten werden. Daraus resultieren N_r -Immissionen (NH_x -, NO_y -Depositionen; NH_3 -, N_2O -, NO_2 -Konzentrationen Luft; N-Gewässereinträge), durch die in den betreffenden Gebieten die Qualitätsziele für einzelne Schutzgüter überschritten werden. Bei der Aggregation auf der nationalen Ebene werden diese Überschreitungen (möglicherweise) kompensiert durch Regionen, in denen nur geringe Emissionen auftreten. Derartige Überschreitungen können nur durch eine regionalisierte, räumlich höher aufgelöste Untersuchung abgebildet werden. Diese Betrachtungsebene bedeutet daher eine unabdingbare Ergänzung des nationalen Stickstoffindikators.

Ansatz und Methodik der Untersuchungen im vorliegenden Projekt bauen auf Heldstab et al. (2020) auf.

Es werden folgende **Schutzgüter** betrachtet, die durch die Immission von reaktiven N-Verbindungen beeinträchtigt werden können: terrestrische Ökosysteme, N-sensible Vegetation, Küstengewässer, Grundwasser, menschliche Gesundheit und Klima. Ergänzend zum DESTINO-Ansatz werden "Marine Ökosysteme in den Küstenzonen (Nordsee und Ostsee)" als siebtes Schutzgut aufgenommen.

Für jedes Schutzgut wird ein **Qualitätsziel** festgelegt, in dem sich das Schutzgut in Bezug auf die Beeinträchtigung durch N_r -Verbindungen in einem "guten Zustand" befindet (für das Schutzgut Klima wird davon abweichend ein Umwelthandlungsziel festgelegt). Soweit vorhanden werden als Qualitätsziele die derzeit geltenden **Immissionsgrenzwerte** bzw. Richtwerte für die Schutzgüter übernommen.

Wirkungsindikatoren beschreiben quantitativ die Einwirkung der betrachteten N_r -Verbindung(en) auf das Schutzgut, z.B. in Form von Deposition, Konzentration in der Luft oder Eintragsmenge (Fracht), die aus den entsprechenden **N_r -Emissionen** resultieren.

Als wissenschaftliches Ergebnis des vorliegenden Projekts werden **Obergrenzen** der Emissionen für alle N_r -Verbindungen und räumliche Betrachtungseinheiten ermittelt, das heißt die **maximal zulässigen N_r -Emissionen** (für das Schutzgut Oberflächengewässer zulässige N(ges)-Konzentrationen), die nicht überschritten werden dürfen, damit die Qualitätsziele eingehalten werden. Die Begriffe "Obergrenze" und "(maximal) zulässige N-Emission" (Oberflächengewässer: "zulässige N(ges)-Konzentration") werden synonym verwendet.

Die Differenz zwischen der **IST-Emission** in einem Referenzzeitraum und der **Obergrenze** beziffert die **erforderliche Verminderung** der Emission einer N_r -Verbindung, damit das Qualitätsziel eingehalten wird. Die erforderliche Verminderung in den einzelnen räumlichen Betrachtungseinheiten wird jeweils kartographisch und tabellarisch sowie aggregiert für Deutschland dargestellt.

Darauf aufbauend können **(Emissions-)Zielwerte** als umweltpolitische Zielvorgaben formuliert werden. Dies erfordert jedoch einen umfassenden Diskussionsprozeß, der unter Einbezug der vorliegenden Ergebnisse noch nicht geführt wurde.

In Tabelle 1 sind die Qualitätsziele, Wirkungsindikatoren und Emissionen der sieben Schutzgüter zusammengestellt.

Tabelle 1: Übersicht der sieben Umweltbereiche bzw. Schutzgüter sowie deren Qualitätsziele und Wirkungsindikatoren, die bei der Entwicklung von regionalen Obergrenzen für die Emissionen von N_r einbezogen werden.

Umweltbereich / Schutzgut	Qualitätsziel (Obergrenze)	Wirkungsindikator	Emissionen	Kap. ^a
Terrestrische Ökosysteme (Eutrophierung durch N-Deposition)	Einhaltung der kritischen Belastungsgrenze (Critical Load, CL _{eutN}) des empfindlichsten Ökosystems innerhalb Kreise	NH _x - und NO _y -Depositionen (1 km x 1 km Raster) ^b	NH ₃ - und NO _x -Emissionen n. GRETA (1 km x 1 km Raster) ^c	2
Marine Ökosysteme in den Küsten-Zonen^d (Nordsee und Ostsee)	Einhaltung des kritischen atmosphärischen Inputs (CAI) für marine Ökosysteme in den Küsten-zonen der Nordsee und Ostsee	NH _x - und NO _y -Deposition auf die Flächen der Küstenzonen (1-nautische Meile)	NH ₃ und NO _x -Emissionen n. GRETA (1 km x 1 km Raster) ^c	2 ^d
Oberflächengewässer (Eutrophierung von Küstengewässern)	Gesamt-N-Konzentration in Zuflüssen zur Nordsee 2,8 mg N L ⁻¹ , Ostsee 2,6 mg N L ⁻¹ (Übergangspunkt limnisch-marin bzw. Grenze)	N(ges)-Eintrag und N(ges)-Fracht in Oberflächengewässern	N(ges)-Eintrag und N(ges)-Fracht in Oberflächengewässern, berechnet mit Modell MoRE (2.759 Analysegebiete)	3
Grundwasserqualität (Parameter NO ₃ -Konzentration)	Potenzielle NO ₃ -Konzentration im Sickerwasser max. 50 mg NO ₃ L ⁻¹	Potenzieller NO ₃ -Eintrag in das Grundwasser (hydrosphärischer N-Überschuss der Landwirtschaftsfläche)	hydrosphärischer N-Überschuss Landwirtschaftsflächen (302 Kreisregionen)	4
Klima (THG-Emissionen)	Einhaltung der jährlichen N ₂ O-Emissionshöchstmenge bis 2030 gem. Vorgabe KSG ^e	N ₂ O-Emissionen n. GRETA (Kreise)	N ₂ O-Emissionen n. GRETA (1 km x 1 km Raster) ^c	5
Vegetation (beeinflusst durch NH ₃ -Konzentration Luft)	Critical Level NH ₃ : generell 3 µg NH ₃ m ⁻³ , in Kreisen mit Vorkommen N-empfindlicher Flechten und Moose (Kryptogamen) 1 µg NH ₃ m ⁻³	NH ₃ -Konzentration (Luft) n. PINETI-4 (2 km x 2 km) ^b	NH ₃ -Emissionen n. GRETA (1 km x 1 km Raster) ^c	6
Menschliche Gesundheit	NO ₂ -Konzentration (Jahresmittel) max. 10 µg NO ₂ m ⁻³ (WHO-Richtwert 2021) im Mittel Kreise	Modellierte NO ₂ -Konzentrationen (Atmosphäre) n. Optimaler Interpolation (OI; 2 km x 2 km) ^b	NO _x -Emissionen n. GRETA (1 km x 1 km Raster) ^c	7

^a Bearbeitung: Kap. 2: M. Bach, E. Griese, M. Geupel; Kap. 3: K. Morling; Kap. 4: M. Bach, S. Hannappel, S. Borrmann; Kap. 5, 6, 7: E. Griese.

^b Für die weitere Verwendung transformiert auf das Raster des GeoGitterDE

^c Deutschland im Raster des GeoGitterDE_1km (BKG 2020)

^d Die Berechnung der zulässigen N-Emissionen für die marinen Ökosysteme in Nordsee und Ostsee (Küstenzonen) ist in das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme integriert

^e Klimaschutzgesetz (v. 18. August 2021)

Analog zum nationalen Stickstoffindikator müssen die Indikatoren und ihre regionalisierten Obergrenzen folgende Anforderungen erfüllen (vgl. Heldstab et al. 2020):

- ▶ Eine regelmäßige Aktualisierung des Status der Wirkungsindikatoren soll möglich sein, um Trendentwicklungen sichtbar zu machen.
- ▶ Ein Wirkungsindikator, der zwei verschiedene Schutzgüter beeinträchtigt, darf nicht doppelt gezählt werden (bspw. betrifft die NH_3 -Emission sowohl Schutzgut "Terrestrische Ökosysteme" als auch "Vegetation").
- ▶ Die nationale Obergrenze kann insgesamt nur eingehalten werden, wenn die Indikatoren der einzelnen Schutzgüter ihre jeweilige Obergrenze in allen räumlichen Betrachtungseinheiten separat einhalten bzw. unterschreiten.
- ▶ Es gilt die Prämisse, dass die erforderlichen Emissionsminderungen ausschließlich innerhalb des Bundesgebietes vorzunehmen sind (d. h. ohne Beiträge aus dem Ausland), sofern die Quellen-Senken-Beziehungen des Ferntransports von reaktiven N-Verbindungen dies zulassen.
- ▶ Es gilt das Prinzip des Verschlechterungsverbots: wenn ein Qualitätsziel innerhalb einer Kreisregion aktuell bereits eingehalten wird, das heißt, dass die aktuelle Emission geringer ist als die Obergrenze, dann darf sich der Qualitätszustand nicht wieder verschlechtern (auch wenn das Qualitätsziel weiterhin eingehalten würde), das heißt die maximal zulässige Emission entspricht dann der aktuellen Emission.

Die räumliche Auflösung der Indikatoren und Obergrenzen hängt für die einzelnen Schutzgüter zunächst von der verfügbaren Datenbasis ab. NH_x - und NO_y -Depositionsdaten liegen bspw. in einer Auflösung von 2 km x 2 km vor (PINETI-4, Kranenburg et al. 2024), NH_3 - und NO_x -Emissionen mit 1 km x 1 km und die N_2O -Exposition (Konzentration in der Atmosphäre) mit 2,4 x 2,4 km. Für die Oberflächengewässer wird die Modellierung für 2.759 AU in Deutschland (mittlere Fläche 135 km²) durchgeführt. Primärdaten zur NO_3 -Konzentration im Grundwasser sind nur in Form von Messergebnissen für rund 10.000 Messstellen vorhanden, eine flächenbezogene Darstellung (Karte) der NO_3 -Konzentration im Grundwasser liegt nicht vor. Andere Eingangsdaten wie bspw. der Stickstoffüberschuss der Landwirtschaft sind nur für die Kreisregionen vorhanden.

Für die Durchführung der Berechnungen wurden die Daten und Ergebnisse einheitlich in das 1 km x 1 km-Raster des GeoGitterDE_1km (BKG 2020) transformiert. Daraus können dann verschiedene Aggregationsebenen wie "Bundesgebiet insgesamt" oder "Kreise und kreisfreie Städte" erzeugt werden. Aus Gründen der eingeschränkten Datenverfügbarkeit für einzelne Umweltbereiche wurden im vorliegenden Projekt Kreise und kreisfreie Städte (zus. 402 räumliche Einheiten, Stichtag Gebietsstand 01.01.2016) teilweise zu sogenannten Kreisregionen zusammengefasst (302 Einheiten), indem eine Reihe von kreisfreien Städten (mit wenig Gebietsfläche) jeweils mit dem angrenzenden bzw. umgebenden Landkreis vereinigt wurden. Das Vorgehen ist in Häußermann et al. (2019) beschrieben; Liste der Kreise und Kreisregionen s. Tabelle 22 (im Anhang). Mit "Kreis" werden im vorliegenden Bericht sowohl kreisfreie Städte und Landkreise als auch gegebenenfalls daraus zusammengefasste Einheiten (Kreisregionen) bezeichnet. Die integrierende Darstellung der Ergebnisse und der Überschreitung der Obergrenzen für N-Emissionen erfolgt im Regelfall für die Kreisregionen, zum einen zur besseren Übersicht; zum anderen sind Kreise und kreisfreie Städte (bzw. Kreisregionen) die administrativen Einheiten, die zur Umsetzung von Maßnahmen und Minderungsprogramme adressiert werden.

In den Kapiteln 2 bis 7 wird die Entwicklung der Obergrenzen für reaktiven Stickstoff für die sechs Umweltbereiche vorgestellt. Die Kapitel sind (weitgehend) identisch strukturiert: Einleitend werden das Qualitätsziel, die Wirkungsindikatoren und die Emissionen für das betreffende Schutzgut dargestellt. Anschließend wird die Methodik zur Ermittlung der Minderungsanforderungen in den jeweils betrachteten regionalen Einheiten erläutert. Die Ergebnisse beziffern die Verminderung der Emission einer oder mehrerer reaktiver N-Verbindungen, die zur Einhaltung des Qualitätsziels erforderlich ist. Abschließend werden in einem kurzen Fazit ausgewählte Aspekte der Methodik angesprochen und es wird angemerkt, was bei der Interpretation der Ergebnisse gegebenenfalls ergänzend zu beachten ist. In Kapitel 8 wird auf die Unsicherheiten der Berechnungen für die Schutzgüter eingegangen. Im Kapitel 9 werden schließlich die Ergebnisse zu den Minderungsanforderungen für die einzelnen Schutzgüter auf der Ebene der Kreise sowie für das nationale Aggregat zusammengeführt.

2 Schutzgut terrestrische und marine Ökosysteme - Eutrophierung durch Stickstoff-Deposition

2.1 Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren

Qualitätsziele

Einhaltung der kritischen Belastungsgrenze zum Schutz terrestrischer Ökosysteme vor Eutrophierung durch Stickstoff (CLeutN) innerhalb der Kreise (verschiedene Anforderungsniveaus, s. Kap. 2.2).

Ergänzend wird hier auch das Schutzgut "Marine Ökosysteme in den Küstenzonen von Nordsee und Ostsee (Eutrophierung durch N-Deposition)" einbezogen, da der Berechnungsweg für die erforderliche Verminderung der N-Emissionen identisch ist mit dem Schutzgut "Terrestrische Ökosysteme".

Wirkungsindikatoren

NH_x- und NO_y-Deposition.

Emission

NH₃- und NO_x-Emissionen in die Atmosphäre.

Datengrundlagen

- ▶ Nationale Critical Loads (CLeutN) Daten (deutscher Datensatz 2015 - 2017) - GeoG (Schlutow et al. 2018)
- ▶ Karten NH_x- und NO_y-Depositionsraten (2019) des PINETI-4-Projekts (Kranenburg et al. 2024)
- ▶ Karten NH₃- und NO_x-Emissionen (2019; GRETA) (UBA 2016)
- ▶ Source-Receptor-Beziehungen der NH₃- und der NO_x-Emissionen sowie der resultierenden NH_x- und NO_y-Depositionen (für Bundesländer) (PINETI-4, Kranenburg et al. 2024).
- ▶ Kritische atmosphärische Inputs (CAI) zum Schutz der marinen Ökosysteme in den Küstenzonen (1-nautische Meile-Zone) der Nordsee und Ostsee (UBA, eigene Berechnung).

2.2 Methodik

Der Berechnungsweg zur Ermittlung der Überschreitungen der zulässigen N-Emissionen in die Atmosphäre zur Einhaltung der kritischen Belastungsgrenze (zum Schutz der terrestrischen Ökosysteme sowie der marinen Ökosysteme in den Küstenzonen von Nordsee und Ostsee) vor Eutrophierung durch Stickstoff auf Kreisebene ist im Anhang A.2 ausführlich dargestellt. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zusammenfassend beschrieben.

1. Schritt Ermittlung des niedrigsten CLeutN für die empfindlichste naturnahe/halbnatürliche Ökosystem-Fläche auf Kreisebene

Die Karte der Critical Loads (s. UBA-Projekt FKZ 43848 und 80075) basiert auf einer Karte der Ökosystemtypen, für die Critical Loads berechnet wurden. Diese Karte wurde auf der Grundlage der CORINE Land Cover (UBA 2015), verschnitten mit der Bodenübersichtskarte BÜK1000N (BGR 2014) und der Klimakarte für die Periode 1981 – 2010 (DWD 2012), von den Autoren des Critical Load-Datensatzes für Deutschland 2018 entwickelt (Schlutow et al. 2018). Dazu diente die Datenbank des BERN-Modells (Bioindication for Ecosystem Regeneration towards Natural

conditions), das die ökologischen Nischen von 886 naturnahen bzw. halbnatürlichen Pflanzengesellschaften und 2210 Pflanzenarten in Auswertung von ca. 50.000 Vegetationsaufnahmen mit Boden- und Klimaangaben in Deutschland umfasst.

Die Critical Load-Werte wurden den 1 km x 1 km-Rasterzellen des GeoGitterDE_1km (BKG 2020) zugewiesen, die im Projekt als kleinste Einheiten der räumlichen Auflösung verwendet werden; das Bundesgebiet wird im GeoGitterDE durch 361.471 Rasterzellen abgebildet. Dazu wurde innerhalb jeder Rasterzelle der *niedrigste* auftretende Critical Load-Wert für N-Eutrophierung (CL_{eutN} , in $kg\ N\ ha^{-1}\ a^{-1}$) in der Critical Loads-Karte gesucht, der dann für die gesamte Rasterzelle als maximal zulässige atmosphärische N-Deposition gilt. Insgesamt wurden 261.787 Rasterzellen (entsprechend 72,4 %) mit einem CL_{eutN} -Wert belegt; Abbildung 1 zeigt die Verteilung der kleinsten CL_{eutN} -Werte in den Rasterzellen des GeoGitterDE in Deutschland.

Als Critical Atmospheric Input (CAI)-Werte zum Schutz der marinen Ökosysteme in den Küstenzonen (innerhalb der 1-nautischen Meilen-Zone) wurden $5,78\ kg\ N\ ha^{-1}\ a^{-1}$ für die Nordsee und $3,31\ kg\ N\ ha^{-1}\ a^{-1}$ für die Ostsee verwendet (UBA, eigene Berechnung, unveröff.).

Die NH_x - und NO_y -Depositionsdaten wurden vom UBA aus dem Projekt PINETI-4 (Kranenburg et al. 2024) für das Jahr 2019 bereitgestellt, in Abbildung 2 sind die Depositionen im Mittel der Kreisregionen wiedergegeben. Für alle Rasterzellen mit einem CL_{eutN} -Wert bzw. die 1-nautischen Meilen-Zone wurde ausgewertet, ob die N(gesamt)-Deposition (Summe aus NH_x - und NO_y -Deposition) den CL_{eutN} -Wert überschreitet, das heißt ob eine Überschreitung der zulässigen N-Deposition (2019) vorliegt (Abbildung 3).

2. Schritt: Ökologisch erforderliche Verminderung der NH_x - und NO_y -Deposition auf der Ebene der Kreisregionen

Die erforderliche Minderung der N-Deposition auf der Ebene der 302 Kreisregionen zur Einhaltung der kritischen Belastungsgrenze wurde für die Terrestrischen Ökosysteme für drei verschiedene Anforderungsniveaus des Qualitätsziels N-Deposition $< CL_{eutN}$ berechnet:

- **MEDIAN (50-Perzentil):** Die Critical Loads werden auf der Hälfte der Raster mit einem CL_{eutN} -Wert innerhalb einer Kreisregion eingehalten (vereinfacht: 50 % der Ökosysteme sind ausreichend geschützt²).
- **90-PERZENTIL:** Die Critical Loads werden auf 90 %³ der Raster mit einem CL_{eutN} -Wert innerhalb einer Kreisregion eingehalten (vereinfacht: 90 % der Ökosysteme sind ausreichend geschützt).
- **MAXIMUM (100-Perzentil):** Die Critical Loads werden auf allen Rastern mit einem CL_{eutN} -Wert innerhalb einer Kreisregion eingehalten (alle Ökosysteme, auch das empfindlichste, sind ausreichend geschützt).

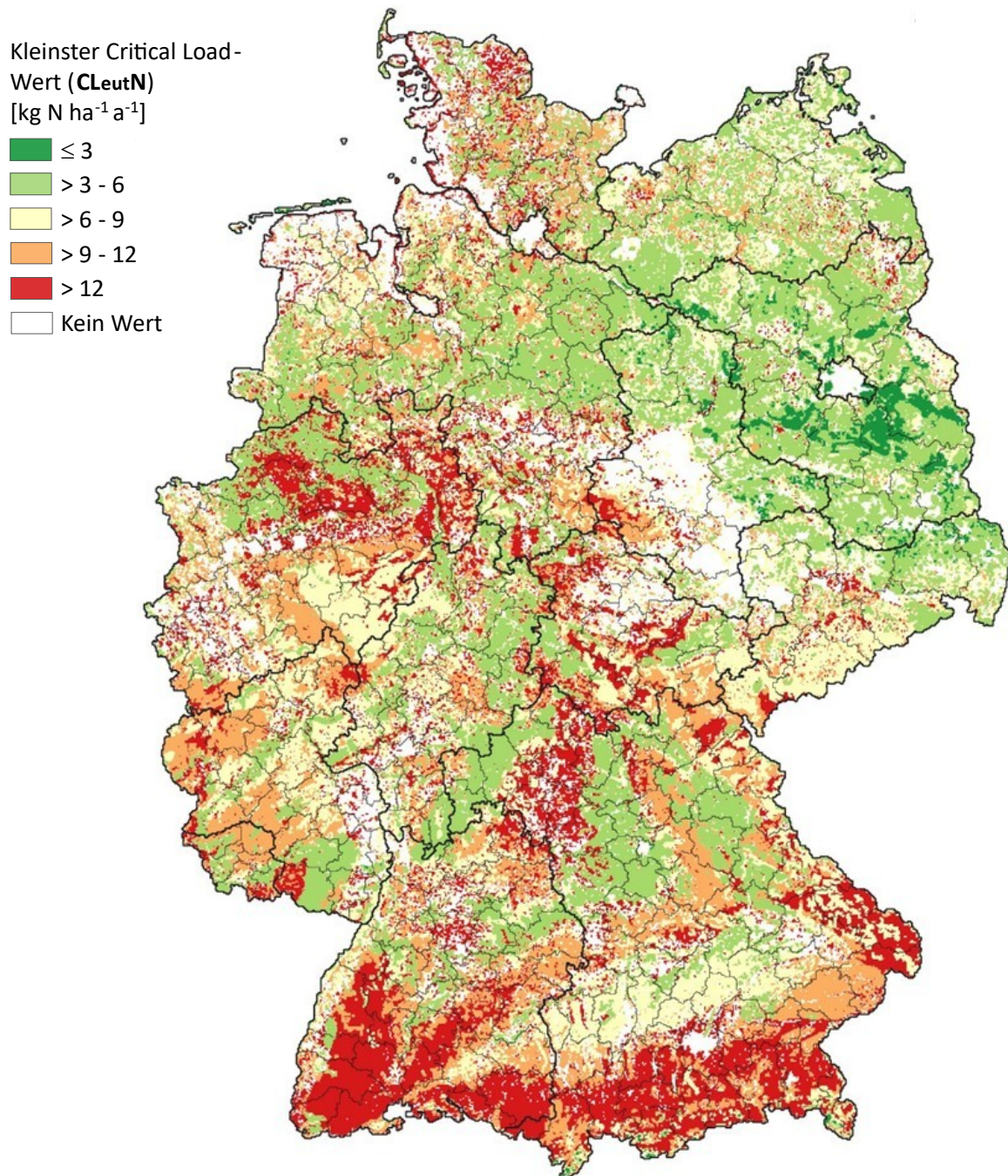
Für die marinen Ökosysteme wurde nicht nach Anforderungsniveaus unterschieden, es wurde jeweils vollständige Einhaltung der CAI (100-Perzentil) vorausgesetzt. Aus den drei Anforderungsniveaus A, B und C resultieren drei verschiedene Obergrenzen respektive erforderliche Verminderungen der N(gesamt)-Emissionen. Die Aufteilung der erforderlichen Reduzierung der N(gesamt)-Deposition auf die beiden Komponenten NH_x und NO_y erfolgt im Verhältnis der NH_x -

² Die Vereinfachung bezieht sich darauf, dass der Perzentilwert berechnet wird als Anteil der Raster mit N(gesamt)-Deposition $> CL_{eutN}$ an der Gesamtzahl der Raster mit einem CL_{eutN} -Wert in einer Kreisregion. Für eine exakte Berechnung des (Flächen-)Anteils der ausreichend geschützten Ökosysteme müssten die tatsächlichen Flächenausdehnungen der Ökosysteme in den Rastern mit N(gesamt)-Deposition $< CL_{eutN}$ und in der Kreisregion insgesamt ausgewertet werden, worauf im Projekt allerdings verzichtet wurde.

³ Ein Flächenanteil von 90 % wird auch in der EU-Wiederherstellungsverordnung (EU-Verordnung 2024/1991 über die Wiederherstellung der Natur vom 24. Juni 2024) als Vorgabe für die Wiederherstellung von Ökostemen genannt, die sich nicht im guten Zustand befinden.

und NO_y -Deposition in den Kreisregionen. In Abbildung 4 ist die erforderliche Reduzierung der NH_x - und NO_y -Deposition, gemittelt für die Kreisregionen, zur Einhaltung der CL_{eutN} -Werte für das Anforderungsniveau 90-Perzentil dargestellt.

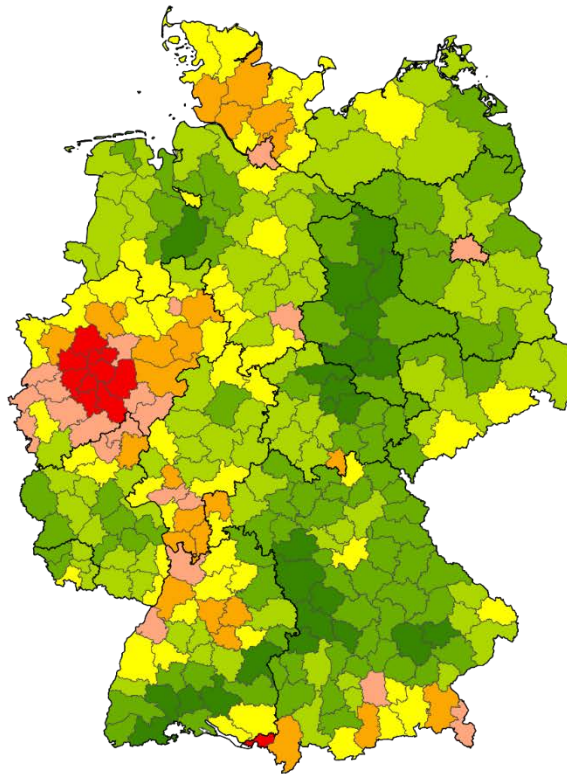
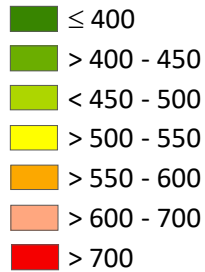
Abbildung 1: Kleinste Critical Load (CL_{eutN})-Wert zum Schutz terrestrischer Ökosysteme vor Eutrophierung (Schlutow et al. 2018) in den Rasterzellen des GeoGitterDE (BKG 2020).



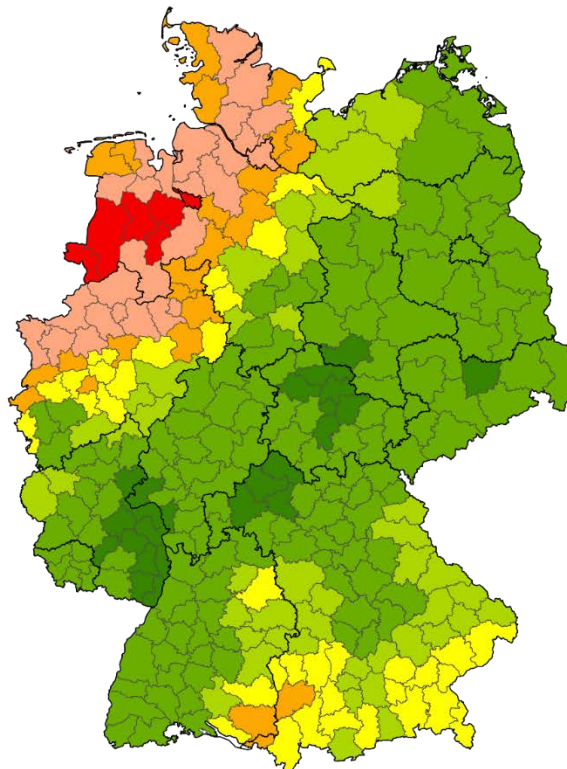
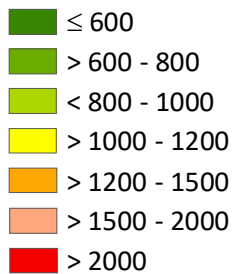
Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Abbildung 2: NO_y - und NH_x -Deposition^a im Mittel der Kreisregionen 2019 (n. PINETI-4, Kranenburg et al. 2024).

NO_y -Deposition
[kg N km⁻² a⁻¹]



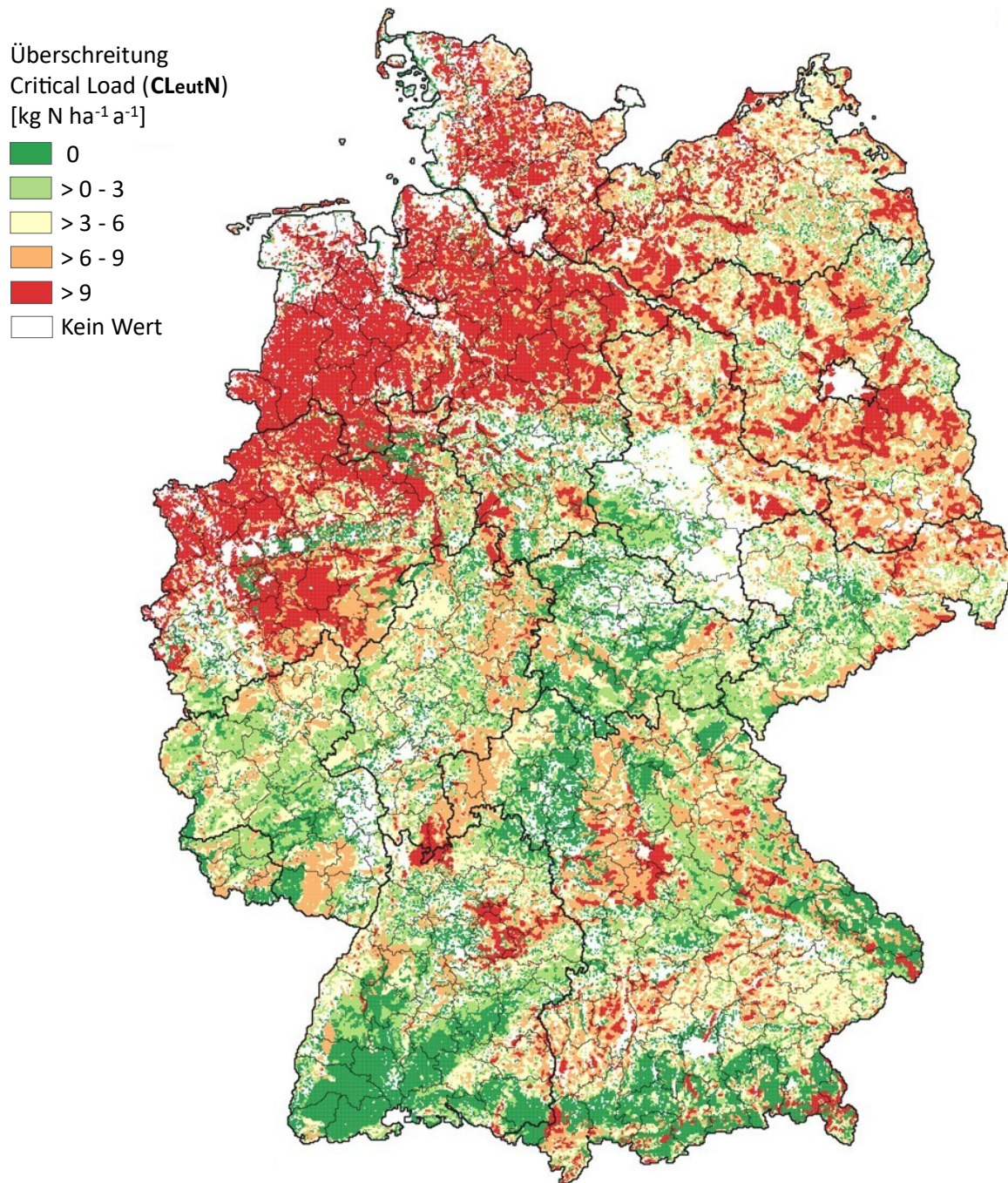
NH_x -Deposition
[kg N km⁻² a⁻¹]



^a Hier und alle folgenden Depositionskarten: Aus kartographischen Gründen werden die Depositionen auf die Küstenzonen (1-nautische Meile) von Nordsee und Ostsee nicht dargestellt.

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

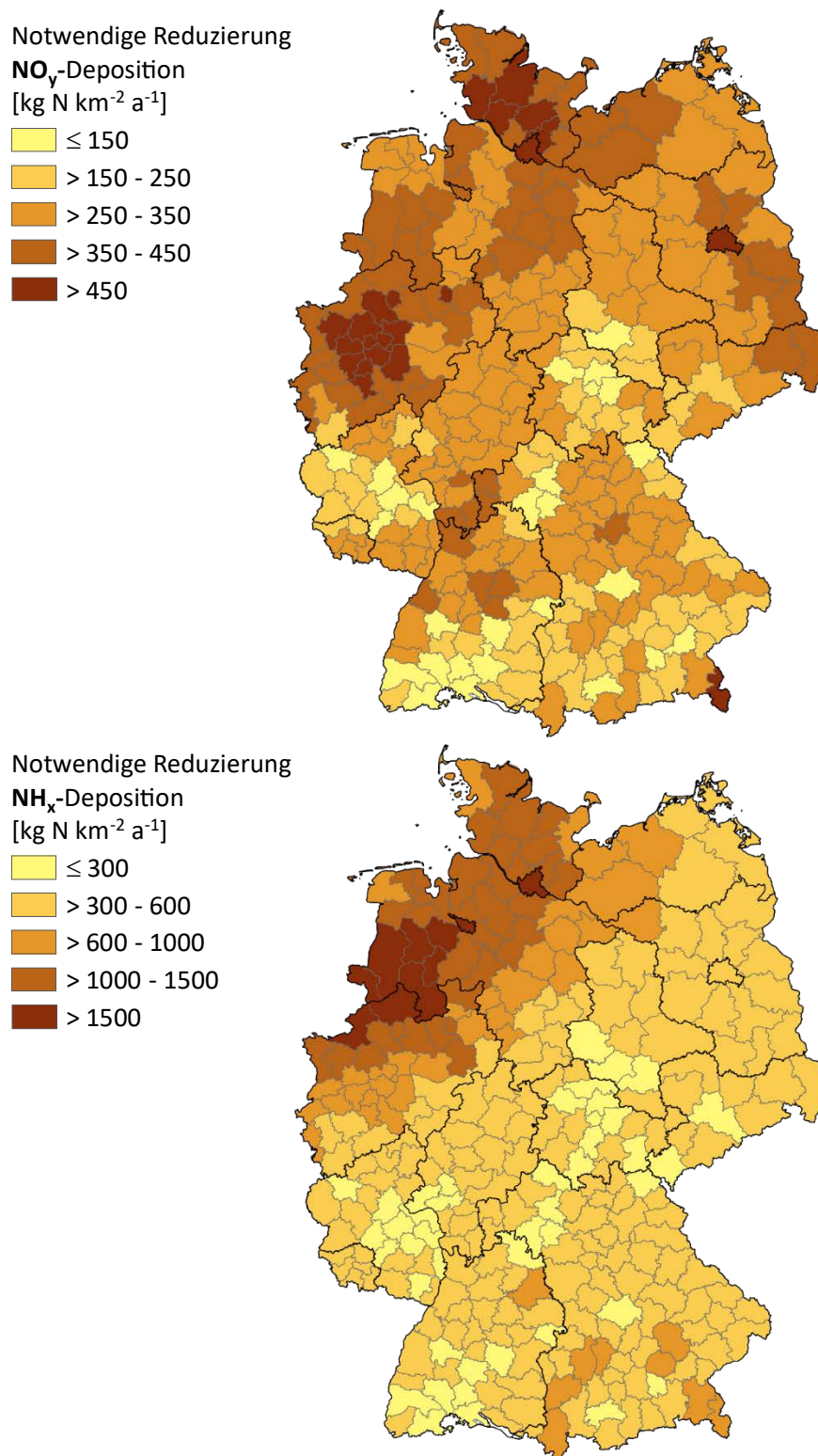
Abbildung 3: Überschreitung der Critical Load (CL_{eutN}) zum Schutz terrestrischer Ökosysteme vor Eutrophierung (UBA 2015, Schlutow et al. 2018) durch die atmosphärische N-Deposition (NH_x-N und NO_y-N, n. PINETI-4, Jahr 2019, Kranenburg et al. 2024) in Deutschland^a.



^a 1 km x 1 km Rasterzellen des GeoGitterDE (BKG 2020)

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Abbildung 4: Erforderliche Reduzierung der NO_y - und NH_x -Deposition im Mittel der Kreisregionen zur Einhaltung der Critical Load-Werte zum Schutz terrestrischer Ökosysteme für Anforderungsniveau 90-Perzentil^a.



^a Die Critical Loads werden auf 90 % der Rasterzellen mit einem CLeutN-Wert innerhalb einer Kreisregion eingehalten (vereinfacht: 90 % der Ökosysteme sind ausreichend geschützt; s. Kapitel 2.2).

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

3. Schritt: Berechnung der erforderlichen Verminderung der Emissionen in den Kreisregionen

Aus der erforderlichen Reduzierung der N-Deposition in den Kreisregionen wird anschließend die erforderliche Verminderung der N-Emissionen abgeleitet. Dabei liegt die Annahme zu Grunde, dass aus der Menge der erforderlichen Depositionsminderung die Menge der erforderlichen Emissionsminderung berechnet werden kann. Dafür werden zwei Annahmen eingeführt: (i) Die N-Deposition innerhalb einer Kreisregion ergibt sich aus den Emissionen innerhalb der Kreisregion sowie dem atmosphärischen Import und Export (über die Kreisgrenzen hinweg). (ii) Innerhalb einer Kreisregion können keine räumlichen Beziehungen zwischen Emissionsquellen und Depositionsflächen erstellt werden; eine Änderung der gesamten, innerhalb der Kreisregion emittierten bzw. über die Atmosphäre importierten/exportierten Mengen NH_x - und NO_y -Mengen verändert die Deposition in allen Rasterzellen proportional zur gegebenen Deposition, unabhängig von der Lokalisierung der einzelnen Emissionsquellen innerhalb der Kreisregion. Abbildung 5 zeigt die gemittelten NH_3 - und NO_x -Emissionen in den Kreisregionen 2019 (n. GRETA, UBA 2016).

NH_3 und NO_x werden in der Atmosphäre über größere Entfernungen transportiert, von der gesamten Deposition innerhalb eines Kreises wird nur ein gewisser Anteil durch Emissionen innerhalb des betreffenden Kreises verursacht, der übrige Teil ist auf Emissionen (Import) aus anderen Regionen zurückzuführen. Umgekehrt werden die Emissionen aus einem Kreisgebiet auch exportiert und gehen auf Flächen außerhalb dieses Kreises nieder. Diese großräumigen Quellen-Senken-Beziehungen zwischen den NO_x - und NH_3 -Emissionen und den NO_y - und NH_x -Depositionen werden mit dem PINETI-4 Modell abgebildet und in Form von sogenannten Source-Receptor-Tables (S-R-Tables) dargestellt (Kranenburg et al. 2024). Für das Projekt standen S-R-Tables mit den Quellen-Senken-Beziehungen zwischen den Bundesländern, den Küstenzonen der Nord- und Ostsee sowie dem Ausland zur Verfügung (Abbildung 42 und Abbildung 43 im Anhang). Ein S-R-Tabellenwert gibt an, welche Anteile der gesamten Deposition in einem Bundesland (als Beispiel) aus den Emissionen des betreffenden Bundeslandes selbst (betrifft nicht die Küstenzonen), aus den anderen 15 Bundesländern und aus dem Ausland stammen.

Mittels dieser S-R-Tables wurde für die Kreise berechnet, in welchem Umfang die Emissionen gemindert werden müssen, damit die ökologisch erforderliche Reduzierung der Deposition im jeweils betrachteten Kreis (analog in den Küstenzonen von Nordsee und Ostsee) erreicht wird. Diese Berechnung wurde mit zwei verschiedenen Annahmen durchgeführt:

- a) Die erforderliche Emissionsminderung erfolgt nur aus nationalen Quellen. In diesem Fall wurde die ökologische Minderungserfordernis der Deposition in einem Kreis entsprechend den S-R-Tabellen nur den Bundesländern zugeschrieben.
- b) Die erforderliche Emissionsminderung erfolgt sowohl aus nationalen Quellen als auch aus ausländischen Quellen, die ihre Emissionen reduzieren und damit einen Beitrag zur erforderlichen Depositionsverminderung in Deutschland leisten. In diesem Fall wurde die ökologische Minderungserfordernis auch den ausländischen Emittenten zugeschrieben, wodurch sich der Anteil der national erforderlichen Minderung vermindert. Bei der Zuweisung, wieviel im Ausland und wieviel national vermindert werden muss, wurde das aktuelle S-R-Muster (2019) verwendet.

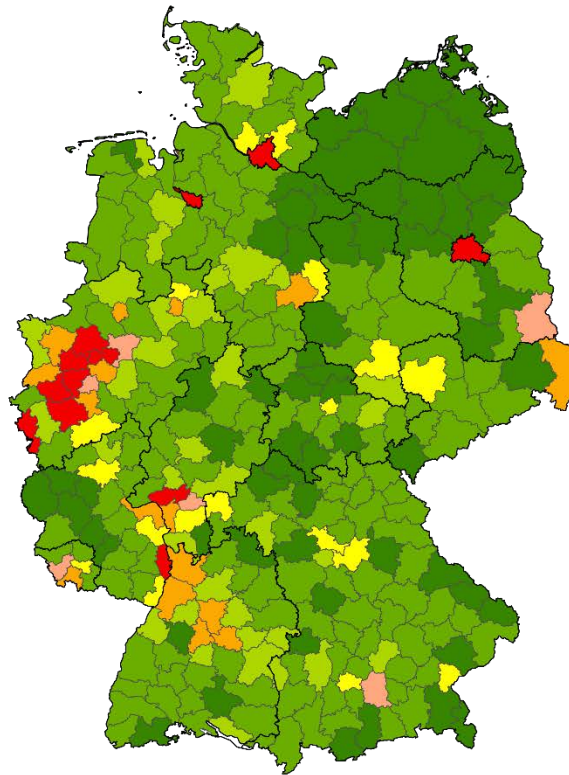
In beiden Fällen wurde berücksichtigt, dass die nationalen Emissionen auch grenzüberschreitend verfrachtet werden und daher eine nationale Emissionsminderung nicht zu 100% in Deutschland wirksam wird, weil ein (teilweise beträchtlicher) Anteil der Emissionen nicht in Deutschland, sondern im Ausland deponiert. Entsprechend der S-R Tabellen wurde daher die ökologisch erforderliche Emissionsminderung um denjenigen Anteil erhöht, der über die Grenzen Deutschlands im Ausland deponiert (s. Tabelle 2: „überhöhte Brutto Minderung Emission“).

Im Ergebnis sind die erforderlichen Emissions-Minderungsmengen daher teilweise erheblich größer als die ökologisch erforderlichen Depositions-Reduzierungen.

Abbildung 5: NO_x- und NH₃-Emission im Mittel der Kreisregionen 2019 (n. GRETA, UBA 2016).

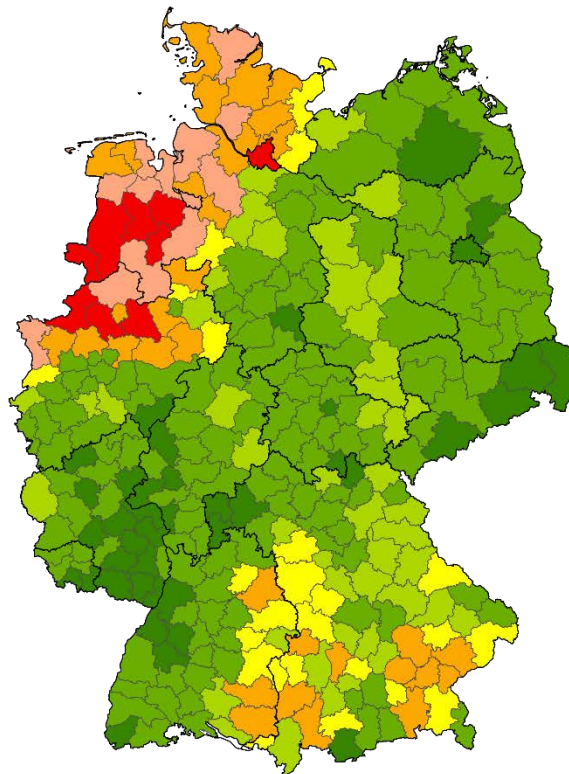
NO_x-Emission
[kg N km⁻² a⁻¹]

- ≤ 500
- > 500 - 1000
- < 1000 - 1500
- > 1500 - 2000
- > 2000 - 3000
- > 3000 - 4000
- > 4000



NH₃-Emission
[kg N km⁻² a⁻¹]

- ≤ 500
- > 500 - 1000
- < 1000 - 1500
- > 1500 - 2000
- > 2000 - 3000
- > 3000 - 4000
- > 4000



Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Die erforderliche Emissionsminderung in jedem Bundesland muss anschließend noch auf die Kreisregionen innerhalb dieses Landes verteilt werden. Aufgrund der begrenzten Auflösung der S-R-Tables (nur für Bundesländer) wird vereinfachend angenommen, dass die Emissionen in allen Kreisregionen prozentual genauso wie für das Bundesland insgesamt vermindert werden müssen.

2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse zur ökologisch erforderlichen Reduzierung der Deposition sowie die dafür erforderlichen Verminderungen der NH₃- und NO_x-Emissionen sind für Deutschland insgesamt in Tabelle 2 sowie für die einzelnen Bundesländer (als räumliche Einheiten der Source-Receptor-Beziehungen) in Tabelle 24 bis Tabelle 27 (Anhang A.2) dargestellt, jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Verminderung der Emissionen im Ausland und für die drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels. Die Einzelwerte für die Kreisregionen sind in Tabelle 28 (Anhang A.2) aufgeführt.

Tabelle 2: Ökologisch erforderliche Reduzierung der Emission und dafür erforderliche Brutto-Verminderung der NH₃- und NO_x-Emissionen (2019) inkl. Überhöhung zur Einhaltung der Critical Load (CL_{eutN}) für terrestrische Ökosysteme (für drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels) und der CAI^a für marine Ökosysteme, mit und ohne Beitrag der Emissionsminderung im Ausland.

	NH ₃		NO _x	
	Berücksichtigung Ausland		Berücksichtigung Ausland	
	mit	ohne	mit	ohne
Deposition Landfläche DE (kt N)	335,3		174,1	
Deposition Küstenzone (kt N)	5,2		2,7	
Emission in DE (kt N)	469,6		343,1	
Anforderungsniveau 50-Perzentil (Median)				
Ökolog. erforderliche Reduzierung Deposition (kt N)	143,3		68,8	
Überhöhte Brutto-Minderung Emission (kt N)	214,6	318,9	162,7	373,0
Minderung Emission relativ zu Ist-Emission	45,7 %	67,9 %	47,4 %	108,7 %
Anforderungsniveau 90-Perzentil				
Ökolog. erforderliche Reduzierung Deposition (kt N)	221,7		110,9	
Überhöhte Brutto-Minderung Emission (kt N)	326,2 ^b	490,5	257,8 ^b	585,3
Minderung Emission relativ zu Ist-Emission	69,5 %	104,4 %	75,1 %	170,6 %
Anforderungsniveau 100-Perzentil (Maximum)				
Ökolog. erforderliche Reduzierung Deposition (kt N)	266,5		134,7	
Überhöhte Brutto-Minderung Emission (kt N)	389,3	587,7	311,2	703,3
Minderung Emission relativ zu Ist-Emission	82,9 %	125,2 %	90,7 %	205,0 %

^a CAI: Kritischer atmosphärischer Input in den Küstenzonen (1-nautische Meile) von Nordsee und Ostsee.

^b Diese Werte gehen in den nationalen Stickstoff-Indikator ein (Tabelle 19, Tabelle 20).

Die NH_3 -Emissionsmenge von 469,6 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ übersteigt die Deposition von 340,5 kt $\text{NH}_x\text{-N}$ (Landfläche und Küstenzone zusammen) um rund 38 %, das heißt, dass Deutschland 2019 (netto) mehr als ein Drittel seiner NH_3 -Emission über die Atmosphäre ins Ausland exportiert hat. Für NO_y ist dieser Anteil mit rund 94 % noch wesentlich größer, der inländischen Emission von 343,1 kt $\text{NO}_x\text{-N}$ steht eine Deposition von nur 176,8 kt $\text{NO}_y\text{-N}$ gegenüber. Zum Schutz der Terrestrischen Ökosysteme müsste die N(gesamt)-Deposition (Summe $\text{NH}_x\text{-N}$ und $\text{NO}_y\text{-N}$) in Deutschland für das niedrigste Anforderungsniveau Median um 212,1 kt N reduziert werden, für das Anforderungsniveau 90-Perzentil trägt die erforderliche Reduzierung 332,6 kt N und für das maximale Schutzniveau 401,2 kt N (Werte für $\text{NH}_x\text{-N}$ und $\text{NO}_y\text{-N}$ separat s. Tabelle 2).

Über die Auswertung der Quellen-Senken-Beziehungen von Emissionen und Depositionen werden daraus die erforderlichen Verminderungen der Emissionen für die beiden N-Verbindungen ermittelt. Bei Auswertung für das Bundesgebiet insgesamt könnte die erforderlichen Emissionsverminderungen ohne Einbezug von Minderungen im Ausland, das heißt ausschließlich durch Minderung in Deutschland, nur für NH_3 mit dem niedrigsten Anforderungsniveau geleistet werden: die NH_3 -Emissionen in Deutschland müssten um 318,9 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ vermindert werden, damit die Deposition um 141,3 kt $\text{NH}_x\text{-N}$ reduziert wird. Die erforderliche Minderung von 318,9 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ entspricht rund 68 % der $\text{NH}_3\text{-N}$ -Emissionen in Deutschland und wäre somit rein rechnerisch ausschließlich durch inländische Verminderungen zu leisten. Die Auswertung auf der Ebene der Bundesländer (s. Tabelle 26) verdeutlicht aber, dass bereits für diese Kombination (NH_3 , Anforderungsniveau Median) in einigen Bundesländern (Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen) Werte über 100 % berechnet werden, das heißt die NH_3 -Minderungserfordernis für das betreffende Bundesland ist größer als die Emission. Für alle weiteren Kombination von N-Verbindungen und Anforderungsniveau ist bereits auf Bundesebene die erforderliche Minderung größer als die nationale Emission 2019, am auffälligsten ist die Diskrepanz mit 205 % für NO_x mit dem maximalen Anforderungsniveau.

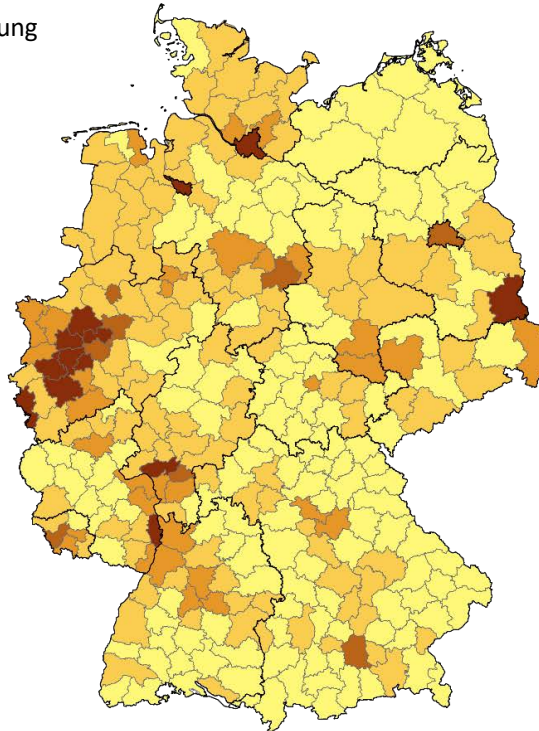
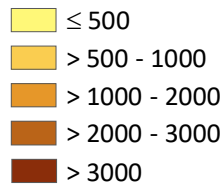
Daraus ergibt sich als Konsequenz, dass entgegen der grundlegenden Prämisse für das Projekt, die erforderlichen Minderungen ausschließlich mit nationalen Anstrengungen zu erreichen, für das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme die Verminderung der NH_3 - und NO_x -Emissionen im Ausland mitberücksichtigt werden muss, um das Qualitätsziel zu erreichen. Nach Auffassung der Autor*innen stellt das Anforderungsniveau 90-Perzentil einen vertretbaren Kompromiss dar zwischen einem (bezogen auf die Flächenausdehnung) ausreichenden Schutz der Vegetation auf der einen Seite und andererseits den Anforderungen für die Zielerreichung, das heißt der Umsetzung von Emissionsminderungsmaßnahmen bei den einzelnen Emittentengruppen. Mit dieser Vorgabe ergibt sich ein inländischer Emissionsminderungsbedarf von 326,2 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ und 257,8 kt $\text{NO}_x\text{-N}$, was 69,5 % bzw. 75,1 % der inländischen Emissionsmengen entspricht. Zwischen den Bundesländern (Tabelle 24 und Tabelle 25; Anhang A.2) tritt dabei eine relativ große Spreizung der erforderlichen Verminderung auf; für NH_3 liegt der Anteil der zu vermindernenden Emission zwischen 48 % (Baden-Württemberg) und 116 % (Sachsen) bzw. 119 % (Mecklenburg-Vorpommern). Für Sachsen und Mecklenburg-Vorpommern liegt die berechnete NH_3 -Emissionsminderung sogar oberhalb der Ist-Emissionen, das Minderungsziel kann also auch bei Einbezug der ausländischen Emissionen rechnerisch nicht erreicht werden. Insgesamt können daher 4,4 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ zu wenig reduziert werden, um das Qualitätsziel mit dem Anforderungsniveau 90-Perzentil überall einhalten zu können. Da in beiden Ländern nicht mehr gemindert werden kann als vorhanden ist, wird die rechnerische Obergrenze für NH_3 zum Schutzgut Eutrophierung (Ist-Emission minus Emissionsminderung) daher um die 4,4 kt von 143,3 kt auf 147,7 kt erhöht (siehe Tabelle 19).

Die erforderliche Verminderung der NH_3 - und NO_x -Emissionen in den Kreisregionen für das gewählte Anforderungsniveau 90-Perzentil zeigt Abbildung 6 (auf die kartografische Darstellung

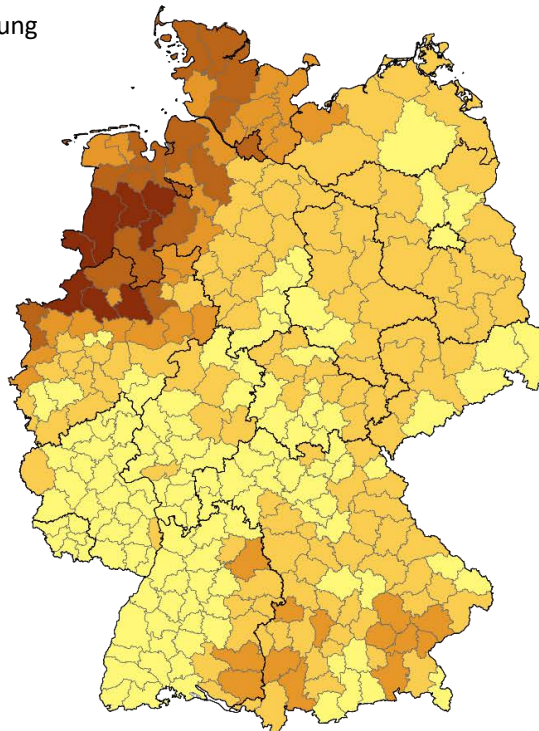
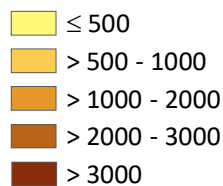
der Ergebnisse für die beiden anderen Anforderungsniveaus wird verzichtet). Diese Ergebnisse gehen in den nationalen Stickstoff-Indikator ein (Tabelle 19, Tabelle 20).

Abbildung 6: Erforderliche Verminderung der NO_x - und NH_3 -Emissionen (mit Einbezug von Emissionsminderung im Ausland) in den Kreisregionen zur Reduzierung der NO_y - und NH_x -Deposition zur Einhaltung der Critical Load-Werte zum Schutz terrestrischer Ökosysteme (Anforderungsniveau 90-Perzentil^a)

Erforderliche Verminderung
 NO_x -Emissionen
[kg N km⁻² a⁻¹]



Erforderliche Verminderung
 NH_3 -Emissionen
[kg N km⁻² a⁻¹]



^a Die Critical Loads werden auf 90 % der Rasterzellen mit einem CLeutN-Wert innerhalb einer Kreisregion eingehalten (vereinfacht: 90 % der Ökosysteme sind ausreichend geschützt; s. Kapitel 2.2).

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020

2.4 Fazit und Anmerkungen

- Die räumliche Auflösung der Ausweisung von naturnahen bzw. halbnatürlichen Ökosystemen in der Critical Load-Karte geht auf die Landnutzung-Klassifikation der CORINE Land Cover-Karte aus 2012 zurück, die Flächen ab 25 ha Ausdehnung (Mindestkartierfläche in CLC 2012) ausgrenzt und dafür eine Nutzungsklasse zuweist. Die Rasterzellen der CL-Karte stellen den jeweils niedrigsten CL_{LeutN} dar, der innerhalb einer Rasterzelle auftritt (unabhängig vom Flächenanteil des Polygons mit diesem CL_{LeutN} -Wert in einer Rasterzelle). Für die hier durchgeführten Arbeiten wurde davon ausgegangen, dass für die Wirkungsbewertung der N-Depositionen diese CL-Karte eine adäquate räumliche Auflösung darstellt.

Mit dem Landbedeckungsmodell 2018 (LBM2018) steht eine räumlich deutlich höher aufgelöste (Mindestkartiergröße 1 Hektar) und aktuellere Informationsquelle zur Landnutzung in Deutschland zur Verfügung. Für zukünftige Projekte wird empfohlen, die CL-Karte Deutschland auf Basis des LBM2018 (oder Nachfolgeprodukt) neu zu berechnen.

Ob bei Einbezug von weiteren Datenquellen zu FFH-Gebieten, Naturschutzgebieten und/oder Nationalparks möglicherweise stellenweise noch niedrigere CL_{LeutN} -Wert ermittelt worden wären, wurde im Rahmen des Projekts nicht untersucht.

- Am 24. Juni 2024 ist die EU-Verordnung zur Wiederherstellung der Natur und zur Änderung der Verordnung (EU) 2022/869 (EU-Verordnung 2440/1991) in Kraft getreten. Die EU-Mitgliedsstaaten werden darin verpflichtet, innerhalb eines vorgegebenen Zeitrahmens geeignete Wiederherstellungsmaßnahmen für diejenigen Lebensraumtypen zu ergreifen, die sich aktuell nicht im guten Zustand befinden. Möglicherweise wird aus der Umsetzung dieser Verordnung zukünftig eine Gebietskulisse entwickelt werden, die die im vorliegenden Projekt verwendete Critical Load-Karte ablöst.
- Bei den hier verarbeiteten PINETI-4 Daten muss unterschieden werden zwischen Daten der PINETI-4-Gesamtdositionsergebnisse und den Source-Receptor-Tables aus PINETI-4. Während die S-R-Tables auf den reinen LOTOS-EUROS Modell-Rechnungen basieren, fließen in das PINETI-4 Gesamtergebnis noch Messwerte der nassen Deposition mit ein. In der PINETI Projektmethode werden die LOTOS-EUROS Modellergebnisse unter Berücksichtigung der Messwerte geringfügig nach oben korrigiert (Kranenburg et al. 2024). Das betrifft vor allem die östlichen Bundesländer. Die Unterschiede zwischen reinem und korrigiertem Modellergebnis der Deposition sind in Schaap et al. 2018 (PINETI-3) dokumentiert.

Da die hier berechnete erforderliche Depositionsminderung mit den (nach oben korrigierten) PINETI-4 Gesamtergebnissen ermittelt wurde, während die resultierende Emissionsminderung auf Basis der S-R-Tables (d.h. ohne diese Korrektur) berechnet wurde, kommt es zu Unausgewogenheiten zwischen erforderlicher Depositionsminderung und erforderlicher Emissionsminderung. Das führt dazu, dass für zwei Bundesländer (Sachsen und Mecklenburg-Vorpommern) der Anteil der zu vermindernden NH_3 -Emission größer ist als 100 %, in diesen beiden Ländern kann somit das Minderungsziel auch bei Einbezug der ausländischen Emissionen rechnerisch nicht erfüllt werden. Das Qualitätsziel des Anforderungsniveaus 90-Perzentil, das heißt, dass die Critical Loads auf 90 % der Raster (mit einem CL_{LeutN} -Wert) eingehalten werden, lässt sich also nicht vollständig erreichen. Der Flächenanteil und die Lokalisierung dieser Gebiete mit Überschreitung des Critical Load können allerdings nicht angegeben werden.

- Die berechnete zu vermindernende NH_3 -Emission von 147,7 kt N übertrifft die vorhandene NH_3 -Emission (Ist-Emission) von 143,3 kt N um 4,4 kt N. Um diese Menge wird die rechnerische NH_3 -Obergrenze erhöht (Tabelle 19). Es sei hier darauf hingewiesen, dass diese spezifi-

sche Obergrenze für NH_3 für das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme sich von der Gesamt-obergrenze für NH_3 (Tabelle 20) unterscheidet, für welche die NH_3 -Minderungserfordernisse für die beiden Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme sowie Vegetation auf Ebene der Kreisregionen gemeinsam ausgewertet werden,

- Die zulässige N-Gesamtemission pro Kreis wird mit der Annahme berechnet, dass alle N-Emissionen innerhalb eines Kreises proportional zu ihrer Emissionsrate zur N-Deposition in einer betrachteten Rasterzelle beitragen, das heißt unabhängig von ihrer Entfernung zu dieser Rasterzelle. Grundsätzlich wäre es präziser, die zulässigen N-Emissionen mit Hilfe von Rückwärtstrajektorien mit einem atmosphärischen Ausbreitungsmodell aus der zulässigen N-Deposition zu ermitteln. Eine Modellierung mit einem atmosphärischen Chemie-Transport-Modell wäre allerdings außerordentlich aufwändig und war im Projekt nicht durchführbar.

3 Schutzgut Oberflächengewässer - Eutrophierung von Küstengewässern

3.1 Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren

Qualitätsziel

Als Qualitätsziel werden die Bewirtschaftungsziele der Oberflächengewässerverordnung (OGewV, zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 4 G v. 9. Dezember 2020 I 2873) für Übergangs- und Küstengewässer für die Gesamt-Stickstoff-(N(ges))-Konzentration festgelegt (jew. Jahresmittelwert, arithmetisch gemittelt):

- ▶ Zuflüsse zur Nordsee: 2,8 mg N L⁻¹ am Übergangspunkt limnisch-marin bzw. am Grenzpunkt zum Unterlieger
- ▶ Zuflüsse zur Ostsee: 2,6 mg N L⁻¹ am Übergangspunkt limnisch-marin bzw. am Grenzpunkt zum Unterlieger
- ▶ Donau: für die Flussgebietseinheit (FGE) Donau ist in der OGewV kein Bewirtschaftungsziel festgelegt, da der deutsche Beitrag zum N-Eintrag in das Schwarze Meer gering ist.

Anmerkung: Die Qualitätsziele der OGewV für oberirdische Gewässer für N-Verbindungen werden für NO₃⁻, Nitrit (NO₂⁻) und Ammonium (NH₄⁺) an keiner Messstelle in Deutschland überschritten, für NH₃ nur an einer geringen Zahl von Messstellen (Heldstab et al. 2020). Die Qualitätsziele für diese N-Verbindungen in Binnengewässern werden daher nicht weiter betrachtet.

Wirkungsindikatoren

N(ges)-Konzentration und N(ges)-Fracht in den Oberflächengewässern sowie N(ges)-Einträge in den Flussgebieten (Analysegebiete der MoRE-Modellierung).

Emission

N(ges)-Eintrag und N(ges)-Fracht in Oberflächengewässer, berechnet mit Modell MoRE.

Datengrundlagen

Umfangreiche flächenbezogene Daten u. a. zu Landnutzung, N-Deposition, N-Überschuss Landwirtschaft und Hydrogeologie sowie Daten zu Siedlungswasserwirtschaft und Gewässern (Einzelheiten s. Modellbeschreibung in Morling und Fuchs 2021, Morling et al. 2024).

3.2 Modellierung der N-Einträge und N-Konzentration

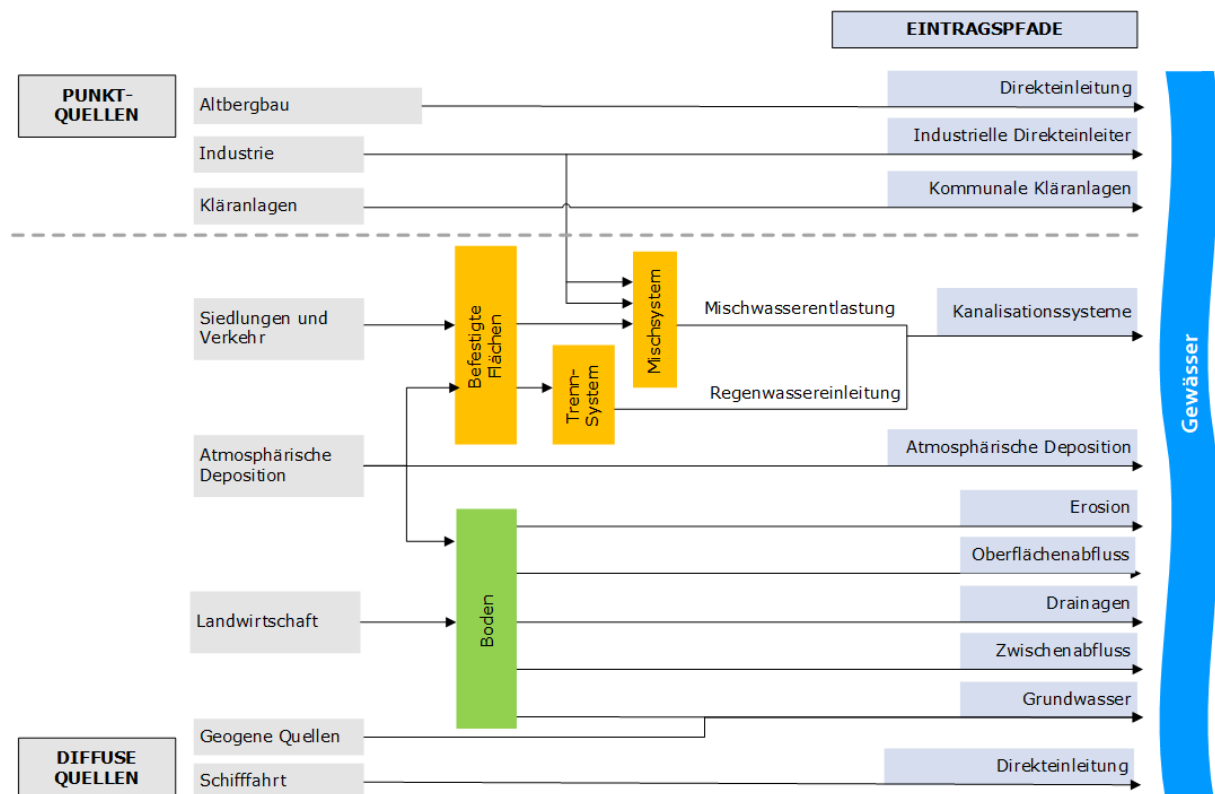
3.2.1 Modellinstrument MoRE

Für die Darstellung des Ist-Zustandes wird auf die Ergebnisse des Modellsystems MoRE zurückgegriffen. Das Modellinstrument MoRE (Modeling of Regionalized Emissions; isww.iwg.kit.edu/MoRE.php) wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes für die bundesweite Quantifizierung der Emissionen von Stoffen in Gewässern entwickelt und wird kontinuierlich fortgeführt (Fuchs et al. 2010, Fuchs et al. 2017b, 2017a, Fuchs et al. 2018, Fuchs et al. 2022, Morling und Fuchs 2021, Morling et al. 2024). Die Modellergebnisse sind sowohl die Grundlage zur Beschreibung der aktuellen Eintragungssituation als auch zur Ableitung von Minderungsmaßnahmen. Sie fließen regelmäßig in unterschiedliche Berichtsprozesse und Produkte ein, wie:

- ▶ EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL): Bestandsaufnahme der Emissionen, Einleitungen und Verluste (prioritäre Stoffe)
- ▶ Meeresstrategierahmenrichtlinie (MSRL): Folgebewertung und Maßnahmenplanung
- ▶ Helsinki Commission (HELCOM): Pollution Load Compilation
- ▶ UBA-Produkte: Umweltatlas, Broschüre "Wasserwirtschaft in Deutschland" etc.

Das Modell MoRE berechnet auf der Grundlage einer regionalisierten Pfadanalyse (Abbildung 7) den jährlichen N(ges)-Eintrag in Oberflächengewässer aus Punktquellen und über diffuse Eintragspfade.

Abbildung 7: Schematische Darstellung der in MoRE berücksichtigten Pfade^a für die Modellierung von Stoffeinträgen in Gewässer



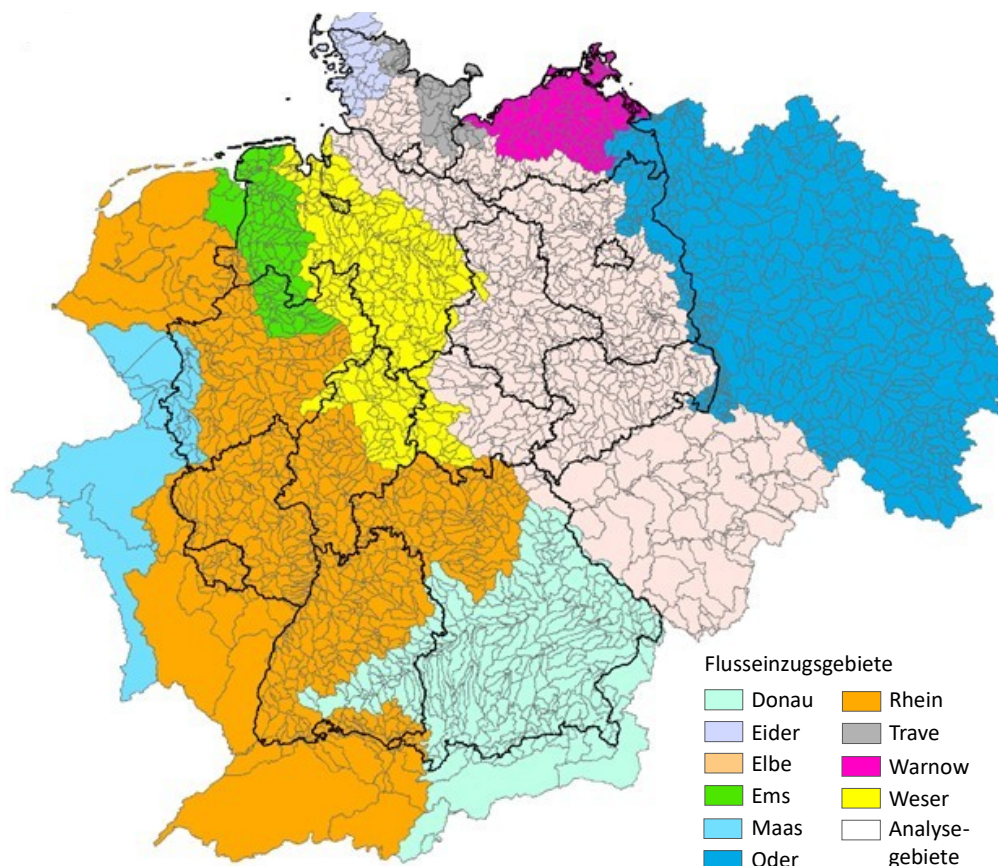
^a Für die Modellierung der Stickstoffeinträge werden die Pfade Altbergbau und die Schifffahrt nicht betrachtet.
Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

Das Gesamtgebiet der MoRE-Modellierung deckt alle Flussgebiete Deutschlands einschließlich der ausländischen Anteile ab und umfasst eine Fläche von rund 660.000 km² (Abbildung 8). Die kleinste räumliche Einheit für die Modellierung bilden die Analysegebiete (analytical units, AU), die typischerweise oberirdische hydrologische Einzugsgebiete repräsentieren. Deutschland wird dabei durch 2.759 AU mit einer mittleren Fläche von 135 km² abgedeckt. Für jedes AU können der N(ges)-Eintrag und die N(ges)-Konzentration am Auslass eines AU berechnet werden.

Zu den Datengrundlagen der MoRE-Modellierung gehören flächenbezogene Daten u. a. zur Landnutzung, atmosphärischen N-Deposition, N-Überschuss der Landwirtschaft, Hydrogeologie, Niederschlag, NO₃-Konzentration im Grundwasser (s. Kapitel 4) sowie Daten zur Siedlungswasserwirtschaft, Gewässerabflüssen und Gewässergüte.

MoRE ist, aufbauend auf dem Modell MONERIS (Behrendt et al. 1999), für die Darstellung von mittleren jährlichen Bedingungen ausgelegt. Alle Berechnungen werden auf Jahresbasis durchgeführt. Im vorliegenden Vorhaben werden die Jahre 2016 bis 2018 bzw. deren Mittelwert betrachtet. Für diese drei Jahre wurden die Ergebnisse des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME zum Gesamtabfluss und den Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss in MoRE übernommen, womit die Darstellung des Wasserhaushaltes in MoRE erheblich verbessert werden konnte (Morling et al. 2024). Für die deutschen Flussgebiete erfolgt dabei die Abflusseparation anhand von Referenzdaten und im Abgleich mit dem Hydrologischen Atlas Deutschland.

Abbildung 8: Flusseinzugsgebiete und Analysegebiete des Stoffeintragsmodells MoRE (Modellierung für das Bundesgebiet).



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG, Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierung vorgestellt (s. Morling et al. 2024, Fuchs et al 2022).

3.2.2 Modellerte N(ges)-Einträge

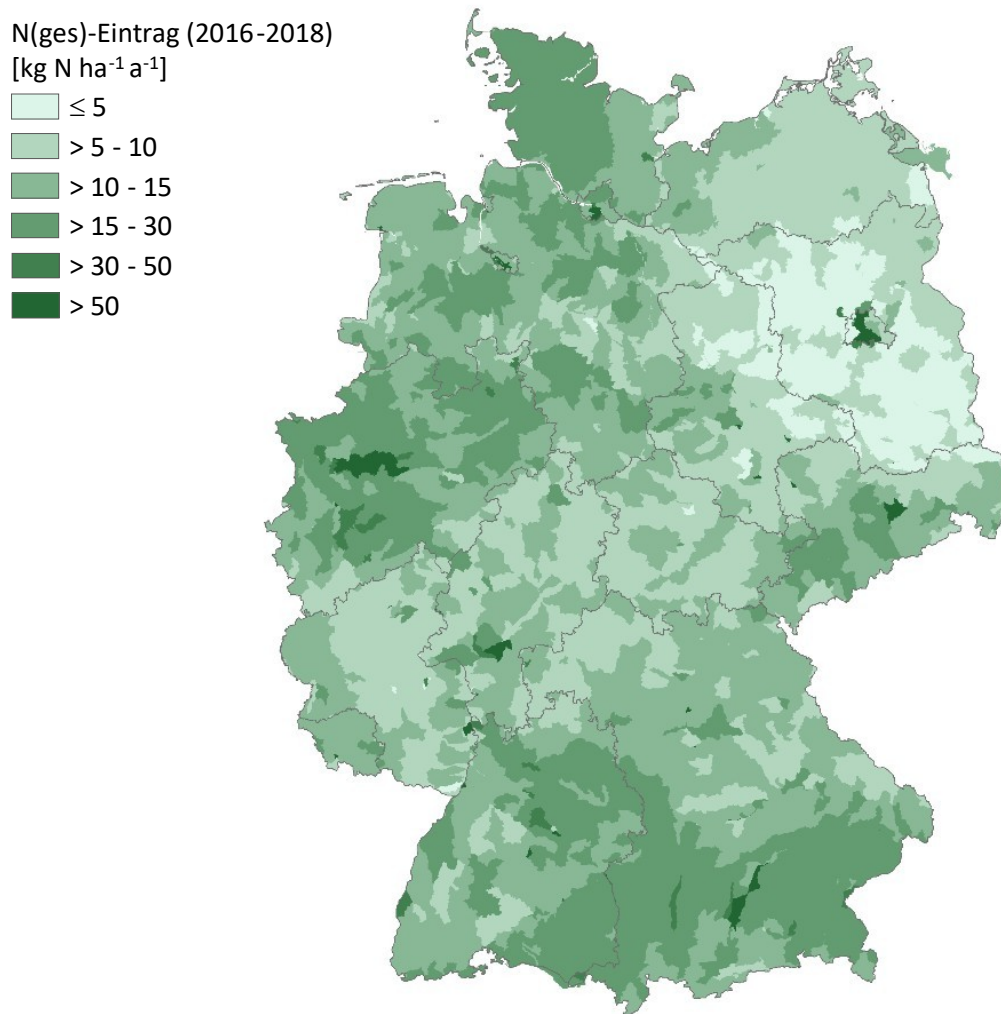
Die für 2016 bis 2018 mit MoRE modellierten N(ges)-Einträge in die deutschen Oberflächengewässer fasst Tabelle 3 zusammen. Im Mittel liegen diese bei rund 453,9 kt N a⁻¹. Der größte Teil der Einträge (rund 77 %) stammt aus diffusen Quellen. Zwischenabfluss und Grundwasser tragen zusammen mit mehr als 50 % zu den gesamten N-Einträgen bei. Obwohl nur ca. 23 % der Einträge aus Punktquellen stammen, treten diese in der flächenhaften Darstellung besonders hervor (Abbildung 9). Großstadregionen wie beispielsweise das Ruhrgebiet oder Berlin heben sich durch hohe flächenspezifische N(ges)-Einträge ab. In diesen Regionen ist der Einfluss der punktuellen urbanen Quellen (insbesondere Kläranlagen) deutlich zu erkennen.

Tabelle 3: Mit dem Modellinstrument MoRE berechnete N(ges)-Einträge in die Oberflächengewässer in Deutschland über alle Pfade, Jahre 2016 bis 2018 und Mittelwert, sowie die Anteile an den Gesamteinträgen (Werte gerundet)

Eintragspfad	Einträge 2016 kt N a ⁻¹	Einträge 2017 kt N a ⁻¹	Einträge 2018 kt N a ⁻¹	Einträge Mittel 2016-2018 kt N a ⁻¹	Anteil am Gesamteintrag (Mittel) %
Atmosphärische Deposition	11,1	11,6	9,7	10,8	2 %
Erosion ^a	4,0	4,0	4,0	4,0	1 %
Kommunale Kläranlagen	77,8	76,4	72,1	75,4	17 %
Industrielle Direkteinleiter	5,5	6,0	5,8	5,8	1 %
Kanalisationssysteme	25,3	25,5	18,9	23,2	5 %
Oberflächenabfluss	17,4	16,0	18,1	17,2	4 %
Drainagen	63,5	56,3	73,7	64,5	14 %
Zwischenabfluss	124,2	117,6	108,7	116,8	26 %
Grundwasser	151,9	142,0	114,7	136,2	30 %
Gesamt	480,7	455,4	425,7	453,9	100 %

^a Für die Darstellung des Pfades Erosion beruht die Ermittlung des Bodenabtrages und des Sedimenteintrages in Gewässer auf einem langjährigen Mittel und unterliegt somit keiner jährlichen Variation (siehe auch Fuchs et al. 2022).

Abbildung 9: Modellierte N(ges)-Einträge in Oberflächengewässer über alle Eintragspfade in den MoRE-Analysegebieten (Mittel 2016 – 2018).



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

3.2.3 Modellierung der N-Gewässerfrachten

Ausgehend von den N(ges)-Einträgen in das Gewässersystem werden die Frachten im Gewässer modelliert, indem die Einträge um die gewässerinterne N-Retention vermindert werden. Die Ansätze zur Schätzung der N-Retention in Oberflächengewässern wurden von Behrendt et al. (1999), Venohr (2006) und Venohr et al. (2011) entwickelt und für MoRE aus dem Modell MONERIS (Modelling Nutrient Emissions in River Systems) übernommen. Es handelt sich um empirische Ansätze, die die gewässerinterne Retention in Abhängigkeit von der hydraulischen Belastung (HL) und der Wassertemperatur (T) berechnen, weshalb der Ansatz auch als THL-Ansatz bezeichnet wird. Zentrale Größe ist die "hydraulische Belastung" eines Oberflächengewässers, die den Quotienten aus Abfluss und Wasseroberfläche darstellt. Für die N-Frachtberechnung werden anhand der hydraulischen Belastung drei Retentionsfaktoren für jedes AU ermittelt:

- ▶ Retentionsfaktor nach THL-Ansatz für Nebenläufe in den AU
- ▶ Retentionsfaktor nach THL-Ansatz für Hauptläufe der AU
- ▶ Retentionsfaktor nach THL-Ansatz am Auslass eines AU.

Die Berechnung der Frachten erfolgt für die Nebenläufe, die Hauptläufe und abschließend den Auslass des gesamten AU und unterliegt dabei der folgenden Systematik (Venohr et al. 2009):

- Es wird davon ausgegangen, dass die Stoffeinträge eines AU gleichmäßig in die Nebengewässer gelangen und dort einer Retention unterliegen (Fracht der Nebengewässer).
- Für AU, die Durchflussgebiete darstellen, wird für die von den Oberliegern zufließende Fracht eine Retention im Hauptlauf berechnet.
- Für Einträge aus Punktquellen wird in dem betreffenden AU keine Retention im Haupt- oder Nebenlauf angenommen. Diese Einträge werden erst bei der Retentionsberechnung für den Hauptlauf in dem darunterliegenden AU berücksichtigt.
- Liegt am Auslass eines AU eine Wasser-/Seefläche, dann wird für die gesamte am Auslass ankommende Fracht eine zusätzliche Retention berücksichtigt.

N-Fracht der Nebenläufe

Für die Nebenläufe wird innerhalb eines AU die Retention nur für die diffusen Einträge berücksichtigt. Die diffusen N-Einträge entsprechen der Differenz zwischen Gesamteinträgen in einem AU und den Einträgen über Punktquellen (Kläranlagen, industrielle Direkteinleiter) und Mischwasserüberläufen:

$$DIFF_E_N = TOT_E_N - WWTP_E_N - ID_E_N - US_cso_E_N \quad \text{Gl. (1)}$$

mit

$DIFF_E_N$	[t N a ⁻¹]	Diffuse N(ges)-Einträge ohne Mischwasserüberläufe
TOT_E_N	[t N a ⁻¹]	N(ges)-Einträge über alle Pfade
$WWTP_E_N$	[t N a ⁻¹]	N(ges)-Einträge über Kläranlagen
ID_E_N	[t N a ⁻¹]	N(ges)-Einträge über industrielle Direkteinleiter
$US_cso_E_N$	[t N a ⁻¹]	N(ges)-Einträge über Mischwasserüberläufe

Die Einträge über Punktquellen werden in den Hauptläufen und in den nachfolgenden AU berücksichtigt (siehe unten).

Die diffusen Einträge werden anschließend mit dem Retentionsfaktor für die Nebenläufe verrechnet, um die N-Fracht der Nebenläufe zu erhalten:

$$F_tribN = RM_THL_tribN \cdot DIFF_E_N \quad \text{Gl. (2)}$$

mit

F_tribN	[t N a ⁻¹]	N(ges)-Gewässerfracht der Nebenläufe
RM_THL_tribN	[-]	Retentionsfaktor nach THL-Ansatz für Nebenläufe

N-Frachten der Hauptläufe und am Gebietsauslass

Die N-Fracht im Hauptlauf eines AU setzt sich zusammen aus:

- N(ges)-Fracht der Nebenläufe, d. h. den diffusen N-Einträgen vermindert um die Retention in den Nebenläufen (Gl. (2)),
- N(ges)-Einträgen aus den Punktquellen (Kläranlagen, industrielle Direkteinleiter) und Mischwasserüberläufen, die definitionsgemäß nur in den Hauptlauf erfolgen, und
- N(ges)-Fracht, die aus stromaufwärts gelegenen AU(s) stammt, vermindert um den N-Retentionsfaktor für den Hauptlauf.

Für AU, an deren unterem Gebietsauslass sich eine größere Wasser- oder Seefläche befindet, die zu einer zusätzlichen Retention führt, wird außerdem die Summe der aufgeführten N-Frachten noch mit dem Retentionsfaktor für den Gebietsauslass verrechnet:

$$F_{mod,EZG} = (RM_THL_mrN \cdot upstr\{F_{mod,EZG}\} + RL_trib_N + WWTP_E_N + ID_E_N + US_cso_E_N) \cdot RM_THL_mrolN \quad \text{Gl. (3)}$$

mit:

$F_{mod,EZG}$	[t N a ⁻¹]	Modellierte N(ges)-Fracht am Gebietsauslass eines AU unter Berücksichtigung des gesamten Einzugsgebietes (EZG)
RM_THL_mrN	[-]	Retentionsfaktor nach THL-Ansatz für Hauptläufe
RM_THL_mrolN	[-]	Retentionsfaktor nach THL-Ansatz für Gebietsauslass
$upstr\{\}$		Funktion zum Aufsummieren der Frachten aus den Oberlieger-AU

Die so ermittelten Frachten $F_{mod,EZG}$ beziehen sich immer auf den Auslass eines AU und berücksichtigen alle Oberlieger, da die Frachten der einzelnen AU entlang des Abflussbaumes aufsummiert werden. Dies ist die übliche Berechnung in MoRE.

Alternativ kann auch die Fracht eines einzelnen AU ohne Berücksichtigung aller Oberlieger ermittelt werden. Hierfür kann beispielsweise von $F_{mod,EZG}$ die Fracht, die aus den Oberlieger-Gebieten stammt, abgezogen werden. Es ist aber auch möglich die Fracht des AU anhand der jeweils nur aus dem betreffenden AU stammenden Einträge und Retentionsfaktoren zu berechnen:

$$F_{mod,AU} = (RL_trib_N + WWTP_E_N + ID_E_N + US_cso_E_N) \cdot RM_THL_mrolN \quad \text{Gl. (4)}$$

mit

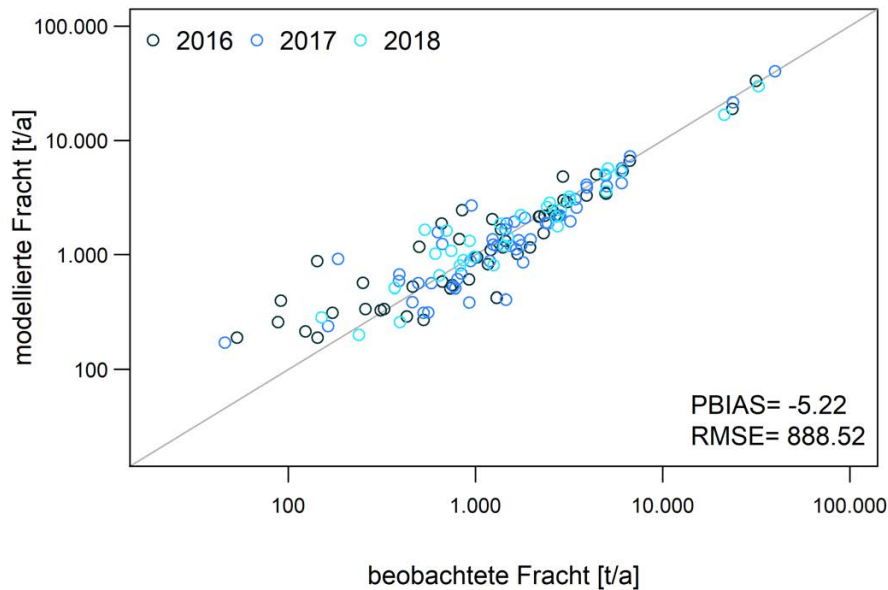
$F_{mod,AU}$	[t N a ⁻¹]	Modellierte Stickstoff-Gewässerfracht eines AU am Gebietsauslass ohne Berücksichtigung von oberhalb zulaufenden Frachten
RM_THL_mrolN	[-]	Retentionsfaktor nach THL-Ansatz für Gebietsauslass

Für Quellgebiete, die keine Oberlieger aufweisen, ist das nicht erforderlich (es gilt $F_{mod,EZG} = F_{mod,AU}$).

Mit diesen Ansätzen wird eine N(ges)-Fracht von 215,1 kt N (Mittel 2016 - 2018) für Deutschland ermittelt (ohne die Flussgebiete von Rhein und Donau, für die sich kein Minderungsbedarf ergibt; s. Kap. 3.3).

Zur Plausibilisierung der modellierten N-Gewässerfrachten wurden diese beobachteten Frachten an ausgewählten Gütemessstellen gegenübergestellt (Abbildung 10). Es zeigt sich eine weitgehend gute Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Gewässerfrachten. Größere Abweichungen gibt es insbesondere für kleinere Einzugsbiete, in denen die modellierten Frachten größer sind als die beobachteten. Neben Unsicherheiten in der Modellierung können insbesondere auch die Abschätzungen der beobachteten Frachten in kleineren Gewässern mit Unsicherheiten behaftet sein, da kurzzeitige Abflussereignisse mit potentiell höheren Frachten durch Einzelmessungen in der Regel kaum erfasst werden.

Abbildung 10: Gegenüberstellung modellierter und beobachteter Stickstoff-Gewässerfrachten an Gewässergütemessstellen in Deutschland für die Jahre 2016 bis 2018 (n = 132).



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

3.2.4 Modellierung der N-Gewässerkonzentrationen mit MoRE

Aus den modellierten jährlichen N(ges)-Gewässerfrachten kann, in Verbindung mit den jährlichen Abflüssen, für jedes AU die N(ges)-Konzentration als Jahresmittel berechnet werden. Die berechneten N(ges)-Konzentration beziehen sich immer auf den Gebietsauslass eines AU und berücksichtigen alle von oberhalb stammenden N-Frachten und Abflüsse, die dafür akkumuliert werden:

$$c_{mod,EZG} = \frac{F_{mod,EZG} \cdot 1000}{upstr(Q_{mod}) \cdot 86,4 \cdot 365} \quad \text{Gl. (5)}$$

mit

$c_{mod,EZG}$	[mg N L ⁻¹]	Modellierte N-Konzentration im Gewässer am Gebietsauslass eines AU
$F_{mod,EZG}$	[t a ⁻¹]	Modellierte N-Gewässerfracht am Gebietsauslass eines AU
Q_{mod}	[m ³ s ⁻¹]	Modellierter Abfluss eines AU am Gebietsauslass
$upstr()$		Funktion zum Aufsummieren des Abflusses entlang des Abflussbaumes

Analog zur Frachtberechnung kann alternativ auch die N-Konzentration jedes AU isoliert berechnet werden, in dem nur die aus dem betreffenden AU stammende N-Fracht und Abfluss berücksichtigt wird:

$$c_{mod,AU} = \frac{F_{mod,AU} \cdot 1000}{Q_{mod} \cdot 86,4 \cdot 365} \quad \text{Gl. (6)}$$

mit

$c_{mod,AU}$	[mg N L ⁻¹]	Modellierte N-Konzentration im Gewässer eines AU am Gebietsauslass ohne Berücksichtigung der Frachten aus dem Oberlauf
$F_{mod,AU}$	[t a ⁻¹]	Modellierte N-Gewässerfracht eines AU am Gebietsauslass ohne Berücksichtigung der Frachten aus dem Oberlauf
Q_{mod}	[m ³ s ⁻¹]	Modellierter Abfluss eines AU am Gebietsauslass

Da die modellierten Einträge und Abflüsse regional sehr variabel ausfallen können, wirkt sich dies auch auf die berechneten Konzentrationen aus. Es ist zu beachten, dass für ein einzelnes betrachtetes AU $C_{\text{mod,AU}} \neq C_{\text{mod,EZG}}$ sein kann.

3.3 Ermittlung des Minderungsbedarfs

Grundsätzlich können drei Ansätze verfolgt werden, um zulässige N(ges)-Konzentrationen für die AU zu berechnen, mit denen das meeresökologische Qualitätsziel am Übergangspunkt limnisch-marin eingehalten wird. Je nach gewähltem Ansatz führt dies zu unterschiedlicher Höhe und räumlichen Verteilung des resultierenden Minderungsbedarfes und der regionalen Obergrenzen der N(ges)-Einträge in Gewässer.

Im Folgenden werden drei Ansätze (Szenarien) zur Ermittlung des Minderungsbedarfes vorgestellt und deren Ergebnisse miteinander verglichen.

- ▶ **Szenario A:** Die Einhaltung des meeresökologischen Qualitätsziels für die Nordsee bzw. die Ostsee wird flächendeckend für alle AU gefordert, ohne Berücksichtigung der gewässerinternen Retention im weiteren Verlauf im Gewässersystem unterhalb des betrachteten AU.
- ▶ **Szenario B:** Die Einhaltung des meeresökologischen Qualitätsziels für die Nordsee bzw. die Ostsee wird spätestens am Übertrittspunkt limnisch-marin bzw. am Grenzpunkt zum Unterlieger an der Landesgrenze gefordert. Damit können sich im Binnenland andere Qualitätsziele ergeben. Diese Qualitätsziele für die AU im Binnenland werden unter Berücksichtigung der kumulativen Retention in einem Flussgebiet ermittelt, wobei die kumulative Retention jeweils zwischen dem Auslass des betrachteten AU und dem Übertrittspunkt limnisch-marin (bzw. Grenzpunkt zu Unterlieger an der Landesgrenze) berechnet wird.
- ▶ **Szenario C:** Wie in Szenario B wird die Einhaltung der meeresökologischen Qualitätsziele für Nord- bzw. Ostsee wird spätestens am Übertrittspunkt limnisch-marin bzw. am Grenzpunkt zum Unterlieger an der Landesgrenze gefordert. Ausgangspunkt für die Berechnung des Minderungsbedarfs sind die Qualitätsziele unter Berücksichtigung der kumulativen Retention aus Szenario B. Die Berechnung des Minderungsbedarfs unterscheidet sich dahingehend, dass dieser dort im Abflussbaum entsteht, wo erstmals eine Überschreitung des Qualitätsziels auftritt. Die Betrachtung erfolgt ausgehend an der Quelle zur Mündung flussabwärts.

Von diesen Szenariobetrachtungen werden die folgenden FGE ausgenommen:

- ▶ **Donau:** Für die Donau ist kein Qualitätsziel festgelegt.
- ▶ **Rhein:** Am Rhein wird seit einigen Jahren an der Messstelle Kleve-Bimmen an der Grenze zu den Niederlanden das meeresökologische Qualitätsziel von $2,8 \text{ mg N L}^{-1}$ im Jahresmittel eingehalten (genauere Auswertung siehe Anhang A.3.1). Es werden deshalb nur Gebiete des Deltarheins betrachtet, die direkt in die Niederlande entwässern. Um trotzdem abschätzen zu können, wie hoch ein möglicher Minderungsbedarf im gesamten Einzugsgebiet ist, werden alle Szenarien zusätzlich unter Berücksichtigung des Rhein-EZG durchgeführt, die Ergebnisse sind ergänzend im Anhang (A.3.2, A.3.4) aufgeführt.

Da Messwerte zu Konzentrationen an den Übergabepunkten nicht für alle Flusssysteme und alle AU in Deutschland vorliegen, werden bei allen Berechnungen nicht gemessene, sondern modellierte N-Konzentrationen verwendet.

3.3.1 Szenario A: Meeresökologische Qualitätsziele gelten für alle Analysegebiete

Dieses Szenario stellt die in den Annahmen strikteste und am einfachsten zu berechnende Umsetzungsmöglichkeit dar, da das meeresökologische Qualitätsziel überall einzuhalten ist (ohne Berücksichtigung der gewässerinternen Retention oder Verdünnung). Bei diesem Ansatz spielt daher die Entfernung der einzelnen AU zur Küste keine Rolle.

Die Berechnung erfolgt auf Basis der Einträge und Frachten innerhalb eines AU (exklusive Oberlieger), so dass Beziehungen zu Oberlieger-Gebieten oder Einträge aus dem Ausland in diesem Ansatz nicht berücksichtigt werden müssen. Zur Berechnung des Minderungsbedarfes werden die modellierten Gewässerkonzentration am Auslass eines AU dem meeresökologischen Qualitätsziel gegenübergestellt:

$$\text{Minderungsbedarf}[\%] = \frac{c_{\text{mod,AU}} - c_M}{c_{\text{mod,AU}}} \cdot 100 \quad \text{Gl. (7)}$$

mit

$c_{\text{mod,AU}}$	[mg N L ⁻¹]	Modellierte N-Konzentration im Gewässer eines AU am Gebietsauslass ohne Berücksichtigung von oberhalb zulaufenden Frachten
c_M	[mg N L ⁻¹]	Meeresökologisches Qualitätsziel im limnisch-marinen Übergangsbereich (Nordsee: 2,8 mg N L ⁻¹ ; Ostsee: 2,6 mg N L ⁻¹).

Fällt der Minderungsbedarf für ein AU nach Gleichung Gl. (7) negativ aus, wird er Null gesetzt. Zur Berechnung des Minderungsbedarfs in kt N a⁻¹ wird der relative Minderungsbedarf mit den modellierten Einträgen multipliziert.

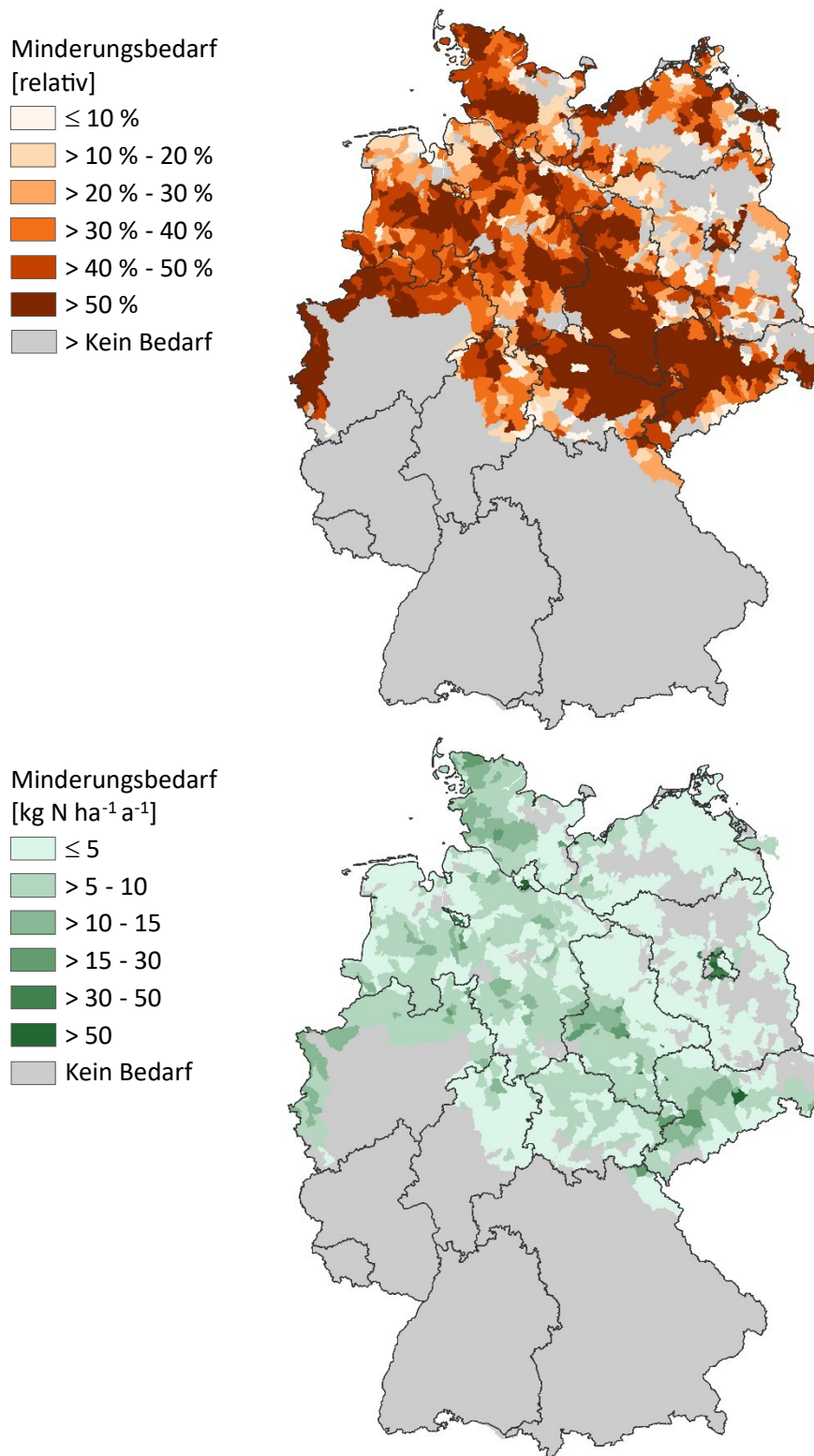
Ermittelter Minderungsbedarf

Mit diesem strikten Ansatz ergibt sich im Mittel der Jahre 2016 bis 2018 für die deutschen FGE ein Gesamt-Minderungsbedarf der Stickstoff-Einträge von rund 92,6 kt N a⁻¹, was einer erforderlichen Eintragsminderung von 43 % entspricht. Die Werte für die einzelnen FGE sind in Tabelle 4 dargestellt.

Räumlich betrachtet liegt der Minderungsbedarf in weiten Teilen Deutschlands über 50 % (Abbildung 11), mit Schwerpunkten in Berlin, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen, sowie dem Maas-Einzugsgebiet in Westdeutschland. Gebiete ohne Minderungsbedarf finden sich insbesondere in weiten Teilen Brandenburgs und Mecklenburg-Vorpommerns.

Auch wenn der prozentuale Minderungsbedarf teilweise recht hoch ausfällt (z. B. im nördlichen Sachsen-Anhalt), entspricht dies mitunter einer relativ geringen absoluten Minderung von ≤ 5 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Dagegen müssten in diesem Szenario insbesondere in städtischen Gebieten sehr hohe Minderungen von > 30 kg N ha⁻¹ a⁻¹ erbracht werden.

Abbildung 11: Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge aus den MoRE-Analysegebieten in die Oberflächengewässer^a in Deutschland zur Einhaltung des meeresökologischen Qualitätsziels in allen Analysegebieten (Szenario A), Mittel 2016 – 2018.



^a Ohne Einbezug der FGE Rhein

Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

3.3.2 Szenario B: Meeresökologische Qualitätsziele gelten für die Analysegebiete mit Berücksichtigung der kumulativen Retention im Binnenland

Die Berechnung des Minderungsbedarfes erfolgt in diesem Szenario grundsätzlich wie in Szenario A, die Qualitätsziele für das Binnenland werden jedoch unter Berücksichtigung der kumulativen Retention in den Flussgebieten abgeleitet. Die Berechnung erfolgt analog zu Szenario A als Gegenüberstellung der modellierten Gewässerkonzentration am Auslass eines AU und dem Qualitätsziel:

$$\text{Minderungsbedarf}[\%] = \frac{c_{\text{mod},\text{AU}} - c_B}{c_{\text{mod},\text{AU}}} \cdot 100 \quad \text{Gl. (8)}$$

mit

$c_{\text{mod},\text{AU}}$	[mg N L ⁻¹]	Modellierte N-Konzentration im Gewässer eines AU am Gebietsauslass ohne Berücksichtigung von oberhalb zulaufenden Frachten
c_B	[mg N L ⁻¹]	Zulässige Konzentration am Gebietsauslass eines AU zur Einhaltung des meeresökologischen Qualitätsziels mit Berücksichtigung der kumulativen Retention im Binnenland

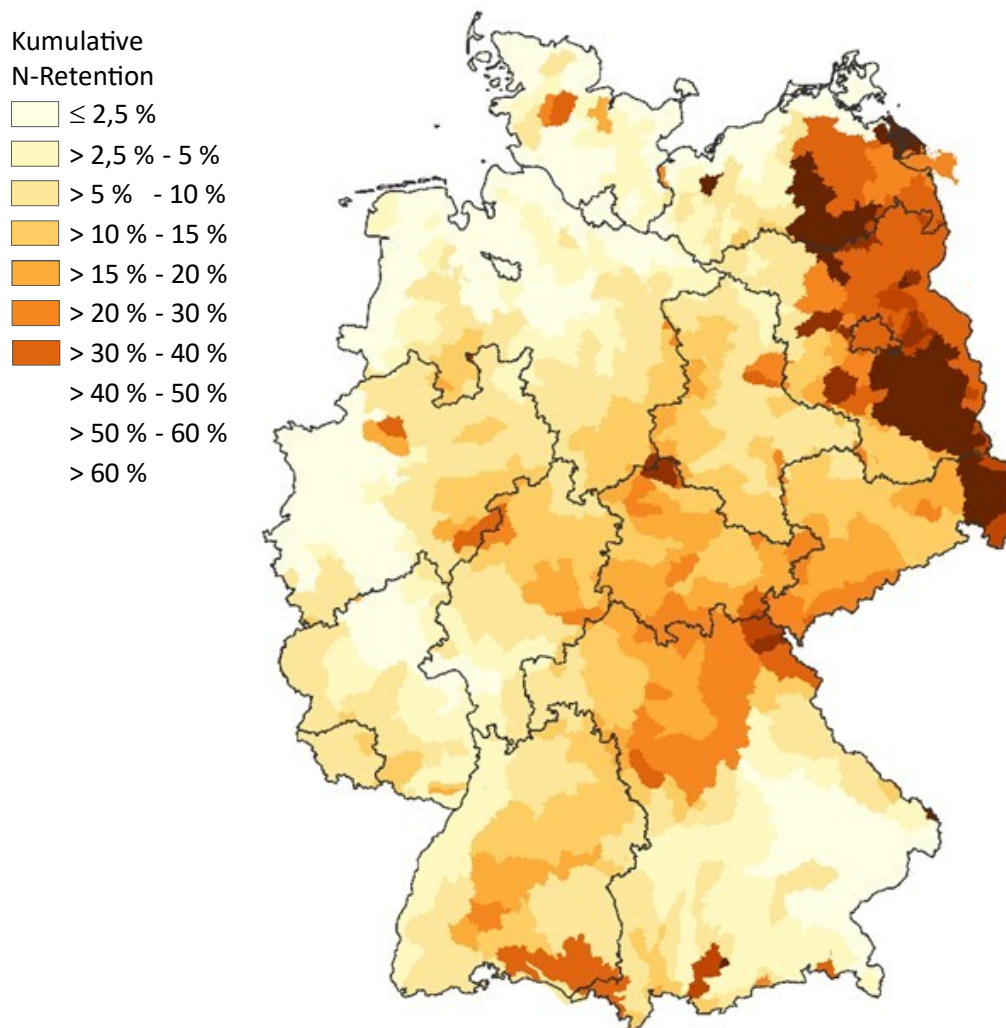
Die Ableitung der zulässigen Konzentrationen im Binnenland erfolgte gemäß dem Vorgehen nach LAWA (2017). In einem ersten Schritt wird die kumulative Retention von jedem AU bis zur Küste ermittelt. Im zweiten Schritt erfolgt dann die Berechnung der zulässigen Konzentration am Gebietsauslass eines AU unter Verwendung des Wertes der kumulativen Retention.

Kumulative Retention

Für die betrachteten Jahre 2016 bis 2018 wurden die mit MoRE ermittelten Retentionsfaktoren (siehe auch Abschnitt 3.2.3) pro Analysegebiet herangezogen. Die kumulative Retention R_{ai} berücksichtigt die Retention vom Auslass eines Teilgebietes bis zur Mündung ins Meer (Übergangspunkt limnisch-marin) bzw. für Flüsse, die außerhalb des deutschen Staatsgebietes ins Meer münden (z. B. Rhein, Oder), bis zum jeweiligen Grenzpunkt in Deutschland.

Um die kumulative Retention zu berechnen, werden zunächst die Einträge aus allen Gebieten gleich Null gesetzt. Für das betrachtete Gebiet wird dann eine Fracht von 1 angenommen und anschließend entlang des Abflussbaumes die Retention bis zur Mündung bzw. dem Grenzpunkt berechnet. So erhält man die Fracht (als Anteil des N-Eintrags im betreffenden AU), die aus dem betreffenden AU bis zur Küste bzw. zur Landesgrenze gelangt. Die kumulative Retention ergibt sich als $(1 - \text{Frachtanteil an der Küste bzw. Grenzpunkt})$. Diese Berechnung wurde für jedes der drei betrachteten Jahre durchgeführt und anschließend für die drei Jahre gemittelt (Abbildung 12). Die kumulative Retention R_{ai} kann rechnerisch Werte bis nahe 100 % annehmen, analog zu LAWA (2017) wurde die R_{ai} für die nächsten Schritte allerdings auf maximal 50 % begrenzt.

Abbildung 12: Kumulative Stickstoff-Retention im Gewässer zwischen den Analysegebieten (Gebietsauslass) bis zum Übergangspunkt limnisch-marin bzw. bis zum Grenzpunkt in Deutschland^a nach MoRE-Modellierung (Mittel 2016 – 2018).



^a Für Flüsse, die außerhalb des deutschen Staatsgebietes ins Meer münden.

Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Ermittlung der zulässigen Konzentrationen im Binnenland

Aus der ermittelten kumulativen Retention und den meeresökologischen Qualitätszielen werden AU-spezifische zulässige Konzentrationen für das Binnenland berechnet (LAWA 2017):

$$c_{Bi} = \frac{c_{Mi}}{R_{ai}} \quad \text{Gl. (9)}$$

mit

c_{Bi}	[mg N L ⁻¹]	Zulässige Konzentration im Binnenland für Analysegebiet i
c_{Mi}	[mg N L ⁻¹]	Meeresökologisches Qualitätsziel im limnisch-marinen Übergangsbereich für Analysegebiet i
R_{ai}	[-]	Kumulative N-Retention des Analysegebiets i

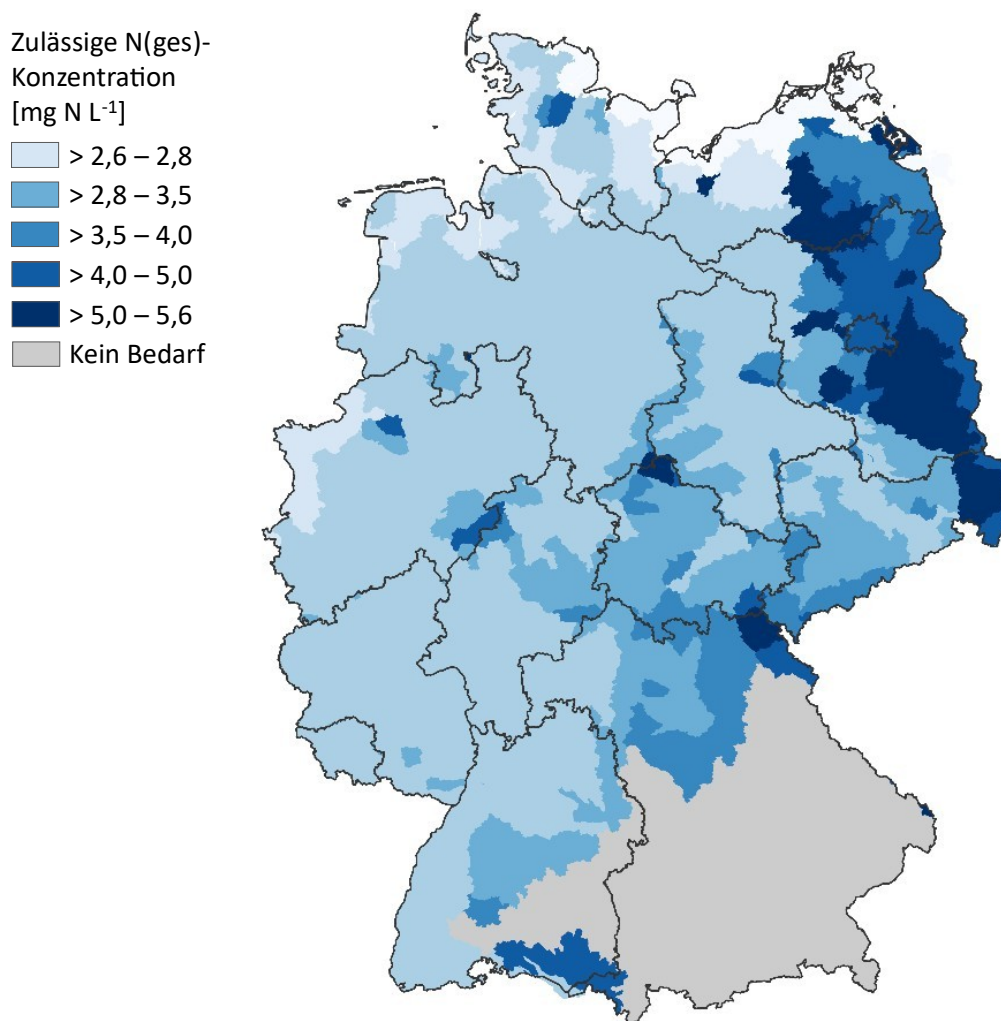
Die zulässige Konzentration c_{Bi} stellt die N(ges)-Konzentration am Auslass eines AU dar und gilt für die Betrachtung des jeweiligen AU inklusive seiner Oberlieger-Gebiete (gesamtes EZG). Sie kann jedoch auch für die Betrachtung eines einzelnen AU herangezogen werden. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass die zulässigen Konzentrationen in jedem Fall eingehalten werden,

wenn die Konzentration, die sich aus den Einträgen innerhalb eines AU ergibt, der zulässigen Konzentration für das gesamte EZG entspricht.

Da die kumulative Retention auf maximal 50 % begrenzt wird (LAWA 2017), kann das berechnete Qualitätsziel auf AU-Ebene nur maximal doppelt so hoch sein wie das vorgegebene meeres-ökologische Qualitätsziel.

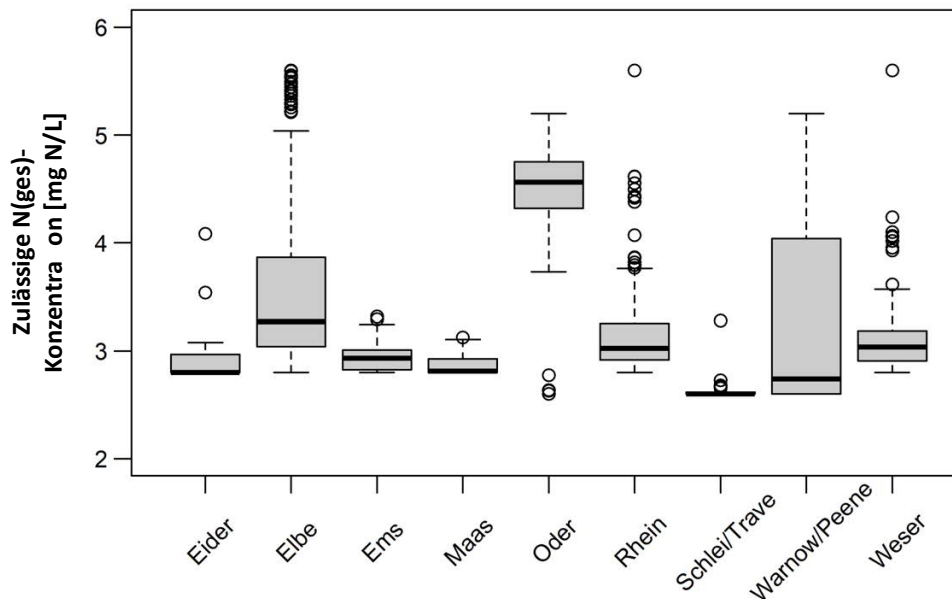
Die Berechnung wurde für die Einzeljahre 2016 bis 2018 durchgeführt und anschließend für diesen Zeitraum gemittelt. Die zulässigen Konzentrationen auf AU-Ebene nehmen mit der Distanz zur Mündung/Grenzpunkt und in Abhängigkeit der vorliegenden kumulativen Retention zu (Abbildung 12). In der räumlichen Verteilung der ermittelten zulässigen Konzentrationen im Binnenland (Abbildung 13) ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei LAWA (2017). Die zulässigen Konzentrationen fallen für die einzelnen FGE sehr unterschiedlich aus. Küstennahe FGE wie Schlei/Trave, Eider und Ems zeigen geringe zulässige Konzentrationen. Insbesondere für die ostdeutschen FGE Oder, Warnow/Peene und Elbe werden aufgrund der dort vorliegenden hohen Retention teilweise aber auch sehr hohe zulässige Konzentrationen berechnet (Abbildung 13, Abbildung 14).

Abbildung 13: Zulässige N(ges)-Konzentrationen im Binnenland (Jahresmittel) auf Ebene der deutschen MoRE-Analysegebiete (Mittel 2016 – 2018) mit Berücksichtigung der kumulativen N-Retention.



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Abbildung 14: Zulässige N(ges)-Konzentrationen im Binnenland (Jahresmittel) mit Berücksichtigung der kumulativen N-Retention in den MoRE-Analysegebieten, Box-Plot-Verteilungen in den Flussgebietseinheiten.



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG.

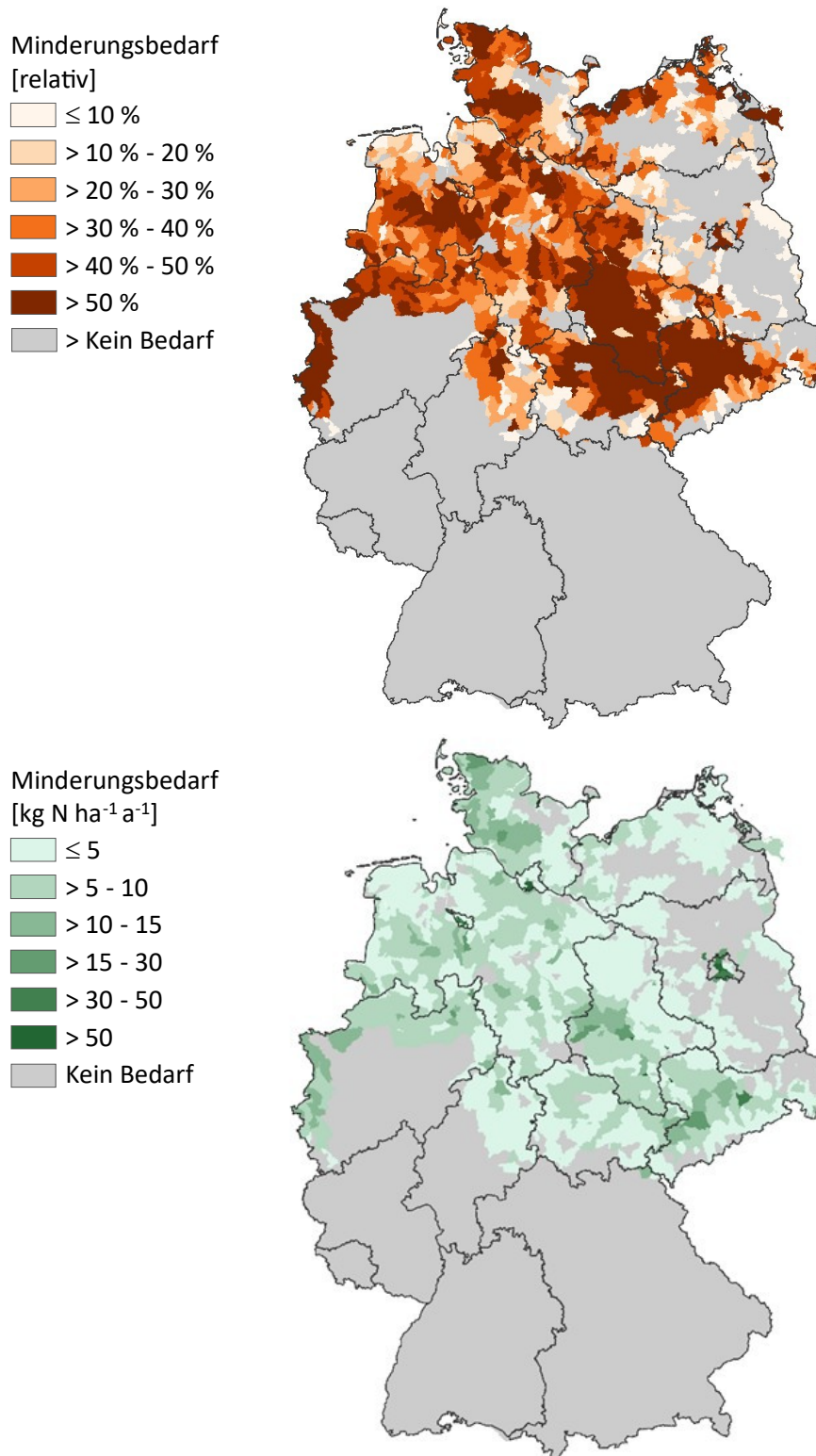
Ermittelter Minderungsbedarf

Unter Verwendung der abgeleiteten zulässigen Konzentrationen ergibt sich im Mittel der Jahre 2016 bis 2018 für die deutschen FGE zunächst ein Gesamt-Minderungsbedarf der N-Einträge von rund 81,2 kt N a⁻¹. Die Werte für die einzelnen FGE sind in Tabelle 4 dargestellt. Hinweis: Die Summation des Minderungsbedarfs auf der Ebene der MoRE-Analysegebiete führt zu einem etwas unterschiedlichen Ergebnis als die nachfolgende Umlegung auf die Kreisregionen (Kapitel 3.3.6), da die Flächen der Analysegebiete und der Kreisregionen nicht kongruent sind. Aggregiert für die Kreisregionen beträgt der Minderungsbedarf 76,7 kt N a⁻¹. Für die Berechnung der nationalen N-Obergrenze (Tabelle 19, Tabelle 20) werden die Werte nach Umlegung auf die Kreisregionen verwendet.

Auch in diesem Szenario liegt der Minderungsbedarf in weiten Teilen Deutschlands über 50 % (Abbildung 15). Davon betroffen sind im Wesentlichen die gleichen Regionen wie in Szenario A (vgl. Abbildung 11). Auch die Gebiete ohne Minderungsbedarf decken sich weitestgehend mit denen aus Szenario A. Insbesondere für die ostdeutschen Bundesländer Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern ist in weiten Teilen ein geringerer Minderungsbedarf gegenüber Szenario A ersichtlich (vgl. Abbildung 11 und Abbildung 15).

Ähnlich wie in Szenario A kann der prozentuale Minderungsbedarf teilweise recht hoch ausfallen und trotzdem einer recht niedrigen absoluten Minderung von $\leq 5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ entsprechen (z.B. im nördlichen Sachsen-Anhalt). Ebenfalls wie in Szenario A lassen sich sehr hohe Minderungen von $> 30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ besonders in städtischen Gebieten ausmachen (Abbildung 15).

Abbildung 15: Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge aus den MoRE-Analysegebieten in die Oberflächengewässer^a in Deutschland zur Einhaltung des meeresökologischen Qualitätsziels, mit Berücksichtigung der kumulativen Retention (Szenario B), Mittel 2016 – 2018.



^a Ohne Einbezug der FGE Rhein

Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

3.3.3 Szenario C: Meeresökologische Qualitätsziele gelten für die Analysegebiete mit Berücksichtigung der kumulativen Retention und der Verdünnung entlang des Abflussbaums

Grundlage für die Ableitung des Minderungsbedarfs in Szenario C sind die in Szenario B berechneten zulässigen Konzentrationen. Allerdings wird in diesem Szenario davon ausgegangen, dass ein Minderungsbedarf erst dann auszuweisen ist, wenn erstmals entlang der Fließstrecke eine Überschreitung des meeresökologischen Qualitätsziels auftritt. Das Vorgehen orientiert sich an LUBW (2015) und wurde bspw. für die Stoffeintragsmodellierung in Baden-Württemberg verwendet (Kiemle et al. 2019).

Basierend auf den ermittelten zulässigen Konzentrationen aus Szenario B (Abschnitt 3.3.2) und dem modellierten Abfluss werden die zulässigen Frachten berechnet, die entlang des Abflussbaumes vorliegen.

$$MF_{B,EZG} = \frac{c_B \cdot upstr(Q_{mod}) \cdot 86,4 \cdot 365}{1000} \quad \text{Gl. (10)}$$

mit

$F_{B,EZG}$	[t N a ⁻¹]	Zulässige N(ges)-Fracht im Binnenland am Gebietsauslass eines AU
c_B	[mg N L ⁻¹]	Zulässige Konzentrationen für N im Binnenland
Q_{mod}	[m ³ s ⁻¹]	Modellierter Gesamtabfluss eines AU am Gebietsauslass
$upstr()$		Funktion zum Aufsummieren des Abflusses aus Oberlieger-Gebieten

Für AU ohne Oberlieger (Quellgebiete) ergibt sich ein Minderungsbedarf, wenn die modellierte Fracht zu einer N(ges)-Konzentrationen über dem jeweiligen meeresökologischen Qualitätsziel führen würde. Der Minderungsbedarf errechnet sich dann aus der modellierten Fracht abzüglich der zulässigen Fracht. Ist kein Minderungsbedarf erforderlich, da die modellierte Fracht < zulässige Fracht ist, wird die modellierte (niedrigere) Fracht an den Unterlieger weitergegeben.

Für AU mit Oberlieger(n) wird angenommen, dass jeweils nur die maximal zulässige(n) Fracht(en) von oberhalb zufließen, da eine eventuell erforderliche Minderung in den oberhalb liegenden Gebieten bereits erfolgt ist. Für ein AU mit Oberliegern ergibt sich die maximal zulässige Fracht dann wie folgt:

$$MF_{max,AU} = F_{B,EZG} - F_{max,OL} \quad \text{Gl. (11)}$$

mit

$F_{max,AU}$	[t N a ⁻¹]	Maximal zulässige N(ges)-Fracht am Gebietsauslass eines AU ohne Berücksichtigung der von oberhalb zulaufenden Frachten
$F_{B,EZG}$	[t N a ⁻¹]	Zulässige N(ges)-Fracht für N im Binnenland am Gebietsauslass eines AU
$F_{max,OL}$	[t N a ⁻¹]	Zulässige N-Frachten, die aus Oberlieger-Gebieten zufließen

Der Minderungsbedarf für AU mit Oberliegern ergibt sich aus der Gegenüberstellung von modellierten und den maximal zulässigen Zielfrachten:

$$Minderungsbedarf[\%] = \frac{F_{mod,AU} - F_{max,AU}}{F_{mod,AU}} \cdot 100 \quad \text{Gl. (12)}$$

Wenn in Oberlieger-Gebieten keine Minderung erforderlich ist und die modellierte Fracht < Zielfracht des AU, wird die modellierte (niedrigere) Fracht an die Unterlieger weitergegeben. Da-

durch kann die Fracht der Oberlieger ($F_{\max,OL}$), geringer ausfallen und für das stromabwärts gelegene Gebiet kann die maximal zulässige Zielfracht ($F_{\max,AU}$) höher ausfallen (Gleichung Gl. (11)). Aufgrund dieser Verdünnungseffekte kann sich in diesem Szenario der Minderungsbedarf in den flussabwärts gelegenen Gebieten verringern und es so zu höheren zulässigen Maximaleinträgen kommen. Wenn für alle AU eines EZG ein Minderungsbedarf besteht, ergibt sich der gleiche Minderungsbedarf wie in Szenario B, da die gleichen zulässigen Konzentrationen zugrunde gelegt werden.

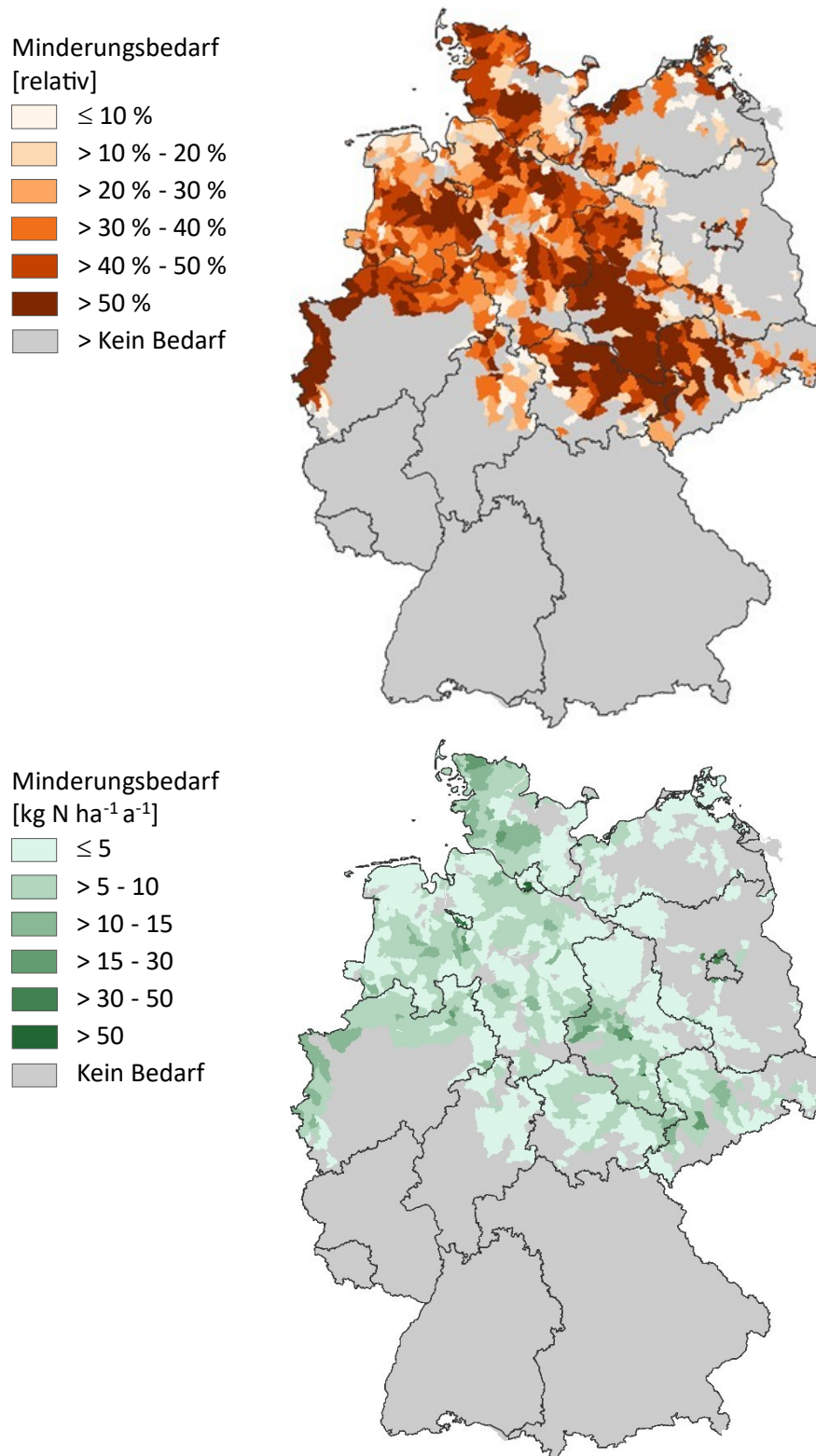
Im Szenario C müssen für die Darstellung des Ist-Zustandes (Abschnitt 3.2) die Zuflüsse aus ausländischen Gebieten berücksichtigt werden, da diese den berechneten Minderungsbedarf im Inland beeinflussen können. Um eine mögliche Kompensation von ausländischen Quellen innerhalb von Deutschland auszuschließen, wurden in diesem Szenario alle von außerhalb nach Deutschland zufließenden modellierten Frachten einer Korrektur unterzogen. Für den Fall, dass die modellierten Frachten am Übergabepunkt vom Ausland nach Deutschland über den Zielfrachten liegen ($F_{\text{mod,EZG}} > F_{B,EZG}$), wurden sie durch die Zielfrachten ersetzt. Lagen die modellierten Frachten niedriger als die Zielfrachten, wurde keine Änderung vorgenommen.

Ermittelter Minderungsbedarf

Unter Berücksichtigung der für das Binnenland abgeleiteten zulässigen Konzentrationen und der Weitergabe von Frachten entlang des Abflussbaumes ergibt sich im Mittel der Jahre 2016 bis 2018 für die deutschen FGE ein Gesamt-Minderungsbedarf der N-Einträge in Oberflächengewässern von rund 70 kt N a⁻¹, was einer Minderung von 32 % entspricht. Die Werte für die einzelnen FGE sind in Tabelle 4 gegenübergestellt.

Im Vergleich zu Szenario A und B fallen die Minderungsbedarfe auch räumlich deutlich geringer aus (Abbildung 16), jedoch besteht in vielen Regionen weiterhin ein Minderungsbedarf von mehr als 50 %. Der absolute Minderungsbedarf in städtischen Gebieten (z B. Berlin und Dresden) ist aufgrund der beschriebenen Verdünnungseffekte geringer als in den Szenarien A und B (Abbildung 16).

Abbildung 16: Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge aus den MoRE-Analysegebieten in die Oberflächengewässer^a in Deutschland zur Einhaltung des meeresökologischen Qualitätsziels, mit Berücksichtigung der kumulativen Retention und der Verdünnung entlang des Abflussbaums (Szenario C), Mittel 2016 – 2018.



^a Ohne Einbezug der FGE Rhein

Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

3.3.4 Ergebnisse der Szenarien im Vergleich

Die drei Szenarien weisen deutliche Unterschiede in der Höhe der berechneten Minderungsbedarfe auf (Tabelle 4). Im Szenario A, dem höchsten Anforderungsniveau, entsteht auch der höchste Minderungsbedarf. Szenario C weist den geringsten Minderungsbedarf aus, da Verdünnungseffekte entlang des Abflussbaumes berücksichtigt werden.

Eine Abnahme der ermittelten Minderungsbedarfe von Szenario A zu C ist für alle FGE ersichtlich, fällt jedoch sehr unterschiedlich aus. Insbesondere für die küstennahen FGE Eider, Ems, Maas und Schlei/Trave unterscheidet sich der Minderungsbedarf zwischen den Szenarien nur wenig. Dagegen ist der Unterschied zwischen den Szenarien für die Oder relativ am höchsten (Tabelle 4).

Tabelle 4: Absoluter und relativer Minderungsbedarf der N-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands für drei Szenarien^a zur Einhaltung der meeresökologischen Qualitätsziele für Nord- und Ostsee, Mittel 2016 – 2018, Werte gerundet.

Flussgebietseinheit ^b	Minderungsbedarf (Mittel 2016 - 2018) ^c					
	Szenario A Meeresökologische Qualitätsziele in allen AU einzuhalten		Szenario B Wie A, mit Berücksichtigung der kumulativen Retention		Szenario C Wie B, mit Berücksichtigung Verdünnung entlang Abflussbaum	
	t N a ⁻¹	%	t N a ⁻¹	%	t N a ⁻¹	%
Eider	4.600	35 %	4.200	32 %	4.200	32 %
Elbe	45.000	46 %	39.400	40 %	32.400	33 %
Ems	8.100	38 %	7.400	35 %	7.400	35 %
Maas	3.100	d	3.100	d	2.800	d
Oder	2.000	d	1.100	d	300	d
Deltarhein ^e	3.000	d	2.900	d	2.700	d
Schlei/Trave	2.000	18 %	1.900	17 %	1.800	16 %
Warnow/Peene	3.500	29 %	2.600	21 %	1.800	15 %
Weser	21.300	36 %	18.600	31 %	16.500	28 %
Gesamt	92.600	43 %	81.200^c	38 %	69.900	32 %

^a Beschreibung s. Abschnitte 3.3.1 bis 3.3.3.

^b Für die Donau sind keine meeresökologischen Anforderungen definiert, daher wird dieses FGE nicht betrachtet.

^c Die Berechnung und Summation des Minderungsbedarfs auf der Ebene der MoRE-Analysegebiete führt zu einem etwas unterschiedlichen Ergebnis als die nachfolgende Umlegung auf die Kreisregionen (s. Kapitel 3.3.6), da die Flächen der Analysegebiete und der Kreisregionen nicht kongruent sind. Für die Berechnung der nationalen N-Obergrenze (Tabelle 19, Tabelle 20) wird der Minderungsbedarf von 76,7 kt N nach Umlegung auf die Kreisregionen verwendet.

^d Aufgrund des geringen Anteils der Einträge aus Deutschland an den gesamten Einträgen in die FGE wird der relative Minderungsbedarf nicht ausgewiesen.

^e Gebiete des Rhein-Einzugsgebietes an der westdeutschen Grenze, die nicht in den Hauptlauf des Rheins, sondern in die niederländischen Zuflüsse des Rheins entwässern.

Für alle betrachteten Szenarien gilt, dass das Ziel rechnerisch in allen Gebieten eingehalten werden kann (Tabelle 5). Daneben ermöglichen die Szenarien A und B eine genauere Einschätzung der Eintragspfade der bestehenden Belastung. Da der Minderungsbedarf auf das jeweilige AU bezogen ist, kann anhand der Verteilung der in dem Gebiet modellierten Einträge darauf rückgeschlossen werden, ob die Belastung eher auf punktuelle oder auf diffuse Quellen zurückzuführen

ist, was für die Maßnahmenplanung relevant ist. Da bei Szenario C Verdünnungseffekte auftreten können, können die Quellen der Belastung nur eingeschränkt ausgewiesen werden.

Tabelle 5: Vergleich der Szenarien für die Ermittlung des Minderungsbedarfes.

	Szenario A	Szenario B	Szenario C
Ziel kann theoretisch in allen AU erreicht werden	X	X	X
Auftreten von Verdünnungseffekten	-	-	X
Quellenbezogene Ermittlung des Minderungsbedarfes	X	X	-

Eintragspfadbezogene Auswertung des Minderungsbedarfes

Für die eintragspfadbezogene Ermittlung wurden die modellierten Einträge pro AU eingeteilt in landwirtschaftliche und siedlungswasserwirtschaftliche Quellen. Zu den landwirtschaftlich geprägten Eintragspfaden gehören

- Erosion über landwirtschaftliche Nutzflächen
- Oberflächenabfluss über vegetationsbedeckte Flächen
- Drainagen
- Zwischenabfluss
- Grundwasser

Zu den siedlungswasserwirtschaftlich geprägten Pfaden zählen

- Kläranlagen
- Kanalisationssysteme (Regenwasser- und Mischwassereinleitungen, Kleinkläranlagen)
- Industrielle Direkteinleiter.

Daneben gibt es Eintragspfade, die sich nicht eindeutig diesen beiden Quellgruppen zuordnen lassen. Dazu gehört die atmosphärische Deposition auf die Gewässerfläche oder die Erosion über natürlich bedeckte Flächen, die für die N(ges)-Frachten aber von untergeordneter Bedeutung sind.

Die Relation der Eintragspfade wurde auf die berechnete Minderung übertragen. Wenn z. B. in einem AU 60 % der Einträge durch Landwirtschaft bedingt sind, wird angenommen, dass auch 60 % des Minderungsbedarfes durch die Landwirtschaft erbracht werden sollte. Dieser vereinfachende Ansatz berücksichtigt nicht die tatsächlich bestehenden, regional unterschiedlichen Minderungspotenziale in den verschiedenen Bereichen, das heißt ob bspw. die Abwasserbehandlung auf dem neuesten Stand der Technik ist und/oder das Düngungsmanagement in der Landwirtschaft effizient erfolgt und mit geringem N-Überschuss gewirtschaftet wird.

Insgesamt sind die Einträge (vgl. Tabelle 3) und somit auch der Minderungsbedarf überwiegend durch landwirtschaftliche Quellen bedingt (Tabelle 6). Für die Szenarien A und B entfallen 77 % des gesamten Minderungsbedarfes auf die Landwirtschaft. Das entspricht rund 71 kt N a⁻¹ (Szenario A) bzw. 62,5 kt N a⁻¹ (Szenario B). Für beide Szenarien ergeben sich rund 21 % des Minderungsbedarfes für abwasserbürtige Quellen, was rund 19 kt N a⁻¹ (Szenario A) bzw. 17 kt N a⁻¹ (Szenario B) entspricht. Dagegen ergibt sich für Szenario C ein Minderungsbedarf der landwirtschaftlichen Quellen von 82 % (rund 57 kt N a⁻¹), während sich für die abwasserbürtigen Quellen 18 % (12,6 kt N a⁻¹) ergeben.

Tabelle 6: Relativer Minderungsbedarf der N-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands aufgeschlüsselt nach Eintragsquellen (Landwirtschaft vs. Abwasserbewirtschaftung) für drei Szenarien^a (Mittel 2016 – 2018, Werte gerundet).

Flussgebietseinheit ^b	Minderungsbedarf (Mittel 2016 - 2018) nach Quellen					
	Szenario A Meeresökologische Qualitätsziele in allen AU einzuhalten		Szenario B Wie A, mit Berücksichtigung der kumulativen Retention		Szenario C Wie B, mit Berücksichtigung Verdünnung entlang Abflussbaum	
	Landwirtschaft	Abwasserbewirtschaftung	Landwirtschaft	Abwasserbewirtschaftung	Landwirtschaft	Abwasserbewirtschaftung
	%	%	%	%	%	%
Eider	95 %	4 %	95 %	3 %	95 %	3 %
Elbe	73 %	26 %	73 %	26 %	78 %	21 %
Ems	85 %	14 %	85 %	14 %	85 %	14 %
Maas	68 %	32 %	68 %	32 %	70 %	30 %
Oder	56 %	13 %	33 %	14 %	82 %	17 %
Deltarhein ^c	86 %	13 %	86 %	13 %	86 %	13 %
Schlei/Trave	80 %	19 %	79 %	19 %	83 %	15 %
Warnow/Peene	84 %	10 %	81 %	12 %	91 %	8 %
Weser	81 %	18 %	80 %	18 %	83 %	16 %
Gesamt	77 %	21 %	77 %	21 %	82 %	18 %

^a Beschreibung s. Abschnitte 3.3.1 bis 3.3.3

^b Für die Donau sind keine meeresökologischen Anforderungen definiert, daher wird diese FGE nicht betrachtet.

^c Gebiete des Rhein-Einzugsgebietes an der deutschen Grenze, die nicht in den Hauptlauf des Rheins, sondern in die niederländischen Zuflüsse des Rheins entwässern.

3.3.5 Vergleich mit Gütemessungen

Der Minderungsbedarf wurde anhand von Modellergebnissen ermittelt. Für eine Abschätzung der Plausibilität der modellierten Gewässerkonzentrationen wurden Messergebnisse der N(ges)-Konzentration an Gütemessstellen der Bundesländer (Kap. A.3.3) herangezogen und mit den in Abschnitt 3.3.2 ermittelten zulässigen Konzentrationen im Binnenland verglichen. Da diese zulässigen Konzentrationen nur für die Jahre 2016 bis 2018 abgeleitet wurden, wurden auch nur die Gütemessungen für diesen Zeitraum betrachtet. Für die Donau sind keine meeresökologischen Qualitätsziele festgelegt, im Rhein wird das Qualitätsziel am Grenzpunkt Kleve/Bimmen bereits eingehalten, daher wurden diese FGE nicht einbezogen.

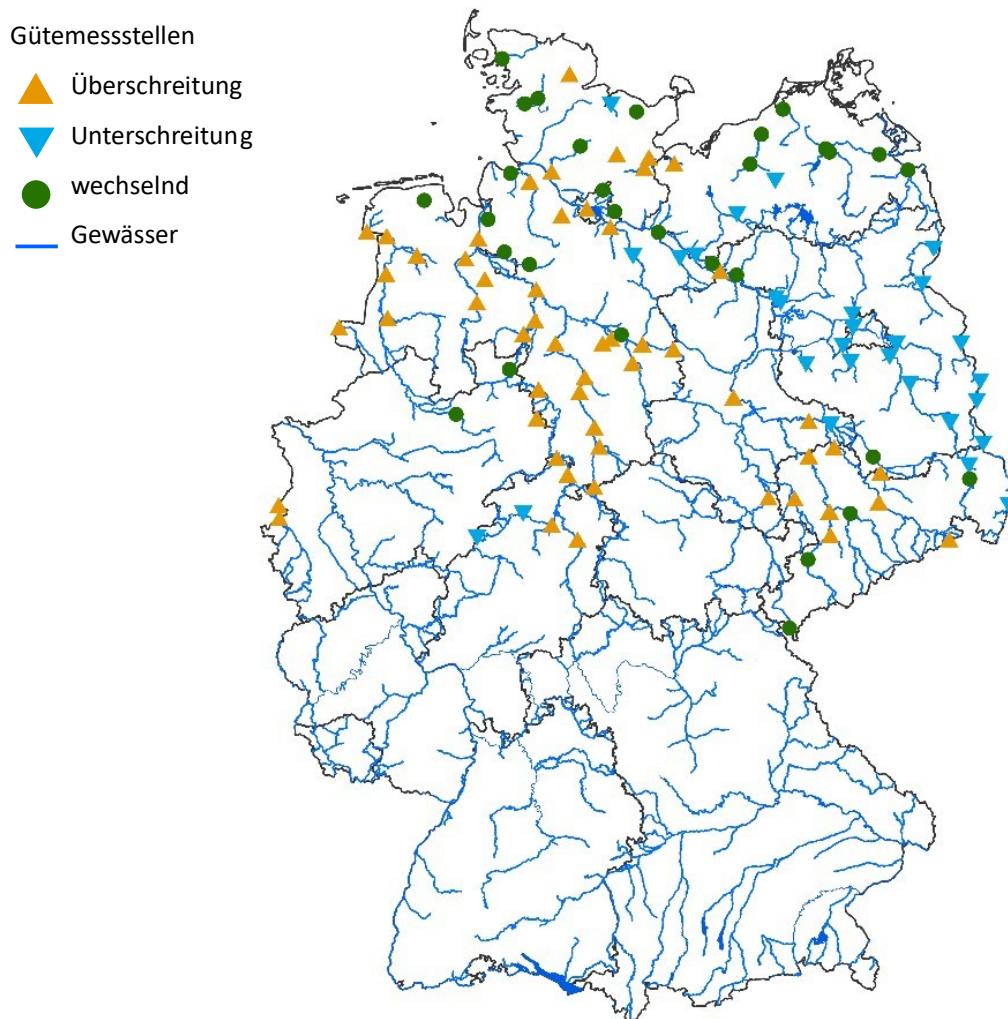
Ausgewählt wurden Gütemessungen, die als Einzelmessungen vorlagen. Waren mindestens zehn Messungen pro Jahr vorhanden, wurden daraus die Jahresmittelkonzentration (arithmetisches Mittel) berechnet. Weiterhin wurden Gütemessstellen nur dann herangezogen, wenn für alle drei betrachteten Jahre (2016 bis 2018) eine Jahresmittelkonzentration berechnet werden konnte.

Jede Gütemessstelle kann einem Analysegebiet in MoRE zugeordnet werden. Diese Zuordnung wurde herangezogen, um den Gütemessstellen die jeweilige ins Binnenland übertragenen zulässigen Konzentrationen, die pro Analysegebiet vorliegen, zuzuweisen. Die zulässigen Konzentrationen variieren in weiten Teilen des Landes nur in einem geringen Umfang (s. Abbildung 13), so

dass die tatsächliche Lage der Gütemessstelle zum Gebietsauslass für diesen Vergleich nicht näher betrachtet wurde.

Insgesamt konnten 117 Gütemessstellen ausgewertet werden. Für jedes Jahr wurde bestimmt, ob die an der Gütemessstelle ermittelte Jahresmittelkonzentration ober- oder unterhalb der zulässigen Konzentration des AU liegt und eine Kategorisierung vorgenommen (Unterschreitung, Überschreitung oder wechselnd). Insbesondere in Berlin-Brandenburg und Teilen Mecklenburg-Vorpommerns sind Gütemessstellen vertreten, die für alle drei Jahre mittlere Konzentrationen unterhalb der zulässigen Konzentrationen aufweisen (30 Gütemessstellen, Abbildung 17).

Abbildung 17: Jahresmittelkonzentrationen an Gütemessstellen^a in Bezug zu den berechneten zulässigen N(ges)-Konzentrationen (Mittel 2016 – 2018).



^a Für die Donau sind keine meeresökologischen Qualitätsziele festgelegt, im Rhein wird das Qualitätsziel am Grenzpunkt Kleve/Bimmen eingehalten, daher werden diese FGE nicht betrachtet.

Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

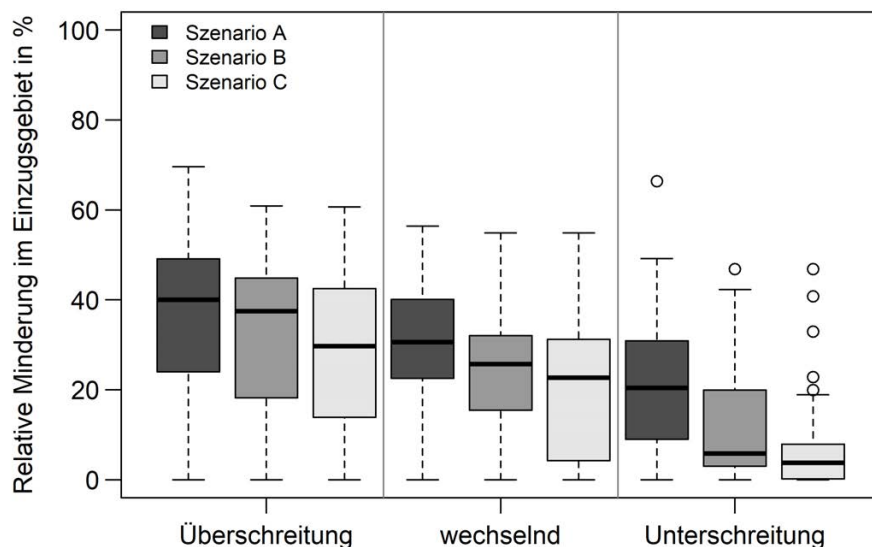
Eine Überschreitung in allen drei Jahren zeigte sich dagegen für die Mehrheit der betrachteten Gütemessstellen und hauptsächlich in Niedersachsen in den FGE Weser und Ems, aber auch in weiteren Landesteilen Niedersachsens (55 Gütemessstellen, Abbildung 17). Vor allem in Norddeutschland zeigen die Gütemessstellen ein wechselndes Bild. Hier lagen die mittleren Konzentrationen teilweise ober- oder unterhalb der zulässigen Konzentrationen für die drei betrachteten Jahre (32 Gütemessstellen, Abbildung 17).

Das Muster von Über- und Unterschreitungen der Gütemessungen, relativ zu den berechneten zulässigen Konzentrationen im Binnenland (Abbildung 17), deckt sich grob mit den modellierten Minderungsbedarfen (vgl. Abbildung 11 und Abbildung 16). In Regionen, in denen an Gütemessstellen eine Unterschreitung der zulässigen Konzentrationen im Jahresmittel beobachtet wurde, wurde tendenziell eher kein oder nur geringer Minderungsbedarf ausgewiesen. Sehr deutlich sichtbar ist dies insbesondere für die Region Berlin-Brandenburg. Überschreitungen finden sich dagegen eher in Regionen, in denen auch ein hoher Minderungsbedarf modelliert wurde. Dazu zählen insbesondere das Weser- und Ems-Einzugsgebiet sowie die Saale.

Gütemessstellen repräsentieren grundsätzlich das gesamte darüber liegende Einzugsgebiet. Die modellierten Einträge (Abschnitt 3.2.2) und ermittelten absoluten Minderungsbedarfe für alle drei Szenarien (Abschnitte 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3) wurden bis zu dem jeweiligen AU aufsummiert, in dem die Gütemessstellen verortet sind. Daraus wurde der relative Minderungsbedarf für das EZG bestimmt und für einen übergeordneten Vergleich der zuvor beschriebenen Kategorisierung der Gütemessstellen (Unterschreitung, Überschreitung oder wechselnd) gegenübergestellt (Abbildung 18). Für alle drei Szenarien ist der gleiche generelle Trend ersichtlich. Gütemessstellen mit einer Überschreitung der berechneten zulässigen Konzentration finden sich eher in EZG mit hohem relativen Minderungsbedarf, während Gütemessstellen mit einer Unterschreitung der zulässigen Konzentrationen eher in EZG mit geringerem Minderungsbedarf zu finden sind (Abbildung 18).

Diese Gegenüberstellung kann nur als Näherung betrachtet werden. Die MoRE-Ergebnisse beziehen sich immer auf die Analysegebiete und diese räumliche Auflösung erlaubt es nicht, einzelne kleine Gewässer innerhalb eines AU adäquat wiederzugeben. Somit kann es zu Abweichungen zwischen dem ermittelten Minderungsbedarf und der hier vorgenommenen Kategorisierung einer Gütemessstelle kommen.

Abbildung 18: Modellierter relativer Minderungsbedarf im Einzugsgebiet im Vergleich zu der Kategorisierung der Gütemessstellen aus Abbildung 17



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG.

Vergleich mit den AGRUM-DE-Minderungsszenarien

Im Rahmen des AGRUM-DE-Projekts wurden ebenfalls Berechnungen der N-Einträge und -frachten in den Oberflächengewässern sowie des Minderungsbedarfs zur Einhaltung der meeresöko-

logischen Qualitätsziele durchgeführt (Zinnbauer et al. 2023). In Tabelle 7 sind die von Zinnbauer et al. (2023) und die in diesem Vorhaben mit dem MoRE-Ansatz berechneten Ergebnisse gegenübergestellt.

Die Größenordnungen der von MoRE und von AGRUM-DE modellierten N-Einträge und Frachten stimmen auf ganz Deutschland bezogen gut überein. Dagegen sind die berechneten Minderungsbedarfe für die MoRE-Modellierung in allen Szenarien z.T. deutlich höher als die Abschätzung im AGRUM-DE-Projekt. Mit dem sehr strikten Szenario A werden fast doppelt so hohe Minderungsbedarfe ausgewiesen. Für die Szenarien B und C ist der Unterschied geringer.

Tabelle 7: Ergebnisse der MoRE-Modellierung zu N-Einträgen und N-Frachten sowie Minderungsbedarf zur Einhaltung der meeresökologischen Qualitätsziele im Vergleich zu den Ergebnissen des AGRUM-DE-Projekts (Zinnbauer et al. 2023)

	MoRE	AGRUM-DE
Zeitbezug	Einzeljahre 2016 bis 2018 (Variante LARSIM-ME) (Morling et al. 2024)	Mittlere Hydrologie für 1981 bis 2010 (Kapitel 5.2) ^a ; andere Eingangs- daten jüngerer Datums
Modellierte Einträge in Deutschland (inklusive Donau) ^b	426 - 481 kt N a ⁻¹	477 kt N a ⁻¹ (Tabellen A9, A11) ^a
Modellierte Gewässerfrachten in Deutschland ^c (inklusive Donau) ^b	305 - 364 kt N a ⁻¹	355 kt N a ⁻¹ (Tabellen A15, A13) ^a
Minderungsbedarf (exklusiv Donau)	Mittel der Jahre 2016 bis 2018 Szenario A B C 93 81 70 kt N a ⁻¹	Mit N-Überschuss Jahr 2016 53 kt N a ⁻¹ (Tabelle 29) ^a

^a Nummerierung Kapitel und Tabellen bezieht sich auf Zinnbauer et al. (2023).

^b Im Gegensatz zu den übrigen Darstellungen in diesem Kapitel ist hier die FGE Donau einbezogen, um die Werte mit den AGRUM-Ergebnissen vergleichen zu können.

^c Für MoRE wurde die jeweilige modellierte Fracht des einzelnen AU mit der kumulativen Retention des AU multipliziert. Das entspricht der Fracht, die aus einem einzelnen AU stammt und die Küste bzw. den Grenzpunkt erreicht. Um die gesamte Fracht für Deutschland zu erhalten, werden die so ermittelten Frachten über alle AU aufsummiert.

Ursachen für die unterschiedlichen Ergebnisse können in den verwendeten Eingangsdaten und Berechnungsansätzen für die Ermittlung von Einträgen und Frachten begründet sein, die sich zwischen beiden Modellen unterscheiden und auch regional unterschiedlich sein können. Darüber hinaus entstehen die unterschiedlichen Ergebnisse für die Minderungsbedarfe wohl vorrangig in der unterschiedlichen Art der Berechnung. Für die Modellierung mit MoRE wurde die Berechnung im vorliegenden Projekt auf das jeweilige AU bezogen oder entlang des Abflussbaumes (von der Quelle zur Mündung). Dagegen wurde im AGRUM-DE-Projekt der Ansatz verfolgt an der Mündung zu beginnen. Bei Überschreitung der zulässigen Konzentrationen wurde eine nicht zu überschreitende maximale Konzentration/Fracht in das stromaufwärts gelegene Einzugsgebiet übertragen und für jedes Gebiet der Minderungsbedarf ermittelt (Zinnbauer et al. 2023, S. 158). Die Methodik der Übertragung in stromaufwärts gelegene Gebiete (wie bspw. die Verteilung auf mehrere Oberlieger erfolgt) wird allerdings nicht genauer ausgeführt.

Im Ergebnis wurden mit AGRUM-DE Minderungsbedarfe berechnet, die im Vergleich zur MoRE-Modellierung (Abbildung 11, Abbildung 15, Abbildung 16) gleichmäßiger verteilt in den Flussgebieten erscheinen und mit der Entfernung von der Küste abnehmen (Karte 151 in Zinnbauer et al. 2023). In Tabelle 8 sind die ermittelten Minderungsbedarfe in den FGE für AGRUM-DE

(Zinnbauer et al. 2023) und das MoRE-Szenario B gegenüber gestellt, dessen Methodik am ehesten mit dem AGRUM-Ansatz vergleichbar ist. Besonders auffällig ist dabei, dass insbesondere für das Elbe-Einzugsgebiet von AGRUM-DE - bezogen auf die Tonnage - ein deutlich niedrigerer Minderungsbedarf ermittelt wurde. Für andere FGE wie unter anderem die Oder ist allerdings der relative Unterschied des Minderungsbedarfs noch wesentlich größer (wobei für das FGE Oder nicht geklärt werden konnte, in wieweit das Gebiet des Stettiner Haffs jeweils berücksichtigt wurde oder nicht).

Tabelle 8: Vergleich des mit MoRE (Szenario B) und mit AGRUM-DE (Zinnbauer et al. 2023) modellierten Minderungsbedarfs der N-Einträge in Oberflächengewässer in den FGE.

Flussgebietseinheit ^a	Minderungsbedarf nach MoRE (Szenario B) t N a ⁻¹	Minderungsbedarf nach AGRUM-DE t N a ⁻¹
Eider	4.200	900
Elbe	39.400	13.000
Ems	7.400	12.000
Maas	3.100	1.900
Oder	1.100	80
Deltarhein ^b	2.900	5.500
Schlei/Trave	1.900	3.900
Warnow/Peene	2.600	1.200
Weser	18.600	14.000
Gesamt	81.200^c	53.000

^a Für die Donau sind keine meeresökologischen Anforderungen definiert, daher wird diese FGE nicht betrachtet.

^b Gebiete des Rhein-Einzugsgebietes an der deutschen Grenze, die nicht in den Hauptlauf des Rheins, sondern in die niederländischen Zuflüsse des Rheins entwässern.

^c Der Minderungsbedarfs auf der Ebene der MoRE-Analysegebiete unterscheidet sich geringfügig vom Minderungsbedarf von 76,7 kt N a⁻¹ nach Umlegung auf die Kreisregionen (Kapitel 3.3.6), da die Flächen der Analysegebiete und der Kreisregionen nicht kongruent sind. Für die Berechnung der nationalen N-Obergrenze (Tabelle 19, Tabelle 20) wird der Wert von 76,7 kt N a⁻¹ verwendet.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Unterschiede in den Modellergebnissen von MoRE und AGRUM-DE zum einen in unterschiedlichen Eingangsdaten und Modellierungsansätzen zur Berechnung der N-Einträge begründet liegen. Zum anderen unterscheidet sich auch die Methodik zur Ermittlung des Minderungsbedarfes, weshalb es zu unterschiedlichen Ergebnissen auf der regionalen Ebene kommt.

3.3.6 Ermittlung der regionalen Obergrenzen

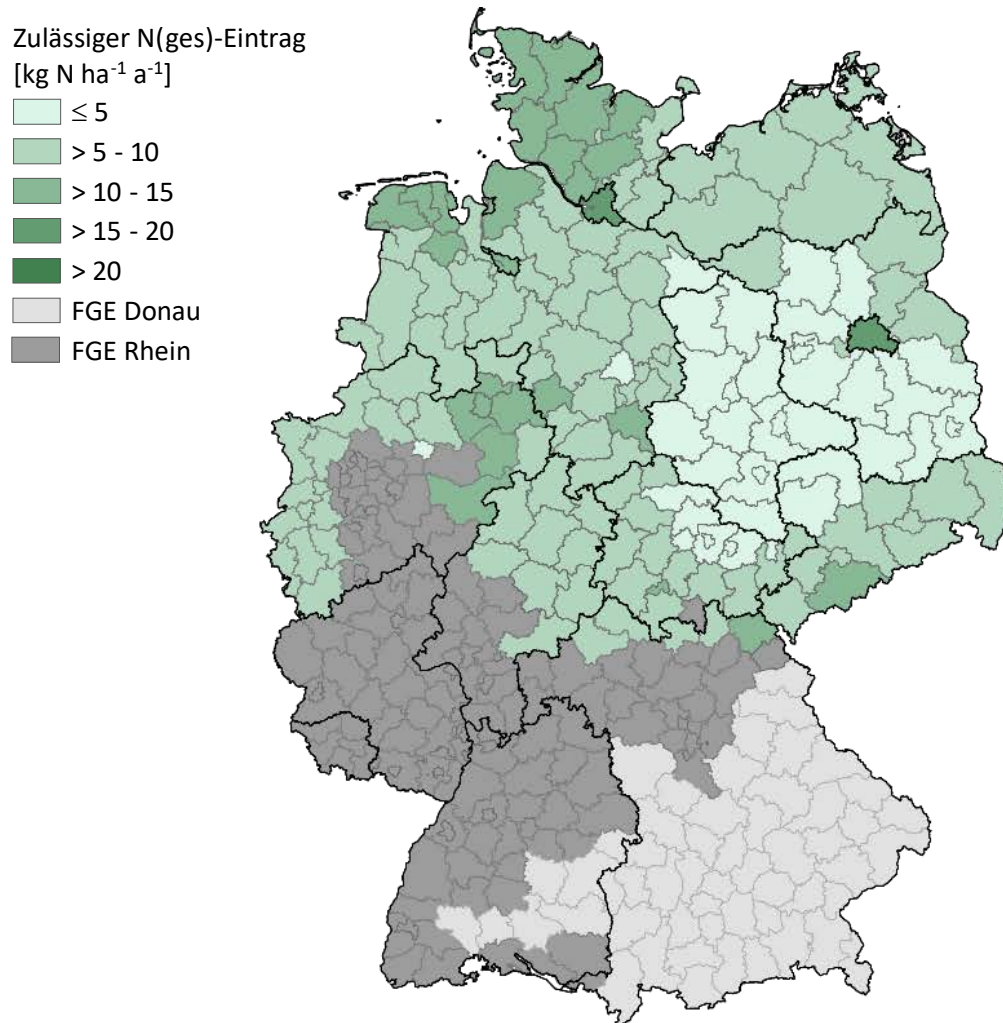
Als Komponente des nationalen Stickstoff-Indikators werden im Folgenden die Ergebnisse aus Szenario B (zulässige Konzentrationen für die AU mit kumulativer Retention) verwendet. Dieses Szenario übernimmt die Vorgehensweise der LAWA (2017) und stellt ein "mittleres Anforderungsniveau" dar. Die regionalen Obergrenzen für N-Einträge in Oberflächengewässer ergeben sich aus der Differenz der gesamten modellierten N-Einträge pro Analysegebiet abzüglich des erforderlichen Minderungsbedarfes (Abbildung 19). Insgesamt ergeben sich somit für Nord- und Ostdeutschland wesentlich geringere flächenspezifische Gesamteinträge für N(ges) (vgl. Abbil-

dung 14 und Abbildung 19). Für die FGE Donau ist kein Bewirtschaftungsziel festgelegt und daher entsteht auch kein Minderungsbedarf. In der FGE Rhein ergibt sich in den Szenarien A und B für einzelne AU ein gewisser Minderungsbedarf; da jedoch im Rhein seit einigen Jahren an der Grenze zu den Niederlanden das meeresökologische Qualitätsziel eingehalten wird, wird für das Flussgebiet als Ganzes kein Minderungsbedarf ausgewiesen. Für die FGE Donau und Rhein (ausgenommen die AU des Deltarheins, die direkt in die Niederlande entwässern) werden daher, dem Verschlechterungsverbot folgend, die derzeitigen N-Einträge als regionale Obergrenzen festgelegt. Eine Darstellung der regionalen Obergrenzen mit Berücksichtigung von Minderungen im Rhein-Einzugsgebiet findet sich in Anhang A.3.2.

Auswertung für die Kreisregionen

Zur Auswertung und Darstellung für die Kreisregionen wurden die Ergebnisse zu den spezifischen Obergrenzen für N(ges)-Einträge und deren Überschreitung in den Analysegebieten auf die Rasterzellen des GeoGitterDE (1 km x 1 km) übertragen. Für die Zusammenführung der Ergebnisse zur nationalen N-Obergrenze wurden die Werte anschließend auf der Ebene der Kreisregionen aggregiert; das betrifft 125 Kreisregionen mit zusammen 194.527 km². Die Übertragung der Ergebnisse auf die Kreisregionen führt zu etwas unterschiedlichen nationalen Summen gegenüber den MoRE-Analysegebieten, da die Flächen der AU's und der Kreisregionen nicht kongruent sind. Für die Berechnung der nationalen N-Obergrenze (Tabelle 19, Tabelle 20) werden die Werte nach Umlegung auf die Kreisregionen verwendet, der Minderungsbedarf beträgt mit dieser räumlichen Aggregation 76,7 kt N a⁻¹.

Abbildung 19: Obergrenzen der N(ges)-Einträge in Oberflächengewässer im Szenario B (zulässige Konzentrationen im Binnenland) auf Ebene der Kreisregionen^a (Mittel 2016 - 2018), ohne Berücksichtigung der FGE Rhein.



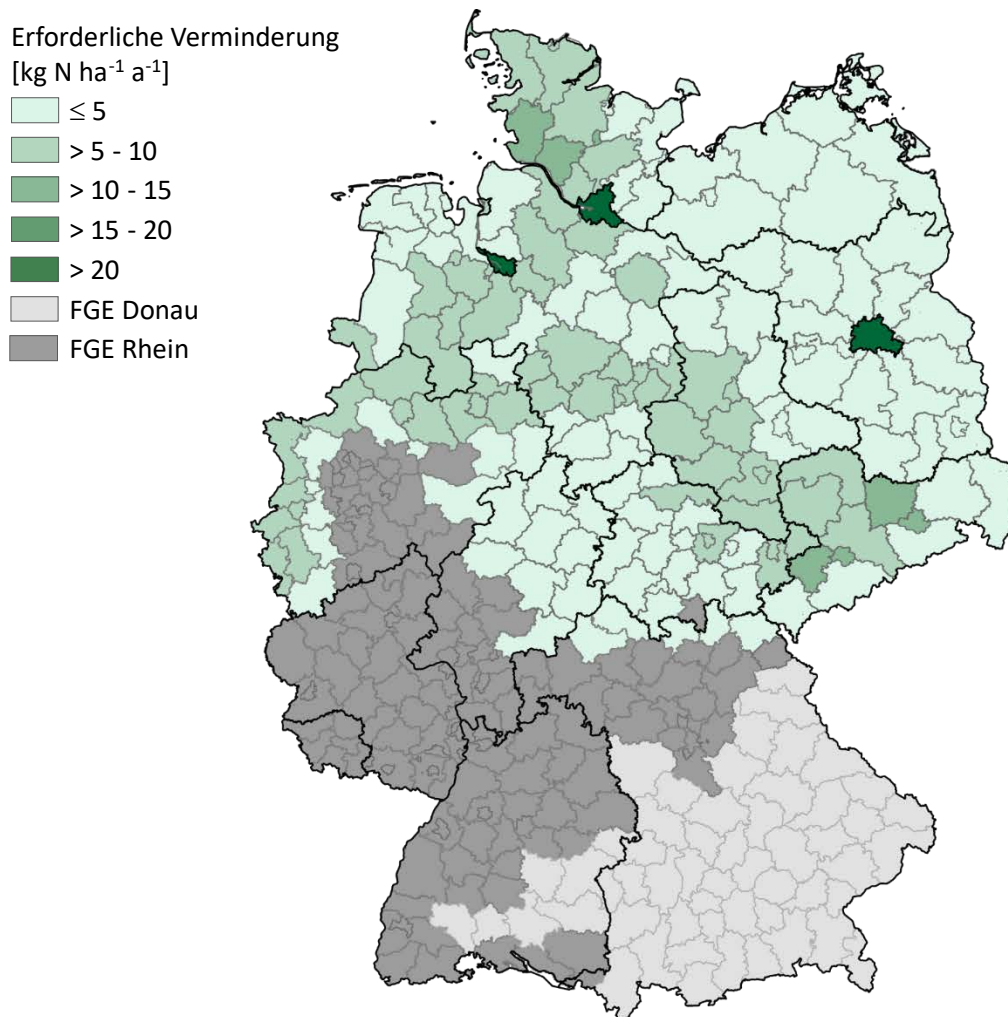
^a Für die Donau sind keine meeresökologischen Qualitätsziele festgelegt, im Rhein wird das Qualitätsziel am Grenzpunkt Kleve/ Bimmen eingehalten, daher werden diese FGE nicht betrachtet.

Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Abbildung 20 zeigt die erforderliche absolute Minderung der N(ges)-Einträge in Oberflächengewässer für das Szenario B (Ziele im Binnenland), ohne Berücksichtigung von Verminderungen im Rhein-Einzugsgebiet. Die Einzelwerte für die Kreisregionen sind in Tabelle 31 (Anhang A.3.2) aufgeführt.

Aufgrund des Verschlechterungsverbots wird für eine Kreisregion, in welcher der Ist-Wert der N(ges)-Fracht aktuell bereits niedriger ist als die zulässige N(ges)-Fracht, der Ist-Wert als zulässige Emission übernommen.

Abbildung 20: Erforderliche Minderung der N(ges)-Einträge in Oberflächengewässer im Szenario B (zulässige Konzentrationen im Binnenland) auf Ebene der Kreisregionen^a (Mittel 2016 - 2018), ohne Berücksichtigung der FGE Rhein.



^a Für die Donau sind keine meeresökologischen Qualitätsziele festgelegt, im Rhein wird das Qualitätsziel am Grenzpunkt Kleve/ Bimmen eingehalten, daher werden diese FGE nicht betrachtet.

Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

3.4 Fazit und Anmerkungen

- Die N(ges)-Einträge in die Oberflächengewässer in Deutschland stammen gemäß der pfad-spezifischen Einteilung der MoRE-Modellergebnisse (2016 – 2018) zu rund 77 % aus der Landwirtschaft und zu 21 % aus der Siedlungswasserwirtschaft. Der Minderungsbedarf wurde im vorliegenden Projekt im gleichen Verhältnis auf diese beiden Hauptquellen verteilt (Tabelle 6). Je nach Ausprägung der Flussgebietseinheiten und der Eintragssituation variieren die Anteile zwischen 95 % landwirtschaftlich geprägte Pfade zu 3 % abwasserbürtige Pfade für die FGE Eider und bis zu 68 % zu 32 % für die FGE Maas. Auf der Ebene der MoRE-Analysegebiete variiert dieses Verhältnis noch stärker. Die lokale Bedeutung von unterschiedlichen Eintragsquellen stellt eine Schlüsselgröße für die Konzeption von Maßnahmen zur Reduzierung der N-Gewässereinträgen dar.
- Im Durchschnitt des Bundesgebietes stammen rund 70 % der gesamten N-Einträge in die Oberflächengewässer aus der Landwirtschaft (Pfade Grundwasser, Zwischenabfluss und Dräna-gen). Daher besteht ein additiver Effekt zwischen einer Verminderung des hydrosphärischen

N-Überschuss zur Einhaltung des Qualitätsziels für das Schutzgut Grundwasser und einer Verminderung des N-Eintrags in die Oberflächengewässer. Die Grundwasservorkommen reagieren in der Regel jedoch nur langsam auf Veränderungen der Stoffeinträge mit dem Sickerwasser; die mittleren Verweilzeiten betragen in Kluftaquiferen (Mittelgebirgsregionen) mehrere Jahre, in Porenaquiferen (Norddeutschland, Oberrheinebene) mehrere Jahrzehnte. Es erscheint daher gerechtfertigt, den Effekt einer Verminderung des hydrosphärischen N-Überschuss auf den N-Eintrag in Oberflächengewässer nicht weiter zu berücksichtigen.

- Die Aggregation der Ergebnisse zu den zulässigen Emissionen und zum Minderungsbedarf auf der Ebene der Kreise bzw. Kreisregionen ist aus dem übergeordneten methodischen Ansatz des vorliegenden Projekts heraus unverzichtbar. Im Fall der N-Gewässereinträge und des Minderungsbedarfs ist damit jedoch eine räumliche Nivellierung verbunden. Da die MoRE-Analysegebiete kleiner sind als die Kreisregionen, werden jeweils mehrere MoRE-Analysegebiete (im Mittel rund neun AU) in einem Kreis zusammengefasst. Damit einher geht, dass Unterschiede im Minderungsbedarf dieser Analysegebiete auf Ebene der Kreisregionen nicht mehr sichtbar sind. Für rund ein Viertel der Kreise gilt außerdem, dass mehr als 10 % der Fläche der Kreise Analysegebiete aus zwei FGE umfassen. Handelt es sich dabei um FGE ohne Minderungsbedarf (z.B. FGE Donau oder Teile der FGE Rhein), fällt der resultierende Minderungsbedarf bezogen auf die gesamte Fläche der entsprechenden Kreisregion [in kg N/ha] geringer aus. Die Aggregation auf Ebene der Kreise führt somit dazu, dass lokale Unterschiede im Minderungsbedarf nicht überall adäquat widergegeben werden.
- Für die Kommunikation der Ergebnisse zum *relativen* Minderungsbedarf der Gewässereinträge im Bundesgebiet spielt es eine Rolle, ob die Flussgebiete von Rhein und Donau in die Berechnung einbezogen werden oder nicht. Bezogen auf einen Gesamteintrag von insgesamt rund 215,1 kt N a⁻¹ in Deutschland *ohne* Berücksichtigung von FGE Rhein und Donau (Mittel 2016-2018) entspricht der Minderungsbedarf von 81,2 kt N a⁻¹ (berechnet auf der Ebene der AU) des Szenario B einem Anteil von 38 % (Tabelle 4). Bezieht man die FGE Rhein und Donau dagegen mit ein, beträgt der N-Gewässereintrag in Deutschland insgesamt 456,9 kt N a⁻¹, der Minderungsbedarf von 81,2 kt N a⁻¹ beläuft sich dann nur noch auf 18 % der Gesamteinträge.
- Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen zum Minderungsbedarf der drei mit MoRE berechneten Szenarien und die Divergenzen zwischen MoRE und AGRUM verdeutlichen, dass sowohl die Wahl der verwendeten Eingangsdaten und Modellierungsansätze als auch der methodische Ansatz zur Ermittlung des Minderungsbedarfes zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Den Ursachen und Hintergründen dafür kann im Rahmen des hier vorgestellten Projekts nicht weiter nachgegangen werden. Solche unterschiedlichen Ergebnisse können auch zu einer unterschiedlichen Einschätzung bei der Fokussierung von Maßnahmen (landwirtschaftliche oder abwasserbürtige Quellen) führen. Die Autorinnen und Autoren sehen zu diesen Fragen weiteren Forschungsbedarf in Bezug auf Methodik und Daten, um die Maßnahmenplanung zur Minderung von N-Einträgen zu verbessern.

4 Schutzgut Grundwasserqualität - Nitrateintrag

4.1 Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren

Qualitätsziel

Der Schwellenwert der Grundwasserverordnung (GrwV) für den Nitratgehalt von 50 mg NO₃ L⁻¹ wird an allen Messstellen bzw. flächendeckend im Grundwasser eingehalten.

Die GrwV legt auch Schwellenwerte für Ammonium und Nitrit von jeweils 0,5 mg L⁻¹ fest. Nach Stand der Kenntnis wird der Schwellenwert für Nitrit in keiner Messstelle überschritten. Die Überschreitung des Schwellenwerts für Ammonium führt für 4,1 % der Grundwasserkörper in Deutschland zur Einstufung in einen "schlechten" chemischen Zustand (UBA 2022). Dieser GW-Güteparameter wird aufgrund der im Vergleich zu Nitrat nachrangigen Bedeutung aber nicht weiter betrachtet.

Wirkungsindikatoren

- i) Potenzielle NO₃-Konzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung
- ii) NO₃-Konzentration im Grundwasser

Emission

N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen (i.e. N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche) bzw. N-Eintrag aus der gesamten Fläche, jeweils mit dem Sickerwasser bzw. mit der Grundwasserneubildung in das Grundwasser.

Datengrundlagen

- Karte Mittlere jährliche Grundwasserneubildung in Deutschland 1:1000.000, Mittel 1961-1990 (GWN1000; BGR 2003a)
- Karte Mittlere jährliche Sickerwasserrate in Deutschland 1:1000.000, Mittel 1961-1990 (SWR1000_250; BGR 2003b)
- Jährlicher N-Überschuss (Flächenbilanz) der Landwirtschaft (a) in den Kreisregionen (n. Häußermann et al. 2019), (b) in den Gemeinden (n. Zinnbauer et al. 2023), verschiedene Zeiträume

Methodische Vorbemerkung

Für das Schutzgut Grundwasser (GW) ist bis dato keine flächenbezogene, kleinräumig aufgelöste Darstellung oder Auswertung zur Einhaltung bzw. Überschreitung des Qualitätsziels "NO₃-Konzentration ≤ 50 mg L⁻¹) in Deutschland von Fachbehörden (auf Bundesebene) veröffentlicht worden. Im Unterschied zu den übrigen Schutzgütern fehlt damit die (flächendeckende) Beschreibung der Ist-Situation (Immission) des Schutzgutes als Ausgangsbasis für die Ermittlung der Obergrenzen und des erforderlichen Minderungsbedarfs der Stickstoff-Emissionen. In Anbetracht dieses Mankos werden drei methodische Ansätze eingeführt und geprüft, um regional aufgelöste Obergrenzen und den Minderungsbedarf zu ermitteln. Für die nationale Stickstoffobergrenze (Kapitel 9) wird eine der Varianten des methodischen Ansatz I verwendet.

Ansatz I: Der Minderungsbedarf der N-Emission wird unabhängig von der eigentlichen Zielgröße Nitratkonzentration im Grundwasser ermittelt. Stattdessen werden als Proxy-Größen die "potenzielle NO₃-Konzentration im Sickerwasser" bzw. die "potenzielle NO₃-Konzentration in der Grundwasserneubildung" berechnet. Der Wert von 50 mg NO₃ L⁻¹ wird als Qualitätsziel für

diese Proxy-Größen herangezogen, die erforderliche Verminderung des N-Eintrags (i.e. N-Überschuss der Landwirtschaftsflächen) entspricht dann der relativen Überschreitung des Qualitätsziels durch die potenzielle NO_3 -Konzentration in einer räumlichen Betrachtungseinheit (Kapitel 4.2).

Ansatz II: Die erforderliche Verminderung des N-Eintrags wird berechnet aus der Überschreitung des Qualitätsziels von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ im Grundwasser. Da bis dato keine flächendeckende, räumlich höher aufgelöste Karte der Nitratgehalte im Grundwasser in Deutschland vorliegt, wird die NO_3 -Konzentration im GW mit Hilfe des Random Forest-Verfahrens modelliert (Kapitel 4.3). Der Wert von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ gilt als Qualitätsziel für diese modellierten GW-Konzentrationen.

Ansatz III: Zukünftig wird als maßgeblicher Wert des Nitratgehalts im Grundwasser die Summe aus dem gemessenen Nitratgehalt im Grundwasser und dem Denitrifikationswert ermittelt. Daten zum Denitrifikationswert im Grundwasser lagen für dieses Vorhaben aus acht Bundesländern vor, für die die Nitratkonzentration im Grundwasser in Deutschland *einschließlich* des Denitrifikationswerts mit Random Forest modelliert wird (Kapitel 4.4). Der Wert von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ gilt als Qualitätsziel für die modellierten GW-Konzentrationen mit Denitrifikationswert.

4.2 Ansatz I: Potenzielle Nitratkonzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung

Der Ansatz I zur Berechnung der erforderlichen Minderung des N-Eintrags in das Grundwasser ohne Berücksichtigung (respektive Kenntnis) der tatsächlichen NO_3 -Konzentrationen im Grundwasser wurde erstmalig im Model MONERIS (Behrendt et al. 1999) vorgestellt. Der Ansatz ist integraler Bestandteil der Modellinstrumente MoRE (Fuchs et al. 2017a) und AGRUM-DE (Wendland et al. 2020; Zinnbauer et al. 2023), wurde unter anderem auch von Bach et al. (2016) verwendet und wurde in der ersten Fassung der AVV Gebietsausweisung (AVV GeA, v. 03.11.2020) als Verfahren zur emissionsbasierten Modellierung der Nitrataustragsgefährdung durch die Landwirtschaft in Deutschland vorgeschrieben.

4.2.1 Methodik

Die potenzielle NO_3 -Konzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung wird berechnet aus der N-Menge (dem N-Eintrag), die mit dem Sickerwasser (unterhalb der durchwurzelten Bodenzone) bzw. mit der Grundwasserneubildung in das Grundwasser verlagert werden. Für die Berechnung können verschiedene Datengrundlagen zum Wasserfluss aus dem Boden in das Grundwasser hinein sowie zum N-Überschuss der Landwirtschaftsflächen als maßgeblicher N-Eintragsgröße herangezogen werden. Weiterhin kann die Berechnung mit unterschiedlichem Flächenbezug durchgeführt werden.

Wasserfluss in das Grundwasser

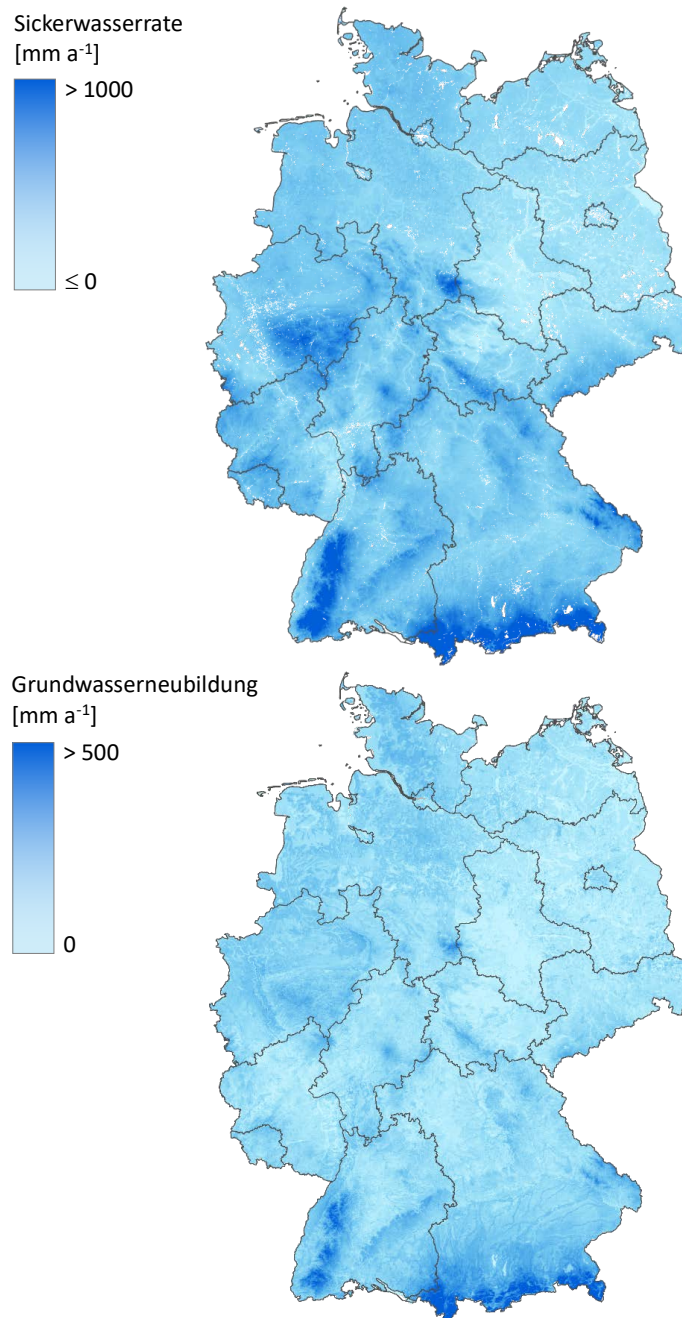
Zur Abschätzung der Wassermenge, die aus dem durchwurzelten Bodenbereich in das Grundwasser verlagert wird, können zwei hydrologische Größen herangezogen werden.

- Grundwasserneubildung (GWN): Die Grundwasserneubildung ist gem. DIN 4049 der Wasserüberschuss, der vom Niederschlag nach Abzug der Verdunstung und der schnell fließenden Anteile übrigbleibt. Im langjährigen Mittel entspricht dieser Anteil dem aus dem Grundwasserspeicher stammenden Basisabfluss (Hydrologischer Atlas Deutschland 2003, Tafel 5.5; BGR 2003a).

- Sickerwasserrate (SWR): Die mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden ist die Sickerwasserhöhe, die den Boden unter Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs im langjährigen Mittel abwärts verlässt. Im Unterschied zur GWN beinhaltet die SWR zusätzlich den Zwischenabfluss (Hydrologischer Atlas Deutschland 2003, Tafel 4.5; BGR 2003b).

Die SWR beträgt im Mittel in Deutschlands 316 mm a⁻¹, die GWN 133 mm a⁻¹ (jew. Mittel 1961-1990), Abbildung 21 zeigt die Verteilung der beiden hydrologischen Größen in Deutschland.

Abbildung 21: Jährliche Sickerwasserrate und jährliche Grundwasserneubildung, Mittel 1961 - 1990 (Hydrologischer Atlas Deutschland 2003).



Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR; Daten: Hydrologischer Atlas Deutschland (2003); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020; BGR (2015)

Stickstoff-Eintrag

Die Nitrat-Einträge in das Grundwasser sind im Wesentlichen auf die N-Austräge aus Landwirtschaftsflächen zurückzuführen, insbesondere in Regionen mit hohen Nitratgehalten. Zur Abschätzung des N-Austrags aus der Landwirtschaft wird regelmäßig der Überschuss der Stickstoff-Flächenbilanz herangezogen, berechnet als Differenz zwischen den N-Zufuhren und der N-Abfuhr zur Landwirtschaftsfläche. Unter der Prämisse, dass der Humus- und N-Gehalt im Oberboden längerfristig konstant bleibt, das heißt, dass die N-Mineralisierungs- und N-Immobilisierungsprozesse im Mittel der Kulturen bzw. Fruchtfolgen ausgeglichen sind, entspricht der N-Überschuss derjenigen N-Menge, die den Bodenbereich auch wieder verlässt: das geschieht zum einen in Form von reaktiven N-Verbindungen über die Auswaschung von Nitrat und Emissionen in die Atmosphäre (hauptsächlich als Ammoniak) und zum anderen kann ein Teil des Stickstoffs zu N_2 denitrifiziert werden. Regional differenzierte N-Überschüsse⁴ werden von zwei Einrichtungen flächendeckend für Deutschland berechnet.

- ▶ **N-Überschuss** nach Häußermann et al. (2019): Der N-Überschuss umfasst auch die gasförmigen Ammoniak-Emissionen aus dem Boden und überschätzt daher tendenziell das Nitratauswaschungspotenzial. Der jährliche N-Überschuss nach Häußermann et al. (2019) ist auf der Ebene der Kreisregionen für die Zeitreihe 1995 bis 2021⁵ verfügbar; im vorliegenden Projekt wurden daraus zwei Periodenmittel verwendet:
 - (i) Mittel 2010 - 2019, was dem Niveau der N-Überschüsse und damit dem N-Eintrag in die Landwirtschaftsflächen im vieljährigen Durchschnitt entspricht.
 - (ii) Mittel 2019 - 2021: in diesen drei Jahren ist die N-Mineraldüngung gegenüber den früheren Jahren deutlich zurückgegangen, was niedrigere N-Überschüsse zur Folge hat.
- ▶ **Hydrosphärischer N-Überschuss:** Der hydrosphärische N-Überschuss entspricht dem N-Überschuss, jedoch vermindert um die gasförmigen NH_3 -Verluste, die während und nach der Ausbringung von mineralischen und organischen N-Düngern auf Landwirtschaftsflächen entstehen. Der hydrosphärische N-Überschuss beziffert damit diejenige N-Menge, die jährlich rechnerisch für die Nitratauswaschung im Boden verfügbar ist.
- ▶ **RAUMIS-N-Überschuss** nach Zinnbauer et al. (2023): Im Modellverbund AGRUM-DE⁶ wurden mit dem Modell RAUMIS regionale N-Flächenbilanzen auf Gemeindeebene für die Jahre 2014 - 2016 berechnet. Der N-Überschuss nach RAUMIS ist nur eingeschränkt vergleichbar mit dem N-Überschuss nach Häußermann et al. (2019): RAUMIS verwendet unter anderem teilweise andere statistische Datengrundlagen zu Flächennutzung und Tierbeständen, die verfügbare Stickstoffmenge im Boden im Frühjahr (N_{min} -Werte) geht in den N-Düngungsbedarf mit ein und die atmosphärische N-Deposition wird nicht berücksichtigt; die Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen sind in Häußermann et al. (unveröff.) detailliert dargestellt.

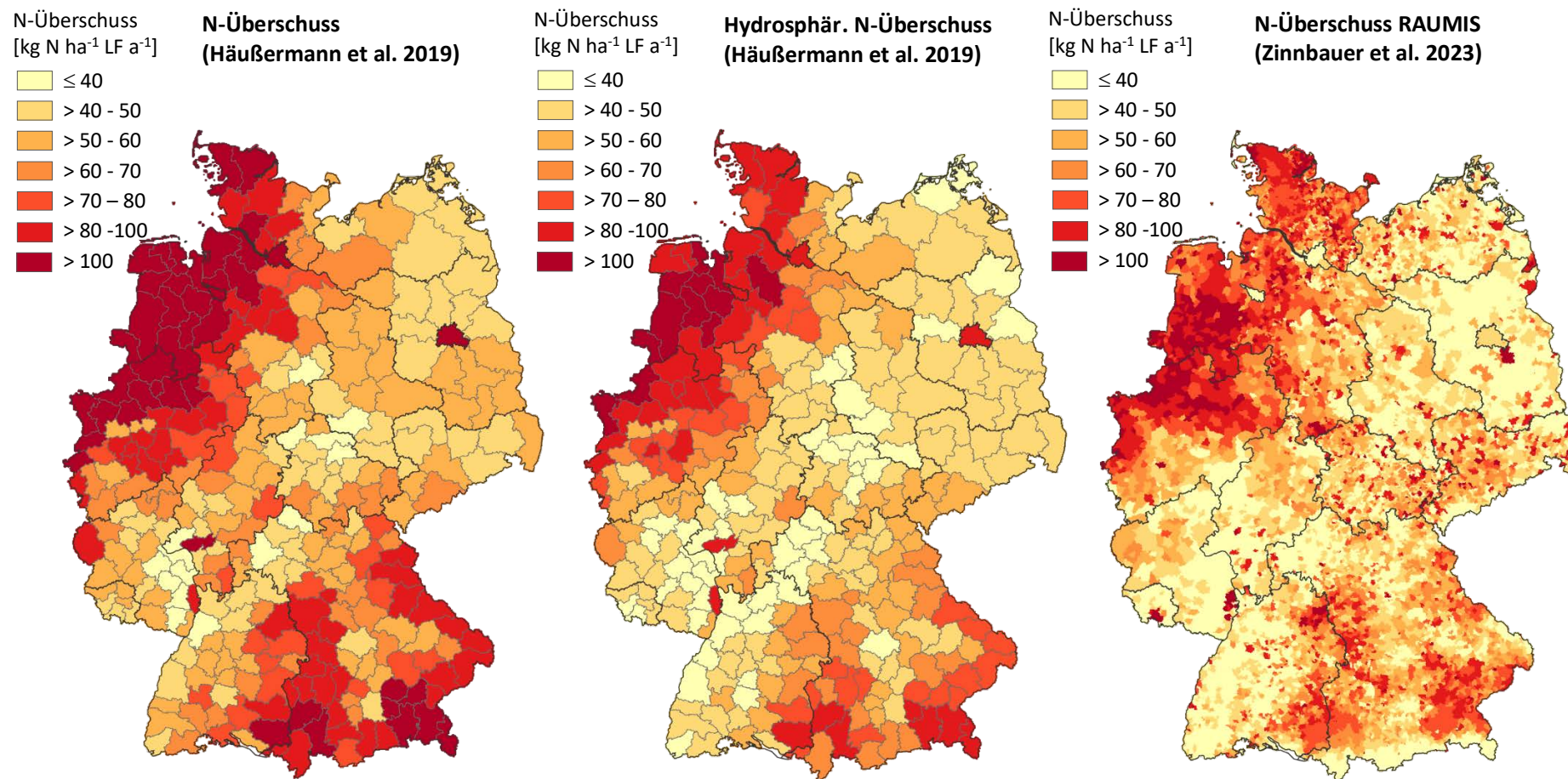
Die N-Überschüsse nach den unterschiedlichen Ansätzen sind in Tabelle 9 zusammengestellt, Abbildung 22 zeigt die regionale Verteilung in Deutschland (für ausgewählte N-Überschüsse).

⁴ Im Folgenden wird im Bericht durchgängig zur Vereinfachung der Begriff N-Überschuss verwendet, gemeint ist immer der Überschuss der N-Flächenbilanz der Landwirtschaft.

⁵ Die Zeitreihe des N-Überschuss n. Häußermann et al. (2019) wurde im Rahmen des Projekts bis Jahr 2022 aktualisiert (unveröff.).

⁶ Dem Thünen-Institut ist für die Übermittlung der Daten zu danken.

Abbildung 22: N-Überschuss und hydrosphärischer N-Überschuss 2010 - 2019 (Häußermann et al. 2019) in den Kreisregionen und N-Überschuss nach RAUMIS 2014 - 2016 (Zinnbauer et al. 2023) in den Gemeinden in Deutschland.



Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR; Daten: Häußermann et al. (2019), Häußermann et al. (unveröff.), Zinnbauer et al. (2023); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020

Tabelle 9: N-Überschuss (in kt N a⁻¹) in Deutschland nach verschiedenen Ansätzen und für unterschiedliche Zeiträume.

	Häußermann et al. (2019)				Zinnbauer et al. (2023) RAUMIS
	N-Überschuss		hydrosphär. N-Überschuss		2014-2016
	2010-2019	2019-2021	2010-2019	2019-2021	
Deutschland gesamt [kt N a ⁻¹]	1169,0	916,5	973,4 ^a	764,3	967,7
Bezogen auf LF [kg N ha ⁻¹ a ⁻¹]	70,2	55,1	58,5	45,9	58,1

^a Wert, der im Folgenden für die Berechnung zum Minderungsbedarf und die nationalen N-Obergrenze herangezogen wurde.

N-Eintragsflächen

Im Hinblick auf den Flächenbezug, für den N-Einträge in das Grundwasser betrachtet werden, können zwei Standpunkte eingenommen werden.

- **Bezugsfläche LF:** Nitrat-Einträge in das Grundwasser sind maßgeblich auf die N-Austräge aus Landwirtschaftsflächen zurückzuführen. Für eine verursacherbezogene Bewertung der erforderlichen Verminderung der potenziellen NO₃-Konzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung darf die Verdünnung der NO₃-Konzentration aus Landwirtschaftsflächen durch Mischung mit SWR bzw. GWN aus anderen Landnutzungen (mit geringerem N-Eintrag) nicht berücksichtigt werden. Dies entspricht dem Kompensationsverbot, das heißt, dass bereichsweise Überschreitungen eines Qualitätsziels nicht Unterschreitungen in anderen Bereichen ausgeglichen werden dürfen.
- **Bezugsfläche Gesamtfläche:** Die Variante "LF" vereinfacht die tatsächlichen Verhältnisse: in Deutschland wird nur rund die Hälfte der Fläche landwirtschaftlich genutzt, von den übrigen Flächen erfolgt jedoch auch Wasserverlagerung in das Grundwasser. Aufgrund des im Regelfall geringen N-Eintrags aus den übrigen Flächennutzungen (Wald, Siedlungsflächen, naturnahe Flächen) ist die Nitratkonzentration in diesem Sickerwasser bzw. dieser Grundwasserneubildung aber niedriger. Die Nitratkonzentration in einem Aquifer ergibt sich als Mischungskonzentration aus den Anteilen der SWR bzw. GWN aus Landwirtschaftsflächen (mit tendenziell höherer Konzentration) und den Anteilen aus anderen Landnutzungen (mit tendenziell niedriger Konzentration). Um den N-Eintrag auch aus Nicht-Landwirtschaftsflächen für die Berechnung des Indikators "potenzielle Nitratkonzentration" zu berücksichtigen, wird in der Variante "Gesamtfläche" ein N-Eintrag von pauschal 5 kg N ha⁻¹ angesetzt (analog zu Knoll et al. 2020). Dieser Wert orientiert sich an einer Literaturlauswertung von Beisecker und Evers (2012), die als mittlere N-Auswaschung aus Waldflächen 5,5 kg N ha⁻¹ a⁻¹ ausweist.

Potenzielle Nitratkonzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung

Die Indikatorgröße "potenzielle NO₃-Konzentration" wird berechnet aus dem Wasserfluss in das Grundwasser und dem N-Eintrag in diesen Wasserfluss mit räumlicher Auflösung der Rasterzellen des GeoGitterDE. Aus der Kombination von zwei Größen des Wasserflusses, fünf Varianten des N-Überschuss und zwei Varianten für den Flächenbezug des N-Eintrags ergeben sich insgesamt 20 verschiedene Ergebnisse für die "potenzielle NO₃-Konzentration":

$$potNO3-Konz_{k,l,m} = N-Eintrag_{k,l} / Wasserfluss_m * 4430 \quad \text{Gl. (13)}$$

mit

$$N-Eintrag_{1,l} = N-Überschuss_l \quad (k = 1: \text{nur Eintrag aus Landwirtschaftsflächen})$$

$$N\text{-Eintrag}_{2,l} = N\text{-Überschuss}_l * \text{Anteil_LF} + 5 * (1 - \text{Anteil_LF})$$

(k = 2: Eintrag Landwirtschaftsfl. und Flächen mit sonstiger Nutzung/Vegetation)
mit $l = 1, \dots, 5$: Varianten des N-Überschuss

$potNO_3\text{-Konz}_{k,l,m}$	[mg NO ₃ L ⁻¹]	potenzielle NO ₃ -Konzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung, 20 Kombinationen
$N\text{-Eintrag}_{k,l}$	[kg N km ⁻¹]	N-Eintragsmenge in den Wasserfluss (GWN oder SWR)
$N\text{-Überschuss}$	[kg N ha ⁻¹]	N-Überschuss nach verschiedenen Ansätzen (s. Tabelle 9)
Anteil LF	[-]	Anteil Landwirtschaftsfläche in der Rasterzelle
Wasserfluss_m	[mm a ⁻¹]	m = 1: Sickerwasserrate , 2: Grundwasserneubildung
4430	[-]	Dimensionsumrechnung [kg N ha ⁻¹] in [kg N km ⁻²] sowie [mm a ⁻¹] in [mg NO ₃ L ⁻¹]
5	[kg N ha ⁻¹]	N-Eintrag aus Nicht-Landwirtschaftsflächen

Auf den Jahresbezug [a⁻¹] wird hier und im Folgenden aus Gründen der Lesbarkeit verzichtet. In der SWR-Karte treten Gebiete mit negativen Werten auf (keine Sickerwasserspende, sondern GW-Zehrung), für diese Raster wurde kein Eintrag ins GW und keine potenzielle NO₃-Konzentration berechnet. Der Anteil der Landwirtschaftsfläche in den Rastern des GeoGitterDE wurde aus der Verschneidung mit der CORINE Land Cover-Karte (CLC2018, BKG 2022) ermittelt.

Aus der Kombination der verschiedenen Größen zu Wasserfluss, N-Überschuss und Eintragsfläche können 20 Werte respektive Karten der potenziellen NO₃-Konzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung berechnet werden (Tabelle 10). Die Spannweite der Mittelwerte der potenziellen NO₃-Konzentration umfasst 78 bis 356 mg L⁻¹.

Tabelle 10: Mittlere potentielle Nitratkonzentration im Sickerwasser (SWR) bzw. in der Grundwasserneubildung (GWN) und Anteil der Raster^a >50 mg NO₃ L⁻¹ für fünf Varianten des N-Überschuss und zwei Bezugsflächen des N-Eintrags.

Wasser- Fluss	Bezugsfläche ^b	N-Überschuss		hydrosphär. N-Überschuss		RAUMIS
		2010-2019	2019-2021	2010-2019	2019-2021	2014-2016
		Mittlere potentielle Nitratkonzentration [mg NO ₃ L ⁻¹]				
SWR	LF	181	138	155	118	151
	Gesamtfläche	117	90	101 ^c	78	102
GWN	LF	356	273	301	232	287
	Gesamtfläche	210	164	180	141	183
		Anteil Rasterzellen ^a > 50 mg NO ₃ L ⁻¹ [%]				
SWR	LF	91,0 %	80,7 %	84,0 %	71,8 %	78,5 %
	Gesamtfläche	57,6 %	49,4 %	51,8 % ^c	43,0 %	50,7 %
GWN	LF	99,8 %	98,7 %	99,2 %	97,6 %	95,8 %
	Gesamtfläche	79,5 %	76,5 %	77,3 %	73,6 %	74,7 %

^a 1 km x 1 km- Rasterzellen des GeoGitterDE

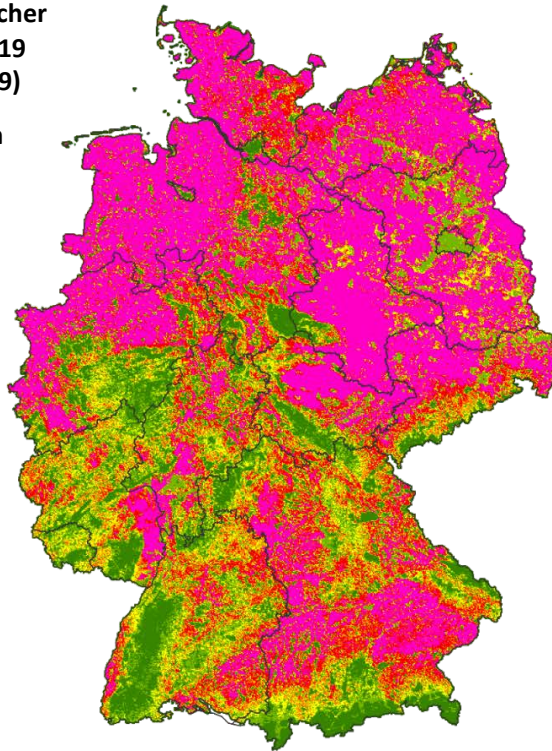
^b Variante LF: N-Eintrag und Nitratkonzentration SWR bzw. GWN nur für Landwirtschaftsflächen berechnet; Variante Gesamtfläche: N-Eintrag und Nitratkonzentration SWR bzw. GWN für Gesamtfläche Deutschland berechnet.

^c Fett gedruckt: Variante, die im Folgenden für das Gesamtergebnis und die nationale N-Obergrenze ausgewählt wurde.

Abbildung 23: Potenzielle Nitratkonzentration im Sickerwasser, berechnet mit dem hydrosphärischen N-Überschuss^a 2010-2019 und mit RAUMIS-N-Überschuss^b als Eintrag aus Landwirtschaftsflächen sowie jeweils 5 kg N ha⁻¹ Eintrag aus den übrigen Flächen.

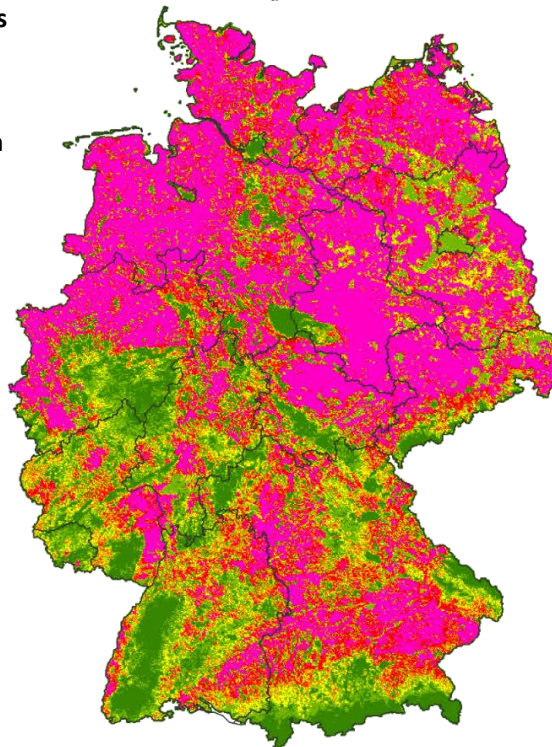
**N-Eintrag: hydrosphärischer
N-Überschuss 2010 - 2019
(Häußermann et al. 2019)**

**Pot. Nitratkonzentration
[mg NO₃ L⁻¹]**



**N-Eintrag: N-Überschuss
RAUMIS 2014 - 2016
(Zinnbauer et al. 2023)**

**Pot. Nitratkonzentration
[mg NO₃ L⁻¹]**



^a Häußermann et al. (2019)

^b Zinnbauer et al. (2023)

Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020

Abbildung 23 zeigt die Verteilung der potenziellen NO_3 -Konzentration im Sickerwasser für die zwei Kombinationen hydrosphärischer N-Überschuss 2010-2019 (Häußermann et al. 2019) und RAUMIS-Überschuss (Zinnbauer et al. 2023), jeweils mit Flächenbezug Gesamtfläche.

Mit Verwendung des N-Überschuss ergeben sich höhere Konzentration als bei Verwendung des dem hydrosphärischen N-Überschuss und des RAUMIS-Überschuss (Tabelle 10). Die höheren Überschüsse der Periode 2010-2019 verursachen höhere Konzentrationen im Vergleich zu 2019-2021. Die Konzentrationen berechnet mit der Grundwasserneubildung sind rund doppelt so hoch wie mit der Sickerwasserspende. Bei Berechnung mit Flächenbezug "Gesamtfläche" vermindert sich die potenzielle Nitratkonzentration infolge des Verdünnungseffekts deutlich gegenüber der Berechnung mit Bezug nur auf den Wasserfluss aus Landwirtschaftsflächen (Varianten "LF"). Dementsprechend liegen die Anteile der Raster mit einer potenziellen NO_3 -Konzentration über 50 mg L^{-1} in den verschiedenen Kombinationen zwischen 43 % und nahezu 100 %.

Für jede dieser 20 Kombinationen wird der zulässige N-Eintrag und die erforderliche Verminderung des N-Eintrags aus Landwirtschaftsflächen zur Einhaltung des Qualitätsziels von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ in SWR bzw. GWN in den Rasterzellen berechnet. Auf die Indizierung für die Kombinationen von Wasserfluss, N-Überschuss und Bezugsfläche wird in der nachstehenden Gleichung verzichtet.

$$\text{zuläss_Eintrag} = N\text{-Eintrag} * (\text{potNO}_3\text{-Konz} - 50) / \text{potNO}_3\text{-Konz} \quad \text{Gl. (14)}$$

mit

$$\text{zuläss_Eintrag} \quad [\text{kg N km}^{-2}] \quad \text{zulässiger N-Eintrag zur Einhaltung pot. NO}_3\text{-Konzentration} \\ \leq 50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1} \text{ in SWR bzw. GWN}$$

Die erforderliche Verminderung für die Kreisregionen ergibt sich als Summe der erforderlichen Verminderungen in den Rasterzellen der Kreisregion.

4.2.2 Ergebnisse

Für die zwanzig Kombinationen der Berechnungsgrößen ergeben sich erforderliche Verminderungen des N-Eintrags zwischen 222,1 und 934,6 kt N (Tabelle 11). Diese erforderliche Minderung des N-Eintrags entspricht, gemäß dem hier gewählten Ansatz, der erforderlichen Verminderung des N-Überschuss der Landwirtschaftsflächen. Die erforderliche Verminderung in den Kreisregionen zur Einhaltung einer potenziellen NO_3 -Konzentration von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ im Sickerwasser für den hydrosphärischen N-Überschuss 2010-2019 (Häußermann et al. 2019) und den RAUMIS-Überschuss (Zinnbauer et al. 2023), jeweils mit Flächenbezug Gesamtfläche, zeigt Abbildung 24. Die flächenbezogene Minderungserfordernis in Abbildung 24 bezieht sich, im Unterschied zu den Kartendarstellungen für die übrigen Schutzgüter, nur auf die Landwirtschaftsflächen als maßgebliche Eintragsquellen. Die Einzelwerte für die Kreisregionen für drei ausgewählte Kombinationen sind in Tabelle 36 (Anhang A.5) aufgeführt.

Für den nationalen Stickstoff-Indikator wird aus den 20 Varianten der erforderlichen Minderung der Wert von 373,7 kt N ($22,5 \text{ kg N ha LF}^{-1}$) für die Kombination von "hydrosphärischer N-Überschuss 2010-2019", "N-Eintrag von der gesamten Fläche" und dem Wasserfluss der "Sickerwasserspende" herangezogen. Das Ergebnis für diese Kombination liegt im unteren Bereich der Spannbreite der Werte in Tabelle 11 und bewertet die Beeinträchtigung des Schutzgutes und die erforderliche Verminderung eher konservativ.

Aufgrund des Verschlechterungsverbots wird in denjenigen Kreisregionen, in denen der Ist-Wert des hydrosphärischen N-Überschuss aktuell bereits niedriger ist als der zulässige N-Überschuss, der Ist-Wert als zulässige Emission übernommen; dies betrifft neun Kreisregionen.

Tabelle 11: Erforderliche Verminderung des N-Eintrags aus Landwirtschaftsflächen in das Sickerwasser (SWR) bzw. in die Grundwasserneubildung (GWN) zur Einhaltung einer potenziellen Nitratkonzentration von 50 mg L⁻¹ in SWR bzw. GWN in Deutschland^a für fünf Varianten des N-Überschuss und zwei Bezugsflächen des N-Eintrags.

Wasser- Fluss	Bezugsfläche ^a	N-Überschuss		hydrosphär. N-Überschuss		RAUMIS 2014-2016
		2010-2019	2019-2021	2010-2019	2019-2021	
		Erforderliche Verminderung [kt N]				
SWR	LF ^b	657,9	423,6	475,2	292,8	493,2
	Gesamtfläche ^b	526,4	327,2	373,7^c	222,1	397,7
GWN	LF	934,6	682,7	739,2	531,3	736,4
	Gesamtfläche	837,2	596,2	650,3	454,2	657,0
		Erforderliche Verminderung [kg N ha ⁻¹ LF]				
SWR	LF	39,5	25,4	28,5	17,6	29,6
	Gesamtfläche	31,6	19,7	22,5^c	13,3	23,9
GWN	LF	56,2	41,0	44,4	31,9	44,2
	Gesamtfläche	50,3	35,8	39,1	27,3	39,5
		Erforderliche Verminderung ^d [%]				
SWR	LF	56,3 %	46,2 %	48,8 %	38,3 %	51,0 %
	Gesamtfläche	45,0 %	35,7 %	38,4 %	29,1 %	41,1 %
GWN	LF	80,0 %	74,5 %	75,9 %	69,5 %	76,1 %
	Gesamtfläche	71,6 %	65,1 %	66,8 %	59,4 %	67,9 %

^a 1 km x 1 km- Rasterzellen des GeoGitterDE

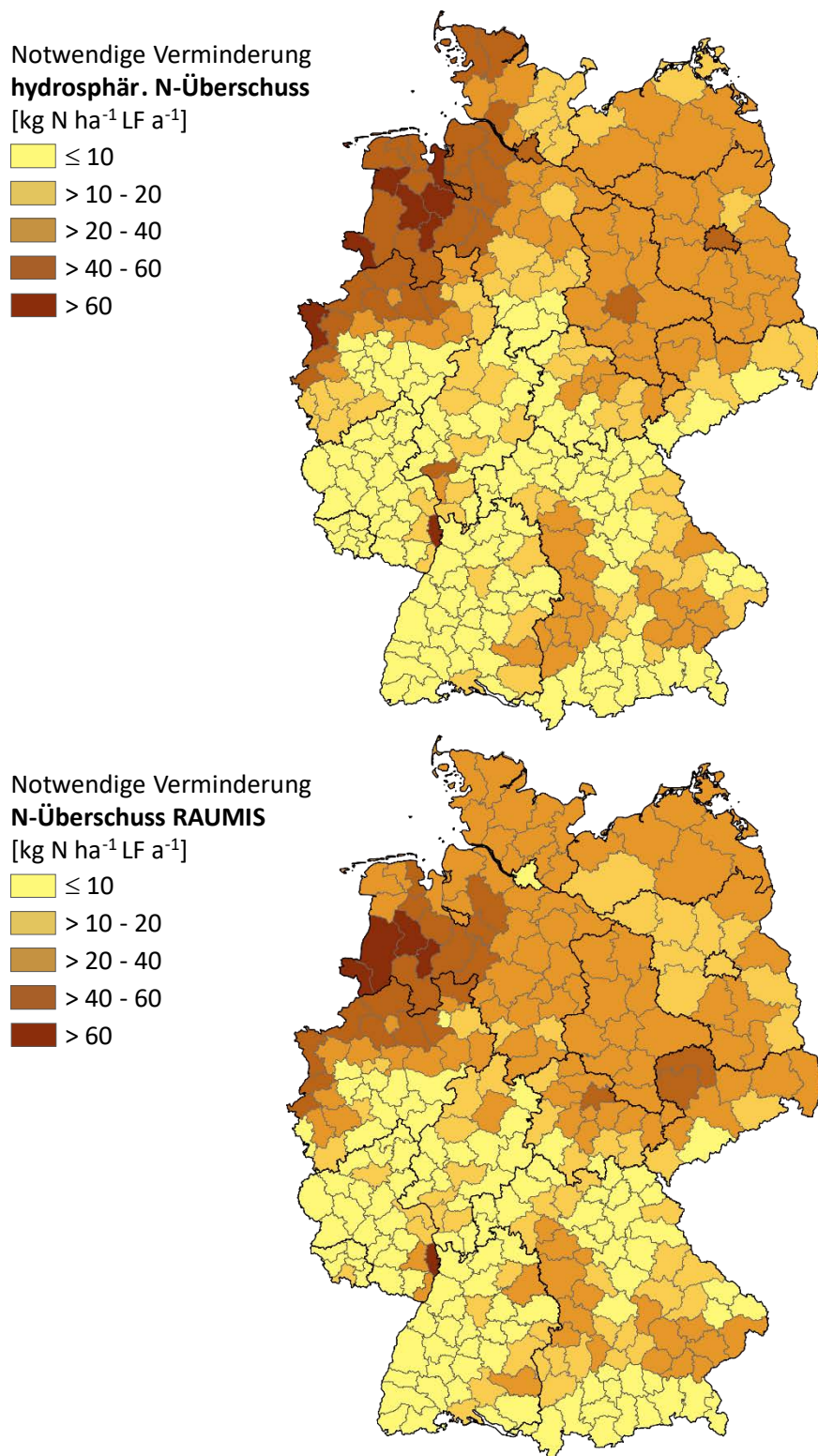
^b Variante LF: N-Eintrag und Nitratkonzentration SWR bzw. GWN nur für Landwirtschaftsflächen berechnet; Variante Gesamtfläche: N-Eintrag und Nitratkonzentration SWR bzw. GWN für Gesamtfläche Deutschland berechnet.

^c Variante, die für die nationale N-Obergrenze verwendet wird.

^d Erforderliche relative Verminderung des N-Überschuss, jeweils gegenüber IST-Wert gem. Tabelle 9

In Bezug auf den hydrosphärischen N-Überschuss wurde dem Zeitraum 2010-2019 der Vorzug gegeben gegenüber dem Zeitraum 2019-2021 (mit dessen Verwendung sich noch niedrigere potenzielle NO₃-Konzentrationen ergeben), da zum einen das N-Austragspotenzial aus dem Boden weniger vom N-Überschuss des Einzeljahres als vielmehr von der N-Menge abhängt, die im mehrjährigen Mittel einer Fläche im Überschuss zugeführt worden ist. Zum anderen stellt die Absenkung der N-Überschüsse 2019-2021 möglicherweise nur einen temporären Effekt dar, zurückzuführen auf die Dürrejahre 2018 und 2019, in deren Folge die N-Düngung von den Betrieben aufgrund reduzierter Ertragserwartungen und hoher N(min)-Gehalte eingeschränkt wurde. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die hydrosphärischen N-Flächenbilanzüberschüsse in Deutschland insgesamt auch 2021 und 2022 mit 531 bzw. 595 kt N (Fortschreibung Häußermann et al. 2019; unveröff.) deutlich niedriger waren als im Mittel der Jahre 2010 bis 2019. Wenn dieses Niveau auch zukünftig nicht wieder überschritten oder sogar weiter reduziert wird und dieser Rückgang auch in den Regionen mit Überschreitung des Qualitätsziels auftritt, dann ist ein Teil der erforderlichen Verminderung bereits erreicht worden.

Abbildung 24: Erforderliche Verminderung des N-Überschuss (zwei Ansätze) auf der Landwirtschaftsfläche in den Kreisregionen zur Einhaltung einer potenziellen Nitratkonzentration im Sickerwasser von 50 mg NO₃ L⁻¹.



Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020

4.3 Ansatz II: Nitratkonzentration im Grundwasser

Im Ansatz II wird die erforderliche Verminderung des N-Eintrags berechnet aus der Überschreitung des Qualitätsziels im Grundwasser. Von Bundes- oder Länderbehörden wurde bislang keine flächendeckende, hochaufgelöste Karte der Nitratgehalte im Grundwasser in Deutschland veröffentlicht. In dieser Situation wurde als Ausgangspunkt für Ansatz II zunächst eine Karte der NO_3 -Konzentration im GW in Deutschland mit Hilfe des Random Forest-Verfahrens modelliert. Die Einhaltung bzw. Unterschreitung von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ gilt als Qualitätsziel für diese modellierten GW-Konzentrationen.

Die Nitratkonzentration in einem Grundwasserkörper bzw. in einer Grundwassermessstelle hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab. Dazu zählen insbesondere die hydrogeologischen Eigenschaften des Grundwasserleiters, die Grundwasserneubildungsrate, die Verweilzeiten in der ungesättigten Zone (UZ) und im Grundwasser, die Landnutzung im Einzugsbereich und die Höhe des Stickstoff-Überschusses auf den Landwirtschaftsflächen. Weiterhin bestimmen die biogeochemischen Verhältnisse in der ungesättigten Zone und im Grundwasserleiter die Intensität des Nitratabbaus während der Passage des Sicker- bzw. Grundwassers.

Ausgangspunkt für eine flächendeckende Regionalisierung der Nitratkonzentration im Grundwasser sind die gemessenen Nitratgehalte in einem GW-Messnetz. Diese Punktdaten müssen mit geeigneten mathematisch-statistischen Verfahren in flächenhafte Informationen überführt werden. Grundsätzlich kommen dafür unter anderem als Verfahren in Frage:

- Deterministische Verfahren
- Geostatistische Verfahren (Kriging-Verfahren)
- Machine Learning-Verfahren.

In der "Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten" (AVV GeA; erstmalig v. 12.08.2020, novelliert 10.08.2022) werden für die Abgrenzung der mit Nitrat belasteten Gebiete deterministische und geostatistische Verfahren vorgeschrieben. In einer Untersuchung zur Leistungsfähigkeit und zur Unsicherheit dieser Verfahren kommen Ohlert et al. (2023a, 2023b) zu dem Schluss, dass diese Verfahren für die Abgrenzung der mit Nitrat belasteten Gebiete nicht geeignet sind, da unter anderem in den höheren NO_3 -Konzentrationsbereichen die Nitratkonzentration systematisch zu niedrig interpoliert wird. Brenning (2024) führt dazu aus, dass die Verwendung der in der AVV GeA betrachteten Verfahren IDW (Inverse Distanzgewichtung) und "Voronoi" aus wissenschaftlicher Sicht nicht empfohlen werden kann. Auch das einzige bisher verwendete geostatistische Verfahren, SIMIK+, weist zahlreiche Einschränkungen und sogar technische Fehler auf.

Machine Learning-Techniken wie bspw. Random Forest werden seit Anfang der 2000er Jahre unter anderem zur Erzeugung von Verteilungskarten für GW-Parametern eingesetzt. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Zielgröße und mehreren erklärenden Variablen (Prädiktoren), deren Ausprägung flächendeckend für ein Betrachtungsgebiet vorliegt, statistisch analysiert. Bei den Prädiktoren kann es sich sowohl um numerische als auch kategoriale Variablen handeln. Zunächst anhand eines Trainingsdatensatzes (hier: NO_3 -Messwerte eines GW-Messnetzes) der Entscheidungsbaum (i.e. das RF-Modell) entwickelt. Anschließend wird mittels dieses Entscheidungsbaumes die Zielgröße (hier: NO_3 -Konzentration) für alle Objekte (hier: Raster des GeoGitterDE) geschätzt, für die die Werte der Prädiktoren vorliegen. Das Random Forest-Verfahren wird unter anderem in den Anwendungen von Knoll et al. (2019) für Hessen und von Knoll et al. (2024) für Deutschland ausführlich erläutert. Nach Brenning (2024) ist jedoch auch das Random

Forest-Verfahren zur Ausweisung nitratbelasteter Gebiete bzw. zur Modellierung der Nitratkonzentrationsverteilung nur bedingt geeignet. Auch hier wird der Anteil ausgewiesener Fläche über 50 mg NO₃ L⁻¹ signifikant unterschätzt.

Datenbeschaffung und -aufbereitung

Im Rahmen des Projekts wurden die Stammdaten sowie die Messwerte zu den GW-Parametern NO₃⁻, O₂⁻, SO₄⁻, Fe(gel)- und Fe(ges)-Konzentration für insgesamt 13024 Messstellen von den Datenportalen der Bundesländer abgerufen bzw. auf Nachfrage von den zuständigen Landesämtern⁷ übermittelt (Tabelle 35, Anhang A.5. Erstmals lagen für 2435 Messstellen in acht Bundesländern auch die Denitrifikationswerte⁸ vor. Die Daten wurden in eine gemeinsame Datenbank überführt, vereinheitlicht und auf Plausibilität geprüft. Anschließend wurden die Messstellen und die Konzentrationsdaten selektiert (Einzelheiten s. Anhang A.4), danach verblieb ein Datensatz von 10023 Messstellen (Abbildung 25), davon 2155 mit Denitrifikationswert. Für die weiteren Berechnungen wurden die Messwerte der Nitratkonzentrationen der einzelnen Messstellen für den Zeitraum 2016 - 2021 gemittelt. Die Häufigkeitsverteilung der Nitratkonzentrationen in fünf Klassen separat für die drei Messstellenarten und insgesamt ist in Tabelle 12 aufgeführt.

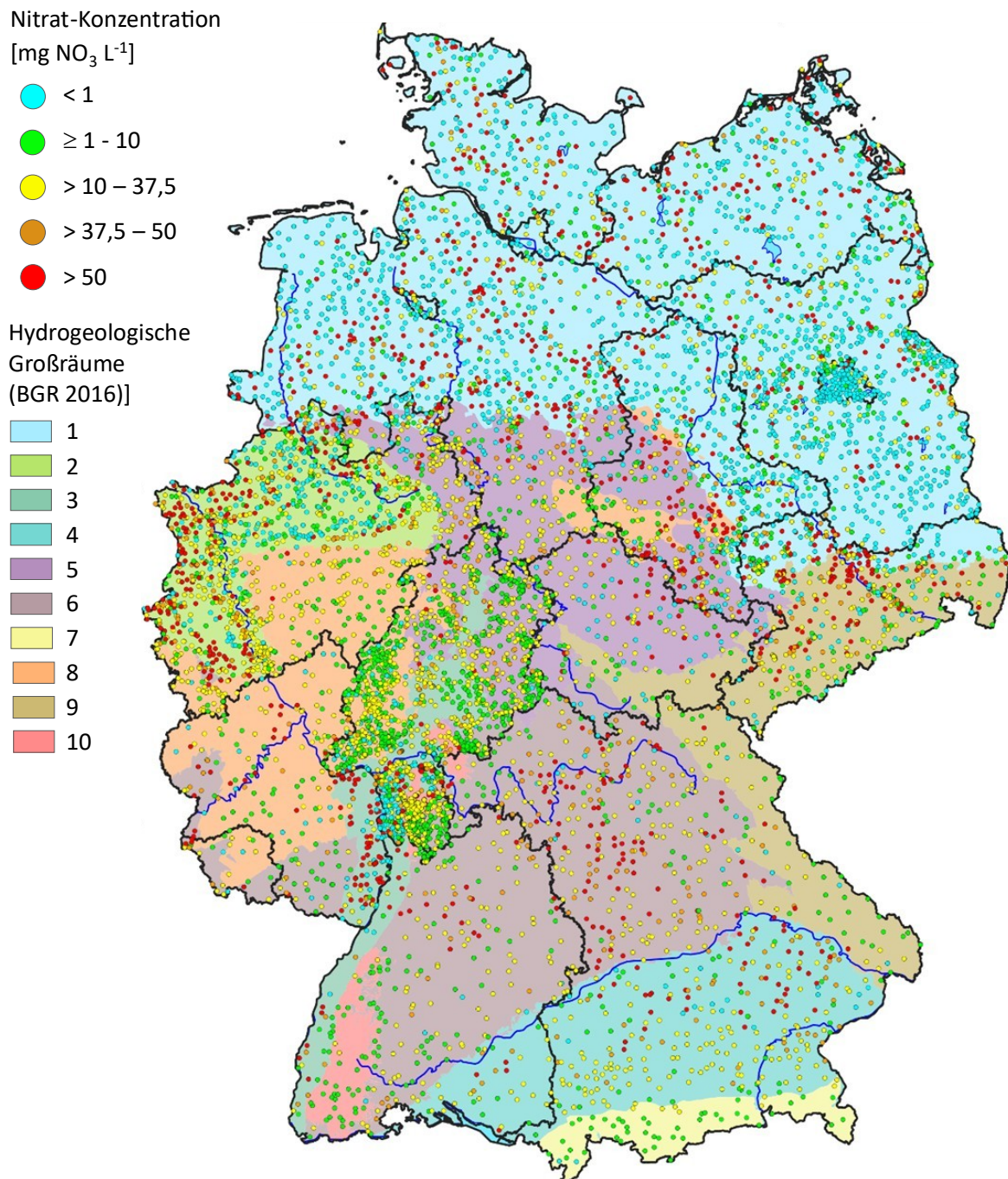
Tabelle 12: Häufigkeitsverteilung der Nitratgehalte (Mittel 2016 - 2021) in den ausgewerteten Messstellen.

Messstellenart	Anzahl	Nitratgehalt [mg NO ₃ L ⁻¹]				
		bis 10	>10 - 25	>25 - 37,5	>37,5 - 50	>50
GWM	5555	52,2 %	14,5 %	8,9 %	6,1 %	18,2 %
Brunnen	1866	38,5 %	33,5 %	15,5 %	6,3 %	6,2 %
Quelle	2602	43,0 %	30,7 %	11,1 %	7,5 %	7,6 %
Insgesamt	10023	47,3 %	22,3 %	10,7 %	6,5 %	13,2 %

⁷ Den beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Landesämter ist für Ihre Unterstützung zu danken.

⁸ Grundwasserverordnung (v. 12. Oktober 2022): Liegen denitrifizierende Verhältnisse [im Grundwasser] vor, so ist der maßgebliche Wert [des Nitratgehalts] die Summe aus dem gemessenen Nitratgehalt im Grundwasser und dem ermittelten Denitrifikationswert. Der Denitrifikationswert ist der Wert, der angibt, wie viel Nitrat im Grundwasser bereits abgebaut worden ist. Er ist mit der besten verfügbaren Methode spätestens bis zum Ablauf des 22. Dezember 2025 erstmalig zu ermitteln.

Abbildung 25: Ausgewertete Messstellen nach Nitratkonzentration (Mittelwert 2016 - 2021) der Messstelle



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020; BGR (2015)

Random Forest-Modellierung

Für das Trainieren des Klassifikationsalgorithmus (Entscheidungsbaums) eines Random Forest-(RF)-Modells müssen die GW-Konzentrationsdaten mit den Flächendaten verknüpft werden, die als Prädiktoren dienen. Die verwendeten Prädiktoren sind im Anhang A.4 aufgeführt, Einzelheiten der Aufbereitung (Pre-Processing) sind in Knoll et al. (2024) erläutert. Im Regelfall sind keine Angaben zum Grundwasserfließregime bzw. zum Einzugsbereich einer Messstelle verfügbar. Daher wurden vereinfachend als Werte der Prädiktoren die Werte in den 1 km x 1 km-Rasterzellen des GeoGitterDE verwendet, in denen jeweils die Messstelle lokalisiert sind.

Die Datenaufbereitung erfolgte mit der Pandas-Bibliothek (Version 2.2.1), für das Training der Random-Forest-Modelle wurde scikit-learn (Version 1.2.2) verwendet. Die Daten wurden im Excel-Format exportiert für die Darstellung und weitere Analysen in ArcGIS.

Für die Entwicklung und Überprüfung des RF-Klassifikationsalgorithmus wurden die Messstellen geschichteter Zufallsstichprobe in einen Trainings- (80 % der Daten) und einen Testdatensatz (20 %) aufgeteilt.

Aufgrund der prägenden Bedeutung der Redox-Verhältnisse im Grundwasser für die Nitratkonzentration wurden, analog zu Knoll et al. (2024), mittels RF drei Karten der Verteilung der O_2 -, SO_4 - und $Fe(ges)$ -Konzentrationen im Grundwasser erzeugt (mit räumlicher Auflösung des GeoGitterDE), die als Prädiktoren verwendet wurden.

Insgesamt wurden mehr als 100 RF-Modelle trainiert, die u.a. für folgende Faktoren variiert wurden:

- ▶ RF-Modellparameter (m_try, min_sample, min_sample_leaf)
- ▶ einbezogene/ausgeschlossene Prädiktoren
- ▶ Selektion Messstellen (alle Messstellenarten, nur GWM; nur oberflächennah, alle Tiefen)
- ▶ Häufigkeitsverteilung der Messstellen (Anteile \leq / $>$ 50 mg NO_3 L⁻¹)
- ▶ Redox-Parameter (4-gestuft n. Knoll et al. 2020; diskrete O_2 -, SO_4 - und Fe_{gel} -Konzentrationswerte)
- ▶ regionale Selektion (bspw. separate Modelle für hydrogeologische Einheiten)
- ▶ Für ausgewählte Messstellen: Ausgrenzung von Zustromgebieten der Messstellen (n. LAWA-Verfahren, LAWA 2019); Ermittlung der Prädiktorenwerte im Mittel der Zustromgebiete.

Die Bewertung der Modellgüte erfolgt anhand der statistischen Gütemaße "Bestimmtheitsmaß" (R^2) und "mittlerer absoluter Fehler" (MAE).

Die trainierten Modelle wiesen durchweg nur geringe bis mäßige Gütemaße auf. Zur Verwendung im vorliegenden Projekt (s. Abbildung 26) wurde schließlich ein RF-Modell ausgewählt, das nur mit den 7.405 Messstellen der Messstellenarten "Brunnen" und "Grundwassermessstelle (GWN)" trainiert wurde. Mit einem $R^2 = 0,56$ und einem MAE von 13,3 mg NO_3 L⁻¹ (Trainingsdaten) bleibt die RF-Modellgüte hinter dem Ergebnis von Knoll et al. (2024) zurück. Die Streudiagramme der gemessen und modellierten Nitratkonzentrationen und die Diagramme der Prädiktoren-Signifikanz für die Trainingsdaten sind in Abbildung 57 und Abbildung 58 (Anhang A.4) dargestellt.

Die folgenden Prädiktoren haben die größte Bedeutung für die Klassifikation des dargestellten RF-Modells:

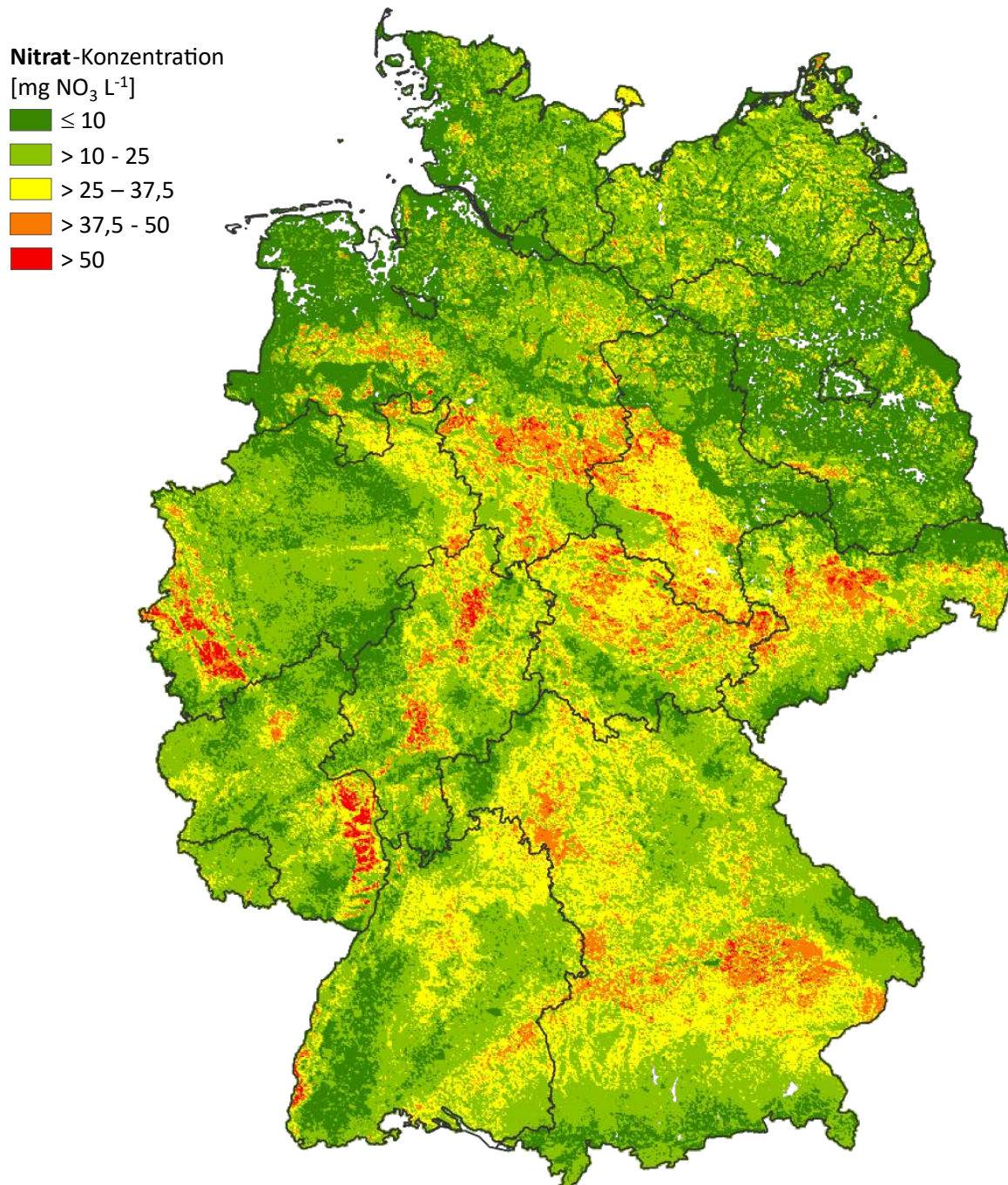
- ▶ $Fe(ges)$ -Konzentration
- ▶ O_2 -Konzentration
- ▶ Potenzielle NO_3 -Konzentration im Sickerwasser, berechnet mit RAUMIS N-Überschuss
- ▶ Hydrogeologischer Raum der Hydrogeologische Raumgliederung Deutschland (HYRAUM)
- ▶ Anteil Ackerfläche
- ▶ SO_4 -Konzentration
- ▶ Anteil Waldfläche
- ▶ N-Überschuss n. RAUMIS

Es ist auffällig, dass drei dieser sieben Prädiktoren die Redox-Bedingungen charakterisieren. Offensichtlich ist die Intensität der Denitrifikation die ausschlaggebende Einflussgröße für die Regionalisierung der Nitratkonzentration.

Ergebnisse

Mit dem beschriebenen RF-Modell wurden anschließend die Nitratkonzentrationen im Grundwasser im Bundesgebiet berechnet, Abbildung 26 zeigt das Ergebnis.

Abbildung 26: Nitratkonzentration im Grundwasser (ohne Denitrifikationswert) in Deutschland modelliert mit Random Forest-Verfahren.



Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020; BGR (2015)

Das regionale Verteilungsmuster der Gebiete mit höherer und mit niedriger Konzentration ist ähnlich wie in Knoll et al. (2020; Figure 6), jedoch ist der Anteil der Rasterzellen mit einer Nitratkonzentration über 50 mg NO₃ L⁻¹ nach dem Ansatz II der vorliegenden Untersuchung mit nur 2 % erheblich geringer als in der Modellierung von Knoll et al. (2024) mit 10 %.

Tabelle 13: Häufigkeitsverteilung der Nitratgehalte im Grundwasser in Deutschland modelliert mit dem Random Forest-Verfahren.

	Nitratgehalt [mg NO ₃ L ⁻¹]				
	bis 10	>10 - 25	>25 - 37,5	>37,5 - 50	>50
Anteil Rasterzellen	26,9 %	43,5 %	19,2 %	8,4 %	2,0 %

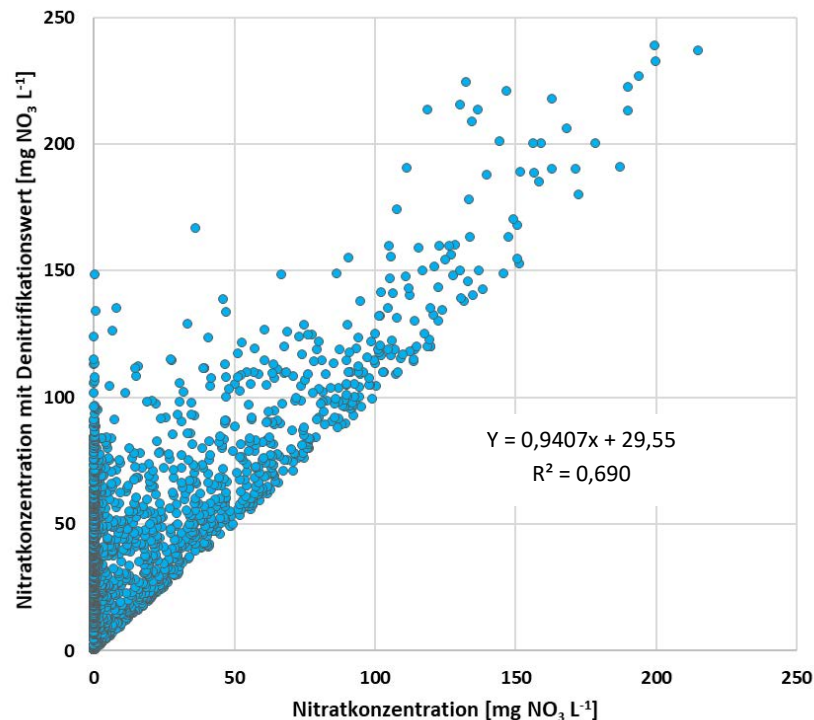
Infolge des sehr geringen Anteils von Rastern mit einer Nitratkonzentration über 50 mg NO₃ L⁻¹ wird mit Ansatz II nur ein außerordentlich geringer Minderungsbedarf des N-Überschuss von 2,9 kt N berechnet (bezogen auf den hydrosphärischen N-Überschuss 2010-2019). Dieser Ansatz wird nicht weiter betrachtet.

4.4 Ansatz III: Nitratkonzentration im Grundwasser mit Denitrifikationswert

Die GrwV (v. 12.10.2022) schreibt vor, dass ab 2026 für Messstellen mit "denitrifizierenden Verhältnissen" als maßgeblicher Wert des Nitratgehalts die Summe aus dem gemessenen Nitratgehalt im Grundwasser und dem Denitrifikationswert zu ermitteln ist. Der Denitrifikationswert gibt an, wie viel Nitrat im Grundwasser bereits abgebaut worden ist. Zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung lagen für acht Bundesländer Daten zum Denitrifikationswert im Grundwasser vor.

Die Daten der 2.435 Messstellen aus acht Bundesländern mit Denitrifikationswert wurden für die weitere Auswertung selektiert, unter anderem wurden nur Messstellen mit positivem Denitrifikationswert berücksichtigt (d.h., dass die Nitratkonzentration ohne Denitrifikation \geq Konzentration mit Denitrifikation). Für die verbleibenden 1.898 Messstellen beträgt die mittlere Konzentration ohne Denitrifikationswert 23,0 mg NO₃ L⁻¹, mit Denitrifikationswert 51,1 mg NO₃ L⁻¹. Mit anderen Worten ist im Durchschnitt dieser rund 1.900 Messstellen nahezu die Hälfte des ursprünglich vorhandenen Nitrats im Grundwasser abgebaut worden. Die Stärke des Nitratabbaus zeigt aber keinen Zusammenhang mit der Nitratkonzentration (weder mit noch ohne Denitrifikationswert), das heißt die weder die absolute noch die relative Verminderung (bezogen z.B. auf die Anfangskonzentration) des Nitratgehalts sind in diesem Datenbestand eine Funktion der Nitratkonzentration, wie Abbildung 27 verdeutlicht.

Abbildung 27: Nitratkonzentration im Grundwasser ohne und mit Denitrifikationswert (1898 Messstellen^a).



^a Datenselektion: nur Messstellen mit Konzentration ohne Denitrifikationswert < Konzentration mit Denitrifikationswert; 8 Werte > 250 mg NO₃ L⁻¹ nicht abgebildet.

Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR; Datengrundlage: Datenabruf Grundwasserdienste der Länder.

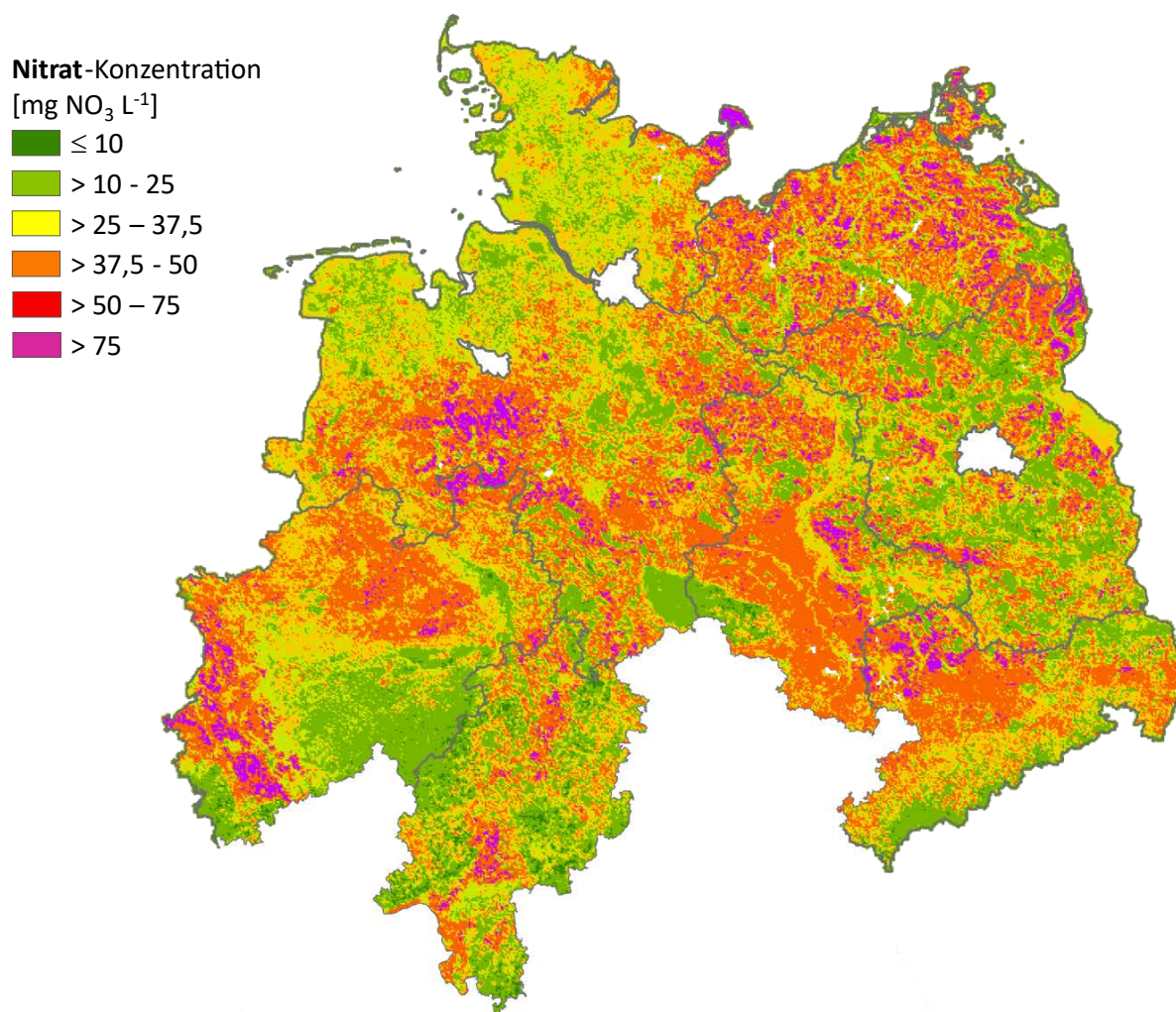
Für die acht Bundesländer mit Daten zur Nitratkonzentration im Grundwasser mit Denitrifikationswert wurde im Ansatz III eine Random Forest-Modellierung durchgeführt wie in Kap. 4.2 beschrieben mit zwei Unterschieden: (i) das Modell wurde nur mit den 2112 Messstellen mit Denitrifikationswert trainiert; (ii) die NO₃-Konzentration (ohne Denitrifikationswert) wurde als zusätzlicher Prädiktor verwendet.

Das Bestimmtheitsmaß des RF-Modells ist mit einem $R^2 = 0,697$ (Trainingsdaten) besser als für das Modell ohne Denitrifikationswert, der MAE ist mit 15,4 mg NO₃ L⁻¹ etwas höher, was auf den erheblich größeren Anteil von Konzentrationen über 50 mg NO₃ L⁻¹ zurückzuführen ist. Die Streudiagramme der gemessen und modellierten Nitratkonzentrationen und die Diagramme der Prädiktoren-Signifikanz sind in Abbildung 59 und Abbildung 60 (Anhang A.5) dargestellt.

Ergebnisse

Abbildung 28 zeigt die regionale Verteilung der Nitratgehalte im Grundwasser mit Denitrifikationswert.

Abbildung 28: Nitratkonzentration im Grundwasser^a mit Denitrifikationswert^b modelliert mit Random Forest-Verfahren.



^a Modelliert für die acht Bundesländer mit Messergebnissen zum Denitrifikationswert.

^b Der Denitrifikationswert gibt an, wie viel Nitrat im Grundwasser bereits abgebaut worden ist.

Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020; BGR (2015)

Die RF-Modellierung der Nitratgehalte mit Denitrifikation führt zu erheblich höheren NO₃-Konzentrationswerten im Vergleich zu einer Modellierung mit den Gehalten nach Denitrifikation. Die mittlere Nitratgehalt mit Denitrifikation im Grundwasser der acht Länder in Abbildung 28 beträgt 42,6 mg NO₃ L⁻¹, das rund 2,5-fache des Wertes für die entsprechende Fläche in Abbildung 26. Der Anteil der Fläche mit einer Nitratkonzentration über 50 mg NO₃ L⁻¹ steigt von 2,1 % ohne Denitrifikationswert auf 36,6 % mit Denitrifikationswert (Tabelle 14).

Tabelle 14: Häufigkeitsverteilung der Nitratgehalte im Grundwasser mit und ohne Denitrifikationswert modelliert mit dem Random Forest-Verfahren für acht Bundesländer^a.

	Nitratgehalt [mg NO ₃ L ⁻¹]					
	bis 10	>10 - 25	>25 - 37,5	>37,5 - 50	>50 - 75	>75
mit Deni-Wert	0,9 %	21,5 %	18,2 %	22,8 %	32,2 %	4,5 %
ohne Deni-Wert	36,5 %	39,6 %	14,5 %	7,3 %	2,1 %	0,1 %

^a n = 211.552 Rasterzellen

Der Minderungsbedarf für die mit Random Forest modellierte Nitratkonzentration mit Denitrifikationswerts wurde wie folgt berechnet:

$$\text{zuläss_N-Eintrag} = \text{N-Überschuss} * \text{Anteil_LF} * (\text{NO}_3\text{-GW_mD} - 50) / \text{NO}_3\text{-GW_mD} * 100 \quad \text{Gl. (15)}$$

mit

<i>zuläss_Eintrag</i>	[kg N km ⁻²]	zulässiger N-Überschuss zur Einhaltung einer NO ₃ -Konzentration ≤ 50 mg NO ₃ L ⁻¹ <u>mit</u> Denitrifikationswert im Grundwasser
<i>N-Überschuss</i>	[kg N ha ⁻¹ LF]	hydrosphärischer N-Überschuss 2010-2019 (n. Häußermann et al. 2019)
<i>NO3-GW_mD</i>	[mg NO ₃ L ⁻¹]	NO ₃ -Konzentration im Grundwasser <u>mit</u> Denitrifikationswert (nach RF-Modell)
<i>100</i>	[-]	Dimensionsumrechnung [ha] in [km ²]

Die erforderliche Verminderung ergibt sich als Summe über die Rasterzellen. Die Fläche der acht Bundesländer entspricht 58,5 % des gesamten Bundesgebiets. Mit Ansatz III wird dafür ein Minderungsbedarf von 59,7 kt N-Überschuss berechnet, was 5,7 kg N ha⁻¹ LF entspricht. Bezogen auf die 643,0 kt N hydrosphärischer N-Überschuss (2010-2019) in diesen acht Länder bedeutet das einen Minderungsbedarf von 9,3 %.

Aufgrund der unvollständigen Flächenabdeckung des Bundesgebietes werden die Ergebnisse des Ansatz III für die Nationale N-Obergrenze nicht berücksichtigt.

4.5 Fazit und Anmerkungen

- Von den sieben Schutzgütern, die Gegenstand des vorliegenden Projekts sind, sind die Methodik und die Ergebnisse zur Ermittlung eines Wirkungsindikators und der erforderlichen Emissionsminderung zur Einhaltung des Qualitätsziels für das Schutzgut Grundwasser (Parameter Nitratkonzentration) am wenigsten zuverlässig. Die vielfältigen Umsatzprozesse von organischen und anorganischen Stickstoffverbindungen im durchwurzelten Bodenbereich, in der ungesättigten Zone und im Grundwasser und deren Einflussfaktoren sind zwar grundsätzlich bekannt. Für eine flächendeckende Modellierung der Umsatzraten und der hier interessierenden resultierenden Größe Nitratkonzentration im Grundwasser fehlt es bis heute sowohl an den entsprechenden Modellen als auch an der Bereitstellung der dafür benötigten Modelleingangsgrößen (Modelltreiber) mit der notwendigen hohen räumlich-zeitlichen Auflösung. Dies betrifft insbesondere die Modellierung der Intensität des Nitratabbaus im Grundwasser.
- Aus diesem Grund wird von den drei untersuchten Ansätzen die Proxy-Größe "potenzielle Nitrat-Konzentration im Sickerwasser" (Ansatz I) für die Ermittlung von regionalen Obergrenzen des N-Eintrags in das Grundwasser herangezogen. Diese Größe wurde auch von der LAWA in der ersten Fassung der AVV Gebietsausweisung (AVV GeA, v. 03.11.2020) und wird im AGRUM-DE-Projekt sowie im Monitoringbericht Deutschlands an die EU-Kommission (BMEL und BMUNV, 2024) verwendet: "Die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ist ein guter Indikator zur Beurteilung, ob das Grundwasserschutzziel von 50 mg NO₃ L⁻¹ erreicht werden kann" (Zinnbauer et al. 2023).
- Grundwasservorkommen reagieren in der Regel nur langsam auf Veränderungen der Stoffeinträge mit dem Sickerwasser. Die mittleren Verweilzeiten des Grundwassers im Untergrund betragen in Kluftaquiferen (Mittelgebirgsregionen) mehrere Jahre, in Porenaquiferen (Norddeutschland, Oberrheinebene) mehrere Jahrzehnte und länger. Mit dementsprechend langen Zeitspannen ist daher auch zu rechnen, bis eine Verminderung des Nitratreintrags mit dem

Sickerwasser sich auch tatsächlich in einem Rückgang der Nitrat-Konzentration im Grundwasser abzeichnet. Mit Blick auf die politische Steuerungswirkung, die ein nationaler Stickstoffindikator entfalten soll, erscheint es daher zielführender, nicht die Veränderung der Nitrat-Konzentration im Grundwasser als Bewertungsgröße heranzuziehen, sondern die Veränderungen der "Nitrat-Konzentrationen im Sickerwasser". Diese Größe erfasst auch kurzfristige Veränderungen des hydrosphärischen N-Überschuss und ist daher geeignet, die Wirkung von Emissionsminderungsmaßnahmen zum Schutz des Grundwassers abzubilden.

- ▶ Allerdings bietet auch die Größe "Nitratkonzentrationen im Sickerwasser" Gestaltungsspielräume in der Berechnung, die zu stark divergierenden Ergebnissen führen können. Dies verdeutlicht die große Spannbreite der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser für die 10 Varianten, die im vorliegenden Projekt mit der SWR berechnet wurden (Tabelle 10). Je nachdem, welcher Wert des N-Überschuss als N-Eintragsgröße und welcher Flächenbezug verwendet wird, können sich zwischen 43 % und 91 % Flächenanteil über 50 mg NO₃ L⁻¹ und ein Minderungsbedarf für den jeweiligen N-Überschuss zwischen 222 kt N und 658 kt N ergeben. Wenn zusätzlich die Grundwasserneubildung als Einflussfaktor berücksichtigt wird, verdoppelt sich die Zahl der Varianten nochmal und die Spreizung der Ergebnisse nimmt noch weiter zu.
- ▶ Für die nationale N-Obergrenze wird schließlich die Berechnung mit dem hydrosphärischen N-Überschuss für den Zeitraum 2010-2019 und bezogen auf die Gesamtfläche (alle Flächennutzungen) verwendet. Der hydrosphärische N-Überschuss wird als Eintragsgröße gewählt, damit sich die berechnete N-Minderung nur auf denjenigen Teil des landwirtschaftlichen Flächenbilanzüberschusses bezieht, der potenziell als Nitrat verlagert werden kann. Die gasförmigen Ammoniak-, Stickstoffoxid- und Lachgas-Emissionen aus der Landwirtschaft gehen in dieses NO₃-Auswaschungspotenzial und somit auch in die erforderliche Minderung des (hydrosphärischen) N-Überschusses nicht mit ein. Das bietet den Vorteil, dass eine Doppelzählung der erforderlichen NH₃-, NO_x- und N₂O-Verminderung vermieden wird. Außerdem stimmt der hydrosphärische N-Überschuss 2010-2019 sehr gut mit dem RAUMIS-N-Überschuss überein, was das Ergebnis mit dem Ansatz von AGRUM-DE besser vergleichbar macht. Dem Zeitraum 2010-2019 wurde gegenüber der Periode 2019-2021 der Vorzug gegeben, da in Anbetracht der in der Regel mehrjährigen Dauer der Grundwasserpassage im Untergrund das Mittel über eine längere Zeitspanne (hier: 10 Jahre) und einen länger zurückliegenden Zeitraum den adäquateren Schätzwert für den potenziellen N-Eintrag darstellt. Mit dem Bezug auf die Gesamtfläche (anstatt nur auf die Landwirtschaftsfläche) wird die Tatsache berücksichtigt, dass die NO₃-Konzentration in einer Grundwassermessstelle üblicherweise eine Mischkonzentration aus dem Sickerwasser verschiedener Landnutzungen im Einzugsbereich der betreffenden Messstelle mit unterschiedlichen (nutzungsgeprägten) NO₃-Konzentrationen darstellt.
- ▶ Im Hinblick auf die erforderliche Verminderung des hydrosphärischen N-Flächenbilanzüberschuss ist darauf hinzuweisen, dass dieser Überschuss in Deutschland in den Jahren 2021 und 2022 mit 531 bzw. 595 kt N a⁻¹ (Fortschreibung Häußermann et al. 2019; unveröff.) bereits deutlich niedriger war als der Überschuss von 973 kt N a⁻¹ im Mittel der Jahre 2010 bis 2019, der hier für die Berechnung verwendet wurde. Wenn dieser Rückgang auch in den Regionen mit Überschreitung des Qualitätsziels auftritt und in den nächsten Jahren kein Wiederanstieg zu verzeichnen ist, dann ist ein Teil der erforderlichen Verminderung bereits erreicht worden.
- ▶ Die Höhe und die regionale Verteilung des N-Überschuss auf Landwirtschaftsflächen nach (i) RAUMIS (Zinnbauer et al. 2023), gemittelt für Kreisregionen, und (ii) der hydrosphäri-

sche N-Überschuss 2010 - 2019 nach Häußermann et al. (2019) sind relativ ähnlich (Abbildung 22). Infolge dessen zeigen auch die damit berechneten Karten der potenziellen Nitratkonzentration im Sickerwasser ein ähnliches Verteilungsmuster (Abbildung 23). Für weiterführende Interpretationen ist allerdings anzumerken, dass die hier verwendete Größe RAUMIS-N-Überschuss *nicht* identisch ist mit der Größe "N-Austrag aus dem Boden", mit der in AGRUM-DE die Nitratkonzentration im Sickerwasser berechnet wird. Im Modellansatz AGRUM-DE wird der RAUMIS-N-Überschuss noch um rund 50 % vermindert, die der Denitrifikation und Immobilisation im Boden zugeschrieben werden, bevor mit dieser reduzierten Größe dann eine Nitratkonzentration im Sickerwasser berechnet wird. Für den "tolerierbaren N-Überschuss" nach AGRUM-DE werden daher deutlich höhere Werte ausgewiesen als im hier verfolgten Ansatz I, und entsprechend geringer fallen die erforderlichen Verminderungen des N-Überschuss aus. Die Daten zum N-Austrag aus dem Boden nach AGRUM-DE wurden vom AGRUM-Projektkonsortium bzw. der LAWA allerdings nicht zur Verfügung gestellt. Für Deutschland insgesamt wird in AGRUM-DE (auf Rasterebene) ein Minderungsbedarf der RAUMIS-N-Überschüsse von rund 140 kt N ermittelt, rund 15 % des N-Überschuss 2014 - 2016 (Zinnbauer et al. 2023).

- ▶ Die Datensätze der jährlichen Grundwasserneubildung (GWN1000 0; BGR 2003a) und der jährlichen Sickerwasserrate aus dem durchwurzelten Bodenbereich (SWR1000_250; 0; BGR 2003b) geben jeweils den Mittelwert der Jahre 1961 - 1990 wieder. Diese Klimaperiode liegt jetzt mehr als 30 Jahre zurück, es muss davon ausgegangen werden, dass infolge des Klimawandels sich Höhe und regionale Verteilung von SWR und GWN in Deutschland mittlerweile gegenüber dieser Periode mehr oder weniger stark verändert haben. Von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe wurden bislang aber keine aktuelleren Karten bereitgestellt. Im Rahmen des AGRUM-DE-Projekts sind zwar zeitnahe und räumlich sehr hoch aufgelöste Datensätze zur jährlichen Sickerwasserhöhe und zur Grundwasserneubildungshöhe berechnet worden, sie konnten allerdings in diesem Projekt nicht mitverarbeitet werden.
- ▶ In den Rasterzellen der Karte SWR1000_250 0 (BGR 2003b) wird die Sickerwasserrate als flächengewichteter Mittelwert der nutzungsspezifischen SWR unter Ackerland, Grünland und Wald ausgewiesen. Im Regelfall nimmt die Höhe der SWR in der Reihenfolge Ackerland > Grünland > Wald ab. Je geringer der Flächenanteil der beiden Nutzungen Ackerland und Grünland (und je größer der Unterschied zwischen den nutzungsspezifischen SWR) in einem Raster ist, umso stärker unterschätzt das flächengewichtete Mittel der SWR (aus allen drei Nutzungen) die SWR unter Ackerland und Grünland (i.e. Landwirtschaftsflächen). Daraus resultiert eine systematische Überschätzung der potenziellen Nitratkonzentration im Sickerwasser, wenn für den N-Eintrag nur die Landwirtschaftsflächen als Bezugsflächen gewählt werden, für die SWR aber der Mittelwert aus Ackerland, Grünland und Waldflächen.
- ▶ Im Gegensatz zum etablierten Ansatz der "Nitrat-Konzentration im Sickerwasser" führt ein bislang wenig verbreitetes Verfahren wie Random Forest nicht zu belastbaren Ergebnissen, die allgemeine Akzeptanz erwarten könnten. Insbesondere die stark eingeschränkte Interpretierbarkeit von Black-Box-Modellen wie Random Forest steht einem Einsatz für die Aufgabenstellung dieses Projekt entgegen (Brenning 2024). Daher werden nur die Ergebnisse des Ansatz I in das Gesamtergebnis (Kapitel 9) übernommen.
- ▶ In den beiden Random Forest-Modellen zur Regionalisierung der Nitratkonzentration (ohne und mit Denitrifikationswert, Ansatz II und III) sind der RAUMIS-N-Überschuss und die damit berechneten Größen der potenziellen NO_3 -Konzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung drei Prädiktoren mit hoher Signifikanz. Die Verwendung der Größe N-Überschuss mit der höheren räumlichen Differenzierung von RAUMIS (9629 Gemeinden)

verbessert offensichtlich die RF-Modellierung gegenüber dem N-Überschuss mit einer räumlichen Auflösung von nur 302 Kreisregionen.

- ▶ Abgesehen von den Random Forest-basierten Ansätzen von Knoll et al. (2020) und im vorliegenden Projekt ist bis dato keine kleinräumig aufgelöste Darstellung oder Auswertung zur Einhaltung der Nitratkonzentration im Grundwasser im Bundesgebiet insgesamt veröffentlicht worden. Für die Ausweisung von Nitrat belasteten Gebieten nach AVV GeA werden zwar ebenfalls geostatistische bzw. deterministische Regionalisierungsverfahren herangezogen, die zunächst diskrete NO_3 -Konzentrationswerte berechnen und auf deren Basis dann die Abgrenzung der mit Nitrat belasteten Gebiete erfolgt. Die Frage, in welchem Flächenumfang das Grundwasser in Deutschland den Schwellenwert von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ überschreitet, kann trotz mittlerweile rund 30 Jahren "Nitratproblem" weiterhin nicht fundiert beantwortet werden (Bach 2020).
- ▶ Die Random Forest-Modelle der Nitratkonzentration im Grundwasser von Knoll et al. (2020) und im vorliegenden Projekt (ohne Denitrifikationswert) führen zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen, von Knoll et al. (2024) wurden rund 10 % Raster über $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ klassifiziert, im vorliegenden Projekt nur rund 2 %. Die Gütemaße des hier angewendeten RF-Modell sind schlechter als in Knoll et al. (2024). Eine Ursache dafür ist (mutmasslich) darin zu suchen, dass von Knoll et al. (2024) auch die Redox-Verhältnisse im Grundwasser auf Basis einer Random Forest-Regionalisierung der Fe-, Mn- und O_2 -Konzentration als Modell-Prädiktor verwendet wurden. Im vorliegenden Projekt wurde darauf jedoch verzichtet. Mit den bislang verwendeten Trainingsdaten (Messstellen), Prädiktoren und/oder Parametrisierungen erzeugt Random Forest als Regionalisierungsverfahren offensichtlich keine reproduzierbaren Karten der Nitratkonzentration im Grundwasser.
- ▶ In Anbetracht der kritischen Auseinandersetzung von Brenning (2024) mit den aktuell in der AVV GeA vorgeschriebenen Verfahren zur Ausweisung von Nitrat belasteten Gebieten wird mit Interesse zu verfolgen sein, wie die Bundesländer die Vorschrift der Grundwasserverordnung umsetzen werden, zukünftig die Nitratkonzentration im Grundwasser *einschließlich* des Denitrifikationswertes, also inklusive des bereits im Grundwasser abgebauten Nitrats auszuweisen.

5 Schutzgut Klima - Lachgas-Emissionen

5.1 Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren

Qualitätsziel

Einhaltung der jährlichen N₂O-Emissionshöchstmengen bis zum Jahr 2030 gem. Vorgaben des KSG; für N₂O gewichtet mit den Sektor-spezifischen Minderungszielen des KSG (v. 18. August 2021) und den Anteilen der Sektoren an der gesamten N₂O-Emission (s. Kapitel 5.2). Die zulässige N₂O-Emission beträgt nach diesem Ansatz 46,6 kt N₂O-N in 2030 und die Sektor-spezifischen Minderungsziele der N₂O-Emission bis 2030 betragen -16,5 % für den Sektor Landwirtschaft und -44,0 % für die übrigen fünf Sektoren.

Anmerkung: Damit wird nicht ein Umweltqualitätsziel im eigentlichen Sinn formuliert, sondern ein Umwelthandlungsziel.

Hinweis: Mit der Novellierung des KSG im Juni 2024 sind die Sektor-spezifischen THG-Minderungsvorgaben aufgehoben worden. Diese Änderung der klimapolitischen Rahmenvorgabe wurde im vorliegenden Bericht nicht berücksichtigt; die methodische Entwicklung des Minderungsziels für N₂O verwendet die bis dahin geltenden Vorgaben des KSG (v. 18. August 2021) für die CFR-Sektoren.

Wirkungsindikator

N₂O-Emission.

Emission

N₂O-Emissionen.

Datengrundlagen

► Karte N₂O-Emissionen (Jahre 2015 bis 2020; GRETA).

5.2 Ableitung Sektor-spezifischer N₂O-Minderungsziele für 2030

Die Vorgaben des Klimaschutzgesetzes (KSG, v. 18. August 2021) zu den Höchstmengen der jährlichen THG-Emissionen in Deutschland für das Zieljahr 2030 sind nur in Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten (CO₂-Äq.) insgesamt angegeben und nicht weiter nach Höchstmengen für die einzelnen THG aufgeschlüsselt. Die N₂O-Emissionen in Deutschland betrugen 2020 95,0 kt N₂O (60,2 kt N₂O-N) entsprechend 28,2 Mio. t CO₂-Äq., der Anteil des N₂O an den gesamten CO₂-Äq.-Emissionen beträgt damit 3,9 % (UBA 2022; ohne Emissionen aus dem Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft, LULUCF). Von den in der Emissionsberichterstattung betrachteten sechs Sektoren ist die Landwirtschaft mit einem Anteil von rund 78 % (2020)⁹ an den gesamten N₂O-Emissionen die mit Abstand wichtigste Quelle von N₂O.

Die Sektor-spezifischen N₂O-N-Minderungsziele für 2030 wurden wie folgt abgeleitet (s. Tabelle 15).

1. Aus den Angaben zu den THG-Emissionen insgesamt und den N₂O-Emissionen in 1990 wird der Anteil des N₂O (in CO₂-Äq.) an den THG-Emissionen in 1990 berechnet (Spalte D = B / A in Tabelle 15; Quellen zu allen Emissionsdaten s. Tabelle 15).

⁹ Vorläufige Daten des Jahres 2023 (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/dis-tickstoffoxid-emissionen>) zeigen, dass der Anteil der Landwirtschaft lediglich rund 74 % beträgt. Diese Daten konnten allerdings für das vorliegende Projekt (die Berechnungen wurden vor allem in 2023 durchgeführt) nicht mehr berücksichtigt werden.

2. Das KSG (v. 18. August 2021) gab einzuhaltende THG-Jahresemissionsmengen in 2030 aufgeschlüsselt für sechs Sektoren vor (Sp. H). Das KSG differenzierte diese Emissionsmengen jedoch nicht weiter für die einzelnen THG; mangels dieser Angabe wurde daher der Anteil der N₂O-Emission an den THG-Emissionen in 1990 (Sp. D) für die THG-Jahresemission 2030 übernommen (Sp. J). Mit diesem Anteil wurden dann aus den Sektor-spezifischen THG-Jahresemission in 2030 die Sektor-spezifischen Obergrenzen für die N₂O-N-Emissionen in 2030 abgeleitet (Sp. K = H * J, in t CO₂-Äq.; Sp. L Werte in t N₂O-N).
3. Mit tatsächlichen N₂O-Emissionen i. H. v. 60,2 kt N₂O-N (Summe Sp. G) insgesamt in 2020 werden die Minderungsvorgaben des KSG für 2030 i. H. v. 65,1 kt N₂O-N (Summe Sp. L), berechnet nach vorstehendem Ansatz, jedoch bereits mehr als erfüllt. Diese Entwicklung ist maßgeblich auf die sehr wirksame Minderung der N₂O-Emissionen im Sektor Industrie zurückzuführen, die von 52,8 kt N₂O-N in 1990 auf nur noch 3,4 kt N₂O-N in 2020 (-93 %) zurückgegangen sind (s. dazu auch Anmerkung in Kapitel 5.5). Das KSG sieht jedoch keine Kompensation von THG-Minderungen zwischen den Sektoren vor, das heißt eine unzureichende Minderung in einem Sektor kann nicht mit einer Übererfüllung in einem anderen Sektor verrechnet werden. Aus diesem Grund wird für die weitere Betrachtung das Minderungsziel für den Sektor Industrie in 2030 dem Ist-Wert von 3,4 kt N₂O-N in 2020 gleichgesetzt (Prinzip des "Verschlechterungsverbots"). Damit berechnen sich als mengenmäßige Sektor-spezifische zulässige N₂O-N-Emissionen die Werte in Spalte M; die Werte für die vier Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr und Abfallwirtschaft sind dort bereits summiert. Für die sechs Sektoren insgesamt ergeben sich 46,6 kt N₂O-N-Emissionen als Obergrenze, die im Folgenden verwendet wird; dieser Wert ist geringer als die erforderliche Minderung, die sich zunächst aus einer Umlegung der THG-Vorgabe (für CO₂-Äq. insgesamt) auf die einzelnen THG ergibt (Sp. L).
4. Anschließend werden die Sektor-spezifischen prozentualen Minderungsziele der N₂O-Emission für 2030 gegenüber 2020 (Sp. N) aus der Ist-Emission 2020 (Sp. G) und der zulässigen N₂O-Emission (Sp. M) mit $N = 1 - M / G$ berechnet. Zur Vereinfachung der Berechnung werden die fünf Sektoren Industrie, Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr und Abfallwirtschaft dabei zusammengefasst und dafür wird ein gemitteltetes Minderungsziel berechnet. In Anbetracht der nachrangigen Bedeutung dieser fünf Sektoren (zusammen nur 16 % der zulässigen N₂O-Emissionsmenge in 2030) erscheint diese Vereinfachung vertretbar.

Die relative Minderungsvorgabe wird auf das Ausgangsjahr 2020 (und nicht auf 1990) bezogen, da im vorliegenden Projekt die Minderungserfordernis einheitlich für das Jahr 2019 bzw. 2020 (Oberflächengewässer: Mittel 2016-2018) dargestellt wird.

Tabelle 15: Ableitung prozentualer N₂O-Minderungsziele 2030 für Sektor Landwirtschaft und die übrigen Sektoren (zusammengefasst) gegenüber 2020; ausgehend vom Klimaschutzgesetz (KSG, v. 18. August 2021)^a.

Sektor	THG-Emissionen gesamt (IST)	1990			THG-Emissionen gesamt (IST)	2020			THG-Emissionen gesamt gem. KSG	Anteil N ₂ O an CO ₂ -Äq. des Sektors	2030			Sektorale Minde- rungsziele 2030 ggü. 2020
		N ₂ O-Emissionen	Anteil N ₂ O an CO ₂ -Äq. des Sektors	N ₂ O-Emissionen		Anteil N ₂ O an CO ₂ -Äq. des Sektors	Obergrenze N ₂ O-Emissionen in 2030				für Be- rechnun- gen ver- wendet			
							abgeleitet aus KSG							
	Mio. t CO ₂ -Äq.	Mio. t CO ₂ -Äq.	kt N ₂ O-N	in %	Mio. t CO ₂ -Äq.	Mio. t CO ₂ -Äq.	kt N ₂ O-N	Mio. t CO ₂ -Äq.	%	Mio. t CO ₂ - Äq.	kt N ₂ O-N	kt N ₂ O-N	%	
Spalte Quellen	A (1)	B (2)	C berechnet	D berechnet	E (1)	F (2)	G berechnet	H (1)	J Übernahme aus 1990	K berechnet	L berechnet	M berechnet	N berechnet	
Industrie	283,7	24,7	52,8	8,7 %	171,9	1,6	3,4	118	8,7 %	10,3	(22,0)	3,4 ^b	4,1	-44,0 %
Energiewirtschaft	466,1	3,2	6,8	0,7 %	220,0	1,8	3,9	108	0,7 %	0,7	1,6			
Gebäude	209,7	1,0	2,1	0,5 %	119,4	0,4	0,8	67	0,5 %	0,3	0,7			
Verkehr	163,4	1,4	3,0	0,9 %	146,4	1,7	3,6	85	0,9 %	0,7	1,6			
Abfallwirtschaft	38,0	1,2	2,6	3,2 %	8,8	0,8	1,7	4	3,2 %	0,1	0,3			
Landwirtschaft	81,1	26,5	56,6	32,7 % ^c	62,4	21,9	46,8	56	32,7 %	18,3	39,1	39,1		-16,5 %
Summe	1.241,9	58,0	123,8		728,7	28,2	60,2	438		30,5	65,1	46,6		-22,6 %

Umrechnung Spalte B, F, K in Spalte C, G, L mit Faktor: *0,636 *1000 /298

Quellen: (1) www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#nationale-treibhausgasminderungsziele

(2) www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgasemissionen; Tabellenblatt "N2O"

^a Am 26.04.2024 wurde die Neufassung des KSG vom Bundestag verabschiedet (Drucksache, 20/11183 24. April 2024). Im novellierten KSG wird die Erreichung der nationalen Klimaziele nur noch sektorübergreifend in der Summe der gesamten THG-Emissionen bewertet. Die Jahresemissionen der einzelnen Sektoren bleiben als Betrachtungsgröße im Monitoring erhalten.

^b Die zulässige Emission im Sektor Industrie von 22,4 kt N₂O-N für 2030 wurde mit 3,4 kt N₂O-N bereits 2020 weit unterschritten, daher wird als Ziel 2030 der Ist-Wert 2020 übernommen.

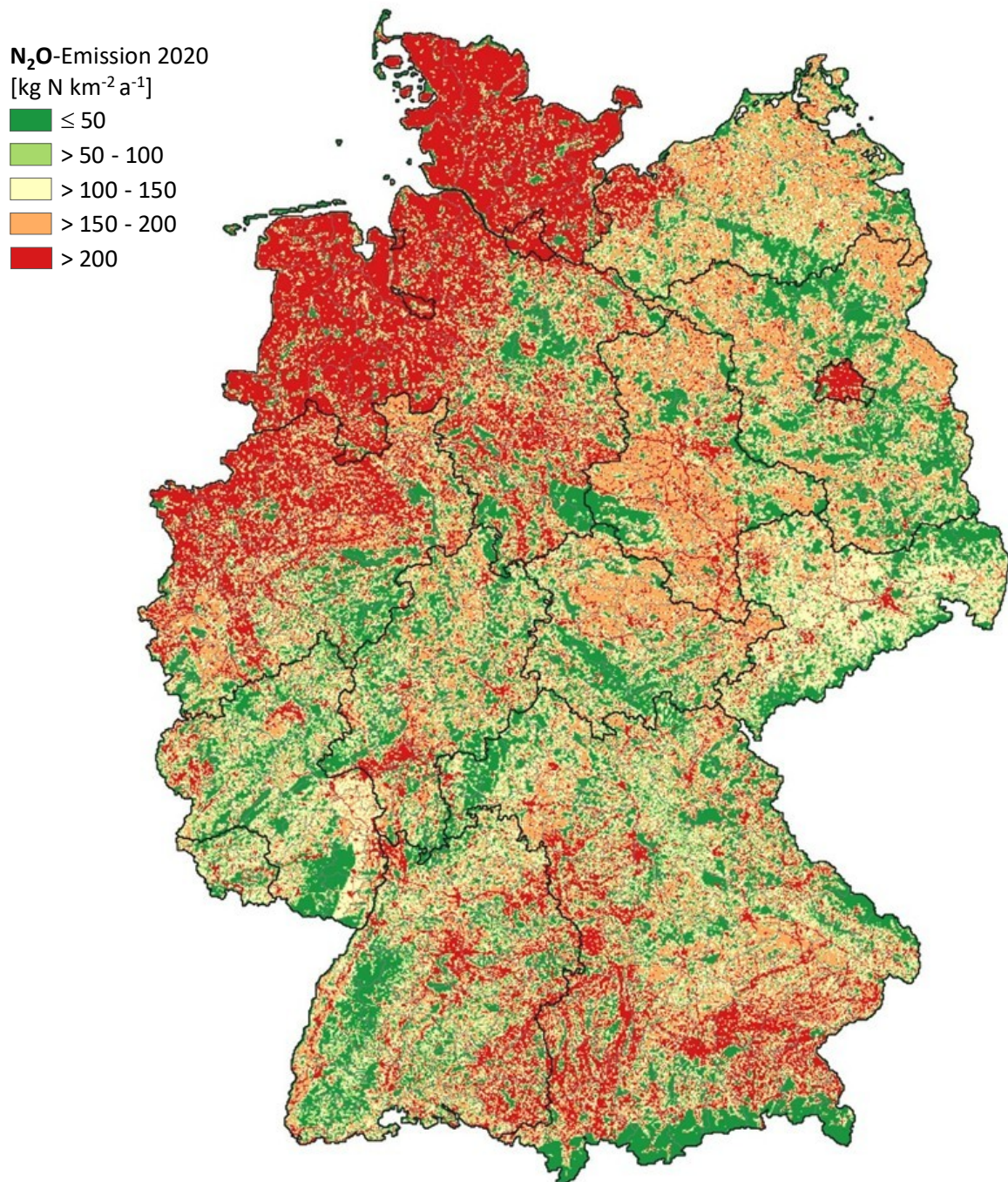
^c Infolge Neufestlegung der Emissionsfaktoren für die landwirtschaftlichen Böden verringert sich der Anteil der N₂O-Emissionen an den Gesamt-THG-Emissionen der Landwirtschaft auf etwa 23 %. Diese Änderung konnte im Projekt allerdings nicht mehr berücksichtigt werden, da die Berechnungen vor Veröffentlichung der neuen Emissionsdaten durchgeführt wurden.

5.3 Ermittlung der N₂O-Emissionsminderungen auf Kreisebene

Ist-Situation

Aus den GRETA-Daten 2020 ergeben sich die N₂O-N-Emission insgesamt (Summe aller Sektoren) für die Rasterzellen des GeoGitterDE in Deutschland (Abbildung 29).

Abbildung 29: N₂O-Emissionen in Deutschland^a 2020 nach GRETA.



^a 1 km x 1 km Rasterzellen des GeoGitterDE (BKG 2020)

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Grundsätzlich ist der größte Teil der N₂O-Emissionen auf die Landwirtschaft zurückzuführen. Dies zeigt sich vor allem im Nordwesten Deutschlands (Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen

und Schleswig-Holstein) wo intensive Landwirtschaft betrieben wird. Allerdings können auch im urbanen Raum relativ große Mengen durch Verbrennungs- und sonstige Industrieprozesse freigesetzt werden. Insbesondere Berlin hebt sich daher stark von seiner Umgebung ab, aber auch in vielen anderen Ballungsräumen (z. B. Dresden, Magdeburg, Stuttgart) stellt sich ein ähnliches Bild dar. In Nordrhein-Westfalen (aber auch Bremen und Hamburg) treten die Ballungsräume kaum aus ihrer Umgebung hervor, da dort im Umfeld auch die landwirtschaftlichen N₂O- Emissionen ähnlich hoch sind.

Zulässige Emissionen

Die Obergrenze der Lachgas-Emissionen in 2030 (N_2O_{2030}) für jede Kreisregion wird wie folgt berechnet:

$$N_2O_{2030} = N_2O_{ges} - (N_2O_{LW_{Ist}} * MF_{LW} + N_2O_{Üb_{Ist}} * MF_{Üb}) \quad \text{Gl. (16)}$$

mit

N_2O_{2030}	[kg N ₂ O-N km ⁻²]	Zulässige N ₂ O-Emissionen in 2030
$N_2O_{LW_{Ist}}$	[kg N ₂ O-N km ⁻²]	N ₂ O-Emissionen aus der Landwirtschaft in 2020
MF_{LW}	[kg kg ⁻¹]	Erforderliche Emissionsminderung in der Landwirtschaft, MF _{LW} = 16,5 %
$N_2O_{Üb_{Ist}}$	[kg N ₂ O-N km ⁻²]	N ₂ O-Emissionen aus den übrigen fünf Sektoren in 2020
$MF_{Üb}$	[kg kg ⁻¹]	Erforderliche Emissionsminderung in den übrigen Sektoren, MF _{Üb} = 44,0 %

für $i = 302$ Kreisregionen; auf die Indizierung i wird in Gleichung Gl. (16) zur besseren Lesbarkeit verzichtet.

5.4 Ergebnis

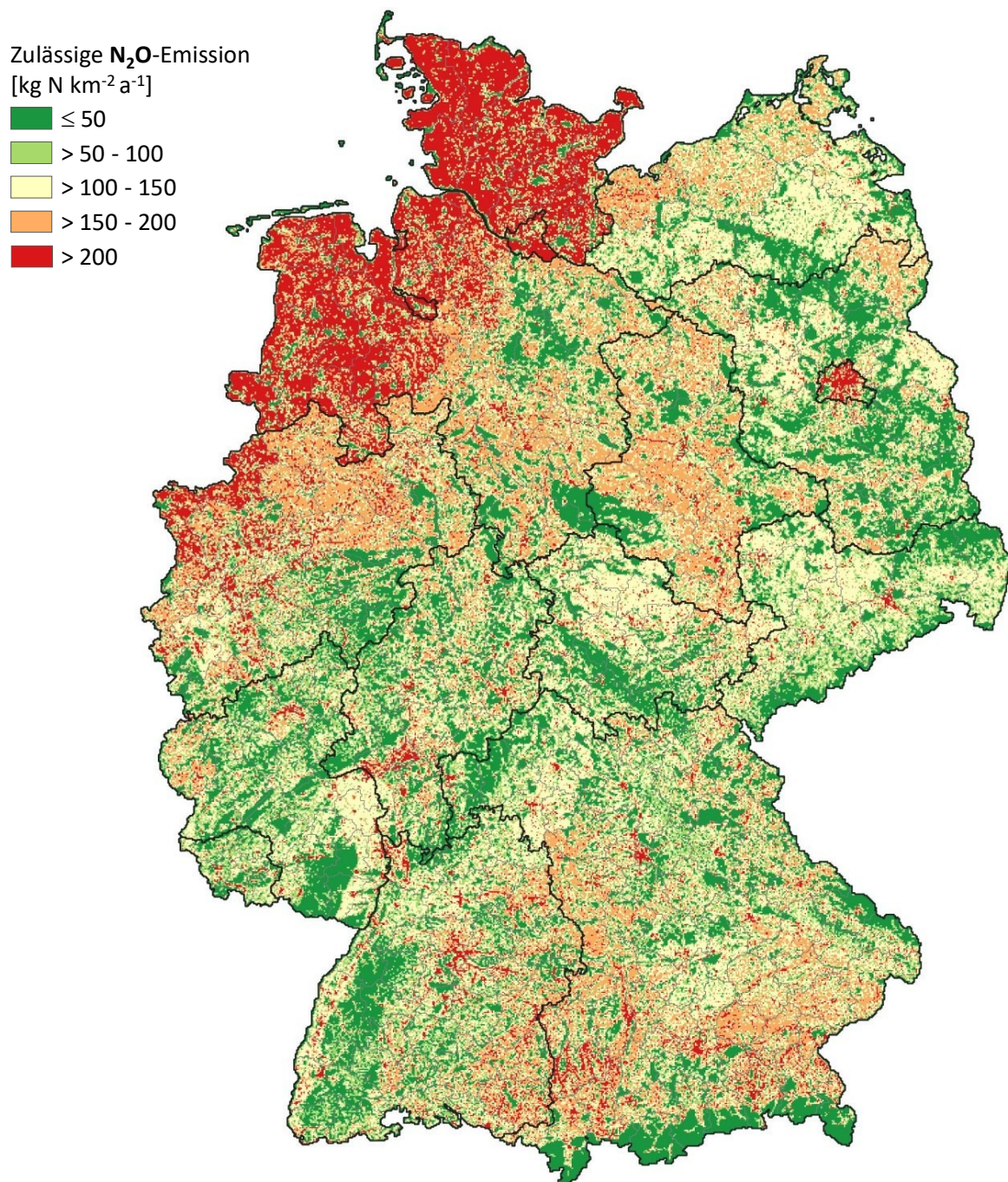
Aus der Differenz zwischen der Ist-Emission 2020 (in kg N₂O-N km⁻² a⁻¹; Abbildung 29) und der zulässigen Emission für 2030 gem. Gl. (16) (Abbildung 30) wird die erforderliche Verminderung der N₂O-Emissionen für jede Kreisregion flächenbezogen ermittelt (t N₂O-N km⁻² a⁻¹; Abbildung 31). Da die Emissionen deutschlandweit linear prozentual gemindert werden sollen (in Abhängigkeit von den beiden Emissionsquellen Landwirtschaft und Sonstiges) ergibt sich für die zulässigen Emissionen (Abbildung 30) eine sehr ähnliche Verteilung zu den bestehenden Emissionen 2020 (Abbildung 29) auf geringerem Niveau.

Die Verminderung für die sonstigen Quellen fällt prozentual höher aus als für landwirtschaftliche Quellen, daher treten die Kreisregionen der Ballungsräume (Emissionen stammen hauptsächlich nicht aus der Landwirtschaft) in Abbildung 31 hervor, sodass insbesondere auch in Nordrhein-Westfalen diese Ballungsräume nun deutlich sichtbar werden.

Für die Zusammenführung mit den Obergrenzen der übrigen Schutzgüter wird die erforderliche Verminderung in absoluter Menge ausgedrückt. Bei Anwendung der deutschlandweiten Obergrenzen für 2030 gemäß Tabelle 15 müssen die N₂O-Emissionen von 62,4 kt N₂O-N¹⁰ in Deutschland insgesamt um 14,2 kt N₂O-N pro Jahr vermindert werden. Die Einzelwerte für die Kreisregionen sind in Tabelle 37 (Anhang A.6) aufgeführt.

¹⁰ Anmerkung: der Wert von 62,4 kt N₂O-N ergibt sich aus der Summation der Emissionen in Deutschland (2020) nach GRETA und unterscheidet sich geringfügig von der Angabe 60,2 kt N₂O-N in Tabelle 15 (Spalte G); aus Gründen der Konsistenz der verwendeten Datenquellen mit den übrigen Schutzgütern wird das GRETA-Ergebnis verwendet.

Abbildung 30: Zulässige N₂O-Emissionen (Obergrenzen) für 2030 in Deutschland^a zur Einhaltung der THG-Minderungsverpflichtung des Klimaschutzgesetzes^b



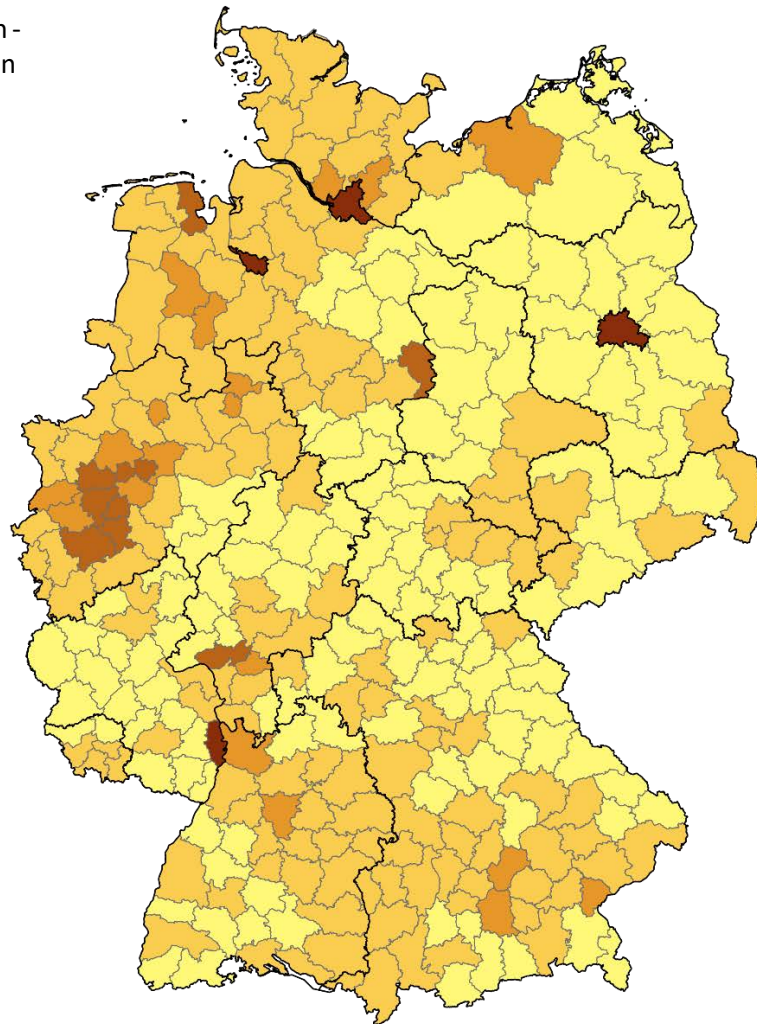
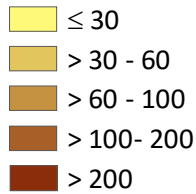
^a 1 km x 1 km Rasterzellen des GeoGitterDE (BKG 2020)

^b KSG in der Fassg. v. 18. August 2021

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Eckhoff; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Abbildung 31: Erforderliche Verminderung der N₂O-Emissionen in den Kreisregionen bis 2030 zur Einhaltung der THG-Minderungsverpflichtung des Klimaschutzgesetzes^a für 2030.

Erforderliche Verminderung N₂O-Emission
[kg N km⁻² a⁻¹]



^a KSG in der Fassg. v. 18. August 2021. In der Neufassung des KSG (v. 17.05.2024) wurden die Sektor-spezifischen THG-Minderungsziele aufgehoben; diese Änderung konnte im vorliegenden Bericht nicht mehr berücksichtigt werden.

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Eckhoff; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

5.5 Fazit und Anmerkungen

- Die Anforderung an die Minderung der N₂O-Emissionen werden im vorliegenden Ansatz mit jeweils einem einheitlichen Prozentsatz für den Sektor Landwirtschaft und die übrigen fünf Sektoren, das heißt linear auf die Kreise verteilt. Grundsätzlich ist auch ein alternativer Ansatz zur Regionalisierung für die Landwirtschaft denkbar: für Tierhaltungssysteme und für Anbauverfahren in der Landwirtschaft könnten maximal zulässige spezifische N₂O-Emissionen pro Hektar bzw. pro Tier nach "guter fachlicher Praxis" festgelegt werden. Die Obergrenze der N₂O-Emissionmenge in einem Kreis ergibt sich dann aus den Anbauflächen und Tierzahlen im Kreis, beaufschlagt mit den zulässigen Verfahrensspezifischen N₂O-Emissionen. Dieser Ansatz hätte den Vorteil, dass die Obergrenzen nicht auf den Status-quo der N₂O-Emissionen zurückgehen, sondern aus normativen Vorgaben einer N₂O-verlustarmen Landwirtschaft abgeleitet würden. Den Autor*innen sind allerdings keine Veröffentlichungen bekannt, in denen die "gute fachliche Praxis" der Tierhaltung bzw. der N-Düngung in Bezug auf die Höhe der damit verbundenen N₂O-Emissionen beschrieben wird.

- Von Mathivanan et al. (2021) wurden aus der Auswertung von Feldversuchen in Deutschland neue Faktoren für die direkten N_2O -Emissionen aus Pflanzenbau und N-Düngung ermittelt. Die neuen Faktoren sind für vier Klimazonen in Deutschland differenziert und liegen niedriger als der bisher verwendete IPCC-Emissionsfaktor. Diese neuen Faktoren werden vom Thünen-Institut für das Nationale Emissionsinventar ab Berichtsjahr 2020 zugrunde gelegt und werden auch in der Berechnung von Dreisbach et al. (in Vorbereitung) verwendet. Dadurch wird die THG-Emission aus der Landwirtschaft in Deutschland um rund 8,6 % (Mathivanan et al. 2021) entsprechend 5,7 Mio. t CO_2 -Äq. bzw. 21,5 kt N_2O -N geringer berechnet. Die inzwischen erfolgte Änderung der Emissionsfaktoren der landwirtschaftlichen Böden führt zu einem verringerten Anteil der N_2O -Emissionen an der THG-Summe (ca. 23 % für 2023). Da diese Verringerung im vorliegenden Projekt nicht berücksichtigt werden konnten, handelt es sich bei den hier ermittelten Zahlen um ein sehr konservatives Ergebnis. Zudem war im KSG (v. 18. August 2021) nicht geregelt, wie eine derartige scheinbare, ausschließlich methodisch bedingte THG-"Emissionsminderung" im Hinblick auf die gesetzlich festgelegten zulässigen Jahresemissionsmengen zu behandeln ist. Eine Stellungnahme von UBA und Thünen-Institut (Biewald et al. 2022) weist auf diese Problematik hin; in der Novelisierung des KSG in 2024 (v. 17. Mai 2024) wird dieser Punkt jedoch nicht geregelt.
- In Abbildung 31 ist die erforderliche Verminderung der N_2O -Emissionen auf der Ebene der Kreisregionen dargestellt. Aus der Auswertung des Landbedeckungsmodells Deutschland (LBM-DE 2018) ist der Anteil Landwirtschaftsfläche (LF) auch für jede Rasterzelle des GeoGitterDE bekannt. Die Minderungsvorgabe für die Landwirtschaft, bezogen auf die 1 km²-Fläche einer Rasterzelle, variiert mit dem Anteil der LF in den Rasterzellen. Damit könnte die erforderliche Emissionsminderung insgesamt (alle Sektoren) auch mit räumlich differenzierten Werten für die Rasterzellen des GeoGitterDE dargestellt werden, worauf aus Gründen der Übersichtlichkeit jedoch verzichtet wurde.

6 Schutzgut Vegetation - Ammoniak-Konzentration (Luft)

6.1 Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren

Qualitätsziel

NH₃-Critical Level (NH₃-Konzentration im Jahresmittel):

- ▶ generell maximal 3 µg NH₃ m⁻³ Luft (Qualitätsziel für höhere Pflanzen);
- ▶ max. 1 µg NH₃ m⁻³ Luft als Qualitätsziel für N-empfindliche Flechten und Moose (Kryptogamen) (gem. Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks, and Trends - Update 2024. CLRTAP 2024).

Wirkungsindikator

NH₃-Konzentration (Atmosphäre).

Emission

NH₃-Emissionen (in die Atmosphäre).

Datengrundlagen

- ▶ Karte der N-empfindlichen Ökosystemtypen (Schlutow et al. 2018)
- ▶ Karte NH₃-Konzentration (PINETI-4, Kranenburg et al. 2024; Jahr 2019)
- ▶ Karte NH₃-Emissionen (GRETA; Jahr 2019).

6.2 Methodik

1. Ermittlung des Critical Levels auf Kreisebene für Ökosysteme, die von N-empfindlichen Flechten und Moosen (Kryptogamen) charakterisiert werden

Im Rahmen des UBA-Projekts zur Ermittlung von Critical Loads für die Berichterstattung Deutschlands an die UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) wurde eine deutschlandweite Karte der N-empfindlichen Ökosystemtypen erarbeitet, basierend auf der BERN-Datenbank (Bioindication for Ecosystem Regeneration towards Natural conditions) (Schlutow et al. 2018, Schlutow et al. 2024; s. Kapitel 2.2). Die Einstufung der Pflanzengesellschaften wurde gegenüber früheren Versionen der BERN-Datenbank überprüft, da die Datenbank seit dem ICP Mapping Manual (CLRTAP 2024) weiterentwickelt wurde und die Empfindlichkeiten der Pflanzen und Flechten (gem. Literaturauswertungen) neu zugeordnet wurden.

Die Karte der N-empfindlichen Ökosystemtypen (Schlutow et al. 2018) dient als Grundlage, um das (z. T. potenzielle) Vorkommen N-empfindlicher Flechten und Moose (Kryptogamen) direkt auszulesen und jeder Kreisregion zuzuordnen. Da Flechten und Moose sehr unterschiedlich auf N-Einträge reagieren, werden nicht alle Kryptogamen-Vorkommen betrachtet, sondern die N-empfindlichen Arten ausgewählt. Dies geschieht mithilfe der in der BERN-Datenbank hinterlegten Empfindlichkeiten der Arten, basierend auf deren Empfindlichkeit gegen N-Einträge.

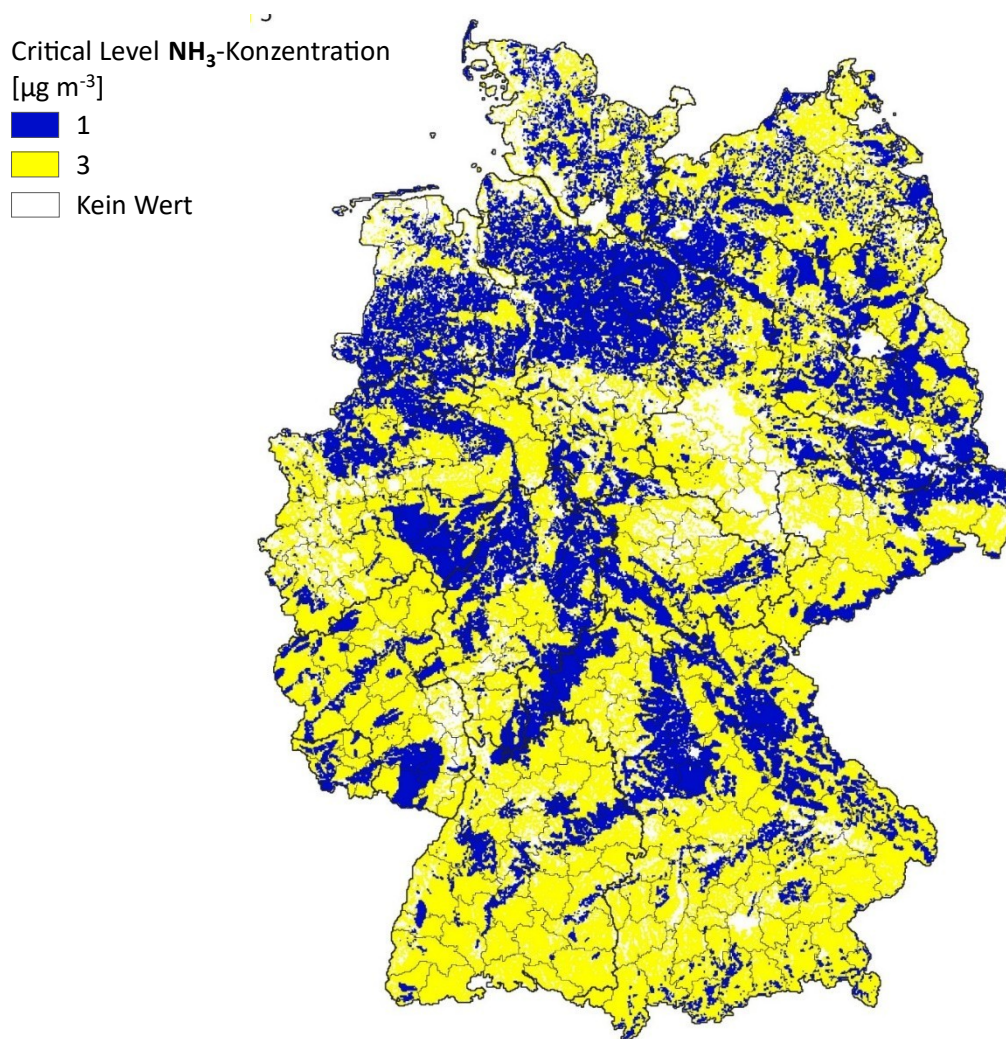
Während beispielsweise in Peterson et. al. (2003) bereits verbale Angaben zur Empfindlichkeit der meisten deutschen Moose und Flechten hinterlegt sind, existieren bisher keine Critical Level für Ammoniak für alle Flechten bzw. Moosarten, weshalb zur Bestimmung der Empfindlichkeit auf die Critical Loads zurückgegriffen wird. Dazu wurde die Empfindlichkeit von Pflanzengesellschaften gegen Stickstoffeinträge in das Sickerwasser mit den unteren Grenzen der empirischen Critical Load (für das Projekt mit updates der empirischen CL von Bobbink et al. 2022) ermittelt,

indem zuerst die kritischen Austragsraten mit dem Sickerwasser (N_{le}) errechnet wurden und diese dann durch die Regionalklima-typischen Sickerwasserraten (der jeweiligen hinterlegten Feldstudien) geteilt wurden. Jede behandelte Pflanzengesellschaft kommt dabei nur in einem Klimaregionaltyp vor, sodass die ermittelten kritischen Konzentrationen für jede Pflanzengesellschaft eindeutig sind. Dieses Vorgehen deckt sich mit der Ermittlung schwedischer $N_{crit(phyto)}$ in Tabelle 5.5 des Manual ICP Modelling & Mapping (CLRTAP 2024). Da etwa 60 % des N-Eintrages ins Sickerwasser aus Ammoniak stammt (Kranenburg et al. 2024, S. 28), wird nun für dieses Projekt rückbezüglich angenommen, dass hohe bzw. niedrige N_{crit} -Werte gleichbedeutend mit hoher bzw. niedriger Empfindlichkeit gegenüber Ammoniak-Immissionen sind.

Dabei werden alle Pflanzengesellschaften als empfindlich eingestuft, deren kritische N-Konzentration im Sickerwasser kleiner oder gleich 2 mg N L^{-1} (im Jahresdurchschnitt) ist (s. Tabelle 38, Anhang A.6). Kommt in diesen Pflanzengesellschaften mindestens eine Flechten- oder Moosart als charakteristische bzw. hochstete Art vor, wird, der Critical Level NH_3 auf $1 \text{ } \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft festgelegt. 14 Flechtenarten wurden so als empfindlich eingestuft und 34 Moosarten mit diesem Critical Level versehen; aufgrund von Überlappungen sind insgesamt 36 Pflanzengesellschaften mit einem Critical Level von $1 \text{ } \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft ausgezeichnet (s. Tabelle 38, Anhang A.7).

Alle Rasterzellen des GeoGitterDE, in denen mindestens eine empfindliche Pflanzengesellschaft vorkommt, werden als empfindlich eingestuft; für Rasterzellen mit Vorkommen von weniger empfindlicher Vegetation wird der Critical Level auf $3 \text{ } \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft gesetzt, Rasterzellen ohne einen Critical Level-Wert für die Vegetation bleiben ohne Wert (Abbildung 32).

Abbildung 32: Critical Level der NH_3 -Konzentration in der Luft (Jahresmittel) der Pflanzengesellschaften in Deutschland^a (n. BERN-Datenbank, Schlutow et al. 2024)



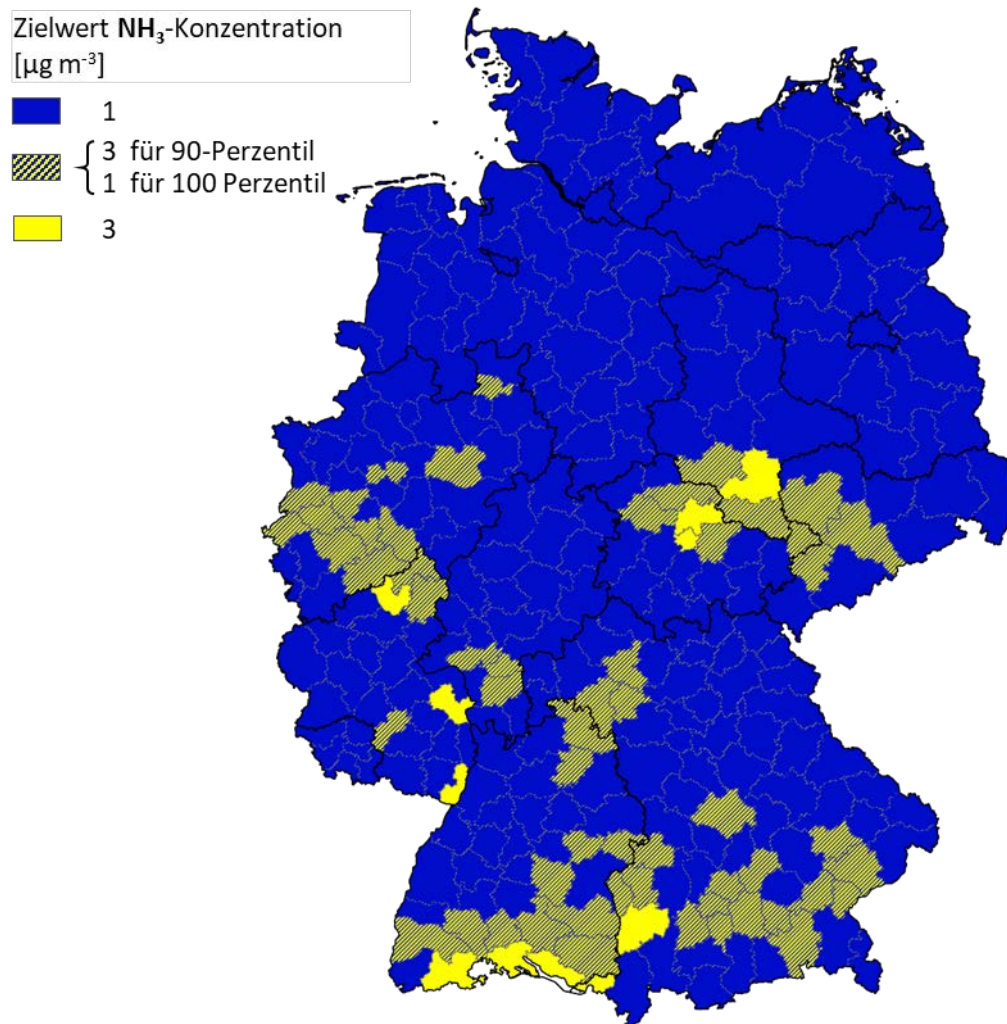
^a 1 km x 1 km Rasterzellen des GeoGitterDE (BKG 2020)

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Vorkommen von empfindlichen Pflanzengesellschaften sind nahezu überall in Deutschland zu finden, regionale Schwerpunkte treten insbesondere in Norddeutschland, Brandenburg und in einigen Mittelgebirgen auf.

Anschließend werden die Häufigkeiten der Rasterzellen mit Vorkommen einer empfindlichen Pflanzengesellschaft in den Kreisregionen ausgewertet. Sind $\geq 10\%$ der Rasterzellen (Anforderungsniveau 90-Perzentil) in einer Kreisregion als empfindlich eingestuft, dann wird für die gesamte Kreisregion ein Qualitätsziel von $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft festgesetzt (Abbildung 33).

Abbildung 33: Qualitätsziele der NH_3 -Konzentration (Anforderungsniveau 90-Perzentil) auf der Ebene der Kreisregionen.



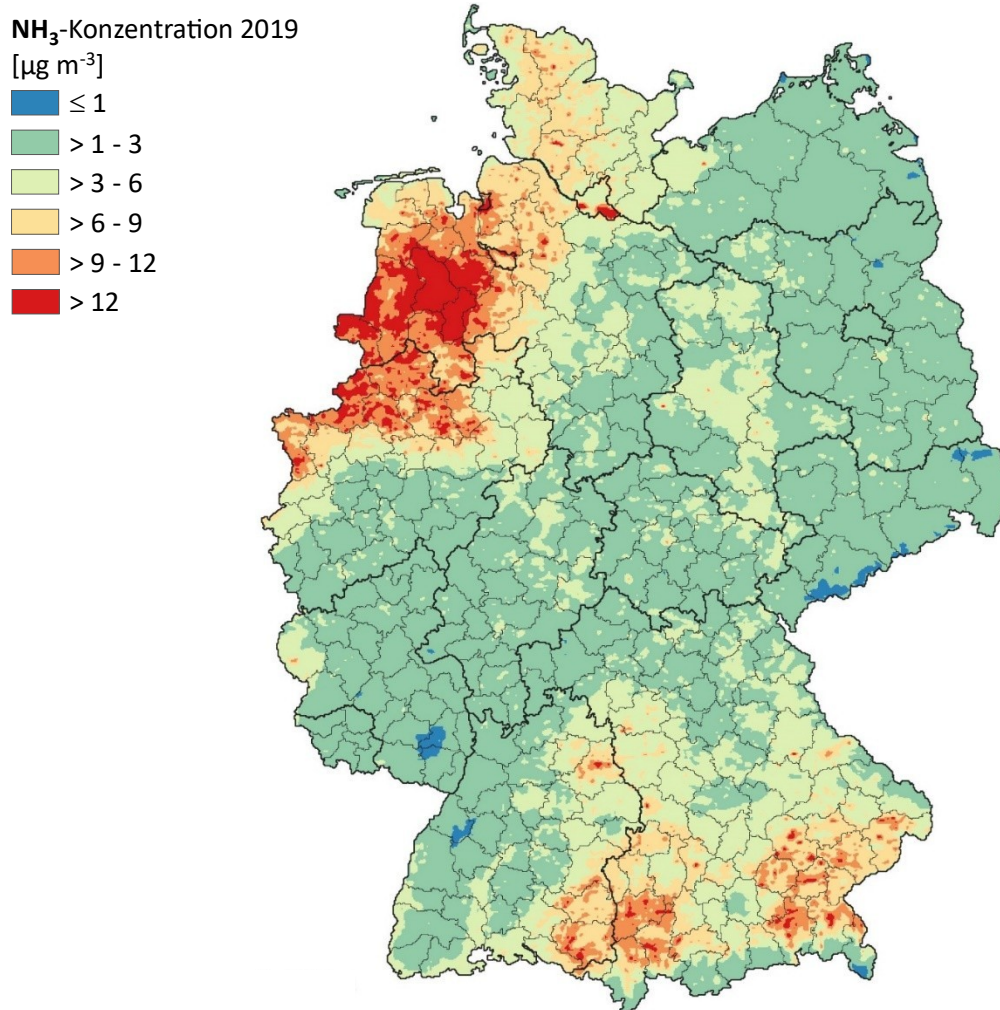
Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Eckhoff; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Von den 302 Kreisregionen wurde lediglich 67 ein Qualitätsziel von $3 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft zugeordnet (in diesen Kreisregionen tritt in weniger als 10 % der Rasterzellen empfindliche Vegetation auf), für die übrigen 235 Kreisregionen beträgt das Qualitätsziel $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft. Wenn ein maximales Schutzniveau (100-Perzentil; vgl. Kapitel 2.2) vorgegeben würde, das heißt eine Kreisregion würde insgesamt als empfindlich eingestuft, wenn auch nur in einer einzigen Rasterzelle eine empfindliche Pflanzengesellschaft vorkommt, dann würde der Wert von $3 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft lediglich elf Kreisregionen zugeordnet.

2. Rückrechnung der kritischen NH_3 -N-Konzentration auf die NH_3 -N-Emission auf Kreisebene

Der PINETI-4-Datensatz enthält NH_3 -Konzentrationen in der Modellhöhe 2,5 m über der Bodenoberfläche mit räumlicher Auflösung von 2 km x 2 km. Der Jahresmittelwert der NH_3 -Konzentrationen (Ist-Situation 2019) liegt in weiten Bereichen Deutschlands unter 3 $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft (Abbildung 34).

Abbildung 34: NH_3 -Konzentration (Jahresmittel) in Deutschland^a 2019 (PINETI-4)



^a 1 km x 1 km Rasterzellen des GeoGitterDE (BKG 2020)

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

In den Regionen mit einer hohen Viehdichte im Nordwesten und Südosten Deutschlands treten allerdings auch deutlich höhere Werte auf, die den Critical Level von 1 $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft um mehr als das Zehnfache überschreiten

GRETA stellt räumlich aufgelöste Daten (1 km x 1 km) der Emissionen von NH_3 bereit. Für die Ermittlung der Überschreitung der zulässigen NH_3 -Emissionen wurden die Werte für die Kreisregionen gemittelt; die Kartendarstellung zeigt Abbildung 5 (untere Karte).

Analog zur NH_x -Deposition ist die NH_3 -Konzentration in der Atmosphäre an einem Ort nicht nur auf die NH_3 -Emissionen im Nahbereich zurückzuführen, sondern wird auch vom Ferntransport von NH_3 über größere Strecken bestimmt. Die Quellen-Senken-Beziehungen wurden aus dem PINETI-4-Projekt (Kranenburg et al. 2024) für das hier vorliegende Projekt als Source-Receptor-

Tabellen (S-R-Tables) der NH_3 -Konzentration auf der Ebene der Bundesländer berechnet. Die S-R-Table stellt dar, welcher Anteil der NH_3 -Konzentrationen in einem Bundesland (als Rezeptor) aus dem Bundesland selbst, aus den übrigen Ländern und aus dem Ausland (als Quellen) stammt (s. Anhang A.6). Auf Basis der S-R-Table lässt sich damit eine absolute Masse von NH_3 in der Zielluftschicht der Atmosphäre berechnen, die in jedem Bundesland aus den verschiedenen Quellregionen stammt.

Dafür wird zunächst die Konzentration (IST-Zustand) in der Zielluftschicht des Bundeslandes mit dem Volumen der Luftmasse über dem Bundesland (BL) verrechnet. Das Volumen ergibt sich aus der Fläche des Bundeslandes (in m^2) multipliziert mit der Höhe der Zielluftschicht, die mit 1 m Mächtigkeit (von 2 m bis 3 m über der Bodenoberfläche gemäß der Modellhöhe 2,5 m des PINETI-4-Datensatzes) angenommen wird:

$$Masse_{\text{NH}_3-\text{N}} = \text{NH}_3_{\text{Konz.}} * \text{Fläche}_{\text{BL}} * \frac{14}{17} * 10^{-9} \quad \text{Gl. (17)}$$

mit

$Masse_{\text{NH}_3-\text{N}}$	[kg NH_3 -N pro Bundesland]	Masse an NH_3 -N die über einem Bundesland in der Zielluftschicht vorgefunden wird
$\text{NH}_3_{\text{Konz.}}$	[μg NH_3 m^{-3}]	Jahresdurchschnittskonzentration Ammoniak in der Zielluftschicht eines Bundeslandes
$\text{Fläche}_{\text{BL}}$	[m^2]	Fläche eines Bundeslandes
10^{-9}		Dimensionsumrechnung μg in kg.

Die zulässige absolute Menge an NH_3 (in der Zielluftschicht) in einem Bundesland zur Einhaltung der NH_3 -Critical Level (CLvl) errechnet sich dann als Summe der NH_3 -Massen (errechnet für die Kreisregionen (KR) analog zu Gleichung Gl. (17)

$$\text{Zulässige Menge}_{\text{BL}} = \sum \text{CLvl}_{\text{KR}} * \text{Fläche}_{\text{KR}} * \frac{14}{17} * 10^{-9} \quad \text{Gl. (18)}$$

mit

$\text{Zulässige Menge}_{\text{BL}}$	[kg NH_3 -N pro Bundesland]	Menge NH_3 -N die über einem Bundesland vorhanden sein darf, damit die Critical Level der Kreisregionen nicht überschritten werden
CLvl_{KR}	[μg NH_3 m^{-3}]	Kritische Ammoniak-Konzentration in der Zielluftschicht, zum Schutz der Vegetation in den Kreisregionen
$\text{Fläche}_{\text{KR}}$	[m^2]	Fläche der Kreisregion
KR		Summation über die Kreisregionen im Bundesland

Die Differenz zwischen den zulässigen Emissionsmengen und den Ist-Mengen entspricht dem Minderungsbedarf bzw. der Überschreitung der Obergrenze. Dieser Minderungsbedarf wird entsprechend den S-R-Beziehungen aus PINETI (siehe Abbildung 61, Anhang A.6) auf die Quellregionen verteilt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass gemäß S-R-Table nur ein gewisser Anteil dieser NH_3 -Menge aus Deutschland stammt. Die Berechnungen erfolgen mit der Prämisse, dass die erforderliche NH_3 -Konzentrationsminderung ausschließlich durch nationale Emissionsminderungen in Deutschland erreicht wird (im Unterschied zum Schutzgut Terrestrische Ökosysteme, s. Kapitel 2.2). Mit diesem Ansatz ergibt sich aus der Obergrenze (Spalte 3 in Tabelle 16) abzüglich dem Anteil, der nach den S-R-Tables aus dem Ausland stammt und unveränderlich ist (Spalte 4 in Tabelle 16), diejenige zulässige Emissionsmenge, die aus deutschen Quellen stammt (Spalte 5 in Tabelle 16).

Tabelle 16: **NH₃-N-Menge in der Atmosphäre^a (Bundesländer, Jahr 2019), die gemäß S-R-Tables aus Deutschland und aus dem Ausland stammt, sowie zulässige Emissionsmengen (für Anforderungsniveau 90-Perzentil^b).**

Bundesland	Ist-Wert	NH ₃ -N-Menge ^a [kg] pro Bundesland			Zulässige Emissionsmengen aus den Bundesländern (als Quelle)
		Zulässige Emissionsmenge (90-Perzentil ^b) insgesamt	davon aus dem Ausland	davon aus DE = zur Einhaltung des Qualitätsziels	
Spalte	2	3	4	5	6
Brandenburg	43,63	24,59	11,30	13,29	10,32
Berlin	1,21	0,74	0,33	0,41	0,24
Baden-Württemberg	93,94	54,19	22,08	32,11	29,77
Bayern	234,80	87,28	41,91	45,37	51,14
Bremen	2,44	0,27	0,25	0,02	0,16
Hessen	34,58	20,43	8,48	11,95	10,71
Hamburg	3,67	0,63	0,36	0,27	0,54
Mecklenburg-Vorp.	35,72	19,73	8,44	11,29	7,00
Niedersachsen	237,33	39,72	36,09	3,63	14,47
Nordrhein-Westfalen	134,24	42,91	32,23	10,68	15,03
Rheinland-Pfalz	27,91	23,08	11,36	11,73	9,10
Schleswig-Holstein	62,30	13,54	8,08	5,46	7,25
Saarland	3,31	2,19	1,78	0,41	0,67
Sachsen	23,60	23,77	7,75	16,02	10,03
Sachsen-Anhalt	43,65	24,24	7,76	16,48	15,17
Thüringen	26,49	20,84	5,90	14,94	12,47
Deutschland	1008,82	398,15	204,10	194,05	194,05

^a In der Luftschicht von 2 bis 3 m über der Bodenoberfläche.

^b Qualitätsziel (Anforderungsniveau 90-Perzentil): für Kreisregionen mit Vorkommen empfindlicher Vegetation in ≥ 10 % der Rasterzellen gilt das Qualitätsziel $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft, für alle übrigen $3 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft (s. Kapitel 6.1, Schritt 1 und Abbildung 33).

Die zulässigen Emissionsmengen in jedem Bundesland (Spalte 6 der Tabelle 16) ergeben sich durch Verteilung der zulässigen Gesamtmenge zur Einhaltung des Qualitätsziels, die aus dem Inland stammt (für Anforderungsniveau 90-Perzentil; Spalte 5) auf die einzelnen Bundesländer gemäß der Quelle-Senken-Beziehungen zwischen den Bundesländern (S-R-Tabelle, s. Tabelle 39, Anhang A.6). Die daraus resultierende zulässige Gesamtmenge für jedes Quellenbundesland ist in Tabelle 39 in der letzten Spalte bzw. in Tabelle 16 in Spalte 6 aufgeführt.

3. Ermittlung der erforderlichen Verminderung der NH₃-Emissionen zum Schutz empfindlicher Pflanzenarten

Im nächsten Schritt wird das Verhältnis der NH₃-Emissionen in einem Bundesland (als Quelle) und den in Deutschland bzw. den einzelnen Bundesländern als NH₃-Konzentration erfassten NH₃-Mengen (als Rezeptoren, hier: in der Luftschicht von 2 bis 3 m über dem Boden) (Spalte 4,

Tabelle 17) genutzt, um aus der zulässigen Gesamtmenge für jedes Quellbundesland wieder eine zulässige Emissionsmenge zu errechnen, nach Gl. (19).

$$\text{Verhältnis}_{\text{NH}_3\text{-N}} = \frac{\text{Masse}_{\text{NH}_3\text{-N}}}{\text{Emissionen}_{\text{NH}_3\text{-N}}} \quad \text{Gl. (19)}$$

mit

$\text{Verhältnis}_{\text{NH}_3\text{-N}}$		Verhältnis zwischen den emittierten Mengen und der $\text{NH}_3\text{-N}$ Masse in der Luftschicht von 1 m eines Bundeslandes
$\text{Masse}_{\text{NH}_3\text{-N}}$	[kg $\text{NH}_3\text{-N}$ pro Bundesland]	Masse an $\text{NH}_3\text{-N}$, die über einem Bundesland in der Ziel-luftschicht vorgefunden wird, s. Gl. (17)
$\text{Emissionen}_{\text{NH}_3\text{-N}}$	[kg $\text{NH}_3\text{-N}$ pro Bundesland]	Masse an $\text{NH}_3\text{-N}$, die von einem Bundesland innerhalb eines Jahres emittiert wird

Dazu werden die zulässigen Mengen [kg pro BL] (Spalte 6, Tabelle 16) durch das Verhältnis aus Emission und Menge (Spalte 4 in Tabelle 17) geteilt, nach Gl. (20).

$$\text{Zulässige_Emissionen}_{\text{NH}_3\text{-N}} = \frac{\text{Zulässige_Quellmenge}_{\text{NH}_3\text{-N}}}{\text{Verhältnis}_{\text{NH}_3\text{-N}}} \quad \text{Gl. (20)}$$

mit

$\text{Zulässige_Emissionen}_{\text{NH}_3\text{-N}}$	[kg $\text{NH}_3\text{-N}$ pro Bundesland]	Zulässige $\text{NH}_3\text{-N}$ Emissionen eines Bundeslandes zur Einhaltung der CriticalLevel der Kreisregionen.
$\text{Zulässige_Quellmenge}_{\text{NH}_3\text{-N}}$	[kg $\text{NH}_3\text{-N}$ pro Bundesland]	Zulässige $\text{NH}_3\text{-N}$ Mengen in der Luftschicht von 1 m, zur Einhaltung der Critical Level der Kreisregionen (s. Spalte 6, Tabelle 16)
$\text{Verhältnis}_{\text{NH}_3\text{-N}}$		siehe Gl. (19)

Die daraus resultierenden maximalen Emissionswerte pro Bundesland finden sich in Spalte 6 in Tabelle 17. Aus der Differenz zu den Ist-Emissionen ergibt sich die erforderliche Emissionsminderung (Tabelle 17, Spalten 7 und 8 für das Ziel, 90 % der Flächen [Rasterzellen] mit schutzwürdiger Vegetation zu schützen).

Tabelle 17: Maximal zulässige Emissionen der Bundesländer zur Einhaltung des Qualitätsziels (Anforderungsniveau 90-Perzentil^a).

Bundesland	NH ₃ -Emissionen (Ist)	Als Konzentration über DE erfasst	Verhältnis (Anteil von Ist)	Zulässige Quellmenge (aus Tabelle 16)	Maximal zulässige Emissionen	Erforderliche Emissionsminderung (90-Perzentil) ^a	
	t NH ₃ -N a ⁻¹	kg NH ₃ -N (1 m) a ⁻¹	x 10 ⁻⁶	kg NH ₃ -N a ⁻¹	t NH ₃ -N a ⁻¹	t NH ₃ -N a ⁻¹	%
<i>Spalte</i>	2	3	4	5	6	7	8
Brandenburg	20.316	25,1	1,24	10,32	8.337	11.979	59,0 %
Berlin	444	0,6	1,26	0,24	188	256	57,6 %
Baden-Württemberg	37.682	72,2	1,92	29,77	15.538	22.144	58,8 %
Bayern	93.792	194,2	2,07	51,14	24.697	69.095	73,7 %
Bremen	1.212	2,7	2,21	0,16	71	1.141	94,1 %
Hessen	15.899	25,0	1,57	10,71	6.806	9.093	57,2 %
Hamburg	3.710	4,1	1,11	0,54	486	3.224	86,9 %
Mecklenburg-Vorp.	14.993	18,8	1,26	7,00	5.575	9.418	62,8 %
Niedersachsen	118.705	210,4	1,77	14,47	8.163	110.542	93,1 %
Nordrhein-Westf.	65.982	115,0	1,74	15,03	8.623	57.359	86,9 %
Rheinland-Pfalz	11.914	15,5	1,30	9,10	6.977	4.937	41,4 %
Schleswig-Holstein	41.877	53,3	1,27	7,25	5.697	36.180	86,4 %
Saarland	1.301	1,6	1,24	0,67	541	760	58,4 %
Sachsen	9.059	12,2	1,35	10,03	7.436	1.623	17,9 %
Sachsen-Anhalt	20.615	33,9	1,65	15,17	9.210	11.404	55,3 %
Thüringen	12.119	19,9	1,64	12,47	7.584	4.535	37,4 %
Deutschland	469.620	662,7	1,41	194,05	115.929	353.690	75,3 %

^a Qualitätsziel (Anforderungsniveau 90-Perzentil): für Kreisregionen mit Vorkommen empfindlicher Vegetation in ≥ 10 % der Rasterzellen gilt das Qualitätsziel $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft, für alle übrigen $3 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft (s. Kapitel 6.1, Schritt 1 und Abbildung 33).

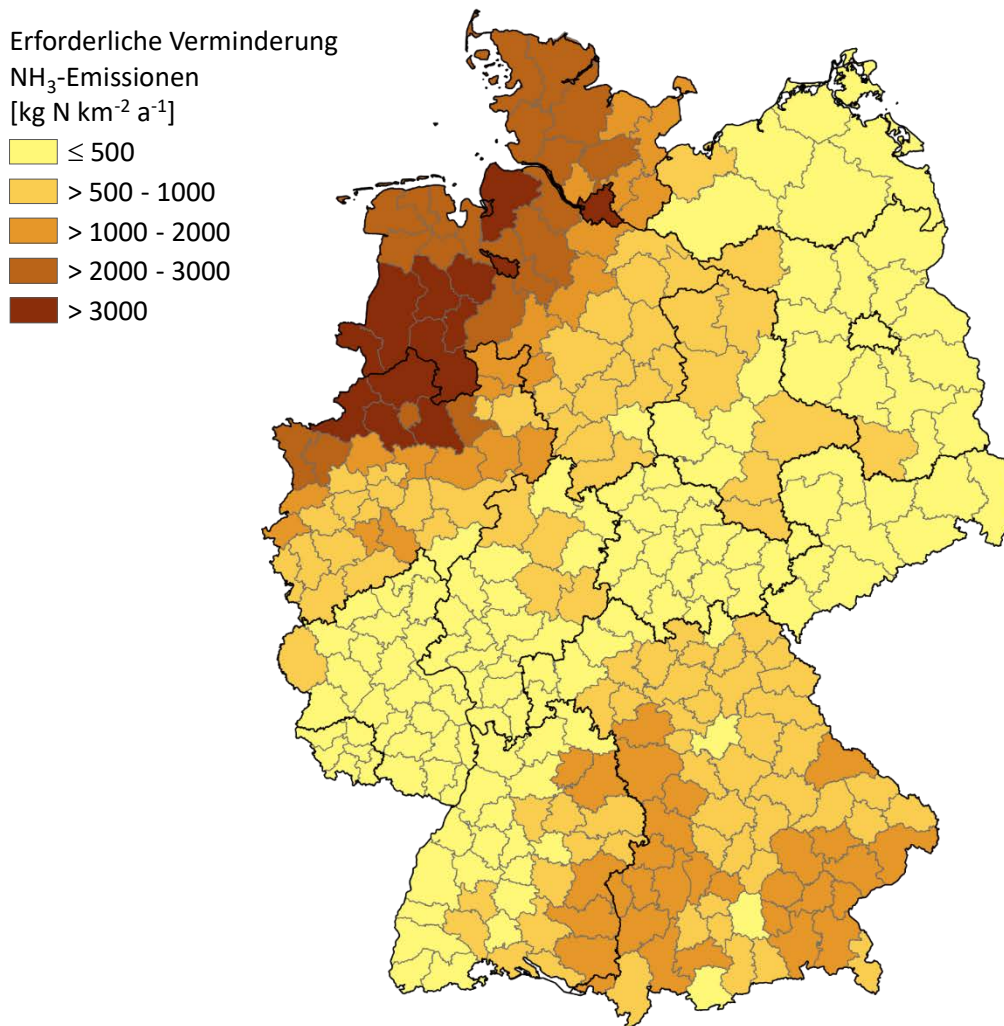
6.3 Ergebnisse

Die erforderlichen prozentualen NH₃-Emissionsminderungen für die einzelnen Bundesländer (Spalte 7, Tabelle 17) zur Einhaltung des Qualitätsziels werden schließlich auf alle Kreisregionen im betreffenden Bundesland übertragen (Abbildung 35). Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf das Qualitätsziel mit Anforderungsniveau 90-Perzentil^a: die zulässige Konzentration von $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft gilt für Kreisregionen mit Vorkommen empfindlicher Vegetation in ≥ 10 % der Rasterzellen. Für Deutschland insgesamt ergibt sich eine erforderliche Verminderung von 353,7 kt NH₃-N, was gegenüber der Emission von 469,6 kt NH₃-N (2019) eine Reduktion um rund 75 % darstellt.

Analog zu den unterschiedlichen Anforderungsniveaus (Qualitätszielen) für das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme (Kapitel 2.2) wurden die erforderlichen NH₃-Emissionsminderungen für Schutzgut Vegetation auch für eine zweite Variante "maximaler Schutz" (100-Perzentil) berechnet: die zulässige Konzentration von $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft gilt bereits dann für eine Kreisregion, wenn auch nur in einer einzigen Rasterzelle empfindliche Vegetation auftritt. Die Ergebnisse für

dieses Anforderungsniveau "100-Perzentil" werden nicht in die abschließenden Ergebnisse in Kapitel 9 übernommen, sind aber der Vollständigkeit halber in Tabelle 40, Tabelle 41 und Abbildung 62 (Anhang A.7) dargestellt. Die Einzelwerte (für beide Anforderungsniveaus) für die Kreisregionen sind in Tabelle 42 (Anhang A.7) aufgeführt.

Abbildung 35: Erforderliche Verminderung der NH₃-Emissionen in den Kreisregionen (2019) zur Einhaltung des Qualitätsziels^a (Anforderungsniveau 90-Perzentil)^b der NH₃-Konzentration.



^a 1 oder 3 µg m⁻³, s. Abbildung 33

^b Qualitätsziel (Anforderungsniveau 90-Perzentil): für Kreisregionen mit Vorkommen empfindlicher Vegetation in ≥ 10 % der Rasterzellen gilt das Qualitätswert 1 µg NH₃ m⁻³ Luft, für alle übrigen 3 µg NH₃ m⁻³ Luft (s. Kapitel 6.1, Schritt 1 und Abbildung 33).

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

NH₃-Emissionen beeinträchtigen sowohl das Schutzgut Vegetation als auch das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme (Kapitel 2). Für die Berechnung der nationalen Obergrenze der NH₃-Emission werden für jede Kreisregion die beiden Werte der zulässigen NH₃-Emissionen miteinander verglichen, die sich aus den beiden Schutzgütern ergeben. Für die Obergrenze für Deutschland insgesamt wird dann der *niedrigere* dieser beiden Werte bzw. der *höhere* der beiden Werte der erforderlichen Verminderung der NH₃-Emission herangezogen; für 192 Kreisregionen resultiert die Minderungserfordernis aus dem Schutzgut Vegetation und für 110 Kreisregionen aus Schutzgut Terrestrische Ökosysteme.

6.4 Fazit und Anmerkungen

- Für das Schutzgut Vegetation, also die Einhaltung der Critical Level, ergibt sich deutschlandweit mit 353,7 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ eine etwas höhere Minderungsanforderung als für das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme mit 326,2 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ (s. Kapitel 2). Dies zeigt sich auch darin, dass für 192 Kreisregionen das Schutzgut Vegetation zu einer höheren Minderungserfordernis der NH_3 -Emissionen führt im Vergleich zu 110 Kreisregionen, für die das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme die höhere Minderungsanforderung ergibt (s. Tabelle 44, Anhang A.7). Diese Verteilung ist allerdings wesentlich durch den Unterschied in der Methodik bedingt: während für das Schutzgut Vegetation (dieses Kapitel) die Einhaltung der Critical Level ausschließlich durch Verminderungen in Deutschland erreicht werden soll und kann, ist dies für das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme nicht möglich. Die Berechnungen (s. Kapitel 2) haben gezeigt, dass mit einer Minderung der NH_3 -Emissionen ausschließlich in Deutschland das Qualitätsziel für die Terrestrischen Ökosysteme nicht erreicht werden könnte; daher wurde dort von einer Minderung im Inland und im Ausland ausgegangen.

Würde man analog dazu auch für das Schutzgut Vegetation eine Minderung im Inland und im Ausland vorsehen, dann würde sich die erforderliche Verminderung zur Einhaltung der Critical Level in den Kreisregionen gegenüber den jetzt ausgewiesenen Werten mehr oder weniger deutlich verringern. Es ist zu vermuten, dass dann mit der Erfüllung des Qualitätsziels für Terrestrische Ökosysteme gleichzeitig auch die Vegetation ausreichend geschützt wäre, da die Minderungsanforderungen nach den beiden Ansätzen bereits jetzt nahe bei einander liegen.

- Für die Bundesländer (respektive die Kreise bzw. Kreisregionen) ergeben sich sehr unterschiedliche Minderungsanforderungen. In Sachsen, Thüringen und Rheinland-Pfalz müssten die Emissionen um weniger als 50 % (17,9 %, 37,4 % und 41,4 %) reduziert werden, während alle übrigen Länder deutlich über 50 % vermindern müssen, wobei auf die Bundesländer Schleswig-Holstein, Hamburg, Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Bremen mit Werten zwischen rund 86 % und 94 % die größten Minderungen entfallen. In wieweit Emissionsminderungen in diesem Umfang technisch und/oder politisch umsetzbar sind, war nicht Gegenstand des vorliegenden Projekts.
- Die Source-Receptor-Tables zur Ermittlung des Minderungsbedarfs liegen derzeit nur auf der Ebene der Bundesländer vor, dementsprechend kann auch der Minderungsbedarf nur für die Ebene der Bundesländer ermittelt werden. Im Prinzip wäre es aus fachlicher Sicht sinnvoll, S-R-Tables mit einer räumlichen Auflösung für Kreisregionen zu verwenden, die allerdings im Zeitrahmen des Vorhabens nicht bereitgestellt werden konnten.
- Der PINETI-4 Datensatz verdeutlicht die große Spannbreite der NH_3 -Konzentration im Bundesgebiet (Abbildung 34). Eine Bundesland-bezogene Betrachtung kann diese Variabilität nicht ausreichend abbilden. Eine Minderung der NH_3 -Emissionen in räumlicher Nähe zu empfindlichen Ökosystemen hat (mutmaßlich) eine größere Wirkung für den Schutz der Vegetation als bei weiter entfernten Emissionsquellen. Daher sollten entsprechende Minderungsmaßnahmen bevorzugt im Nahbereich von empfindlichen Ökosystemen durchgeführt werden. Bei höherer räumlicher Auflösung der Quellen-Senken-Beziehungen würde wahrscheinlich die Minderungsanforderung für eine Reihe von Kreisregionen geringer ausfallen als mit dem derzeit verwendeten Ansatz. Für die Konzeption von konkreten Minderungsmaßnahmen sollten die Lagebeziehungen zwischen Emissionsquellen und empfindlichen Ökosystemen berücksichtigt werden.

7 Schutzgut Menschliche Gesundheit - Stickstoffdioxid-Konzentration

7.1 Qualitätsziel und Wirkungsindikatoren

Qualitätsziel

WHO-Richtwert und EU-Beurteilungsschwelle der NO₂-Konzentration von 10 µg NO₂ m⁻³ Luft im Jahresmittel (WHO 2021).

Die neue WHO-Luftgüteleitlinie basiert auf einer systematischen Bestandsaufnahme der vorliegenden wissenschaftlichen Evidenz über die gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen (WHO 2021). Die Ergebnisse zeigen, dass sich Luftschadstoffe auch unterhalb der bisher empfohlenen Richtwerte nachteilig auf die Gesundheit auswirken. Aufgrund dessen empfiehlt die WHO neuerdings teilweise deutlich strengere Richtwerte, für deren Erreichung die WHO zum Teil Zwischenziele festgelegt hat. Die neuen WHO-Richtwerte bilden eine wesentliche Grundlage für die Überarbeitung der europäischen Richtlinie zur Luftqualität (2008/50/EG) und der dort festgelegten Grenz- bzw. Zielwerte (UBA 2022)¹¹.

Wirkungsindikator

NO₂-Konzentration in der Außenluft (Jahresmittelwert).

Emission

NO_x-Emission.

Datengrundlagen

- Karte NO₂-Konzentration in der Außenluft 2020 in Deutschland (modellerte Jahresmittel der Konzentration; 2,4 km x 2,4 km Daten gem. Optimaler Interpolation OI; UBA 2023a).
- Karte NO_x-Emissionen 2020 (GRETA; UBA) (1 km x 1 km).

7.2 Methodik

Der Geodatensatz zu den NO₂-Konzentrationen stammt aus dem RCG-Modell mit Optimierter Interpolation (OI; UBA 2023a). Aufgrund der Methodik können Konzentrationsspitzen, die z. B. an Messstationen in direkter Straßennähe auftreten, nicht dargestellt werden. Die Jahresmittelwerte werden auf eine Gitterzelle verteilt, sodass diese lediglich den urbanen und ländlichen Hintergrund abbilden können.

Die Geodaten lagen zunächst in Rasterkarten mit unterschiedlichem Ursprung vor, d. h. verschoben gegenüber dem im vorliegenden Projekt als Standard verwendeten GeoGitterDE. Die Werte der Ausgangskarte wurden im GIS in das GeoGitterDE übertragen, indem in den Rasterzellen des GeoGitterDE die NO₂-Konzentration der Ausgangszellen mit der größten Überlappung übernommen wurden (Abbildung 36).

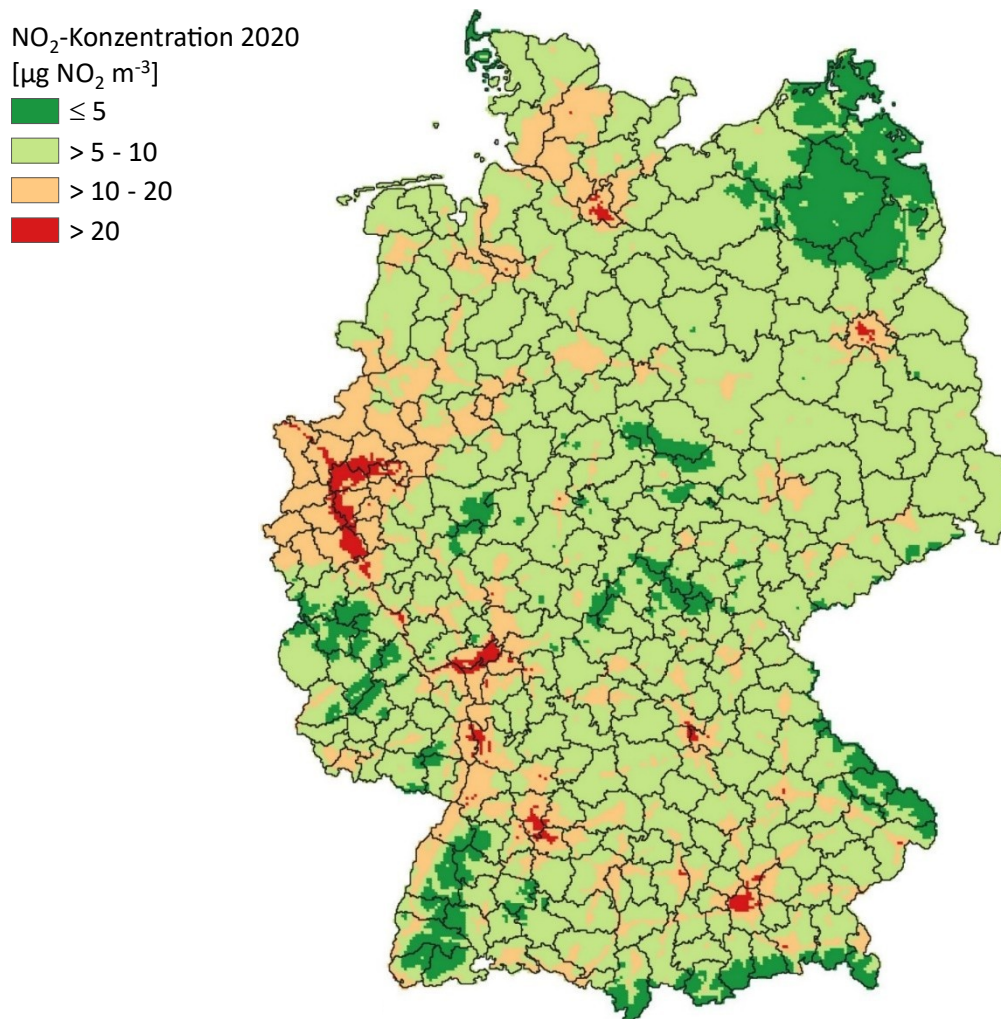
GRETA liefert räumlich aufgelöste Daten zur Emission von NO_x (Abbildung 37), aggregiert für die Kreisregionen).

¹¹ Am 24. April 2024 stimmte das EU-Parlament für den „Vorschlags für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa“ (<https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-revision-of-eu-ambient-air-quality-legislation>), in welchem für die NO₂-Jahresdurchschnittskonzentration ein Limit von 20 µg m⁻³ bis 2030 vorgesehen ist (https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2ae4a0cc-55f8-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0013.02/DOC_2&format=PDF). Dieser Wert konnte im regioNat Projekt nicht mehr berücksichtigt werden.

Für die Ermittlung der erforderlichen Verminderung der NO_x -Emission, um den WHO-Richtwert von $10 \mu\text{g NO}_2 \text{ m}^{-3}$ Luft (Jahresmittel) der NO_2 -Konzentration einzuhalten, wurde der Zusammenhang zwischen NO_x -Emission und NO_2 -Konzentration ermittelt. Für diesen Zusammenhang wurden verschiedene Regressionsfunktionen zwischen den beiden Größen berechnet und getestet.

In einem ersten Schritt wurde der Zusammenhang auf Ebene der Rasterzellen getestet. Auf dieser Ebene des GeoGitterDE ($n = 361.470$ Punkte) besteht keine (signifikante) Korrelation zwischen der NO_x -Emission und der NO_2 -Konzentration; Abbildung 63 (Anhang A.8) zeigt das Ergebnis.

Abbildung 36: Modellierte Jahresmittelwerte der NO_2 -Konzentration^a in der Außenluft in Deutschland^b 2020 nach Optimaler Interpolation (OI; UBA 2023a)



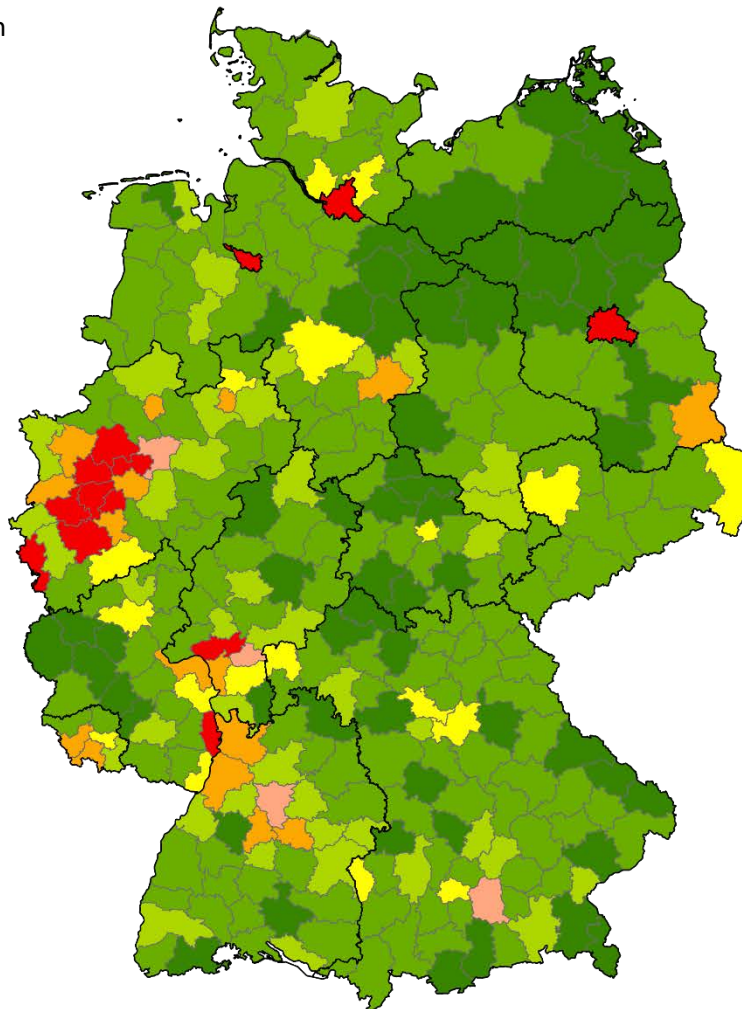
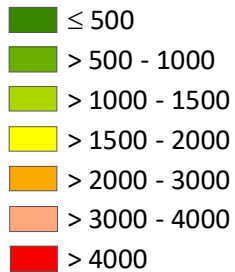
^a Der WHO-Richtwert zum Schutz der menschlichen Gesundheit beträgt $10 \mu\text{g NO}_2 \text{ m}^{-3}$ Luft, Minderungsbedarf besteht in den orangen und roten Bereichen.

^b 1 km x 1 km Rasterzellen des GeoGitterDE (BKG 2020).

Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Abbildung 37: NO_x-Emissionen in den Kreisregionen in Deutschland 2020 (GRETA).

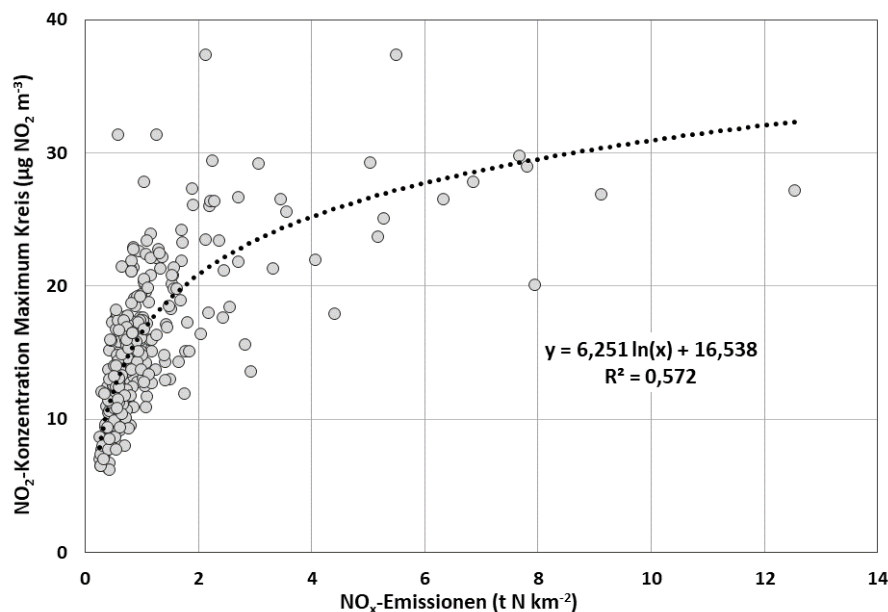
NO_x-Emission 2020 in
den Kreisregionen
[kg N km⁻² a⁻¹]



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von GRETA, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

In einem zweiten Schritt wurden die Regressionen zwischen NO_x-Emission und der maximalen NO₂-Konzentration (i.e. Maximum aller NO₂-Hintergrundkonzentrationen, Jahresmittel 2020, in einer Kreisregion) auf der Ebene der Kreisregionen berechnet. Abbildung 38 zeigt die gewählte Regression zwischen dem Maximum der NO₂-Konzentration (jew. Jahresmittel 2020) und der NO_x-Emission (im Mittel der Kreisregion).

Abbildung 38: Regression zwischen der jährlichen NO_x-Emission (gemittelt über die Fläche der Kreisregionen) und der maximalen NO₂-Konzentration in der Außenluft (Jahresmittel 2020) in den Kreisregionen.



Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE).

Aus der Regressionsfunktion in Abbildung 38 kann die zulässige NO_x-Emission pro km² (im Mittel einer Kreisregion) abgeleitet werden, mit der rechnerisch eine NO₂-Konzentration von 10 µg m⁻³ als Maximalwert (des Jahresmittelwert) in einer Kreisregion nicht überschritten wird (Bezugsjahr 2020):

$$\ln(\text{NO}_x\text{-N-Emission}) = (10 - 16,538) / 6,251 = 0,352 \text{ [t N km}^{-2} \text{ a}^{-1}] \quad \text{Gl. (21)}$$

Entsprechend Gleichung Gl. (21) wäre der Maximalwert des Konzentrationsjahresmittels in allen Rasterzellen einer Kreisregionen nicht höher als 10 µg NO₂ m⁻³ Luft, wenn die NO_x-Emissionen im Durchschnitt aller Kreisregionen (bzw. Rasterzellen) 352 kg N km⁻² pro Jahr nicht überschreitet. Minderungsbedarf der NO_x-Emission einer Kreisregion besteht dann, wenn die NO_x-Emission 2020 in einer Kreisregion größer ist als die zulässige Emission, berechnet aus dem Wert von 352 kg N km⁻² a⁻¹ multipliziert mit der Fläche der Kreisregion (in km²). Ist die aktuelle Emissionsmenge in einer Kreisregion (Bezugsjahr 2020) höher als die zulässige Emissionsmenge, aber die maximale NO₂-Konzentration liegt bereits ≤ 10 µg m⁻³, dann wird für diese Kreisregion *keine* Minderungsanforderung berechnet.

Mit diesem Ansatz werden die Konzentrationsspitzen, die in unmittelbarer Nähe zu vielbefahrenen Straßen auftreten können, nicht berücksichtigt. Dies ist der Methodik der Konzentrationsmodellierung mittels Optimaler Interpolation (s.o.) geschuldet, in der die Konzentrationen als Mittelwerte für 2,4 km x 2,4 km große Rasterzellen berechnet werden. Für die Darstellung der Konzentration in einzelnen Straßenzüge ist die Auflösung nicht ausreichend (zur Frage der Exposition der Bevölkerung s. auch Kapitel 7.4).

7.3 Ergebnisse

Die zulässige flächenbezogene NO_x-Emission von 352 kg N km⁻² wird in 250 Kreisregionen überschritten. Die erforderliche Verminderung entspricht der Differenz zwischen der zulässigen NO_x-Emissionsmenge pro Kreisregion (berechnet aus dem Wert von 352 kg N km⁻² multipliziert mit der Fläche der Kreisregionen) und der Ist-NO_x-Emissionsmenge (Jahr 2020). Für Deutschland

insgesamt ergibt sich eine erforderliche Verminderung von 211,0 kt NO_x-N, was gegenüber der Emission von 343,4 kt NO_x-N (2020) eine Verminderung um rund 61 % darstellt.

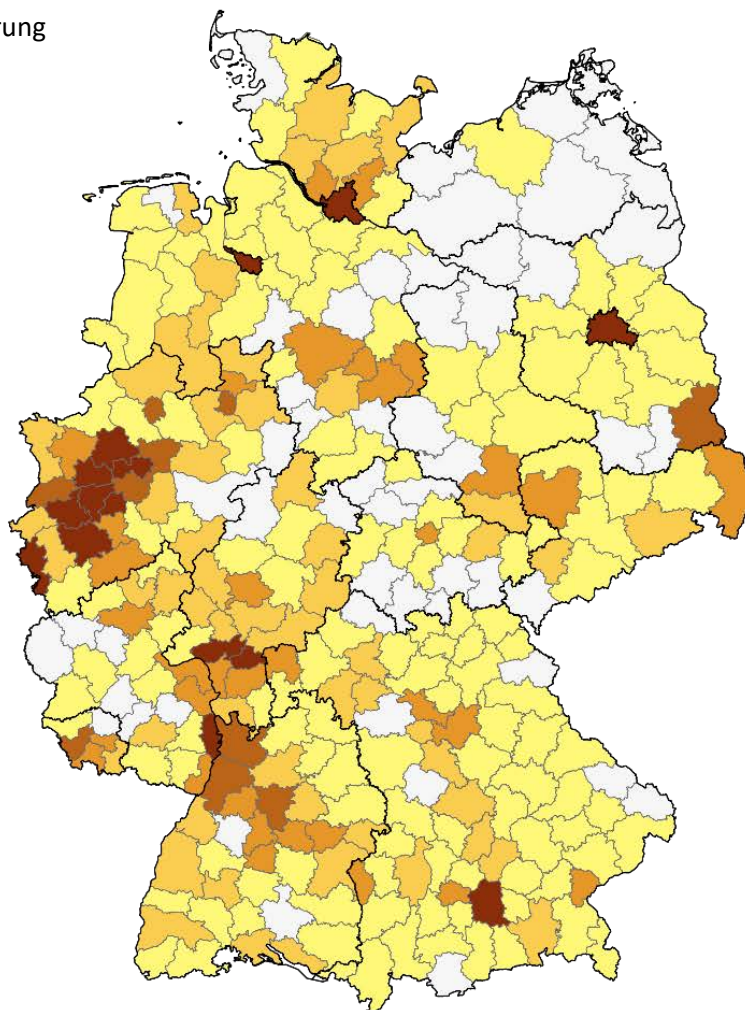
In 52 Kreisregionen sind keine Emissionsminderungen erforderlich (Abbildung 39 und Tabelle 43, Anhang A.8). Diese Kreisregionen befinden sich vor allem im Nordosten und in der Mitte Deutschlands (Abbildung 39). Besonders hohe Minderungsanforderungen sind hingegen in den Städte Berlin, Bremen und Hamburg sowie im Ruhrgebiets zu leisten (Abbildung 39 und Tabelle 43, Anhang A.8).

In 50 Kreisregionen wird das Qualitätsziel von 10 µg NO₂ m⁻³ Luft bereits jetzt eingehalten, das heißt es besteht kein Minderungsbedarf, obwohl die mit der hier angewandten Methodik berechnete zulässige Emission niedriger liegt als die Ist-Emission. Diese Überschreitung wird aber nicht als erforderliche Verminderung betrachtet, da in diesen Kreisregionen der Wert des Wirkungsindikator NO₂-Konzentration keinen Minderungsbedarf begründet. In zwei Kreisregionen ist der Ist-Wert der NO_x-Emission niedriger als die berechnete zulässige Emission, der Ist-Wert wird in diesem Fällen als zulässige Emission übernommen (Verschlechterungsverbot).

Abbildung 39: Erforderliche Verminderung der NO_x-Emission in den Kreisregionen zur rechnerischen Einhaltung des WHO-Richtwerts der Konzentration von 10 µg NO₂ m⁻³ Luft (Jahresmittelwert) in der gesamten Fläche der Kreisregionen.

Erforderliche Minderung
NO_x-Emission in den
Kreisregionen
[kg N km⁻² a⁻¹]

0
> 0 - 500
> 500 - 1000
> 1000 - 2000
> 2000 - 3000
> 3000



Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE); Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

NO_x-Emissionen beeinträchtigen zwei Schutzgüter, Terrestrische Ökosysteme (Kapitel 2) und Menschliche Gesundheit. Für die Berechnung der nationalen Obergrenze der NO_x-Emission werden für jede Kreisregion die beiden Werte der zulässigen NO_x-Emissionen miteinander verglichen, die sich für diese beiden Schutzgüter ergeben. Für die Obergrenze für Deutschland insgesamt wird der *niedrigere* der beiden Werte bzw. der *höhere* der beiden Werte der erforderlichen Verminderung der NO_x-Emission herangezogen; für 71 Kreisregionen resultiert die Minderungserfordernis aus dem Schutzgut Menschliche Gesundheit und für 231 Kreisregionen aus dem Schutzgut Terrestrische Ökosysteme.

7.4 Fazit und Anmerkungen

- Der neue WHO-Richtwert von 10 µg m⁻³ für das Jahresmittel wurde im Jahr 2020 an 83 % der 400 Stationen in Deutschland überschritten (UBA 2022).
- Am 24. April 2024 stimmte das EU-Parlament für den "Vorschlags für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa". Mit diesem Vorschlag wird ein Grenzwert von 20 µg NO₂ m⁻³ als Jahresmittelwert zur Einhaltung bis 2030 eingeführt. Auf diesen Vorschlag konnte im Zuge des regioNat-Projektes aufgrund des bereits fortgeschrittenen Bearbeitungsstandes nicht eingegangen werden. Der doppelt so hohe Wert für die NO₂-Konzentration würde entsprechend geringere Reduktionen erforderlich machen. So wären beispielsweise die orangen Bereiche in der Abbildung 36 nicht von erhöhten NO₂-Konzentrationen betroffen. Der Grenzwert von 20 µg m⁻³ ist auch in der mittlerweile verabschiedeten Fassung der Richtlinie vom 23. Oktober 2024 festgeschrieben¹². Allerdings wurde auch der Wert von 10 µg m⁻³ NO₂ als so genannte Beurteilungsschwelle in die Richtlinie übernommen, welche langfristig und im Einklang mit den WHO-Empfehlungen einzuhalten ist. Daher ist es gerechtfertigt, den WHO-Richtwert für die Berechnung der erforderlichen NO_x-Emissionsminderung zu Grunde zu legen.
- Das Bestimmtheitsmaß der Regressionen könnte verbessert werden, wenn große Punktquellen aus den kreisbezogenen Werten der NO_x-Emission herausgerechnet würden. Allerdings würden dann auch nicht alle Emissionen in die Regression mit einbezogen werden, so dass im Ergebnis kein Bezug zur Gesamtmenge der Emissionen hergestellt werden könnte. Mutmaßlich geben große Punktquellen das NO_x über hohe Schornsteine in die Atmosphäre ab mit dem Effekt, dass diese Quellen nur wenig zur NO₂-Konzentration im Nahbereich der Punktquellen bzw. zum gemittelten Wert in einer Kreisregion beitragen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sie über Source-Receptor-Beziehungen im Ferntransport Auswirkungen auf die NO_x-Konzentrationen an anderen Orten haben, analog zu den NH₃-Emissionen (s. Kap. 6).
- Wie in Abbildung 63 (Anhang A.8) zu erkennen ist, liegt in einigen wenigen Rasterzellen die NO_x-Emission um den Faktor 1000 bis 10000 über dem mittleren Niveau der übrigen Rasterzellen. Dabei handelt es sich vor allem um Standorte von Kraftwerken oder Industrieanlagen (große Punktquellen). In einigen Fällen kommt es vor, dass die NO₂-Konzentrationen (Jahresmittelwerte) in den entsprechenden Kreisregionen trotz dieser Punktquellen 10 µg m⁻³ nicht überschreiten, da Punktquellen in den GRETA-Daten mit der Information über die effektive Quellhöhe versehen sind und somit in der Ausbreitungsberechnung in höhere Modellschichten emittieren. Dadurch verteilen sich Schadstoffe weiter und tragen im Nahbereich der Punktquelle kaum zur modellierten NO₂-Konzentration bei. Beispiele dafür sind die Kreisregionen Spree-Neiße (mit dem Kohlekraftwerk Jänschwalde) und Görlitz (mit dem

¹² Richtlinie (EU) 2024/2881 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2024 über Luftqualität und saubere Luft für Europa (Neufassung)

Kohlekraftwerk Boxberg), deren Kreis-Mittelwerte der Jahresmittelkonzentrationen maximal 13,6 bzw. 11,8 g NO₂ m⁻³ betragen, also kaum über dem WHO-Richtwert liegen. Bei anderen NO_x-Quellen wie dem Verkehr werden die NO_x-Emissionen hingegen bodennah freigesetzt und bilden dadurch eine wesentliche Komponente der lokalen NO₂-Konzentration.

- ▶ Dies führt dazu, dass die Minderungsanforderung für Kreisregionen, in denen ein Hauptteil der Emissionen auf einzelne große Punktquellen zurückzuführen, zu hoch ausgewiesen wird im Hinblick auf die erforderliche Verminderung der NO₂-Konzentration im Mittel des Kreises selbst. Allerdings kann die Minderungsanforderung auch relativ leicht durch das Abschalten der großen Punktquellen erreicht werden, was z.T. aus Gründen des Klimaschutzes sowieso geplant ist (Stichwort Kohleausstieg 2038).
- ▶ Die mit dem RCG modellierten NO₂-Konzentrationen werden im Nachgang mit Messdaten assimiliert (Verfahren der Optimalen Interpolation; UBA 2023a). Aufgrund der Auflösung von (nur) 2,4 km x 2,4 km können diese Daten nur die Hintergrundkonzentration, nicht jedoch lokale Belastungen wiedergeben, die beispielsweise entlang großer Straßen auftreten. Auf Grundlage dieser Daten kann die NO₂-Belastung daher nur bis zur Skalenebene des urbanen Hintergrundes dargestellt werden. Aussagen über die NO₂-Exposition der Bevölkerung (Anzahl der Personen, die einer NO₂-Konzentration oberhalb eines bestimmten Werts ausgesetzt sind), können daraus nicht abgeleitet werden. Wie Abbildung 36 verdeutlicht, wird die Konzentration von 10 µg NO₂ m⁻³ Luft aktuell vor allem in bevölkerungsreichen Regionen überschritten. Das vergleichsweise dichte Straßennetz mit einem hohen Verkehrsaufkommen ist dort der entscheidende Faktor.
- ▶ Die NO_x-Emissionen stammen, neben der Verbrennung von Steinkohle und Braunkohle, hauptsächlich aus dem Straßenverkehr. Für die Bewertung des Schutzguts Menschliche Gesundheit bedeutet die Zusammenfassung von Kreisen und kreisfreien Städten zu Kreisregionen, so wie sie im Projekt vorgenommen wird, einen Verlust an Berechnungsschärfe: in diesen Gebietseinheiten wird die (flächenbezogen) vergleichsweise hohe verkehrsbedingte Emission in den kreisfreien Städten mit der niedrigen Emission im umgebenden (eher ländlich geprägten) Landkreis gemittelt. Im Ergebnis wird für die Kreisregion als Ganzes nur eine relativ geringe Emission und ein entsprechend geringer Minderungsbedarf ausgewiesen; die zugeordneten kreisfreien Städte treten bei diesem Ansatz nicht als "hot spots" von NO_x-Emissionen in Erscheinung. In Anbetracht des insgesamt relativ geringen Anteils der erforderlichen NO_x-Minderung am gesamten nationalen Stickstoffziel (s. Tabelle 19) erscheint diese methodisch bedingte Einschränkung jedoch vertretbar.
- ▶ Der Abgleich mit dem Minderungsbedarf für das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme (Kapitel 2) zeigt, dass die Einhaltung der Critical Load, das heißt die Verminderung der Eutrophierung durch Stickstoff, im Regelfall das striktere Ziel der beiden Schutzgüter darstellt. Nur für 71 Kreisregionen stellt das Schutzgut Menschliche Gesundheit das strengere Kriterium dar. Dabei handelt es sich um Kreisregionen mit großen Städten bzw. kreisfreien Städten. So ist die menschliche Gesundheit neben Berlin, Bremen und Hamburg zum Beispiel auch in den Kreisregionen Nürnberger Land (mit Stadt Nürnberg) und im Rhein-Erft-Kreis (mit Köln) maßgeblich für die Ermittlung der erforderlichen Verminderung. Wenn in den übrigen 231 Kreisregionen die NO_x-Emissionen entsprechend den Anforderungen an das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme vermindert werden, dann ist dort auch ein ausreichender Schutz der menschlichen Gesundheit verbunden. Das Auftreten von lokalen "hot-spots" im Nahbereich vielbefahrener Straßen kann allerdings nicht ausgeschlossen werden (s.o.).

8 Unsicherheit der Ergebnisse

Umweltindikatoren, wie beispielsweise die Überschreitung der ökologisch zulässigen Deposition von reaktiven Stickstoffverbindungen, beschreiben den Zustand und die Veränderung der Umweltqualität. Als Bestandteil des Umweltmonitoring unterstützen Indikatoren bei der Identifizierung von Bereichen mit Handlungsbedarf. Für die Bewertung des Umweltzustands und für die Konzeption von Maßnahmen ist die Frage der Validität respektive der Unsicherheit von Indikatoren dabei von zentraler Bedeutung.

Unter der Unsicherheit einer Größe wird in der Statistik der mittlere Fehler bzw. das Vertrauensintervall einer Größe verstanden. "Unsicherheit" kann durch verschiedene Faktoren verursacht werden. Die epistemische Unsicherheit von Modelleingabedaten und -parameter bezeichnet den Umstand, dass der wahre Wert von Messwerten oder Modellparametern nicht bekannt ist. Epistemische Unsicherheit resultiert aus unvollständigem Wissen, z.B. durch einen zu geringen Stichprobenumfang (bspw. Depositions- oder Grundwassermessstellen) und/oder die begrenzte Bestimmungsgenauigkeit von Messungen bzw. Analyseverfahren. Variabilität bezeichnet den Umstand, dass der Wert von Eingabedaten oder Modellparametern im Raum und/oder in der Zeit nicht konstant ist, wie bspw. die Witterungsbedingungen (Wetterlagen) für den atmosphärischen Transport. Variabilität kann nicht durch zusätzliche Messungen reduziert werden (aber sie kann durch Messungen genauer quantifiziert werden).

Mit einer Sensitivitätsanalyse¹³ wird untersucht, wie stark das Ergebnis eines Modells bzw. einer Berechnung infolge der Variation von Eingangsgrößen und Modellparameter variiert. Eine hohe Sensitivität einer Eingabegröße impliziert nicht automatisch, dass dadurch auch ein hohes Maß an Unsicherheit in den Modellergebnissen hervorgerufen wird. Wenn der wahre Wert von Eingabedaten oder Parametern sehr genau bekannt ist, das heißt der Wert kaum variiert, wird die betreffende Größe nur wenig Unsicherheit in den Modellergebnissen hervorrufen. Umgekehrt erzeugt ein Parameter, der unsicher aber wenig sensitiv ist, ebenfalls keine größere Unsicherheit in den Ergebnissen. Die wichtigen Eingabedaten und Parameter sind also diejenigen, die sowohl sensitiv als auch unsicher sind.

Im vorliegenden Projekt konnten systematische Sensitivitätsanalysen der kreisbezogenen Ergebnisse zu den Obergrenzen der Wirkungsindikatoren und den erforderlichen Verminderungen für die einzelnen Schutzgüter allerdings (mit einer Ausnahme) nicht durchgeführt werden. Dafür fehlen für die Berechnungsverfahren der meisten Schutzgüter sowohl Informationen zur Unsicherheit der Modellstruktur und Modellparameter als auch zur Variabilität der Inputgrößen. Im Folgenden werden einige Quellen von Unsicherheiten in den verwendeten Daten und Berechnungsansätzen für die Schutzgüter aufgeführt, damit kann zumindest die mögliche Größenordnung von Unsicherheiten umrissen werden.

Emissionen und Depositionen von Luftschadstoffen und Flächenbezug - Verschiedene Schutzgüter

Die primären Geodatenätze (Karten) zu Emissionen und Depositionen bzw. Konzentrationen von luftgetragenen N-Spezies (NO_x , NH_3 , N_2O) liegen in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen und teilweise in anderen Projektionen vor, das heißt nicht kongruent zum GeoGitterDE (BKG 2020), das im vorliegenden Projekt als Standard verwendet wird. Aus der Transformation resultieren Lageverschiebungen der Werte.

¹³ Sensitivitätsanalysen können zum einen nach der Methode "ein Faktor auf einmal" (one at a time) erfolgen, bei der die Modellberechnungen wiederholt durchgeführt werden und der Wert einer einzigen Eingabegröße bzw. eines Parameters dabei gestuft verändert wird. Bei einer mehrdimensionalen Sensitivitätsanalyse werden mehrere Größen gleichzeitig variiert, häufig mit einer Zufallsziehung der Werte (Morris 1991, Campolongo et al. 2007). Die Sensitivität einer Inputvariablen kann in Form des Varianzbeitrags ausgedrückt werden, mit dem diese Inputvariable zur Gesamtvarianz der betrachteten Zielgröße beiträgt.

Die Daten der räumlich verteilten NO_x - bzw. NH_3 -Emissionen werden mit dem Gridding Emission Tool for ArcGIS (GRETA; UBA 2016) erzeugt. Ausgehend von Inventardaten zur NO_x - bzw. NH_3 -Emission (bspw. für Industrie, Verkehr, Landwirtschaft) generiert GRETA räumlich hochaufgelöste Emissionsdatensätze, zur regionalen Verteilung werden quellgruppenspezifische Parameter genutzt.

Die Unsicherheit der Schätzung der NH_3 - und NO_x -Emissionen infolge der Unsicherheit des Kompensationspunktes wird im Luftschadstoff-Reporting für die CLRTAP geschätzt und beträgt für die nationalen Emissionstotale 15 % für NH_3 respektive 27 % für NO_x (Schneider et al. 2018).

In PINETI-4 wird die trockene und die nasse Deposition mit dem Chemie-Transportmodell LOTOS-EUROS berechnet. In den Vorgängerprojekten der PINETI-Reihe wurde der Fehler mit 30 % abgeschätzt (UBA 2017). Dieser kann aber lokal deutlich höher sein. Dabei ist räumliche Auflösung der Gitterboxen der Modellierung eine Quelle für systematische Fehler. Die laterale Auflösung der Modellierung beträgt $0,03125 \times 0,015625$ Grad (etwa $2 \times 2 \text{ km}^2$). Da die Daten des zugrundeliegenden meteorologischen Modells (ECMWF) nur in einer Auflösung von $0,1 \times 0,05$ Grad (etwa $6 \times 6 \text{ km}^2$) vorlagen, wurden sie geostatistisch auf die höhere Modelauflösung von LOTOS-EUROS interpoliert. Die pro Rastermittelpunkt ermittelten Depositionsflüsse wurden anschließend landnutzungsabhängig mit geostatistischen Methoden auf ein $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ -Gitter verteilt. Durch Interpolation der trockenen Deposition auf die höhere Auflösung von $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ kann die Unsicherheit noch zunehmen. Innerhalb einer Rasterzelle und in orographisch stark gegliedertem Gelände kann die modellbedingte Unsicherheit damit sehr viel höher als 30 % liegen. Eine Validierung der modellierten Depositionswerte kann über den Vergleich mit Luftkonzentrationsmessungen und mit Messwerten der nassen Deposition erfolgen. Für PINETI-4 (Kranenburg et al. 2022) wurden systematische Fehler (Normalised Mean Bias) der modellierten NH_3 , NO und NO_2 Konzentrationen von 38, 26 bzw. 13 % ermittelt. Für die nasse Deposition wurden systematische Fehler (ebenfalls Normalised Mean Bias) von 12 und 36 % für NH_x bzw. NO_y ermittelt. Für die trockene Deposition ist dieser Vergleich nicht möglich, da keine direkten Messungen der trockenen Deposition vorliegen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der Fehler der trockenen Deposition höher ist als jener der Konzentration.

Als kleinste Einheit der räumlichen Auflösung wurde im Projekt das GeoGitterDE_1km als nationales Referenzsystem (UTM 32N; BKG 2020) verwendet; das Bundesgebiet wird im vorliegenden Projekt im GeoGitterDE durch 361.469 Rasterzellen repräsentiert. Das sind rund 1,1 % mehr Fläche als die amtliche Flächenstatistik (Destatis, versch. J.) ausweist. Die Differenz ist auf die Raster an der Außengrenze bzw. der Küstenlinie des Bundesgebietes zurückzuführen, deren Fläche von 1 km^2 vollständig der betreffenden Kreisregion zugerechnet wird, auch wenn tatsächlich nur ein mehr oder weniger großer Teil tatsächlich zum Bundesgebiet gehört (bzw. an der Küste zum Festland). Dadurch werden die Kreise bzw. Kreisregionen an der Umrisslinie Deutschlands im GeoGitterDE systematisch überrepräsentiert, was insbesondere Kreise mit zugehörigen Inseln betrifft. Für vier Kreise beträgt diese Abweichung mehr als 10 % (Vorpommern-Rügen, Nordfriesland, Konstanz, Lindau/Bodensee) und erreicht im Maximum 15,1 % (Vorpommern-Rügen). Infolge dieser Überrepräsentanz im GeoGitterDE können bei der Umrechnung einer Größe von Masse (absolut) pro Kreisregion in flächenbezogene Masse pro km^2 (im Mittel der Kreisregion) - und vice versa - die Werte entsprechend dem Verhältnis von tatsächlicher Kreisfläche zur Fläche im GeoGitterDE verzerrt werden. Im Median der Kreisregionen beträgt die Abweichung jedoch nur 0,4 %, was in Anbetracht der Größenordnung von anderen Unsicherheitsfaktoren vernachlässigbar erscheint.

Die vorstehend aufgeführten Geodaten zu Emissionen, Depositionen und Konzentrationen wurden in ArcGIS Pro 3.2 in das GeoGitterDE überführt, indem jeweils den Rasterzellen des GeoGitter-

terDE der Wert des Merkmals in der Ausgangskarte mit der größten Flächenüberdeckung zugewiesen wurde. Durch dieses Vorgehen kann sich die Verortung der Werte gegenüber der ursprünglichen Lokalisierung verschieben (theoretisch um maximal eine halbe Länge und Breite der Ziellaster, im GeoGitterDE_1km also um maximal 0,5 km in Ost/West- bzw. Nord/Süd-Richtung). Das GeoGitterDE ist mit 1 km² höher aufgelöst als die primären Geodaten (s.o.). Dies führt dazu, dass bei Darstellung von Daten im GeoGitterDE der Eindruck einer höheren räumlichen Auflösung und damit Genauigkeit entstehen kann, als die Ursprungsdaten tatsächlich beinhalten.

NH₃- und NO_x-Emissionen sowie NH_x- und NO_y-Depositionen - Schutzgut Terrestrische Ökosysteme

Zentrale Komponente für die Berechnung der erforderlichen Verminderung der NO_x- und NH₃-Emissionen sind die Source-Receptor-Tables (S-R-Tables) der räumlichen Austauschbeziehungen zwischen Emissionen (Quellen) und Depositionen (Senken; s. Kapitel A.2). Die hier verwendeten S-R-Tables umfassen als räumliche Einheiten die Bundesländer, die Küstenzonen der Nordsee und der Ostsee, die europäischen Nachbarländer Deutschlands, die internationale Schifffahrt im Betrachtungsgebiet sowie weiterhin internationale Regionen außerhalb des konkreten Modellierungsbereichs (PINETI-4; Kranenburg et al. 2024). Eine S-R-Table gibt an, welcher Anteil der gesamten Deposition in einem Bundesland aus den Emissionen des betreffenden Bundeslandes selbst stammt, welche Anteile aus den anderen 15 Bundesländern stammen und welcher Anteil auf Emissionen außerhalb des Bundesgebietes entfällt.

Mangels höherer räumlicher Auflösung muss im vorliegenden Projekt für alle Kreise innerhalb eines Bundeslandes jeweils der identische S-R-Wert verwendet werden (s. Abbildung 42 und Abbildung 43). Je größer die Fläche und/oder je inhomogener die atmosphärischen Transportverhältnisse in einem Bundesland sind, umso stärker kann der S-R-Wert für eine Kreisregion vom Mittelwert des Bundeslandes abweichen. Für viele Kreisregionen bedeutet dies mutmaßlich eine deutliche, jedoch nicht näher quantifizierbare Über- oder Unterschätzung des erforderlichen Minderungsbedarfs der NO_x- und NH₃-Emissionen.

Der grenzübergreifende Transport und die nationalen Emissionen und Depositionen von Luftverunreinigungen werden für die S-R-Tables mit einem Modell des Norwegian Meteorological Synthesizing Centre - West (MSC-W) berechnet. Die S-R-Tables beinhalten auch Bilanzen der NO_x- und NH₃-Emission sowie der NO_y- und NH_x-Deposition in Deutschland. Diese Werte unterscheiden sich von den Ergebnissen der Systeme GRETA und PINETI-4, die größte Abweichung tritt für die NO_x-Emission in Erscheinung (als NO₂ gerechnet; Tabelle 18), die nach S-R-Table 34 % niedriger geringer ist als nach PINETI-4. Ursachen für die unterschiedlichen Ergebnisse der Systeme PINETI und EMEP werden u.a. in UBA (2017) erläutert. Diese Differenzen verdeutlichen die Größenordnung der Unsicherheit, die bei der Ermittlung von Obergrenzen und der erforderlichen Verminderung von Emissionen bereits Bestandteil der Ausgangsdaten ist.

Tabelle 18: NH₃- und NO_x-Emissionen sowie NH_x- und NO_y-Depositionen 2019 in Deutschland nach GRETA bzw. PINETI-4 im Vergleich zur Modellierung des MSC-W^a (S-R-Table-Werte).

N-Verbindung (Emission / Deposition)	Emission		Deposition	
	GRETA kt N a ⁻¹	S-R-Table kt N a ⁻¹	PINETI-4 kt N a ⁻¹	S-R-Table kt N a ⁻¹
NH ₃ / NH _x	469,6	433,0	340,7	327,2
NO _x (als NO ₂) / NO _y	343,1	225,1	176,8	149,6

^a Norwegian Meteorological Synthesizing Centre - West (MSC-W), Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP).

Neben der Depositions- und Emissionsmodellierung enthält auch die Modellierung der Critical Loads (also der kritischen Grenzwerte als Zusammenhang zwischen Bodenchemie und biologischer Wirkung) größere Unsicherheiten. Vor allem die Qualität der Eingangsdaten in der Critical Load Modellierung (Rezeptordaten, Flächennutzung, Bodendaten, Klimadaten) hat einen großen Einfluss auf die Höhe und Lage der modellierten Critical Loads. Weitere Hinweise zu Unsicherheiten sind in Schlutow et al. (2018) aufgeführt. Durch die Anwendung der Critical Load Datensatzes, den das Umweltbundesamt auch für die Indikatorberichterstattung verwendet („Eutrophierung von Ökosystemen“), besteht jedoch methodische Konsistenz. Durch die Wahl des Anforderungsniveaus 90-Perzentil wird dieser Unsicherheit Rechnung getragen.

N(ges)-Fracht - Schutzgut Oberflächengewässer

Das Modell MoRE erlaubt eine einfache Sensitivitätsanalyse z.B. für ausgewählte Eingangsdaten. Beispiel: Die beiden Eingangsgrößen "N-Überschüsse" und "Stickstoffkonzentrationen im Grundwasser" sowie beide zusammen wurden auf Ebene der Analysegebiete jeweils um $\pm 10 \%$ variiert (für Szenario B, s. Kapitel 3.3.2); in Anlehnung an die geschätzte Unsicherheit der Größe N-Flächenbilanzüberschuss der Kreisregionen (s. Häußermann et al. 2019). Mit dieser Variation der N-Überschüsse bzw. der Grundwasserkonzentrationen beträgt die Sensitivität der Zielgröße "Gesamteinträge in die Oberflächengewässer" insgesamt $\pm 6 \%$ bzw. $\pm 5 \%$ (Einzelheiten s. Anhang A.3.4, Tabelle 24, Abbildung 54). Werden beide Eingangsgrößen gemeinsam variiert, steigt die Sensitivität auf $\pm 11 \%$.

Die Sensitivität der Zielgröße "erforderliche Verminderung" ist höher, bei Variation der N-Überschüsse bzw. der Grundwasserkonzentrationen um jeweils $\pm 10 \%$ erhöht bzw. reduziert sich der Minderungsbedarf um $\pm 16 \%$ bzw. $\pm 12 \%$ (Tabelle 24, Abbildung 55, Anhang A.3.4). Wenn beide Eingangsgrößen gemeinsam variiert werden, ändert sich der Minderungsbedarf um $\pm 29 \%$ (Tabelle 24, Abbildung 55).

Das räumliche Verteilungsbild der Gewässereinträge und des Minderungsbedarfs bleibt erhalten. Die stark landwirtschaftlich geprägten FGE zeigen die höchste Änderungen bei Variation der N-Überschüsse; die FGE von Weser, Rhein und Maas zeigen dagegen die höchsten Änderungen bei der Variation der Grundwasserkonzentrationen (Tabelle 24).

Der Vergleich der Ergebnisse der MoRE-Modellierung mit dem konzeptionell ähnlichen Modell AGRUM-DE verdeutlicht die Variabilität, die auf unterschiedliche Modellansätze und Eingangsdaten zurückgeht. Die modellierten N-Einträge in das Gewässersystem nach MoRE für die Jahre 2016 bis 2018 betragen 89 % bis 101 % des AGRUM-Wertes (Bezugsjahr 2016), der Minderungsbedarf 86 % bis 102 % für Deutschland insgesamt (s. Tabelle 7). Für einzelne FGE sind die Differenzen zum Teil deutlich größer, für das FGE Elbe bspw. wird nach MoRE ein relativer Minderungsbedarf von 41 % berechnet, während AGRUM nur 16 % ausweist.

Nitratkonzentration - Schutzgut Grundwasser

Für den Überschuss der N-Flächenbilanz der Landwirtschaft in Deutschland insgesamt ermittelten Häußermann et al. (2019) mittels einer Monte Carlo-Sensitivitätsanalyse eine Schwankungsbreite (90 %-Interquantil) von 7,2 kg N ha⁻¹ LF, für die einzelnen Bundesländer zwischen 5,1 und 11,6 kg N ha⁻¹ LF. In dieser Größenordnung ist auch die Unsicherheit der Größe "potenzielle Nitratkonzentration im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung" in Bezug auf den N-Eintrag anzusetzen.

Für die Random Forest-Regionalisierung der Nitratkonzentrationen im Grundwasser in Deutschland (1 km x 1 km) wurde von Knoll et al. (2024) das Unsicherheitsintervall mit dem Quantile Random Forest (QRF)-Verfahren ermittelt. Das 90 %-Unsicherheitsintervall betrug für diese RF-

Modellierung $53 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$ (Bereich vom 5-Perzentil bis 95-Perzentil der Werteverteilung, innerhalb derer der wahre Wert der Zielgröße zu erwarten ist), wobei das Unsicherheitsintervall proportional zur Höhe der Nitratkonzentration war. Für die im vorliegenden Projekt durchgeführten RF-Anwendungen ist von einem Unsicherheitsintervall in ähnlicher Größenordnung auszugehen.

N₂O-Emissionen - Schutzgut Klima

Im nationalen Treibhausgasemissionsinventar UBA (2018) wird die Unsicherheit der N₂O-Emissionen in der Landwirtschaft und im Sektor Wald und Landnutzung als "sehr hoch" eingeschätzt, für das nationale Total zwar geringer, aber immer noch als "beträchtlich".

NH₃-Emissionen - Schutzgut Vegetation

Die modellierten NH₃-Konzentrationen wurden zwar in der Auflösung 1 km^2 zur Verfügung gestellt, aber verschoben gegenüber dem GeogitterDE und mussten daher zunächst Lage-transformiert werden. Weiterhin werden die NH₃-Konzentrationen für eine Höhe von 2,5 m über dem Erdboden modelliert, was nicht der tatsächlichen Wuchshöhe der Rezeptoren entspricht. Die meisten Flechten und Moose (Kryptogamenarten) werden nur ein bis zwei Dezimeter groß, Rentierflechten (Gattung *Cladonia*) erheben sich nur wenige cm über die Bodenoberfläche. Andere Rezeptoren wie Bäume (denen als Critical Level $3 \text{ } \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ zugeordnet ist) erreichen dagegen Höhen von 30 m und mehr. Die NH₃-Konzentration, der einerseits Flechten und Moose (Kryptogamen) nahe der Bodenoberfläche und andererseits Bäume im Kronenbereich ausgesetzt sind, kann sich von der Konzentration in der Modellbezugshöhe 2,5 m somit deutlich unterscheiden. Die Bewertung der Immissionsbelastung der Rezeptoren (Pflanzen) in der Bezugshöhe 2,5 m unter- oder überschätzt daher die tatsächlich einwirkende NH₃-Konzentration mutmaßlich, zur Größenordnung dieses Fehlers ist aber keine Aussage möglich.

Mit der Zuordnung der Critical Level von 1 und $3 \text{ } \mu\text{g}$ zu einen deutschen Rezeptorendatensatz ist methodisches Neuland betreten worden. Die damit verbundenen Unsicherheiten sind als sehr groß einzustufen. Durch Auswahl des 10-Perzentil Szenarios wird dieser Unsicherheit Rechnung getragen.

NO_x-Emissionen - Schutzgut Menschliche Gesundheit

Die ursprüngliche räumliche Auflösung der NO_x-Emissionswerte ist unterschiedlich für die einzelnen Quellgruppen, bspw. $5 \times 5 \text{ km}^2$ für die Emissionen insgesamt und für den Energiesektor, $3 \times 3 \text{ km}^2$ für Straßenverkehr und Landwirtschaft sowie $0,5 \times 0,5 \text{ km}^2$ für Flugverkehr (Bearbeitungsstand gem. UBA 2016). Die Emissionen aus der Landwirtschaft werden vom Thünen-Institut bereitgestellt und liegen ursprünglich nur mit Regionalgliederung Kreise vor.

Für die NO₂-Immission wurde aus der Betrachtung von drei Modellregionen in Deutschland mit höher aufgelösten Expositionsmodellen von Schneider et al. (2018) überschlägig geschätzt, dass sich auf Basis feinstrukturierterer Daten die NO₂-Konzentrationen im Mittel um 21 % erhöhen würde.

In der Gesamtbetrachtung aller Schutzgüter bzw. methodischen Ansätze ist festzuhalten, dass alle Wirkungsindikatoren und Emissionen mit zum Teil beträchtlichen Unsicherheiten behaftet sind, jedoch ohne dass deren Größenordnung näher beziffert werden könnte. Für den Ist-Wert des nationalen integrierten Stickstoffindikators (Summe über die Teilindikatoren, ohne regionale Differenzierung) des DESTINO-Projekts schätzten Heldstab et al. (2020) einen Unsicherheitsbereich von $\pm 25 \text{ } \%$ bis $\pm 30 \text{ } \%$. Für die Ergebnisse zu den einzelnen Schutzgütern sowie für das nationale Aggregat im hier vorgestellten Projekt gehen die Autor*innen von einer Unsicherheit in einem vergleichbaren Bereich aus.

9 Nationale Stickstoff-Obergrenze

In den Kapiteln 2 bis 8 werden jeweils Methodik und Ergebnis der Ist-Situation der Einhaltung bzw. Überschreitung der Qualitätsziele für sieben Schutzgüter beschrieben. Aus der Verknüpfung der Immissionen, die sich aus terrestrischer Deposition, Luftkonzentration oder Gewässereintrag ergeben, mit den verursachenden Emissionen werden die Obergrenzen im Sinne zulässiger Emissionmengen dargestellt. Betrachtet werden NH_3 , NO_x und N_2O für den Umsatzraum Atmosphäre, NO_3 bzw. N-Überschuss der Landwirtschaftsflächen und N(ges) für den Umsatzraum Hydrosphäre sowie schließlich die Summe der N_r -Verbindungen.

Die Ergebnisse für die einzelnen Schutzgüter wurden zunächst für die räumliche Auflösung der 1 km x 1 km-Rasterzellen des GeoGitterDE (BKG 2020) aufbereitet, unabhängig vom Raumbezug der primären Bearbeitungseinheiten der Emissionen bzw. Immissionen wie bspw. 1 km x 1 km-Rasterzellen des GRETA-Tools, Kreise bzw. Kreisregionen, MoRE-Analyseeinheiten oder Flussgebiete. Auf Basis dieses Rasterzellen-Datensatzes wurden dann die Ergebnisse aggregiert für 302 Kreise bzw. Kreisregionen sowie für das Bundesgebiet insgesamt. Die Ergebnisse zur Ist-Situation der Emissionen und Depositionen, zu den Obergrenzen und zum Minderungsbedarf wurden für die einzelnen N_r -Verbindungen bezogen auf die Elementarfläche von 1 km² im GeoGitterDE (kg N km⁻² a⁻¹) und anschließend für die Kreisregionen und dann das Bundesgebiet aggregiert zu absoluten N_r -Mengen (t N a⁻¹). Für die Karten der regionalen Verteilung (Kreisregionen, für Schutzgut Oberflächengewässer auch AU) werden die Größen jeweils flächenbezogen (kg N km⁻² a⁻¹) gemittelt für die Kreisflächen dargestellt, damit der Vergleich zwischen Kreisregionen nicht durch die unterschiedliche Größe der Kreise überprägt wird.

In Tabelle 19 sind die aggregierten Ergebnisse zu den aktuellen Emissionen, den Obergrenzen und den erforderlichen Verminderungen von reaktiven N-Verbindungen für die sieben Schutzgüter zusammengefasst. Für vier der sieben Schutzgüter sind verschiedene Anforderungsniveaus und Szenarien für den Umsetzungs- bzw. Erreichungsgrad des Qualitätsziels berechnet worden; für die Aggregation der nationalen N-Obergrenze werden die folgenden Varianten verwendet:

- ▶ Terrestrische Ökosysteme: Anforderungsniveau 90-Perzentil
- ▶ Oberflächengewässer: Szenario B (ohne Flussgebiet Rhein und Donau)
- ▶ Grundwasser: Ansatz I: Potenzielle Nitratkonzentration im Sickerwasser berechnet mit dem hydrosphärischen N-Überschuss 2010-2019 (Häußermann et al. 2019) und bezogen auf die Gesamtfläche
- ▶ Vegetation: Anforderungsniveau 90-Perzentil.

Mit der Wahl dieser Anforderungsniveaus werden ambitionierte, aber nicht immer die maximalen Qualitätsziele für die Schutzgüter gesetzt.

Die N-Emissionsmengen für die einzelnen Schutzgüter in Tabelle 19 (letzte drei Spalten) sind wie folgt verknüpft:

"Ist-Situation" abzgl. "Obergrenze" = "erforderliche Verminderung".

Für die Schutzgüter terrestrische und marine Ökosysteme, Vegetation, Grundwasserqualität und Menschliche Gesundheit wurde zunächst die "Obergrenze" in Form einer Critical Load (Terrestrische Ökosysteme), eines Critical Level (Vegetation), des zulässigen N-Eintrags ins Grundwasser sowie der zulässigen NO_x -Emission ermittelt, die "erforderliche Verminderung" wird dann als Differenz berechnet. Für die Schutzgüter Oberflächengewässer und Klima wurden dagegen jeweils die beiden Summanden "Ist-Situation" und "erforderliche Verminderung" ermittelt, die "Obergrenze" ergibt sich dann als Resultierende.

Tabelle 19: Qualitätsziele, Wirkungsindikatoren und Obergrenzen für die Emissionen von reaktivem Stickstoff zur Einhaltung der Qualitätsziele für die sieben Schutzgüter.

Umweltbereich/ Schutzgut	Qualitätsziel	Wirkungsindikator		Ist-Situation kt N a ⁻¹	Emissionen	
		Parameter	Ist-Situation ^a des- Parameters		Obergrenze kt N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung kt N a ⁻¹
Terrestrische Ökosysteme (Eutrophierung durch N-Deposition)	Einhaltung der kritischen Belas- tungsgrenze (Critical Load, CL _{eut} N) des empfindlichsten Ökosystems in- nerhalb einer Kreisregion	NH _x - und NO _y - Deposition (Landfläche DE)	335,3 kt NH _x -N 174,1 kt NO _y -N	469,6 NH ₃ -N 343,1 NO _x -N	147,7 NH ₃ -N 85,4 NO _x -N Anforderungsniveau: 90-Perzentil	326,2 NH ₃ -N ^b 257,8 NO _x -N ^b
Marine Ökosysteme in den Küstenzonen^c (Nordsee und Ostsee)	Einhaltung CAI ^d : Nordsee 5,78 kg N(ges) ha ⁻¹ Ostsee 3,31 kg N(ges) ha ⁻¹	NH _x - und NO _y -Depo- sition (1 nautische Meile-Küstenzone)	5,2 kt NH _x -N 2,7 kt NO _y -N	(entf.)	(erforderl. Minderung ist Teil der erfor- derlichen Minderung für das Schutzgut terrestrische Ökosysteme)	
Oberflächengewässer (Eutrophierung von Küstengewässern)	Gesamt-N-Konzentration in Zuflüs- sen zur Nordsee 2,8 mg N L ⁻¹ ; Ost- see 2,6 mg N L ⁻¹	N(ges)-Fracht in Oberflächengewäs- sern	215,1 kt N(ges)- Fracht (DE ohne FGE Rhein und Do- nau)	215,1 N(ges)-Fracht	138,3 N(ges)	76,7 N(ges) Szenario B
Grundwasserqualität (NO ₃ -Konzentration)	Potenzielle NO ₃ -Konzentration im Sickerwasser max. 50 mg NO ₃ L ⁻¹	N-Überschuss Land- wirtschaftsflächen	973,4 kt N	973,4 N-Überschuss	599,7 N-Überschuss	373,7 N-Überschuss Ansatz mit hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019 n. Häußermann et al. 2019, bezogen auf die Gesamtfläche
Klima (THG-Emission)	Einhaltung der jährl. N ₂ O-Emissions- höchstmenge von 48,3 kt N ₂ O-N bis 2030 (n. KSG ^e)	N ₂ O-Emission	62,4 ^f kt N ₂ O-N	62,4 ^f N ₂ O-N	48,3 ^f N ₂ O-N	14,1 N ₂ O-N
Vegetation (beeinflusst durch NH ₃ -Konzentration)	Critical Level NH ₃ : in Kreisen mit Vorkommen N-empfindlicher Flech- ten und Moose (Kryptogamen) max. 1 µg NH ₃ m ⁻³ , sonst max. 3 µg NH ₃ m ⁻³	NH ₃ -Konzentration (Luft)	NH ₃ -Konz. > Criti- cal Level in 269 Kreisregionen	469,6 NH ₃ -N	115,9 NH ₃ -N Anforderungsniveau 90-Perzentil	353,7 NH ₃ -N
Menschliche Gesundheit (beeinflusst durch NO ₂ -Konzentration)	NO ₂ -Konzentration (Jahresmittel) max. 10 µg m ⁻³ Luft (WHO-Richtwert 2021) in der gesamten Kreisregion	NO ₂ -Konzentration (Luft)	Überschreitung von 10 µg m ⁻³ Luft in 250 Kreisregionen	343,4 NO _x -N ^g	132,3 NO _x -N ^h	211,0 NO _x -N ^h

^a Unterschiedliche Bezugsjahre: Ökosysteme und Vegetation: 2019; Menschliche Gesundheit: 2020; Klima: 2020; Oberflächengewässer: 2016-2018; Grundwasser: hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019, Sickerwasserrate 1961-1990.

^b Erforderliche Emissionsverminderung in Deutschland mit ausländischem Beitrag.

^c Die Obergrenzen der zulässigen N-Emissionen für die marinen Ökosysteme in Nordsee und Ostsee (1-nautische Meile-Küstenzone) wurden zusammen mit dem Schutzgut Terrestrische Ökosysteme berechnet.

^d CAI: Kritischer Atmosphärischer Input (Deposition) zum Schutz der marinen Ökosysteme vor Eutrophierung mit Stickstoff.

^e KSG (v. 18.08.2021); Neufassung (v. 26.04.2024) konnte während der Laufzeit des Projekts nicht berücksichtigt werden.

^f Diese Werte unterscheiden sich geringfügig von den Angaben in Tabelle 15: Die Summe der N₂O-Emission über die Gitterzellen nach GRETA entspricht nicht exakt der Wert, der sich aus dem KSG berechnet.

^g Wert unterscheidet sich geringfügig von Ist-Emission für Terrestrische Ökosysteme, da unterschiedliche Bezugsjahre.

^h Mit Verschlechterungsverbot in zwei Kreisregionen.

Für das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme tritt das Problem auf, dass die erforderliche Verminderung der NH_3 -Emission in 16 Kreisregionen größer ist als die Ist-Emission. Mit anderen Worten, mit einer regional differenzierten Ermittlung von Obergrenzen und Minderungsbedarf verbleibt eine geringfügige NH_3 -Minderungslücke ("negativer" Minderungsbetrag) von 4,4 kt N für NH_3 . Um diesen Betrag differieren daher in Tabelle 19 (Schutzgut Terrestrische Ökosysteme) und Tabelle 20 jeweils die "Ist-Situation" abzgl. "Obergrenze" von der "erforderliche Verminderung" für NH_3 .

Aus der Aggregation der zulässigen Emissionen und der erforderlichen Verminderungen in den 302 Kreisregionen für die verschiedenen reaktiven N-Verbindungen wird schließlich die nationale N-Obergrenze ermittelt (Tabelle 20).

Tabelle 20: Nationale Stickstoff-Obergrenze: Ist-Situation, Obergrenzen und erforderliche Verminderung der Emissionen^a von reaktiven Stickstoff-Verbindungen in Deutschland zur Einhaltung der Qualitätsziele^b der Schutzgüter mit regionalisierter Ermittlung.

Umweltbereich/ Schutzgüter	Stickstoff- Verbindung	Emission			
		Ist-Situation ^c	Obergrenze	Erforderliche Verminderung ^d	
		kt N a ⁻¹	kt N a ⁻¹	kt N a ⁻¹	%
Ökosysteme ^e , Vegetation	NH_3	470	83	391	83,2 %
Ökosysteme ^e , Menschl. Gesundheit	NO_x (als NO_2)	343	62	281	81,9 %
Klima	N_2O	62	48	14	22,7 %
Oberflächengewässer (Küstenmeere)	$\text{N}(\text{ges})$	215	138	77	35,7 %
Grundwasser	NO_3 (N-Überschuss LF)	973	600	374	38,4 %
Insgesamt		2.064	932	1.136^f	55,1 %

^a Werte auf kt N gerundet; rundungsbedingt können Summen-Differenzen auftreten

^b Qualitätsziele s. Tabelle 19.

^c Unterschiedliche Bezugsjahre: Ökosysteme und Vegetation: 2019; Menschliche Gesundheit: 2020; Klima: 2020; Oberflächengewässer: 2016-2018; Grundwasser: hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019, Sickerwasserrate 1961-1990.

^d Mit Verschlechterungsverbot: zulässige Emission = MIN[Emission(aktuell); zulässige Emission]

^e Terrestrische und marine Ökosysteme

^f Erforderl. Verminderung ist etwas größer als Emission abzgl. Obergrenze: für Schutzgut Terrestrische Ökosysteme ist erforderl. Verminderung in 16 Kreisregionen größer als Ist-Emission, es verbleibt NH_3 -Minderungslücke von 4 kt N.

Für NH_3 und NO_x wurden zunächst jeweils zwei Werte der zulässigen Emission und der erforderlichen Verminderung berechnet:

- NH_3 : für die Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme und Vegetation
- NO_x : für die Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme und Menschliche Gesundheit.

Im Aggregat der nationalen N-Obergrenze dürfen Emissionen und Minderungsbedarf für N-Verbindungen jedoch nicht doppelt gezählt werden, daher wird bei der Summation für die 302 Kreisregionen nur der jeweils *niedrigere* der beiden Werte der zulässigen NH_3 - bzw. NO_x -Emission und der *höhere* Wert der erforderlichen Verminderung berücksichtigt. In Tabelle 19 (letzte Spalte) wird die erforderliche Verminderung (summiert über die Kreise) für das betreffende Schutzgut zunächst unabhängig von der erforderlichen Verminderung für das jeweils andere

Schutzgut ausgewiesen, das von dieser N-Verbindung ebenfalls beeinträchtigt wird. Für die nationale N-Obergrenze (Tabelle 20) wird dann für jeden Kreis der *größere* der beiden Einzelwerte zur Minderungserfordernis für die beiden Schutzgüter summiert. Exemplarisch für NH_3 : die erforderliche Verminderung bei Ermittlung nur für Schutzgut Ökosysteme beträgt 326,2 kt N, bei Ermittlung nur für Schutzgut Vegetation 353,7 kt N. Beide Werte sind kleiner als die erforderliche Verminderung im nationalen Indikator von 390,6 kt N, für die der jeweils größere der beiden Kreiswerte summiert wird. Für NH_3 wird die erforderliche Minderung in 192 Kreisregionen von der höheren Anforderung an das Schutzgut Vegetation bestimmt, in 110 Kreisregionen durch die Anforderung des Schutzgutes Terrestrische Ökosysteme. Die erforderliche Verminderung für NO_x ergibt sich überwiegend durch das Schutzgut Terrestrische Ökosysteme, nur in 71 Kreisregionen ist die Anforderung an das Schutzgut Menschliche Gesundheit höher.

Mit Blick auf die einzelnen Stickstoffverbindungen ergibt sich für Ammoniak ein Minderungsbedarf in Höhe von rund 391 kt $\text{NH}_3\text{-N}$, welcher aus den Qualitätszielen für die Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme und Vegetation resultiert. Für Stickstoffoxide ergibt sich ein Minderungsbedarf von rund 281 kt $\text{NO}_x\text{-N}$, welcher aus den Qualitätszielen für die Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme und Gesundheit resultiert. Diese beiden Werte sind im Gegensatz zur Projekt-Prämisse, die Emissionsminderung allein im Inland zu erreichen, bereits mit Einbezug von Emissionsminderungen im Ausland berechnet (proportional zum ausländischen Anteil der Depositionen in Deutschland gemäß S-R-Tables; s. Kapitel A.2 3. Schritt).

In Anbetracht der hier berechneten Obergrenzen von 83 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ und 62 kt $\text{NO}_x\text{-N}$ erscheinen die Reduktionsverpflichtungen des 2. nationalen Luftreinhalteprogramms 2023 (UBA 2023b), wonach Emissionshöchstmengen von 353 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ und 161 kt $\text{NO}_x\text{-N}$ in 2030 nicht überschritten werden dürfen, als vollkommen unzureichend.

Für die übrigen Schutzgüter kann die erforderliche Verminderung durch Reduktion der Emissionen ausschließlich im Inland geleistet werden. Mit 973 kt N, entsprechend rund 47 % der gesamten nationalen Emission von reaktiven N-Verbindungen, stellt der hydrosphärische N-Überschuss (Mittel 2010 - 2019) der Landwirtschaftsflächen die größte Emissionsquelle dar. Zur Einhaltung einer potenziellen NO_3 -Konzentration im Sickerwasser von 50 mg $\text{NO}_3 \text{ L}^{-1}$ muss dieser N-Überschuss allerdings nur um 374 kt N (38 %) vermindert werden, was im Vergleich zum (relativen) Minderungsbedarf für NH_3 und NO_x ein realisierbarer Wert erscheint. Weiterhin ist anzumerken, dass die hydrosphärischen N-Flächenbilanzüberschüsse in Deutschland insgesamt in den Jahren 2021 und 2022 mit 531 bzw. 595 kt N deutlich niedriger waren als im Mittel 2010 bis 2019, so dass ein Teil der erforderlichen Verminderung bereits umgesetzt worden ist.

Mit rund 36 % liegt der relative Minderungsbedarf der N(ges)-Fracht in Oberflächengewässern in einer ähnlichen Größenordnung wie für Schutzgut Grundwasser. Da das Qualitätsziel der N(ges)-Konzentration im Rhein bereits eingehalten wird und für die Donau kein Qualitätsziel festgelegt wurde, betrifft die Minderungserfordernis nur die übrigen Flussgebiete in Deutschland mit einer Fläche von zusammen rund 194.200 km² (125 Kreisregionen), in denen der N(ges)-Eintrag um zusammen 77 kt N zurückgehen muss.

Der geringste absolute und relative Minderungsbedarf besteht für Schutzgut Klima, zur Einhaltung der sektorbezogenen Vorgaben des Klimaschutzgesetzes (v. 18.08.2021) müssen die N_2O -Emissionen nur um rund 23 % entsprechend 14 kt N gesenkt werden. Für das Schutzgut Menschliche Gesundheit wird der Minderungsbedarf in den meisten Kreisregionen (s.u.) bereits durch die Minderung für die Terrestrischen Ökosysteme abgedeckt.

Aufgrund des Verschlechterungsverbots wird in denjenigen Kreisregionen, in denen der Ist-Wert der Emission einer N-Verbindung niedriger ist als die zulässige Emission, der Ist-Wert als zulässige Emission übernommen. Dies betrifft für den N-Überschuss neun Kreisregionen, für NO_x

in Bezug auf das Schutzgut Menschliche Gesundheit zwei Kreise und für die N(ges)-Fracht einen Kreis.

Mit der Emissionsminderung von N-Verbindungen, abgeleitet aus der Erfordernis für ein bestimmtes Schutzgut, sind zum Teil auch Minderungen für andere Schutzgüter verbunden. So reduziert ein Rückgang der NH_x - und NO_y -Deposition auch den N-Überschuss auf Landwirtschaftsflächen und damit den potenziellen N-Eintrag in das Grundwasser. Auf längere Sicht sinkt dadurch auch die N-Fracht in die Küstenmeere, wenn der N-Eintrag aus dem Grundwasser in die Oberflächengewässer zurückgeht. Diese Wirkungskette wurde bei der Summation allerdings nicht berücksichtigt. In Anbetracht der im Regelfall längeren Reaktionszeit des Grundwassers auf Änderungen der N-Einträge werden derartige trade off-Effekte, im Hinblick auf die Aussagekraft der N-Obergrenze, als vernachlässigbar angesehen.

Auf der anderen Seite wurde durch ausschließliche Einbeziehung des hydrosphärischen N-Überschusses für die Einhaltung des Nitrat-Qualitätsziels im Grundwasser (Kapitel 4) sichergestellt, dass die Emissionsminderungen von Ammoniak, NO_x und Lachgas, die sich durch Verminderung des Gesamtüberschusses in der Landwirtschaft ebenso als trade off ergeben, nicht doppelt gezählt wurden. NH_3 wird ausschließlich in den Kapiteln 2 und 6, NO_x ausschließlich in den Kapiteln 2 sowie 7, und Lachgas ausschließlich in Kapitel 5 behandelt.

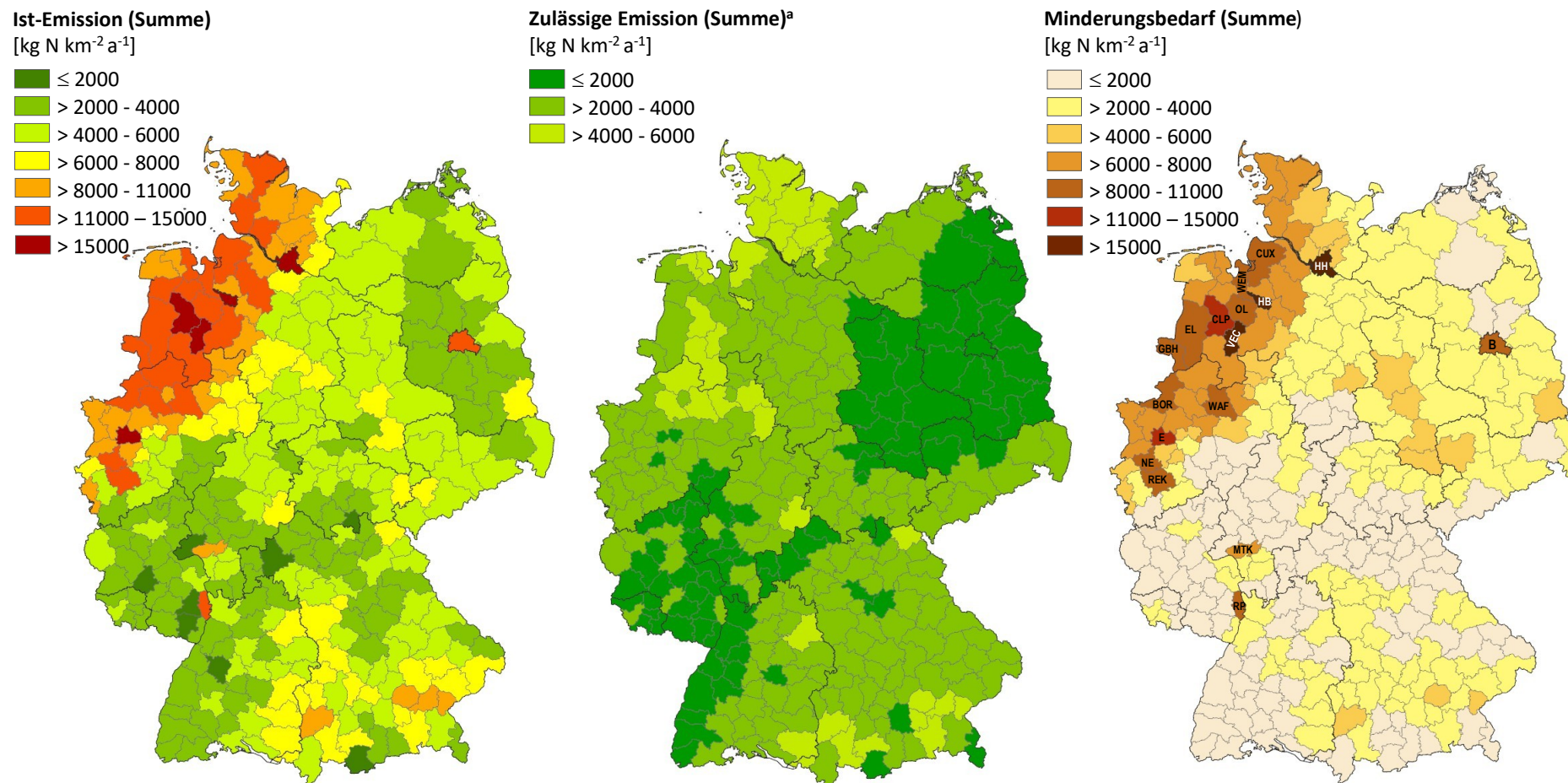
Minderungsbedarf in den Kreisregionen

Abbildung 40 zeigt die Ist-Situation, die zulässigen Emissionen (Obergrenzen) und die erforderliche Verminderung der Emissionen zur Einhaltung der Qualitätsziele in der Summe der reaktiven Stickstoff-Verbindungen für die Kreisregionen, die Einzelwerte sind in Tabelle 44 (Anhang A.8) aufgeführt. In Abbildung 40 werden die Größen jeweils flächenbezogen (kg N km^{-2}) dargestellt, damit der Vergleich zwischen Kreisregionen nicht durch die unterschiedliche Größe überprägt wird.

In den meisten der 302 Kreisregionen ist die flächenbezogene Gesamt-Minderungserfordernis sehr gering (bis $2000 \text{ kg N km}^{-2}$ entsprechend 20 kg N ha^{-1}) oder gering (2000 bis $<4000 \text{ kg N km}^{-2}$); die Fläche dieser Kreise umfasst rund 79 % der Gesamtfläche Deutschlands. Für die 16 Kreisregionen mit einem hohen bis sehr hohen flächenbezogenen Minderungsbedarf insgesamt (mehr als $8000 \text{ kg N km}^{-2}$) ist in Tabelle 45 (Anhang A.8) der Minderungsbedarf der einzelnen N-Verbindungen aufgeführt. In den landwirtschaftlich geprägten Kreisen mit hoher Viehbesatzdichte bilden die Beeinträchtigungen der Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme und Vegetation durch NH_3 - und Grundwasser durch NO_3 -Emissionen (N-Überschuss) die Hauptbelastungen. Der Kreis Vechta (Kürzel VEC in Abbildung 40) weist dabei mit 169 kg N ha^{-1} den größten flächenbezogenen Minderungsbedarf aller Kreisregionen in Deutschland auf, wovon 99 kg N ha^{-1} (59 %) auf die Verminderung der NH_3 -Emission und 51 kg N ha^{-1} (30 %) auf die Reduzierung des N-Überschuss (NO_3) entfallen. Auch in den weiteren Kreisen mit hohem Viehbesatz (Cloppenburg [CLP], Grafschaft Bentheim [GBH], Oldenburg [OL], Emsland [EM], Borken [BOR], Wesermarsch [WEM], Cuxhaven [CUX] und Warendorf [WAF]) dominieren die landwirtschaftlichen NH_3 - und NO_3 -Emissionen mit zusammen mit 82 % bis 92 % den Gesamt-Minderungsbedarf.

Daneben zeigen auch eine Reihe von Großstädten bzw. urban geprägten Kreisregionen einen hohen bis sehr hohen flächenbezogenen Minderungsbedarf, der dort auf die NO_x -Emissionen aus Verkehr und Industrie zurückzuführen ist. In Hamburg, Bremen und Berlin kommt außerdem auch ein gewisser Minderungsbedarf für die N(ges)-Fracht (Schutzgut Oberflächengewässer), das heißt für die Einträge aus der Siedlungswasserwirtschaft, in Höhe von 15 % bis 22 % des gesamten Minderungsbedarfs hinzu.

Abbildung 40: Emissionen (Ist-Situation), zulässige Emissionen^a (Obergrenzen) und erforderliche Verminderung der Emissionen in den Kreisregionen^b zur Einhaltung der Qualitätsziele der Schutzgüter - Summe der reaktiven Stickstoff-Verbindungen.



^a Zur Verdeutlichung der Relation zwischen Ist-Emissionen, zulässigen Emissionen und Minderungsbedarf ist die Klasseneinteilung für alle drei Kartendarstellungen einheitlich.

^b Auf die Kurzbezeichnungen der Kreise/Kreisregionen mit dem höchsten Minderungsbedarf wird in Tabelle 45 Bezug genommen.

Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Für das Flussgebiet des Rheins besteht kein Minderungsbedarf für die N(ges)-Fracht (s. Kapitel 3.3). In den urbanen Kreisregionen im Rhein-Gebiet mit hohem Minderungsbedarf wird der Minderungsbedarf daher mit 80 % bis 94 % fast ausschließlich durch die NO_x-Emissionen bestimmt (Kreisregionen Essen [E] mit Duisburg, Mülheim, Oberhausen; Neuss [NE] mit Mönchengladbach; Rhein-Erft-Kreis [REK] mit Köln; s. Tabelle 45).

Zwei Kreisregionen fallen durch einen hohen Minderungsbedarf in einer Umgebung mit ansonsten niedrigem bis sehr niedrigem Bedarf ins Auge. In der Kreisregion Main-Taunus-Kreis (MTK; Minderungsbedarf 70 kg N ha⁻¹) ist das auf die Städte Frankfurt a.M. (mit dem Rhein-Main-Airport) und Wiesbaden zurückzuführen, die zur Region MTK gehören. Die Kreisregion Rhein-Pfalz-Kreis (RP) umfasst auch die Stadt Ludwigshafen mit dem Industriestandort BASF, in dieser Region ist außerdem auch die Landwirtschaft durch einen vergleichsweise hohen Minderungsbedarf infolge des hohen Anteils von Feldgemüseanbau (mit hohen N-Überschüssen) gekennzeichnet. Weiterhin wird für diese Kreisregion auch der größte N₂O-Minderungsbedarf in Deutschland in Höhe von 8 kg N ha⁻¹ ausgewiesen.

Vergleich mit DESTINO

Der Zielwert des nationalen Stickstoffindikators des DESTINO-Projekts entspricht inhaltlich der nationalen N-Obergrenze des vorliegenden Projekts. Im Vergleich zum Vorläuferprojekt DESTINO (DEutsche STickstoffflüsse, Indikatoren und Objectives), in dem ein nationaler Stickstoff-Indikator *ohne* regionalisierte Obergrenzen berechnet wurde, sind deutliche Unterschiede in den Ergebnissen festzustellen. Mit 2.064 kt N ist die Ist-Emission der vorliegenden Berechnung rund 30 % größer als die Ist-Emission von 1.574 kt N nach DESTINO (Heldstab et al. 2020). Das ist vor allem darauf zurückzuführen, dass in DESTINO für Schutzgut Grundwasser nur der N-Überschuss von 148 kt N in diejenigen Rasterzellen berücksichtigt wurde, in denen eine Überschreitung der Nitratkonzentration im Sickerwasser auftritt, während im vorliegenden Projekt der N-Überschuss auf der gesamten Landwirtschaftsfläche in Höhe von 973 kt N in die nationale Emissionssumme aufgenommen wird. Umgekehrt wurde in DESTINO beim Schutzgut Oberflächengewässer das Flussgebiet Rhein noch einbezogen, während im Bezugszeitraum des vorliegenden Projekts für dieses FGE kein Minderungsbedarf mehr besteht. Die Emissionsmengen der luftgetragenen N-Verbindungen sind zwischen dem DESTINO-Bezugsjahr (NH₃, N₂O und NO_x: Jahr 2015) und der hier vorgestellten Berechnung (Bezugsjahre 2019 bzw. 2020) bereits weiter zurückgegangen.

Für die zulässigen Emissionen (Obergrenzen) werden im vorliegenden Projekt mit Berechnung auf regionaler Basis (Kreisregionen) und mit weitreichenderen Qualitätszielen teilweise erheblich niedrigere N-Mengen ermittelt als auf ausschließlich nationaler Basis in DESTINO. Am stärksten betrifft dies die zulässige NH₃-Emission, für die in DESTINO noch 402 kt N angegeben wurde, während der Wert im vorliegenden Ansatz nur noch 83 kt N beträgt. Auch die zulässige NO_x-Emission wird von 168 kt N auf jetzt 62 kt N reduziert.

Tabelle 21: Ergebnisse des nationalen Stickstoffindikators^a im DESTINO-Projekt: Ist-Zustand und niedrigster Zielwert der Emissionen von reaktiven Stickstoff-Verbindungen in Deutschland^b (Bezugsjahr 2015; Heldstab et al. 2020, Tabelle 12).

Schutzgüter	DESTINO-Teilindikatoren		
	Stickstoffspezies	IST-Zustand kt N	niedrigster Zielwert kt N
Terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung	Summe NH ₃ - und NO _x -Emissionen	625 kt NH ₃ -N a ⁻¹ 361 kt NO _x -N a ⁻¹	402 kt NH ₃ -N a ⁻¹ 168 kt NO _x -N a ⁻¹
Oberflächengewässer	TN-Fracht	356 kt TN a ⁻¹	314 kt TN a ⁻¹
Grundwasser	N-Überschuss/Nitrat	148 kt N a ⁻¹	127 kt N a ⁻¹
Klimaschutz	N ₂ O-Emissionen	83 kt N ₂ O-N a ⁻¹	48 kt N ₂ O-N a ⁻¹
Integrierter Stickstoff-Indikator^a		1.574 kt N a⁻¹ (149 %)	1.058 kt N a⁻¹ (100 %)
unberücksichtigt blieben (höhere Zielwerte)			
Terrestrische Ökosysteme / Biologische Vielfalt	NH ₃ -Emissionen	625 kt NH ₃ -N a ⁻¹	441 kt NH ₃ -N a ⁻¹
Menschliche Gesundheit	NO _x -Emissionen	361 kt NO _x -N a ⁻¹	236 kt NO _x -N a ⁻¹

^a Der Zielwert des nationalen Stickstoffindikators des DESTINO-Projekts entspricht inhaltlich der nationalen N-Obergrenze des vorliegenden Projekts.

^b Ermittlung erfolgte auf der nationalen Ebene, ohne Regionalisierung.

Die Werte der zulässigen Emission für die Oberflächengewässer sind aufgrund des unterschiedlichen Flächenbezugs (mit vs. ohne FGE Rhein) nicht vergleichbar. Ebenso ist eine Gegenüberstellung der zulässigen Emissionen in das Grundwasser aufgrund des unterschiedlichen Einbezug der Raster ohne Überschreitung des Qualitätsziels nicht möglich. Während in DESTINO als erforderliche Verminderung in der Summe aller N-Spezies noch rund 500 kt N angegeben wurden (siehe Tabelle 21), erhöht sich dieser Wert mit dem hier verfolgten Ansatz auf 1.136 kt N (Tabelle 20), was rund 55 % der aktuellen N_r-Emissionen entspricht.

Fazit und Anmerkungen

Mit der Entwicklung einer nationalen Obergrenze für reaktiven Stickstoff, ermittelt aus regional differenzierten Obergrenzen für einzelne Schutzgüter, wird zum Teil methodisches Neuland betreten. Nach Kenntnisstand der Autorinnen und Autoren ist dies international der erste Versuch, in einer gemeinsamen Auswertung für alle N-sensiblen Schutzgüter und alle relevanten N-Verbindungen die Höhe und die räumliche Verteilung der Überschreitung der Qualitätsziele dieser Schutzgüter mit einer räumlichen Auflösung unterhalb der nationalen Ebene darzustellen. Infolge der kurzen Projektlaufzeit, der methodischen Einschränkungen und der begrenzten Datenverfügbarkeit besteht dafür in einigen Bereichen noch Raum für Verbesserungen.

Der methodische Entwicklungsstand und die Komplexität der Ansätze, mit denen die erforderlichen Emissionsminderungen für die sieben Schutzgüter ermittelt wurden, unterscheiden sich erheblich voneinander. Modelle wie bspw. das im vorliegenden Projekt verwendete Modell MoRE, mit denen für die WRRL-Zustandserfassung und Maßnahmenbewertung die N-Einträge und N-Frachten in die Binnengewässer berechnet werden, sind seit mehr als 20 Jahren in Deutschland eingeführt und werden kontinuierlich weiterentwickelt. Für dieses Schutzgut liegt eine fachlich sehr gut abgesicherte methodische Basis vor. In Bezug auf die Nitratbelastung des Grundwassers fehlt es jedoch, trotz mehr als 30 Jahren "Nitratproblem", weiterhin an einem belastbaren Ansatz zur Prognose der Nitratkonzentration im Grundwasser. Für die Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme und Vegetation wurde mit den S-R-Tables als zentralem Instrument zur Verknüpfung

der regionalen NH_3 - und NO_x -Emissionen mit den NH_x - und NO_y -Depositionen im Rahmen des Projekts ein Berechnungsverfahren entwickelt, das in dieser Form mutmaßlich ein Novum darstellt. Die Umlegung der N_2O -Minderungsanforderung aus dem Klimaschutzgesetz in die Fläche ist dagegen im Prinzip eine einfache Dreisatzrechnung.

Die räumliche Auflösung der maßgeblichen Eingangsgrößen ist außerordentlich heterogen. Für die luftgetragenen N-Verbindungen sind die Emissions- und Depositionsraten sowie Luft-Konzentrationen in Form der PINETI-4- und GRETA-Daten mit 1 km^2 -Auflösung verfügbar. Die Verteilung der Empfindlichkeit der Terrestrischen Ökosysteme und der Vegetation kann mit den Datensätzen zu Critical Load und Critical Level mit der gleichen räumlichen Genauigkeit analysiert werden.

Für die Ermittlung der erforderlichen Verminderung der NH_3 - und NO_x -Emissionen steht dieser sehr hohen Auflösung der primären Größen jedoch eine unzureichende Abbildungsschärfe der Quellen-Senken-Beziehungen gegenüber. Die S-R-Tables lagen im Projekt nur auf Ebene der Bundesländer vor. Die Verteilung der erforderlichen Emissionsvermindierungen auf die Kreisregionen auf dieser Basis kann nur als eine erste Näherung an die tatsächliche Situation betrachtet werden. Gerade für die ökologisch am stärksten betroffenen Schutzgüter Terrestrische Ökosysteme und Vegetation stellen somit die Ergebnisse zur Höhe und zur räumlichen Verteilung der erforderlichen Emissionsminderung mit Raumbezug Kreisregionen mutmaßlich nur Anhaltswerte dar. Für weiterführende Projekte ist anzuregen, dass die Emissions-Immissions-Beziehungen, ähnlich wie in einer Umweltverträglichkeitsprüfung, mit räumlich hochauflösenden Programmen modelliert wird. Für die NH_3 -Emissionen wären dabei auch landwirtschaftliche Stallanlagen als Punktquellen zu betrachten. Für den atmosphärischen Ferntransport von NH_3 und NO_x sind S-R-Tables mit höherer Auflösung unabdingbar.

Als Gebietskulisse für die Aggregation der Ist-Emission, der Obergrenze und der erforderlichen Verminderung sind im Projekt die Kreisregionen festgelegt worden, da die Größe N-Flächenbilanzüberschuss (n. Häußermann et al. 2019) - als maßgeblicher Faktor der Nitratbelastung des Grundwassers - zu Projektbeginn nur für diese Einheiten verfügbar war. Kreisregionen stellen mit einer durchschnittlichen Größe von rund 1.200 km^2 jedoch bereits relativ große Betrachtungseinheiten dar, innerhalb derer sehr heterogene Emissionsverhältnisse auftreten können.

Insbesondere in Bezug auf das Schutzgut Menschliche Gesundheit sind die Kreisregionen (als Zusammenfassung von i.d.R. einem Stadtkreis mit dem umgebenden Landkreis) eine eher ungünstige Bezugseinheit. Für Kreisregionen werden die meist hohen NO_x -Emission und -Konzentrationen im urbanen Bereich (Stadtkreis) gemittelt mit den eher niedrigen Werten im ländlichen Umfeld (Landkreis). Dadurch wird für die Aggregationseinheit der Kreisregion eine geringere erforderliche Verminderung ausgewiesen, als dies bei separater Berechnung für den Stadtkreis der Fall wäre.

Für die Ermittlung einer nationalen N-Obergrenze ist die Zusammenfassung der Ergebnisse zu den einzelnen N-Verbindungen bzw. Schutzgütern für eine gemeinsame räumliche Einheit (unterhalb der nationalen Ebene) nicht zwingend erforderlich. Es ist problemlos möglich, die Berechnungen für jede N-Verbindung bzw. für jedes Schutzgut auf der jeweils adäquaten Maßstabsebene durchzuführen (bspw. Binnengewässer: MoRE-AU's, N-Überschuss: Gemeinden; Luftschadstoffe: 1 km^2 -Raster, unbeschadet der Einschränkungen der räumlichen Auflösung, die durch die S-R-Tables bedingt werden). Die Resultate werden dann für die nationale N-Obergrenze für das Bundesgebiet summiert, parallel dazu können die Werte für beliebige andere Gebietszuschnitte zusammengefasst werden. Für die flächenbezogenen Ergebnisdarstellungen wurde im vorliegenden Projekt die Aggregation für die Kreisregionen gewählt, um einen einheitlichen und visuell vergleichbaren Raumbezug für die Ergebnisgrößen zu verwenden.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zu N-Obergrenzen und Minderungsbedarf gelten nur unter den dargestellten Rahmenbedingungen, mit den getroffenen Modellannahmen und für die jeweiligen Bezugsjahre. Mit jeder Änderung von Qualitätszielen, Änderungen in den Emissions- und/oder Depositionsraten von reaktiven N-Verbindungen sowie Änderungen der verwendeten Verfahren bzw. Modelle ändern sich auch die Ergebnisse. Die Interpretation sollte sich daher weniger auf die absoluten Werte fokussieren als vielmehr darauf, die am stärksten betroffenen Schutzgüter, die N-Verbindungen mit den größten Minderungserfordernissen und die Regionen mit den größten Überschreitungen von Qualitätszielen, das heißt mit dem größten Handlungsbedarf zu identifizieren.

10 Quellenverzeichnis

- Aubrecht, E. L., Balzer, F., Biewald, A., Bilharz, M., Bünger, B. et al. (2021): Daten zur Umwelt. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 116 S. Bach, M. (2020): Nitratbelastung des Grundwassers in Deutschland - Ist das Messnetz schuld? In: *WasserWirtschaft*, 6, S. 12 – 17.
- AVV GeA. (2020). Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten (AVV Gebietsausweisung). Vom 3. November 2020. BAnz AT 10.11.2020 B4, S. 1-17.
- Bach, M., Häußermann, U., Klement, L., Knoll, L., Breuer, L., Weber, T., Fuchs, S. (2020): Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010-2014 (DESTINO Bericht 2). Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, UBA-Texte 64/2020, 164 S.
- Bach, M. (2020): Nitratbelastung des Grundwassers in Deutschland - Ist das Messnetz schuld? *Wasserwirtschaft* 6/2020, 12-17.
- Bach, M., Kanig, M. Beisecker, R. (2025): National Nitrogen Budget: Fortschreibung des nationalen Stickstoff-Inventars für die Jahre 2015 - 2020. Umweltbundesamt, UBA-Texte (im Druck), Dessau-Roßlau.
- Bach, M., Klement, L. Häußermann, U. (2016): Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von Nitratreinträgen in die Gewässer auf Basis regionalisierter Stickstoff-Überschüsse. Zwischenbericht. Umweltbundesamt, UBA-Texte 55/2016, Dessau-Roßlau, 51 S.
- Behrendt, H., Huber, P., Kornmilch, M., Opitz, D., Schmoll, O. et al. (1999): Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands. Umweltbundesamt, Texte 75/1999, Dessau, 386 S.
- Beisecker, R. Evers, J. (2012): Diffuse Stoffausträge aus Wald und naturnahen Nutzungen. Abschlussbericht. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Kassel, Göttingen, 132 S.
- Brenning, A. (2024). Evaluierung und Weiterentwicklung der Regionalisierungsverfahren zur Ausweisung nitratbelasteter Gebiete nach AVV GeA in Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (UBA), UBA-Texte 67/2024, 54 S.
- Biewald, A., Gniffke, P. Fuß, R. (2022): Prozentuale Sektorziele ermöglichen mehr Klimaschutz - das aktuelle Fallbeispiel Landwirtschaft. Umweltbundesamt, Fact Sheet, Dessau-Roßlau, 8 S.
- Bobbink, R., Loran, C., Tomassen, H., Aazem, K., Aherne, J. et al. (2022): Review and revision empirical critical loads of nitrogen for Europe. Umweltbundesamt, Texte 110/2022, Dessau-Roßlau, 358 S.
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) [Hrsg.] (2020): Dokumentation Geographische Gitter für Deutschland- GeoGitter, Leipzig.
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) [Hrsg.] (2022): Dokumentation CORINE Land Cover 5 ha - CLC5 (2018). https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/clc5_2018.pdf (26.06.2023).
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [Hrsg.] (2003a): Mittlere jährliche Grundwasserneubildung von Deutschland 1:1.000.000 (GWN1000), Hannover.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [Hrsg.] (2003b): Mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden in Deutschland 1:1.000.000 (SWR1000_250), Hannover.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [Hrsg.] (2013a): Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK1000). https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/EN/Themen/Boden/Produkte/produktkatalog_node_en.html
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [Hrsg.] (2013b): Hydrogeologische Karten für den Hydrologischen Atlas von Deutschland - Hydrogeologische Regionen (HYREG1000). https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/Beratung/Had/had_projektbeschr.html
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [Hrsg.] (2014): Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK1000N) für Deutschland (Wald, Grünland, Acker), Hannover.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [Hrsg.] (2015): Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/EN/Themen/Boden/Produkte/produktkatalog_node_en.html

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [Hrsg.] (2022): HÜK250 - Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland 1:250.000. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/laufend/Beratung/Huek200/huek200_projektbeschr.html

Bundesministerien für Ernährung und Landwirtschaft sowie für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMEL und BMUNV) (2025): 5. Monitoringbericht zur Wirkung der Düngeverordnung auf das Grundwasser und die Oberflächengewässer. Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) [Hrsg.] (2017): Stickstoffeintrag in die Biosphäre. Erster Stickstoff-Bericht der Bundesregierung., Berlin, 24 S.

Bund-Länder-Fachgespräch Stickstoffbilanz (FGNB) [Hrsg.] (2017): Klärung der Anforderungen an die Stickstoffbilanzierung - Grundlagen und Methodik der Critical Levels, Critical Loads und Critical Surplus zur flächendeckenden Bewertung des Stickstoffhaushalts (CS-Bericht 2017), Karlsruhe, 2 S.

Campolongo, F., Cariboni, J. Saltelli, A. (2007): An effective screening design for sensitivity analysis of large models. In: *Environmental Modelling & Software*, 22, 10, S. 1509 – 1518.

CLRTAP (2024): Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks, and Trends - Update 2024. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, UBA-Texte 123/2024.

Deutscher Wetterdienst (DWD) [Hrsg.] (2012): Mittlere Tagesmitteltemperatur und Jahresniederschlagssummen der Referenzperiode 1981 - 2010 für Sommer und Winter. Rasterdatei.

Dreisbach, N., Bach, M., Häußermann, U., Breuer, L., Döhler, H. et al. (in Vorbereitung): Entwicklung eines Modells zur Bewertung von THG-Minderungsmaßnahmen im Sektor Landwirtschaft (E-MoLL). Schlussbericht, Texte, Dessau-Roßlau.

Drucksache 20/11183 (2024) (24.04.2024): Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Klimaschutz und Energie (25. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksachen 20/8290, 20/8670 – Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes.

Fuchs, S., Brecht, K., Gebel, M., Bürger, S., Uhlig, M. Halbfaß, S. (2022): Phosphoreinträge in die Gewässer bundesweit modellieren. Abschlussbericht. Umweltbundesamt, Texte 142/2022, Dessau-Roßlau, 149 S.

Fuchs, S., Kaiser, M., Kiemle, L., Kittlaus, S., Rothvoß, S. et al. (2017a): Modeling of Regionalized Emissions (MoRE) into Water Bodies: An Open-Source River Basin Management System. In: *Water*, 9, 4, S. 239.

Fuchs, S., Rothvoß, S. Toshovski, S. (2018): Ubiquitäre Schadstoffe – Eintragsinventare, Umweltverhalten und Eintragsmodellierung. Abschlussbericht. Umweltbundesamt, Texte 52/2018, Dessau-Roßlau, 137 S.

Fuchs, S., Scherer, U., Wander, R., Behrendt, H., Venohr, M. et al. (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS. Umweltbundesamt, Texte 45/2010, Dessau-Roßlau, 243 S.

Fuchs, S., Weber, T., Wander, R., Toshovski, S., Kittlaus, S. et al. (2017b): Effizienz von Maßnahmen zur Reduktion von Stoffeinträgen. Endbericht. Umweltbundesamt, UBA-Texte 05/2017, Dessau-Roßlau, 385 S.

Geupel, M., Heldstab, J., Schäppi, B., Reutimann, J., Bach, M. et al. (2021): A National Nitrogen Target for Germany. In: *Sustainability*, 13, 3, S. 1121.

Häußermann, U., Bach, M., Klement, L. Breuer, L. (2019): Stickstoff-Flächenbilanzen für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise - Jahre 1995 bis 2017. Umweltbundesamt, UBA-Texte 131/2019, Dessau-Roßlau, 167 S.

- Häußermann, U., Dreisbach, N., Bach, M., Breuer, L. (unveröff.): Evaluierung der novellierten Düngegesetzgebung auf deren Umwelt- und Klimawirkung - DÜNGEval. Abschlussbericht (UBA FKZ 3718 72 2180). Umweltbundesamt, Texte, Dessau-Roßlau (in Vorbereitung).
- Heldstab, J., Schäppi, B., Reutimann, J., Bach, M., Häußermann, U. et al. (2020): Integrierter Stickstoffindikator, nationales Stickstoffziel und IST-Zustand (DESTINO Teilbericht 1). Umweltbundesamt, Texte 96/2020, Dessau-Roßlau, 124 S.
- Kiemle, L., Wagner, A., Hüsener, J., Fuchs, S., Henning, K., Haile, C. (2019): Modellierung der Nährstoffeinträge in die Fließgewässer Baden-Württembergs für die Aktualisierung der Bewirtschaftungspläne nach WRRL (unveröff.). Institut für Wasser und Umwelt, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT).
- Knoll, L., Bach, M., Häußermann, U., Breuer, L., Morling, K. et al. (2024): Stickstoffreduktion in der ungesättigten Zone und im Grundwasser - Grundlage für die Modellierung des Stickstoff-Eintrags in Oberflächengewässer. Forschungsbericht, Universität Gießen, 92 S.
- Knoll, L., Breuer, L., Bach, M. (2019): Large scale prediction of groundwater nitrate concentrations from spatial data using machine learning. In: *The Science of the total environment* ,668, S. 1317 – 1327.
- Knoll, L., Breuer, L., Bach, M. (2020): Nation-wide estimation of groundwater redox conditions and nitrate concentrations through machine learning. In: *Environ. Res. Lett.* ,15, 6, S. 64004.
- Kranenburg, R. et al. (2024): PINETI-4: Modelling and assessment of acidifying and eutrophying atmospheric deposition to terrestrial ecosystems. Umweltbundesamt, Texte in print, Dessau-Roßlau.
- Kranenburg, R., Schaap, M., Coenen, P. (2022): Origin of nitrogen deposition to the German North and Baltic Sea. (PINETI-IV appendix). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, (unveröffentlicht).
- Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) [Hrsg.] (2015): Abschätzung der erforderlichen Reduzierung von Nährstoffeinträgen in die Fließgewässer Baden-Württembergs. Unter Mitarbeit von Uwe Bergdolt und Kurt Henning, 2015.
- LAWA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser [Hrsg.] (2017): Empfehlung zur Übertragung flussbürtiger, meeresökologischer Reduzierungsziele ins Binnenland. Ständiger Ausschuss "Oberirdische Gewässer und Küstengewässer", Potsdam.
- LAWA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2019): Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten. Abschlussbericht. Förderprogramm der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 92 S.
- Mathivanan, G. P., Eysholdt, M., Zinnbauer, M., Rösemann, C., Fuß, R. (2021): New N₂O emission factors for crop residues and fertiliser inputs to agricultural soils in Germany. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* ,322, S. 107640.
- Morling, K., Fuchs, S. (2021): Modelling copper emissions from antifouling paints applied on leisure boats into German water bodies. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* ,289, S. 117961.
- Morling, K., Fuchs, S., Krumm, J., Haag, I. (2024): Zusammenführung der bundesweiten Modellierung von Wasserhaushalt (LARSIM-ME) und Stoffeinträgen (MoRE). Abschlussbericht. Umweltbundesamt, Texte 37/2024, Dessau-Roßlau, 133 S.
- Morris, M. D. (1991): Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. In: *Technometrics* ,33, 2, S. 161 – 174.
- Oelmann, M., Rubel, C., Klaas, K., Nunes-Heinzmann, A. C., Schäppi, B. et al. (2021): Maßnahmenvorschläge für ein Aktionsprogramm zur integrierten Stickstoffminderung. Umweltbundesamt, Texte 78/2021, Dessau-Roßlau.
- Ohlert, P. L., Bach, M., Breuer, L. (2023a): Accuracy assessment of inverse distance weighting interpolation of groundwater nitrate concentrations in Bavaria (Germany). In: *Environmental science and pollution research international* ,30, 4, S. 9445 – 9455.
- Ohlert, P. L., Bach, M., Breuer, L. (2023b): Verfahren zur Regionalisierung der Nitratkonzentration im Grundwasser. In: *HyWa* ,67, 1, S. 20 – 33.

Petersen, B., Ellwanger, G., Biewald, G., Hauke, U., Ludwig, G., Pretscher, P., Schröder, E., Ssymank, A. (2003): Das europäische Schutzgebietssystem Natura 2000. Ökologie und Verbreitung von Arten der FFH-Richtlinie in Deutschland. Band 1: Pflanzen und Wirbellose. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz 69(1), S. 221-232; Bonn-Bad Godesberg (Landwirtschaftsverlag).

Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) [Hrsg.] (2015): Stickstoff-Lösungsstrategien für ein dringendes Umweltproblem. Kurzfassung, Berlin, 12 S.

Schaap, M., Hendriks, C., Kranenburg, R., Kuenen, J., Segers, A. et al. (2018): PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland. Umweltbundesamt, UBA-Texte 79/2018, Dessau-Roßlau, 149 S.

Schlutow, A., Kraft, P., Scheuschner, T., Schlutow, M., Schröder, W. (2024): Bioindication for Ecosystem Regeneration towards Natural conditions: the BERN data base and BERN model. In: *Environ Sci Eur*, 36, 1,

Schlutow, A., Nagel, H.-D., Bouwer, Y. (2018): Critical Load Daten für die Berichterstattung 2015 - 2017 im Rahmen der Zusammenarbeit unter der Genfer Luftreinhaltekonvention (CLRTAP). Umweltbundesamt, Texte 60/2018, 156 S.

Schneider, A., Cyrys, J., Breitner, S., Kraus, U., Peters, A. et al. (2018): Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland. Umweltbundesamt, Umwelt & Gesundheit 01/2018, Dessau-Roßlau, 172 S.

Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2015): Bodenbedeckungsdaten für Deutschland CORINE 2012. (Copyright: BKG/Geobasis-DE), Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2016): ArcGIS basierte Lösung zur detaillierten, deutschlandweiten Verteilung (Gridding) nationaler Emissionsjahreswerte auf Basis des Inventars zur Emissionsberichterstattung, Texte 71/2016, Dessau-Roßlau, 222 S.

Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2017): Hintergrundbelastungsdaten Stickstoffdeposition - Ergebnisse und Daten des PINETI-3-Projekts., Erläuterungen des Umweltbundesamtes und Antworten auf FAQ, die im Rahmen eines Fachgesprächs am 24. Oktober 2017 an das UBA gerichtet wurden.
<https://gis.uba.de/website/depo1/data/4f25b5c21b8ceb185525.pdf> (19.07.2024).

Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2018): German Informative Inventory Report 2018, (IIR 2018). <http://iir-de-2018.wikidot.com/>.

Umweltbundesamt (UBA) [Hrsg.] (2021): Stickstoff - Element mit Wirkung. Ein integrierter Zielwert setzt einen neuen Rahmen., Hintergrund, Dessau-Roßlau, 30 S.

Umweltbundesamt (UBA) (2022): Luftqualität 2021. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 34 S.

Umweltbundesamt (UBA) (2023a): Darstellung der flächenhaften Immissionsbelastung in Deutschland aus einer Kombination von Messung und Rechnung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (Stand: 29.08.2023)
(https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/12969/dokumente/uba_factsheet_rcg_oi.pdf)

Umweltbundesamt (UBA) (2023b): Nationales Luftreinhalteprogramm der Bundesrepublik Deutschland 2023. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/240515_nationales_luftreinhalteprogramm_de_final_barr.pdf (22.01.2025).

Velthof, G. L., Oudendag, D., Witzke, H. P., Asman, W. A. H., Klimont, Z., Oenema, O. (2009): Integrated assessment of nitrogen losses from agriculture in EU-27 using MITERRA-EUROPE. In: *Journal of environmental quality*, 38, 2, S. 402 – 417.

Venohr, M. (2006): Modellierung der Einflüsse von Temperatur, Abfluss und Hydromorphologie auf die Stickstoffretention in Flusssystemen, Berliner Beiträge zur Ökologie Band 4, Weißensee-Verlag Ökologie, Stuttgart, 193 S.

- Venohr, M., Hirt, U., Hofmann, J., Opitz, D., Gericke, A. et al. (2009): Das Modellsystem MONERIS. Leibniz Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei im Forschungsverbund Berlin e. V., Berlin, 128 S.
- Venohr, M., Hirt, U., Hofmann, J., Opitz, D., Gericke, A. et al. (2011): Modelling of Nutrient Emissions in River Systems - MONERIS - Methods and Background. In: *International Review of Hydrobiology*, 96, 5, S. 435 – 483.
- Vries, W. de, Schulte-Uebbing, L., Kros, H., Voogd, J. C. Louwagie, G. (2021): Spatially explicit boundaries for agricultural nitrogen inputs in the European Union to meet air and water quality targets. In: *The Science of the Total Environment*, 786, S. 147283.
- Wendland, F., Bergmann, S., Eisele, M., Gömann, H., Herrmann, F. et al. (2020): Model-Based Analysis of Nitrate Concentration in the Leachate—The North Rhine-Westfalia Case Study, Germany. In: *Water*, 12, 2, S. 550.
- World health organization (WHO) [Hrsg.] (2021): WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5}) and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Genf.
- Zinnbauer, M., Eysholdt, M., Henseler, M., Herrmann, F., Kreins, P. et al. (2023): Quantifizierung aktueller und zukünftiger Nährstoffeinträge und Handlungsbedarfe für ein deutschlandweites Nährstoffmanagement – AGRUM-DE, Thünen Report 108, Braunschweig, 454 S.

A Anhänge

A.1 Anhang zu Aufgabenstellung und Ansatz

Aus Gründen der eingeschränkten Datenverfügbarkeit für einzelne Umweltbereiche wurden im hier vorgestellten Projekt die Kreise und kreisfreien Städte (zusammen 402 räumliche Einheiten) teilweise zu sog. Kreisregionen zusammengefasst (302 Einheiten); Einzelheiten und Zuordnung s. Häußermann et al. (2019). In der nachstehenden Tabelle sind die Kreisregionen mit den darin zusammengefassten Kreisen sowie die (unveränderten) Kreise aufgeführt.

Tabelle 22: Zuordnung der Kreise und Kreisfreien Städte zu Kreisregionen in Deutschland (Erläuterung s. Kapitel 1.2)

ARS ^a neu	Kreis / Kreisregion (zusammengefasste Kreise)	Anzahl Rasterzellen 1 km x 1 km im GeoGitterDE
01051	Dithmarschen	1499
01053	Herzogtum Lauenburg	1263
01054	Nordfriesland	2403
01055	Ostholstein (mit Lübeck)	1711
01056	Pinneberg	671
01057	Plön	1118
01058	Rendsburg-Eckernförde (mit Kiel und Neumünster)	2418
01059	Schleswig-Flensburg (mit Flensburg)	2193
01060	Segeberg	1347
01061	Steinburg	1053
01062	Stormarn	765
02000	Hamburg	771
03151	Gifhorn	1568
03153	Goslar	970
03154	Helmstadt (mit Wolfsburg)	886
03155	Northeim	1266
03157	Peine	539
03158	Wolfenbüttel (mit Braunschweig, Salzgitter)	1139
03159	Göttingen	1756
03241	Region Hannover	2301
03251	Diepholz	1998
03252	HamelN-Pyrmont	801
03254	Hildesheim	1200
03255	Holz Minden	693
03256	Nienburg (Weser)	1399
03257	Schaumburg	678
03351	Celle	1547
03352	Cuxhaven (mit Bremerhaven)	2184
03353	Harburg	1240
03354	Lüchow-Dannenberg	1231
03355	Lüneburg	1323
03356	Osterholz	659

ARS ^a neu	Kreis / Kreisregion (zusammengefasste Kreise)	Anzahl Rasterzellen 1 km x 1 km im GeoGitterDE
03357	Rotenburg (Wümme)	2064
03358	Heidekreis	1895
03359	Stade	1277
03360	Uelzen	1464
03361	Verden	788
03451	Ammerland	734
03452	Aurich (mit Emden)	1523
03453	Cloppenburg	1420
03454	Emsland	2916
03455	Friesland (mit Wilhelmshaven)	781
03456	Grafschaft Bentheim	1040
03457	Leer	1115
03458	Oldenburg (mit Delmenhorst und Oldenburg)	1236
03459	Osnabrück (mit Osnabrück)	2232
03460	Vechta	805
03461	Wesermarsch	863
03462	Wittmund	701
04011	Bremen	323
05112	Duisburg. Essen. Mülheim. Oberhausen	611
05124	Wuppertal (mit Remscheid und Solingen)	330
05154	Kleve	1319
05158	Mettmann (mit Düsseldorf)	621
05162	Neuss (mit Mönchengladbach)	748
05166	Viersen (mit Krefeld)	722
05170	Wesel	1045
05334	Städteregion Aachen	768
05358	Düren	945
05362	Rhein-Erft-Kreis (mit Köln)	1102
05366	Euskirchen	1262
05370	Heinsberg	667
05374	Oberbergischer Kreis	918
05378	Rheinisch-Berg.-Kreis (mit Leverkusen)	520
05382	Rhein-Sieg (mit Bonn)	1293
05515	Münster	304
05554	Borken	1484
05558	Coesfeld	1111
05562	Recklinghausen (mit Bottrop und Gelsenkirchen)	967
05566	Steinfurt	1801
05570	Warendorf	1317
05711	Bielefeld	260
05754	Gütersloh	966
05758	Herford	454
05762	Höxter	1200
05766	Lippe	1239

ARS ^a neu	Kreis / Kreisregion (zusammengefasste Kreise)	Anzahl Rasterzellen 1 km x 1 km im GeoGitterDE
05770	Minden-Lübbecke	1147
05774	Paderborn	1249
05913	Dortmund (mit Bochum und Herne)	479
05954	Ennepe-Ruhr (mit Hagen)	574
05958	Hochsauerlandkreis	1955
05962	Märkischer Kreis	1060
05966	Olpe	715
05970	Siegen-Wittgenstein	1133
05974	Soest	1334
05978	Unna (mit Hamm)	766
06431	Bergstraße	714
06432	Darmstadt-Dieburg (mit Darmstadt)	785
06433	Groß-Gerau	449
06434	Hochtaunuskreis	479
06435	Main-Kinzig-Kreis	1398
06436	Main-Taunus-Kreis (mit Frankfurt und Wiesbaden)	676
06437	Odenwaldkreis	615
06438	Offenbach (mit Offenbach)	400
06439	Rheingau-Taunus-Kreis	813
06440	Wetteraukreis	1096
06531	Gießen	855
06532	Lahn-Dill-Kreis	1067
06533	Limburg-Weilburg	740
06534	Marburg-Biedenkopf	1252
06535	Vogelsbergkreis	1464
06631	Fulda	1373
06632	Hersfeld-Rotenburg	1098
06633	Kassel (mit Kassel)	1398
06634	Schwalm-Eder-Kreis	1537
06635	Waldeck-Frankenberg	1849
06636	Werra-Meißner-Kreis	1025
07131	Ahrweiler	790
07132	Altenkirchen (Westerwald)	642
07133	Bad Kreuznach	866
07134	Birkenfeld	774
07135	Cochem-Zell	697
07137	Mayen-Koblenz (mit Koblenz)	923
07138	Neuwied	629
07140	Rhein-Hunsrück-Kreis	985
07141	Rhein-Lahn-Kreis	779
07143	Westerwaldkreis	990
07231	Bernkastel-Wittlich	1168
07232	Eifelkreis Bitburg-Prüm	1698
07233	Vulkaneifel	916

ARS ^a neu	Kreis / Kreisregion (zusammengefasste Kreise)	Anzahl Rasterzellen 1 km x 1 km im GeoGitterDE
07235	Trier-Saarburg (mit Trier)	1245
07331	Alzey-Worms (mit Worms)	703
07332	Bad-Dürkheim (mit Neustadt a.d. Weinstraße)	710
07333	Donnersbergkreis	640
07334	Germersheim	471
07335	Kaiserslautern (mit Kaiserslautern)	783
07336	Kusel	575
07337	Südliche Weinstraße (mit Landau i.d. Pfalz)	736
07338	Rhein-Pfalz (mit Frankenthal, Ludwigshafen und Speyer)	470
07339	Mainz-Bingen (mit Mainz)	698
07340	Südwestpfalz (mit Pirmansens und Zweibrücken)	1123
08115	Böblingen	621
08116	Esslingen	641
08117	Göppingen	642
08118	Ludwigsburg, Landkr. (mit Stuttgart)	901
08119	Rems-Murr-Kreis	856
08125	Heilbronn (mit Heilbronn)	1198
08126	Hohenlohekreis	779
08127	Schwäbisch Hall	1478
08128	Main-Tauber-Kreis	1305
08135	Heidenheim	627
08136	Ostalbkreis	1508
08215	Karlsruhe (mit Karlsruhe)	1261
08216	Rastatt (mit Baden-Baden)	895
08225	Neckar-Odenwald-Kreis	1124
08226	Rhein-Neckar (mit Heidelberg und Mannheim)	1319
08235	Calw	801
08236	Enzkreis (mit Pforzheim)	667
08237	Freudenstadt	873
08315	Breisgau-Hochschwarzwald (mit Freiburg i. Breisgau)	1563
08316	Emmendingen	691
08317	Ortenaukreis	1895
08325	Rottweil	766
08326	Schwarzwald-Baar-Kreis	1031
08327	Tuttlingen	732
08335	Konstanz	924
08336	Lörrach	839
08337	Waldshut	1217
08415	Reutlingen	1091
08416	Tübingen	515
08417	Zollernalbkreis	917
08425	Alb-Donau-Kreis (mit Ulm)	1480
08426	Biberach	1405
08435	Bodenseekreis	698

ARS ^a neu	Kreis / Kreisregion (zusammengefasste Kreise)	Anzahl Rasterzellen 1 km x 1 km im GeoGitterDE
08436	Ravensburg	1628
08437	Sigmaringen	1209
09171	Altötting	584
09172	Berchtesgadener Land	922
09173	Bad Tölz-Wolfratshausen	1123
09174	Dachau	576
09175	Ebersberg	548
09176	Eichstätt (mit Ingolstadt)	1348
09177	Erding	872
09178	Freising	797
09179	Fürstenfeldbruck	435
09180	Garmisch-Partenkirchen	1065
09181	Landsberg am Lech	805
09182	Miesbach	890
09183	Mühldorf a. Inn	805
09184	München (mit München)	976
09185	Neuburg-Schrobenhausen	741
09186	Pfaffenhofen a.d. Ilm	759
09187	Rosenheim (mit Rosenheim)	1510
09188	Starnberg	488
09189	Traunstein	1568
09190	Weilheim-Schongau	967
09271	Deggendorf	861
09272	Freyung-Grafenau	1025
09273	Kelheim	1077
09274	Landshut (mit Landshut)	1413
09275	Passau (mit Passau)	1678
09276	Regen	1003
09277	Rottal-Inn	1293
09278	Straubing-Bogen (mit Straubing)	1274
09279	Dingolfing-Landau	877
09371	Amberg-Weizbach (mit Amberg)	1307
09372	Cham	1567
09373	Neumarkt i.d. Oberpf.	1340
09374	Neustadt a.d. Waldnaab (mit Weiden i.d. Opf.)	1514
09375	Regensburg (mit Regensburg)	1465
09376	Schwandorf	1469
09377	Tirschenreuth	1125
09471	Bamberg (mit Bamberg)	1224
09472	Bayreuth (mit Bayreuth)	1344
09473	Coburg (mit Coburg)	635
09474	Forchheim	650
09475	Hof (mit Hof)	970
09476	Kronach	652

ARS ^a neu	Kreis / Kreisregion (zusammengefasste Kreise)	Anzahl Rasterzellen 1 km x 1 km im GeoGitterDE
09477	Kulmbach	654
09478	Lichtenfels	521
09479	Wunsiedel i. Fichtelgebirge	621
09571	Ansbach (mit Ansbach)	2068
09572	Erlangen-Höchststadt (mit Erlangen)	636
09573	Fürth (mit Fürth)	370
09574	Nürnberger-Land (mit Nürnberg)	985
09575	Neustadt a.d. Aisch-Bad Windsheim	1267
09576	Roth (mit Schwabach)	939
09577	Weißenburg-Gunzenhausen	967
09671	Aschaffenburg (mit Aschaffenburg)	761
09672	Bad Kissingen	1136
09673	Rhön-Grabfeld	1020
09674	Haßberge	958
09675	Kitzingen	685
09676	Miltenberg	716
09677	Main-Spessart	1325
09678	Schweinfurt (mit Schweinfurt)	877
09679	Würzburg (mit Würzburg)	1049
09771	Aichach-Friedberg	785
09772	Augsburg (mit Augsburg)	1216
09773	Dillingen a.d. Donau	793
09774	Günzburg	760
09775	Neu-Ulm	515
09776	Lindau (Bodensee)	358
09777	Ostallgäu (mit Kaufbeuren)	1458
09778	Unterallgäu (mit Memmingen)	1300
09779	Donau-Ries	1276
09780	Oberallgäu (mit Kempten)	1665
10041	Regionalverband Saarbrücken	448
10042	Merzig-Wadern	574
10043	Neunkirchen	248
10044	Saarlouis	483
10045	Saarpfalz-Kreis	436
10046	St. Wendel	474
11000	Berlin	899
12060	Barnim	1493
12061	Dahme-Spreewald	2279
12062	Elbe-Elster	1910
12063	Havelland	1732
12064	Märkisch-Oderland	2215
12065	Oberhavel	1805
12066	Oberspreewald-Lausitz	1225
12067	Oder-Spree (mit Frankfurt (Oder))	2447

ARS ^a neu	Kreis / Kreisregion (zusammengefasste Kreise)	Anzahl Rasterzellen 1 km x 1 km im GeoGitterDE
12068	Ostprignitz-Ruppin	2526
12069	Potsdam-Mittelmark (mit Brandenburg an der Havel u. Potsdam)	3010
12070	Prignitz	2145
12071	Spree-Neiße (mit Cottbus)	1862
12072	Teltow-Fläming	2105
12073	Uckermark	3103
13071	Mecklenburgische Seenplatte	5499
13072	Rostock (mit Rostock)	3672
13073	Vorpommern-Rügen	3645
13074	Nordwestmecklenburg	2193
13075	Vorpommern-Greifswald	4052
13076	Ludwigslust-Parchim (mit Schwerin)	4900
14521	Erzgebirgskreis (mit Chemnitz)	2113
14522	Mittelsachsen	2128
14523	Vogtlandkreis	1459
14524	Zwickau	951
14625	Bautzen	2418
14626	Görlitz	2227
14627	Meißen	1461
14628	Sächsische Schweiz-Osterzgebirge (mit Dresden)	2046
14729	Leipzig (mit Leipzig)	1957
14730	Nordsachsen	2029
15081	Altmarkkreis Salzwedel	2299
15083	Börde (mit Magdeburg)	2602
15084	Burgenlandkreis	1417
15085	Harz	2103
15086	Jerichower Land	1574
15087	Mansfeld-Südharz	1459
15088	Saale (mit Halle)	1575
15089	Salzlandkreis	1425
15090	Stendal	2428
15091	Wittenberg (mit Dessau-Roßlau und Anhalt-Bitterfeld)	3650
16051	Erfurt	272
16061	Eichsfeld	937
16062	Nordhausen	717
16063	Wartburgkreis	1374
16064	Unstrut-Hainich-Kreis	977
16065	Kyffhäuserkreis	1038
16066	Schmalkalden-Meiningen	1251
16067	Gotha	932
16068	Sömmerda	808
16069	Hildburghausen (mit Suhl)	1080
16070	Ilm-Kreis	810
16071	Weimarer Land (mit Weimar)	888

ARS ^a neu	Kreis / Kreisregion (zusammengefasste Kreise)	Anzahl Rasterzellen 1 km x 1 km im GeoGitterDE
16072	Sonneberg	462
16073	Saalfeld-Rudolstadt	1004
16074	Saale-Holzland (mit Jena)	935
16075	Saale-Orla-Kreis	1154
16076	Greiz (mit Gera)	992
16077	Altenburger Land	570

^a ARS: Amtliche Regionalschlüsselnummer; für Kreisregionen wird die ARS des namengebenden Kreises übernommen (i. d. R. der flächengrößte Kreis).

A.2 Anhang zu Schutzgut terrestrische und marine Ökosysteme

Berechnung der erforderlichen Verminderung der N-Emissionen in die Atmosphäre zur Einhaltung der kritischen Belastungsgrenze zum Schutz terrestrischer und mariner Ökosysteme vor Eutrophierung durch Stickstoff (CL_{eutN}) auf Kreisebene.

Die verwendeten Datengrundlagen sind im Kapitel 2.1 aufgeführt. Ausgangspunkt ist die Karte der Nationalen Critical Loads Eutrophierung Stickstoff (GeoG, NDZ Bericht 2017; Schlutow et al. 2018). Die CL_{eutN}-Werte aus GeoG werden jeweils einer Rasterzelle (1 km x 1 km) des GeoGitterDE zugeordnet. Bei mehreren CL_{eutN}-Werten innerhalb eines Raster wird der kleinste CL_{eutN}-Wert dem Raster zugeordnet. Der MIN[CL_{eutN}]-Wert gilt für die gesamte Rasterzelle unabhängig von der Fläche des schutzbedürftigen Biotops. Raster, in denen keine empfindlichen Biotope vorhanden sind, bekommen keinen CL_{eutN}-Wert zugewiesen.

Die PINETI-4-Depositionsdaten liegen zunächst mit einer (horizontalen) Auflösung von 2 km x 2 km und in der Einheit eq ha⁻¹ a⁻¹ vor (Kranenburg et al. 2024). Mit der GIS-Funktion "größte Überschneidung" wird jedem Raster im GeoGitterDE jeweils ein Wert der Deposition von NH_x-N, NO_y-N und N(gesamt) in kt N km⁻² a⁻¹ zugewiesen (für wenige Raster liegen keine Daten vor).

Die GRETA-Emissionsdaten liegen bereits im GeoGitterDE vor und können ohne Transformation verwendet werden.

Sowohl die CL_{eutN}- als auch die CAI-Daten und die N-Depositionsdaten werden auf die Fläche von 1 km² der Raster im GeoGitterDE bezogen. Deposition, CL_{eutN} und Emission in den Rastern werden im weiteren Verlauf der Berechnungen einheitlich in t N pro räumlicher Bezugseinheit (Raster, KR, BL, DE) angegeben. Zur Vereinfachung der Darstellung wird der Zeitbezug (ein Jahr) in allen Gleichungen usw. nicht mitgeführt.

Aufgrund des identischen Berechnungswegs wird beim Schutzgut Terrestrische Ökosysteme auch die erforderliche Verminderung der N-Emissionen zum Schutz der marinen Ökosysteme in den Küstenzonen (1-nautische Meile-Zone) von Nordsee und Ostsee vor Eutrophierung durch Stickstoff einbezogen.

1. Schritt: Aktuelle NH_x-, NO_y- und N(gesamt)-Depositionen und Überschreitungen der CL_{eutN} auf Kreisebene und der CAI in den Küstenzonen

Für jede der 302 Kreisregionen in Deutschland wird die NH_x- und NO_y-Deposition (Jahr 2019) sowie die Summe N(gesamt) aus beiden Komponenten ermittelt:

$$NH3-Dep_{KR} = \sum_{i=1}^r NH3-Dep_i \quad \text{Gl. (22)}$$

$$NO2-Dep_{KR} = \sum_{i=1}^r NO2-Dep_i \quad \text{Gl. (23)}$$

$$Nges-Dep_{KR} = \sum_{i=1}^r (NH3-Dep_i + NO2-Dep_i) \quad \text{Gl. (24)}$$

mit

$NH3-Dep_i$	[t N km ⁻²]	NH _x -Deposition im Raster i
$NO2-Dep_i$	[t N km ⁻²]	NO _y -Deposition im Raster i
$Nges-Dep_i$	[t N km ⁻²]	N(gesamt)-Deposition im Raster i
$NH3-Dep_{KR}$	[t N]	Summierte NH _x -Deposition in der Kreisregion KR
$NO2-Dep_{KR}$	[t N]	Summierte NO _y -Deposition in der Kreisregion KR
$Nges-Dep_{KR}$	[t N]	Summierte N(gesamt)-Deposition in der Kreisregion KR
r		Anzahl der Raster i (1 km ²) insgesamt in der Kreisregion KR.

Für alle Raster mit einem CL_{eutN} -Wert, d. h. mit einem Vorkommen eutrophierungsgefährdeter Vegetation, wird ermittelt, um wieviel die $N(gesamt)$ -Deposition den CL_{eutN} -Wert überschreitet (i. e. Minderungsbedarf, in $t\ N\ km^{-2}$; wird als positive Zahl ausgedrückt), und um welchem Prozentsatz die Deposition im betreffenden Raster relativ vermindert werden muss, um den CL_{eutN} -Wert einzuhalten:

$$Nges - Dep_{Ueber_i} = \begin{cases} Nges-Dep_i - CL_{eutN_i} & \text{für } Nges-Dep_i > CL_{eutN_i} \\ 0 & \text{für } Nges-Dep_i \leq CL_{eutN_i} \end{cases} \quad \text{Gl. (25)}$$

$$rel_Ueber_i = Nges-Dep_Ueber_i / Nges-Dep_i = 1 - CL_{eutN_i} / Nges-Dep_i \quad \text{Gl. (26)}$$

mit

$Nges-Dep_Ueber_i$	[t N km^{-2}]	Überschreitung des CL_{eutN} -Werts (ökologisch zulässige $N(gesamt)$ -Deposition) durch die $N(gesamt)$ -Deposition im Raster i
rel_Ueber_i	[-]	erforderliche relative Verminderung der $N(gesamt)$ -Deposition zur Einhaltung des CL_{eutN} -Werts im Raster i
CL_{eutN_i}	[t N km^{-2}]	Wert des Critical Load im Raster i

Die absolute Überschreitung (in t N) wird anschließend über alle Raster i mit einem CL_{eutN_i} -Wert in einer Kreisregion summiert:

$$Nges-Dep_Ueber_KR = \sum_{i=1}^m Nges-Dep_Ueber_i \text{ für alle } i \text{ mit } Nges-Dep_i > CL_{eutN_i} \quad \text{Gl. (27)}$$

mit

$Nges-Dep_Ueber_KR$	[t N]	Summierte Überschreitung der ökologisch zulässigen $N(gesamt)$ -Deposition in allen Rastern mit einem CL_{eutN} -Wert in der Kreisregion KR (in t N)
m	[t N km^{-2}]	Anzahl der Raster i mit CL_{eutN_i} -Wert in der Kreisregion KR.

Weiterhin werden als Hilfsgrößen für jede Kreisregion die NH_3 -, NO_y - und $N(gesamt)$ -Deposition für diejenigen Raster summiert, für die gilt $Nges-Dep_i > CL_{eutN_i}$:

$$NH3-Dep_KR = \sum_{i=1}^m NH3-Dep_i \text{ für alle } i \text{ mit } Nges-Dep_i > CL_{eutN_i} \quad \text{Gl. (28)}$$

$$NO2-Dep_KR = \sum_{i=1}^m NO2-Dep_i \text{ für alle } i \text{ mit } Nges-Dep_i > CL_{eutN_i} \quad \text{Gl. (29)}$$

$$Nges-Dep_KR = \sum_{i=1}^m Nges-Dep_i \text{ für alle } i \text{ mit } Nges-Dep_i > CL_{eutN_i} \quad \text{Gl. (30)}$$

Für die weiteren Berechnungen werden außerdem für jede Kreisregion die NH_3 - und NO_x -Emissionsmengen (Jahr 2019) benötigt:

$$NH3-Em_KR = \sum_{i=1}^r NH3-Em_i \quad \text{Gl. (31)}$$

$$NO2-Em_KR = \sum_{i=1}^r NO2-Em_i \quad \text{Gl. (32)}$$

mit

$NH3-Em_i, NO2-Em_i$	[t N km^{-2}]	NH_3 -, NO_x -Emission (2019) im Raster i
$NH3-Em_KR, NO2-Em_KR$	[t N]	Summierte NH_3 -, NO_x -Emission (2019) in der Kreisregion KR

2. Schritt: Ökologisch erforderliche Reduzierung der NH_x - und NO_y -Deposition auf der Ebene der Kreisregionen

Die ökologisch erforderliche Reduzierung der NH_x - und NO_x -Deposition zur Einhaltung der kritischen Belastungsgrenze zum Schutz Terrestrischer Ökosysteme vor Eutrophierung durch Stickstoff wird für drei verschiedene Anforderungsniveaus des Qualitätsziels N(gesamt)-Deposition < CL_{eutN} berechnet:

- Median (50P): Die Critical Loads werden auf der Hälfte der Raster mit einem CL_{eutN} -Wert innerhalb einer Kreisregion eingehalten (vereinfacht: 50 % der Ökosysteme sind ausreichend geschützt).
- 90-Perzentil (90P): Die Critical Loads werden auf 90 Prozent der Raster mit einem CL_{eutN} -Wert innerhalb einer Kreisregion eingehalten (vereinfacht: 90 % der Ökosysteme sind ausreichend geschützt)
- Maximum (MAX): Die Critical Loads werden auf allen Rastern mit einem CL_{eutN} -Wert innerhalb einer Kreisregion eingehalten (alle Ökosysteme, auch das empfindlichste, sind ausreichend geschützt).

Für jede Kreisregion werden die Werte rel_Ueber_i aufsteigend sortiert. Aus dieser Reihung werden für die drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels die rel_Ueber_i -Werte für den Median (50P), das 90-Perzentil (90P) und das Maximum (MAX) bestimmt:

$$\text{rel_Ueber}_{50P} = 50\text{-Perzentil}[\text{rel_Ueber}_i] [\%] \quad \text{Gl. (33)}$$

$$\text{rel_Ueber}_{90P} = 90\text{-Perzentil}[\text{rel_Ueber}_i] [\%] \quad \text{Gl. (34)}$$

$$\text{rel_Ueber}_{MAX} = 100\text{-Perzentil}[\text{rel_Ueber}_i] [\%] \quad \text{Gl. (35)}$$

Die drei Werte sind wie folgt zu interpretieren: wenn die N(gesamt)-Deposition in der Kreisregion auf allen Rastern prozentual um rel_Ueber_{50P} , rel_Ueber_{90P} bzw. rel_Ueber_{MAX} reduziert wird, dann sind dadurch (näherungsweise) 50 %, 90 % bzw. 100 % der eutrophierungsgefährdeten terrestrischen Ökosysteme in der Kreisregion ausreichend geschützt. Die Depositionen innerhalb eines Kreises können aber (gemäß Annahme) nicht gezielt nur in den Rastern mit Überschreitung des CL_{eutN} -Wert reduziert werden, sondern die *gesamte* Deposition im Kreis muss um diese relative Verminderung reduziert werden. Die erforderliche Reduzierung im Kreis wird dann für die Anforderungsniveaus (50P, 90P, MAX) berechnet zu:

$$\text{Red_Nges-Dep_KR}(50P) = \text{rel_Ueber}_{50P} * \text{Nges-Dep_Ist_KR} \quad \text{Gl. (36)}$$

$$\text{Red_Nges-Dep_KR}(90P) = \text{rel_Ueber}_{90P} * \text{Nges-Dep_Ist_KR} \quad \text{Gl. (37)}$$

$$\text{Red_Nges-Dep_KR}(MAX) = \text{rel_Ueber}_{MAX} * \text{Nges-Dep_Ist_KR} \quad \text{Gl. (38)}$$

Die Aufteilung der erforderlichen Reduzierung der N(gesamt)-Deposition auf die beiden Komponenten NH_x und NO_y erfolgt im Verhältnis der NH_x - und NO_y -Deposition in der Kreisregion:

$$\text{Red_NH3-Dep_KR}(90P) = \text{Red_Nges-Dep_KR}(90P) * \text{NH3-Dep_KR} / \text{Nges-Dep_KR} \quad \text{Gl. (39)}$$

$$\text{Red_NO2-Dep_KR}(90P) = \text{Red_Nges-Dep_KR}(90P) * \text{NO2-Dep_KR} / \text{Nges-Dep_KR} \quad \text{Gl. (40)}$$

mit

$\text{Red_NH3-Dep_KR}(90P)$	[t N]	Erforderliche Reduzierung der NH_x -Deposition in der Kreisregion für Anforderungsniveau 90-Perzentil
--------------------------------	-------	--

Red_NO2-Dep_KR(90P) [t N] Erforderliche Reduzierung der NO_y-Deposition in der Kreisregion für Anforderungsniveau 90-Perzentil

Analog für die Variablen ...(50P) und ...(MAX).

Anmerkung: Für die Küstenzonen von Nordsee und Ostsee werden keine unterschiedlichen Anforderungsniveaus unterschieden, da das Vorkommen der schützenswerten marinen Ökosysteme innerhalb der Küstenzonen nicht räumlich differenziert wird. Für die Berechnungen der erforderlichen Emissionsminderung in den drei Varianten (50P, 90P, MAX) des Anforderungsniveaus geht für die beiden Küstenzonen immer der gleiche Wert ein.

3. Schritt: Berechnung der erforderlichen Verminderung der Emissionen in den Kreisregionen

Quelle und mit umweltpolitischen Maßnahmen adressierbare Regelgröße der N-Depositionen sind die N-Emissionen in die Atmosphäre. Aus der im 2. Schritt ermittelten erforderlichen Reduzierung der N-Deposition in den Kreisregionen muss daher die erforderliche Verminderung der N-Emissionen abgeleitet werden. Dafür werden zwei Annahmen eingeführt:

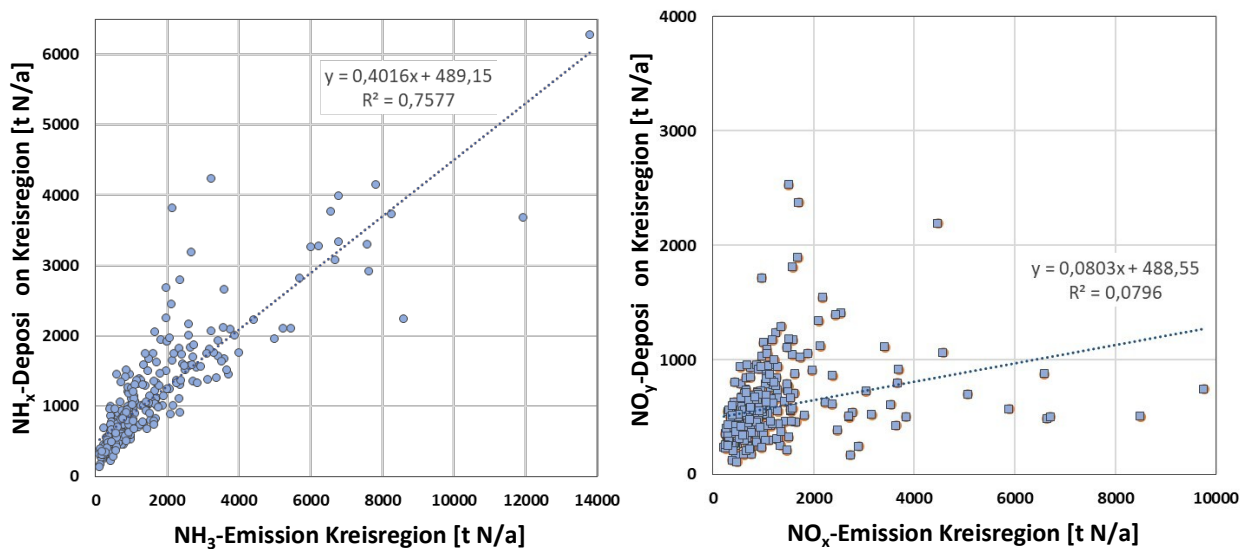
- (i) Die Gesamtmenge der Deposition innerhalb einer Kreisregion wird bestimmt durch die Gesamtmenge der Emissionen innerhalb der Kreisregion sowie den atmosphärischen Import und Export (über die Kreisgrenzen hinweg).
- (ii) Innerhalb der Betrachtungseinheit einer Kreisregion können jedoch *keine* räumlichen Beziehungen zwischen Emissionsquellen und Depositionsflächen erstellt werden. Das heißt, dass das räumliche Verteilungsmuster der Deposition in den Rastern (gemäß PINETI-4-Daten) als invariant betrachtet wird. Eine Änderung der gesamten, innerhalb der Kreisregion emittierten NH₃- bzw. NO_x-Menge und/oder der über die Atmosphäre importierten/exportierten Menge verändert die Deposition in allen Raster proportional zur gegebenen Deposition (Ist-Situation), unabhängig von der Lokalisierung der einzelnen Emissionsquellen innerhalb der Kreisregion.

In wieweit diese Annahmen fachlich gerechtfertigt sind, kann kritisch hinterfragt werden. Solange jedoch kein Modell zur Darstellung von Quellen-Senken-Beziehungen für NH₃ und NO_x im Maßstabsbereich von einigen Kilometern verfügbar ist (d. h. die atmosphärischen Transport- und Depositionsprozesse auf der Skala des GeoGitterDE abgebildet werden können, flächendeckend für Deutschland), sind diese Vereinfachungen nach Auffassung der Autor*innen unumgänglich.

Zur Überprüfung der Annahme (i) sind in Abbildung 41 die Zusammenhänge zwischen den NH₃- bzw. NO_x-Emissionen und -Depositionen für die 302 Kreisregionen dargestellt. Mit einer gewissen Berechtigung kann für NH₃ (linke Graphik) interpretiert werden, dass NH₃-Emissions- und -Depositionsmengen auf der Ebene der Kreisregionen relativ eng korreliert sind - allerdings nicht im Verhältnis eins-zu-eins, sondern die NH_x-Deposition beträgt im Mittel nur rund die Hälfte der NH₃-Emission in den Kreisregionen; das heißt, dass von der NH₃-Emissionsmenge netto rund die Hälfte über die Atmosphäre aus den Kreisregionen exportiert wird.

Für den Zusammenhang der NO_x-Emissions- und NO_y-Depositionsmengen (rechte Graphik) wird bei Einbezug aller Daten nur ein sehr niedriger Korrelationskoeffizient ausgewiesen. Eine Auswertung nur für die Kreisregionen mit weniger als 2.000 t NO_x-N-Emission (Grenze willkürlich gezogen) ergibt eine etwas bessere Regression ($y = 0,438 \cdot x + 194$; $R^2 = 0,28$; $n = 269$). Ursache dafür sind mutmaßlich einzelne große NO_x-Emittenten (Punktquellen) in den Kreisregionen mit mehr als 2.000 t NO_x-N-Emission, deren NO_x-Abgabe nicht bodennah, sondern über hohe Schornsteine erfolgt und damit zum größten Teil mit atmosphärischem Ferntransport über weite Strecken verfrachtet wird und dann in großer Entfernung von der Punktquelle deponiert.

Abbildung 41: Zusammenhang zwischen der Emission (n. GRETA) und der N-Deposition (n. PINETI-4) in den Kreisregionen für NH₃-N (linke Graphik) und NO_x-N (rechte Graphik), Jahr 2019.



Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR.

Schadgase wie NO₂ und NH₃ werden in der Atmosphäre über Kreis- und Landesgrenzen hinweg transportiert. Von der gesamten Deposition innerhalb eines Kreises wird daher nur ein gewisser Anteil durch Emissionen innerhalb des betreffenden Kreises verursacht, der übrige Teil ist auf Emissionen (Import) aus anderen Regionen zurückzuführen. Umgekehrt werden die Emissionen aus einem Kreisgebiet auch exportiert und gehen auf Flächen außerhalb dieses Kreises nieder. Diese großräumigen Quellen-Senken-Beziehungen zwischen den NO_x- bzw. NH₃-Emissionen und den NO_y- bzw. NH_x-Depositionen werden mit dem PINETI-4 Modell abgebildet und in Form von sogenannten Source-Receptor-Tables (S-R-Tables) dargestellt.

Die Quellen-Senken-Beziehungen aus PINETI-4 umfassen die Bundesländer (BL), die Küstenzonen der Nordsee und der Ostsee, die europäischen Nachbarländer Deutschlands, die internationale Schifffahrt im Betrachtungsgebiet sowie weiterhin europäische und internationale Regionen außerhalb des konkreten Betrachtungsbereichs (Kranenburg et al. 2024). Eine S-R-Table für ein Bundesland gibt an, welcher Anteil der gesamten Deposition in einem BL aus den Emissionen des betreffenden BL selbst stammt (betrifft nicht die Küstenzonen), welche Anteile aus den anderen 15 BL stammen und ggf. welcher Anteil auf Emissionen im Ausland bzw. die internationale Seeschifffahrt entfällt (Importe von außerhalb des Bundesgebietes).

Auf Basis der S-R-Tables aus PINETI-4 für das Jahr 2019 wird für die Kreisregionen berechnet, in welchem Umfang die Emissionen in allen Kreisregionen in Deutschland (und ggf. außerdem im Ausland, s.u.) gemindert werden müssen, damit die ökologisch erforderliche Reduzierung der Deposition in der jeweils betrachteten Kreisregion erreicht wird. Die Depositionsminderung in einer betrachteten Kreisregion insgesamt ergibt sich als Summe aus den Emissionsminderungen im betreffenden Kreis selbst sowie in allen übrigen Kreisregionen (und ggf. im Ausland), von denen jeweils ein bestimmter *Anteil* (gemäß Quellen-Senken-Beziehungen) zur Depositionsminderung in der betrachteten Kreisregion beiträgt. Für das vorliegende Projekt standen die S-R-Tables allerdings nur auf der Ebene der BL zur Verfügung, so dass für alle Kreisregionen eines BL jeweils der identisch Werte der Quellen-Senken-Beziehungen (s. Abbildung 42 und Abbildung 43) verwendet wurde.

Bei der Berechnung der erforderlichen Emissionsminderung werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt:

- Der grundlegenden Prämisse des Projekts (s. Kapitel 1.2) folgend wird versucht, die erforderliche Emissionsminderung ausschließlich aus den Quellen in Deutschland zu leisten. Dafür werden die PINETI-4 S-R-Tables mit der Vorgabe modifiziert, dass die gesamten Depositionen in einem BL aus Deutschland stammen.
- Von der Prämisse, dass die erforderliche Emissionsminderung nur aus nationalen Quellen zu leisten ist, wird abgewichen und das tatsächliche Verteilungsmuster der S-R-Tables (unter Berücksichtigung des internationalen Ferntransports) wird zu Grunde gelegt.

Die Prozentwerte in Abbildung 42 beschreiben die Source-Receptor-Beziehungen für NO_y zwischen den 16 BL und den Küstenzonen von Nordsee und Ostsee als Senken (Rezeptoren) mit den 16 BL (ohne Berücksichtigung des Auslands; Abbildung 42a) bzw. den 16 BL sowie dem Ausland (Abbildung 42b) als Quellen (Source) (S-R-Table für NH_x s. Abbildung 43).

Die S-R-Tabellenwerte bedeuten:

$\text{NO}_x(\text{S-R})\%_{\text{S,R}}$: Anteil an der gesamten NO_y -Deposition im BL **R** bzw. in der Küstenzone (als Receptor), die aus dem BL **S** und ggf. Ausland (als Source) stammt [%]

$\text{NH}_3(\text{S-R})\%_{\text{S,R}}$: Anteil an der gesamten NH_x -Deposition im BL **R** bzw. in der Küstenzone (als Receptor), die aus dem BL **S** und ggf. Ausland (als Source) stammt [%]

mit

S = Bundesländer BB, ..., TH (ohne Berücksichtigung Ausland) bzw. S = BB, ..., EXT (mit Ausland)

R = Bundesländer BB, ..., Ostsee.

Aufgrund des atmosphärischen Ferntransports wirkt sich eine Verminderung der NO_x - bzw. NH_3 -Emission in einer Kreisregion nicht nur auf die Deposition in der betreffenden Kreisregion selbst aus, sondern auch - mehr oder weniger stark - auf die Deposition in allen übrigen Kreisregionen, in den Küstenzonen sowie im Ausland. Diese Zusammenhänge müssen bei der regionalen Verteilung der NO_x - bzw. NH_3 -Minderungserfordernis über die Einbindung der S-R-Tables berücksichtigt werden.

Abbildung 42: Source-Receptor-Tables der NO_y-Deposition (Jahr 2019) für die Bundesländer und die Küstenzonen von Nordsee und Ostsee, a) ohne und b) mit Berücksichtigung der Deposition aus dem Ausland (Kranenburg et al. 2024).

a) S-R-Beziehungen NO_y ohne Berücksichtigung ausländischer Quellen (Depositionen in einem Bundesland^a stammen nur aus Deutschland).

Recep- tor-BL	Source-BL															
	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SL	SH	SN	ST	TH
BB	24,3%	5,4%	3,6%	5,9%	0,4%	4,4%	1,7%	2,5%	11,9%	14,2%	2,6%	0,5%	2,7%	7,7%	9,3%	2,9%
BE	22,2%	38,9%	2,0%	3,3%	0,3%	2,4%	1,0%	1,2%	7,1%	8,6%	1,5%	0,3%	1,7%	3,2%	4,8%	1,5%
BW	0,4%	0,1%	61,3%	14,6%	0,1%	4,2%	0,1%	0,1%	1,3%	7,6%	6,9%	1,3%	0,2%	0,8%	0,5%	0,7%
BY	0,7%	0,1%	17,5%	54,2%	0,1%	6,4%	0,1%	0,2%	2,1%	8,5%	4,9%	0,9%	0,3%	1,4%	1,0%	1,7%
HB	1,4%	0,3%	1,7%	2,2%	23,2%	2,3%	1,1%	0,6%	44,3%	16,2%	1,6%	0,3%	1,4%	1,2%	1,6%	0,7%
HE	0,7%	0,1%	9,3%	8,6%	0,1%	40,0%	0,2%	0,1%	2,8%	19,4%	12,4%	1,5%	0,3%	1,3%	1,1%	2,1%
HH	1,6%	0,4%	1,4%	1,7%	1,0%	2,1%	40,4%	1,6%	23,6%	11,3%	1,4%	0,3%	10,2%	1,1%	1,4%	0,6%
MV	7,9%	1,8%	3,0%	4,0%	0,8%	4,0%	3,9%	19,8%	15,7%	17,5%	2,5%	0,5%	8,6%	3,3%	5,0%	1,8%
NI	1,8%	0,4%	3,2%	3,8%	1,6%	5,8%	1,6%	1,0%	40,3%	28,2%	3,2%	0,6%	2,0%	1,8%	3,0%	1,6%
NW	0,6%	0,1%	3,2%	3,5%	0,1%	4,8%	0,2%	0,2%	4,5%	73,5%	5,4%	0,7%	0,4%	0,9%	0,9%	1,0%
RP	0,6%	0,1%	11,6%	8,2%	0,1%	10,3%	0,1%	0,1%	1,5%	20,4%	38,8%	5,1%	0,2%	1,1%	0,7%	1,0%
SL	0,6%	0,1%	11,4%	8,8%	0,1%	6,4%	0,1%	0,1%	1,5%	12,2%	15,2%	40,9%	0,2%	1,0%	0,7%	0,9%
SH	2,5%	0,6%	2,2%	2,9%	1,1%	2,9%	7,6%	3,1%	16,8%	16,8%	2,1%	0,4%	35,9%	1,7%	2,3%	1,0%
SN	4,8%	0,8%	5,5%	11,0%	0,4%	5,5%	0,8%	0,8%	8,8%	13,0%	3,1%	0,5%	1,3%	29,2%	8,5%	6,2%
ST	4,3%	1,0%	4,5%	6,7%	0,5%	6,5%	1,0%	0,9%	17,3%	17,6%	3,4%	0,6%	1,3%	5,3%	23,7%	5,3%
TH	1,9%	0,4%	7,8%	14,3%	0,2%	13,3%	0,3%	0,4%	7,0%	16,3%	5,5%	0,9%	0,5%	4,6%	4,4%	22,0%
Nordsee	3,1%	0,8%	3,9%	5,3%	1,6%	4,3%	2,9%	2,2%	25,5%	26,8%	3,4%	0,7%	13,0%	2,4%	2,8%	1,4%
Ostsee	5,7%	1,4%	3,4%	4,5%	0,9%	4,4%	3,6%	11,4%	15,7%	19,7%	2,8%	0,5%	16,3%	3,5%	4,5%	1,9%

Gelesen wird in Zeilen (Beispiele):

Von der gesamten NO_y-N-Deposition in BE (als Receptor) stammen 38,9 % aus BE selbst (als Emissions-Quelle)

Von der gesamten NO_y-N-Deposition in BW (Receptor) stammen 11,9 % aus HE (Quelle).

b) S-R-Beziehungen NO_y mit Berücksichtigung ausländischer Quellen (Depositionen in einem Bundesland^a stammen aus Deutschland und aus dem Ausland (EXT)).

Recep- tor-BL	Source-BL und -EXT (Ausland)																
	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SL	SH	SN	ST	TH	EXT
BB	11,1%	2,5%	1,6%	2,7%	0,2%	2,0%	0,8%	1,2%	5,5%	6,5%	1,2%	0,2%	1,2%	3,5%	4,3%	1,3%	54,3%
BE	13,0%	22,7%	1,2%	1,9%	0,2%	1,4%	0,6%	0,7%	4,1%	5,0%	0,8%	0,2%	1,0%	1,9%	2,8%	0,9%	41,5%
BW	0,2%	0,0%	28,5%	6,8%	0,0%	2,0%	0,1%	0,0%	0,6%	3,5%	3,2%	0,6%	0,1%	0,4%	0,2%	0,3%	53,6%
BY	0,3%	0,1%	8,5%	26,4%	0,0%	3,1%	0,1%	0,1%	1,0%	4,2%	2,4%	0,4%	0,1%	0,7%	0,5%	0,9%	51,3%
HB	0,7%	0,1%	0,8%	1,1%	11,1%	1,1%	0,5%	0,3%	21,1%	7,7%	0,8%	0,1%	0,7%	0,6%	0,7%	0,3%	52,2%
HE	0,3%	0,1%	4,8%	4,5%	0,0%	20,8%	0,1%	0,1%	1,4%	10,1%	6,4%	0,8%	0,1%	0,7%	0,6%	1,1%	48,0%
HH	0,8%	0,2%	0,7%	0,9%	0,5%	1,1%	21,3%	0,8%	12,5%	6,0%	0,8%	0,1%	5,4%	0,6%	0,7%	0,3%	47,2%
MV	3,1%	0,7%	1,1%	1,6%	0,3%	1,6%	1,5%	7,6%	6,0%	6,8%	1,0%	0,2%	3,3%	1,3%	1,9%	0,7%	61,4%
NI	0,8%	0,2%	1,3%	1,6%	0,7%	2,4%	0,7%	0,4%	16,7%	11,7%	1,3%	0,2%	0,8%	0,7%	1,3%	0,6%	58,4%
NW	0,3%	0,1%	1,4%	1,5%	0,1%	2,1%	0,1%	0,1%	2,0%	32,6%	2,4%	0,3%	0,2%	0,4%	0,4%	0,4%	55,7%
RP	0,3%	0,0%	4,8%	3,4%	0,0%	4,3%	0,0%	0,0%	0,6%	8,5%	16,2%	2,1%	0,1%	0,5%	0,3%	0,4%	58,4%
SL	0,2%	0,0%	4,2%	3,3%	0,0%	2,4%	0,0%	0,0%	0,5%	4,5%	5,6%	15,1%	0,1%	0,4%	0,2%	0,3%	63,2%
SH	0,8%	0,2%	0,7%	1,0%	0,4%	1,0%	2,6%	1,0%	5,6%	5,6%	0,7%	0,1%	12,0%	0,6%	0,8%	0,3%	66,5%
SN	2,2%	0,4%	2,5%	5,0%	0,2%	2,5%	0,4%	0,4%	4,0%	5,9%	1,4%	0,2%	0,6%	13,3%	3,9%	2,8%	54,4%
ST	2,1%	0,5%	2,2%	3,3%	0,2%	3,2%	0,5%	0,5%	8,5%	8,7%	1,7%	0,3%	0,7%	2,6%	11,7%	2,6%	50,7%
TH	0,9%	0,2%	3,9%	7,0%	0,1%	6,5%	0,2%	0,2%	3,4%	8,0%	2,7%	0,5%	0,3%	2,3%	2,2%	10,8%	50,8%
Nordsee	0,6%	0,2%	0,8%	1,1%	0,3%	0,9%	0,6%	0,4%	5,2%	5,5%	0,7%	0,1%	2,7%	0,5%	0,6%	0,3%	79,6%
Ostsee	1,7%	0,4%	1,0%	1,3%	0,3%	1,3%	1,1%	3,4%	4,6%	5,8%	0,8%	0,2%	4,8%	1,0%	1,3%	0,6%	70,4%

Gelesen wird in Zeilen (Beispiele):

Von der gesamten NO_y-N-Deposition in BE (Receptor) stammen 22,9 % aus BE selbst (als Quelle)

Von der gesamten NO_y-N-Deposition in BW (Receptor) stammen 2,0 % aus HE (Quelle)

Von der gesamten NO_y-N-Deposition in BB (Receptor) stammen 54,3 % aus dem Ausland (EXT) als Quelle.

Abbildung 43: Source-Receptor-Tables der NH_x-Deposition (Jahr 2019) für die Bundesländer und die Küstenzonen von Nordsee und Ostsee, a) ohne und b) mit Berücksichtigung der Deposition aus dem Ausland (Kranenburg et al. 2024).

a) S-R-Beziehungen NH_x ohne Berücksichtigung ausländischer Quellen (Depositionen in einem Bundesland^a stammen nur aus Deutschland).

Recep- tor-BL	Source-BL															
	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SL	SH	SN	ST	TH
BB	45,8%	0,8%	1,1%	3,2%	0,2%	1,5%	0,5%	3,0%	15,7%	5,7%	0,7%	0,1%	4,1%	3,2%	12,5%	2,0%
BE	32,7%	20,1%	1,0%	3,0%	0,2%	1,5%	0,5%	1,9%	14,9%	5,8%	0,6%	0,1%	4,4%	1,5%	9,9%	1,8%
BW	0,2%	0,0%	72,7%	18,4%	0,0%	1,3%	0,0%	0,1%	1,7%	2,0%	1,8%	0,2%	0,4%	0,4%	0,3%	0,5%
BY	0,2%	0,0%	12,2%	79,3%	0,0%	1,7%	0,0%	0,1%	1,5%	1,8%	1,0%	0,1%	0,2%	0,4%	0,4%	1,1%
HB	0,2%	0,0%	0,3%	0,7%	17,9%	0,3%	0,2%	0,3%	72,8%	5,4%	0,2%	0,0%	1,0%	0,1%	0,4%	0,2%
HE	0,7%	0,0%	4,7%	7,9%	0,0%	54,6%	0,1%	0,2%	6,1%	12,9%	7,4%	0,5%	0,5%	0,7%	1,3%	2,6%
HH	0,5%	0,0%	0,3%	0,7%	0,5%	0,4%	33,8%	1,3%	45,5%	3,8%	0,2%	0,0%	11,9%	0,1%	0,7%	0,2%
MV	5,9%	0,1%	0,7%	2,0%	0,3%	0,9%	1,3%	40,2%	22,6%	6,0%	0,5%	0,0%	14,9%	0,5%	3,3%	0,7%
NI	0,5%	0,0%	0,5%	1,4%	0,9%	1,2%	0,4%	0,6%	78,3%	12,3%	0,4%	0,0%	1,6%	0,2%	1,2%	0,5%
NW	0,3%	0,0%	1,0%	1,9%	0,1%	1,7%	0,0%	0,2%	10,8%	79,8%	2,4%	0,1%	0,4%	0,2%	0,5%	0,5%
RP	0,8%	0,0%	5,3%	8,8%	0,0%	5,0%	0,0%	0,1%	2,8%	9,2%	61,2%	3,7%	0,3%	0,7%	0,9%	1,2%
SL	0,7%	0,0%	6,7%	11,5%	0,0%	3,1%	0,0%	0,1%	2,5%	4,3%	12,7%	55,8%	0,3%	0,6%	0,7%	0,9%
SH	0,6%	0,0%	0,4%	1,0%	0,4%	0,4%	2,5%	1,7%	22,1%	3,8%	0,3%	0,0%	65,9%	0,2%	0,7%	0,2%
SN	4,1%	0,1%	2,6%	10,3%	0,1%	2,7%	0,2%	0,8%	12,4%	6,7%	1,0%	0,1%	2,2%	36,4%	10,6%	9,6%
ST	3,2%	0,1%	1,4%	4,1%	0,2%	2,5%	0,3%	0,8%	19,9%	7,3%	0,8%	0,1%	1,8%	1,8%	50,4%	5,4%
TH	1,2%	0,0%	3,2%	13,3%	0,1%	9,1%	0,1%	0,3%	9,3%	8,1%	1,8%	0,2%	0,8%	2,5%	4,5%	45,6%
Nordsee	0,9%	0,0%	0,8%	2,2%	0,7%	0,7%	0,6%	1,5%	49,7%	7,8%	0,5%	0,0%	32,9%	0,3%	1,1%	0,4%
Ostsee	2,1%	0,0%	0,8%	2,1%	0,4%	0,9%	1,0%	15,6%	22,4%	5,9%	0,5%	0,0%	45,0%	0,5%	2,1%	0,7%

b) S-R-Beziehungen NH_x mit Berücksichtigung ausländischer Quellen (Depositionen in einem Bundesland^a stammen aus Deutschland und aus dem Ausland (EXT)).

Recep- tor-BL	Source-BL und -EXT (Ausland)																
	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SL	SH	SN	ST	TH	EXT
BB	30,9%	0,5%	0,7%	2,2%	0,1%	1,0%	0,3%	2,0%	10,6%	3,9%	0,4%	0,0%	2,8%	2,1%	8,4%	1,4%	32,5%
BE	22,0%	13,6%	0,7%	2,0%	0,1%	1,0%	0,4%	1,3%	10,0%	3,9%	0,4%	0,0%	3,0%	1,0%	6,7%	1,2%	32,7%
BW	0,1%	0,0%	40,9%	10,3%	0,0%	0,7%	0,0%	0,1%	1,0%	1,2%	1,0%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%	43,7%
BY	0,1%	0,0%	8,3%	53,7%	0,0%	1,2%	0,0%	0,1%	1,0%	1,2%	0,7%	0,1%	0,1%	0,3%	0,3%	0,7%	32,3%
HB	0,2%	0,0%	0,2%	0,6%	14,7%	0,3%	0,2%	0,3%	59,8%	4,4%	0,2%	0,0%	0,8%	0,1%	0,3%	0,1%	17,9%
HE	0,4%	0,0%	2,8%	4,7%	0,0%	32,4%	0,0%	0,1%	3,6%	7,6%	4,4%	0,3%	0,3%	0,4%	0,8%	1,6%	40,6%
HH	0,4%	0,0%	0,2%	0,6%	0,4%	0,3%	27,6%	1,1%	37,2%	3,1%	0,2%	0,0%	9,7%	0,1%	0,6%	0,1%	18,3%
MV	4,0%	0,0%	0,5%	1,3%	0,2%	0,6%	0,9%	26,7%	15,1%	4,0%	0,3%	0,0%	9,9%	0,3%	2,2%	0,5%	33,5%
NI	0,4%	0,0%	0,4%	1,0%	0,7%	0,9%	0,3%	0,4%	57,5%	9,1%	0,3%	0,0%	1,1%	0,1%	0,9%	0,3%	26,6%
NW	0,2%	0,0%	0,6%	1,2%	0,0%	1,0%	0,0%	0,1%	6,4%	47,6%	1,4%	0,1%	0,2%	0,1%	0,3%	0,3%	40,4%
RP	0,3%	0,0%	2,2%	3,7%	0,0%	2,1%	0,0%	0,1%	1,2%	3,9%	25,8%	1,6%	0,1%	0,3%	0,4%	0,5%	57,9%
SL	0,2%	0,0%	2,0%	3,4%	0,0%	0,9%	0,0%	0,0%	0,7%	1,3%	3,8%	16,6%	0,1%	0,2%	0,2%	0,3%	70,2%
SH	0,4%	0,0%	0,3%	0,8%	0,3%	0,3%	1,9%	1,2%	16,7%	2,8%	0,2%	0,0%	49,9%	0,1%	0,5%	0,2%	24,3%
SN	2,5%	0,0%	1,6%	6,2%	0,1%	1,6%	0,1%	0,5%	7,4%	4,0%	0,6%	0,1%	1,3%	21,8%	6,3%	5,8%	40,0%
ST	2,3%	0,0%	1,0%	2,9%	0,1%	1,8%	0,2%	0,6%	14,2%	5,2%	0,6%	0,1%	1,3%	1,3%	36,0%	3,8%	28,5%
TH	0,8%	0,0%	2,1%	8,7%	0,1%	5,9%	0,1%	0,2%	6,0%	5,3%	1,1%	0,1%	0,5%	1,6%	2,9%	29,6%	35,0%
Nordsee	0,5%	0,0%	0,4%	1,3%	0,4%	0,4%	0,3%	0,8%	28,4%	4,5%	0,3%	0,0%	18,8%	0,2%	0,6%	0,2%	42,8%
Ostsee	1,2%	0,0%	0,5%	1,3%	0,2%	0,5%	0,6%	9,3%	13,3%	3,5%	0,3%	0,0%	26,8%	0,3%	1,3%	0,4%	40,4%

Lesebeispiel s. vorstehende Abbildung.

^a Abkürzungen der Bundesländer s. Abkürzungsverzeichnis.

Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR.

- **Hinweis 1:** Zur Vereinfachung wird im Folgenden (ab hier bis Ende 3. Schritt) die Berechnung exemplarisch nur für NH₃, nur für das Anforderungsniveau 90P (Median) und nur für die S-R-Beziehungen *mit* Berücksichtigung Ausland dargestellt. Die Rechengänge für NO_x, für die Anforderungsniveaus 50P und MAX sowie für die S-R-Beziehungen *ohne* Berücksichtigung Ausland sind identisch.
- **Hinweis 2:** Die Begriffe "Verminderung" (bzw. "Minderung") und "Reduzierung" werden hier nicht synonym verwendet: "*Reduzierung*" (gem. Gleichung Gl. (36 bis Gl. (38) bezeichnet den ökologisch erforderlichen Rückgang der *Deposition* (in den Rastern bzw. in einer Kreisregion respektive Küstenzone) zur Einhaltung des ökologischen Qualitätsziels (CL_{eutN}, CAI). "*(Ver)Minderung*" bezeichnet den nach Gleichung Gl. (42) (und folgende) berechneten Beitrag zur Minderung der *Emission*, der sich unter Einbezug der Source-Receptor-Beziehungen zwischen den BL sowie dem Ausland ergibt; zunächst für die Ebene des BL und anschließend für die Kreisregionen innerhalb eines BL.

Die ökologisch erforderliche Reduzierung der NH_x-Deposition *Red_NH3-Dep_KR(90P)* (s. Gleichungen Gl. (39) und Gl. (40) für Anforderungsniveau 90P in einer Kreisregion *KR* bzw. einer Küstenzone wird gemäß Quellen-Senken-Beziehungen der S-R-Table rechnerisch verteilt (Symbol ⇒) auf die Emissionen aus den 16 BL (und dem Ausland) als Quellen dieser Deposition:

$$\begin{aligned} Red_NH3-Dep_KR(90P) \Rightarrow & Mind_NH3-Em(90P)_{KR,S} * NH3(S-R)\%_{KR,1} & \text{Gl. (41)} \\ & + Mind_NH3-Em(90P)_{KR,S} * NH3(S-R)\%_{KR,2} \\ & \dots \\ & + Mind_NH3-Em(90P)_{KR,S} * NH3(S-R)\%_{KR,17} \end{aligned}$$

$$\text{mit } \sum_{S=1}^{17} NH3(S-R)\%_{KR,S} = 100 \%$$

mit

<i>Mind_NH3-Em(90P)_{KR,S}</i>	[t N]	Beitrag der NH ₃ -Emissionsminderung im Bundesland <i>S</i> zur gesamten erforderlichen Reduzierung der Deposition in der Kreisregion <i>KR</i> (bzw. einer Küstenzone)
--	-------	--

Diese Aufteilung der ökologisch erforderlichen Reduzierung *Red_NH3-Dep_KR(90P)* auf die 17 räumlichen Einheiten der Quellen gem. Gleichung Gl. (42) wird für alle *KR* = 302 Kreisregionen zzgl. 2 Küstenzonen durchgeführt. Im Ergebnis wird eine 302 x 17 Matrix berechnet mit den individuellen Beiträgen der NH₃-Emissionsminderung *Mind_NH3-Em(90P)_{KR,S}* in allen *S* = 17 Quellregionen¹⁴ (16 Bundesländern und Ausland) zur gesamten ökologisch erforderlichen Reduzierung der Deposition in allen *KR* = 302 Kreisregionen und 2 Küstenzonen.

Die Spaltensummen über die *S* = 17 Quellregionen dieser Matrix beziffern den erforderlichen Minderungsbetrag der Emissionen, der auf ein BL bzw. das Ausland entfällt.

$$Mind_NH3-Em_BL(90P)_S = \sum_{KR=1}^{302} [Mind_NH3-Em(90P)_{KR,S}] \quad \text{Gl. (42)}$$

mit

<i>Mind_NH3-Em_BL(90P)_S</i>	[t N]	Erforderliche Minderung der NH ₃ -Emissionen im BL <i>S</i> (bzw. im Ausland), damit der Beitrag des BL <i>S</i> zur ökologisch erforderlichen Reduzierung der Deposition in allen <i>KR</i> ausreicht
--	-------	---

¹⁴ Die räumliche Aufteilung der Herkünfte der Depositionen auf (nur) 16 Bundesländer, die zudem sehr unterschiedliche Gebietsgrößen umfassen, sowie das Ausland ist aus fachlicher Sicht nicht zufriedenstellend. Für zukünftige Anwendungen des hier vorgestellten Ansatzes sollten S-R-Tables mit einer räumlichen Auflösung für Kreisregionen zur Verfügung stehen, so dass die räumliche Aufteilung der Herkünfte mit Regionalgliederung Kreisregionen (und nicht nur Bundesländer) vorgenommen werden kann.

Die Summe über allen 302 x 17 Minderungsbeträgen

$$\sum_{KR=1}^{302} \left[\sum_{S=1}^{17} Mind_NH3-Em(90P)_{KR,S} \right] \quad [t\ N]$$

entspricht der ökologisch erforderlichen Minderung der NH₃-Emissionen in Deutschland und dem Ausland insgesamt (hier: für Anforderungsniveau 90P, mit Berücksichtigung Ausland). Aus dieser ökologisch erforderlichen Minderung der NH₃-Emissionen *Mind_NH3-Em_BL(90P)* auf BL-Ebene (Gleichung Gl. (42) muss schließlich die tatsächliche erforderliche brutto-Minderung der NH₃-Emissionen ermittelt werden. Die tatsächlich erforderliche Minderung der Emissionen ist größer als die ökologisch erforderliche Menge, weil nicht alle Emissionen aus einer KR bzw. einem BL auch in Deutschland wirksam werden, d. h. dort deponieren, sondern ein (teilweise beträchtlicher) Anteil über den atmosphärischen Transport auch ins Ausland verfrachtet wird. Die S-R-Tables geben auch diesen Anteil der Emission eines BL *NH3-Em_ext%_{BL}* an, der nicht in Deutschland deponiert, sondern über den atmosphärischen Transport ins Ausland gelangt¹⁵ Tabelle 23.

Tabelle 23: Anteil der NH₃- bzw. NO_x-Emission eines Bundeslandes, der nach S-R-Tables außerhalb der Fläche Deutschlands im Ausland deponiert (PINETI-4, Kranenburg et al. 2024).

	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SL	SH	SN	ST	TH
NH₃	65,5%	58,6%	46,6%	52,4%	37,7%	49,3%	38,9%	73,5%	50,4%	49,3%	50,5%	53,0%	59,0%	75,7%	59,7%	64,8%
NO_x	89,5%	78,7%	73,1%	77,2%	80,1%	75,2%	73,6%	87,5%	82,3%	81,0%	77,3%	80,2%	86,2%	85,9%	83,9%	80,6%

Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR.

Von der Minderung der NH₃-Emission in einem BL bewirkt somit nur der Anteil $(1 - NH3_Em_ext\%_{BL})$ auch eine Minderung der NH_x-Deposition (in Deutschland).

Die erforderliche Brutto-Reduzierung (Überhöhung) der NH₃-Emissionen in den 16 BL wird dann berechnet zu

$$brutto_Mind_NH3-Em_BL(90P) = Mind_NH3-Em_BL(90P) * (1 - NH3-Em_ext\%_{BL}) \quad \text{Gl. (43)}$$

Diese Brutto-Verminderung für jedes BL muss anschließend noch auf die KR im betreffenden BL verteilt werden. Aufgrund der begrenzten Auflösung der S-R-Tables (nur für BL) wird angenommen, dass die Ist-Emission in allen KR im gleichen Verhältnis wie für das BL insgesamt vermindert werden muss. Die absolute Menge der erforderlichen Verminderung der NH₃-Emission in den KR *brutto-Mind_NH3-Em_KR(90P)* [in t N] wird dann mit dieser relativen Minderung berechnet aus der Ist-Emission in den KR:

$$rel_Mind_NH3-Em_BL(90P) = brutto_Mind_NH3-Em_BL(90P) / NH3-Em_BL \quad \text{Gl. (44)}$$

$$brutto_mind_NH3-Em_KR(90P)_{KR} = rel_Mind_NH3-Em_BL(90P) * NH3-Em_KR \quad \text{Gl. (45)}$$

mit

<i>rel_Mind_NH3-Em_BL(90P)</i>	[%]	Relative Verminderung der Ist-Emission im Bundesland <i>BL</i> zum Erreichen der erforderlichen Brutto-Minderung
<i>brutto_Mind_NH3-Em_KR(90P)</i>	[t N]	erforderliche Brutto-Verminderung der NH ₃ -Emission in der Kreisregion <i>KR</i>

¹⁵ Analog zu Fußnote 10 sollten für zukünftige Anwendungen die Angaben der S-R-Tables zu den NH₃- bzw. NO_x-Emission, die außerhalb der Gebietsfläche deponieren, mit räumlicher Auflösung für Kreisregionen zur Verfügung stehen.

4. Schritt: Ergebnisse zur erforderlichen Verminderung der Emissionen

Tabelle 24 und Tabelle 25 zeigen die Ergebnisse der ökologisch erforderlichen Reduzierung der Deposition sowie die dafür erforderliche Verminderung der Emissionen für NH_3 (Tabelle 24) und für NO_x (Tabelle 25), aggregiert für Deutschland insgesamt sowie für die einzelnen BL, mit Berücksichtigung der Verminderung der Emissionen im Ausland. Für das Anforderungsniveau 90-Perzentil (s. 2. Schritt) betragen die erforderlichen Emissionsminderungen in Deutschland 326,2 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ und 257,8 kt $\text{NO}_x\text{-N}$, was 69,5 % der $\text{NH}_3\text{-N}$ - respektive 75,1 % der $\text{NO}_x\text{-N}$ -Emissionen in Deutschland entspricht. Zur Erreichung der ökologisch erforderlichen Verminderung müssen außerdem im Ausland Beiträge zur Emissionsminderung i. H. v. 74,4 kt $\text{NH}_3\text{-N}$ und 61,7 kt $\text{NO}_x\text{-N}$ geleistet werden. Die Angaben in Tabelle 24 und Tabelle 25 sind aufgeschlüsselt für die Bundesländer (als räumliche Einheiten der Source-Receptor-Beziehungen). Zwischen den BL tritt eine relativ große Spreizung der erforderlichen Brutto-Reduzierung der NH_x - und der NO_y -Depositionen auf, die bspw. für NH_3 von 48 % (für BW und HH) bis 119 % (für MV) reicht. Für NH_3 mit Anforderungsniveaus 90-Perzentil ist in den BL Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen die erforderliche Verminderung rechnerisch größer als die Ist-Emission.

Für das Anforderungsniveau 50-Perzentil ergeben sich deutlich niedrigere und für Maximum höhere Werte der erforderlichen Verminderung der NH_3 - und der NO_x -Emissionen. Für Deutschland insgesamt liegen diese Mengen für das Anforderungsniveau Maximum für beide N-Verbindungen zwar noch unterhalb der Ist-Emission (Jahr 2019), aber für jeweils vier BL übersteigt die erforderliche Verminderung die Ist-Emission innerhalb des BL, sowohl für NH_3 als auch für NO_x .

In Tabelle 26 und Tabelle 27 sind die Ergebnisse für die Berechnungen ohne Berücksichtigung von Emissionsminderungen im Ausland dargestellt. Offensichtlich ist die Prämisse, die erforderliche Verminderung nur national, d.h. ausschließlich durch Emissionsminderung im Bundesgebiet zu erbringen, bereits für das Anforderungsniveau Median nur für NH_3 in Deutschland insgesamt zu leisten, aber nicht für alle BL. Für die ambitionierteren Anforderungsniveaus 90-Perzentil und Maximum sowie für NO_x auch bereits mit Anforderungsniveau Median sind die erforderlichen Emissionsminderungen für Deutschland insgesamt und für die meisten bzw. alle BL größer als die Ist-Emissionen.

Tabelle 24: Ökologisch erforderliche Reduzierung und erforderliche Brutto-Verminderung (Überhöhung) der nationalen NH_3 -Emissionen in Deutschland (insgesamt und verteilt auf die Bundesländer) sowie erforderliche ausländische Beiträge (Jahr 2019) für drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels.

NH ₃ - mit Reduzierung Emissionen Ausland	DE ges.	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SL	SH	SN	ST	TH	Ausland
IST- Emission und Deposition																		
NH ₃ -Emission (2019, GRETA) (t N)	469.620	20.316	444	37.682	93.792	1.212	15.899	3.710	14.993	118.705	65.982	11.914	1.301	41.877	9.059	20.615	12.119	
NH _x -Deposition (2019, PINETI-4) (t N) ^a	340.557	20.870	657	28.897	62.700	706	14.381	1.453	18.887	67.884	44.253	13.225	1.839	23.251	12.022	14.161	10.146	
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau 50P (Median)																		
Ökolog. erforderl. Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	143.301	7.635	231	6.564	16.995	607	5.022	1.045	5.287	46.272	26.609	3.604	376	11.387	2.622	6.714	2.331	
Erforderliche Minderung Em. inkl. Überhöhung (t N)	214.609	14.900	376	7.484	23.679	713	6.115	1.277	13.368	66.836	33.107	3.745	353	20.116	6.747	11.474	4.320	46.888
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	45,7 %	73 %	85 %	20 %	25 %	59 %	38 %	34 %	89 %	56 %	50 %	31 %	27 %	48 %	74 %	56 %	36 %	
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau 90P (90-Perzentil)																		
Ökolog. erforderl. Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	221.694	9.709	272	16.097	34.614	790	8.259	1.457	7.071	60.974	38.683	6.698	1.032	17.340	4.092	9.501	5.104	
Erforderliche Minderung Em. inkl. Überhöhung (t N)	326.194	18.909	443	18.001	48.012	925	9.993	1.778	17.890	87.857	47.821	6.773	860	30.865	10.476	16.191	9.399	74.442
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	69,5 %	93 %	100 %	48 %	51 %	76 %	63 %	48 %	119 %	74 %	72 %	57 %	66 %	74 %	116 %	79 %	78 %	
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau MAX (Maximum)																		
Ökolog. erforderl. Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	266.517	10.750	294	22.552	46.953	899	9.934	1.612	8.257	68.942	44.735	8.586	1.263	19.428	4.795	11.089	6.429	
Erforderliche Minderung Em. inkl. Überhöhung (t N)	389.261	20.920	477	25.145	65.131	1.055	12.005	1.962	20.880	99.239	55.214	8.609	1.063	34.570	12.267	18.892	11.832	90.291
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	82,9 %	103 %	107 %	67 %	69 %	87 %	76 %	53 %	139 %	84 %	84 %	72 %	82 %	83 %	135 %	92 %	98 %	

^a Incl. Deposition auf Küstenbereiche Nordsee und Ostsee (1-nautische Meile -Zone)

^b Incl. Reduzierung der Deposition auf Küstenbereiche Nordsee und Ostsee (1-nautische Meile -Zone).

^c Werte in Fettdruck: die rechnerisch erforderliche Reduzierung der Deposition überschreitet die Emissionsmenge in Bundesland

Tabelle 25: Ökologisch erforderliche Reduzierung und erforderliche Brutto-Verminderung (Überhöhung) der nationalen NO_x -Emissionen in Deutschland (insgesamt und verteilt auf die Bundesländer) sowie erforderliche ausländische Beiträge (Jahr 2019) für drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels.

NO_x - mit Reduzierung Emissionen Ausland	DE ges.	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SL	SH	SN	ST	TH	Ausland
IST- Emission und Deposition																		
NO_x -Emission (2019, GRETA) (t N)	343.128	19.869	5.891	37.072	52.031	2.736	21.715	6.636	8.564	37.085	74.907	18.035	3.899	14.189	17.836	13.926	8.735	
NO_x -Deposition (2019, PINETI-4) (t N) ^a	176.773	13.290	567	17.254	32.628	168	10.662	485	11.359	22.761	20.905	9.554	1.244	8.895	8.896	8.300	7.133	
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau 50P (Median)																		
Ökolog. erforderl. Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	68.865	3.500	923	5.568	7.995	443	5.000	1.198	1.868	10.140	17.545	3.734	641	2.925	2.753	3.074	1.560	
Erforderliche Minderung Em. inkl. Überhöhung (t N)	162.659	14.803	2.020	9.548	16.450	917	9.355	1.841	5.925	23.984	40.227	7.340	1.412	7.786	8.771	8.626	3.655	38.628
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	47,4 %	75 %	34 %	26 %	32 %	34 %	43 %	28 %	69 %	65 %	54 %	41 %	36 %	55 %	49 %	62 %	42 %	
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau 90P (90-Perzentil)																		
Ökolog. erforderl. Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	110.938	4.639	1.179	11.984	15.560	611	8.336	1.702	2.531	14.059	26.478	6.651	1.303	4.381	4.180	4.444	2.900	
Erforderliche Minderung Em. inkl. Überhöhung (t N)	257.753	19.610	2.557	20.693	32.280	1.267	15.720	2.598	8.037	33.413	61.130	13.127	2.831	11.625	13.396	12.536	6.932	61.703
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	75,1 %	99 %	43 %	56 %	62 %	46 %	72 %	39 %	94 %	90 %	82 %	73 %	73 %	82 %	75 %	90 %	79 %	
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau MAX (Maximum)																		
Ökolog. erforderl. Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	134.673	5.238	1.314	15.958	20.436	700	10.157	1.925	2.950	16.122	31.264	8.364	1.617	4.950	4.902	5.204	3.572	
Erforderliche Minderung Em. inkl. Überhöhung (t N)	311.155	22.134	2.839	27.617	42.520	1.458	19.191	2.938	9.372	38.428	72.387	16.531	3.528	13.179	15.744	14.714	8.574	74.621
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	90,7 %	111 %	48 %	74 %	82 %	53 %	88 %	44 %	109 %	104 %	97 %	92 %	90 %	93 %	88 %	106 %	98 %	

^a Incl. Deposition auf Küstenbereiche Nordsee und Ostsee (1-nautische Meile -Zone)

^b Incl. Reduzierung der Deposition auf Küstenbereiche Nordsee und Ostsee (1-nautische Meile -Zone).

^c Werte in Fettdruck: die rechnerisch erforderliche Reduzierung der Deposition überschreitet die Emissionsmenge in Bundesland

Tabelle 26: Ökologisch erforderliche Reduzierung und erforderliche Brutto-Verminderung (Überhöhung) der nationalen NH_3 -Emissionen in Deutschland (insgesamt und verteilt auf die Bundesländer) - ohne Beiträge zur Emissionsminderung aus dem Ausland - für drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels.

NH_3 - <u>ohne</u> Reduzierung Emissionen Ausland	DE ges.	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SL	SH	SN	ST	TH
IST- Emission und Deposition																	
NH ₃ -Emission (2019, GRETA) (t N)	469.620	20.316	444	37.682	93.792	1.212	15.899	3.710	14.993	118.705	65.982	11.914	1.301	41.877	9.059	20.615	12.119
NH _x -Deposition (2019, PINETI-4) (t N) ^a	340.557	20.870	657	28.897	62.700	706	14.381	1.453	18.887	67.884	44.253	13.225	1.839	23.251	12.022	14.161	10.146
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau 50P (Median)																	
Ökolog. erforderliche Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	143.301	7.635	231	6.564	16.995	607	5.022	1.045	5.287	46.272	26.609	3.604	376	11.387	2.622	6.714	2.331
Erforderliche Brutto-Minderung inkl. Überhöhung in DE (t N)	318.949	22.142	558	12.281	35.711	974	9.904	1.709	19.946	93.313	52.486	7.286	800	27.771	10.809	16.641	6.618
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	67,9 %	109 %	126 %	33 %	38 %	80 %	62 %	46 %	133 %	79 %	80 %	61 %	62 %	66 %	119 %	81 %	55 %
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau 90P (90-Perzentil)																	
Ökolog. erforderliche Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	221.694	9.709	272	16.097	34.614	790	8.259	1.457	7.071	60.974	38.683	6.698	1.032	17.340	4.092	9.501	5.104
Erforderliche Brutto-Minderung inkl. Überhöhung in DE (t N)	490.481	28.154	659	30.117	72.734	1.267	16.288	2.383	26.676	122.963	76.304	13.542	2.196	42.288	16.871	23.549	14.490
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	104,4 %	139 %	148 %	80 %	78 %	105 %	102 %	64 %	178 %	104 %	116 %	114 %	169 %	101 %	186 %	114 %	120 %
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau MAX (Maximum)																	
Ökolog. erforderliche Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	266.517	10.750	294	22.552	46.953	899	9.934	1.612	8.257	68.942	44.735	8.586	1.263	19.428	4.795	11.089	6.429
Erforderliche Brutto-Minderung inkl. Überhöhung in DE (t N)	587.762	31.173	710	42.195	98.661	1.443	19.590	2.637	31.150	139.030	88.240	17.358	2.688	47.380	19.771	27.484	18.252
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	125,2 %	153 %	160 %	112 %	105 %	119 %	123 %	71 %	208 %	117 %	134 %	146 %	207 %	113 %	218 %	133 %	151 %

^a Incl. Deposition auf Küstenbereiche Nordsee und Ostsee (1-nautische Meile -Zone)

^b Incl. Reduzierung der Deposition auf Küstenbereiche Nordsee und Ostsee (1-nautische Meile -Zone).

^c Werte in Fettdruck: die rechnerisch erforderliche Reduzierung der Deposition überschreitet die Emissionsmenge in Bundesland

Tabelle 27: Ökologisch erforderliche Reduzierung und erforderliche Brutto-Verminderung (Überhöhung) der nationalen NO_x -Emissionen in Deutschland (insgesamt und verteilt auf die Bundesländer) - ohne Beiträge zur Emissionsminderung aus dem Ausland - für drei Anforderungsniveaus des Qualitätsziels.

NO_x - <u>ohne</u> Reduzierung Emissionen Ausland	DE ges.	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SL	SH	SN	ST	TH
IST- Emission und Deposition																	
NO _x -Emission (2019, GRETA) (t N)	343.128	19.869	5.891	37.072	52.031	2.736	21.715	6.636	8.564	37.085	74.907	18.035	3.899	14.189	17.836	13.926	8.735
NO _y -Deposition (2019, PINETI-4) (t N) ^a	176.773	13.290	567	17.254	32.628	168	10.662	485	11.359	22.761	20.905	9.554	1.244	8.895	8.896	8.300	7.133
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau 50P (Median)																	
Ökolog. erforderliche Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	68.865	3.500	923	5.568	7.995	443	5.000	1.198	1.868	10.140	17.545	3.734	641	2.925	2.753	3.074	1.560
Erforderliche Brutto-Minderung inkl. Überhöhung in DE (t N)	372.959	33.350	4.342	20.726	35.072	2.223	20.150	4.536	14.983	57.329	92.551	16.476	3.237	21.196	19.590	19.143	8.055
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	108,7 %	168 %	74 %	56 %	67 %	81 %	93 %	68 %	175 %	155 %	124 %	91 %	83 %	149 %	110 %	137 %	92 %
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau 90P (90-Perzentil)																	
Ökolog. erforderliche Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	110.938	4.639	1.179	11.984	15.560	611	8.336	1.702	2.531	14.059	26.478	6.651	1.303	4.381	4.180	4.444	2.900
Erforderliche Brutto-Minderung inkl. Überhöhung in DE (t N)	585.269	44.211	5.548	44.609	68.262	3.064	33.597	6.445	20.299	79.486	139.676	29.343	6.578	31.747	29.747	27.678	14.978
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	170,6 %	223 %	94 %	120 %	131 %	112 %	155 %	97 %	237 %	214 %	186 %	163 %	169 %	224 %	167 %	199 %	171 %
Erforderliche Reduzierung Emission - Anforderungsniveau MAX (Maximum)																	
Ökolog. erforderliche Reduzierung Emission in DE (t N) ^b	134.673	5.238	1.314	15.958	20.436	700	10.157	1.925	2.950	16.122	31.264	8.364	1.617	4.950	4.902	5.204	3.572
Erforderliche Brutto-Minderung inkl. Überhöhung in DE (t N)	703.303	49.918	6.183	59.404	89.650	3.511	40.936	7.289	23.655	91.151	164.923	36.903	8.164	35.871	34.889	32.405	18.450
Erforderliche Minderung Em., relativ zu Ist-Emission ^c	205,0 %	251 %	105 %	160 %	172 %	128 %	189 %	110 %	276 %	246 %	220 %	205 %	209 %	253 %	196 %	233 %	211 %

^a Incl. Deposition auf Küstenbereiche Nordsee und Ostsee (1-nautische Meile -Zone)

^b Incl. Reduzierung der Deposition auf Küstenbereiche Nordsee und Ostsee (1-nautische Meile -Zone)

^c Werte in Fettdruck: die rechnerisch erforderliche Reduzierung der Deposition überschreitet die Emissionsmenge in Bundesland

Tabelle 28: NH_x- und NO_y-Deposition sowie NH₃- und NO_x-Emissionen 2020, Überschreitung der Critical Load und erforderliche Minderung von NH_x- und NO_y-Deposition zum Schutz der terrestrischen Ökosysteme in den Kreisregionen und der marinen Ökosysteme in den Küstenzonen vor Eutrophierung durch Stickstoff.

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x	NO _y		NH _x	NO _y	NH ₃	NO _x	NH ₃	NO _x
			t N	t N		t N	t N	t N	t N	t N	t N
1051	Dithmarschen	507	2090,2	842,1	467,6	1678,2	676,1	3758,9	1271,9	2770,5	1042,0
1053	Herzogtum Lauenburg	938	1645,5	672,0	1056,6	1353,9	552,9	2146,3	884,5	1581,9	724,6
1054	Nordfriesland	841	3076,9	1235,9	579,5	2364,5	949,7	6684,2	1258,8	4926,6	1031,3
1055	Ostholstein	815	2001,2	877,5	731,5	1565,4	686,4	2597,7	1630,6	1914,6	1335,9
1056	Pinneberg	343	1007,5	357,9	358,0	806,0	286,3	1445,4	1017,3	1065,3	833,4
1057	Plön	638	1508,1	560,4	584,9	1136,1	422,2	2517,5	711,5	1855,5	582,9
1058	Rendsburg-Eckernförde	1436	3765,7	1404,8	1687,2	3021,0	1126,9	6567,3	2547,2	4840,4	2086,8
1059	Schleswig-Flensburg	936	3302,0	1170,2	942,7	2645,4	937,5	7594,5	1592,4	5597,5	1304,6
1060	Segeberg	862	2063,0	756,5	1030,8	1699,7	623,3	3243,8	1142,5	2390,8	936,1
1061	Steinburg	440	1675,9	591,9	598,1	1391,4	491,5	3601,2	973,5	2654,2	797,5
1062	Stormarn	490	1115,3	426,1	548,6	918,6	351,0	1719,7	1159,1	1267,5	949,6
2000	Hamburg	186	1452,6	485,1	301,8	1225,6	409,3	3710,4	6636,4	1778,1	2597,7
3151	Gifhorn	1288	1383,8	740,1	1105,9	1094,1	585,1	1226,5	656,7	907,8	591,7
3153	Goslar	781	854,6	590,9	394,0	435,5	301,1	435,3	757,5	322,2	682,5
3154	Helmstadt	515	621,2	410,0	200,2	437,1	288,5	539,5	1357,0	399,3	1222,7
3155	Northeim	868	988,6	630,6	451,7	623,3	397,6	1018,8	683,0	754,0	615,4
3157	Peine	251	410,7	246,7	88,8	281,6	169,1	537,0	720,2	397,5	648,9
3158	Wolfenbüttel	526	804,1	538,9	170,4	459,0	307,6	649,3	2780,4	480,6	2505,1
3159	Göttingen	1363	1312,5	936,1	529,1	780,8	556,9	1175,0	1295,7	869,7	1167,4

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x t N	NO _y t N		NH _x t N	NO _y t N	NH ₃ t N	NO _x t N	NH ₃ t N	NO _x t N
3241	Region Hannover	1413	2250,9	1111,9	1105,4	1784,3	881,4	1975,1	3418,4	1461,8	3079,9
3251	Diepholz	1289	3256,7	788,2	1497,5	2610,3	631,7	6016,1	1053,0	4452,7	948,8
3252	Hameln-Pyrmont	492	832,4	411,1	241,9	552,1	272,6	791,3	519,3	585,7	467,8
3254	Hildesheim	629	954,5	565,8	219,4	607,0	359,8	901,0	1136,9	666,8	1024,3
3255	Holzminde	562	666,1	367,1	308,1	429,0	236,4	515,9	415,7	381,8	374,6
3256	Nienburg (Weser)	994	1830,8	590,4	1057,6	1504,8	485,3	2644,7	700,1	1957,4	630,8
3257	Schaumburg	396	795,8	345,8	283,9	584,2	253,8	742,1	744,0	549,3	670,4
3351	Celle	1397	1741,7	788,6	1552,9	1406,5	636,9	1612,0	559,7	1193,1	504,3
3352	Cuxhaven	1115	3733,6	1041,9	1330,7	2836,8	791,6	8253,3	1590,4	6108,5	1432,9
3353	Harburg	1011	1667,6	620,0	1083,3	1343,3	499,5	1499,0	1007,5	1109,5	907,7
3354	Lüchow-Dannenberg	1071	1033,2	545,0	898,7	808,8	426,6	1010,3	308,0	747,7	277,5
3355	Lüneburg	1096	1360,2	628,9	1070,8	1080,9	499,7	1277,0	585,5	945,1	527,6
3356	Osterholz	443	1102,8	294,7	553,0	894,9	239,1	1682,0	369,3	1244,9	332,7
3357	Rotenburg (Wümme)	1628	3278,5	895,5	1860,0	2594,7	708,7	6231,5	1062,3	4612,1	957,1
3358	Heidekreis	1718	2452,1	915,6	1822,5	1961,2	732,3	2121,2	1049,7	1570,0	945,7
3359	Stade	614	1934,7	591,4	542,7	1427,7	436,5	3428,7	791,3	2537,7	712,9
3360	Uelzen	1240	1368,7	671,4	1060,7	1059,6	519,8	1160,4	572,6	858,9	515,9
3361	Verden	451	1143,4	329,7	529,2	941,1	271,3	1896,7	625,6	1403,8	563,6
3451	Ammerland	480	1363,8	336,6	678,7	959,5	236,9	2276,2	498,7	1684,7	449,4
3452	Aurich	401	2113,3	721,9	376,7	1499,4	512,2	3579,1	886,5	2649,0	798,8
3453	Cloppenburg	967	3682,6	648,1	2019,0	3127,5	550,4	11951,5	979,6	8845,6	882,6

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x t N	NO _y t N		NH _x t N	NO _y t N	NH ₃ t N	NO _x t N	NH ₃ t N	NO _x t N
3454	Emsland	2133	6281,2	1392,0	3946,1	5283,4	1170,9	13792,1	2439,9	10207,8	2198,3
3455	Friesland	281	1300,6	357,0	323,4	906,6	248,8	2373,7	869,1	1756,8	783,0
3456	Grafschaft Bentheim	648	2102,8	505,5	1149,0	1794,6	431,4	5247,1	808,0	3883,5	728,0
3457	Leer	325	1704,4	505,6	311,9	1213,9	360,1	3422,9	750,5	2533,4	676,1
3458	Oldenburg	858	2815,2	548,4	1638,9	2425,8	472,6	5693,2	1296,5	4213,7	1168,2
3459	Osnabrück	1719	4151,0	1116,7	2314,5	3352,7	901,9	7816,8	2138,4	5785,4	1926,6
3460	Vechta	578	2233,5	352,5	1352,2	1978,7	312,3	8599,5	826,2	6364,7	744,4
3461	Wesermarsch	211	1350,1	366,4	160,2	888,1	241,0	2727,2	547,1	2018,5	493,0
3462	Wittmund	196	1006,3	313,8	224,8	717,8	223,8	1885,8	284,4	1395,8	256,2
4011	Bremen	88	705,8	167,9	118,6	515,0	122,5	1212,0	2735,8	925,3	1267,4
5112	Duisburg, Essen, Mühl- heim, Oberh.	229	777,9	505,3	212,7	554,3	360,1	470,7	8498,3	341,1	6935,3
5124	Wuppertal	239	448,1	301,8	252,3	329,9	222,2	325,2	1310,4	235,7	1069,4
5154	Kleve	675	2225,4	703,6	936,7	1700,2	537,6	4415,2	1623,1	3199,9	1324,6
5158	Mettmann	375	719,6	518,3	262,9	451,7	325,3	576,5	3156,3	417,8	2575,8
5162	Neuss	296	774,1	499,8	206,7	494,7	319,4	723,6	6705,6	524,4	5472,3
5166	Viersen	386	1004,4	453,7	411,9	710,8	321,1	1272,8	1658,8	922,5	1353,7
5170	Wesel	675	1574,7	627,0	920,7	1302,2	518,4	2630,8	2237,4	1906,7	1825,9
5334	Städteregion Aachen	488	789,3	499,6	320,6	541,3	342,6	572,0	3840,9	414,6	3134,5
5358	Düren	454	733,4	513,5	210,8	426,4	298,5	630,2	987,3	456,7	805,7
5362	Rhein-Erft-Kreis	441	871,9	744,9	238,0	518,2	442,7	686,4	9755,0	497,4	7960,8
5366	Euskirchen	981	961,7	618,2	250,3	477,1	306,7	1049,5	891,2	760,6	727,3

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x t N	NO _y t N		NH _x t N	NO _y t N	NH ₃ t N	NO _x t N	NH ₃ t N	NO _x t N
5370	Heinsberg	283	811,9	404,9	273,1	595,9	297,2	976,7	652,7	707,9	532,7
5374	Oberbergischer Kreis	878	1074,1	676,1	747,3	588,8	370,6	1092,1	757,4	791,5	618,1
5378	Rheinisch-Berg.-Kreis	475	600,9	421,8	451,7	379,4	266,3	678,1	1151,3	491,4	939,5
5382	Rhein-Sieg	972	1146,0	861,0	634,4	680,1	511,0	1092,0	2384,8	791,4	1946,2
5515	Münster	219	542,5	175,9	241,7	445,5	144,4	706,7	764,6	512,2	624,0
5554	Borken	1110	2919,6	778,5	1773,9	2474,3	659,7	7630,0	1196,0	5529,9	976,1
5558	Coesfeld	826	1956,5	614,1	843,8	1618,0	507,9	5002,3	874,4	3625,4	713,6
5562	Recklingshausen	676	1495,9	698,6	995,5	1272,8	594,4	1974,5	5065,0	1431,0	4133,4
5566	Steinfurt	1415	3335,7	906,2	1923,5	2741,8	744,9	6788,2	1977,0	4919,8	1613,4
5570	Warendorf	998	2102,1	671,4	989,0	1663,5	531,3	5454,5	1122,4	3953,2	915,9
5711	Bielefeld	186	406,7	171,6	202,1	325,4	137,3	217,7	619,0	157,8	505,2
5754	Gütersloh	749	1554,4	516,2	907,6	1255,0	416,8	2819,0	1106,2	2043,1	902,7
5758	Herford	309	644,9	237,4	131,9	374,5	137,9	800,2	759,5	580,0	619,8
5762	Höxter	837	1240,7	611,0	342,0	694,8	342,2	2081,8	664,1	1508,8	542,0
5766	Lippe	1015	1590,9	734,6	664,6	1173,3	541,8	1344,4	1285,4	974,4	1049,0
5770	Minden-Lübbecke	693	1596,1	528,7	561,0	1202,4	398,3	2429,0	1096,2	1760,4	894,6
5774	Paderborn	937	1702,5	727,8	707,7	1283,5	548,7	2716,9	952,5	1969,1	777,3
5913	Dortmund	191	548,0	384,5	88,8	363,8	255,3	308,0	2473,8	223,2	2018,8
5954	Ennepe-Ruhr	497	668,1	457,5	436,0	465,1	318,5	467,7	1438,8	339,0	1174,2
5958	Hochsauerlandkreis	1823	1948,4	1147,5	1030,2	1140,7	671,8	1819,2	1012,7	1318,4	826,4
5962	Märkischer Kreis	980	1199,7	771,0	1011,0	812,6	522,2	914,3	1250,2	662,7	1020,3

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x t N	NO _y t N		NH _x t N	NO _y t N	NH ₃ t N	NO _x t N	NH ₃ t N	NO _x t N
5966	Olpe	689	679,6	453,2	523,1	415,5	277,1	478,3	525,1	346,7	428,5
5970	Siegen-Wittgenstein	1092	996,9	710,0	667,3	584,6	416,4	433,8	897,8	314,4	732,7
5974	Soest	890	1589,9	765,2	485,8	906,2	436,1	2706,3	1503,9	1961,4	1227,3
5978	Unna	487	1020,8	495,1	301,4	759,7	368,5	1697,1	2711,9	1230,0	2213,2
6431	Bergstraße	578	512,6	422,1	303,8	345,5	284,5	432,1	817,5	271,6	591,8
6432	Darmstadt-Dieburg	532	544,1	440,9	194,1	333,9	270,5	615,7	1301,2	387,0	942,0
6433	Groß-Gerau	272	247,8	238,7	104,2	161,2	155,2	220,4	952,1	138,5	689,2
6434	Hochtaunuskreis	377	289,5	263,8	104,6	140,3	127,9	166,4	491,9	104,6	356,1
6435	Main-Kinzig-Kreis	1118	943,6	737,8	502,0	592,0	462,9	902,5	1471,8	567,2	1065,4
6436	Main-Taunus-Kreis	305	427,4	424,8	78,9	187,9	186,8	574,9	3641,7	361,3	2636,3
6437	Odenwaldkreis	559	487,4	350,7	405,1	327,4	235,6	466,4	274,1	293,1	198,4
6438	Offenbach	312	268,0	249,7	102,5	154,1	143,6	202,6	1341,1	127,3	970,8
6439	Rheingau-Taunus-Kreis	740	449,7	418,4	187,2	219,9	204,5	233,4	678,5	146,7	491,2
6440	Wetteraukreis	701	659,2	524,1	195,1	357,6	284,3	790,0	1024,9	496,5	742,0
6531	Gießen	662	546,0	421,2	212,5	282,5	218,0	576,8	1099,2	362,6	795,7
6532	Lahn-Dill-Kreis	982	689,9	565,5	337,4	359,5	294,7	381,0	930,6	239,5	673,7
6533	Limburg-Weilburg	567	464,3	357,3	168,8	238,1	183,2	546,6	649,0	343,6	469,8
6534	Marburg-Biedenkopf	998	805,2	573,1	420,5	479,0	341,0	928,9	735,5	583,8	532,4
6535	Vogelsbergkreis	1214	1029,6	674,5	366,5	599,1	392,5	1428,0	611,0	897,5	442,3
6631	Fulda	1133	1012,4	664,8	489,4	634,2	416,4	1717,5	1288,7	1079,5	932,9
6632	Hersfeld-Rotenburg	934	778,7	544,0	549,9	497,9	347,8	814,3	999,5	511,8	723,6

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x	NO _y		NH _x	NO _y	NH ₃	NO _x	NH ₃	NO _x
			t N	t N		t N	t N	t N	t N	t N	t N
6633	Kassel	1013	1108,0	728,4	450,7	691,8	454,8	1017,3	1488,5	639,4	1077,6
6634	Schwalm-Eder-Kreis	1151	1077,7	688,5	474,8	653,6	417,6	1573,7	787,3	989,1	569,9
6635	Waldeck-Frankenberg	1571	1333,6	840,0	679,0	795,1	500,8	1698,5	663,3	1067,5	480,2
6636	Werra-Meißner-Kreis	896	706,1	534,2	378,9	431,6	326,5	612,3	467,9	384,8	338,7
7131	Ahrweiler	736	564,6	424,8	291,9	314,3	236,5	352,9	614,1	200,6	447,0
7132	Altenkirchen (Westerw.)	624	575,2	417,5	358,1	264,3	191,9	428,1	333,6	243,4	242,8
7133	Bad Kreuznach	724	420,2	363,3	78,4	146,3	126,5	311,7	530,7	177,2	386,3
7134	Birkenfeld	750	481,7	352,5	102,4	211,3	154,6	336,5	245,7	191,3	178,8
7135	Cochem-Zell	650	445,4	323,2	189,1	239,4	173,7	293,7	314,5	167,0	228,9
7137	Mayen-Koblenz	689	584,4	462,0	201,9	308,5	243,9	617,2	1563,6	350,9	1138,1
7138	Neuwied	564	498,8	398,2	274,9	232,9	186,0	396,8	717,4	225,6	522,1
7140	Rhein-Hunsrück-Kreis	885	593,1	440,9	165,6	188,0	139,8	554,3	628,3	315,1	457,3
7141	Rhein-Lahn-Kreis	693	456,3	381,9	199,3	253,6	212,2	380,2	502,2	216,1	365,5
7143	Westerwaldkreis	925	784,8	588,4	274,9	313,0	234,6	661,0	882,7	375,8	642,5
7231	Bernkastel-Wittlich	1055	833,9	541,0	318,3	440,9	286,1	640,9	513,4	364,3	373,7
7232	Eifelkreis Bitburg-Prüm	1411	1574,5	705,6	429,4	854,5	382,9	2481,4	626,2	1410,7	455,7
7233	Vulkaneifel	857	743,8	421,7	158,4	207,0	117,4	775,7	383,8	441,0	279,3
7235	Trier-Saarburg	1080	896,6	550,3	317,9	474,1	291,0	648,6	872,1	368,8	634,7
7331	Alzey-Worms	145	317,1	296,8	13,7	88,6	82,9	341,5	1118,8	194,2	814,3
7332	Bad-Dürkheim	470	357,1	343,0	234,1	225,2	216,2	108,9	529,1	61,9	385,1
7333	Donnersbergkreis	459	324,6	268,9	57,1	181,0	149,9	312,3	417,6	177,5	304,0

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x t N	NO _y t N		NH _x t N	NO _y t N	NH ₃ t N	NO _x t N	NH ₃ t N	NO _x t N
7334	Germersheim	383	269,5	237,4	126,4	149,6	131,8	151,2	712,1	86,0	518,3
7335	Kaiserslautern	714	481,5	361,7	333,4	304,1	228,5	361,3	763,6	205,4	555,8
7336	Kusel	518	323,9	237,2	34,0	48,2	35,3	358,2	223,7	203,6	162,8
7337	Südliche Weinstraße	522	390,9	347,9	143,8	217,7	193,8	126,5	548,5	71,9	399,2
7338	Rhein-Pfalz	215	220,8	244,6	73,5	140,7	155,9	437,8	2903,2	248,9	2113,1
7339	Mainz-Bingen	304	323,3	322,7	54,4	156,5	156,3	298,8	1510,4	169,9	1099,3
7340	Südwestpfalz	1054	763,1	522,3	386,0	437,3	299,3	538,1	580,3	305,9	422,3
8115	Böblingen	438	410,4	308,2	138,3	247,8	186,1	467,3	1274,5	223,3	711,4
8116	Esslingen	447	481,9	369,5	138,9	306,2	234,8	433,5	1365,1	207,1	762,0
8117	Göppingen	536	568,5	340,2	159,0	245,0	146,6	979,7	878,6	468,0	490,4
8118	Ludwigsburg. Landkr.	467	642,2	506,4	120,8	400,2	315,6	868,9	2698,5	415,1	1506,3
8119	Rems-Murr-Kreis	678	739,5	499,2	449,4	501,7	338,7	752,1	919,1	359,3	513,0
8125	Heilbronn	724	833,9	634,3	276,3	541,2	411,6	743,8	1422,5	355,3	794,0
8126	Hohenlohekreis	596	731,4	393,5	262,3	387,7	208,6	1335,5	485,3	638,0	270,9
8127	Schwäbisch Hall	1173	1518,0	658,0	615,0	983,8	426,5	3675,6	1171,2	1755,9	653,8
8128	Main-Tauber-Kreis	1085	901,3	581,2	182,1	382,5	246,7	1096,1	588,9	523,6	328,7
8135	Heidenheim	527	516,1	256,3	87,4	163,0	81,0	746,8	705,5	356,7	393,8
8136	Ostalbkreis	1273	1332,7	690,6	626,2	875,8	453,8	2270,4	1068,3	1084,6	596,3
8215	Karlsruhe	908	769,6	725,0	271,6	460,6	434,0	450,7	3050,9	215,3	1703,0
8216	Rastatt	761	691,0	568,1	298,5	410,7	337,6	221,7	980,1	105,9	547,1
8225	Neckar-Odenwald-Kreis	981	848,8	586,6	375,9	510,4	352,7	804,4	564,5	384,3	315,1

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x t N	NO _y t N		NH _x t N	NO _y t N	NH ₃ t N	NO _x t N	NH ₃ t N	NO _x t N
8226	Rhein-Neckar	866	927,6	795,0	454,6	632,8	542,4	857,9	3670,8	409,9	2049,0
8235	Calw	763	526,7	389,8	240,9	288,2	213,3	376,5	355,4	179,9	198,4
8236	Enzkreis	556	431,0	360,6	153,7	254,3	212,7	386,1	947,8	184,4	529,1
8237	Freudenstadt	797	650,2	446,3	56,6	150,2	103,1	423,4	460,3	202,3	257,0
8315	Breisgau-Hochschwarzwald	1292	990,8	663,0	67,7	139,4	93,3	906,1	1544,7	432,9	862,2
8316	Emmendingen	526	505,4	336,5	75,0	289,1	192,5	447,7	505,2	213,9	282,0
8317	Ortenaukreis	1477	1447,0	1019,8	298,8	778,9	548,9	970,1	1745,1	463,4	974,1
8325	Rottweil	663	562,5	334,2	83,8	261,5	155,4	751,6	673,0	359,1	375,7
8326	Schwarzwald-Baar-Kreis	871	699,7	391,8	6,9	0,0	0,0	972,5	676,1	464,6	377,4
8327	Tuttlingen	653	510,6	278,0	7,1	0,0	0,0	550,3	448,4	262,9	250,3
8335	Konstanz	704	733,1	377,1	68,5	195,7	100,7	921,4	810,1	440,2	452,2
8336	Lörrach	717	601,0	363,4	79,7	295,8	178,9	408,4	650,6	195,1	363,1
8337	Waldshut	1059	899,3	474,8	42,0	112,6	59,5	944,0	495,3	451,0	276,5
8415	Reutlingen	960	810,0	507,0	81,5	190,6	119,3	1024,1	841,7	489,2	469,8
8416	Tübingen	373	341,1	243,6	127,8	203,6	145,5	358,8	702,7	171,4	392,3
8417	Zollernalbkreis	820	619,0	407,5	72,4	275,0	181,0	547,2	553,3	261,4	308,8
8425	Alb-Donau-Kreis	1085	1330,1	551,4	286,4	746,1	309,3	2846,3	1550,7	1359,7	865,6
8426	Biberach	1033	1557,7	570,2	502,9	786,8	288,0	2945,0	803,7	1406,9	448,6
8435	Bodenseekreis	564	741,3	359,4	100,2	282,2	136,8	779,8	825,2	372,5	460,6
8436	Ravensburg	1379	1999,7	818,3	232,3	707,3	289,4	3893,5	1161,5	1860,0	648,3
8437	Sigmaringen	1017	1027,5	448,6	199,0	395,2	172,5	1524,2	477,7	728,1	266,7

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x t N	NO _y t N		NH _x t N	NO _y t N	NH ₃ t N	NO _x t N	NH ₃ t N	NO _x t N
9171	Altötting	484	677,9	279,0	174,3	285,8	117,6	1437,7	877,7	736,0	544,5
9172	Berchtesgadener Land	834	930,6	631,2	405,4	630,7	427,8	747,9	429,0	382,9	266,2
9173	Bad Tölz-Wolfratshausen	1044	1181,4	624,5	249,5	594,4	314,2	931,4	423,7	476,8	262,9
9174	Dachau	376	527,1	245,2	167,4	252,7	117,6	991,2	459,4	507,4	285,0
9175	Ebersberg	440	589,5	279,7	60,3	133,8	63,5	992,5	450,1	508,1	279,2
9176	Eichstätt	1038	956,8	548,2	154,6	293,0	167,9	924,1	1293,7	473,1	802,6
9177	Erding	555	909,7	361,3	227,8	540,1	214,6	2363,2	497,9	1209,7	308,9
9178	Freising	556	677,7	343,4	245,8	345,7	175,2	931,2	1011,7	476,7	627,7
9179	Fürstenfeldbruck	288	407,0	203,8	80,3	172,8	86,5	489,1	662,4	250,4	411,0
9180	Garmisch-Partenkirchen	960	959,2	547,5	204,8	503,4	287,3	392,6	300,6	201,0	186,5
9181	Landsberg am Lech	621	812,2	333,5	108,7	301,4	123,8	1061,1	519,2	543,2	322,1
9182	Miesbach	810	880,6	473,0	137,9	337,1	181,1	805,8	482,1	412,5	299,1
9183	Mühldorf a. Inn	683	879,7	345,2	179,6	298,1	117,0	2094,5	499,2	1072,2	309,7
9184	München (mit München)	527	957,5	605,0	114,6	422,9	267,2	538,1	3542,2	275,4	2197,6
9185	Neuburg-Schrobenhausen	459	585,3	284,1	237,3	396,7	192,6	902,0	385,3	461,7	239,1
9186	Pfaffenhofen a.d. Ilm	583	594,9	320,4	287,6	365,5	196,9	766,3	692,8	392,3	429,8
9187	Rosenheim	1311	1758,1	788,8	281,9	744,4	334,0	3309,8	1478,9	1694,3	917,5
9188	Starnberg	400	464,0	241,8	44,4	152,6	79,5	363,8	357,8	186,2	222,0
9189	Traunstein	1361	1868,8	931,5	407,5	1045,0	520,9	2758,8	746,5	1412,2	463,1
9190	Weilheim-Schongau	859	1036,7	417,2	62,3	225,8	90,9	1672,0	661,5	855,9	410,4
9271	Deggendorf	609	783,1	409,5	210,2	437,5	228,7	975,5	567,8	499,4	352,3

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x t N	NO _y t N		NH _x t N	NO _y t N	NH ₃ t N	NO _x t N	NH ₃ t N	NO _x t N
9272	Freyung-Grafenau	962	944,6	557,4	200,8	489,6	288,9	889,7	323,7	455,5	200,8
9273	Kelheim	913	828,0	467,4	453,2	569,7	321,6	945,5	903,2	484,0	560,3
9274	Landshut	1114	1401,6	551,4	632,0	857,4	337,3	3372,1	823,7	1726,2	511,1
9275	Passau	1396	1804,5	834,0	447,7	848,4	392,1	3194,7	1068,8	1635,4	663,1
9276	Regen	952	856,0	495,8	167,3	410,1	237,5	874,7	354,2	447,8	219,8
9277	Rottal-Inn	1100	1381,8	551,1	475,1	519,7	207,3	3127,8	598,3	1601,2	371,2
9278	Straubing-Bogen	851	1048,1	527,7	310,4	661,9	333,2	1490,0	700,0	762,7	434,3
9279	Dingolfing-Landau	614	828,5	340,9	278,5	367,3	151,1	1682,0	490,0	861,0	304,0
9371	Amberg-Sulzbach	1234	1015,8	560,2	586,6	662,1	365,2	1391,3	627,9	712,2	389,5
9372	Cham	1376	1368,6	663,7	488,8	782,3	379,4	2381,6	566,8	1219,1	351,6
9373	Neumarkt i.d. OPf.	1161	1002,7	562,5	306,0	618,4	346,9	1344,2	729,8	688,1	452,8
9374	Neustadt a.d. Waldnaab	1352	1215,8	664,2	746,1	805,8	440,2	1649,9	868,3	844,6	538,7
9375	Regensburg	1130	1140,5	618,8	446,8	744,5	403,9	1508,0	1201,1	771,9	745,2
9376	Schwandorf	1340	1245,6	618,4	621,7	845,0	419,5	1989,4	872,6	1018,4	541,3
9377	Tirschenreuth	959	929,4	500,5	343,6	500,8	269,7	1414,2	599,7	723,9	372,1
9471	Bamberg	1045	806,7	549,6	390,5	520,0	354,3	831,2	893,5	425,5	554,3
9472	Bayreuth	1221	1062,6	633,1	555,1	634,2	377,8	1429,3	895,4	731,7	555,5
9473	Coburg	504	449,1	271,2	219,8	293,1	177,0	781,9	445,1	400,3	276,1
9474	Forchheim	576	465,7	307,4	145,3	307,0	202,7	478,0	374,5	244,7	232,3
9475	Hof	827	741,4	406,4	143,8	247,4	135,6	1245,1	765,8	637,4	475,1
9476	Kronach	618	486,7	332,0	212,3	280,2	191,1	319,4	413,2	163,5	256,3

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x	NO _y		NH _x	NO _y	NH ₃	NO _x	NH ₃	NO _x
			t N	t N		t N	t N	t N	t N	t N	t N
9477	Kulmbach	592	475,1	289,5	178,3	277,7	169,2	615,5	368,5	315,1	228,6
9478	Lichtenfels	462	347,7	222,2	116,3	222,9	142,5	433,3	265,3	221,8	164,6
9479	Wunsiedel i. Fichtelgebirge	528	463,6	264,6	163,9	229,7	131,1	557,1	425,1	285,2	263,7
9571	Ansbach	1546	1762,6	802,1	838,9	1185,9	539,6	4010,0	1225,8	2052,7	760,5
9572	Erlangen-Höchststadt	517	460,3	296,9	360,8	344,2	222,0	506,0	1053,5	259,0	653,6
9573	Fürth	274	277,0	154,4	183,1	190,8	106,4	492,3	466,6	252,0	289,5
9574	Nürnberger-Land	838	748,6	510,6	425,4	557,1	380,0	615,3	1820,5	315,0	1129,5
9575	Neustadt a.d. Aisch-Bad Windsheim	871	1002,6	498,5	396,1	690,2	343,1	2163,4	516,6	1107,4	320,5
9576	Roth	838	733,2	412,2	554,3	534,6	300,6	944,6	902,0	483,5	559,6
9577	Weißenburg-Gunzenhau- sen	715	798,3	374,2	257,2	525,4	246,3	1542,5	378,0	789,6	234,5
9671	Aschaffenburg	647	518,3	438,1	314,7	318,4	269,1	320,3	1177,8	164,0	730,7
9672	Bad Kissingen	1042	665,9	518,5	330,2	359,2	279,7	569,1	505,7	291,3	313,7
9673	Rhön-Grabfeld	835	549,1	410,6	139,2	278,8	208,5	574,5	362,0	294,1	224,6
9674	Haßberge	788	617,1	408,5	295,7	387,0	256,2	779,3	398,3	398,9	247,1
9675	Kitzingen	424	451,0	295,0	31,7	141,0	92,2	745,6	628,9	381,7	390,2
9676	Miltenberg	648	475,8	373,9	399,3	319,2	250,8	348,6	458,1	178,4	284,2
9677	Main-Spessart	1171	741,5	648,1	465,6	426,9	373,1	435,5	843,5	222,9	523,3
9678	Schweinfurt	548	492,2	366,0	29,6	105,6	78,5	670,8	774,9	343,4	480,7
9679	Würzburg	649	631,9	462,4	63,9	207,0	151,5	911,4	1145,1	466,6	710,4
9771	Aichach-Friedberg	567	788,1	338,1	408,7	502,7	215,6	1633,7	629,6	836,3	390,6

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x	NO _y		NH _x	NO _y	NH ₃	NO _x	NH ₃	NO _x
			t N	t N		t N	t N	t N	t N	t N	t N
9772	Augsburg	799	1292,6	560,1	594,3	816,9	354,0	1775,7	1543,4	909,0	957,5
9773	Dillingen a.d. Donau	513	737,7	277,9	178,8	396,6	149,4	1636,3	331,5	837,6	205,6
9774	Günzburg	577	771,9	307,3	318,1	416,8	165,9	1325,4	530,1	678,5	328,9
9775	Neu-Ulm	383	553,1	215,8	241,8	299,2	116,7	773,5	743,1	395,9	461,0
9776	Lindau (Bodensee)	301	476,0	254,9	47,0	139,0	74,4	643,5	285,2	329,4	176,9
9777	Ostallgäu	1141	1748,5	699,1	284,7	742,7	296,9	3103,7	908,9	1588,8	563,9
9778	Unterallgäu	868	1635,8	581,9	537,1	834,4	296,9	3517,5	922,5	1800,6	572,3
9779	Donau-Ries	847	1103,8	466,1	276,3	616,6	260,4	2348,6	688,9	1202,3	427,4
9780	Oberallgäu	1474	1920,3	953,5	646,1	1002,1	497,6	2010,4	877,1	1029,1	544,2
10041	Regionalverband Saarbrücken	345	313,6	231,5	122,6	191,7	141,5	114,7	972,8	75,9	706,3
10042	Merzig-Wadern	510	408,8	247,8	138,2	230,7	139,9	338,3	397,7	223,8	288,8
10043	Neunkirchen	214	170,1	122,3	50,1	102,0	73,4	140,4	385,0	92,9	279,6
10044	Saarlouis	396	305,0	207,4	115,4	182,5	124,1	244,1	1471,9	161,4	1068,7
10045	Saarpfalz-Kreis	364	304,6	205,5	118,3	188,4	127,1	191,5	410,5	126,7	298,0
10046	St. Wendel	446	337,3	229,1	80,3	169,0	114,8	271,7	260,8	179,7	189,4
11000	Berlin	249	656,8	567,3	227,3	525,2	453,7	444,2	5891,2	442,9	2556,6
12060	Barnim	1289	1056,2	736,8	911,9	813,2	567,2	688,7	665,9	641,0	657,2
12061	Dahme-Spreewald	1980	1622,5	1032,1	1446,1	1265,5	804,9	1698,1	981,7	1580,5	968,9
12062	Elbe-Elster	1408	1354,6	804,8	993,0	1006,9	598,3	1629,7	438,1	1516,8	432,3
12063	Havelland	1337	1101,0	713,3	763,1	820,6	531,7	1081,4	671,5	1006,5	662,7
12064	Märkisch-Oderland	1492	1465,3	954,2	860,1	1133,5	738,1	1799,0	1133,0	1674,4	1118,2

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x t N	NO _y t N		NH _x t N	NO _y t N	NH ₃ t N	NO _x t N	NH ₃ t N	NO _x t N
12065	Oberhavel	1464	1265,9	846,2	1023,3	988,3	660,6	910,9	747,3	847,8	737,6
12066	Oberspreewald-Lausitz	840	813,1	548,4	570,3	610,0	411,4	712,3	925,5	663,0	913,4
12067	Oder-Spree	2089	1744,1	1177,6	1654,2	1372,0	926,3	1404,4	1516,1	1307,2	1496,3
12068	Ostprignitz-Ruppin	1884	1917,9	1086,3	1388,1	1490,7	844,3	1991,6	1080,7	1853,7	1066,6
12069	Potsdam-Mittelmark	2492	2057,9	1338,2	1684,1	1592,1	1035,3	1655,6	2101,6	1541,0	2074,1
12070	Prignitz	1605	1745,9	937,6	1172,4	1373,4	737,6	2192,7	551,0	2040,8	543,8
12071	Spree-Neiße	1425	1257,7	877,4	998,3	960,1	669,9	1018,7	6588,4	948,1	6502,3
12072	Teltow-Fläming	1666	1496,1	948,2	1239,8	1159,7	735,0	1458,0	1106,1	1357,1	1091,7
12073	Uckermark	2142	1971,4	1289,2	1056,4	1418,7	927,8	2074,6	1362,2	1930,9	1344,4
13071	Mecklenburgische Seenpl.	3938	3817,6	2525,6	2052,5	2614,3	1729,5	2143,2	1505,6	2557,3	1412,9
13072	Rostock	2366	3184,2	1889,3	1720,4	2343,5	1390,5	2684,6	1694,1	3203,4	1589,9
13073	Vorpommern-Rügen	2132	2678,6	1713,1	1352,5	1943,3	1242,9	1967,0	976,5	2347,1	916,4
13074	Nordwestmecklenburg	1323	2170,7	1050,0	958,9	1639,8	793,2	2598,1	1089,9	3100,2	1022,9
13075	Vorpommern-Greifswald	2657	2796,8	1807,3	1641,4	2085,0	1347,3	2356,9	1590,4	2812,4	1492,5
13076	Ludwigslust-Parchim	3617	4239,0	2373,3	2886,0	3272,8	1832,4	3242,9	1707,4	3869,5	1602,4
14521	Erzgebirgskreis	1796	1447,9	1105,5	658,2	738,4	563,8	601,8	1476,8	696,0	1109,2
14522	Mittelsachsen	1488	1301,1	997,9	378,3	627,9	481,6	1099,3	1223,3	1271,3	918,8
14523	Vogtlandkreis	1287	1022,3	641,5	281,5	429,3	269,4	1026,5	722,0	1187,1	542,3
14524	Zwickau	721	603,2	450,5	199,6	297,5	222,2	570,6	874,2	659,9	656,6
14625	Bautzen	1807	1517,2	1171,7	1101,4	1141,1	881,3	871,9	1187,1	1008,3	891,6
14626	Görlitz	1496	1416,8	1060,2	895,6	1065,6	797,4	834,9	4580,1	965,5	3440,1

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x t N	NO _y t N		NH _x t N	NO _y t N	NH ₃ t N	NO _x t N	NH ₃ t N	NO _x t N
14627	Meißen	929	868,4	631,3	376,0	623,4	453,2	883,5	1061,4	1021,7	797,2
14628	Sächsische Schweiz-Osterz- gebirge	1574	1340,2	1054,7	754,7	881,3	693,6	720,2	1886,9	832,8	1417,2
14729	Leipzig	878	1209,5	913,5	367,4	742,9	561,1	1049,2	3695,3	1213,3	2775,5
14730	Nordsachsen	1201	1295,8	868,6	599,0	925,8	620,6	1401,2	1129,2	1620,4	848,1
15081	Altmarkkreis Salzwedel	1794	1818,3	951,5	1162,7	1344,4	703,5	2347,0	677,7	1843,3	610,0
15083	Börde	1180	1837,2	1008,6	728,8	1366,2	750,0	3130,1	2061,3	2458,4	1855,6
15084	Burgenlandkreis	556	891,6	571,8	168,0	461,6	296,1	1512,5	1584,0	1187,9	1425,9
15085	Harz	1206	1300,1	918,9	189,7	525,8	371,6	1331,9	917,4	1046,1	825,9
15086	Jerichower Land	725	1129,3	620,0	448,0	839,9	461,1	1924,1	1267,1	1511,2	1140,7
15087	Mansfeld-Südharz	859	797,4	580,8	96,0	230,4	167,8	879,4	745,2	690,6	670,8
15088	Saale	360	979,6	610,3	90,3	427,6	266,4	1750,1	2373,2	1374,5	2136,4
15089	Salzlandkreis	656	1021,9	561,0	405,4	759,9	417,2	1741,0	1146,5	1367,4	1032,1
15090	Stendal	1667	1730,6	936,5	969,5	1303,8	705,5	2403,5	966,1	1887,7	869,7
15091	Wittenberg	2242	2655,0	1540,8	1496,6	2006,7	1164,5	3595,2	2187,4	2823,7	1969,1
16051	Erfurt	91	138,6	107,3	3,4	21,9	16,9	114,9	481,2	89,1	381,8
16061	Eichsfeld	711	602,8	446,1	160,3	335,0	247,9	718,9	709,2	557,6	562,8
16062	Nordhausen	474	461,0	335,3	80,2	223,9	162,9	564,2	310,4	437,5	246,3
16063	Wartburgkreis	1116	909,2	673,9	354,3	567,5	420,7	868,1	838,3	673,3	665,3
16064	Unstrut-Hainich-Kreis	482	559,0	404,3	31,2	123,6	89,4	732,9	395,5	568,4	313,9
16065	Kyffhäuserkreis	513	548,9	402,7	69,9	221,0	162,1	603,4	271,3	467,9	215,3
16066	Schmalkalden-Meiningen	1111	818,9	597,6	276,5	458,2	334,4	775,7	395,8	601,6	314,1

AGS	Kreis/Kreisregion	Anzahl Raster km ²	Deposition 2020		Überschrei- tung CL N(gesamt) t N	erforderliche Minderung Deposition		Emission 2020		erforderliche Minderung Emission	
			NH _x	NO _y		NH _x	NO _y	NH ₃	NO _x	NH ₃	NO _x
			t N	t N		t N	t N	t N	t N	t N	t N
16067	Gotha	544	581,9	422,4	112,3	301,0	218,5	832,4	467,0	645,5	370,6
16068	Sömmerda	233	417,6	288,3	40,2	173,1	119,5	584,8	320,9	453,6	254,7
16069	Hildburghausen	951	704,8	510,9	160,8	309,2	224,1	621,6	397,3	482,1	315,3
16070	Ilm-Kreis	637	485,5	372,9	86,1	212,0	162,8	441,9	463,9	342,7	368,1
16071	Weimarer Land	524	497,6	336,0	51,1	155,8	105,2	857,0	593,2	664,6	470,7
16072	Sonneberg	430	355,7	259,8	110,3	187,7	137,1	183,3	246,0	142,2	195,2
16073	Saalfeld-Rudolstadt	937	609,4	429,3	175,4	347,8	245,0	561,7	306,7	435,7	243,4
16074	Saale-Holzland	758	631,7	405,4	320,2	421,7	270,6	946,9	941,3	734,4	747,0
16075	Saale-Orla-Kreis	980	785,9	474,9	201,3	297,6	179,8	1062,3	727,9	823,8	577,6
16076	Greiz	763	672,3	418,7	289,6	413,4	257,4	1079,1	561,3	836,9	445,4
16077	Altenburger Land	248	365,0	246,9	64,2	207,1	140,1	570,3	308,4	442,3	244,7

A.3 Anhang zu Schutzgut Oberflächengewässer

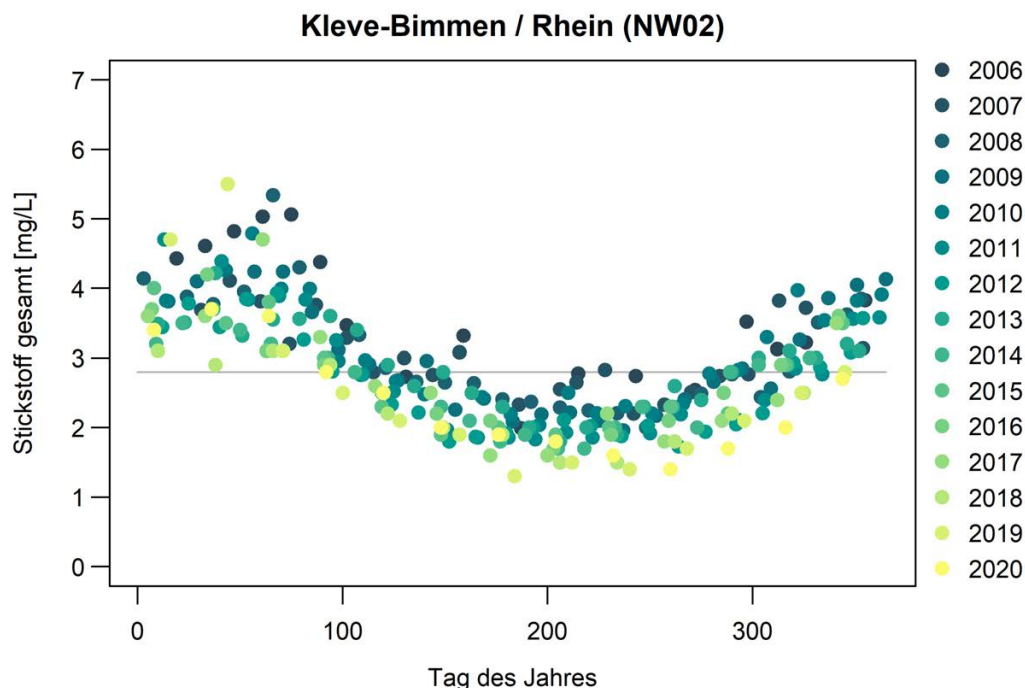
A.3.1 Gütedaten an der Messstelle Kleve-Bimmen (NW02)

Aus der in der MoRE-Datenbank verwalteten Gütemessungen wurden Messwerte für den Zeitraum 2006 bis 2020 an der Messstelle Kleve-Bimmen am Rhein (NW02) genauer ausgewertet. Dafür wurden nur diejenigen Messwerte ausgewählt, die als Einzelmessungen der Gesamt-Stickstoff-Konzentration vorlagen. Diese zeigen eine ausgeprägte Saisonalität mit niedrigeren Konzentrationen in den Sommermonaten unterhalb der meeresökologischen Anforderung von $2,8 \text{ mg N L}^{-1}$ und höheren Konzentrationen im Winterhalbjahr (Abbildung 44).

Als Jahresmittel der Konzentrationen wurde das arithmetische Mittel aus den Messwerten gebildet, sofern ≥ 10 Gütemessungen pro Jahr vorliegen. Über den betrachteten Zeitraum nehmen die Jahresmittel-Konzentrationen stetig ab, so dass bereits seit 2014 das Qualitätsziel von $2,8 \text{ mg N L}^{-1}$ unterschritten wird (Abbildung 45, Abbildung 46).

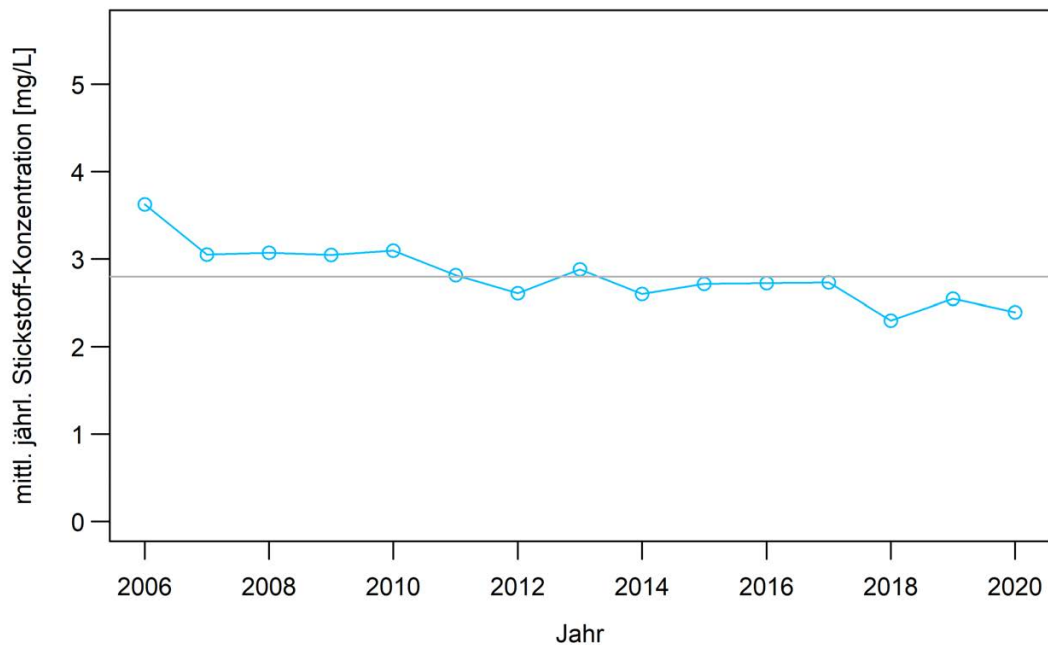
Stickstoff-Konzentrationen sind oft positiv mit dem Abfluss korreliert. Auch für die Messstelle Kleve-Bimmen ist eine schwache Korrelation vorhanden ($r = 0,43$; $p < 0,001$; Abbildung 47). Der Abfluss am Pegel Rees, der der Gütemessstelle am nächsten liegt, zeigte über den betrachteten Zeitraum 2006 bis 2020 eine Abnahme des Abflusses ($\tau = -1,52$; $p < 0,001$; Mann-Kendall-Trendtest; Abbildung 48). Somit können neben der Umsetzung von Maßnahmen und der Reduzierung von Einträgen in Oberflächengewässer auch die zunehmende Trockenheit der vergangenen Jahre ursächlich für die sinkenden Jahresmittelkonzentrationen sein.

Abbildung 44: N(ges)-Konzentration (Einzelmessungen 2006 bis 2020) im Rhein an der Gütemessstelle Kleve/Bimmen. Die horizontale Linie markiert das meeresökologische Qualitätsziel für die Nordsee ($2,8 \text{ mg N L}^{-1}$).



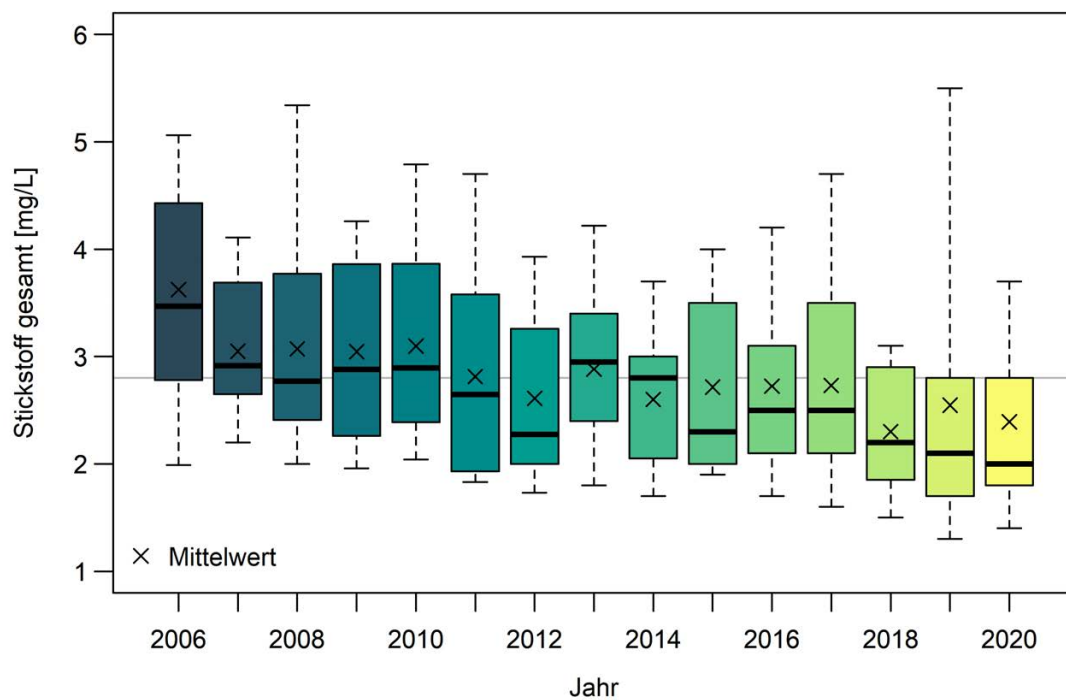
Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG.

Abbildung 45: Jahresmittel der N(ges)-Konzentration im Rhein 2006 bis 2020 an der Gütemessstelle Kleve/Bimmen. Die horizontale Linie markiert das meeresökologische Qualitätsziel für die Nordsee ($2,8 \text{ mg N L}^{-1}$).



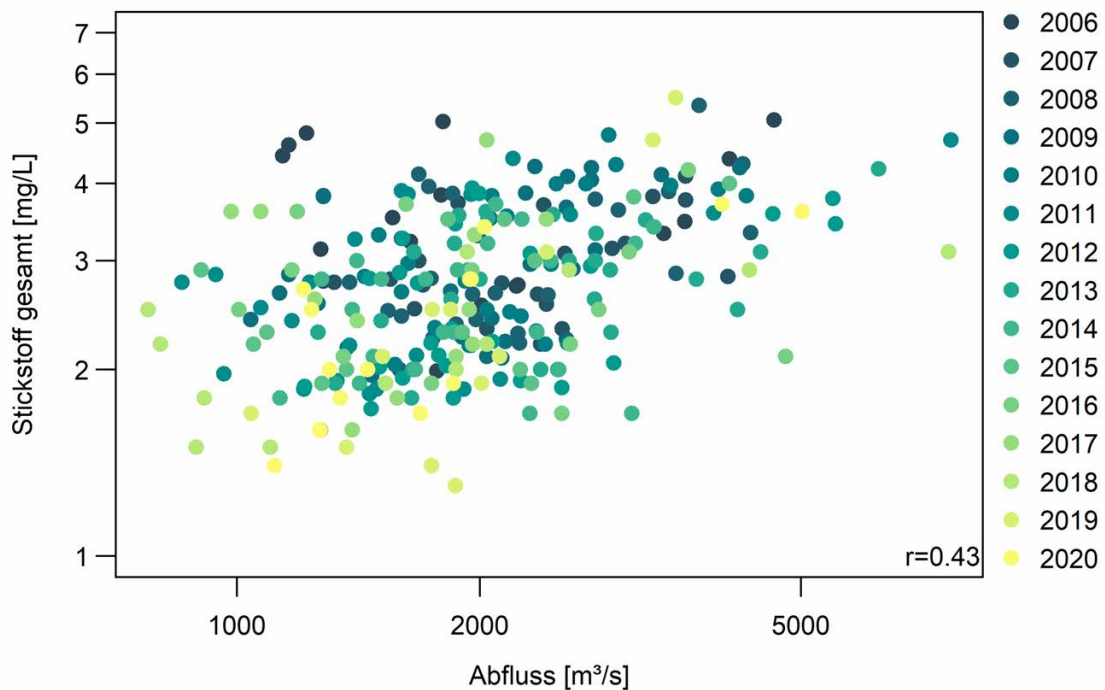
Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG.

Abbildung 46: Verteilung der N(ges)-Konzentrationen nach Jahren (Einzelmessungen 2006 bis 2020) im Rhein an der Gütemessstelle Kleve/Bimmen. Boxplot-Whiskers reichen von Minimum bis Maximum.



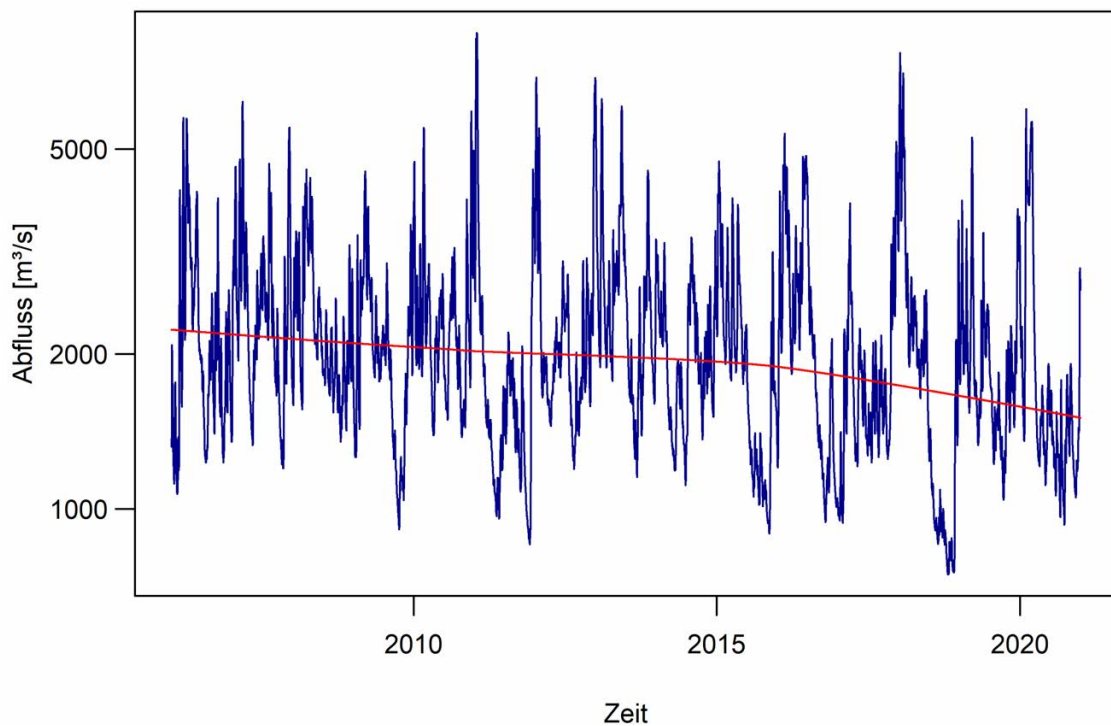
Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

Abbildung 47: N(ges)-Konzentrationen (Einzelmessungen 2006 bis 2020) im Rhein an der Gütemessstelle Kleve/Bimmen in Abhängigkeit vom Abfluss (Pegel Rees), logarithmische Achseneinteilung



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

Abbildung 48: Abfluss im Rhein am Pegel Rees (Tagesmittelwerte) für den Zeitraum 2006 bis 2020 mit Glättungsfunktion zur Verdeutlichung des Trends, logarithmische Darstellung



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

A.3.2 Minderungsbedarf für die Szenarien A bis C mit Einbezug der FGE Rhein

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Ermittlung des Minderungsbedarfes unter Einbeziehung des gesamten Rhein-Einzugsgebietes dargestellt. Im Vergleich zu den im Haupttext präsentierten Ergebnissen ergeben sich generell höhere Minderungsbedarfe für alle drei Szenarien (110 bis 150 kt N a⁻¹ bzw. 30 bis 41 % der Einträge (Tabelle 29, Abbildung 49 bis Abbildung 51). Ebenfalls steigt auch die Bedeutung der siedlungsbedingten Eintragsquellen, da im Rhein-Einzugsgebiet einige Großstadtreionen verortet sind (z.B. Ruhrgebiet, Rhein-Main-Gebiet). So entfallen rund 28 bis 32 % des gesamten Minderungsbedarfes auf siedlungsbedingte Quellen (Tabelle 30).

Tabelle 29: Absoluter und relativer Minderungsbedarf der Stickstoff-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands für drei Szenarien^a zur Einhaltung der meeresökologischen Qualitätsziele für Nordsee und Ostsee, mit Einbezug FGE Rhein (Mittel 2016 bis 2018), Werte gerundet.

Flussgebietseinheit ^b	Minderungsbedarf (Mittel 2016-2018)					
	Szenario A Meeresökologische Qualitätsziele in allen AU einzuhalten		Szenario B Wie A, mit Berücksichtigung der kumulativen Retention		Szenario C Wie B, mit Berücksichtigung Verdünnung entlang Abflussbaum	
	t N a ⁻¹	%	t N a ⁻¹	%	t N a ⁻¹	%
Eider	4.600	35 %	4.200	32 %	4.200	32 %
Elbe	45.000	46 %	39.400	40 %	32.400	33 %
Ems	8.100	38 %	7.400	35 %	7.400	35 %
Maas	3.100	^c	3.100	^c	2.800	^c
Oder	2.000	^c	1.100	^c	300	^c
Rhein	60.400	40 %	53.100	35 %	43.400	28 %
Schlei/Trave	2.000	18 %	1.900	17 %	1.800	16 %
Warnow/Peene	3.500	29 %	2.600	21 %	1.800	15 %
Weser	21.300	36 %	18.600	31 %	16.500	28 %
Gesamt	150.000	41 %	131.400	36 %	110.600	30 %

^a Beschreibung s. Abschnitte 3.3.1 bis 3.3.3

^b Für die Donau sind keine meeresökologischen Anforderungen festgelegt, daher wird diese FGE nicht betrachtet.

^c Aufgrund des geringen Anteils der Einträge aus Deutschland an den gesamten Einträgen in die FGE wird der relative Minderungsbedarf nicht ausgewiesen.

Tabelle 30: Relativer Minderungsbedarf der Stickstoff-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands aufgeschlüsselt nach Quellen (Landwirtschaft bzw. Abwasserwirtschaft) für drei Szenarien^a, mit Einbezug FGE Rhein (Mittel 2016 bis 2018).

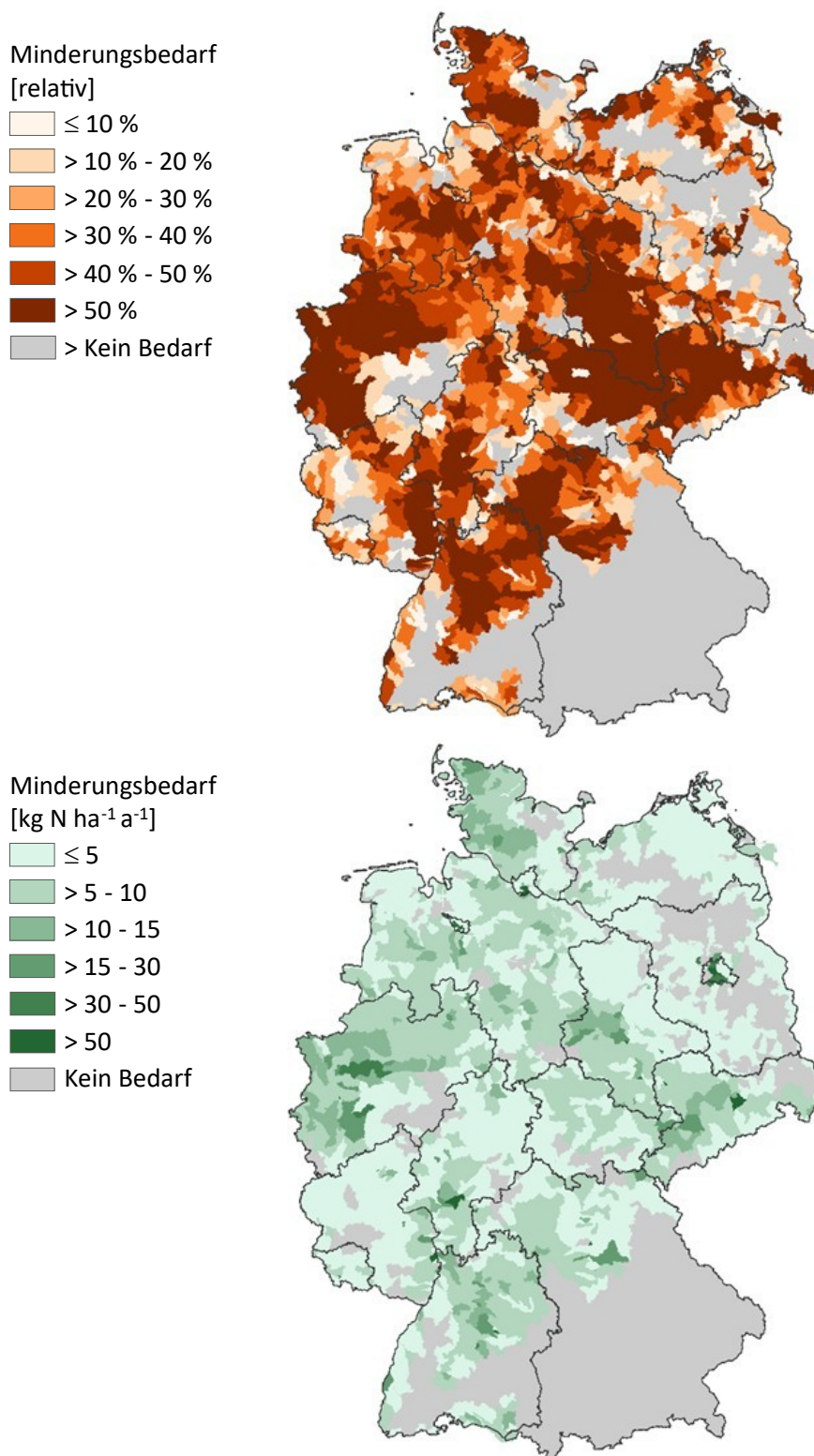
Flussgebietseinheit ^b	Minderungsbedarf (Mittel 2016-2018) nach Quellen					
	Szenario A Meeresökologische Qualitätsziele in allen AU einzuhalten		Szenario B Wie A, mit Berücksichti- gung der kumulativen Retention		Szenario C Wie B, mit Berücksichti- gung Verdünnung entlang Abflussbaum	
	Landwirt- schaft	Abwasser- wirtschaft	Landwirt- schaft	Abwasser- wirtschaft	Landwirt- schaft	Abwasser- wirtschaft
	%	%	%	%	%	%
Eider	95 %	4 %	95 %	3 %	95 %	3 %
Elbe	73 %	26 %	73 %	26 %	78 %	21 %
Ems	85 %	14 %	85 %	14 %	85 %	14 %
Maas	68 %	32 %	68 %	32 %	70 %	30 %
Oder	56 %	13 %	33 %	14 %	82 %	17 %
Rhein	54 %	45 %	51 %	47 %	55 %	44 %
Schlei/Trave	80 %	19 %	79 %	19 %	83 %	15 %
Warnow/Peene	84 %	10 %	81 %	12 %	91 %	8 %
Weser	81 %	18 %	80 %	18 %	83 %	16 %
Gesamt	68 %	31 %	66 %	32 %	71 %	28 %

^a Beschreibung s. Abschnitte 3.3.1 bis 3.3.3

^b Für die Donau sind keine meeresökologischen Anforderungen festgelegt, daher wird diese FGE nicht betrachtet.

Szenario A

Abbildung 49: Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands zur Einhaltung der meeresökologisch zulässigen Konzentrationen in allen MoRE-Analysegebieten (Szenario A), Mittel 2016 bis 2018, mit Einbezug der FGE Rhein.



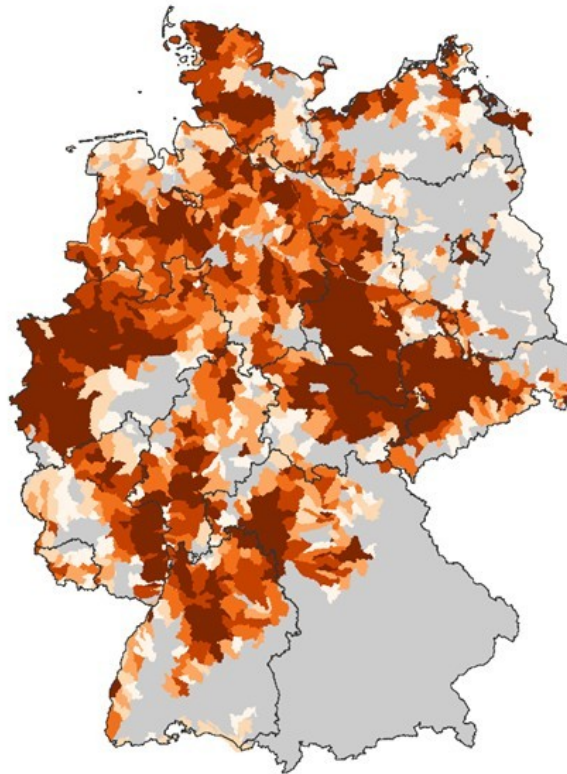
Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

Szenario B

Abbildung 50: Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands zur Einhaltung der zulässigen Konzentrationen im Binnenland (Szenario B), Mittel 2016 bis 2018, mit Einbezug der FGE Rhein.

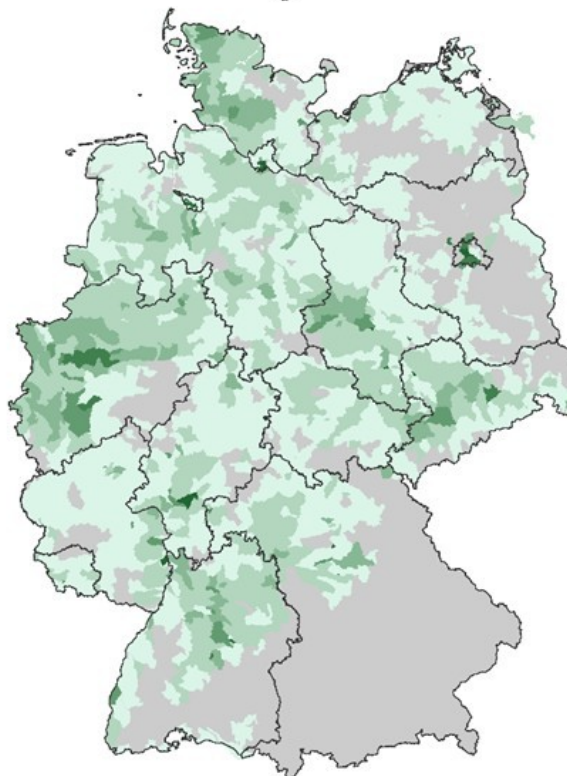
Minderungsbedarf
[relativ]

- ≤ 10 %
- > 10 % - 20 %
- > 20 % - 30 %
- > 30 % - 40 %
- > 40 % - 50 %
- > 50 %
- > Kein Bedarf



Minderungsbedarf
[kg N ha⁻¹ a⁻¹]

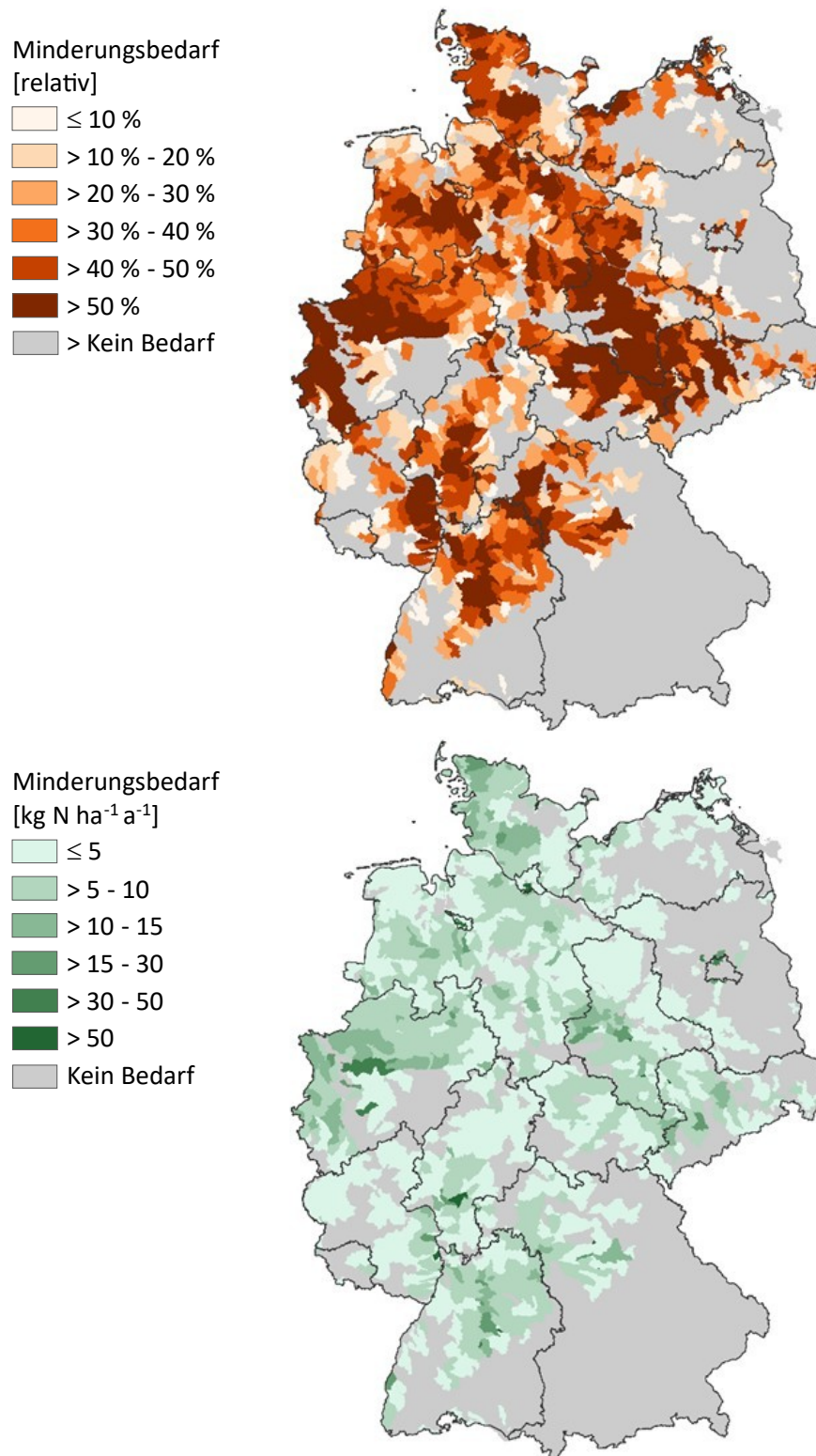
- ≤ 5
- > 5 - 10
- > 10 - 15
- > 15 - 30
- > 30 - 50
- > 50
- Kein Bedarf



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

Szenario C

Abbildung 51: Prozentualer (oben) und absoluter Minderungsbedarf (unten) der N(ges)-Einträge in die Oberflächengewässer Deutschlands zur Einhaltung der flussabwärts gerichteten zulässigen Konzentrationen im Binnenland (Szenario C), Mittel 2016 bis 2018, mit Einbezug der FGE Rhein.



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

Tabelle 31: Zulässige N(ges)-Einträge in die Oberflächengewässer (Obergrenzen) nach MoRE-Modellierung (Mittel 2016 - 2018) und erforderlicher Minderungsbedarf in den Kreisregionen (mit und ohne Einbezug der FGE Rhein) zur Einhaltung der meeres-ökologischen Qualitätsziele.^a

ARS	Kreis/Kreisregion	FGE ^b Donau j/n	N-Eintrag (2016-2018) t N a ⁻¹	Obergrenze ^c		Erforderliche Minderung ^c	
				ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹	ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹
1051	Dithmarschen		3272,1	1754,1	1754,1	1517,9	1517,9
1053	Herzogtum Lauenburg		1512,6	1173,8	1173,8	338,7	338,7
1054	Nordfriesland		5260,4	3058,7	3058,7	2201,6	2201,6
1055	Ostholstein		1957,2	1522,7	1522,7	434,5	434,5
1056	Pinneberg		1653,9	859,0	859,0	794,9	794,9
1057	Plön		1443,7	1256,0	1256,0	187,7	187,7
1058	Rendsburg-Eckernförde		4741,0	3313,3	3313,3	1427,7	1427,7
1059	Schleswig-Flensburg		4579,5	2804,8	2804,8	1774,8	1774,8
1060	Segeberg		2236,2	1389,4	1389,4	846,8	846,8
1061	Steinburg		2177,4	1127,0	1127,0	1050,4	1050,4
1062	Stormarn		984,8	744,5	744,5	240,4	240,4
2000	Hamburg		3152,6	1159,1	1159,1	1993,5	1993,5
3151	Gifhorn		1777,0	1142,8	1142,8	634,2	634,2
3153	Goslar		1477,1	1136,6	1136,6	340,5	340,5
3154	Helmstadt		955,8	468,5	468,5	487,2	487,2
3155	Northeim		1380,0	995,0	995,0	385,0	385,0
3157	Peine		578,7	257,6	257,6	321,1	321,1
3158	Wolfenbüttel		1382,0	657,6	657,6	724,4	724,4
3159	Göttingen		1844,5	1438,3	1438,3	406,1	406,1
3241	Region Hannover		3203,2	1921,3	1921,3	1281,8	1281,8
3251	Diepholz		2832,3	1414,1	1414,1	1418,2	1418,2
3252	Hameln-Pyrmont		1256,9	835,9	835,9	421,0	421,0
3254	Hildesheim		1845,2	1119,5	1119,5	725,7	725,7
3255	Holzminden		800,0	679,9	679,9	120,1	120,1
3256	Nienburg (Weser)		1487,5	979,4	979,4	508,1	508,1
3257	Schaumburg		1033,0	616,5	616,5	416,5	416,5
3351	Celle		1802,8	1326,5	1326,5	476,4	476,4
3352	Cuxhaven		2899,3	2374,9	2374,9	524,4	524,4
3353	Harburg		1875,1	1003,1	1003,1	872,0	872,0
3354	Lüchow-Dannenberg		821,0	532,4	532,4	288,6	288,6
3355	Lüneburg		1384,3	847,3	847,3	536,9	536,9
3356	Osterholz		740,5	537,4	537,4	203,1	203,1

ARS	Kreis/Kreisregion	FGE ^b Donau j/n	N-Eintrag (2016-2018) t N a ⁻¹	Obergrenze ^c		Erforderliche Minderung ^c	
				ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹	ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹
3357	Rotenburg (Wümme)		3098,5	1694,6	1694,6	1403,9	1403,9
3358	Heidekreis		2439,2	1630,1	1630,1	809,0	809,0
3359	Stade		2057,7	1226,9	1226,9	830,7	830,7
3360	Uelzen		1890,6	974,9	974,9	915,7	915,7
3361	Verden		1006,1	587,8	587,8	418,3	418,3
3451	Ammerland		931,9	740,9	740,9	191,1	191,1
3452	Aurich		1992,6	1600,3	1600,3	392,3	392,3
3453	Cloppenburg		2204,8	1075,8	1075,8	1128,9	1128,9
3454	Emsland		3573,5	2141,8	2141,8	1431,7	1431,7
3455	Friesland		1262,6	981,9	981,9	280,7	280,7
3456	Grafschaft Bentheim		1486,3	755,1	755,1	731,2	731,2
3457	Leer		1280,0	866,1	866,1	413,9	413,9
3458	Oldenburg		1818,4	989,1	989,1	829,2	829,2
3459	Osnabrück		3354,7	2163,5	2163,5	1191,2	1191,2
3460	Vechta		1287,7	658,8	658,8	629,0	629,0
3461	Wesermarsch		1029,3	837,5	837,5	191,8	191,8
3462	Wittmund		937,8	775,7	775,7	162,1	162,1
4011	Bremen		1240,0	480,4	480,4	759,5	759,5
5112	Duisburg, Essen, Mühl- heim, Oberh.		2063,2	2063,2	900,3	0,0	1162,9
5124	Wuppertal		689,6	689,6	478,9	0,0	210,6
5154	Kleve		2517,8	1283,9	992,4	1233,9	1525,4
5158	Mettmann		1407,1	1407,1	624,9	0,0	782,1
5162	Neuss		1198,0	1045,9	441,8	152,1	756,3
5166	Viersen		1078,2	547,8	448,6	530,3	629,6
5170	Wesel		1972,3	1642,5	765,4	329,8	1206,9
5334	Städteregion Aachen		975,5	585,7	585,7	389,8	389,8
5358	Düren		1346,8	862,3	511,6	484,4	835,2
5362	Rhein-Erft-Kreis		2550,8	2550,1	728,7	0,6	1822,0
5366	Euskirchen		1104,2	1101,2	752,2	3,0	352,0
5370	Heinsberg		970,5	346,6	346,6	623,9	623,9
5374	Oberbergischer Kreis		1654,1	1654,1	1451,5	0,0	202,6
5378	Rheinisch-Berg.-Kreis		1538,6	1538,6	714,0	0,0	824,6
5382	Rhein-Sieg		1860,7	1860,7	1171,6	0,0	689,0
5515	Münster		442,6	239,6	229,9	203,0	212,7
5554	Borken		2587,2	1326,6	1202,3	1260,6	1384,9

ARS	Kreis/Kreisregion	FGE ^b Donau j/n	N-Eintrag (2016-2018) t N a ⁻¹	Obergrenze ^c		Erforderliche Minderung ^c	
				ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹	ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹
5558	Coesfeld		1880,9	1570,8	847,5	310,2	1033,5
5562	Recklingshausen		2934,9	2934,9	1128,0	0,0	1807,0
5566	Steinfurt		2638,0	1521,2	1521,2	1116,7	1116,7
5570	Warendorf		1938,5	1112,0	993,0	826,5	945,5
5711	Bielefeld		555,5	340,7	340,7	214,7	214,7
5754	Gütersloh		1579,7	996,1	967,8	583,6	612,0
5758	Herford		860,1	466,3	466,3	393,8	393,8
5762	Höxter		1717,3	1167,3	1164,4	549,9	552,9
5766	Lippe		2311,8	1595,3	1538,2	716,5	773,6
5770	Minden-Lübbecke		1421,4	849,8	849,8	571,6	571,6
5774	Paderborn		2275,8	2208,5	1677,1	67,3	598,7
5913	Dortmund		2094,6	2094,6	848,0	0,0	1246,5
5954	Ennepe-Ruhr		1142,5	1142,5	774,8	0,0	367,7
5958	Hochsauerlandkreis		2440,6	2419,1	2308,2	21,5	132,4
5962	Märkischer Kreis		1643,7	1643,7	1403,6	0,0	240,1
5966	Olpe		952,2	952,2	950,9	0,0	1,3
5970	Siegen-Wittgenstein		1211,1	1211,1	1187,1	0,0	24,0
5974	Soest		2074,6	2074,6	1034,6	0,0	1040,1
5978	Unna		1279,6	1278,4	487,4	1,2	792,2
6431	Bergstraße		813,3	813,3	551,6	0,0	261,7
6432	Darmstadt-Dieburg		859,9	859,9	473,2	0,0	386,7
6433	Groß-Gerau		492,1	492,1	267,5	0,0	224,6
6434	Hochtaunuskreis		654,8	654,8	321,4	0,0	333,4
6435	Main-Kinzig-Kreis		1689,2	1689,1	1162,7	0,1	526,4
6436	Main-Taunus-Kreis		1714,3	1714,3	543,2	0,0	1171,1
6437	Odenwaldkreis		566,4	566,4	473,4	0,0	93,0
6438	Offenbach		846,1	846,1	299,4	0,0	546,7
6439	Rheingau-Taunus-Kreis		755,9	755,9	492,7	0,0	263,2
6440	Wetteraukreis		1203,4	1203,4	679,3	0,0	524,1
6531	Gießen		946,5	946,5	510,6	0,0	435,9
6532	Lahn-Dill-Kreis		1203,9	1203,9	942,0	0,0	261,9
6533	Limburg-Weilburg		759,6	759,6	453,0	0,0	306,6
6534	Marburg-Biedenkopf		1267,8	1251,7	836,9	16,1	430,9
6535	Vogelsbergkreis		1428,4	1298,8	1153,6	129,6	274,9
6631	Fulda		1438,3	1245,2	1245,1	193,1	193,2

ARS	Kreis/Kreisregion	FGE ^b Donau j/n	N-Eintrag (2016-2018) t N a ⁻¹	Obergrenze ^c		Erforderliche Minderung ^c	
				ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹	ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹
6632	Hersfeld-Rotenburg		931,2	738,3	738,3	193,0	193,0
6633	Kassel		1585,4	956,3	956,3	629,1	629,1
6634	Schwalm-Eder-Kreis		1500,2	1016,7	1012,9	483,5	487,3
6635	Waldeck-Frankenberg		1754,2	1427,9	1388,6	326,3	365,6
6636	Werra-Meißner-Kreis		915,9	788,8	788,8	127,1	127,1
7131	Ahrweiler		714,6	714,6	389,8	0,0	324,8
7132	Altenkirchen (Westerw.)		702,3	702,3	655,5	0,0	46,8
7133	Bad Kreuznach		627,7	627,7	383,6	0,0	244,1
7134	Birkenfeld		727,6	727,6	712,6	0,0	15,1
7135	Cochem-Zell		738,0	738,0	542,1	0,0	195,9
7137	Mayen-Koblenz		795,8	795,8	437,1	0,0	358,8
7138	Neuwied		627,6	627,6	458,5	0,0	169,0
7140	Rhein-Hunsrück-Kreis		830,5	830,5	547,6	0,0	282,9
7141	Rhein-Lahn-Kreis		672,9	672,9	405,4	0,0	267,5
7143	Westerwaldkreis		1063,7	1063,7	931,3	0,0	132,3
7231	Bernkastel-Wittlich		1128,3	1128,3	1077,6	0,0	50,8
7232	Eifelkreis Bitburg-Prüm		2012,6	2012,6	1648,6	0,0	364,0
7233	Vulkaneifel		892,7	892,7	777,7	0,0	115,0
7235	Trier-Saarburg		1426,5	1426,5	1187,3	0,0	239,2
7331	Alzey-Worms		770,4	770,4	219,4	0,0	551,0
7332	Bad-Dürkheim		667,7	667,7	310,3	0,0	357,5
7333	Donnersbergkreis		571,1	571,1	256,1	0,0	315,0
7334	Germersheim		435,5	435,5	283,9	0,0	151,5
7335	Kaiserslautern		751,0	751,0	567,9	0,0	183,1
7336	Kusel		544,8	544,8	460,1	0,0	84,7
7337	Südliche Weinstraße		729,8	729,8	466,8	0,0	263,0
7338	Rhein-Pfalz		2233,7	2233,7	265,8	0,0	1967,9
7339	Mainz-Bingen		726,8	726,8	275,8	0,0	451,0
7340	Südwestpfalz		1007,1	1007,1	867,9	0,0	139,2
8115	Böblingen		735,5	735,5	352,9	0,0	382,7
8116	Esslingen		1321,0	1321,0	709,1	0,0	611,9
8117	Göppingen		1075,3	1075,3	794,1	0,0	281,2
8118	Ludwigsburg. Landkr.		1787,0	1787,0	649,4	0,0	1137,6
8119	Rems-Murr-Kreis		1500,7	1500,7	897,9	0,0	602,8
8125	Heilbronn		2032,9	2032,9	986,8	0,0	1046,1

ARS	Kreis/Kreisregion	FGE ^b Donau j/n	N-Eintrag (2016-2018) t N a ⁻¹	Obergrenze ^c		Erforderliche Minderung ^c	
				ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹	ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹
8126	Hohenlohekreis		1327,7	1327,7	710,9	0,0	616,8
8127	Schwäbisch Hall		2490,9	2490,9	1489,5	0,0	1001,4
8128	Main-Tauber-Kreis		1385,9	1385,9	710,5	0,0	675,4
8135	Heidenheim	1	979,6	979,6	978,3	0,0	1,3
8136	Ostalbkreis		2435,9	2435,9	1869,4	0,0	566,5
8215	Karlsruhe		2076,6	2076,6	1090,0	0,0	986,5
8216	Rastatt		1368,7	1368,7	1158,8	0,0	210,0
8225	Neckar-Odenwald-Kreis		1443,8	1443,8	1026,6	0,0	417,2
8226	Rhein-Neckar		2336,3	2336,3	1242,3	0,0	1094,0
8235	Calw		795,4	795,4	639,5	0,0	155,9
8236	Enzkreis		854,5	854,5	438,1	0,0	416,4
8237	Freudenstadt		1064,3	1064,3	981,4	0,0	82,9
8315	Breisgau-Hoch-schwarzw.		2146,5	2146,5	1694,4	0,0	452,1
8316	Emmendingen		1062,8	1062,8	701,6	0,0	361,1
8317	Ortenaukreis		2797,4	2797,4	2375,9	0,0	421,5
8325	Rottweil		1168,4	1168,4	900,9	0,0	267,5
8326	Schwarzwald-Baar-Kreis	1	1229,5	1229,5	1175,4	0,0	54,0
8327	Tuttlingen	1	788,7	788,7	729,4	0,0	59,3
8335	Konstanz		1619,2	1619,2	1494,5	0,0	124,7
8336	Lörrach		1105,7	1105,7	947,2	0,0	158,5
8337	Waldshut		1699,1	1699,1	1647,3	0,0	51,8
8415	Reutlingen	1	1624,6	1624,6	1312,7	0,0	311,9
8416	Tübingen		850,8	850,8	448,3	0,0	402,4
8417	Zollernalbkreis		1152,3	1152,3	1010,8	0,0	141,5
8425	Alb-Donau-Kreis	1	2178,4	2178,4	2169,7	0,0	8,7
8426	Biberach	1	2543,3	2543,3	2543,3	0,0	0,0
8435	Bodenseekreis		1626,7	1626,7	1576,3	0,0	50,4
8436	Ravensburg		3252,5	3252,5	3187,2	0,0	65,4
8437	Sigmaringen	1	1789,9	1789,9	1789,9	0,0	0,0
9171	Altötting	1	1255,4	1255,4	1255,4	0,0	0,0
9172	Berchtesgadener Land	1	1470,8	1470,8	1470,8	0,0	0,0
9173	Bad Tölz-Wolfratshau-sen	1	1762,5	1762,5	1762,5	0,0	0,0
9174	Dachau	1	1167,3	1167,3	1167,3	0,0	0,0
9175	Ebersberg	1	976,3	976,3	976,3	0,0	0,0

ARS	Kreis/Kreisregion	FGE ^b Donau j/n	N-Eintrag (2016-2018) t N a ⁻¹	Obergrenze ^c		Erforderliche Minderung ^c	
				ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹	ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹
9176	Eichstätt	1	1780,7	1780,7	1780,7	0,0	0,0
9177	Erding	1	1760,1	1760,1	1760,1	0,0	0,0
9178	Freising	1	1670,7	1670,7	1670,7	0,0	0,0
9179	Fürstenfeldbruck	1	858,6	858,6	858,6	0,0	0,0
9180	Garmisch-Partenkirchen	1	1337,5	1337,5	1337,5	0,0	0,0
9181	Landsberg am Lech	1	1394,1	1394,1	1394,1	0,0	0,0
9182	Miesbach	1	1094,0	1094,0	1094,0	0,0	0,0
9183	Mühldorf a. Inn	1	1489,6	1489,6	1489,6	0,0	0,0
9184	München (mit München)	1	3784,4	3784,4	3784,4	0,0	0,0
9185	Neuburg-Schrobenhausen.	1	1004,4	1004,4	1004,4	0,0	0,0
9186	Pfaffenhofen a.d. Ilm	1	995,1	995,1	995,1	0,0	0,0
9187	Rosenheim	1	2748,4	2748,4	2748,4	0,0	0,0
9188	Starnberg	1	883,6	883,6	883,6	0,0	0,0
9189	Traunstein	1	2933,5	2933,5	2933,5	0,0	0,0
9190	Weilheim-Schongau	1	1461,3	1461,3	1461,3	0,0	0,0
9271	Deggendorf	1	1253,0	1253,0	1253,0	0,0	0,0
9272	Freyung-Grafenau	1	1212,7	1212,7	1212,7	0,0	0,0
9273	Kelheim	1	1291,1	1291,1	1291,1	0,0	0,0
9274	Landshut	1	2321,5	2321,5	2321,5	0,0	0,0
9275	Passau	1	2824,8	2824,8	2824,8	0,0	0,0
9276	Regen	1	938,4	938,4	938,4	0,0	0,0
9277	Rottal-Inn	1	2296,2	2296,2	2296,2	0,0	0,0
9278	Straubing-Bogen	1	1570,7	1570,7	1570,7	0,0	0,0
9279	Dingolfing-Landau	1	1458,7	1458,7	1458,7	0,0	0,0
9371	Amberg-Weizbach	1	1387,3	1387,3	1351,4	0,0	36,0
9372	Cham	1	1784,0	1784,0	1784,0	0,0	0,0
9373	Neumarkt i.d. OPf.	1	1439,5	1439,5	1355,2	0,0	84,3
9374	Neustadt a.d. Waldnaab	1	1658,3	1658,3	1657,7	0,0	0,6
9375	Regensburg	1	1577,2	1577,2	1577,2	0,0	0,0
9376	Schwandorf	1	1474,1	1474,1	1474,1	0,0	0,0
9377	Tirschenreuth		1311,3	1311,3	1311,3	0,0	0,0
9471	Bamberg		1376,8	1376,8	1003,6	0,0	373,1
9472	Bayreuth		1581,4	1581,4	1446,0	0,0	135,4
9473	Coburg		771,6	765,2	485,1	6,4	286,5

ARS	Kreis/Kreisregion	FGE ^b Donau j/n	N-Eintrag (2016-2018) t N a ⁻¹	Obergrenze ^c		Erforderliche Minderung ^c	
				ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹	ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹
9474	Forchheim		774,1	774,1	662,2	0,0	111,9
9475	Hof		1330,7	1129,1	1129,1	201,6	201,6
9476	Kronach		662,9	662,8	630,0	0,0	32,8
9477	Kulmbach		788,9	788,9	703,8	0,0	85,0
9478	Lichtenfels		567,7	567,7	440,8	0,0	126,9
9479	Wunsiedel i. Fichtelgeb.		713,6	713,6	713,6	0,0	0,0
9571	Ansbach	1	2717,4	2717,4	2220,3	0,0	497,1
9572	Erlangen-Höchststadt		961,3	961,3	749,4	0,0	211,9
9573	Fürth		419,4	419,4	199,8	0,0	219,5
9574	Nürnberger-Land		1807,9	1807,9	891,5	0,0	916,3
9575	Neustadt a.d. Aisch-Bad Windsheim		1708,4	1708,4	1049,4	0,0	659,0
9576	Roth		1164,5	1164,5	833,3	0,0	331,1
9577	Weißenburg-Gunzen- hsn.	1	1096,0	1096,0	1082,0	0,0	14,0
9671	Aschaffenburg		836,2	836,2	521,2	0,0	315,0
9672	Bad Kissingen		976,8	976,7	723,8	0,0	253,0
9673	Rhön-Grabfeld		1013,9	1013,8	734,0	0,1	279,9
9674	Haßberge		931,9	931,9	639,0	0,0	292,9
9675	Kitzingen		891,8	891,8	434,2	0,0	457,6
9676	Miltenberg		558,2	558,2	402,3	0,0	155,9
9677	Main-Spessart		1055,2	1055,2	700,0	0,0	355,2
9678	Schweinfurt		968,8	968,8	493,9	0,0	474,9
9679	Würzburg		1237,4	1237,4	434,9	0,0	802,5
9771	Aichach-Friedberg	1	1406,4	1406,4	1406,4	0,0	0,0
9772	Augsburg	1	2291,2	2291,2	2291,2	0,0	0,0
9773	Dillingen a.d. Donau	1	1340,2	1340,2	1340,2	0,0	0,0
9774	Günzburg	1	1268,2	1268,2	1268,2	0,0	0,0
9775	Neu-Ulm	1	974,6	974,6	974,6	0,0	0,0
9776	Lindau (Bodensee)		791,2	791,2	785,3	0,0	5,9
9777	Ostallgäu	1	2608,4	2608,4	2608,4	0,0	0,0
9778	Unterallgäu	1	2510,1	2510,1	2510,1	0,0	0,0
9779	Donau-Ries	1	2010,6	2010,6	2010,6	0,0	0,0
9780	Oberallgäu	1	3090,0	3090,0	3090,0	0,0	0,0
10041	Regionalverband Saar- brücken		593,7	593,7	458,8	0,0	134,9

ARS	Kreis/Kreisregion	FGE ^b Donau j/n	N-Eintrag (2016-2018) t N a ⁻¹	Obergrenze ^c		Erforderliche Minderung ^c	
				ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹	ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹
10042	Merzig-Wadern		725,3	725,3	623,3	0,0	102,0
10043	Neunkirchen		346,8	346,8	286,3	0,0	60,4
10044	Saarlouis		670,8	670,8	460,2	0,0	210,6
10045	Saarpfalz-Kreis		555,9	555,9	444,5	0,0	111,3
10046	St. Wendel		563,3	563,3	559,1	0,0	4,2
11000	Berlin		3244,3	1385,4	1385,4	1858,9	1858,9
12060	Barnim		924,1	790,1	790,1	134,0	134,0
12061	Dahme-Spreewald		982,9	923,1	923,1	59,8	59,8
12062	Elbe-Elster		894,7	697,7	697,7	197,0	197,0
12063	Havelland		828,0	653,3	653,3	174,7	174,7
12064	Märkisch-Oderland		1301,8	1224,4	1224,4	77,3	77,3
12065	Oberhavel		859,5	714,2	714,2	145,3	145,3
12066	Oberspreewald-Lausitz		531,6	512,8	512,8	18,7	18,7
12067	Oder-Spree		1180,5	1117,5	1117,5	63,0	63,0
12068	Ostprignitz-Ruppin		1113,3	1081,2	1081,2	32,1	32,1
12069	Potsdam-Mittelmark		1493,9	1206,2	1206,2	287,7	287,7
12070	Prignitz		1405,4	1163,1	1163,1	242,4	242,4
12071	Spree-Neiße		886,2	852,1	852,1	34,1	34,1
12072	Teltow-Fläming		1055,4	898,4	898,4	157,0	157,0
12073	Uckermark		2056,3	1910,4	1910,4	145,9	145,9
13071	Mecklenburgische Seenplatte		4139,2	3783,9	3783,9	355,4	355,4
13072	Rostock		3517,0	2617,1	2617,1	899,9	899,9
13073	Vorpommern-Rügen		3021,9	2288,9	2288,9	733,0	733,0
13074	Nordwestmecklenburg		2311,4	1508,5	1508,5	802,9	802,9
13075	Vorpommern-Greifswald		2970,4	2485,8	2485,8	484,6	484,6
13076	Ludwigslust-Parchim		4431,6	3366,2	3366,2	1065,5	1065,5
14521	Erzgebirgskreis		3034,6	2356,3	2356,3	678,3	678,3
14522	Mittelsachsen		3308,9	1657,9	1657,9	1651,1	1651,1
14523	Vogtlandkreis		1837,3	1275,9	1275,9	561,4	561,4
14524	Zwickau		1747,7	743,4	743,4	1004,3	1004,3
14625	Bautzen		2220,0	1843,4	1843,4	376,5	376,5
14626	Görlitz		2175,0	1861,5	1861,5	313,5	313,5
14627	Meißen		2261,3	733,7	733,7	1527,6	1527,6

ARS	Kreis/Kreisregion	FGE ^b Donau j/n	N-Eintrag (2016-2018) t N a ⁻¹	Obergrenze ^c		Erforderliche Minderung ^c	
				ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹	ohne FGE Rhein t N a ⁻¹	mit FGE Rhein t N a ⁻¹
14628	Sächsische Schweiz-Osterzgebirge		2947,8	1721,0	1721,0	1226,8	1226,8
14729	Leipzig		2323,0	942,7	942,7	1380,4	1380,4
14730	Nordsachsen		1763,7	681,2	681,2	1082,5	1082,5
15081	Altmarkkreis Salzwedel		1471,1	814,4	814,4	656,7	656,7
15083	Börde		2558,4	709,3	709,3	1849,1	1849,1
15084	Burgenlandkreis		1284,0	339,9	339,9	944,0	944,0
15085	Harz		2587,1	1045,8	1045,8	1541,2	1541,2
15086	Jerichower Land		777,2	560,7	560,7	216,5	216,5
15087	Mansfeld-Südharz		1241,5	487,5	487,5	753,9	753,9
15088	Saale		1533,2	330,2	330,2	1203,0	1203,0
15089	Salzlandkreis		1534,7	296,3	296,3	1238,4	1238,4
15090	Stendal		1299,1	830,5	830,5	468,6	468,6
15091	Wittenberg		2146,4	1309,1	1309,1	837,3	837,3
16051	Erfurt		210,3	92,2	92,2	118,1	118,1
16061	Eichsfeld		958,2	648,4	648,4	309,9	309,9
16062	Nordhausen		779,2	619,2	619,2	160,0	160,0
16063	Wartburgkreis		1220,7	990,4	990,4	230,3	230,3
16064	Unstrut-Hainich-Kreis		958,1	495,6	495,6	462,5	462,5
16065	Kyffhäuserkreis		874,9	325,3	325,3	549,7	549,7
16066	Schmalkalden-Meiningen		1087,3	990,1	976,5	97,2	110,7
16067	Gotha		1060,8	700,9	700,9	360,0	360,0
16068	Sömmerda		570,9	224,9	224,9	346,0	346,0
16069	Hildburghausen		1082,7	1066,1	953,7	16,6	129,0
16070	Ilm-Kreis		788,3	496,3	496,3	292,0	292,0
16071	Weimarer Land		880,6	386,6	386,6	494,0	494,0
16072	Sonneberg		493,8	493,8	491,4	0,0	2,4
16073	Saalfeld-Rudolstadt		783,6	553,5	553,5	230,1	230,1
16074	Saale-Holzland		741,4	285,9	285,9	455,5	455,5
16075	Saale-Orla-Kreis		1107,1	914,4	914,4	192,7	192,7
16076	Greiz		1154,9	599,5	599,5	555,4	555,4
16077	Altenburger Land		809,4	338,8	338,8	470,6	470,6

^a Zuflüsse zur Nordsee: 2,8 mg N L⁻¹, zur Ostsee: 2,6 mg N L⁻¹ (jew. Jahresmittelwert) am Übergangspunkt limnisch-marin bzw. am Grenzübertritt

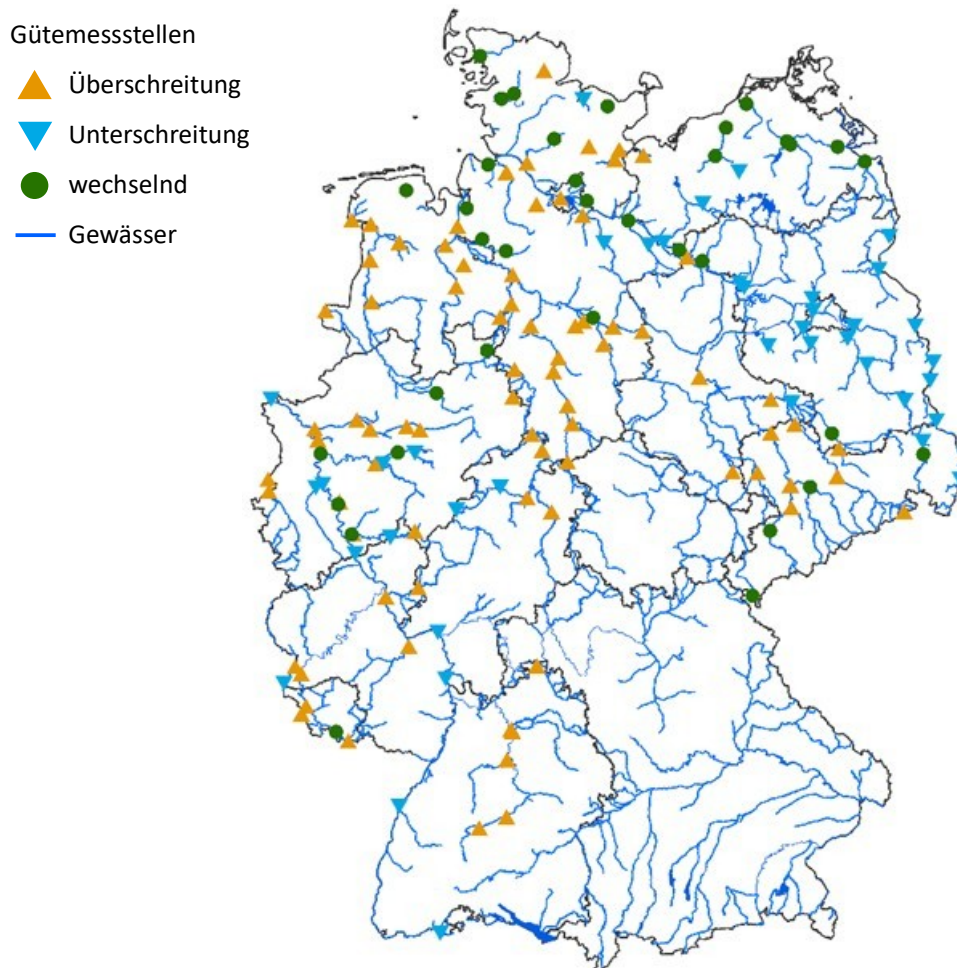
^b Zuordnung der Kreise/Kreisregionen zu den Flussgebieten nach größtem Flächenanteil

^c Die Summation über die Kreisregionen differiert geringfügig gegenüber der Summation über die MoRE-Analysegebiete (s. Tabelle 4)

A.3.3 Vergleich mit Gütemessungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Ermittlung des Minderungsbedarfes unter Einbezug des gesamten Rhein-Einzugsgebietes dargestellt. Insgesamt wurden 158 Gütemessstellen ausgewertet. Für jedes Jahr wurde bestimmt, ob die an der Gütemessstelle ermittelte Jahresmittelkonzentration ober- oder unterhalb der zulässigen Konzentration des AU (Kapitel 3.3.2) liegt und eine Kategorisierung vorgenommen (Unterschreitung, Überschreitung oder wechselnd). Insbesondere in Berlin-Brandenburg, Teilen Mecklenburg-Vorpommerns und Teilen des Rhein-Einzugsgebietes finden sich Gütemessstellen, die für alle drei Jahre mittlere Konzentrationen unterhalb der zulässigen Konzentrationen aufweisen (42 Gütemessstellen, Abbildung 52). Eine Überschreitung in allen drei Jahren zeigte sich dagegen für die Mehrheit der betrachteten Gütemessstellen und hauptsächlich in Niedersachsen (Weser, Ems), aber auch in weiteren Landesteilen (79 Gütemessstellen, Abbildung 52). Vor allem in Norddeutschland zeigen die Gütemessstellen ein wechselndes Bild. Hier lagen die mittleren Konzentrationen teilweise ober- oder unterhalb der zulässigen Konzentrationen für die drei betrachteten Jahre (37 Gütemessstellen, Abbildung 52).

Abbildung 52: Jahresmittelkonzentrationen an Gütemessstellen in Bezug zu den ins Binnenland übertragenen zulässigen N(ges)-Konzentrationen für die Jahre 2016 bis 2018 (mit Einbezug der FGE Rhein).



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

Tabelle 32: Mittlere zulässige N(ges)-Konzentrationen in den Analysegebieten (Abbildung 8), in denen die ausgewählten Gütemessstellen liegen und Angabe, ob die Jahresmittelwerte der gemessenen N(ges)-Konzentrationen das Ziel unterschreiten (↓), überschreiten (↑) oder sich abwechseln (↑↓).

LAWA-Kennung	Gütemessstelle / Gewässer	zulässige N(ges)-Konzentration (Mittel 2016-2018) mg N L ⁻¹	Zielüber-/unterschreitung in den Jahren 2016 – 2018
BB01	Ratzdorf / Lausitzer Neiße	4,21	↓
BB04	Cottbus / Spree	5,60	↓
BB05	Neuzittau / Spree	5,21	↓
BB06	Hennigsdorf / Havel	4,41	↓
BB07	Potsdam / Havel	3,78	↓
BB08	Frankfurt / Oder	4,10	↓
BB09	Hohenwutzen / Oder	4,03	↓
BB10	Guben / Lausitzer Neiße	4,31	↓
BB11	Kietz / Rhin	2,94	↓
BB12	Leibsch / Spree	5,60	↓
BB13	Neue Mühle / Dahme	5,60	↓
BB14	vor Mündung in die Nuthe / Nieplitz	3,78	↓
BB15	Babelsberg / Nuthe	3,78	↓
BB16	Golzow / Plane	3,26	↓
BB17	Saldernhorst / Dosse	2,94	↓
BB18	Mündung bei Bad Liebenwerda / Kleine Elster	3,18	↑↓
BB19	Wittenberge / Stepenitz	2,91	↑↓
BB20	Lenzen / Löcknitz	2,95	↑↓
BB21	Vierraden / Welse	4,01	↓
BE01	Spandau / Spree	4,41	↓
BE02	Krughorn / Havel	4,15	↓
BW101	Kirchentellinsfurt / Neckar	3,32	↑
BW11	Starzach-Börstingen / Neckar	3,38	↑
BW22	Reckingen / Rhein	2,96	↓
BW24	Kehl / Kinzig	2,92	↓
BW26	Besigheim / Enz	3,10	↑
BW27	Kochendorf / Kocher	3,02	↑
BW28	Jagstfeld / Jagst	3,02	↑
BW30	Wertheim / Tauber	3,04	↑
HE06	Limburg-Staffel / Lahn	2,91	↑
HE10	Rotenburg / Fulda	3,18	↑
HE11	Felsberg-Altenburg / Schwalm	3,16	↑

LAWA-Kennung	Gütemessstelle / Gewässer	zulässige N(ges)-Konzentration (Mittel 2016-2018) mg N L ⁻¹	Zielüber-/unterschreitung in den Jahren 2016 – 2018
HE12	Edersee / Eder	3,20	↑
HE13	Bad Karlshafen-Helmarshausen / Diemel	3,05	↑
HH011	Seemannshöft / Elbe	2,80	↑
HH02	Haselknick / Alster	2,82	↑↓
HH03	Zollenspieker / Elbe	2,83	↑
MV01	Dömitz / Elde	2,88	↓
MV02	Bandekow / Sude	2,85	↑↓
MV03	Kessin / Warnow	2,60	↑↓
MV04	Demmin / Tollense	3,88	↑↓
MV05	Anklam / Peene	3,73	↑↓
MV06	Ueckermünde / Uecker	3,73	↑↓
MV07	Ribnitz-Damgarten / Recknitz	2,60	↑↓
MV08	Ahrenshagen / Nebel	2,73	↓
MV09	Wolken / Nebel	2,66	↑↓
MV10	Wotenick / Trebel	3,87	↑↓
MV11	Parchim / Elde	2,99	↓
MV12	Rodenberg / Stepenitz	2,62	↑
NI01	Schnackenburg / Elbe	2,91	↑
NI04	Hemeln / Weser	3,07	↑
NI07	Grafhorst / Aller	3,15	↑
NI08	Langlingen / Aller	2,97	↑↓
NI09	Verden / Aller	2,83	↑
NI10	Reckershausen / Leine	3,15	↑
NI11	Poppenburg / Leine	3,03	↑
NI12	Neustadt / Leine	2,91	↑
NI13	Groß Schwülper / Oker	2,98	↑
NI14	Reithörne / Hunte	2,81	↑
NI15	Herbrum / Ems	2,81	↑
NI16	Laar / Vechte	2,84	↑
NI17	Bokeloh / Hase	2,86	↑
NI18	Bienenbüttel / Ilmenau	2,85	↓
NI20	Steyerberg / Große Aue	2,88	↑
NI21	Seerau / Jeetzel	2,87	↓
NI22	Oberndorf / Oste	2,81	↑
NI23	Daudieck / Lühe-Aue	2,80	↑
NI24	Otterndorf / Medem	2,84	↑↓

LAWA-Kennung	Gütemessstelle / Gewässer	zulässige N(ges)-Konzentration (Mittel 2016-2018) mg N L ⁻¹	Zielüber-/unterschreitung in den Jahren 2016 – 2018
NI25	Detern-Scharrel / Barsseler Tief	2,88	↑
NI26	Buntelsweg / Knockster Tief	2,80	↑
NI27	Nenndorf / Harle	2,80	↑↓
NI28	Hessisch Oldendorf / Weser	2,97	↑
NI29	Drakenburg / Weser	2,83	↑
NI30	Gifhorn / Ise	3,04	↑
NI31	Wathlingen / Fuhse	2,94	↑
NI32	Ehlershausen / Neue Aue	2,93	↑
NI33	Northeim / Rhume	3,15	↑
NI34	Sarstedt / Innerste	3,01	↑
NI35	Holzkamp / Delme	2,81	↑
NI36	Ottersberg / Wümme-Nordarm	2,85	↑↓
NI37	Colnrade / Hunte	2,85	↑
NI38	Tietjens Hütte / Hamme	2,82	↑↓
NI39	Stotel / Lune	2,80	↑↓
NI40	Gandersum / Ems	2,80	↑
NI41	Brake / Weser	2,80	↑
NI42	Greene / Leine	3,04	↑
NW01	Bad Honnef / Rhein	2,83	↓
NW02	Kleve-Bimmen / Rhein	2,80	↓
NW03	Bergheim / Sieg	2,83	↑↓
NW041	Au / Sieg	2,86	↓
NW06	Leverkusen-Rheindorf / Wupper	2,83	↑
NW07	Eppinghoven / Erft	2,83	↓
NW091	Mülheim / Ruhr	2,82	↑↓
NW11	Hohenlimburg / Lenne	2,98	↓
NW13	Wesel / Lippe	2,81	↑
NW211	Vlodrop / Rur	2,83	↑
NW300	Düsseldorf / Rhein	2,82	↓
NW301	Dinslaken / Emscher	2,81	↑
NW314	Troisdorf / Agger	2,85	↑
NW338	Hagen / Volme	2,96	↑
NW340	Siegen / Sieg	3,03	↑
NW341	Bad Berleburg / Eder	4,10	↓
NW342	Haltern / Stever	2,85	↑
NW352	Hamm / Ahse	2,96	↑

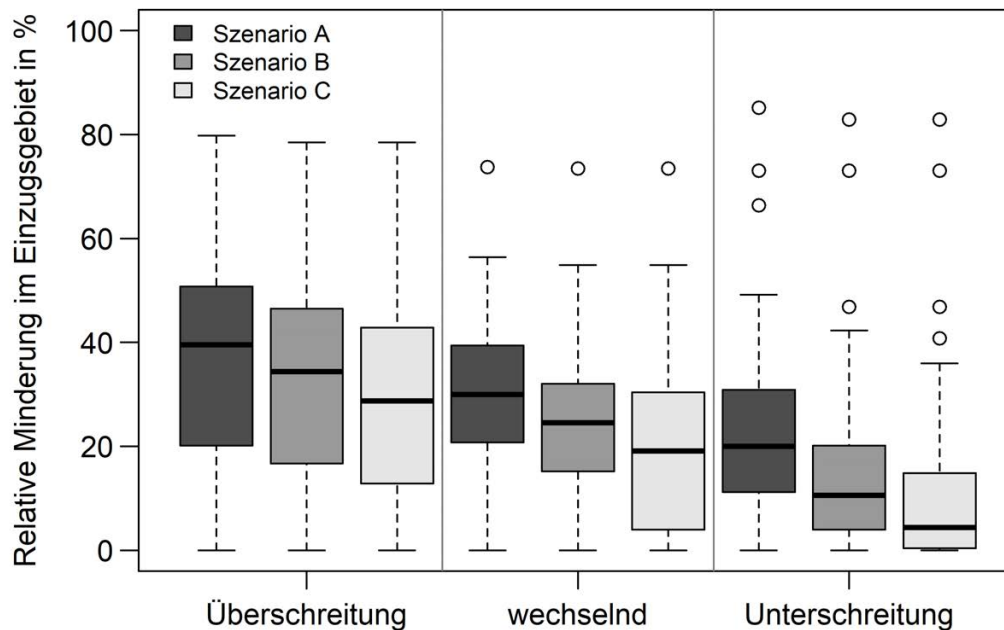
LAWA-Kennung	Gütemessstelle / Gewässer	zulässige N(ges)-Konzentration (Mittel 2016-2018) mg N L ⁻¹	Zielüber-/unterschreitung in den Jahren 2016 – 2018
NW367	Harsewinkel / Lutter	3,11	↑↓
NW388	Fröndenberg / Ruhr	3,06	↑↓
NW389	Datteln / Dortmund-Ems-Kanal	2,87	↑
NW390	Minden / Mittellandkanal	2,92	↑↓
NW391	Leverkusen / Dhünn	2,83	↑↓
NW393	Brüggen / Schwalm	2,80	↑
NW394	Arnsberg / Möhne	3,14	↓
NW396	Lippetal / Lippe	2,96	↑
NW402	Lügde / Emmer	3,05	↑
RP02	Mainz / Rhein	2,86	↓
RP04	Palzem / Mosel	2,97	↓
RP05	Kanzem / Saar	2,96	↑
RP06	Grolsheim / Nahe	2,86	↑
RP07	Sauer, Mündung / Sauer	2,96	↑
RP09	Lahnstein / Lahn	2,85	↑
RP10	Worms / Rhein	2,88	↓
SH01	Reinbek / Bille	2,87	↑↓
SH02	Willenscharen / Stör	2,86	↑↓
SH03	Friedrichstadt / Treene	2,92	↑↓
SH04	Schlüttsiel / Bongsiel. Kanal	2,80	↑↓
SH05	Kiel / Schwentine	2,60	↓
SH061	Lübeck-Moisling / Trave	2,67	↑
SH07	Sachsenwaldau / Bille	2,87	↑↓
SH08	Heiligenstedten / Stör	2,80	↑
SH10	Nordfeld / Eider	2,80	↑↓
SH11	Füsing / Füsinger Au	2,60	↑
SH12	Schwartau / Schwartau	2,65	↑
SH14	Bad Segeberg / Trave	2,73	↑
SH15	Scholenfurt / Kossau	2,60	↑↓
SH18	Tönning / Eider	2,80	↑↓
SL01	Saarbrücken Gündingen / Saar	3,03	↑↓
SL02	Fremersdorf / Saar	2,99	↑
SL05	Niedaltdorf / Nied	3,00	↑
SL06	Reinheim / Blies	3,06	↑
SN01	Görlitz / Lausitzer Neiße	4,56	↓
SN03	Gröditz / Große Röder	3,20	↑

LAWA-Kennung	Gütemessstelle / Gewässer	zulässige N(ges)-Konzentration (Mittel 2016-2018) mg N L ⁻¹	Zielüber-/unterschreitung in den Jahren 2016 – 2018
SN04	Schmilka / Elbe	3,21	↑
SN051	Dommitzsch / Elbe	3,10	↑
SN06	Erlln / Freib. Mulde	3,23	↑
SN07	Sermuth / Zwickauer Mulde	3,29	↑
SN08	Bad Düben / Vereinig. Mulde	3,19	↑
SN09	Bad Elster / Weiße Elster	3,55	↑↓
SN10	Bad Muskau / Lausitzer Neiße	4,44	↓
SN11	Zehren / Elbe	3,14	↑
SN12	Lieske / Spree	5,60	↑↓
SN13	Spree / Schwarzer Schöps	5,60	↓
SN14	Pischwitz / Zschopau	3,32	↑↓
SN17	Schlunzig / Zwickauer Mulde	3,40	↑↓
SN18	Göritzhein / Chemnitz	3,34	↑
SN19	Markkleeberg / Pleiße	3,20	↑
ST01	Wittenberg / Elbe	3,05	↑
ST02	Magdeburg / Elbe	3,00	↑
ST03	Gorsdorf / Schwarze Elster	3,08	↓
ST05	Bad Dürrenberg / Saale	3,12	↑

Gütemessstellen repräsentieren grundsätzlich das gesamte darüber liegende Einzugsgebiet. Die modellierten Einträge (Abschnitt 3.2.2) und ermittelten absoluten Minderungsbedarfe für alle drei Szenarien (Abschnitte 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3) wurden bis zu dem jeweiligen AU aufsummiert, in dem die Gütemessstellen verortet sind. Daraus wurde der relative Minderungsbedarf für das EZG bestimmt und für einen groben Vergleich der zuvor beschriebenen Kategorisierung der Gütemessstellen (Unterschreitung, Überschreitung oder wechselnd) gegenübergestellt (Abbildung 53). Für alle drei Szenarien ist der gleiche generelle Trend ersichtlich. Gütemessstellen mit einer Überschreitung der zulässigen Konzentration finden sich eher in EZG mit hohem relativen Minderungsbedarf, während Gütemessstellen mit einer Unterschreitung der zulässigen Konzentrationen eher in EZG mit geringerem Minderungsbedarf zu finden sind (Abbildung 53).

Diese Gegenüberstellung kann nur als grobe Näherung betrachtet werden. Die Modellierung mit dem MoRE-Modell bezieht sich immer auf die Analysegebiete und die räumliche Auflösung erlaubt es nicht einzelne, kleine Gewässer innerhalb eines AU adäquat wiederzugeben. Somit kann es zu Abweichungen zwischen dem ermittelten Minderungsbedarf und der hier vorgenommenen Kategorisierung einer Gütemessstelle kommen.

Abbildung 53: Modellierter relativer Minderungsbedarf im Einzugsgebiet im Vergleich zu der Kategorisierung der Gütemessstellen aus Abbildung 17.



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

A.3.4 Sensitivitätsanalyse für Schutzgut Oberflächengewässer

Im vorliegenden Projekt wurde exemplarisch fürs das Szenario B eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Für zwei zentrale Eingangsgrößen wurde untersucht, wie sich eine Variation dieser Größen auf die modellierten Stickstoff-Einträge in die Oberflächengewässer und den Minderungsbedarf auswirkt. Da die Landwirtschaft die größte Quelle der Stickstoff-Einträge darstellt und das größte Minderungspotential aufweist, wurden die Eingangsdaten zum Stickstoff-Überschuss und zur Grundwasserkonzentration verändert. Hierfür wurden drei Variationen von Szenario B betrachtet, bei denen die beiden Eingangsdaten einzeln und in Kombination verändert wurden:

- Variation I: ± 10 % N-Überschüsse
- Variation II: ± 10 % Stickstoffkonzentrationen im Grundwasser
- Variation III: ± 10 % N-Überschüsse und Stickstoffkonzentrationen im Grundwasser

Die Durchführung der Sensitivitätsanalyse erfolgte in MoRE anhand von Rechenläufen mit stufenweisen Anpassungen der Eingangsdaten auf Ebene der Analysegebiete.

Sensitivität der Stickstoff-Einträge

Aus den modellierten Stoffeinträgen wurde die Modellsensitivität als Differenz aus positiver (+ 10 %) und negativer Variation (- 10 %) abgeleitet. Bezogen auf die modellierten Stickstoff-Einträge des Ausgangsszenarios kann so die prozentuale Modellsensitivität ermittelt werden:

$$\text{Sensitivität (\%)} = \frac{TOT_E_N_+ - TOT_E_N_-}{TOT_E_N} \cdot 100 \quad (\text{Gl. 46})$$

mit

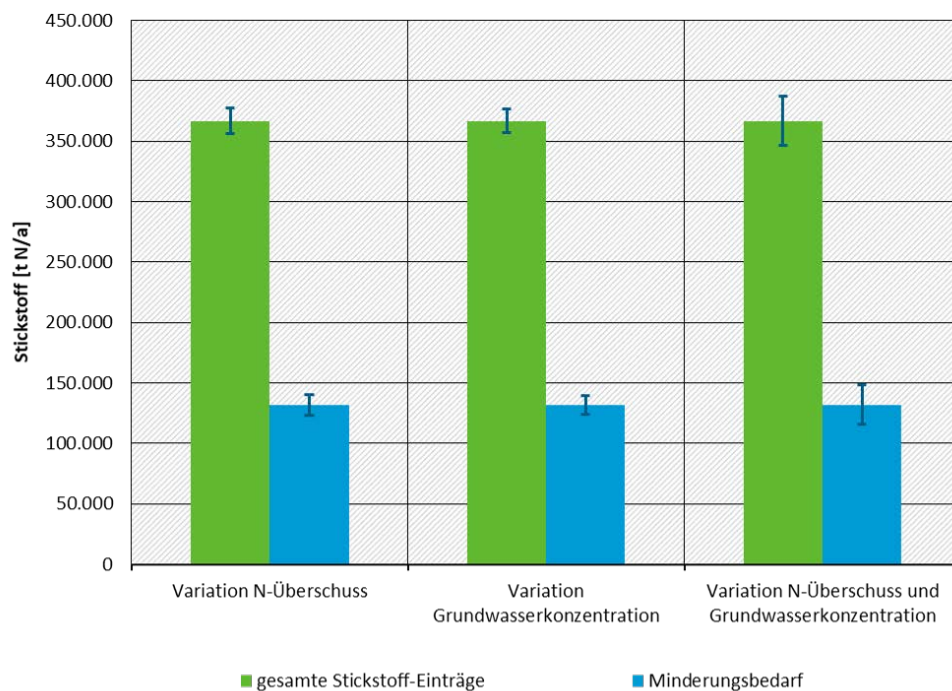
$TOT_E_N_+$ [t N a⁻¹] N(ges)-Einträge über alle Pfade für die positive Variation (+10 %)

TOT_E_N [t N a⁻¹] N(ges)-Einträge über alle Pfade für die negative Variation (-10 %)

TOT_E_N [t N a⁻¹] N(ges)-Einträge über alle Pfade

Bei Variation der N-Überschüsse bzw. der Grundwasserkonzentrationen beträgt die Sensitivität der modellierten Gesamteinträge insgesamt ± 6 % bzw. ± 5 % (Tabelle 33, Abbildung 54). Werden beide Eingangsgrößen gemeinsam variiert, erhöht sich die Sensitivität auf ± 11 % (Tabelle 33, Abbildung 54).

Abbildung 54: Variation der N(ges)-Einträge und der Minderungsbedarfe (s. Fehlerbalken) für Szenario B bei Variation der Eingangsdaten zu N-Überschüssen und Grundwasserkonzentrationen (Mittel 2016 - 2018) um +/- 10 %, ohne FGE Donau.



Quelle: eigene Darstellung, IWU-WG

Aufgeschlüsselt nach Flussgebietseinheiten ergeben sich deutliche regionale Unterschiede. Insbesondere die landwirtschaftlich geprägten Einzugsgebiete des Norddeutschen Tieflandes (Eider, Ems, Oder, Schlei/Trave, Warnow/Peene) zeigen eine höhere Sensitivität bei Variation der N-Überschüsse und eine geringere Sensitivität bei Variation der Grundwasserkonzentrationen. Dagegen zeigen sich in den FGE Maas und Weser die höchsten Sensitivitäten bei Variation der Grundwasserkonzentrationen (Tabelle 33).

Tabelle 33: Modellsensitivität der Stickstoff-Gesamteinträge in die Oberflächengewässer in den Flussgebieten (Mittel 2016 - 2018) bei Variation der Eingangsdaten zu N-Überschüssen und Grundwasserkonzentrationen um +/- 10 % (Werte gerundet)

Flussgebietseinheit	Modellsensitivität der gesamten Stickstoff-Einträge bei Variation der Eingangsdaten um $\pm 10\%$					
	N-Überschüsse		Stickstoffkonzentrationen im Grundwasser		N-Überschüsse und Stickstoffkonzentrationen im Grundwasser	
	t N a ⁻¹	%	t N a ⁻¹	%	t N a ⁻¹	%
Donau ^a	-	-	-	-	-	-
Eider	1.200	11 %	400	4 %	1.600	15 %
Elbe	6.900	7 %	5.100	5 %	11.900	12 %
Ems	1.700	9 %	1.000	5 %	2.600	13 %
Maas	200	4 %	500	9 %	600	11 %
Oder	600	9 %	100	1 %	700	10 %
Rhein	5.200	3 %	8.100	5 %	13.300	9 %
Schlei/Trave	800	10 %	200	2 %	1.000	12 %
Warnow/Peene	1.300	11 %	100	1 %	1.500	12 %
Weser	3.500	6 %	4.000	7 %	7.500	13 %
Gesamt	21.400	6 %	19.500	5 %	40.700	11 %

^a Für die Donau sind keine meeresökologischen Anforderungen festgelegt, daher wird dieses Flussgebiet nicht betrachtet.

Die beiden Eingangsgrößen N-Überschuss und Grundwasserkonzentration besitzen somit einen größeren Einfluss auf die MoRE-Ergebnisse zum N-Eintrag in die Oberflächengewässer als beispielsweise eine Anpassung der Landnutzungsdaten in MoRE, für die eine Unsicherheit von rund 2,5 % in Bezug auf die Gesamteinträge ermittelt wurde (Döringer 2020).

Sensitivität der erforderlichen Verminderungen

Ausgehend von den modellierten Stoffeinträgen wurden die absoluten Minderungsbedarfe für die Variationen von Szenario B ermittelt, die Sensitivität wurde analog zu Gleichung (Gl. 46) berechnet:

$$\text{Sensitivität (\%)} = \frac{MB_+ - MB_-}{MB} \cdot 100 \quad \text{Gl. (47)}$$

mit

MB_+ [t N a⁻¹] Minderungsbedarf für die positive Variation (+10 %)

MB_- [t N a⁻¹] Minderungsbedarf für die negative Variation (-10 %)

MB [t N a⁻¹] Minderungsbedarf

Insgesamt ist die Sensitivität der modellierten Minderungsbedarfe deutlich höher als für die Stickstoff-Gesamteinträge. Bei Variation der N-Überschüsse bzw. der Grundwasserkonzentrationen beträgt die Sensitivität für die Minderungsbedarfe $\pm 16\%$ bzw. $\pm 12\%$ (Tabelle 34, Abbildung 54). Wenn beide Eingangsgrößen gemeinsam variiert werden, steigt die Sensitivität auf $\pm 29\%$ (Tabelle 34, Abbildung 54). Auch die regionale Ausprägung bleibt erhalten. Die stark landwirtschaftlich geprägten Flussgebiete zeigen die höchste Sensitivität des Minderungsbedarfs bei

Variation der N-Überschüsse, die FGE Weser, Deltarhein und Maas zeigen dagegen die höchste Sensitivität bei Variation der Grundwasserkonzentrationen (Tabelle 34).

Tabelle 34: Modellsensitivität der Stickstoff-Minderungsbedarfe in den Flussgebieten (Mittel 2016 - 2018) bei Variation der Eingangsdaten zu N-Überschüssen und Grundwasserkonzentrationen um +/- 10 % (Werte gerundet).

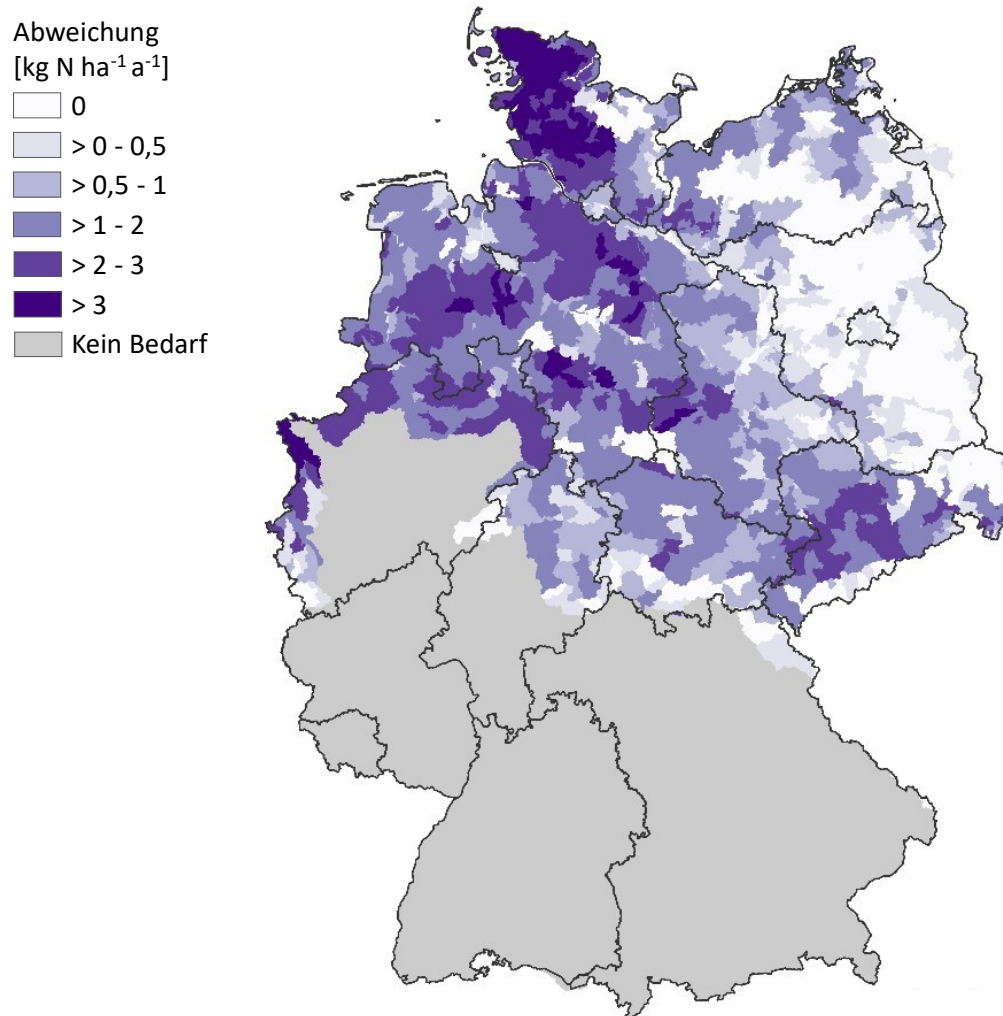
Flussgebietseinheit	Modellunsicherheit der Minderungsbedarfe (Mittel 2016-2018) unter Variation der Eingangsdaten					
	N-Überschüsse		Stickstoffkonzentrationen im Grundwasser		N-Überschüsse und Stickstoffkonzentrationen im Grundwasser	
	t N a ⁻¹	%	t N a ⁻¹	%	t N a ⁻¹	%
Donau ^a	-	-	-	-	-	-
Eider	1.100	26 %	400	10 %	1.500	36 %
Elbe	5.500	14 %	4.100	10 %	9.600	24 %
Ems	1.500	20 %	900	12 %	2.500	34 %
Maas	100	3 %	400	13 %	600	19 %
Oder	100	9 %	100	9 %	300	27 %
Rhein ^b	4.400	8 %	5.800	11 %	10.200	19 %
Schlei/Trave	500	26 %	100	5 %	700	37 %
Warnow/Peene	700	27 %	100	4 %	900	35 %
Weser	3.100	17 %	3.500	19 %	6.600	35 %
Gesamt	17.000	13 %	15.400	12 %	32.900	25 %

^a Für die Donau sind keine meeresökologischen Anforderungen definiert, daher wird dieses Flussgebiet nicht betrachtet.

^b Gebiete des Rhein-Einzugsgebietes an der deutschen Grenze, die nicht in den Hauptlauf des Rheins, sondern direkt in die Niederlande entwässern.

Die Sensitivität der Minderungsbedarfe bei gemeinsamer Variation der N-Überschüsse und Grundwasserkonzentration fällt mit ± 25 % vergleichsweise hoch aus, die absolute Variation beträgt im Mittel allerdings nur $1,4 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. In weiten Bereichen von Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern ist die Abweichung dabei deutlich geringer als $1 \text{ kg N N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, dagegen treten in Schleswig-Holstein und in vereinzelten Gebieten von Niedersachsen Abweichungen von mehr als $3 \text{ kg N N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf (Abbildung 55).

Abbildung 55: Mittlere Variation des flächenbezogenen Minderungsbedarfs der N(ges)-Einträge in den MoRE-Analysegebieten im Szenario B^a bei Variation der Eingangsdaten zu N-Überschüssen und Grundwasserkonzentrationen um +/- 10 % (Mittel 2016 – 2018).



^a Ohne Rhein-Einzugsgebiet

Quelle: eigene Darstellung, IWG-SWW; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020

A.4 Anhang zu Schutzgut Grundwasser

1. Datenaufbereitung der Grundwassermessstellen

Tabelle 35: Übersicht zur Anzahl der Messstellen insgesamt und nach Selektion.

Bundesland	Messstellen insgesamt			darunter: Messstellen mit N ₂ /Ar-Messung		
	Gesamt	nicht ausge- wählt	Auswahl	Gesamt	nicht ausge- wählt	Auswahl
BB	768	60	708	193	11	182
BE	211	63	148	x ^a	x	x
BW	1878	278	1600	x	x	x
BY	849	146	703	x	x	x
HB	27	0	27	x	x	x
HE	3817	1378	2439	331	68	263
HH	18	0	18	x	x	x
MV	494	121	373	241	26	215
NI	1133	192	941	739	92	647
NW	1695	401	1294	271	42	229
RP	292	32	260	x	x	x
SH	300	65	235	142	0	142
SL	49	17	32	x	x	x
SN	687	148	539	34	4	30
ST	577	41	536	484	30	454
TH	229	59	170	x	x	x
Insgesamt	13024	3001	10023	2435	273	2162

^a N₂/Ar-Messungen liegen nicht für alle Bundesländer vor.

Die Datensätze der 16 Bundesländer waren insgesamt sehr heterogen und mussten zunächst vereinheitlicht und - soweit möglich - teilweise bereinigt werden.

- Stammdaten: Filteroberkante und -unterkante waren zum Teil in m u. GOK und zum Teil in m u. MPH angegeben, dadurch kann Ungenauigkeit in Angabe der Filterlage von einigen Dezimetern entstehen.
- Koordinaten der Messstellen lagen nicht alle in einem einheitlichen Koordinatensystem vor.
- Bei einem Teil der Messstellen waren die Angaben der Koordinaten nur auf 100 m genau (da sensible Daten z. B. von Trinkwasserversorgern).
- Beschaffenheitsdaten: in einige Fällen waren mehrere Konzentrationsangaben (= Messungen?) mit gleichem Datum vorhanden; für die Berechnungen bzw. Auswertungen wurde i.d.R. der höchste Wert übernommen.
- Teilweise fehlten die Angaben zur Bestimmungsgrenze (BG). Dafür wurden die Häufigkeiten der BG der Parameter NO₃, Sulfat, Eisen (für Daten ab 2016) und Sauerstoff in den anderen

Datensätzen wurde ausgewertet, daraus wurden für fehlende Werte zur BG als BG festgelegt: NO_3 und Sulfat $< 1 \text{ mg L}^{-1}$, Eisen $< 0,01 \text{ mg L}^{-1}$, Sauerstoff $< 0,1 \text{ mg L}^{-1}$.

- ▶ Heterogenität in Bezug auf Eisen(II) und Eisen, gelöst: in einigen Bundesländern wird unter Fe(gel) im Datensatz Eisen(II) geführt; in anderen Bundesländern Fe(gelöst). Es wurde eine Plausibilitätsprüfung zu Wertepaaren durchgeführt, in denen ein Wert zu Fe(II) mitgeführt wurde ($\text{O}_2 > 5 \text{ mg L}^{-1}$ und $\text{Fe(II)} > 0,05 \text{ mg L}^{-1}$ sowie $\text{Fe(II)} > 0,2 \text{ mg L}^{-1}$ und $\text{NO}_3 > 2,0 \text{ mg L}^{-1}$).
- ▶ Berechnete Daten, die im Rahmen der N_2/Ar -Methode erhoben wurden, werden in den Bundesländern sehr unterschiedlich veröffentlicht. Teilweise werden die bereits umgerechneten Werte zur NO_3 -Eintragskonzentration zur Verfügung gestellt. War die NO_3 -Eintragskonzentration noch zu berechnen wurde diese einheitlich bestimmt. Bei Vorhandensein von Werten unterhalb der Bestimmungsgrenze wurden diese zur weiteren Verarbeitung allerdings nicht halbiert.
- ▶ In wenigen Fällen wurden unplausible Einzelwerte gelöscht.

2. Datenselektion

Zur Reduktion und Vereinheitlichung des Datensatzes wurden die Messstellen nach den folgenden Kriterien selektiert.

- ▶ Voraussetzungen "Stammdaten":
 - Eindeutige Kennzeichnung Messstellenart: Nur Auswahl von GWM, Brunnen, Quellen/Stollen (keine Schachtbrunnen)
 - Brunnen und GWM: Ausschluss, wenn keine Information zu Filterlage oder Messstellentiefe vorlag
 - Nur Messstellen $< 75 \text{ m}$ Tiefe
 - Nur Messstellen $< 50 \text{ m}$ Filterlänge
 - bei Messstellengruppen wird nur der OP geführt (Identifizierung der Gruppe, wie folgt: Puffer von 10 m um jede Messstelle; wenn mehrere Messstellen innerhalb des Puffers, dann Auswahl der flachsten Messstelle).
- ▶ Voraussetzungen "Beschaffenheit":
 - Mindestens 2 Messwerte pro Messstelle.

Nach dieser Datenaufbereitung und Selektion verblieben für den gewählten Auswertungszeitraum 2016 - 2021 mit 8737 die größte Zahl von Messstellen; für die Zeitraum 2017 - 2020 waren es 8333 und für 2018 - 2021 8335 Messstellen. Abbildung 56 zeigt die ausgewerteten Messstellen nach Art der Messstelle.

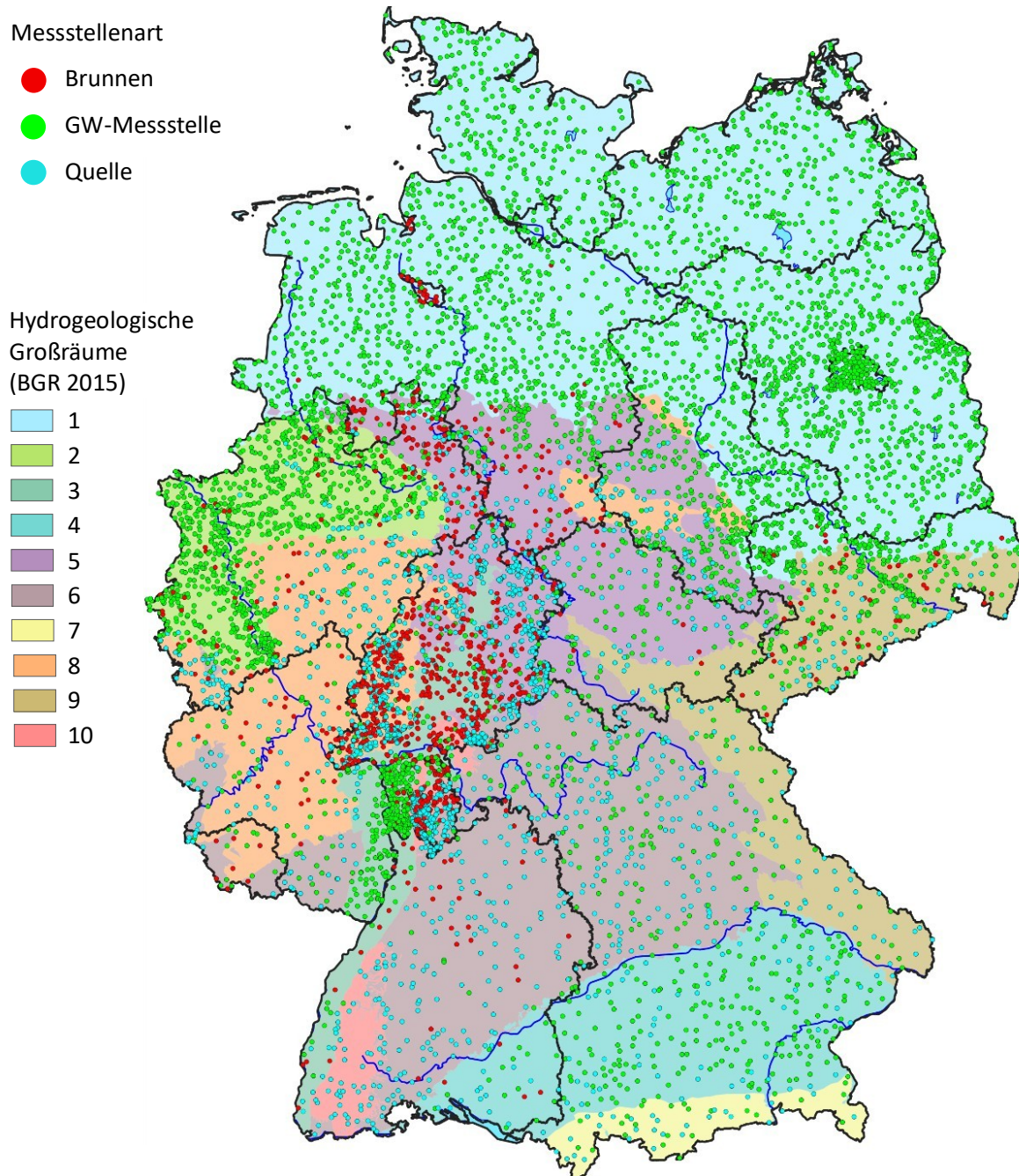
3. Prädiktoren der Random-Forest-Modellierung

Für die RF-Modellierung der Nitratkonzentration im Grundwasser wurden die nachstehenden Prädiktoren verwendet. Ein Teil der Prädiktoren wurde aus Knoll et al. (2024) übernommen, die übrigen wurden im Rahmen des vorliegenden Projekts erarbeitet.

- ▶ Flächenanteile Ackerland, Grünland, Sonderkulturen, Wald, Siedlung und Gewässer; Auswertung CORINE Land Cover (CLC2018, BKG 2022)
- ▶ Hydrogeologische Großräume ($n = 10$), Hydrogeologische Räume ($n = 37$), Hydrogeologische Teilräume ($n = 248$); Quelle: HYRAUM - Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland (BGR 2015)

- HYREG1000 - Hydrogeologische Regionen von Deutschland (BGR 2013b), Attribute: fünf Regionen, 24 Unterregionen (Art und Stärke der Grundwasserführung und der chemischen Zusammensetzung)

Abbildung 56: Ausgewertete Messstellen nach Art der Messstelle

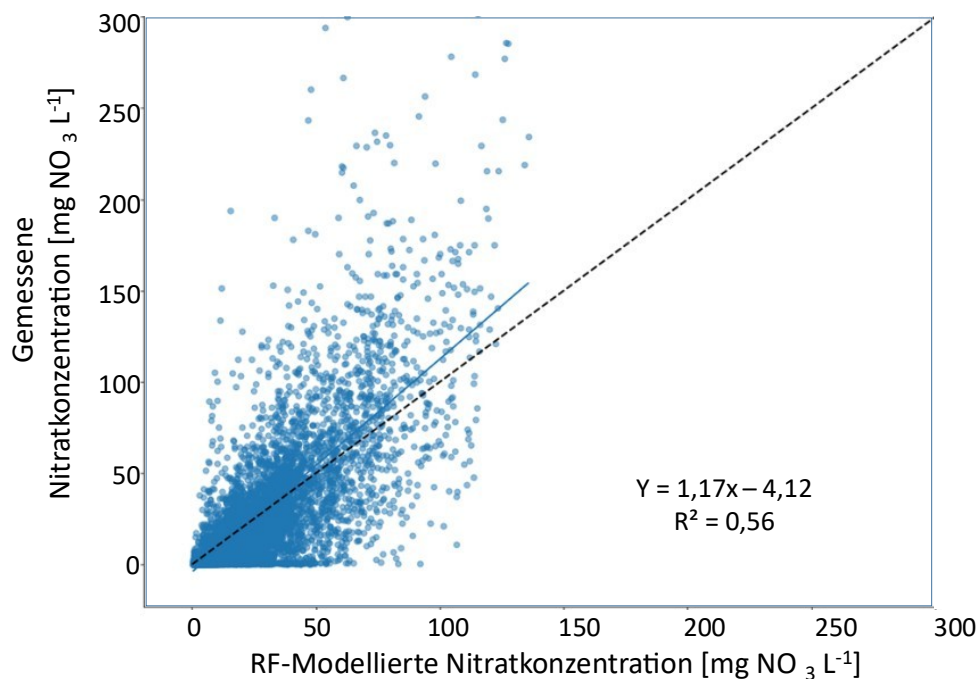


Quelle: eigene Darstellung, HYDOR: © Geo-BasisDE / BKG 2020; BGR (2015)

- HÜK250 - Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland 1: 250.000 (Stand 2019) (BGR 2022), sechs Attribute:
 - Gesteinsart des Grundwasserleiters (4 Klassen)
 - Verfestigungsgrad des Grundwasserleiters (3 Klassen)
 - Hohlraumart des Grundwasserleiters (4 Klassen)

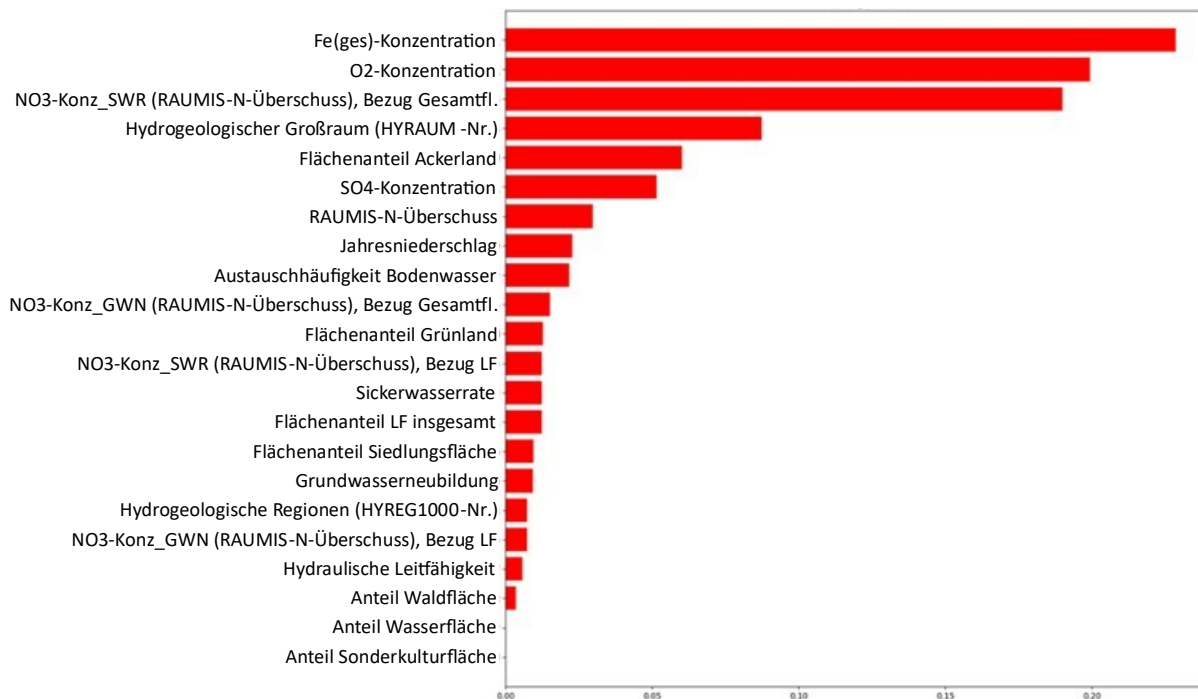
- Gesteinstyp des Grundwasserleiters (8 Klassen)
- Durchlässigkeit des Grundwasserleiters (13 Klassen)
- Grundwasser-Leiter/Nichtleiter (4 Klassen)
- ▶ HYREG1000 - Hydrogeologische Regionen von Deutschland (BGR 2013b), Attribute: fünf Regionen, 24 Unterregionen (Art und Stärke der Grundwasserführung und der chemischen Zusammensetzung)
- ▶ Grundwasser-Überdeckung; Quelle: Hannappel et al. (erarbeitet im Rahmen des Projekts), Attribut: gering, mittel hoch
- ▶ Mittlerer korrigierte jährliche Niederschlagshöhe in Deutschland (mm a⁻¹), Mittel 1961-1990 (Hydrologischer Atlas 2003, Tafel 2.5)
- ▶ Mittlere jährliche Sickerwasserrate in Deutschland, Mittel 1961-1990 (mm a⁻¹) (s. Kapitel 4.1)
- ▶ Mittlere jährliche Grundwasserneubildung in Deutschland, Mittel 1961 - 1990 (mm a⁻¹) (s. Kapitel 4.1)
- ▶ BUEK1000 - Bodenkundliche Übersichtskarte 1: 1.000.000 (BGR 2013a), daraus abgeleitete Karten (ohne Werte für urbane Gebiete):
 - GWS1000_250 - Grundwasserbeeinflussung der Böden (5 Stufen)
 - We1000_250 - Effektive Durchwurzelungstiefe der Böden (dm)
 - KA1000_250 - Kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in den effektiven Wurzelraum (mm a⁻¹)
 - AHACGL1000_250 - Austauschhäufigkeit des Bodenwassers in landwirtschaftlich genutzten Böden (%)
 - FK10dm1000_250 - Wasserspeicherfähigkeit (Feldkapazität) der Böden bis in 1 m Tiefe (mm)
 - NFKWe1000_250 - Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Deutschland (mm)
 - Humus1000_ob_v20 - Humusgehaltklassen (9 Klassen, %-Spannen)
- ▶ Stickstoff-Überschuss auf der landwirtschaftlich genutzten Fläche: fünf Varianten (s. Kapitel 4.2.1)
- ▶ Potentielle Nitratkonzentrationen im Sickerwasser bzw. in der Grundwasserneubildung: 20 Varianten (s. Kapitel 4.2.1)
- ▶ Wasserspeicherfähigkeit (Feldkapazität) der Böden bis 1 m Tiefe (BGR 2015)
- ▶ Humusgehalt - Gehalte an organischer Substanz der Böden (BGR 2013a)
- ▶ Redox-Verhältnisse, Klassifikation nach Knoll et al. (2024), 4-gestuft: stark anaerob, anaerob, intermediär, aerob.
- ▶ O₂-, SO₄- und Fe(gel)-Konzentration im Grundwasser: für diese drei Parameter wurde, ausgehend von den Konzentrationswerten in den Messstellen, ebenfalls mittels Random Forest die Verteilung in Deutschland modelliert. Dieses Vorgehen ist angelehnt an die Karte der (4-gestuften) Redox-Verhältnisse in Knoll et al. (2024), im vorliegenden Projekt jedoch mit separaten und stetigen Werten der O₂-, SO₄- und Fe(gel)-Konzentrationen als Prädiktoren.

Abbildung 57: Gemessene und mit Random Forest modellierte NO_3 -Konzentration (ohne Denitrifikationswert) in den 7405 Messstellen, mit denen das Modell trainiert wurde.



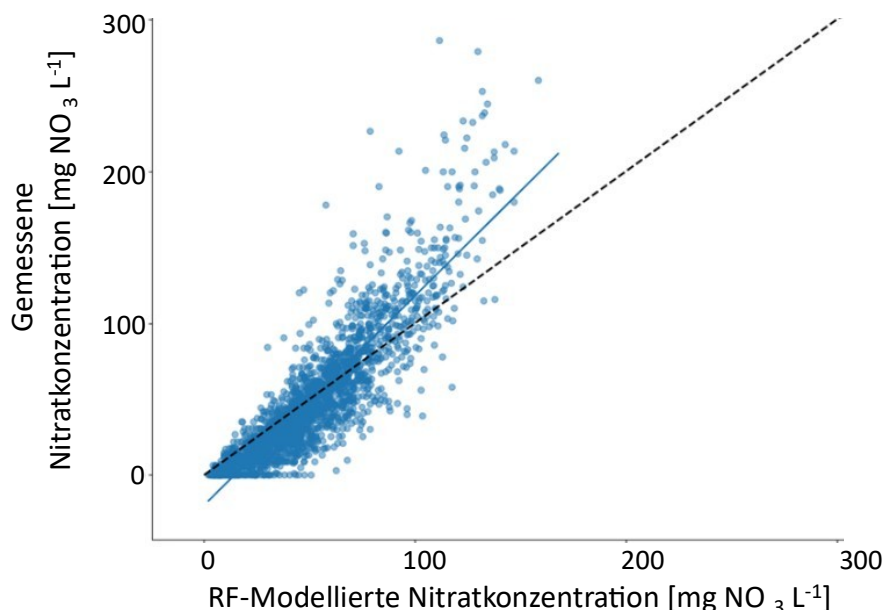
Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR

Abbildung 58: Signifikanz der Prädiktoren (Ranking) im Random Forest Modell zur Regionalisierung der Nitratkonzentration (ohne Denitrifikationswert) im Grundwasser.



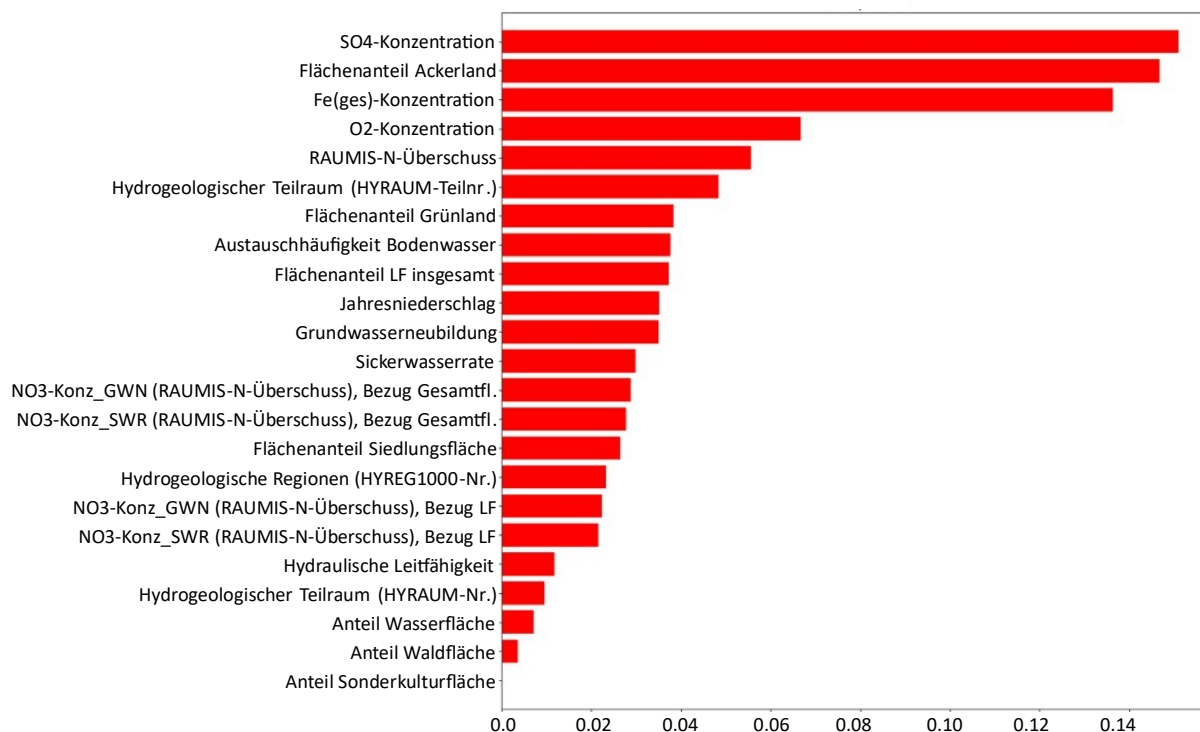
Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR

Abbildung 59: Gemessene und mit Random Forest modellierte NO_3 -Konzentration mit Denitrifikationswert im Grundwasser in den 2112 Messstellen, mit denen das Modell trainiert wurde.



Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR

Abbildung 60: Signifikanz der Prädiktoren (Ranking) im Random Forest Modell zur Regionalisierung der Nitratkonzentration mit Denitrifikationswert im Grundwasser.



Quelle: eigene Darstellung, JLU-ILR

Tabelle 36: Hydrosphärischer N-Überschuss^a 2010-2019, 2019-2021 und N-Überschuss nach RAUMIS^b sowie Minderungsbedarf des jeweiligen N-Überschuss in den Kreisregionen zur Einhaltung einer potenziellen Nitratkonzentration im Sickerwasser^c von 50 mg NO₃ L⁻¹.

AGS	Kreis/Kreisregion	Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		N-Überschuss RAUMIS	
		N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung
		kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N
1051	Dithmarschen	78,2	3430,0	65,0	2183,3	71,6	2804,5
1053	Herzogtum Lauenburg	55,5	1074,3	43,2	396,9	73,3	2319,5
1054	Nordfriesland	84,2	5745,5	70,1	3837,7	79,3	5174,9
1055	Ostholstein	46,2	1167,1	33,8	335,7	74,6	3636,5
1056	Pinneberg	77,1	1099,3	67,8	796,4	65,7	761,5
1057	Plön	58,9	1157,2	46,7	463,9	77,8	2405,3
1058	Rendsburg-Eckernför.	81,0	4381,2	67,3	2623,6	77,6	4053,3
1059	Schleswig-Flensburg	90,8	6021,6	74,6	3795,0	88,2	5737,7
1060	Segeberg	67,9	1489,5	56,4	757,1	69,1	1759,2
1061	Steinburg	87,0	2803,4	70,7	1753,1	76,4	2152,0
1062	Stormarn	59,8	683,2	48,6	266,8	72,9	1281,9
2000	Hamburg	94,5	709,3	77,7	503,4	34,7	96,8
3151	Gifhorn	57,4	1963,3	43,8	1039,6	53,6	1774,6
3153	Goslar	44,0	193,4	28,3	25,4	55,4	453,3
3154	Helmstadt	36,6	667,5	23,6	188,2	55,9	1565,1
3155	Northeim	44,9	464,3	29,9	89,9	65,0	1339,8
3157	Peine	43,2	630,5	29,7	208,4	51,2	905,5
3158	Wolfenbüttel	36,1	879,7	23,0	222,3	53,2	1946,1
3159	Göttingen	43,4	386,5	31,1	72,7	79,2	2503,0
3241	Region Hannover	49,8	2095,9	37,0	862,9	53,3	2476,4
3251	Diepholz	90,1	7662,5	75,5	5807,6	84,2	6928,4
3252	Hameln-Pyrmont	61,3	612,6	44,7	168,0	83,0	1331,5
3254	Hildesheim	43,0	869,1	28,3	215,2	60,4	1884,7
3255	Holzminde	50,0	87,7	36,5	10,0	65,3	345,2
3256	Nienburg (Weser)	74,7	3387,1	63,1	2471,7	78,5	3699,6
3257	Schaumburg	58,4	691,8	44,4	310,6	77,6	1272,8
3351	Celle	71,5	1508,3	60,8	1033,1	63,1	1230,9
3352	Cuxhaven	98,2	7745,3	81,4	5516,6	79,8	5375,2
3353	Harburg	67,2	1452,8	56,2	938,5	59,9	1214,7
3354	Lüchow-Dannenberg	51,8	1769,6	38,0	1001,4	55,6	2008,6

AGS	Kreis/Kreisregion	Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		N-Überschuss RAUMIS	
		N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung
		kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N
3355	Lüneburg	60,1	1852,6	48,6	1228,9	56,3	1655,3
3356	Osterholz	89,6	2039,5	73,7	1430,5	67,5	1198,6
3357	Rotenburg (Wümme)	101,2	7380,0	86,1	5521,4	87,5	5734,2
3358	Heidekreis	70,6	1719,6	77,2	2106,4	66,6	1507,8
3359	Stade	86,3	3759,2	73,6	2769,3	70,9	2588,7
3360	Uelzen	50,2	1167,7	39,1	506,7	55,7	1527,0
3361	Verden	83,4	2341,9	69,1	1703,2	80,3	2209,8
3451	Ammerland	101,1	2510,7	84,7	1828,8	91,0	2092,1
3452	Aurich	90,3	4240,5	72,8	2775,7	79,0	3333,4
3453	Cloppenburg	116,2	6698,8	94,8	4697,0	136,1	8592,0
3454	Emsland	104,1	9291,3	79,9	5552,6	114,0	10918,4
3455	Friesland	101,2	2642,2	79,7	1673,5	87,2	2021,2
3456	Grafschaft Bentheim	123,3	4496,6	96,9	3008,8	105,9	3524,5
3457	Leer	102,1	4372,7	81,7	3024,6	72,9	2479,7
3458	Oldenburg	107,5	4534,7	88,9	3296,4	92,1	3532,1
3459	Osnabrück	98,8	6166,3	74,9	3481,9	100,5	6393,1
3460	Vechta	105,1	4130,5	85,1	2880,4	153,1	7196,7
3461	Wesermarsch	101,3	3863,4	76,0	2446,7	69,8	2101,2
3462	Wittmund	93,8	2156,6	77,1	1470,3	72,4	1292,7
4011	Bremen	106,2	492,6	87,4	355,4	68,7	236,5
5112	Duisburg, Essen, Mühlheim, Oberh.	53,6	28,1	39,1	4,7	55,1	38,4
5124	Wuppertal	82,1	3,3	74,8	0,9	50,9	0,0
5154	Kleve	107,7	5089,5	86,1	3573,2	94,5	4156,8
5158	Mettmann	70,3	106,5	70,4	107,1	51,3	20,7
5162	Neuss	64,3	716,1	52,1	383,3	71,8	949,7
5166	Viersen	99,3	1820,1	80,7	1266,1	88,0	1483,5
5170	Wesel	94,4	2296,4	75,5	1457,5	80,0	1674,2
5334	Städteregion Aachen	76,6	397,1	64,8	248,9	49,4	180,0
5358	Düren	53,1	980,0	38,6	393,4	64,0	1465,2
5362	Rhein-Erft-Kreis	49,2	585,6	37,2	245,0	60,6	995,0
5366	Euskirchen	57,7	714,6	46,2	425,5	53,3	825,1
5370	Heinsberg	87,7	1847,2	68,2	1163,4	90,2	1944,4
5374	Oberbergischer Kreis	79,4	1,7	68,4	0,2	51,9	0,0
5378	Rheinisch-Berg.-Kreis	78,7	15,0	72,2	7,1	73,4	201,9

AGS	Kreis/Kreisregion	Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		N-Überschuss RAUMIS	
		N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung
		kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N
5382	Rhein-Sieg	56,2	496,9	47,9	329,1	49,4	369,0
5515	Münster	89,5	490,7	71,4	289,1	78,7	368,7
5554	Borken	109,1	5186,9	87,9	3418,0	106,5	4971,5
5558	Coesfeld	97,5	3279,6	80,6	2151,8	104,8	3771,4
5562	Recklingshausen	97,6	1073,3	89,0	861,6	86,9	824,9
5566	Steinfurt	92,8	4743,2	79,4	3467,5	91,6	4644,4
5570	Warendorf	88,3	3887,2	70,8	2437,8	97,8	4684,3
5711	Bielefeld	73,9	94,9	54,3	22,1	66,1	63,4
5754	Gütersloh	91,1	2246,2	74,0	1432,3	88,5	2148,2
5758	Herford	69,5	470,1	59,1	286,5	69,2	469,5
5762	Höxter	64,9	1140,0	52,7	591,5	72,6	1614,9
5766	Lippe	66,7	621,7	59,7	383,4	63,9	537,5
5770	Minden-Lübbecke	73,1	2484,0	58,2	1572,5	74,7	2618,8
5774	Paderborn	75,8	1291,3	62,0	668,1	84,9	1781,1
5913	Dortmund	50,7	15,2	34,0	0,0	72,1	79,3
5954	Ennepe-Ruhr	76,8	21,5	75,0	18,1	54,4	3,8
5958	Hochsauerlandkreis	64,8	162,7	55,7	79,2	54,8	150,3
5962	Märkischer Kreis	80,0	104,7	93,7	176,7	57,3	59,2
5966	Olpe	66,4	0,1	54,8	0,0	45,3	0,0
5970	Siegen-Wittgenstein	55,7	0,0	43,3	0,0	31,2	0,0
5974	Soest	72,4	2148,6	57,6	1185,2	82,8	2862,9
5978	Unna	78,5	1060,0	68,2	744,0	86,3	1321,3
6431	Bergstraße	52,8	313,6	44,0	213,1	38,6	223,2
6432	Darmstadt-Dieburg	51,7	405,6	41,3	215,6	40,7	339,2
6433	Groß-Gerau	39,6	347,3	30,3	213,0	31,7	250,8
6434	Hochtaunuskreis	38,4	26,2	34,0	15,8	40,8	53,7
6435	Main-Kinzig-Kreis	49,3	306,3	38,5	156,3	40,9	276,9
6436	Main-Taunus-Kreis	81,9	793,1	91,2	939,2	33,5	205,9
6437	Odenwaldkreis	62,3	49,9	50,1	12,6	46,5	42,5
6438	Offenbach	41,1	28,8	33,1	9,4	27,6	15,4
6439	Rheingau-Taunus-Krs.	29,5	31,8	21,1	11,8	30,6	28,4
6440	Wetteraukreis	45,1	892,2	31,4	405,3	45,2	895,8
6531	Gießen	39,3	220,2	27,7	51,6	35,8	175,7
6532	Lahn-Dill-Kreis	39,9	21,9	29,4	4,7	27,1	16,0

AGS	Kreis/Kreisregion	Hydrosphär. N-Über- schuss 2010-2019		Hydrosphär. N-Über- schuss 2010-2019		N-Überschuss RAUMIS	
		N-Über- schuss	erforderl. Minderung	N-Über- schuss	erforderl. Minderung	N-Über- schuss	erforderl. Minderung
		kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N
6533	Limburg-Weilburg	41,5	158,6	29,8	33,0	42,6	194,6
6534	Marburg-Biedenkopf	50,3	559,3	42,9	349,8	44,2	542,4
6535	Vogelsbergkreis	48,8	315,5	37,5	98,4	45,1	379,2
6631	Fulda	60,4	652,7	49,9	314,7	51,5	490,6
6632	Hersfeld-Rotenburg	46,3	239,9	35,2	73,9	45,4	258,0
6633	Kassel	47,3	429,5	37,0	143,2	51,7	655,3
6634	Schwalm-Eder-Kreis	48,1	1149,5	37,3	631,0	55,2	1606,0
6635	Waldeck-Franken- berg	56,0	702,7	46,4	334,5	54,2	720,8
6636	Werra-Meißner-Kreis	41,7	80,9	31,0	14,6	40,5	129,9
7131	Ahrweiler	40,5	30,9	31,2	4,9	38,2	35,3
7132	Altenkirchen	55,4	1,3	44,9	0,0	37,1	0,0
7133	Bad Kreuznach	26,8	104,3	19,5	43,0	35,0	199,6
7134	Birkenfeld	43,1	1,5	33,5	0,0	38,4	1,3
7135	Cochem-Zell	37,5	19,6	26,8	2,2	54,3	138,7
7137	Mayen-Koblenz	35,8	196,8	26,1	49,7	54,4	699,1
7138	Neuwied	50,2	25,3	39,2	7,9	38,5	0,9
7140	Rhein-Hunsrück- Kreis	40,9	32,4	28,6	0,0	49,4	155,9
7141	Rhein-Lahn-Kreis	36,1	35,6	24,8	1,2	44,8	115,4
7143	Westerwaldkreis	51,0	8,7	41,6	0,5	33,1	0,0
7231	Bernkastel-Wittlich	47,7	72,9	37,5	13,5	46,5	86,9
7232	Eifelkreis Bitburg-P.	66,9	543,0	52,0	119,2	59,4	359,8
7233	Vulkaneifel	55,4	28,2	42,8	1,2	42,5	2,2
7235	Trier-Saarburg	44,7	19,7	32,7	1,4	46,3	41,8
7331	Alzey-Worms	30,8	818,6	27,6	674,0	24,6	545,0
7332	Bad-Dürkheim	25,0	265,7	18,1	150,2	33,8	426,3
7333	Donnersbergkreis	29,8	162,1	18,9	33,8	36,0	280,9
7334	Germersheim	52,3	301,8	39,5	138,1	65,2	546,6
7335	Kaiserslautern	46,2	62,4	37,7	16,9	35,6	16,0
7336	Kusel	38,3	3,2	27,5	0,0	39,2	12,9
7337	Südliche Weinstraße	23,0	36,7	15,6	6,7	27,7	80,3
7338	Rhein-Pfalz	92,3	1631,0	74,0	1258,8	110,4	2029,0
7339	Mainz-Bingen	22,3	264,9	14,3	81,8	26,8	403,6
7340	Südwestpfalz	47,1	1,9	36,3	0,0	44,1	5,5

AGS	Kreis/Kreisregion	Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		N-Überschuss RAUMIS	
		N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung
		kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N
8115	Böblingen	45,9	92,6	31,5	2,7	44,8	142,4
8116	Esslingen	46,1	63,5	37,2	14,4	42,6	113,1
8117	Göppingen	57,5	40,1	47,5	5,0	51,0	49,7
8118	Ludwigsburg. Landkr.	44,6	361,7	36,1	166,3	45,3	449,0
8119	Rems-Murr-Kreis	59,4	172,5	53,0	113,2	47,1	112,0
8125	Heilbronn	34,4	160,6	28,0	45,9	36,9	236,5
8126	Hohenlohekreis	50,7	161,6	42,0	38,4	66,3	637,3
8127	Schwäbisch Hall	63,8	797,5	51,5	249,6	81,1	2077,0
8128	Main-Tauber-Kreis	33,6	78,2	25,7	7,4	47,1	678,8
8135	Heidenheim	52,8	143,8	43,1	52,2	61,3	307,7
8136	Ostalbkreis	60,5	353,2	49,2	103,7	61,8	604,5
8215	Karlsruhe	31,2	58,5	23,5	7,5	33,9	127,4
8216	Rastatt	34,9	0,3	29,2	0,0	36,9	46,1
8225	Neckar-Odenwald-Kr.	38,7	8,8	30,6	0,0	47,2	107,3
8226	Rhein-Neckar	38,2	213,6	29,5	69,6	40,3	309,7
8235	Calw	42,9	0,0	36,0	0,0	36,1	0,0
8236	Enzkreis	42,8	30,5	34,1	3,3	38,5	64,2
8237	Freudenstadt	45,9	1,7	36,2	0,0	36,7	2,4
8315	Breisgau-Hochschw.	42,0	296,1	31,4	97,4	37,9	293,1
8316	Emmendingen	41,2	107,8	32,8	42,4	42,2	174,1
8317	Ortenaukreis	35,5	70,0	27,4	10,1	37,6	253,6
8325	Rottweil	53,6	8,6	45,6	0,9	48,3	26,2
8326	Schwarzwald-Baar-Kr.	49,0	13,8	40,2	0,1	43,6	50,7
8327	Tuttlingen	47,7	13,8	40,5	2,5	40,1	23,6
8335	Konstanz	56,4	367,0	53,9	311,5	52,7	384,2
8336	Lörrach	38,4	4,3	29,1	0,1	33,0	9,3
8337	Waldshut	48,6	0,2	40,6	0,0	42,5	16,1
8415	Reutlingen	52,4	39,4	41,9	7,2	42,1	41,1
8416	Tübingen	39,9	61,9	30,1	7,9	38,5	104,0
8417	Zollernalbkreis	37,1	2,7	29,6	0,0	28,4	7,7
8425	Alb-Donau-Kreis	61,0	973,7	49,0	441,4	67,4	1462,3
8426	Biberach	71,5	1577,8	60,7	941,7	75,8	1927,3
8435	Bodenseekreis	47,6	43,9	38,4	7,0	39,7	18,3

AGS	Kreis/Kreisregion	Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		N-Überschuss RAUMIS	
		N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung
		kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N
8436	Ravensburg	85,3	989,6	70,9	459,7	68,4	394,3
8437	Sigmaringen	56,2	328,2	45,7	97,5	59,9	664,2
9171	Altötting	77,2	645,9	61,0	260,5	75,5	617,3
9172	Berchtesgadener Ld.	80,3	3,7	67,5	0,0	61,1	0,1
9173	Bad Tölz-Wolfratshs.	67,3	0,0	54,7	0,0	43,6	0,0
9174	Dachau	57,1	395,0	42,2	51,7	58,8	504,1
9175	Ebersberg	81,6	281,0	64,6	68,5	68,9	144,9
9176	Eichstätt	38,8	266,3	26,2	23,7	45,7	445,3
9177	Erding	79,0	1699,9	64,2	925,9	75,0	1481,2
9178	Freising	46,1	362,3	34,2	47,1	52,7	620,2
9179	Fürstenfeldbruck	51,0	42,5	36,6	1,4	51,8	117,9
9180	Garmisch-Partenk.	60,8	0,0	42,7	0,0	30,9	0,0
9181	Landsberg am Lech	64,7	148,2	49,3	14,4	53,5	87,2
9182	Miesbach	66,2	0,0	55,6	0,0	48,4	0,0
9183	Mühldorf a. Inn	79,9	1301,3	64,8	684,7	78,4	1246,2
9184	München (München)	43,4	3,4	30,8	0,0	43,3	9,6
9185	Neuburg-Schrobenh.	44,9	610,6	31,1	178,2	47,6	712,8
9186	Pfaffenhofen a.d. Ilm	48,3	416,0	36,3	133,6	54,5	627,7
9187	Rosenheim	92,0	645,9	76,7	235,3	70,7	222,3
9188	Starnberg	52,5	0,4	37,2	0,0	41,9	0,0
9189	Traunstein	86,2	467,6	71,6	173,3	69,1	371,8
9190	Weilheim-Schongau	74,4	86,6	57,8	7,8	49,0	1,0
9271	Deggendorf	52,0	330,2	36,0	52,7	46,7	203,0
9272	Freyung-Grafenau	79,4	82,6	64,8	12,2	45,2	1,7
9273	Kelheim	54,9	973,2	43,0	526,8	61,0	1262,8
9274	Landshut	62,5	2050,0	47,1	855,3	76,5	3228,1
9275	Passau	71,2	1509,3	56,9	764,8	71,1	1709,3
9276	Regen	73,5	34,0	61,1	9,9	50,3	3,0
9277	Rottal-Inn	74,5	1962,0	57,9	921,9	73,4	1964,8
9278	Straubing-Bogen	47,4	969,0	30,6	226,9	47,2	897,7
9279	Dingolfing-Landau	60,8	1374,0	44,0	578,5	69,5	1826,3
9371	Amberg-Sulzbach	55,8	243,9	44,1	61,4	56,1	310,3
9372	Cham	73,6	1302,2	60,7	706,1	63,1	945,1
9373	Neumarkt i.d. OPf.	53,3	272,5	40,4	27,2	49,7	249,9

AGS	Kreis/Kreisregion	Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		N-Überschuss RAUMIS	
		N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung
		kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N
9374	Neustadt (Waldnaab)	61,9	559,8	50,3	210,7	56,8	465,5
9375	Regensburg	43,8	878,6	30,4	313,3	46,3	1021,6
9376	Schwandorf	63,3	936,1	50,6	443,9	60,3	857,0
9377	Tirschenreuth	66,2	510,8	54,4	215,5	63,7	548,9
9471	Bamberg	43,4	244,5	32,4	41,9	44,7	330,4
9472	Bayreuth	59,7	224,1	48,9	55,0	48,9	155,0
9473	Coburg	50,4	268,9	39,8	81,0	62,6	611,9
9474	Forchheim	47,6	72,5	35,0	9,6	39,7	72,2
9475	Hof	57,7	204,4	47,7	53,9	51,8	192,5
9476	Kronach	41,3	4,5	30,7	0,6	37,3	36,2
9477	Kulmbach	45,5	58,4	34,0	5,1	43,3	88,1
9478	Lichtenfels	43,2	98,1	31,3	16,9	45,1	156,0
9479	Wunsiedel Fichtelgeb.	50,5	64,1	40,1	14,3	43,6	51,7
9571	Ansbach	66,6	2527,5	54,9	1411,6	69,9	2921,1
9572	Erlangen-Höchststadt	44,6	149,3	34,8	36,9	44,8	197,5
9573	Fürth	67,4	526,0	55,8	334,0	59,3	401,8
9574	Nürnberger-Land	51,6	48,7	40,3	17,4	40,8	45,2
9575	Neustadt a.d. AischW.	59,2	1640,9	44,7	791,9	64,1	1967,9
9576	Roth	50,6	255,6	40,6	87,2	53,0	338,9
9577	Weißenburg-Gunzenhausen	65,5	1004,8	51,3	493,3	65,5	1053,1
9671	Aschaffenburg	51,8	76,8	39,1	22,4	38,8	99,1
9672	Bad Kissingen	35,4	44,9	25,8	2,6	36,5	74,1
9673	Rhön-Grabfeld	32,2	72,5	22,6	3,4	41,2	466,7
9674	Haßberge	41,2	227,4	30,4	36,9	47,2	452,2
9675	Kitzingen	40,1	573,8	28,4	198,2	47,6	848,8
9676	Miltenberg	42,0	28,9	29,4	0,3	46,1	81,7
9677	Main-Spessart	29,2	17,1	20,7	0,2	33,4	74,8
9678	Schweinfurt	36,4	352,0	26,6	99,7	39,5	480,5
9679	Würzburg	38,0	628,3	26,6	180,8	42,8	978,9
9771	Aichach-Friedberg	71,4	1271,8	58,3	740,4	73,2	1360,1
9772	Augsburg	70,4	1267,2	59,5	793,1	58,0	885,8
9773	Dillingen a.d. Donau	70,2	1527,1	54,7	883,2	67,8	1453,8

AGS	Kreis/Kreisregion	Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		N-Überschuss RAUMIS	
		N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung
		kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N
9774	Günzburg	69,4	920,7	53,2	414,8	58,0	583,7
9775	Neu-Ulm	70,0	530,8	55,2	263,2	62,4	400,7
9776	Lindau (Bodensee)	78,9	0,0	64,9	0,0	50,3	0,0
9777	Ostallgäu	86,5	317,8	84,2	279,3	58,9	42,5
9778	Unterallgäu	94,5	2058,6	74,6	996,2	70,9	825,6
9779	Donau-Ries	69,6	2395,7	56,9	1579,3	69,3	2455,6
9780	Oberallgäu	68,8	0,0	42,0	0,0	49,7	0,0
10041	Regvbd. Saarbrücken	38,2	0,0	31,7	0,0	71,3	97,5
10042	Merzig-Wadern	46,0	0,0	36,4	0,0	36,4	0,0
10043	Neunkirchen	44,7	0,4	35,1	0,0	31,2	0,0
10044	Saarlouis	39,8	2,6	31,0	0,7	33,1	1,8
10045	Saarpfalz-Kreis	40,5	0,1	31,8	0,0	26,6	0,0
10046	St. Wendel	46,4	0,0	35,5	0,0	31,7	0,0
11000	Berlin	94,5	99,9	77,7	73,9	41,6	23,3
12060	Barnim	40,1	881,2	30,2	460,2	32,8	589,8
12061	Dahme-Spreewald	49,2	2415,1	38,3	1674,2	39,0	1720,7
12062	Elbe-Elster	47,6	2991,9	38,6	2215,7	36,6	2076,2
12063	Havelland	39,5	2460,2	29,3	1595,8	29,8	1704,0
12064	Märkisch-Oderland	39,4	3695,9	29,0	2435,3	40,8	3908,4
12065	Oberhavel	42,3	1675,2	33,0	1089,7	29,7	939,3
12066	Oberspreewald-Laus.	48,7	1077,2	40,9	813,0	48,3	1114,0
12067	Oder-Spree)	46,6	2289,5	38,5	1665,3	35,7	1537,8
12068	Ostprignitz-Ruppin	41,8	3222,6	30,6	1893,1	35,3	2508,4
12069	Potsdam-Mittelmark	42,4	3075,9	31,8	1953,0	32,8	2103,4
12070	Prignitz	45,9	3421,0	35,1	2015,2	38,0	2437,2
12071	Spree-Neiße	48,7	1576,3	40,1	1153,9	36,8	1015,7
12072	Teltow-Fläming	45,6	2916,6	30,8	1631,1	35,3	2079,6
12073	Uckermark	38,4	3811,9	28,8	2195,4	41,5	4457,9
13071	Mecklenb. Seenpl.	41,2	5758,0	29,5	2683,7	42,9	6455,2
13072	Rostock	46,6	4594,3	35,2	2218,9	48,6	5123,8
13073	Vorpommern-Rügen	38,0	2952,1	25,7	861,1	45,3	4465,4
13074	Nordwestmecklenbg.	41,6	1935,1	31,0	652,1	52,2	3356,7
13075	Vorpommern-Greifsw.	40,7	5577,8	28,2	2902,1	43,3	6323,2
13076	Ludwigslust-Parchim	53,4	7141,4	45,1	5062,8	44,4	5154,8

AGS	Kreis/Kreisregion	Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		Hydrosphär. N-Überschuss 2010-2019		N-Überschuss RAUMIS	
		N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung	N-Überschuss	erforderl. Minderung
		kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N
14521	Erzgebirgskreis	55,5	159,1	42,3	21,0	50,7	323,0
14522	Mittelsachsen	47,7	1735,8	34,5	607,7	63,5	3637,4
14523	Vogtlandkreis	51,3	492,5	38,7	132,7	55,7	961,0
14524	Zwickau	50,6	811,3	35,9	271,9	62,6	1373,6
14625	Bautzen	43,4	1390,0	31,2	520,6	50,1	2118,2
14626	Görlitz	45,9	1505,4	33,3	610,8	52,6	2230,0
14627	Meißen	43,3	2389,6	30,9	1295,6	54,5	3439,8
14628	Sächs. Schweiz-Ost.	44,2	648,8	32,7	218,4	47,0	954,1
14729	Leipzig	41,0	2460,5	29,0	1284,9	57,8	4213,0
14730	Nordsachsen	43,1	3781,8	26,2	1736,9	53,8	5104,0
15081	Altmarkkreis Salzw.	45,2	3276,7	36,0	2182,4	44,9	3240,7
15083	Börde	44,1	5274,5	32,0	3428,2	44,9	5414,9
15084	Burgenlandkreis	39,1	2521,3	27,2	1450,6	42,0	2795,4
15085	Harz	35,6	2215,4	23,0	1124,7	39,7	2647,6
15086	Jerichower Land	44,1	2634,4	32,0	1675,1	46,6	2836,1
15087	Mansfeld-Südharz	33,6	1484,6	24,6	943,8	36,2	1665,9
15088	Saale	41,8	3805,5	26,2	2203,3	44,4	4104,3
15089	Salzlandkreis	44,1	4103,6	32,0	2895,8	41,4	3834,4
15090	Stendal	50,4	5608,0	38,6	3885,5	41,4	4307,7
15091	Wittenberg	45,2	6176,6	39,1	5090,6	45,8	6374,8
16051	Erfurt	37,5	351,3	25,2	198,5	37,9	356,8
16061	Eichsfeld	32,3	25,5	20,0	0,0	60,4	776,6
16062	Nordhausen	44,3	503,8	35,1	277,4	63,7	1127,7
16063	Wartburgkreis	42,0	388,6	31,2	124,6	47,4	633,4
16064	Unstrut-Hainich-Krs	36,6	1252,4	22,2	558,4	56,7	2441,0
16065	Kyffhäuserkreis	30,9	1074,2	17,9	460,5	50,8	2271,2
16066	Schmalkalden-Meinin.	52,9	298,0	39,8	86,7	52,1	396,5
16067	Gotha	40,9	1044,2	26,4	501,4	54,8	1649,2
16068	Sömmerda	33,1	1575,9	17,7	720,6	48,7	2466,0
16069	Hildburghausen	46,4	136,2	34,6	22,0	52,8	347,5
16070	Ilm-Kreis	37,0	282,9	24,3	93,4	52,9	678,6
16071	Weimarer Land	39,6	1270,9	25,0	592,7	49,6	1802,3
16072	Sonneberg	52,9	14,0	42,5	2,9	45,7	23,4
16073	Saalfeld-Rudolstadt	51,7	426,8	38,3	198,8	50,7	495,3

AGS	Kreis/Kreisregion	Hydrosphär. N-Über- schuss 2010-2019		Hydrosphär. N-Über- schuss 2010-2019		N-Überschuss RAUMIS	
		N-Über- schuss	erforderl. Minderung	N-Über- schuss	erforderl. Minderung	N-Über- schuss	erforderl. Minderung
		kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N	kg N ha LF ⁻¹	t N
16074	Saale-Holzland	48,9	800,3	33,9	313,9	60,0	1226,3
16075	Saale-Orla-Kreis	51,7	642,9	38,9	251,9	60,0	978,1
16076	Greiz	58,9	1370,5	45,2	730,9	60,7	1483,5
16077	Altenburger Land	42,6	816,2	26,2	243,9	58,6	1395,3

^a n. Häußermann et al. (2019)

^b n. Zinnbauer et al. (2023), Jahre 2014 - 2016

^c Berechnet mit N-Eintrag aus der gesamten Fläche; zu den 20 Berechnungskombinationen der pot. Nitratkonz. s. Kapitel 4.2.1

A.5 Anhang zu Schutzgut Klima

Tabelle 37: N₂O-Emissionen 2020 (aus der Landwirtschaft und aus sonstigen Quellen), zulässige Emissionsmenge 2030 und erforderliche Verminderung in den Kreisregionen zur Einhaltung der Vorgaben des Klimaschutzgesetzes^a.

AGS	Kreis/Kreisregion	N ₂ O-Emissionen 2020 t N a ⁻¹	davon aus:		Zulässige Emissions- menge 2030 t N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung	
			Landwirt- schaft t N a ⁻¹	Sonstige Quellen t N a ⁻¹		%	t N a ⁻¹
1051	Dithmarschen	443,9	405,5	38,4	362,1	18,4 %	81,8
1053	Herzogtum Lauen- burg	293,8	273,1	20,8	241,0	18,0 %	52,8
1054	Nordfriesland	666,3	643,6	22,7	553,3	17,0 %	113,0
1055	Ostholstein	444,2	393,1	51,1	358,9	19,2 %	85,4
1056	Pinneberg	195,7	152,9	42,8	152,4	22,1 %	43,3
1057	Plön	306,1	293,6	12,5	253,6	17,1 %	52,5
1058	Rendsburg-Eckern- förde	745,5	666,1	79,4	604,0	19,0 %	141,5
1059	Schleswig-Flensburg	735,2	706,1	29,1	609,4	17,1 %	125,8
1060	Segeberg	372,7	341,5	31,2	304,3	18,3 %	68,4
1061	Steinburg	332,0	313,2	18,8	273,6	17,6 %	58,4
1062	Stormarn	241,6	203,5	38,2	192,3	20,4 %	49,3
2000	Hamburg	946,7	536,2	410,5	680,3	28,1 %	266,4
3151	Gifhorn	210,9	192,3	18,6	171,9	18,5 %	38,9
3153	Goslar	104,5	70,2	34,2	78,2	25,2 %	26,3
3154	Helmstadt	335,8	112,6	223,2	219,6	34,6 %	116,2
3155	Northeim	174,8	155,9	18,9	141,5	19,0 %	33,3
3157	Peine	108,5	90,1	18,3	86,0	20,7 %	22,5
3158	Wolfenbüttel	220,6	149,6	70,9	165,4	25,0 %	55,2
3159	Göttingen	239,0	187,9	51,1	186,5	22,0 %	52,5
3241	Region Hannover	422,8	285,7	137,1	316,8	25,1 %	106,0
3251	Diepholz	483,7	454,8	28,9	398,2	17,7 %	85,5
3252	Hameln-Pyrmont	128,4	107,4	21,0	101,9	20,6 %	26,4
3254	Hildesheim	212,0	165,1	46,9	164,9	22,2 %	47,0
3255	Holzminde	86,1	73,2	12,9	68,7	20,2 %	17,4
3256	Nienburg (Weser)	273,5	252,6	20,9	223,9	18,1 %	49,6
3257	Schaumburg	113,5	93,8	19,7	89,8	20,9 %	23,7
3351	Celle	189,1	163,1	26,0	151,6	19,8 %	37,5
3352	Cuxhaven	707,3	668,9	38,4	583,4	17,5 %	123,9
3353	Harburg	199,6	172,5	27,1	160,1	19,8 %	39,5
3354	Lüchow-Dannenberg	160,8	154,4	6,3	133,3	17,1 %	27,5

AGS	Kreis/Kreisregion	N ₂ O-Emissionen 2020 t N a ⁻¹	davon aus:		Zulässige Emissions- menge 2030 t N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung	
			Landwirt- schaft t N a ⁻¹	Sonstige Quellen t N a ⁻¹		%	t N a ⁻¹
3355	Lüneburg	193,7	174,6	19,1	157,3	18,8 %	36,3
3356	Osterholz	165,6	153,3	12,3	135,7	18,1 %	29,9
3357	Rotenburg (Wümme)	509,8	485,8	24,1	421,5	17,3 %	88,3
3358	Heidekreis	241,8	213,4	28,3	195,1	19,3 %	46,6
3359	Stade	316,4	287,3	29,1	257,6	18,6 %	58,8
3360	Uelzen	197,6	181,5	16,1	161,4	18,3 %	36,1
3361	Verden	178,3	163,0	15,3	145,5	18,4 %	32,8
3451	Ammerland	196,7	183,1	13,6	161,4	17,9 %	35,3
3452	Aurich	359,5	325,2	34,3	292,4	18,7 %	67,1
3453	Cloppenburg	504,6	484,8	19,8	418,3	17,1 %	86,3
3454	Emsland	781,9	719,4	62,5	639,3	18,2 %	142,6
3455	Friesland	301,6	186,2	115,4	221,0	26,7 %	80,6
3456	Grafschaft Bentheim	321,7	286,6	35,0	260,4	19,0 %	61,3
3457	Leer	307,3	285,1	22,2	251,9	18,0 %	55,4
3458	Oldenburg	354,5	314,5	39,9	286,6	19,2 %	67,9
3459	Osnabrück	570,2	487,6	82,6	455,9	20,1 %	114,4
3460	Vechta	342,6	319,9	22,7	281,4	17,9 %	61,2
3461	Wesermarsch	251,5	233,7	17,7	206,3	18,0 %	45,2
3462	Wittmund	173,8	166,3	7,5	143,9	17,2 %	29,9
4011	Bremen	313,0	168,3	144,7	222,4	28,9 %	90,6
5112	Duisburg, Essen, Mühlheim, Oberh.	185,6	25,6	160,0	111,1	40,1 %	74,5
5124	Wuppertal	104,0	18,5	85,5	63,4	39,0 %	40,6
5154	Kleve	334,9	290,0	44,9	268,7	19,8 %	66,2
5158	Mettmann	197,5	42,5	154,9	122,5	38,0 %	75,0
5162	Neuss	182,4	77,5	105,0	123,9	32,1 %	58,6
5166	Viersen	210,6	99,0	111,6	145,6	30,8 %	64,9
5170	Wesel	253,9	179,4	74,4	192,4	24,2 %	61,5
5334	Städteregion Aachen	138,0	63,3	74,7	95,0	31,2 %	43,0
5358	Düren	163,0	107,1	55,9	121,3	25,6 %	41,7
5362	Rhein-Erft-Kreis	309,9	79,5	230,5	195,8	36,8 %	114,1
5366	Euskirchen	177,9	136,0	41,9	137,7	22,6 %	40,2
5370	Heinsberg	135,7	101,0	34,7	104,2	23,2 %	31,4
5374	Oberbergischer Kreis	138,2	106,3	31,9	107,2	22,5 %	31,1
5378	Rheinisch-Berg.-Kreis	157,6	48,3	109,3	101,8	35,4 %	55,8

AGS	Kreis/Kreisregion	N ₂ O-Emissionen 2020 t N a ⁻¹	davon aus:		Zulässige Emissions- menge 2030 t N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung	
			Landwirt- schaft t N a ⁻¹	Sonstige Quellen t N a ⁻¹		%	t N a ⁻¹
5382	Rhein-Sieg	220,6	122,3	98,2	157,8	28,5 %	62,8
5515	Münster	79,0	44,7	34,4	56,8	28,2 %	22,3
5554	Borken	441,5	392,8	48,6	357,2	19,1 %	84,3
5558	Coesfeld	276,1	248,6	27,5	224,2	18,8 %	51,9
5562	Recklingshausen	273,5	105,4	168,1	182,6	33,2 %	90,8
5566	Steinfurt	444,0	375,1	68,9	353,7	20,3 %	90,3
5570	Warendorf	320,3	283,5	36,7	258,7	19,2 %	61,5
5711	Bielefeld	53,8	21,7	32,2	36,2	32,7 %	17,6
5754	Gütersloh	234,3	189,1	45,2	184,1	21,4 %	50,1
5758	Herford	107,1	65,0	42,1	78,2	27,0 %	28,9
5762	Höxter	193,7	173,6	20,2	157,1	18,9 %	36,6
5766	Lippe	233,4	147,2	86,2	171,9	26,3 %	61,5
5770	Minden-Lübbecke	227,6	187,5	40,1	179,9	20,9 %	47,6
5774	Paderborn	219,9	184,1	35,8	174,7	20,6 %	45,2
5913	Dortmund	136,0	20,5	115,5	81,9	39,8 %	54,1
5954	Ennepe-Ruhr	115,4	45,5	69,9	77,3	33,0 %	38,0
5958	Hochsauerlandkreis	217,7	173,2	44,5	170,4	21,7 %	47,3
5962	Märkischer Kreis	147,7	87,1	60,6	107,1	27,5 %	40,6
5966	Olpe	70,2	47,3	22,9	52,6	25,2 %	17,7
5970	Siegen-Wittgenstein	102,2	53,6	48,6	72,2	29,3 %	30,0
5974	Soest	245,0	204,3	40,6	194,4	20,6 %	50,6
5978	Unna	211,4	109,1	102,3	148,9	29,6 %	62,5
6431	Bergstraße	89,5	59,6	30,0	66,8	25,4 %	22,7
6432	Darmstadt-Dieburg	129,0	69,0	60,0	91,6	29,0 %	37,4
6433	Groß-Gerau	73,6	36,5	37,1	51,4	30,1 %	22,2
6434	Hochtaunuskreis	49,6	29,0	20,6	35,9	27,6 %	13,7
6435	Main-Kinzig-Kreis	179,7	120,6	59,1	134,4	25,2 %	45,3
6436	Main-Taunus-Kreis	223,1	42,2	180,9	136,8	38,7 %	86,4
6437	Odenwaldkreis	66,1	51,3	14,8	51,4	22,3 %	14,7
6438	Offenbach	84,9	18,6	66,3	52,7	37,9 %	32,2
6439	Rheingau-Taunus-Kreis	66,4	44,7	21,6	49,7	25,1 %	16,7
6440	Wetteraukreis	164,6	124,1	40,5	126,9	22,9 %	37,7
6531	Gießen	134,6	81,4	53,3	98,2	27,1 %	36,5
6532	Lahn-Dill-Kreis	105,1	66,4	38,7	77,5	26,3 %	27,7

AGS	Kreis/Kreisregion	N ₂ O-Emissionen 2020 t N a ⁻¹	davon aus:		Zulässige Emissions- menge 2030 t N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung	
			Landwirt- schaft t N a ⁻¹	Sonstige Quellen t N a ⁻¹		%	t N a ⁻¹
6533	Limburg-Weilburg	97,2	76,6	20,6	75,9	21,9 %	21,3
6534	Marburg-Biedenkopf	157,0	125,2	31,8	123,0	21,7 %	34,0
6535	Vogelsbergkreis	187,1	168,9	18,2	152,1	18,7 %	35,0
6631	Fulda	241,7	176,8	64,9	184,8	23,5 %	56,8
6632	Hersfeld-Rotenburg	130,3	100,4	29,8	101,1	22,4 %	29,2
6633	Kassel	207,9	130,6	77,2	153,0	26,4 %	54,9
6634	Schwalm-Eder-Kreis	198,8	175,6	23,3	160,5	19,3 %	38,3
6635	Waldeck-Franken- berg	219,1	193,4	25,7	176,9	19,3 %	42,2
6636	Werra-Meißner-Kreis	111,8	93,5	18,3	88,8	20,6 %	23,0
7131	Ahrweiler	77,8	53,9	23,9	58,6	24,6 %	19,1
7132	Altenkirchen	66,8	51,5	15,3	51,8	22,4 %	15,0
7133	Bad Kreuznach	98,0	71,5	26,5	74,9	23,6 %	23,1
7134	Birkenfeld	63,9	53,5	10,4	50,8	20,6 %	13,1
7135	Cochem-Zell	60,7	53,4	7,2	48,9	19,3 %	11,7
7137	Mayen-Koblenz	154,7	87,5	67,3	111,1	28,2 %	43,6
7138	Neuwied	78,8	49,0	29,8	57,9	26,6 %	20,9
7140	Rhein-Hunsrück- Kreis	109,1	89,7	19,4	86,2	21,0 %	22,9
7141	Rhein-Lahn-Kreis	82,1	64,0	18,1	63,9	22,2 %	18,2
7143	Westerwaldkreis	120,3	87,1	33,2	91,8	23,7 %	28,5
7231	Bernkastel-Wittlich	109,8	95,9	13,9	88,4	19,5 %	21,5
7232	Eifelkreis Bitburg- Prüm	262,6	244,6	18,0	215,6	17,9 %	47,0
7233	Vulkaneifel	111,1	96,7	14,4	89,3	19,6 %	21,8
7235	Trier-Saarburg	129,1	98,7	30,4	99,9	22,6 %	29,2
7331	Alzey-Worms	143,2	86,0	57,2	104,3	27,2 %	38,9
7332	Bad-Dürkheim	63,4	40,0	23,4	46,7	26,3 %	16,7
7333	Donnersbergkreis	78,9	67,7	11,2	63,2	20,0 %	15,8
7334	Germersheim	52,7	32,6	20,1	38,7	26,7 %	14,1
7335	Kaiserslautern	89,3	51,1	38,2	64,3	28,0 %	25,0
7336	Kusel	68,8	60,0	8,8	55,3	19,6 %	13,5
7337	Südliche Weinstraße	73,6	48,8	24,7	54,9	25,4 %	18,7
7338	Rhein-Pfalz	878,2	37,5	840,7	502,3	42,8 %	375,9
7339	Mainz-Bingen	132,2	66,9	65,3	92,8	29,8 %	39,4
7340	Südwestpfalz	103,7	69,4	34,2	77,5	25,2 %	26,2

AGS	Kreis/Kreisregion	N ₂ O-Emissionen 2020 t N a ⁻¹	davon aus:		Zulässige Emissions- menge 2030 t N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung	
			Landwirt- schaft t N a ⁻¹	Sonstige Quellen t N a ⁻¹		%	t N a ⁻¹
8115	Böblingen	111,4	55,4	55,9	77,9	30,1 %	33,5
8116	Esslingen	120,9	54,7	66,2	83,0	31,3 %	37,9
8117	Göppingen	128,8	83,1	45,7	95,4	25,9 %	33,4
8118	Ludwigsburg. Landkr.	242,3	90,5	151,8	161,0	33,5 %	81,3
8119	Rems-Murr-Kreis	124,4	80,7	43,7	92,2	25,8 %	32,1
8125	Heilbronn	183,6	122,7	60,9	137,2	25,3 %	46,4
8126	Hohenlohekreis	125,8	110,3	15,5	101,3	19,5 %	24,5
8127	Schwäbisch Hall	299,9	238,8	61,0	234,8	21,7 %	65,1
8128	Main-Tauber-Kreis	168,2	150,0	18,2	136,2	19,0 %	32,0
8135	Heidenheim	101,4	68,6	32,7	76,0	25,0 %	25,4
8136	Ostalbkreis	244,7	193,3	51,3	191,1	21,9 %	53,5
8215	Karlsruhe	211,4	89,8	121,6	143,5	32,1 %	67,9
8216	Rastatt	87,0	43,8	43,3	61,0	29,9 %	26,0
8225	Neckar-Odenwald- Kreis	138,8	109,4	29,4	108,3	21,9 %	30,4
8226	Rhein-Neckar	276,4	98,2	178,3	182,3	34,1 %	94,1
8235	Calw	65,8	48,3	17,5	50,4	23,5 %	15,4
8236	Enzkreis	100,8	53,7	47,1	71,5	29,1 %	29,3
8237	Freudenstadt	76,3	54,1	22,2	57,9	24,1 %	18,4
8315	Breisgau-Hochschw.	195,9	122,1	73,8	143,9	26,5 %	52,0
8316	Emmendingen	78,5	59,6	18,9	60,6	22,8 %	17,9
8317	Ortenaukreis	219,5	138,2	81,3	161,6	26,4 %	57,9
8325	Rottweil	110,1	80,3	29,8	84,2	23,6 %	26,0
8326	Schwarzwald-Baar- Krs.	133,7	104,6	29,1	104,1	22,1 %	29,5
8327	Tuttlingen	85,6	64,7	20,9	66,0	22,8 %	19,5
8335	Konstanz	128,8	95,7	33,1	98,9	23,2 %	29,9
8336	Lörrach	89,5	56,7	32,8	66,0	26,3 %	23,5
8337	Waldshut	129,3	105,7	23,6	102,0	21,1 %	27,3
8415	Reutlingen	153,1	112,9	40,2	117,4	23,4 %	35,8
8416	Tübingen	90,1	48,9	41,3	64,2	28,8 %	26,0
8417	Zollernalbkreis	104,3	79,3	25,0	80,6	22,7 %	23,7
8425	Alb-Donau-Kreis	286,8	223,5	63,3	223,2	22,2 %	63,6
8426	Biberach	267,4	239,7	27,8	216,9	18,9 %	50,6
8435	Bodenseekreis	130,6	83,9	46,6	96,6	26,0 %	34,0
8436	Ravensburg	336,8	303,6	33,1	273,6	18,8 %	63,2

AGS	Kreis/Kreisregion	N ₂ O-Emissionen 2020 t N a ⁻¹	davon aus:		Zulässige Emissions- menge 2030 t N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung	
			Landwirt- schaft t N a ⁻¹	Sonstige Quellen t N a ⁻¹		%	t N a ⁻¹
8437	Sigmaringen	170,2	150,0	20,2	137,3	19,3 %	32,9
9171	Altötting	174,5	97,6	76,9	125,1	28,3 %	49,5
9172	Berchtesgadener Land	74,5	60,1	14,4	58,5	21,4 %	15,9
9173	Bad Tölz-Wolfrats- hausen	103,2	85,3	17,9	81,7	20,9 %	21,5
9174	Dachau	113,0	97,6	15,4	90,6	19,8 %	22,4
9175	Ebersberg	97,4	81,4	16,0	77,3	20,6 %	20,1
9176	Eichstätt	177,0	130,7	46,3	135,7	23,3 %	41,3
9177	Erding	203,1	187,0	16,0	166,1	18,2 %	37,0
9178	Freising	201,2	110,2	91,0	143,5	28,7 %	57,7
9179	Fürstenfeldbruck	91,3	55,1	36,1	66,6	27,1 %	24,7
9180	Garmisch-Partenkir- chen	54,4	41,8	12,6	42,2	22,5 %	12,2
9181	Landsberg am Lech	122,3	106,1	16,3	98,2	19,7 %	24,1
9182	Miesbach	85,4	71,9	13,5	68,0	20,4 %	17,5
9183	Mühldorf a. Inn	179,9	161,3	18,6	145,9	18,9 %	34,0
9184	München (mit Mün- chen)	222,7	53,5	169,2	139,7	37,3 %	83,0
9185	Neuburg-Schroben- hsn.	137,2	99,3	37,9	104,6	23,7 %	32,6
9186	Pfaffenhofen a.d. Ilm	126,9	94,8	32,1	97,6	23,1 %	29,3
9187	Rosenheim	296,3	237,1	59,2	232,3	21,6 %	64,0
9188	Starnberg	51,1	38,2	12,9	39,3	23,1 %	11,8
9189	Traunstein	239,5	208,4	31,1	192,5	19,6 %	47,0
9190	Weilheim-Schongau	175,5	143,9	31,7	138,6	21,1 %	37,0
9271	Deggendorf	125,2	109,5	15,7	100,8	19,5 %	24,4
9272	Freyung-Grafenau	99,3	89,0	10,3	80,5	18,9 %	18,8
9273	Kelheim	133,6	112,3	21,3	106,3	20,5 %	27,3
9274	Landshut	272,1	241,9	30,2	220,1	19,1 %	52,0
9275	Passau	270,4	241,9	28,5	219,2	19,0 %	51,3
9276	Regen	92,5	80,1	12,4	74,2	19,8 %	18,3
9277	Rottal-Inn	257,8	241,3	16,5	212,0	17,8 %	45,9
9278	Straubing-Bogen	199,9	175,0	24,9	160,9	19,5 %	39,0
9279	Dingolfing-Landau	157,1	141,5	15,7	127,6	18,8 %	29,5
9371	Amberg-Sulzbach	164,7	139,3	25,4	131,2	20,3 %	33,4
9372	Cham	222,4	206,8	15,7	182,5	18,0 %	40,0

AGS	Kreis/Kreisregion	N ₂ O-Emissionen 2020 t N a ⁻¹	davon aus:		Zulässige Emissions- menge 2030 t N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung	
			Landwirt- schaft t N a ⁻¹	Sonstige Quellen t N a ⁻¹		%	t N a ⁻¹
9373	Neumarkt i.d. OPf.	175,0	150,0	25,1	140,0	20,0 %	35,0
9374	Neustadt a.d. Wald- naab	177,6	154,4	23,1	142,7	19,6 %	34,9
9375	Regensburg	208,0	169,0	39,0	163,8	21,2 %	44,2
9376	Schwandorf	193,1	168,6	24,5	155,3	19,6 %	37,8
9377	Tirschenreuth	138,2	127,7	10,5	113,1	18,1 %	25,0
9471	Bamberg	152,9	118,8	34,1	118,9	22,2 %	34,0
9472	Bayreuth	174,2	145,1	29,1	138,2	20,7 %	36,0
9473	Coburg	100,9	79,9	21,0	78,9	21,8 %	22,0
9474	Forchheim	82,9	65,9	17,1	64,9	21,8 %	18,0
9475	Hof	148,8	124,5	24,4	118,2	20,6 %	30,6
9476	Kronach	61,5	42,5	19,0	46,4	24,7 %	15,2
9477	Kulmbach	86,1	73,8	12,2	68,9	20,0 %	17,2
9478	Lichtenfels	65,8	55,1	10,7	52,3	20,5 %	13,5
9479	Wunsiedel Fichtel- geb.	76,7	59,9	16,8	59,7	22,1 %	17,0
9571	Ansbach	375,7	341,7	34,1	306,1	18,5 %	69,7
9572	Erlangen-Höchststadt	100,8	57,4	43,4	72,5	28,1 %	28,3
9573	Fürth	71,3	48,9	22,4	53,6	24,8 %	17,7
9574	Nürnberger-Land	153,0	68,0	85,0	104,7	31,5 %	48,3
9575	Neustadt a.d. Aisch- W.	206,1	191,9	14,1	169,1	17,9 %	36,9
9576	Roth	123,5	95,7	27,8	96,0	22,3 %	27,6
9577	Weißenburg-Gun- zenh.	154,3	140,2	14,0	125,7	18,5 %	28,6
9671	Aschaffenburg	92,1	43,8	48,3	63,8	30,7 %	28,3
9672	Bad Kissingen	105,4	87,4	18,0	83,5	20,8 %	21,9
9673	Rhön-Grabfeld	114,3	101,3	13,1	92,4	19,2 %	22,0
9674	Haßberge	110,7	98,2	12,5	89,5	19,2 %	21,2
9675	Kitzingen	106,2	88,6	17,6	84,3	20,6 %	21,9
9676	Miltenberg	68,4	43,9	24,5	50,6	26,0 %	17,8
9677	Main-Spessart	104,7	85,1	19,5	82,4	21,2 %	22,2
9678	Schweinfurt	130,8	101,2	29,6	101,6	22,3 %	29,2
9679	Würzburg	170,8	125,4	45,4	130,8	23,4 %	40,0
9771	Aichach-Friedberg	153,3	132,2	21,1	122,8	19,8 %	30,4
9772	Augsburg	231,7	152,9	78,8	172,5	25,5 %	59,1

AGS	Kreis/Kreisregion	N ₂ O-Emissionen 2020 t N a ⁻¹	davon aus:		Zulässige Emissions- menge 2030 t N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung	
			Landwirt- schaft t N a ⁻¹	Sonstige Quellen t N a ⁻¹		%	t N a ⁻¹
9773	Dillingen a.d. Donau	146,4	134,8	11,6	119,8	18,2 %	26,7
9774	Günzburg	134,7	114,1	20,6	107,4	20,3 %	27,3
9775	Neu-Ulm	100,9	69,6	31,3	76,0	24,7 %	24,9
9776	Lindau (Bodensee)	63,8	54,9	8,9	51,1	19,9 %	12,7
9777	Ostallgäu	282,2	247,1	35,1	227,2	19,5 %	55,0
9778	Unterallgäu	293,3	263,8	29,5	238,1	18,8 %	55,2
9779	Donau-Ries	231,5	207,7	23,8	187,8	18,9 %	43,7
9780	Oberallgäu	229,8	172,8	57,0	177,1	22,9 %	52,7
10041	Regionalv. Saarbrücken	59,6	14,8	44,7	37,5	37,0 %	22,1
10042	Merzig-Wadern	60,9	45,2	15,7	46,7	23,2 %	14,1
10043	Neunkirchen	38,5	18,2	20,3	26,6	30,8 %	11,9
10044	Saarlouis	72,5	34,6	37,9	50,3	30,6 %	22,2
10045	Saarpfalz-Kreis	52,0	30,1	21,9	37,5	27,8 %	14,4
10046	St. Wendel	50,5	39,4	11,0	39,3	22,1 %	11,2
11000	Berlin	438,8	32,1	406,7	254,7	42,0 %	184,1
12060	Barnim	132,6	108,0	24,7	104,5	21,2 %	28,1
12061	Dahme-Spreewald	221,1	190,4	30,7	177,1	19,9 %	44,0
12062	Elbe-Elster	223,9	205,7	18,2	183,0	18,3 %	40,9
12063	Havelland	225,7	197,2	28,5	181,6	19,5 %	44,1
12064	Märkisch-Oderland	291,3	259,8	31,5	235,9	19,0 %	55,4
12065	Oberhavel	180,0	155,3	24,7	144,3	19,8 %	35,7
12066	Oberspreewald-Lausitz	131,5	90,4	41,1	99,0	24,7 %	32,5
12067	Oder-Spree	242,1	190,4	51,6	188,9	22,0 %	53,2
12068	Ostprignitz-Ruppin	319,9	279,6	40,4	257,4	19,5 %	62,5
12069	Potsdam-Mittelmark	337,6	253,9	83,6	260,1	22,9 %	77,4
12070	Prignitz	319,8	305,9	13,9	264,8	17,2 %	55,1
12071	Spree-Neiße	336,0	133,9	202,1	225,6	32,8 %	110,3
12072	Teltow-Fläming	248,6	202,9	45,7	196,0	21,1 %	52,6
12073	Uckermark	406,5	378,2	28,3	333,5	18,0 %	73,0
13071	Mecklenb. Seenpl.	620,9	558,6	62,3	504,1	18,8 %	116,8
13072	Rostock	1034,8	503,4	531,4	720,4	30,4 %	314,3
13073	Vorpommern-Rügen	458,0	431,4	26,6	377,2	17,6 %	80,7
13074	Nordwestmecklenburg	418,5	395,7	22,8	345,2	17,5 %	73,3

AGS	Kreis/Kreisregion	N ₂ O-Emissionen 2020 t N a ⁻¹	davon aus:		Zulässige Emissions- menge 2030 t N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung	
			Landwirt- schaft t N a ⁻¹	Sonstige Quellen t N a ⁻¹		%	t N a ⁻¹
13075	Vorpommern-Greifswald	553,2	469,2	84,0	441,2	20,2 %	112,0
13076	Ludwigslust-Parchim	646,6	579,9	66,8	524,5	18,9 %	122,2
14521	Erzgebirgskreis	196,3	130,9	65,5	146,6	25,3 %	49,7
14522	Mittelsachsen	287,4	230,0	57,5	225,4	21,6 %	62,1
14523	Vogtlandkreis	159,7	132,0	27,7	126,4	20,9 %	33,3
14524	Zwickau	138,3	95,6	42,7	104,2	24,6 %	34,1
14625	Bautzen	234,3	183,4	50,9	182,6	22,1 %	51,7
14626	Görlitz	299,4	165,0	134,4	213,8	28,6 %	85,5
14627	Meißen	199,8	163,2	36,6	157,6	21,1 %	42,2
14628	Sächs. Schweiz- Osterzgeb.	261,6	153,5	108,1	189,4	27,6 %	72,1
14729	Leipzig	380,8	195,0	185,8	267,8	29,7 %	113,0
14730	Nordsachsen	270,6	225,1	45,5	214,6	20,7 %	56,0
15081	Altmarkkreis Salzw.	334,8	309,6	25,2	274,2	18,1 %	60,6
15083	Börde	455,3	373,8	81,5	359,6	63,6 %	95,7
15084	Burgenlandkreis	326,2	213,5	112,7	242,5	25,7 %	83,7
15085	Harz	266,0	226,0	40,0	212,2	20,2 %	53,8
15086	Jerichower Land	279,9	229,8	50,1	221,1	77,6 %	58,8
15087	Mansfeld-Südharz	201,7	175,5	26,2	162,1	19,6 %	39,6
15088	Saale	331,6	233,4	98,1	251,0	24,3 %	80,5
15089	Salzlandkreis	253,2	207,9	45,3	200,0	79,8 %	53,2
15090	Stendal	370,3	348,3	22,0	304,9	17,7 %	65,4
15091	Wittenberg	568,5	422,0	146,5	436,5	23,2 %	132,0
16051	Erfurt	51,2	27,4	23,8	36,3	29,0 %	14,8
16061	Eichsfeld	129,1	107,7	21,4	102,4	20,6 %	26,6
16062	Nordhausen	91,0	79,7	11,3	73,3	19,5 %	17,7
16063	Wartburgkreis	178,2	133,2	45,0	137,1	23,1 %	41,1
16064	Unstrut-Hainich-Krs	145,9	127,5	18,4	117,4	19,5 %	28,5
16065	Kyffhäuserkreis	132,8	123,8	9,1	109,1	17,9 %	23,8
16066	Schmalkalden-Meinin- gen	122,7	106,3	16,5	98,5	19,8 %	24,2
16067	Gotha	120,3	104,1	16,2	96,5	19,8 %	23,8
16068	Sömmerda	129,8	117,0	12,8	105,4	18,8 %	24,4
16069	Hildburghausen	106,3	87,4	18,9	84,0	21,0 %	22,3
16070	Ilm-Kreis	87,4	70,1	17,3	68,6	21,5 %	18,8

AGS	Kreis/Kreisregion	N ₂ O- Emissionen 2020 t N a ⁻¹	davon aus:		Zulässige Emissions- menge 2030 t N a ⁻¹	Erforderliche Verminderung	
			Landwirt- schaft t N a ⁻¹	Sonstige Quellen t N a ⁻¹		%	t N a ⁻¹
16071	Weimarer Land	143,4	118,9	24,5	113,6	20,8 %	29,8
16072	Sonneberg	33,7	25,4	8,3	26,0	22,9 %	7,7
16073	Saalfeld-Rudolstadt	91,5	77,1	14,4	72,8	20,4 %	18,7
16074	Saale-Holzland	138,7	100,3	38,4	105,7	23,8 %	33,0
16075	Saale-Orla-Kreis	142,7	124,3	18,4	114,7	19,6 %	28,0
16076	Greiz	150,7	128,3	22,4	120,3	20,2 %	30,4
16077	Altenburger Land	92,5	81,6	11,0	74,7	19,3 %	17,9

^a Sektor-spezifische THG-Minderungsziele des Klimaschutzgesetzes i. d. Fassung vom 24.06.2021, verteilt auf die THG-Komponenten CO₂, CH₄ und N₂O

A.6 Anhang zu Schutzgut Vegetation

Tabelle 38: Flechten- und Moosarten (Kryptogamenarten) und zugehörige Pflanzengesellschaften, deren Critical Level für Ammoniakkonzentration $1 \mu\text{g m}^{-3}$ entspricht.

Art	Pflanzengesellschaft	BERN_ID ^a	[N] _{crit} BERN4 ^b [mg N L ⁻¹]
<i>Cladonia strepsilis</i>	Leucobryo-Pinetum sylvestris (typ. Subass.) MATUSZ. 1962	2048	0,777
<i>Cladonia mitis</i>	Vaccinio myrtilli-Fagetum sylvatici (typ. Subass.) PASS. 1965	2133	0,330
<i>Cladonia mitis</i>	Vaccinio myrtilli-Fagetum sylvatici (Mnium-Subass.) PASS. 1965	2134	0,330
<i>Cladonia mitis</i>	Dicrano-Fagetum sylvatici PASS. et HOFM. 1965	2140	0,330
<i>Cladonia arbuscula</i>	Cladonio-Pinetum sylvestris (typ. Subass.) PASS. 1956	2150	0,110
<i>Cladonia rangiferina</i>	Cladonio-Pinetum sylvestris (typ. Subass.) PASS. 1956	2150	0,110
<i>Cladonia furcata</i>	Festuco ovinae-Pinetum sylvestris JURASZEK 1928	2152	0,039
<i>Cladonia arbuscula</i>	Corynephoro-Pinetum sylvestris (JURASZEK 1928) HOFMANN 1964	2156	0,110
<i>Cladonia rangiferina</i>	Corynephoro-Pinetum sylvestris (JURASZEK 1928) HOFMANN 1964	2156	0,110
<i>Cladonia sylvatica</i>	Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvaticae PASS. 1956	2160	0,635
<i>Pycnothelia papillaria</i>	Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvaticae PASS. 1956	2160	0,635
<i>Stereocaulon condensatum</i>	Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvaticae PASS. 1956	2160	0,635
<i>Cladonia squarrosa</i>	Genisto anglicae-Callunetum vulgaris SCHWICK. 1933 em. TX. 1937	4771	0,838
<i>Cladonia rangiferina</i>	Narduretum lachenalii KORNECK 1975	5037	2,487
<i>Cladonia alcicornis</i>	Genisto pilosae-Callunetum OBERD. 1938	5050	1,193
<i>Cetraria islandica</i>	Empetro hermaphroditi-Vaccinietum uliginosi BR.-BL. in BR.-BL. in JENNY 1926	5063	0,110
<i>Cladonia arbuscula</i>	Empetro hermaphroditi-Vaccinietum uliginosi BR.-BL. in BR.-BL. in JENNY 1926	5063	0,110
<i>Cladonia gracilis</i>	Empetro hermaphroditi-Vaccinietum uliginosi BR.-BL. in BR.-BL. in JENNY 1926	5063	0,110
<i>Cladonia rangiferina</i>	Empetro hermaphroditi-Vaccinietum uliginosi BR.-BL. in BR.-BL. in JENNY 1926	5063	0,110
<i>Cladonia squarrosa</i>	Teesdalia-Sperguletum vernalis TX. 1955	5601	0,777
<i>Cladonia mitis</i>	Dicrano-Cultopiceetum SCHUBERT 1972	6111	0,134
<i>Sphagnum capillifolium</i>	Sphagno-Piceetum KUOCH 1954	2044	0,091
<i>Sphagnum girgensohnii</i>	Sphagno-Piceetum KUOCH 1954	2044	0,091
<i>Sphagnum magellanicum</i>	Sphagno-Piceetum KUOCH 1954	2044	0,091
<i>Sphagnum palustre</i>	Sphagno-Piceetum KUOCH 1954	2044	0,091
<i>Dicranum scoparium</i>	Vaccinio-Abietetum (typ. Subass.) OBERDORFER 1957	2046	0,128
<i>Hylocomium splendens</i>	Vaccinio-Abietetum (typ. Subass.) OBERDORFER 1957	2046	0,128
<i>Pleurozium schreberi</i>	Vaccinio-Abietetum (typ. Subass.) OBERDORFER 1957	2046	0,128
<i>Pohlia nutans</i>	Vaccinio-Abietetum (typ. Subass.) OBERDORFER 1957	2046	0,128

Art	Pflanzengesellschaft	BERN_ID ^a	[N] _{crit} BERN4 ^b [mg N L ⁻¹]
<i>Polytrichum formosum</i>	Vaccinio-Abietetum (typ. Subass.) OBERDORFER 1957	2046	0,128
<i>Leucobryum glaucum</i>	Leucobryo-Pinetum sylvestris (Molinia-Subass.) MATUSZ. 1962	2047	0,131
<i>Leucobryum glaucum</i>	Leucobryo-Pinetum sylvestris (typ. Subass.) MATUSZ. 1962	2048	0,777
<i>Sphagnum girgensohnii</i>	Vaccinio uliginosi-Piceetum HARTM. 1953	2059	0,030
<i>Sphagnum russowii</i>	Vaccinio uliginosi-Piceetum HARTM. 1953	2059	0,030
<i>Leucobryum glaucum</i>	Carici piluliferae-Fagetum sylvatici (typ. Subass.) PASS. 1956	2130	0,132
<i>Leucobryum glaucum</i>	Vaccinio myrtilli-Fagetum sylvatici (typ. Subass.) PASS. 1965	2133	0,330
<i>Leucobryum glaucum</i>	Vaccinio myrtilli-Fagetum sylvatici (Mnium-Subass.) PASS. 1965	2134	0,330
<i>Leucobryum glaucum</i>	Dicrano-Fagetum sylvatici PASS. et HOFM. 1965	2140	0,330
<i>Dicranum scoparium</i>	Dicrano-Fagetum sylvatici PASS. et HOFM. 1965	2140	0,330
<i>Mnium hornum</i>	Dicrano-Fagetum sylvatici PASS. et HOFM. 1965	2140	0,330
<i>Pohlia nutans</i>	Dicrano-Fagetum sylvatici PASS. et HOFM. 1965	2140	0,330
<i>Polytrichum formosum</i>	Dicrano-Fagetum sylvatici PASS. et HOFM. 1965	2140	0,330
<i>Dicranum scoparium</i>	Cladonio-Pinetum sylvestris (typ. Subass.) PASS. 1956	2150	0,110
<i>Dicranum spurium</i>	Cladonio-Pinetum sylvestris (typ. Subass.) PASS. 1956	2150	0,110
<i>Pleurozium schreberi</i>	Cladonio-Pinetum sylvestris (typ. Subass.) PASS. 1956	2150	0,110
<i>Dicranum scoparium</i>	Festuco ovinae-Pinetum sylvestris JURASZEK 1928	2152	0,039
<i>Hypnum cupressiforme</i>	Festuco ovinae-Pinetum sylvestris JURASZEK 1928	2152	0,039
<i>Ptilidium ciliare</i>	Festuco ovinae-Pinetum sylvestris JURASZEK 1928	2152	0,039
<i>Polytrichum piliferum</i>	Corynephoru-Pinetum sylvestris (JURASZEK 1928) HOFMANN 1964	2156	0,110
<i>Dicranum scoparium</i>	Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvaticae PASS. 1956	2160	0,635
<i>Dicranum undulatum</i>	Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvaticae PASS. 1956	2160	0,635
<i>Hypnum cupressiforme</i>	Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvaticae PASS. 1956	2160	0,635
<i>Pleurozium schreberi</i>	Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvaticae PASS. 1956	2160	0,635
<i>Sphagnum molle</i>	Eriophoro-Betuletum pubescentis HUECK 1925 em. PASSARGE 1968	2190	0,038
<i>Sphagnum palustre</i>	Eriophoro-Betuletum pubescentis HUECK 1925 em. PASSARGE 1968	2190	0,038
<i>Sphagnum palustre</i>	Sphagno-Betuletum pubescentis DOING 1962	2202	0,038
<i>Sphagnum recurvum</i>	Sphagno-Betuletum pubescentis DOING 1962	2202	0,038
<i>Leucobryum glaucum</i>	Molinio-Fagetum sylvatici SCAM. 1959	2230	0,385
<i>Leucobryum glaucum</i>	Dicrano-Quercetum (roboris) PASS. 1963	2340	0,272
<i>Leucobryum glaucum</i>	Betulo-Quercetum petraeae (GAUME 1924) TX. 1937	2401	0,238
<i>Pleurozium schreberi</i>	Pyrolo-Pinetum sylvestris (LIBBERT 1933) SCHMID 1936	2510	0,299
<i>Barbilophozia attenuata</i>	Athyrio alpestris-Piceetum HARTMANN 1959	2511	0,848
<i>Cicerbita alpina</i>	Athyrio alpestris-Piceetum HARTMANN 1959	2511	0,848
<i>Polytrichum commune</i>	Carici-Nardetum strictae PASS. 1964	4730	0,635

Art	Pflanzengesellschaft	BERN_ID ^a	[N] _{crit} BERN4 ^b [mg N L ⁻¹]
<i>Dicranum scoparium</i>	Genisto anglicae-Callunetum vulgaris SCHWICK. 1933 em. TX. 1937	4771	0,838
<i>Dicranum undulatum</i>	Genisto anglicae-Callunetum vulgaris SCHWICK. 1933 em. TX. 1937	4771	0,838
<i>Pleurozium schreberi</i>	Genisto anglicae-Callunetum vulgaris SCHWICK. 1933 em. TX. 1937	4771	0,838
<i>Polytrichum piliferum</i>	Genisto anglicae-Callunetum vulgaris SCHWICK. 1933 em. TX. 1937	4771	0,838
<i>Sphagnum compactum</i>	Ericetum tetralicis TÜXEN 1937	4778	0,587
<i>Sphagnum molle</i>	Ericetum tetralicis TÜXEN 1937	4778	0,587
<i>Sphagnum recurvum</i>	Sphagno-Caricetum lasiocarpae STEFFEN em. KOCH 1931	5012	0,670
<i>Sphagnum recurvum</i>	Sphagno-Caricetum canescentis PASS. 1964	5028	0,635
<i>Aulacomnium palustre</i>	Sphagno-Caricetum canescentis PASS. 1964	5028	0,635
<i>Sphagnum subsecundum</i>	Willemetio-Caricetum fuscae PHIL. 1963	5032	0,674
<i>Polytrichum piliferum</i>	Genisto pilosae-Callunetum OBERD. 1938	5050	1,193
<i>Sphagnum magellanicum</i>	Erico-Sphagnetum magellanicum (OSVALD 1923) MOORE 1968	5060	0,464
<i>Sphagnum recurvum</i>	Erico-Sphagnetum magellanicum (OSVALD 1923) MOORE 1968	5060	0,464
<i>Polytrichum piliferum</i>	Teesdalia-Sperguletum vernalis TX. 1955	5601	0,777
<i>Dicranum polysetum</i>	Vaccinio myrtilli-Cultopinetum HOFMANN 2002	6009	0,078
<i>Hypnum cupressiforme</i>	Vaccinio myrtilli-Cultopinetum HOFMANN 2002	6009	0,078
<i>Pleurozium schreberi</i>	Vaccinio myrtilli-Cultopinetum HOFMANN 2002	6009	0,078
<i>Hypnum cupressiforme</i>	Molinio-Cultopinetum HOFMANN 1964	6015	0,157
<i>Pleurozium schreberi</i>	Molinio-Cultopinetum HOFMANN 1964	6015	0,157
<i>Leucobryum glaucum</i>	Dicrano-Cultopinetum HOFMANN 2002	6042	0,078
<i>Dicranum montanum</i>	Dicrano-Cultopinetum HOFMANN 2002	6042	0,078
<i>Dicranum scoparium</i>	Dicrano-Cultopinetum HOFMANN 2002	6042	0,078
<i>Hypnum cupressiforme</i>	Dicrano-Cultopinetum HOFMANN 2002	6042	0,078
<i>Pleurozium schreberi</i>	Dicrano-Cultopinetum HOFMANN 2002	6042	0,078
<i>Pohlia nutans</i>	Dicrano-Cultopinetum HOFMANN 2002	6042	0,078
<i>Leucobryum glaucum</i>	Vaccinio myrtilli-Cultopiceetum SCHUBERT 1972	6109	0,304
<i>Leucobryum glaucum</i>	Dicrano-Cultopiceetum SCHUBERT 1972	6111	0,134
<i>Dicranum scoparium</i>	Dicrano-Cultopiceetum SCHUBERT 1972	6111	0,134
<i>Polytrichum formosum</i>	Dicrano-Cultopiceetum SCHUBERT 1972	6111	0,134

^a BERN: (Bioindication for Ecosystem Regeneration towards Natural conditions)-Datenbank, Identifikationsnummer der Pflanzengesellschaft

^b [N]_{crit} in kg N m⁻³ im Sickerwasser (Jahresdurchschnitt), ermittelt aus empirischen Critical Load (Bobbink et al. 2022) und Regionalklima-typischen Sickerwasserraten.

Abbildung 61: Source-Receptor-Table der NH₃-Menge^a, die in einer Höhe von 2,5 m über dem Erdboden als Konzentration (im Receptor-Bundesland) modelliert wurde (Kranenburg et al. 2024)

Recept or-BL	Source-BL																	
	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SL	SH	SN	ST	TH	EXT	SUM
BB	22,84	0,32	0,22	0,69	0,05	0,34	0,17	1,35	4,27	1,33	0,14	0,01	1,32	1,21	4,50	0,49	13,72	52,98
BE	0,44	0,25	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,02	0,12	0,04	0,00	0,00	0,04	0,01	0,09	0,01	0,40	1,47
BW	0,08	0,00	68,62	14,95	0,01	0,66	0,01	0,03	0,76	0,83	0,62	0,06	0,11	0,14	0,12	0,26	26,81	114,07
BY	0,30	0,01	15,02	209,20	0,02	1,74	0,03	0,12	2,04	1,91	0,65	0,08	0,33	0,62	0,51	1,65	50,89	285,11
HB	0,01	0,00	0,00	0,01	0,51	0,00	0,01	0,01	1,98	0,09	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,30	2,96
HE	0,22	0,01	0,85	2,07	0,01	20,24	0,01	0,05	1,67	3,33	1,36	0,06	0,11	0,20	0,41	1,10	10,30	41,99
HH	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	1,58	0,06	1,69	0,08	0,00	0,00	0,53	0,00	0,02	0,00	0,44	4,46
MV	2,11	0,02	0,09	0,24	0,07	0,14	0,40	17,91	5,21	1,04	0,07	0,01	4,73	0,10	0,85	0,12	10,25	43,37
NI	1,14	0,02	0,40	0,95	2,28	1,49	1,12	1,39	206,22	21,29	0,42	0,03	3,73	0,31	2,75	0,80	43,83	288,18
NW	0,37	0,01	0,45	1,25	0,05	1,90	0,05	0,28	12,96	103,17	1,63	0,04	0,28	0,24	0,64	0,56	39,13	163,00
RP	0,10	0,00	0,90	1,60	0,00	1,23	0,00	0,02	0,52	1,56	13,11	0,59	0,05	0,07	0,14	0,20	13,79	33,89
SL	0,01	0,00	0,11	0,20	0,00	0,07	0,00	0,00	0,04	0,07	0,28	1,03	0,00	0,01	0,01	0,02	2,16	4,01
SH	0,26	0,01	0,06	0,13	0,12	0,11	1,46	1,17	8,58	1,13	0,06	0,01	52,36	0,05	0,27	0,06	9,82	75,65
SN	0,75	0,01	0,32	1,53	0,02	0,31	0,03	0,09	1,36	0,69	0,12	0,01	0,23	10,09	1,89	1,81	9,41	28,66
ST	1,61	0,03	0,24	0,73	0,06	0,56	0,12	0,30	6,38	1,80	0,17	0,02	0,66	0,92	27,76	2,23	9,42	53,01
TH	0,29	0,01	0,38	2,26	0,01	1,56	0,02	0,05	1,72	1,32	0,21	0,02	0,17	0,85	1,24	14,89	7,16	32,16
SUM	30,53	0,68	87,66	235,82	3,25	30,37	5,01	22,86	255,51	139,69	18,86	1,96	64,69	14,83	41,22	24,20		

Gelesen wird (Beispiele):

Von der gesamten NH₃-Menge, die als Konzentration über BE (als Receptor) erfasst wird, stammen 0,25 kg NH₃ aus BE selbst (als Emissions-Quelle)

Von der gesamten NH₃-Menge, die als Konzentration über BW (Receptor) erfasst wird, stammen 0,66 kg NH₃ aus HE (als Emissions-Quelle).

^a Hinweis: hier sind die NH₃-Mengen aufgeführt, bei einem Vergleich mit Tabelle 16 sind die Werte in NH₃-N umzurechnen.

Tabelle 39: Verteilung der zulässigen NH₃-Emissionsmengen^a [kg NH₃] auf die Quellenbundesländern unter der Annahme der S-R Tabellen aus PINETI-4. In der letzten Spalte sind die insgesamt zulässigen NH₃-Mengen aus den jeweiligen Quellenbundesländern aufgeführt.

		Rezeptor-Bundesland																Σ zulässige Menge NH ₃ aus Quellen-BL
		BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SH	SL	SN	ST	TH	
Quellen-Bundesland	BB	9,38	0,20	0,04	0,07	0,00	0,10	0,00	0,88	0,02	0,04	0,07	0,03	0,00	0,75	0,74	0,21	12,53
	BE	0,13	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,29
	BW	0,09	0,00	30,66	3,53	0,00	0,39	0,00	0,04	0,01	0,05	0,64	0,01	0,03	0,32	0,11	0,28	36,15
	BY	0,28	0,01	6,68	49,21	0,00	0,95	0,00	0,10	0,02	0,13	1,13	0,01	0,05	1,55	0,34	1,64	62,10
	HB	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,03	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,01	0,19
	HE	0,14	0,01	0,29	0,41	0,00	9,26	0,00	0,06	0,03	0,20	0,87	0,01	0,02	0,32	0,26	1,13	13,00
	HH	0,07	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,13	0,17	0,02	0,01	0,00	0,15	0,00	0,03	0,05	0,02	0,66
	MV	0,56	0,01	0,02	0,03	0,00	0,02	0,01	7,41	0,03	0,03	0,02	0,12	0,00	0,09	0,14	0,04	8,50
	NI	1,75	0,06	0,34	0,48	0,02	0,77	0,14	2,16	3,72	1,36	0,37	0,86	0,01	1,38	2,93	1,25	17,57
	NW	0,55	0,02	0,37	0,45	0,00	1,53	0,01	0,43	0,38	10,80	1,11	0,11	0,02	0,69	0,83	0,96	18,26
	RP	0,06	0,00	0,28	0,15	0,00	0,62	0,00	0,03	0,01	0,17	9,29	0,01	0,08	0,12	0,08	0,15	11,05
	SH	0,54	0,02	0,05	0,08	0,00	0,05	0,04	1,96	0,07	0,03	0,03	5,27	0,00	0,23	0,30	0,12	8,80
	SL	0,01	0,00	0,03	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	0,28	0,01	0,01	0,01	0,81
	SN	0,50	0,01	0,06	0,15	0,00	0,09	0,00	0,04	0,01	0,03	0,05	0,01	0,00	10,20	0,42	0,62	12,17
	ST	1,85	0,04	0,06	0,12	0,00	0,19	0,00	0,35	0,05	0,07	0,10	0,03	0,00	1,91	12,75	0,90	18,42
	TH	0,20	0,01	0,11	0,39	0,00	0,50	0,00	0,05	0,01	0,06	0,14	0,01	0,00	1,83	1,02	10,81	15,14
Summe		16,13	0,50	38,99	55,09	0,02	14,51	0,33	13,71	4,40	12,97	14,24	6,63	0,50	19,45	20,01	18,15	

Gelesen wird (Beispiele):

Von den gesamten NH₃-Mengen (0,5 kg) die als Konzentration in BE (Rezeptor) erfasst werden, stammen 0,12 kg NH₃ aus BE selbst (als Quelle).

Von den gesamten NH₃-Mengen (38,99 kg) die als Konzentration in BW (Rezeptor) erfasst werden, stammen 0,29 kg NH₃ aus HE (als Quelle).

^a Hinweis: hier sind die NH₃-Mengen aufgeführt, bei einem Vergleich mit Tabelle 16 sind die Werte in NH₃-N umzurechnen.

Tabelle 40: NH₃-N-Menge in der Atmosphäre^a (Bundesländer, Jahr 2019), die gemäß Source-Receptor-Tables aus Deutschland und aus dem Ausland stammt, sowie zulässige Emissionsmengen unter der Annahme eines maximalen Schutzes (Anforderungsniveau 100-Perzentil^b) der empfindlichen Pflanzengesellschaften.

Bundesland	Ist-Wert	NH ₃ -N-Menge ^a [kg] pro Bundesland			Quellmengen aus den Bun- desländern
		zulässige Menge (für Anforderungsniveau 100-Perzentil ^b)			
		insgesamt	davon aus dem Ausland	davon aus DE = zur Einhal- tung des Qualitätsziels	
Spalte	2	3	4	5	6
Brandenburg	43,63	24,59	11,30	13,29	9,62
Berlin	1,21	0,74	0,33	0,41	0,23
Baden-Württemberg	93,94	34,40	22,08	12,32	12,00
Bayern	234,80	61,39	41,91	19,48	22,73
Bremen	2,44	0,27	0,25	0,02	0,13
Hessen	34,58	17,36	8,48	8,88	7,41
Hamburg	3,67	0,63	0,36	0,27	0,50
Mecklenburg-Vorpom.	35,72	19,73	8,44	11,29	6,86
Niedersachsen	237,33	39,72	36,09	3,63	10,62
Nordrhein-Westfalen	134,24	28,32	32,23	-3,91	1,08
Rheinland-Pfalz	27,91	19,45	11,36	8,09	6,07
Schleswig-Holstein	62,30	13,54	8,08	5,46	6,92
Saarland	3,31	2,19	1,78	0,41	0,52
Sachsen	23,60	15,47	7,75	7,73	5,22
Sachsen-Anhalt	43,65	19,50	7,76	11,74	10,82
Thüringen	26,49	15,12	5,90	9,22	7,60
Deutschland	1008,81	312,43	204,10	108,33	108,33

^a In der Luftschicht von 2 bis 3 m über dem Boden

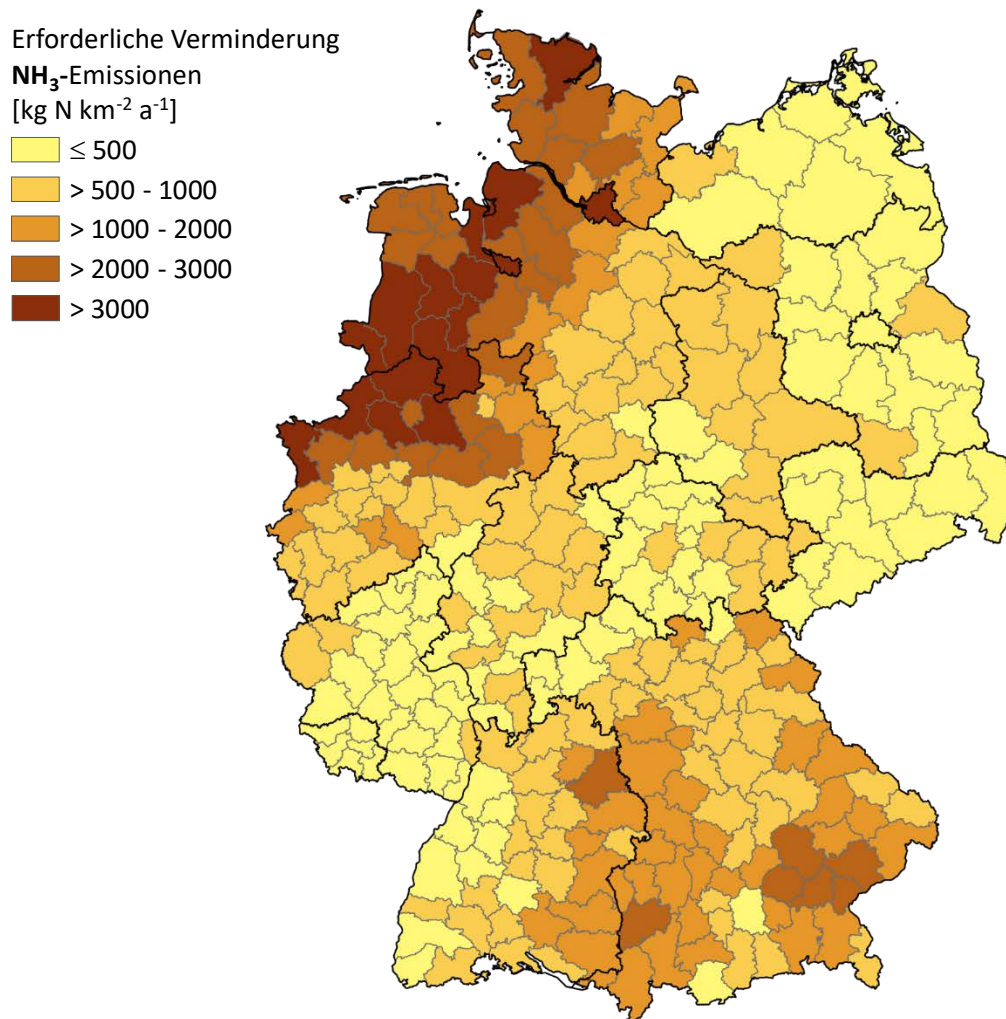
^b Qualitätsziel (Anforderungsniveau 100-Perzentil): für Kreisregionen mit Vorkommen empfindlicher Vegetation in mindestens einer Rasterzellen gilt das Qualitätsziel 1 µg NH₃ m⁻³ Luft, für alle übrigen 3 µg NH₃ m⁻³ Luft (s. Kapitel 6.1, Schritt 1).

Tabelle 41: Anteile der Emissionen der Bundesländer, die in Deutschland wieder als Konzentration erfasst werden, für Anforderungsniveau 100-Perzentil^a (maximaler Schutz der Vegetation).

Bundesland	NH ₃ -Emissionen (Ist)	Als Konzentration über DE erfasst	Verhältnis (Anteil von Ist)	maximal zulässige Emissionen	erforderliche Emissionsminderung	
	t NH ₃ -N a ⁻¹	kg NH ₃ -N a ⁻¹	x 10 ⁻⁶	t NH ₃ -N a ⁻¹	t NH ₃ a ⁻¹	um ... %
Brandenburg	20316	25,1	1,24	7775	12541	61,7 %
Berlin	444	0,6	1,26	180	264	59,5 %
Baden-Württemberg	37682	72,2	1,92	6264	31417	83,4 %
Bayern	93792	194,2	2,07	10977	82815	88,3 %
Bremen	1212	2,7	2,21	58	1154	95,2 %
Hessen	15899	25,0	1,57	4710	11190	70,4 %
Hamburg	3710	4,1	1,11	449	3262	87,9 %
Mecklenburg-Vorp.	14993	18,8	1,26	5460	9533	63,6 %
Niedersachsen	1187052	210,4	1,77	5990	112715	95,0 %
Nordrhein-Westf.	65982	115,0	1,74	622	65360	99,1 %
Rheinland-Pfalz	11914	15,5	1,30	4656	7257	60,9 %
Schleswig-Holstein	41877	53,3	1,27	5441	36435	87,0 %
Saarland	1301	1,6	1,24	419	882	67,8 %
Sachsen	9059	12,2	1,35	3872	5187	57,3 %
Sachsen-Anhalt	20615	33,9	1,65	6574	14041	68,1 %
Thüringen	12119	19,9	1,64	4619	7501	61,9 %
Deutschland	469620	662,7	1,41	68066	401554	85,5 %

^a Qualitätsziel (Anforderungsniveau 100-Perzentil): für Kreisregionen mit Vorkommen empfindlicher Vegetation in mindestens einer Rasterzelle gilt das Qualitätsziel 1 µg NH₃ m⁻³ Luft, für alle übrigen 3 µg NH₃ m⁻³ Luft (s. Kapitel 6.1, Schritt 1).

Abbildung 62: Erforderliche Verminderung der NH_3 -Emissionen in den Kreisregionen (2019) zur Einhaltung des Qualitätsziels der NH_3 -Konzentration für maximalen Schutz (Anforderungsniveau 100-Perzentil)^a der Vegetation.



^a Qualitätsziel (Anforderungsniveau 100-Perzentil): für Kreisregionen mit Vorkommen empfindlicher Vegetation in mindestens einer Rasterzelle gilt das Qualitätsziel 1 µg NH_3 m⁻³ Luft, für alle übrigen 3 µg NH_3 m⁻³ Luft (s. Kapitel 6.1, Schritt 1).
Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Eckhoff; Kartengrundlage: © Geo-BasisDE / BKG 2020.

Tabelle 42: Critical Level-Qualitätsziel und Jahresmittelwerte 2019 der NH₃-Konzentration sowie NH₃-Emission (n. GRETA) und Minderungserfordernis zur Einhaltung der Critical Level^a von 3 bzw. 1 µg m³ (für Anforderungsniveaus 90- und 100-Perzentil^b) in den Kreisregionen.

AGS	Kreis/Kreisregion	Critical Level- Qualitätsziel ^a für 90- / 100- Perzentil µg NH ₃ m ⁻³	Jahresmittel NH ₃ Konzentration µg NH ₃ m ⁻³	NH ₃ -Emissionen 2019 t N a ⁻¹	Minderungs- erfordernis t N a ⁻¹
1051	Dithmarschen	1	5,25	3758,9	3247,6
1053	Herzogtum Lauenburg	1	4,31	2146,3	1854,3
1054	Nordfriesland	1	4,79	6684,2	5774,9
1055	Ostholstein	1	3,61	2597,7	2244,3
1056	Pinneberg	1	5,78	1445,4	1248,8
1057	Plön	1	4,76	2517,5	2175,1
1058	Rendsburg-Eckernförde	1	5,69	6567,3	5673,9
1059	Schleswig-Flensburg	1	6,07	7594,5	6561,4
1060	Segeberg	1	5,45	3243,8	2802,5
1061	Steinburg	1	6,73	3601,2	3111,3
1062	Stormarn	1	5,21	1719,7	1485,8
2000	Hamburg	1	6,68	3710,4	3224,4
3151	Gifhorn	1	2,68	1226,5	1142,2
3153	Goslar	1	1,60	435,3	405,4
3154	Helmstadt	1	2,50	539,5	502,4
3155	Northeim	1	2,56	1018,8	948,7
3157	Peine	1	3,00	537,0	500,1
3158	Wolfenbüttel	1	2,48	649,3	604,7
3159	Göttingen	1	2,14	1175,0	1094,2
3241	Region Hannover	1	3,21	1975,1	1839,3
3251	Diepholz	1	9,42	6016,1	5602,4
3252	Hameln-Pyrmont	1	3,34	791,3	736,9
3254	Hildesheim	1	2,61	901,0	839,0
3255	Holz Minden	1	2,72	515,9	480,4
3256	Nienburg (Weser)	1	5,93	2644,7	2462,8
3257	Schaumburg	1	4,02	742,1	691,1
3351	Celle	1	3,02	1612,0	1501,2
3352	Cuxhaven	1	8,03	8253,3	7685,7
3353	Harburg	1	4,38	1499,0	1395,9
3354	Lüchow-Dannenberg	1	2,65	1010,3	940,8
3355	Lüneburg	1	2,99	1277,0	1189,1

AGS	Kreis/Kreisregion	Critical Level- Qualitätsziel ^a für 90- / 100- Perzentil $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	Jahresmittel NH_3 Konzentration $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	NH_3 -Emissionen 2019 t N a^{-1}	Minderungs- erfordernis t N a^{-1}
3356	Osterholz	1	8,18	1682,0	1566,3
3357	Rotenburg (Wümme)	1	7,51	6231,5	5803,0
3358	Heidekreis	1	3,81	2121,2	1975,3
3359	Stade	1	6,81	3428,7	3192,9
3360	Uelzen	1	2,63	1160,4	1080,6
3361	Verden	1	7,11	1896,7	1766,3
3451	Ammerland	1	10,27	2276,2	2119,7
3452	Aurich	1	6,23	3579,1	3333,0
3453	Cloppenburg	1	16,92	11951,5	11129,6
3454	Emsland	1	11,73	13792,1	12843,6
3455	Friesland	1	7,70	2373,7	2210,5
3456	Grafschaft Bentheim	1	11,92	5247,1	4886,2
3457	Leer	1	9,45	3422,9	3187,5
3458	Oldenburg	1	12,78	5693,2	5301,7
3459	Osnabrück	1	10,04	7816,8	7279,2
3460	Vechta	1	18,73	8599,5	8008,1
3461	Wesermarsch	1	9,24	2727,2	2539,6
3462	Wittmund	1	6,75	1885,8	1756,2
4011	Bremen	1	8,63	1212,0	1140,9
5112	Duisburg, Essen, Mühl- heim, Oberh.	1	3,03	470,7	409,2
5124	Wuppertal	1	2,48	325,2	282,7
5154	Kleve	1	9,31	4415,2	3838,2
5158	Mettmann	3	2,63	576,5	501,2
5162	Neuss	3	3,21	723,6	629,0
5166	Viersen	3	5,22	1272,8	1106,5
5170	Wesel	1	6,76	2630,8	2287,0
5334	Städteregion Aachen	1	2,41	572,0	497,3
5358	Düren	1	2,42	630,2	547,8
5362	Rhein-Erft-Kreis	3	2,28	686,4	596,7
5366	Euskirchen	1	2,10	1049,5	912,3
5370	Heinsberg	3	4,80	976,7	849,0
5374	Oberbergischer Kreis	3	2,50	1092,1	949,4
5378	Rheinisch-Berg.-Kreis	3	2,71	678,1	589,5
5382	Rhein-Sieg	3	2,40	1092,0	949,3

AGS	Kreis/Kreisregion	Critical Level- Qualitätsziel ^a für 90- / 100- Perzentil $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	Jahresmittel NH_3 Konzentration $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	NH_3 -Emissionen 2019 t N a^{-1}	Minderungs- erfordernis t N a^{-1}
5515	Münster	1	8,86	706,7	614,3
5554	Borken	1	11,77	7630,0	6632,9
5558	Coesfeld	1	10,49	5002,3	4348,6
5562	Recklingshausen	1	5,40	1974,5	1716,5
5566	Steinfurt	1	10,39	6788,2	5901,1
5570	Warendorf	1	10,04	5454,5	4741,7
5711	Bielefeld	1	4,89	217,7	189,3
5754	Gütersloh	1	8,93	2819,0	2450,6
5758	Herford	3	5,92	800,2	695,7
5762	Höxter	1	4,42	2081,8	1809,7
5766	Lippe	1	3,90	1344,4	1168,7
5770	Minden-Lübbecke	1	6,76	2429,0	2111,6
5774	Paderborn	1	5,30	2716,9	2361,9
5913	Dortmund	3	2,91	308,0	267,8
5954	Ennepe-Ruhr	1	2,47	467,7	406,6
5958	Hochsauerlandkreis	1	2,35	1819,2	1581,4
5962	Märkischer Kreis	1	2,15	914,3	794,8
5966	Olpe	1	1,74	478,3	415,8
5970	Siegen-Wittgenstein	1	1,37	433,8	377,1
5974	Soest	3	4,77	2706,3	2352,6
5978	Unna	1	5,58	1697,1	1475,3
6431	Bergstraße	1	1,98	432,1	247,1
6432	Darmstadt-Dieburg	3	2,19	615,7	352,2
6433	Groß-Gerau	1	1,91	220,4	126,0
6434	Hochtaunuskreis	1	1,49	166,4	95,2
6435	Main-Kinzig-Kreis	1	1,90	902,5	516,1
6436	Main-Taunus-Kreis	3	2,04	574,9	328,8
6437	Odenwaldkreis	1	1,86	466,4	266,8
6438	Offenbach	3	1,78	202,6	115,8
6439	Rheingau-Taunus-Kreis	1	1,32	233,4	133,5
6440	Wetteraukreis	1	2,28	790,0	451,8
6531	Gießen	1	2,18	576,8	329,9
6532	Lahn-Dill-Kreis	1	1,52	381,0	217,9
6533	Limburg-Weilburg	1	2,06	546,6	312,6
6534	Marburg-Biedenkopf	1	2,21	928,9	531,3

AGS	Kreis/Kreisregion	Critical Level- Qualitätsziel ^a für 90- / 100- Perzentil $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	Jahresmittel NH_3 Konzentration $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	NH_3 -Emissionen 2019 t N a^{-1}	Minderungs- erfordernis t N a^{-1}
6535	Vogelsbergkreis	1	2,55	1428,0	816,7
6631	Fulda	1	2,89	1717,5	982,3
6632	Hersfeld-Rotenburg	1	2,30	814,3	465,7
6633	Kassel	1	2,56	1017,3	581,8
6634	Schwalm-Eder-Kreis	1	2,78	1573,7	900,1
6635	Waldeck-Frankenberg	1	2,56	1698,5	971,4
6636	Werra-Meißner-Kreis	1	1,98	612,3	350,2
7131	Ahrweiler	1	1,64	352,9	146,2
7132	Altenkirchen (Westerwald)	3	1,84	428,1	177,4
7133	Bad Kreuznach	1	1,46	311,7	129,2
7134	Birkenfeld	1	1,40	336,5	139,4
7135	Cochem-Zell	1	1,65	293,7	121,7
7137	Mayen-Koblenz	1	1,99	617,2	255,8
7138	Neuwied	3 / 1 ^a	1,93	396,8	164,4
7140	Rhein-Hunsrück-Kreis	1	1,53	554,3	229,7
7141	Rhein-Lahn-Kreis	1	1,64	380,2	157,5
7143	Westerwaldkreis	3	1,77	661,0	273,9
7231	Bernkastel-Wittlich	1	1,77	640,9	265,6
7232	Eifelkreis Bitburg-Prüm	1	3,55	2481,4	1028,3
7233	Vulkaneifel	1	2,06	775,7	321,4
7235	Trier-Saarburg	1	1,96	648,6	268,8
7331	Alzey-Worms	3 / 1	1,75	341,5	141,5
7332	Bad-Dürkheim	1	1,20	108,9	45,1
7333	Donnersbergkreis	1	1,61	312,3	129,4
7334	Germersheim	3 / 1	1,68	151,2	62,7
7335	Kaiserslautern	1	1,56	361,3	149,7
7336	Kusel	3	1,84	358,2	148,4
7337	Südliche Weinstraße	1	1,29	126,5	52,4
7338	Rhein-Pfalz	1	1,69	437,8	181,4
7339	Mainz-Bingen	1	1,61	298,8	123,8
7340	Südwestpfalz	1	1,62	538,1	223,0
8115	Böblingen	1	2,41	467,3	274,6
8116	Esslingen	1	2,72	433,5	254,8
8117	Göppingen	3	3,81	979,7	575,8
8118	Ludwigsburg. Landkr.	1	2,95	868,9	510,6

AGS	Kreis/Kreisregion	Critical Level- Qualitätsziel ^a für 90- / 100- Perzentil $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	Jahresmittel NH_3 Konzentration $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	NH_3 -Emissionen 2019 t N a^{-1}	Minderungs- erfordernis t N a^{-1}
8119	Rems-Murr-Kreis	1	3,02	752,1	442,0
8125	Heilbronn	1	2,70	743,8	437,1
8126	Hohenlohekreis	3	5,04	1335,5	784,8
8127	Schwäbisch Hall	1	6,20	3675,6	2160,0
8128	Main-Tauber-Kreis	3	3,15	1096,1	644,1
8135	Heidenheim	3	4,13	746,8	438,8
8136	Ostalbkreis	1	4,08	2270,4	1334,2
8215	Karlsruhe	1	1,74	450,7	264,8
8216	Rastatt	1	1,48	221,7	130,3
8225	Neckar-Odenwald-Kreis	1	2,38	804,4	472,7
8226	Rhein-Neckar	1	2,01	857,9	504,2
8235	Calw	1	1,66	376,5	221,2
8236	Enzkreis	1	1,98	386,1	226,9
8237	Freudenstadt	1	1,80	423,4	248,8
8315	Breisgau-Hochschwarzwald	3	2,26	906,1	532,5
8316	Emmendingen	1	2,42	447,7	263,1
8317	Ortenaukreis	1	2,00	970,1	570,1
8325	Rottweil	1	2,94	751,6	441,7
8326	Schwarzwald-Baar-Kreis	3	2,99	972,5	571,5
8327	Tuttlingen	3	2,72	550,3	323,4
8335	Konstanz	3 / 1	4,16	921,4	541,5
8336	Lörrach	1	2,47	408,4	240,0
8337	Waldshut	3 / 1	3,19	944,0	554,8
8415	Reutlingen	3	2,79	1024,1	601,8
8416	Tübingen	1	2,56	358,8	210,9
8417	Zollernalbkreis	1	2,20	547,2	321,6
8425	Alb-Donau-Kreis	1	5,65	2846,3	1672,6
8426	Biberach	3	7,47	2945,0	1730,7
8435	Bodenseekreis	3 / 1	6,37	779,8	458,2
8436	Ravensburg	3	8,73	3893,5	2288,0
8437	Sigmaringen	3	4,51	1524,2	895,7
9171	Altötting	3	7,31	1437,7	1059,1
9172	Berchtesgadener Land	1	3,77	747,9	551,0
9173	Bad Tölz-Wolfratshausen	1	3,67	931,4	686,1
9174	Dachau	3	5,56	991,2	730,2

AGS	Kreis/Kreisregion	Critical Level- Qualitätsziel ^a für 90- / 100- Perzentil $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	Jahresmittel NH_3 Konzentration $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	NH_3 -Emissionen 2019 t N a^{-1}	Minderungs- erfordernis t N a^{-1}
9175	Ebersberg	3	6,17	992,5	731,2
9176	Eichstätt	3	2,76	924,1	680,8
9177	Erding	1	7,98	2363,2	1741,0
9178	Freising	3	5,26	931,2	686,0
9179	Fürstenfeldbruck	3	4,36	489,1	360,3
9180	Garmisch-Partenkirchen	1	2,50	392,6	289,2
9181	Landsberg am Lech	3	5,80	1061,1	781,7
9182	Miesbach	1	3,65	805,8	593,6
9183	Mühldorf a. Inn	3	8,37	2094,5	1543,0
9184	München (mit München)	3	3,34	538,1	396,4
9185	Neuburg-Schrobenhausen	1	4,29	902,0	664,5
9186	Pfaffenhofen a.d. Ilm	1	4,02	766,3	564,5
9187	Rosenheim	3	7,77	3309,8	2438,3
9188	Starnberg	3	3,76	363,8	268,0
9189	Traunstein	1	6,45	2758,8	2032,4
9190	Weilheim-Schongau	1	6,84	1672,0	1231,7
9271	Deggendorf	1	4,84	975,5	718,7
9272	Freyung-Grafenau	1	3,10	889,7	655,5
9273	Kelheim	1	3,45	945,5	696,6
9274	Landshut	1	7,19	3372,1	2484,2
9275	Passau	1	6,86	3194,7	2353,5
9276	Regen	1	3,05	874,7	644,4
9277	Rottal-Inn	3	7,53	3127,8	2304,2
9278	Straubing-Bogen	1	4,55	1490,0	1097,7
9279	Dingolfing-Landau	3	6,45	1682,0	1239,1
9371	Amberg-Sulzbach	1	2,91	1391,3	1024,9
9372	Cham	1	4,40	2381,6	1754,5
9373	Neumarkt i.d. OPf.	1	2,88	1344,2	990,3
9374	Neustadt a.d. Waldnaab	1	2,95	1649,9	1215,5
9375	Regensburg	1	3,70	1508,0	1110,9
9376	Schwandorf	1	3,68	1989,4	1465,6
9377	Tirschenreuth	1	2,85	1414,2	1041,8
9471	Bamberg	1	2,22	831,2	612,3
9472	Bayreuth	1	2,57	1429,3	1053,0
9473	Coburg	1	2,82	781,9	576,0

AGS	Kreis/Kreisregion	Critical Level- Qualitätsziel ^a für 90- / 100- Perzentil $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	Jahresmittel NH_3 Konzentration $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	NH_3 -Emissionen 2019 t N a^{-1}	Minderungs- erfordernis t N a^{-1}
9474	Forchheim	1	2,18	478,0	352,1
9475	Hof	1	2,75	1245,1	917,3
9476	Kronach	1	1,70	319,4	235,3
9477	Kulmbach	1	2,64	615,5	453,5
9478	Lichtenfels	1	2,34	433,3	319,2
9479	Wunsiedel i. Fichtelgebirge	1	2,29	557,1	410,4
9571	Ansbach	1	4,94	4010,0	2954,1
9572	Erlangen-Höchststadt	1	2,58	506,0	372,8
9573	Fürth	1	3,41	492,3	362,7
9574	Nürnberger-Land	1	2,19	615,3	453,3
9575	Neustadt a.d. Aisch- Windsh.	1	4,50	2163,4	1593,7
9576	Roth	1	3,08	944,6	695,8
9577	Weißenburg-Gunzenhau- sen	1	4,11	1542,5	1136,3
9671	Aschaffenburg	1	1,51	320,3	235,9
9672	Bad Kissingen	1	1,79	569,1	419,2
9673	Rhön-Grabfeld	1	2,01	574,5	423,2
9674	Haßberge	1	2,42	779,3	574,1
9675	Kitzingen	3	3,37	745,6	549,2
9676	Miltenberg	1	1,63	348,6	256,8
9677	Main-Spessart	1	1,48	435,5	320,8
9678	Schweinfurt	3	2,41	670,8	494,2
9679	Würzburg	3	2,99	911,4	671,4
9771	Aichach-Friedberg	1	6,02	1633,7	1203,5
9772	Augsburg	1	5,64	1775,7	1308,1
9773	Dillingen a.d. Donau	3	6,41	1636,3	1205,4
9774	Günzburg	3	6,15	1325,4	976,4
9775	Neu-Ulm	3	6,52	773,5	569,8
9776	Lindau (Bodensee)	3 / 1	6,91	643,5	474,1
9777	Ostallgäu	1	7,99	3103,7	2286,4
9778	Unterallgäu	3 / 1	9,64	3517,5	2591,3
9779	Donau-Ries	1	5,25	2348,6	1730,2
9780	Oberallgäu	1	5,73	2010,4	1481,0
10041	Regionalverbd. Saarbrü- cken	1	1,65	114,7	67,0

AGS	Kreis/Kreisregion	Critical Level- Qualitätsziel ^a für 90- / 100- Perzentil $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	Jahresmittel NH_3 Konzentration $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	NH_3 -Emissionen 2019 t N a^{-1}	Minderungs- erfordernis t N a^{-1}
10042	Merzig-Wadern	1	1,88	338,3	197,7
10043	Neunkirchen	1	1,74	140,4	82,1
10044	Saarlouis	1	1,87	244,1	142,6
10045	Saarpfalz-Kreis	1	1,98	191,5	111,9
10046	St. Wendel	1	1,70	271,7	158,8
11000	Berlin	1	1,73	444,2	255,9
12060	Barnim	1	1,54	688,7	406,1
12061	Dahme-Spreewald	1	1,98	1698,1	1001,2
12062	Elbe-Elster	1	2,27	1629,7	960,9
12063	Havelland	1	2,15	1081,4	637,6
12064	Märkisch-Oderland	1	1,98	1799,0	1060,7
12065	Oberhavel	1	1,70	910,9	537,1
12066	Oberspreewald-Lausitz	1	1,72	712,3	420,0
12067	Oder-Spree	1	1,64	1404,4	828,1
12068	Ostprignitz-Ruppin	1	2,25	1991,6	1174,3
12069	Potsdam-Mittelmark	1	1,95	1655,6	976,2
12070	Prignitz	1	2,78	2192,7	1292,8
12071	Spree-Neiße	1	1,66	1018,7	600,6
12072	Teltow-Fläming	1	2,04	1458,0	859,7
12073	Uckermark	1	1,76	2074,6	1223,2
13071	Mecklenburgische Seen- platte	1	1,56	2143,2	1346,3
13072	Rostock	1	2,16	2684,6	1686,4
13073	Vorpommern-Rügen	1	1,57	1967,0	1235,6
13074	Nordwestmecklenburg	1	3,24	2598,1	1632,0
13075	Vorpommern-Greifswald	1	1,66	2356,9	1480,5
13076	Ludwigslust-Parchim	1	2,38	3242,9	2037,1
14521	Erzgebirgskreis	1	1,15	601,8	107,8
14522	Mittelsachsen	3	1,61	1099,3	196,9
14523	Vogtlandkreis	1	2,00	1026,5	183,9
14524	Zwickau	3	1,80	570,6	102,2
14625	Bautzen	1	1,40	871,9	156,2
14626	Görlitz	1	1,51	834,9	149,6
14627	Meißen	1	1,98	883,5	158,3
14628	Sächs. Schweiz-Osterzgeb.	1	1,32	720,2	129,0

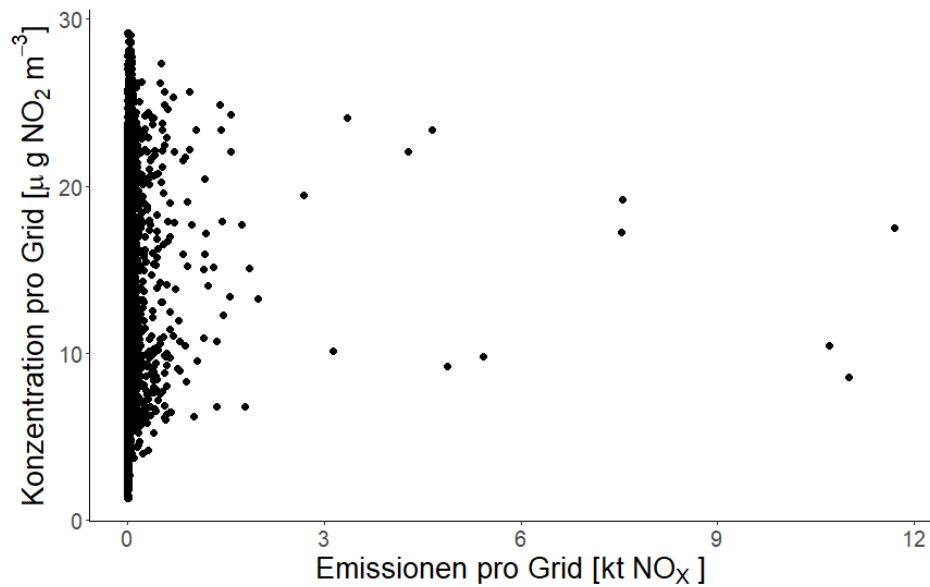
AGS	Kreis/Kreisregion	Critical Level- Qualitätsziel ^a für 90- / 100- Perzentil $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	Jahresmittel NH_3 Konzentration $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$	NH_3 -Emissionen 2019 t N a^{-1}	Minderungs- erfordernis t N a^{-1}
14729	Leipzig	3	2,06	1049,2	188,0
14730	Nordsachsen	1	2,23	1401,2	251,0
15081	Altmarkkreis Salzwedel	1	3,00	2347,0	1298,4
15083	Börde	1	3,24	3130,1	1731,6
15084	Burgenlandkreis	3	2,97	1512,5	836,7
15085	Harz	1	2,12	1331,9	736,8
15086	Jerichower Land	1	3,24	1924,1	1064,5
15087	Mansfeld-Südharz	3	2,04	879,4	486,5
15088	Saale	3 / 1	3,03	1750,1	968,2
15089	Salzlandkreis	1	3,24	1741,0	963,2
15090	Stendal	1	2,96	2403,5	1329,7
15091	Wittenberg	1	2,73	3595,2	1988,9
16051	Erfurt	3 / 1	2,27	114,9	43,0
16061	Eichsfeld	1	2,03	718,9	269,0
16062	Nordhausen	1	2,24	564,2	211,1
16063	Wartburgkreis	1	2,09	868,1	324,9
16064	Unstrut-Hainich-Kreis	3	2,32	732,9	274,3
16065	Kyffhäuserkreis	3	2,14	603,4	225,8
16066	Schmalkalden-Meiningen	1	2,00	775,7	290,3
16067	Gotha	1	2,40	832,4	311,5
16068	Sömmerda	3 / 1	2,80	584,8	218,9
16069	Hildburghausen	1	1,85	621,6	232,6
16070	Ilm-Kreis	1	1,79	441,9	165,4
16071	Weimarer Land	3	2,46	857,0	320,7
16072	Sonneberg	1	1,49	183,3	68,6
16073	Saalfeld-Rudolstadt	1	1,76	561,7	210,2
16074	Saale-Holzland	1	2,61	946,9	354,3
16075	Saale-Orla-Kreis	1	2,21	1062,3	397,5
16076	Greiz	1	2,76	1079,1	403,8
16077	Altenburger Land	3	2,70	570,3	213,4

^a In der Bezugshöhe 2,5 Meter über Bodenoberfläche

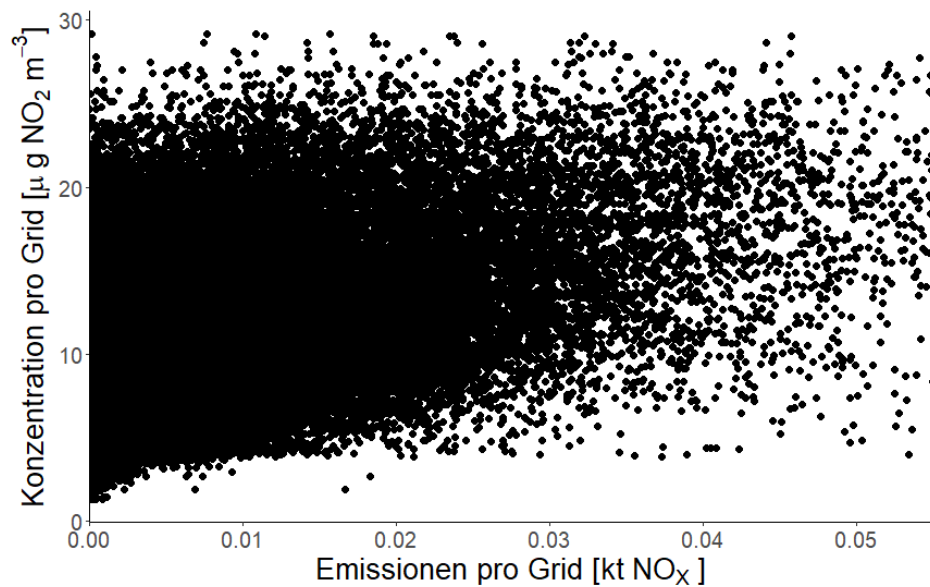
^b Kreise/Kreisregionen mit einem Wert: das Qualitätsziele von 1 oder 3 $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft gilt für beide Anforderungsniveaus (90- und 100-Perzentil); Kreise/Kreisregionen mit zwei Werten: das Qualitätsziel 3 $\mu\text{g m}^{-3}$ gilt für Anforderungsniveau 90-Perzentil, das Qualitätsziel 1 $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ Luft für Anforderungsniveau 100-Perzentil (Erläuterung s. Text).

A.7 Anhang zu Schutzgut Menschliche Gesundheit

Abbildung 63: a) Korrelation zwischen der NO₂-Konzentration (Jahresmittel) und NO_x-Emissionen 2020 in den 361.166 Rasterzellen des GeoGitterDE



b) Ausschnittvergrößerung für Wertebereich bis 55 t NO_x-Emission



Quelle: eigene Darstellung, Ingenieurbüro Dr. Eckhoff (IBE)

Tabelle 43: Erforderliche Verminderung der NO_x-Emission in den Kreisregionen zur Einhaltung des WHO-Richtwerts von 10 µg NO₂ m⁻³ Luft, berechnet mit Regressionsfunktion der NO₂-Konzentrationen der Kreisregionen.

AGS	Kreis/Kreisregion	NO _x -Emissionen im Kreis 2020 t N a-1	NO ₂ -Konzentration 2020 (Jahresmittel) µg m ⁻³ Luft	Zulässige NO _x - Emissionen t N a-1	Erforderliche Verminderung ^a NO _x -Emission t N a-1
1051	Dithmarschen	1271,0	16,4	527,6	743,3
1053	Herzogtum Lauenburg	891,6	17,0	444,6	447,1
1054	Nordfriesland	1271,7	9,5	845,8	0,0
1055	Ostholstein	1675,9	15,6	602,2	1073,6
1056	Pinneberg	1029,3	20,2	236,2	793,1
1057	Plön	716,6	12,6	393,5	323,1
1058	Rendsburg-Eckernförde	2557,5	20,1	851,1	1706,4
1059	Schleswig-Flensburg	1606,4	12,3	771,9	834,5
1060	Segeberg	1148,2	21,4	474,1	674,1
1061	Steinburg	1007,2	16,3	370,6	636,6
1062	Stormarn	1195,2	19,8	269,3	925,9
2000	Hamburg	7021,6	26,9	271,4	6750,2
3151	Gifhorn	661,6	15,2	551,9	109,7
3153	Goslar	774,3	9,5	341,4	0,0
3154	Helmstadt	1328,7	13,0	311,9	1016,9
3155	Northeim	690,2	12,3	445,6	244,6
3157	Peine	763,0	12,9	189,7	573,2
3158	Wolfenbüttel	2314,5	16,4	400,9	1913,6
3159	Göttingen	1332,0	13,6	618,1	713,9
3241	Region Hannover	3469,3	18,3	809,9	2659,4
3251	Diepholz	1062,8	17,5	703,3	359,5
3252	Hameln-Pyrmont	556,5	10,0	281,9	0,0
3254	Hildesheim	1165,3	17,6	422,4	742,9
3255	Holz Minden	406,1	8,0	243,9	0,0
3256	Nienburg (Weser)	698,2	9,2	492,4	0,0
3257	Schaumburg	738,7	11,7	238,6	500,1
3351	Celle	577,0	9,7	544,5	0,0
3352	Cuxhaven	1603,4	17,6	768,7	834,6
3353	Harburg	1018,8	21,1	436,5	582,4
3354	Lüchow-Dannenberg	311,2	7,0	433,3 ^a	0,0
3355	Lüneburg	591,9	10,9	465,7	126,2
3356	Osterholz	372,7	17,8	231,9	140,8
3357	Rotenburg (Wümme)	1067,8	11,5	726,5	341,4

AGS	Kreis/Kreisregion	NOx-Emissionen im Kreis 2020	NO2-Konzentration 2020 (Jahresmittel)	Zulässige NOx- Emissionen	Erforderliche Verminderung ^a NOx-Emission
		t N a-1	µg m-3 Luft	t N a-1	t N a-1
3358	Heidekreis	1068,1	12,3	667,0	401,1
3359	Stade	807,8	13,1	449,5	358,4
3360	Uelzen	577,8	9,3	515,3	0,0
3361	Verden	632,6	15,9	277,4	355,3
3451	Ammerland	504,2	12,5	258,4	245,8
3452	Aurich	944,7	11,2	536,0	408,6
3453	Cloppenburg	987,1	11,2	499,8	487,3
3454	Emsland	2479,4	15,2	1026,4	1453,0
3455	Friesland	834,7	10,9	274,9	559,8
3456	Grafschaft Bentheim	834,7	12,8	366,1	468,6
3457	Leer	755,5	15,4	392,5	363,1
3458	Oldenburg	1327,4	19,6	435,0	892,3
3459	Osnabrück	2199,9	16,0	785,6	1414,3
3460	Vechta	840,9	12,5	283,3	557,5
3461	Wesermarsch	567,4	14,7	303,8	263,7
3462	Wittmund	287,7	9,4	246,7	0,0
4011	Bremen	2567,2	20,1	113,7	2453,5
5112	Duisburg, Essen, Mühl- heim, Oberh.	7661,3	27,2	215,1	7446,3
5124	Wuppertal	1341,9	22,0	116,1	1225,8
5154	Kleve	1648,7	22,1	464,3	1184,4
5158	Mettmann	3120,7	29,3	218,6	2902,1
5162	Neuss	5833,7	29,0	263,3	5570,4
5166	Viersen	1708,1	23,4	254,1	1454,0
5170	Wesel	2286,1	26,0	367,8	1918,3
5334	Städteregion Aachen	3381,7	17,9	270,3	3111,4
5358	Düren	1026,7	17,2	332,6	694,1
5362	Rhein-Erft-Kreis	8456,0	29,8	387,9	8068,1
5366	Euskirchen	927,7	11,6	444,2	483,5
5370	Heinsberg	677,2	17,6	234,8	442,4
5374	Oberbergischer Kreis	777,1	13,2	323,1	454,0
5378	Rheinisch-Berg.-Kreis	1169,9	29,4	183,0	986,8
5382	Rhein-Sieg	2439,5	27,3	455,1	1984,4
5515	Münster	776,6	18,4	107,0	669,6
5554	Borken	1218,6	15,3	522,3	696,3
5558	Coesfeld	885,0	15,3	391,1	493,9

AGS	Kreis/Kreisregion	NOx-Emissionen im Kreis 2020 t N a-1	NO2-Konzentration 2020 (Jahresmittel) µg m-3 Luft	Zulässige NOx- Emissionen t N a-1	Erforderliche Verminderung ^a NOx-Emission t N a-1
5562	Recklingshausen	5100,9	25,1	340,4	4760,6
5566	Steinfurt	2044,5	16,0	633,9	1410,7
5570	Warendorf	1070,2	14,2	463,6	606,7
5711	Bielefeld	631,1	17,6	91,5	539,5
5754	Gütersloh	1135,9	16,0	340,0	795,9
5758	Herford	800,9	15,1	159,8	641,1
5762	Höxter	671,6	9,6	422,4	0,0
5766	Lippe	1445,9	15,1	436,1	1009,8
5770	Minden-Lübbecke	1123,8	15,1	403,7	720,1
5774	Paderborn	973,5	14,3	439,6	533,9
5913	Dortmund	2476,9	23,7	168,6	2308,3
5954	Ennepe-Ruhr	1551,1	21,8	202,0	1349,1
5958	Hochsauerlandkreis	1048,5	9,8	688,1	0,0
5962	Märkischer Kreis	1304,9	13,7	373,1	931,8
5966	Olpe	540,2	11,3	251,7	288,6
5970	Siegen-Wittgenstein	978,8	14,2	398,8	580,0
5974	Soest	1417,4	14,2	469,5	947,8
5978	Unna	2540,5	21,3	269,6	2270,9
6431	Bergstraße	824,3	23,9	251,3	573,0
6432	Darmstadt-Dieburg	1332,0	21,9	276,3	1055,8
6433	Groß-Gerau	952,9	37,4	158,0	794,9
6434	Hochtaunuskreis	497,2	27,8	168,6	328,5
6435	Main-Kinzig-Kreis	1452,6	20,3	492,1	960,6
6436	Main-Taunus-Kreis	3711,6	37,4	237,9	3473,7
6437	Odenwaldkreis	283,9	10,1	216,5	67,4
6438	Offenbach	1376,8	26,5	140,8	1236,0
6439	Rheingau-Taunus-Kreis	688,3	22,9	286,1	402,2
6440	Wetteraukreis	1040,1	22,6	385,8	654,3
6531	Gießen	1161,4	22,2	300,9	860,5
6532	Lahn-Dill-Kreis	920,6	19,1	375,6	545,0
6533	Limburg-Weilburg	654,7	18,5	260,5	394,2
6534	Marburg-Biedenkopf	755,8	15,1	440,7	315,1
6535	Vogelsbergkreis	617,9	11,1	515,3	102,7
6631	Fulda	1346,5	16,1	483,3	863,3
6632	Hersfeld-Rotenburg	1009,0	12,8	386,5	622,5
6633	Kassel	1504,2	22,4	492,1	1012,1

AGS	Kreis/Kreisregion	NOx-Emissionen im Kreis 2020	NO2-Konzentration 2020 (Jahresmittel)	Zulässige NOx- Emissionen	Erforderliche Verminderung ^a NOx-Emission
		t N a-1	µg m-3 Luft	t N a-1	t N a-1
6634	Schwalm-Eder-Kreis	794,2	11,3	541,0	253,2
6635	Waldeck-Frankenberg	678,8	9,6	650,8	0,0
6636	Werra-Meißner-Kreis	480,4	9,8	360,8	0,0
7131	Ahrweiler	620,3	17,4	278,1	342,3
7132	Altenkirchen (Westerwald)	340,5	10,1	226,0	114,5
7133	Bad Kreuznach	542,7	16,3	304,8	237,9
7134	Birkenfeld	267,9	7,5	272,4 ^a	0,0
7135	Cochem-Zell	317,8	9,2	245,3	0,0
7137	Mayen-Koblenz	1590,0	23,3	324,9	1265,2
7138	Neuwied	726,8	22,1	221,4	505,4
7140	Rhein-Hunsrück-Kreis	635,1	16,8	346,7	288,4
7141	Rhein-Lahn-Kreis	514,2	16,8	274,2	240,0
7143	Westerwaldkreis	878,8	16,7	348,4	530,3
7231	Bernkastel-Wittlich	520,3	10,2	411,1	109,1
7232	Eifelkreis Bitburg-Prüm	637,5	9,5	597,6	0,0
7233	Vulkaneifel	377,5	6,3	322,4	0,0
7235	Trier-Saarburg	882,4	17,7	438,2	444,2
7331	Alzey-Worms	1179,0	18,9	247,4	931,5
7332	Bad-Dürkheim	526,6	13,6	249,9	276,7
7333	Donnersbergkreis	395,4	9,2	225,3	0,0
7334	Germersheim	728,3	20,8	165,8	562,5
7335	Kaiserslautern	783,0	14,8	275,6	507,4
7336	Kusel	227,3	9,5	202,4	0,0
7337	Südliche Weinstraße	572,6	12,2	259,1	313,5
7338	Rhein-Pfalz	2973,7	26,5	165,4	2808,2
7339	Mainz-Bingen	1542,5	26,4	245,7	1296,8
7340	Südwestpfalz	602,7	10,2	395,3	207,4
8115	Böblingen	1315,8	23,5	218,6	1097,2
8116	Esslingen	1462,1	26,4	225,6	1236,5
8117	Göppingen	911,4	17,1	226,0	685,5
8118	Ludwigsburg. Landkr.	2751,9	29,2	317,1	2434,8
8119	Rems-Murr-Kreis	936,0	23,4	301,3	634,7
8125	Heilbronn	1583,9	21,3	421,7	1162,2
8126	Hohenlohekreis	495,1	13,9	274,2	220,9
8127	Schwäbisch Hall	1251,2	10,9	520,2	731,0

AGS	Kreis/Kreisregion	NOx-Emissionen im Kreis 2020	NO2-Konzentration 2020 (Jahresmittel)	Zulässige NOx-Emissionen	Erforderliche Verminderung ^a NOx-Emission
		t N a-1	µg m-3 Luft	t N a-1	t N a-1
8128	Main-Tauber-Kreis	601,4	13,8	459,3	142,1
8135	Heidenheim	739,5	12,7	220,7	518,8
8136	Ostalbkreis	1097,5	14,7	530,8	566,7
8215	Karlsruhe	3091,9	21,2	443,8	2648,1
8216	Rastatt	1002,0	18,8	315,0	687,0
8225	Neckar-Odenwald-Kreis	590,3	11,3	395,6	194,6
8226	Rhein-Neckar	3564,6	26,7	464,3	3100,3
8235	Calw	363,4	8,0	281,9	0,0
8236	Enzkreis	982,4	18,5	234,8	747,7
8237	Freudenstadt	480,9	10,7	307,3	173,6
8315	Breisgau-Hochschwarzwald	1600,5	17,4	550,1	1050,3
8316	Emmendingen	515,6	14,6	243,2	272,4
8317	Ortenaukreis	1833,5	17,4	667,0	1166,5
8325	Rottweil	703,9	14,3	269,6	434,2
8326	Schwarzwald-Baar-Kreis	691,1	11,4	362,9	328,2
8327	Tuttlingen	462,5	11,4	257,7	204,8
8335	Konstanz	828,0	15,8	325,2	502,8
8336	Lörrach	668,5	21,3	295,3	373,2
8337	Waldshut	505,3	12,0	428,4	76,9
8415	Reutlingen	869,2	17,4	384,0	485,2
8416	Tübingen	742,8	16,9	181,3	561,6
8417	Zollernalbkreis	556,9	10,8	322,8	234,1
8425	Alb-Donau-Kreis	1713,4	20,8	520,9	1192,5
8426	Biberach	817,2	14,7	494,5	322,7
8435	Bodenseekreis	876,4	16,3	245,7	630,7
8436	Ravensburg	1171,8	16,9	573,0	598,8
8437	Sigmaringen	486,7	9,6	425,5	0,0
9171	Altötting	823,4	14,3	205,6	617,9
9172	Berchtesgadener Land	434,6	17,3	324,5	110,1
9173	Bad Tölz-Wolfratshausen	430,4	12,4	395,3	35,2
9174	Dachau	466,2	21,9	202,7	263,5
9175	Ebersberg	460,6	22,8	192,9	267,7
9176	Eichstätt	1267,2	17,3	474,5	792,8
9177	Erding	503,1	31,4	306,9	196,1
9178	Freising	1006,0	31,4	280,5	725,5

AGS	Kreis/Kreisregion	NOx-Emissionen im Kreis 2020	NO2-Konzentration 2020 (Jahresmittel)	Zulässige NOx- Emissionen	Erforderliche Verminderung ^a NOx-Emission
		t N a-1	µg m-3 Luft	t N a-1	t N a-1
9179	Fürstenfeldbruck	698,1	19,8	153,1	545,0
9180	Garmisch-Partenkirchen	304,7	12,1	374,9 ^a	0,0
9181	Landsberg am Lech	531,8	13,5	283,3	248,4
9182	Miesbach	488,0	16,8	313,3	174,8
9183	Mühl Dorf a. Inn	507,0	12,4	283,3	223,7
9184	München (mit München)	3472,3	25,6	343,5	3128,8
9185	Neuburg-Schrobenhausen	361,3	12,5	260,8	100,5
9186	Pfaffenhofen a.d. Ilm	787,4	16,8	267,2	520,3
9187	Rosenheim	1560,9	20,5	531,5	1029,4
9188	Starnberg	363,3	17,1	171,8	191,5
9189	Traunstein	761,9	12,6	551,9	210,0
9190	Weilheim-Schongau	691,1	11,6	340,4	350,7
9271	Deggendorf	557,1	17,0	303,0	254,0
9272	Freyung-Grafenau	330,9	7,3	360,8 ^a	0,0
9273	Kelheim	894,0	12,4	379,1	515,0
9274	Landshut	837,1	15,8	497,3	339,8
9275	Passau	1082,9	21,5	590,6	492,3
9276	Regen	363,1	8,6	353,0	0,0
9277	Rottal-Inn	606,4	13,2	455,1	151,3
9278	Straubing-Bogen	718,0	14,8	448,4	269,5
9279	Dingolfing-Landau	482,6	17,9	308,7	174,0
9371	Amberg-Sulzbach	651,8	11,4	460,0	191,7
9372	Cham	576,1	11,0	551,5	24,5
9373	Neumarkt i.d. OPf.	751,2	11,5	471,6	279,5
9374	Neustadt a.d. Waldnaab	872,0	17,4	532,9	339,2
9375	Regensburg	1192,6	21,1	515,7	676,9
9376	Schwandorf	861,6	13,1	517,1	344,6
9377	Tirschenreuth	580,3	9,8	396,0	0,0
9471	Bamberg	918,9	17,8	430,8	488,1
9472	Bayreuth	908,5	17,4	473,0	435,5
9473	Coburg	462,9	12,2	223,5	239,4
9474	Forchheim	370,0	13,4	228,8	141,2
9475	Hof	779,0	11,8	341,4	437,6
9476	Kronach	473,0	10,7	229,5	243,5
9477	Kulmbach	374,3	14,4	230,2	144,1

AGS	Kreis/Kreisregion	NOx-Emissionen im Kreis 2020	NO ₂ -Konzentration 2020 (Jahresmittel)	Zulässige NOx-Emissionen	Erforderliche Verminderung ^a NOx-Emission
		t N a-1	µg m-3 Luft	t N a-1	t N a-1
9478	Lichtenfels	271,8	10,5	183,4	88,4
9479	Wunsiedel i. Fichtelgebirge	447,2	10,1	218,6	228,6
9571	Ansbach	1240,9	12,8	727,9	513,0
9572	Erlangen-Höchststadt	1078,3	24,2	223,8	854,4
9573	Fürth	479,2	22,8	130,2	348,9
9574	Nürnberger-Land	1878,3	26,1	346,7	1531,6
9575	Neustadt a.d. Aisch-Bad Windsheim	520,1	8,8	446,0	0,0
9576	Roth	916,1	19,4	330,5	585,6
9577	Weißenburg-Gunzenhausen	390,2	9,1	340,4	0,0
9671	Aschaffenburg	1194,9	21,4	267,9	927,0
9672	Bad Kissingen	516,7	10,1	399,9	116,9
9673	Rhön-Grabfeld	368,4	9,4	359,0	0,0
9674	Haßberge	393,9	10,5	337,2	56,7
9675	Kitzingen	640,0	15,1	241,1	398,8
9676	Miltenberg	466,7	14,9	252,0	214,7
9677	Main-Spessart	811,3	13,8	466,4	344,9
9678	Schweinfurt	802,5	19,2	308,7	493,8
9679	Würzburg	1164,2	19,9	369,2	794,9
9771	Aichach-Friedberg	635,1	18,7	276,3	358,8
9772	Augsburg	1592,5	22,5	428,0	1164,5
9773	Dillingen a.d. Donau	340,3	10,6	279,1	61,1
9774	Günzburg	543,2	15,9	267,5	275,7
9775	Neu-Ulm	790,4	20,8	181,3	609,2
9776	Lindau (Bodensee)	291,7	13,7	126,0	165,7
9777	Ostallgäu	948,5	13,3	513,2	435,3
9778	Unterallgäu	948,0	15,5	457,6	490,5
9779	Donau-Ries	699,2	12,0	449,1	250,1
9780	Oberallgäu	907,5	18,2	586,1	321,4
10041	Regionalverband Saarbrücken	977,9	18,0	157,7	820,2
10042	Merzig-Wadern	435,6	15,3	202,0	233,6
10043	Neunkirchen	407,5	14,3	87,3	320,2
10044	Saarlouis	1360,2	15,6	170,0	1190,2
10045	Saarpfalz-Kreis	444,3	13,1	153,5	290,9

AGS	Kreis/Kreisregion	NOx-Emissionen im Kreis 2020	NO2-Konzentration 2020 (Jahresmittel)	Zulässige NOx-Emissionen	Erforderliche Verminderung ^a NOx-Emission
		t N a-1	µg m-3 Luft	t N a-1	t N a-1
10046	St. Wendel	266,5	9,4	166,8	0,0
11000	Berlin	6160,0	27,8	316,4	5843,6
12060	Barnim	678,4	15,9	525,5	152,9
12061	Dahme-Spreewald	983,7	16,0	802,2	181,5
12062	Elbe-Elster	479,3	8,7	672,3 ^a	0,0
12063	Havelland	691,5	13,7	609,6	81,9
12064	Märkisch-Oderland	1135,6	14,0	779,6	355,9
12065	Oderhavel	763,9	13,0	635,3	128,6
12066	Oberspreewald-Lausitz	928,0	9,3	431,2	0,0
12067	Oder-Spree	1600,2	11,1	861,3	739,0
12068	Ostprignitz-Ruppin	1135,2	8,9	889,1	0,0
12069	Potsdam-Mittelmark	2171,8	16,9	1059,4	1112,4
12070	Prignitz	561,9	6,5	755,0 ^a	0,0
12071	Spree-Neiße	5449,0	13,6	655,4	4793,6
12072	Teltow-Fläming	1127,0	12,4	740,9	386,1
12073	Uckermark	1315,3	6,7	1092,2	0,0
13071	Mecklenburgische Seenplatte	1614,8	7,7	1935,5 ^a	0,0
13072	Rostock	1969,6	14,0	1292,4	677,1
13073	Vorpommern-Rügen	993,2	7,4	1282,9 ^a	0,0
13074	Nordwestmecklenburg	1110,5	9,5	771,9	0,0
13075	Vorpommern-Greifswald	1709,7	6,2	1426,2	0,0
13076	Ludwigslust-Parchim	1775,3	9,6	1724,7	0,0
14521	Erzgebirgskreis	1471,0	16,2	743,7	727,2
14522	Mittelsachsen	1277,5	12,4	749,0	528,5
14523	Vogtlandkreis	738,0	9,9	513,5	0,0
14524	Zwickau	936,1	13,7	334,7	601,4
14625	Bautzen	1212,2	10,8	851,1	361,2
14626	Görlitz	3889,3	11,9	783,8	3105,5
14627	Meißen	1072,9	16,0	514,2	558,7
14628	Sächsische Schweiz-Osterzgeb.	1982,2	19,2	720,1	1262,1
14729	Leipzig	3509,6	17,3	688,8	2820,8
14730	Nordsachsen	1190,4	16,7	714,2	476,2
15081	Altmarkkreis Salzwedel	711,0	8,0	809,2 ^a	0,0
15083	Börde	2148,1	16,5	908,1	1240,0

AGS	Kreis/Kreisregion	NOx-Emissionen im Kreis 2020 t N a-1	NO ₂ -Konzentration 2020 (Jahresmittel) µg m ⁻³ Luft	Zulässige NOx-Emissionen t N a-1	Erforderliche Verminderung ^a NOx-Emission t N a-1
15084	Burgenlandkreis	1596,9	13,4	498,8	1098,1
15085	Harz	952,0	8,6	740,2	0,0
15086	Jerichower Land	1320,5	16,5	558,2	762,3
15087	Mansfeld-Südharz	760,9	8,7	513,5	0,0
15088	Saale	2205,5	14,8	554,4	1651,1
15089	Salzlandkreis	1194,8	16,5	505,1	689,7
15090	Stendal	978,9	7,7	854,6	0,0
15091	Wittenberg	2191,8	13,1	1284,7	907,1
16051	Erfurt	500,5	15,1	95,7	404,8
16061	Eichsfeld	650,3	8,0	329,8	0,0
16062	Nordhausen	317,6	11,3	252,4	65,2
16063	Wartburgkreis	888,1	10,4	483,6	404,5
16064	Unstrut-Hainich-Kreis	413,2	8,5	343,9	0,0
16065	Kyffhäuserkreis	275,6	6,5	365,3 ^a	0,0
16066	Schmalkalden-Meiningen	410,4	7,0	440,3 ^a	0,0
16067	Gotha	474,1	13,2	328,1	146,1
16068	Sömmerda	331,7	11,4	284,4	47,3
16069	Hildburghausen	417,5	9,4	380,1	0,0
16070	Ilm-Kreis	474,1	11,3	285,1	189,0
16071	Weimarer Land	609,4	11,8	312,6	296,8
16072	Sonneberg	247,5	7,7	162,6	0,0
16073	Saalfeld-Rudolstadt	333,5	11,9	353,4 ^a	0,0
16074	Saale-Holzland	974,6	12,8	329,1	645,6
16075	Saale-Orla-Kreis	711,0	9,4	406,2	0,0
16076	Greiz	573,5	11,5	349,1	224,4
16077	Altenburger Land	315,5	10,8	200,6	114,9

^a Kreisregionen ohne Minderungsbedarf: (i) in 50 Kreisregionen unterschreitet die NO₂-Konzentration im Kreis bereits aktuell das Qualitätsziel, eine Minderung der Emission ist daher nicht erforderlich (auch wenn die aktuelle Emission größer ist als die nach Gl. 21 berechnete zulässige Emission); (ii) in 2 Kreisregionen ist die aktuelle Emission geringer als die berechnete zulässige Emission, als zulässige Emission wird aufgrund des Verschlechterungsverbots (s. Kapitel 1.2) dann die (niedrigere) aktuelle Emission verwendet.

A.8 Anhang Nationale Stickstoff-Obergrenze

Tabelle 44: Nationale Stickstoff-Obergrenze: Ist-Emissionen, zulässige Emissionen (Obergrenzen) und erforderliche Verminderung der Emissionen von reaktiven Stickstoff-Verbindungen in den Kreisregionen zur Einhaltung der Qualitätsziele^a der Schutzgüter^b.

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ^f NH ₃ NO _x größer wegen	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹		
1051	Dithmar- schen	3759	1272	444	3272	7844	16591	511	230	362	1754	4414	7272	3248	1042	82	1518	3430	9319	Veg	Öko
1053	Herzogtum Lauenburg	2146	884	294	1513	3835	8673	292	160	241	1174	2761	4628	1854	725	53	339	1074	4045	Veg	Öko
1054	Nordfrie- land	6684	1259	666	5260	11903	25773	909	227	553	3059	6158	10907	5775	1031	113	2202	5745	14866	Veg	Öko
1055	Ostholstein	2598	1631	444	1957	4365	10994	353	295	359	1523	3198	5727	2244	1336	85	435	1167	5267	Veg	Öko
1056	Pinneberg	1445	1017	196	1654	2742	7054	197	184	152	859	1642	3034	1249	833	43	795	1099	4020	Veg	Öko
1057	Plön	2518	711	306	1444	4038	9016	342	129	254	1256	2880	4861	2175	583	52	188	1157	4155	Veg	Öko
1058	Rendsburg- Eckernförde	6567	2547	745	4741	11506	26107	893	460	604	3313	7125	12396	5674	2087	142	1428	4381	13711	Veg	Öko
1059	Schleswig- Flensburg	7595	1592	735	4580	13146	27648	1033	288	609	2805	7125	11860	6561	1305	126	1775	6022	15788	Veg	Öko
1060	Segeberg	3244	1143	373	2236	5150	12145	441	206	304	1389	3660	6002	2803	936	68	847	1489	6143	Veg	Öko
1061	Steinburg	3601	973	332	2177	5928	13012	490	176	274	1127	3124	5191	3111	798	58	1050	2803	7821	Veg	Öko
1062	Stormarn	1720	1159	242	985	2830	6935	234	209	192	744	2147	3527	1486	950	49	240	683	3408	Veg	Öko
2000	Hamburg	3710	6636	947	3153	1356	15802	486	0	680	1159	647	2972	3224	6750	266	1994	709	12944	Veg	Ge- sund
3151	Gifhorn	1227	657	211	1777	4458	8329	84	65	172	1143	2495	3959	1142	592	39	634	1963	4370	Veg	Öko
3153	Goslar	435	758	104	1477	1211	3985	30	75	78	1137	1017	2337	405	683	26	340	193	1648	Veg	Öko
3154	Helmstadt	539	1357	336	956	1820	5008	37	134	220	469	1152	2012	502	1223	116	487	668	2996	Veg	Öko
3155	Northeim	1019	683	175	1380	2547	5804	70	68	142	995	2083	3357	949	615	33	385	464	2447	Veg	Öko

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ^f NH ₃ NO _x größer wegen	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹		
3157	Peine	537	720	108	579	1546	3491	37	71	86	258	916	1368	500	649	22	321	630	2123	Veg	Öko
3158	Wolfenbüt- tel	649	2780	221	1382	2475	7508	45	275	165	658	1596	2739	605	2505	55	724	880	4769	Veg	Öko
3159	Göttingen	1175	1296	239	1844	3168	7722	81	128	186	1438	2782	4615	1094	1167	53	406	387	3107	Veg	Öko
3241	Region Han- nover	1975	3418	423	3203	5781	14800	136	338	317	1921	3685	6397	1839	3080	106	1282	2096	8403	Veg	Öko
3251	Diepholz	6016	1053	484	2832	11683	22068	414	104	398	1414	4020	6351	5602	949	85	1418	7662	15717	Veg	Öko
3252	Hameln-Pyr- mont	791	519	128	1257	2409	5105	54	51	102	836	1796	2840	737	468	26	421	613	2265	Veg	Öko
3254	Hildesheim	901	1137	212	1845	2926	7021	62	113	165	1120	2057	3516	839	1024	47	726	869	3505	Veg	Öko
3255	Holzminde	516	416	86	800	1279	3096	35	41	69	680	1191	2016	480	375	17	120	88	1080	Veg	Öko
3256	Nienburg (Weser)	2645	700	273	1487	6121	11227	182	69	224	979	2734	4189	2463	631	50	508	3387	7038	Veg	Öko
3257	Schaumburg	742	744	114	1033	1963	4596	51	74	90	617	1271	2103	691	670	24	416	692	2493	Veg	Öko
3351	Celle	1612	560	189	1803	3741	7904	111	55	152	1326	2232	3877	1501	504	38	476	1508	4028	Veg	Öko
3352	Cuxhaven	8253	1590	707	2899	13400	26851	568	157	583	2375	5655	9338	7686	1433	124	524	7745	17512	Veg	Öko
3353	Harburg	1499	1007	200	1875	3695	8276	103	100	160	1003	2242	3608	1396	908	40	872	1453	4668	Veg	Öko
3354	Lüchow- Dannenberg	1010	308	161	821	3144	5444	69	30	133	532	1375	2140	941	277	27	289	1770	3304	Veg	Öko
3355	Lüneburg	1277	586	194	1384	3743	7184	88	58	157	847	1891	3041	1189	528	36	537	1853	4143	Veg	Öko
3356	Osterholz	1682	369	166	740	3552	6510	116	37	136	537	1513	2338	1566	333	30	203	2040	4172	Veg	Öko
3357	Rotenburg	6232	1062	510	3099	12771	23673	429	105	422	1695	5391	8041	5803	957	88	1404	7380	15632	Veg	Öko
3358	Heidekreis	2121	1050	242	2439	4910	10762	146	104	195	1630	3190	5266	1975	946	47	809	1720	5496	Veg	Öko
3359	Stade	3429	791	316	2058	6932	13526	236	78	258	1227	3173	4972	3193	713	59	831	3759	8555	Veg	Öko
3360	Uelzen	1160	573	198	1891	3745	7566	80	57	161	975	2577	3850	1081	516	36	916	1168	3716	Veg	Öko

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ⁱ NH ₃ NO _x größer wegen	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹		
3361	Verden	1897	626	178	1006	3851	7558	130	62	145	588	1509	2435	1766	564	33	418	2342	5123	Veg	Öko
3451	Ammerland	2276	499	197	932	4319	8223	157	49	161	741	1809	2917	2120	449	35	191	2511	5306	Veg	Öko
3452	Aurich	3579	887	360	1993	7901	14719	246	88	292	1600	3661	5888	3333	799	67	392	4240	8832	Veg	Öko
3453	Cloppen- burg	11951	980	505	2205	11108	26748	822	97	418	1076	4409	6822	11130	883	86	1129	6699	19926	Veg	Öko
3454	Emsland	13792	2440	782	3573	16932	37520	948	242	639	2142	7641	11612	12844	2198	143	1432	9291	25908	Veg	Öko
3455	Friesland	2374	869	302	1263	4803	9610	163	86	221	982	2160	3613	2210	783	81	281	2642	5997	Veg	Öko
3456	Grafschaft Bentheim	5247	808	322		7199	13575	361	80	260		2702	3403	4886	728	61		4497	10172	Veg	Öko
3457	Leer	3423	750	307	1280	6872	12633	235	74	252	866	2500	3927	3188	676	55	414	4373	8706	Veg	Öko
3458	Oldenburg	5693	1297	354	1818	7425	16588	392	128	287	989	2891	4686	5302	1168	68	829	4535	11902	Veg	Öko
3459	Osnabrück	7817	2138	570	3355	11915	25795	538	212	456	2163	5748	9117	7279	1927	114	1191	6166	16678	Veg	Öko
3460	Vechta	8599	826	343	1288	6788	17844	591	82	281	659	2658	4271	8008	744	61	629	4130	13573	Veg	Öko
3461	Weser- marsch	2727	547	251	1029	5743	10298	188	54	206	838	1879	3165	2540	493	45	192	3863	7133	Veg	Öko
3462	Wittmund	1886	284	174	938	3965	7247	130	28	144	776	1808	2886	1756	256	30	162	2157	4361	Veg	Öko
4011	Bremen	1212	2736	313	1240	882	6383	71	282	222	480	390	1446	1141	2454	91	760	493	4937	Veg	Ge- sund
5112	Duisburg, Essen, Mühlheim, Oberh.	471	8498	186		436	9591	62	1052	111		408	1633	409	7446	74		28	7958	Veg	Ge- sund
5124	Wuppertal	325	1310	104		431	2170	43	85	63		427	618	283	1226	41		3	1552	Veg	Ge- sund
5154	Kleve	4415	1623	335		7813	14186	577	299	269		2724	3868	3838	1325	66		5089	10318	Veg	Öko
5158	Mettmann	577	3156	197		1066	4996	75	254	122		959	1412	501	2902	75		106	3585	Veg	Ge- sund

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Insges.	Erforderliche Verminderung									
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.		NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ^f			
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	NH ₃	NO _x	
																				größer wegen				
5162	Neuss	724	6706	182		2183	9795	95	1135	124		1467	2821	629	5570	59		716	6974	Veg	Ge- sund			
5166	Viersen	1273	1659	211		3164	6306	166	205	146		1344	1861	1107	1454	65		1820	4445	Veg	Ge- sund			
5170	Wesel	2631	2237	254		4547	9669	344	319	192		2250	3106	2287	1918	61		2296	6563	Veg	Ge- sund			
5334	Städtere- gion Aachen	572	3841	138		1865	6416	75	706	95		1468	2344	497	3134	43		397	4072	Veg	Öko			
5358	Düren	630	987	163		2613	4394	82	182	121		1633	2019	548	806	42		980	2375	Veg	Öko			
5362	Rhein-Erft- Kr	686	9755	310		2020	12771	90	1687	196		1434	3407	597	8068	114		586	9365	Veg	Ge- sund			
5366	Euskirchen	1049	891	178		2910	5028	137	164	138		2195	2634	912	727	40		715	2394	Veg	Öko			
5370	Heinsberg	977	653	136		3228	4993	128	120	104		1381	1733	849	533	31		1847	3260	Veg	Öko			
5374	Oberbergi- scher Kreis	1092	757	138		2342	4329	143	139	107		2340	2729	949	618	31		2	1600	Veg	Öko			
5378	Rheinisch- Berg.-Krs.	678	1151	158		1116	3103	89	164	102		1101	1456	589	987	56		15	1647	Veg	Ge- sund			
5382	Rhein-Sieg	1092	2385	221		2517	6214	143	400	158		2020	2721	949	1984	63		497	3493	Veg	Ge- sund			
5515	Münster	707	765	79	443	1140	3133	92	95	57	230	649	1123	614	670	22	213	491	2010	Veg	Ge- sund			
5554	Borken	7630	1196	441		9458	18726	997	220	357		4271	5846	6633	976	84		5187	12880	Veg	Öko			
5558	Coesfeld	5002	874	276		6803	12956	654	161	224		3524	4563	4349	714	52		3280	8394	Veg	Öko			
5562	Reckling- hausen	1975	5065	273		2891	10204	258	304	183		1818	2563	1716	4761	91		1073	7641	Veg	Ge- sund			
5566	Steinfurt	6788	1977	444	2638	9277	21124	887	364	354	1521	4534	7660	5901	1613	90	1117	4743	13465	Veg	Öko			
5570	Warendorf	5455	1122	320	1939	7575	16411	713	206	259	993	3688	5859	4742	916	62	945	3887	10552	Veg	Öko			

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung									
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ⁱ			
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	NH ₃ größer	NO _x wegen	
5711	Bielefeld	218	619	54	555	517	1963	28	79	36	341	422	907	189	540	18	215	95	1056	Veg	Ge- sund		
5754	Gütersloh	2819	1106	234	1580	4651	10391	368	203	184	968	2405	4129	2451	903	50	612	2246	6262	Veg	Öko		
5758	Herford	800	760	107	860	1403	3930	105	118	78	466	933	1700	696	641	29	394	470	2230	Veg	Ge- sund		
5762	Höxter	2082	664	194	1717	4233	8890	272	122	157	1164	3093	4808	1810	542	37	553	1140	4081	Veg	Öko		
5766	Lippe	1344	1285	233	2312	3527	8702	176	236	172	1538	2905	5027	1169	1049	61	774	622	3674	Veg	Öko		
5770	Minden- Lübbecke	2429	1096	228	1421	4743	9917	317	202	180	850	2259	3808	2112	895	48	572	2484	6109	Veg	Öko		
5774	Paderborn	2717	952	220		4311	8201	355	175	175		3020	3725	2362	777	45		1291	4476	Veg	Öko		
5913	Dortmund	308	2474	136		381	3299	40	165	82		366	653	268	2308	54		15	2645	Veg	Ge- sund		
5954	Ennepe- Ruhr	468	1439	115		998	3020	61	90	77		976	1205	407	1349	38		22	1815	Veg	Ge- sund		
5958	Hochsauer- landkreis	1819	1013	218		3608	6658	238	186	170		3445	4040	1581	826	47		163	2618	Veg	Öko		
5962	Märkischer Kreis	914	1250	148		2004	4317	119	230	107		1900	2356	795	1020	41		105	1960	Veg	Öko		
5966	Olpe	478	525	70		955	2028	63	97	53		954	1166	416	429	18		0	862	Veg	Öko		
5970	Siegen-Witt- genstein	434	898	102		914	2348	57	165	72		914	1208	377	733	30		0	1140	Veg	Öko		
5974	Soest	2706	1504	245		5313	9769	354	277	194		3165	3989	2353	1227	51		2149	5779	Veg	Öko		
5978	Unna	1697	2712	211		2833	7453	222	441	149		1773	2585	1475	2271	62		1060	4869	Veg	Ge- sund		
6431	Bergstraße	432	817	90		1219	2558	161	226	67		905	1358	272	592	23		314	1200	Öko	Öko		
6432	Darmstadt- Dieburg	616	1301	129		1433	3479	229	245	92		1028	1593	387	1056	37		406	1886	Öko	Ge- sund		

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung									
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ⁱ			
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	NH ₃ größer	NO _x wegen	
6433	Groß-Gerau	220	952	74		639	1885	82	157	51		292	582	138	795	22		347	1303	Öko	Ge- sund		
6434	Hoch- taunus-kreis	166	492	50		469	1177	62	136	36		443	676	105	356	14		26	501	Öko	Öko		
6435	Main-Kinzig- Kreis	902	1472	180		2232	4786	335	406	134		1925	2801	567	1065	45		306	1984	Öko	Öko		
6436	Main- Taunus- Kreis	575	3642	223		1434	5874	214	168	137		641	1160	361	3474	86		793	4714	Öko	Ge- sund		
6437	Odenwald- krs	466	274	66		1045	1851	173	76	51		995	1295	293	198	15		50	556	Öko	Öko		
6438	Offenbach	203	1341	85		265	1893	75	105	53		236	469	127	1236	32		29	1424	Öko	Ge- sund		
6439	Rheingau- Taunus-Krs.	233	679	66		567	1545	87	187	50		535	859	147	491	17		32	686	Öko	Öko		
6440	Wetter- aukrs.	790	1025	165		2381	4361	293	283	127		1489	2192	497	742	38		892	2168	Öko	Öko		
6531	Gießen	577	1099	135		1377	3188	214	239	98		1157	1708	363	860	36		220	1480	Öko	Ge- sund		
6532	Lahn-Dill- Kreis	381	931	105		1030	2446	142	257	77		1008	1484	239	674	28		22	963	Öko	Öko		
6533	Limburg- Weilburg	547	649	97		1339	2632	203	179	76		1180	1638	344	470	21		159	993	Öko	Öko		
6534	Marburg- Biedenkopf	929	736	157		2486	4307	345	203	123		1926	2597	584	532	34		559	1710	Öko	Öko		
6535	Vogelsberg- kreis	1428	611	187	1428	3187	6841	530	169	152	1154	2872	4876	898	442	35	275	315	1965	Öko	Öko		
6631	Fulda	1718	1289	242	1438	3751	8437	638	356	185	1245	3098	5522	1080	933	57	193	653	2915	Öko	Öko		

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung								
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ^f NH ₃ NO _x		
		t Na ⁻¹	t Na ⁻	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	t Na ⁻¹	größer wegen	
6632	Hersfeld-Rotenburg	814	1000	130	931	1683	4559	303	276	101	738	1443	2861	512	724	29	193	240	1697	Öko	Öko	
6633	Kassel	1017	1489	208	1585	2388	6687	378	411	153	956	1958	3856	639	1078	55	629	429	2830	Öko	Öko	
6634	Schwalm-Eder-Kreis	1574	787	199	1500	3346	7406	585	217	161	1013	2196	4172	989	570	38	487	1150	3234	Öko	Öko	
6635	Waldeck-Frankenbg.	1698	663	219	1754	3831	8166	631	183	177	1389	3128	5508	1068	480	42	366	703	2658	Öko	Öko	
6636	Werra-Meißner-Krs.	612	468	112	916	1630	3738	227	129	89	789	1549	2783	385	339	23	127	81	955	Öko	Öko	
7131	Ahrweiler	353	614	78		772	1817	152	167	59		741	1119	201	447	19		31	698	Öko	Öko	
7132	Altenkirchen	428	334	67		910	1738	185	91	52		908	1236	243	243	15		1	502	Öko	Öko	
7133	Bad Kreuznach	312	531	98		874	1815	134	144	75		770	1124	177	386	23		104	691	Öko	Öko	
7134	Birkenfeld	337	246	64		875	1521	145	67	51		873	1136	191	179	13		2	385	Öko	Öko	
7135	Cochem-Zell	294	314	61		847	1516	127	86	49		827	1089	167	229	12		20	427	Öko	Öko	
7137	Mayen-Koblenz	617	1564	155		1384	3720	266	298	111		1188	1863	351	1265	44		197	1856	Öko	Ge-sund	
7138	Neuwied	397	717	79		827	2020	171	195	58		802	1226	226	522	21		25	794	Öko	Öko	
7140	Rhein-Hunsrück-Krs.	554	628	109		1545	2837	239	171	86		1513	2009	315	457	23		32	828	Öko	Öko	
7141	Rhein-Lahn-Kreis	380	502	82		973	1938	164	137	64		938	1302	216	366	18		36	635	Öko	Öko	
7143	Westerwald-kreis	661	883	120		1357	3021	285	240	92		1348	1966	376	643	29		9	1056	Öko	Öko	
7231	Bernkastel-Wittlich	641	513	110		1646	2910	277	140	88		1573	2078	364	374	21		73	832	Öko	Öko	

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ⁱ NH ₃ NO _x	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	größer wegen	
7232	Eifelkreis Bitburg- Prüm	2481	626	263		5315	8685	1071	170	216		4772	6228	1411	456	47		543	2456	Öko	Öko
7233	Vulkaneifel	776	384	111		1758	3029	335	104	89		1730	2258	441	279	22		28	770	Öko	Öko
7235	Trier- Saarbg.	649	872	129		1589	3239	280	237	100		1569	2186	369	635	29		20	1052	Öko	Öko
7331	Alzey- Worms	342	1119	143		1470	3073	147	187	104		651	1090	194	932	39		819	1983	Öko	Ge- sund
7332	Bad-Dürk- heim	109	529	63		501	1203	47	144	47		236	473	62	385	17		266	729	Öko	Öko
7333	Donners- bergkreis	312	418	79		988	1796	135	114	63		826	1137	178	304	16		162	659	Öko	Öko
7334	Germers- heim	151	712	53		883	1800	65	150	39		582	835	86	562	14		302	964	Öko	Ge- sund
7335	Kaiserslau- tern	361	764	89		861	2075	156	208	64		799	1227	205	556	25		62	849	Öko	Öko
7336	Kusel	358	224	69		941	1591	155	61	55		938	1208	204	163	13		3	383	Öko	Öko
7337	Südliche Weinstraße	127	549	74		577	1326	55	149	55		541	799	72	399	19		37	527	Öko	Öko
7338	Rhein-Pfalz	438	2903	878		1924	6143	189	95	502		293	1079	249	2808	376		1631	5064	Öko	Ge- sund
7339	Mainz-Bin- gen	299	1510	132		849	2791	129	214	93		584	1020	170	1297	39		265	1771	Öko	Ge- sund
7340	Südwest- pfalz	538	580	104		1099	2321	232	158	77		1097	1565	306	422	26		2	756	Öko	Öko
8115	Böblingen	467	1274	111		1028	2882	193	177	78		936	1384	275	1097	33		93	1498	Veg	Ge- sund
8116	Esslingen	434	1365	121		917	2836	179	129	83		853	1244	255	1237	38		64	1593	Veg	Ge- sund

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ⁱ NH ₃ NO _x	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	größer wegen	
8117	Göppingen	980	879	129		1614	3602	404	193	95		1574	2267	576	685	33		40	1335	Veg	Ge- sund
8118	Ludwigs- burg	869	2698	242		1554	5364	358	264	161		1193	1976	511	2435	81		362	3388	Veg	Ge- sund
8119	Rems-Murr- Kreis	752	919	124		1519	3315	310	284	92		1347	2034	442	635	32		172	1281	Veg	Ge- sund
8125	Heilbronn	744	1422	184		1991	4341	307	260	137		1830	2534	437	1162	46		161	1806	Veg	Ge- sund
8126	Hohenlohe- kreis	1335	485	126		2119	4066	551	214	101		1958	2824	785	271	24		162	1242	Veg	Öko
8127	Schwäbisch Hall	3676	1171	300		4847	9993	1516	440	235		4049	6240	2160	731	65		798	3754	Veg	Ge- sund
8128	Main-Tau- ber-Kreis	1096	589	168		2298	4151	452	260	136		2220	3068	644	329	32		78	1083	Veg	Öko
8135	Heidenheim	747	706	101		1393	2946	308	187	76		1249	1819	439	519	25		144	1127	Veg	Ge- sund
8136	Ostalbkreis	2270	1068	245		3858	7441	936	472	191		3504	5104	1334	596	54		353	2337	Veg	Öko
8215	Karlsruhe	451	3051	211		1278	4990	186	403	143		1219	1951	265	2648	68		58	3039	Veg	Ge- sund
8216	Rastatt	222	980	87		568	1857	91	293	61		568	1013	130	687	26		0	844	Veg	Ge- sund
8225	Neckar-Oden- wald-K.	804	564	139		1779	3286	332	249	108		1770	2459	473	315	30		9	827	Veg	Öko
8226	Rhein-Neckar	858	3671	276		1657	6462	354	571	182		1444	2550	504	3100	94		214	3912	Veg	Ge- sund
8235	Calw	376	355	66		765	1563	155	157	50		765	1128	221	198	15		0	435	Veg	Öko
8236	Enzkreis	386	948	101		880	2315	159	200	71		850	1280	227	748	29		31	1034	Veg	Ge- sund

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f,g}	NO _x ^{f,g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ⁱ NH ₃ NO _x	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	größer wegen
8237	Freudenstadt	423	460	76		869	1829	175	203	58		867	1303	249	257	18		2	526	Veg	Öko
8315	Breisgau- Hoch- schwarzw.	906	1545	196		2210	4857	374	494	144		1914	2926	532	1050	52		296	1931	Veg	Ge- sund
8316	Emmending.	448	505	78		912	1943	185	223	61		804	1272	263	282	18		108	671	Veg	Öko
8317	Ortenaukreis	970	1745	219		1983	4918	400	579	162		1913	3053	570	1167	58		70	1865	Veg	Ge- sund
8325	Rottweil	752	673	110		1609	3144	310	239	84		1601	2234	442	434	26		9	911	Veg	Ge- sund
8326	Schwarzwald- Baar-Kreis	972	676	134		1876	3658	401	299	104		1862	2666	571	377	30		14	992	Veg	Öko
8327	Tuttlingen	550	448	86		1155	2239	227	198	66		1141	1632	323	250	20		14	607	Veg	Öko
8335	Konstanz	921	810	129		1877	3738	380	307	99		1510	2296	541	503	30		367	1441	Veg	Ge- sund
8336	Lörrach	408	651	90		887	2035	168	277	66		883	1394	240	373	24		4	641	Veg	Ge- sund
8337	Waldshut	944	495	129		1844	3413	389	219	102		1844	2554	555	276	27		0	859	Veg	Öko
8415	Reutlingen	1024	842	153		2280	4299	422	356	117		2241	3137	602	485	36		39	1162	Veg	Ge- sund
8416	Tübingen	359	703	90		803	1955	148	141	64		741	1095	211	562	26		62	860	Veg	Ge- sund
8417	Zollernalb- kreis	547	553	104		1286	2491	226	244	81		1283	1834	322	309	24		3	657	Veg	Öko
8425	Alb-Donau- Kreis	2846	1551	287		4819	9503	1174	358	223		3846	5601	1673	1192	64		974	3902	Veg	Ge- sund
8426	Biberach	2945	804	267		5402	9418	1214	355	217		3824	5611	1731	449	51		1578	3808	Veg	Öko
8435	Bodensee- krs.	780	825	131		1594	3330	322	194	97		1550	2163	458	631	34		44	1167	Veg	Ge- sund

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ^f NH ₃ NO _x	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	größer wegen	
8436	Ravensburg	3893	1162	337		7323	12714	1605	513	274		6333	8725	2288	648	63		990	3989	Veg	Öko
8437	Sigmaringen	1524	478	170		3071	5243	628	211	137		2743	3720	896	267	33		328	1524	Veg	Öko
9171	Altötting	1438	878	175		2313	4803	379	260	125		1667	2431	1059	618	49		646	2372	Veg	Ge- sund
9172	Berchtesga- dener Land	748	429	74		1383	2635	197	163	59		1380	1798	551	266	16		4	837	Veg	Öko
9173	Bad Tölz- Wolftratshs.	931	424	103		2041	3500	245	161	82		2041	2529	686	263	22		0	971	Veg	Öko
9174	Dachau	991	459	113		2079	3643	261	174	91		1684	2210	730	285	22		395	1433	Veg	Öko
9175	Ebersberg	993	450	97		2010	3550	261	171	77		1729	2239	731	279	20		281	1311	Veg	Öko
9176	Eichstätt	924	1294	177		2384	4779	243	491	136		2117	2988	681	803	41		266	1791	Veg	Öko
9177	Erding	2363	498	203		4610	7674	622	189	166		2910	3887	1741	309	37		1700	3787	Veg	Öko
9178	Freising	931	1012	201		2145	4289	245	286	144		1783	2458	686	725	58		362	1831	Veg	Ge- sund
9179	Fürstenfeld- bruck	489	662	91		1116	2359	129	117	67		1074	1386	360	545	25		43	973	Veg	Ge- sund
9180	Garmisch- Partenk.	393	301	54		913	1660	103	114	42		913	1172	289	186	12		0	488	Veg	Öko
9181	Landsberg am Lech	1061	519	122		2333	4035	279	197	98		2185	2759	782	322	24		148	1276	Veg	Öko
9182	Miesbach	806	482	85		1682	3055	212	183	68		1682	2145	594	299	17		0	910	Veg	Öko
9183	Mühldorf a. Inn	2095	499	180		3791	6565	552	189	146		2490	3377	1543	310	34		1301	3188	Veg	Öko
9184	München	538	3542	223		1091	5394	142	413	140		1087	1782	396	3129	83		3	3612	Veg	Ge- sund
9185	Neuburg- Schrobenhs.	902	385	137		1889	3313	238	146	105		1278	1767	665	239	33		611	1547	Veg	Öko

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung									
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ^f			
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	NH ₃	NO _x	
																					größer wegen		
9186	Pfaffenhofen (Ilm)	766	693	127		1865	3451	202	173	98		1449	1921	565	520	29		416	1530	Veg	Ge-sund		
9187	Rosenheim	3310	1479	296		5987	11071	872	449	232		5341	6894	2438	1029	64		646	4178	Veg	Ge-sund		
9188	Starnberg	364	358	51		710	1482	96	136	39		709	980	268	222	12		0	502	Veg	Öko		
9189	Traunstein	2759	746	240		5333	9077	726	283	192		4865	6067	2032	463	47		468	3010	Veg	Öko		
9190	Weilheim-Schongau	1672	661	176		3527	6036	440	251	139		3440	4270	1232	410	37		87	1766	Veg	Öko		
9271	Deggendorf	976	568	125		2216	3884	257	216	101		1886	2459	719	352	24		330	1426	Veg	Öko		
9272	Freyung-Grafenau	890	324	99		2059	3372	234	123	81		1976	2414	655	201	19		83	958	Veg	Öko		
9273	Kelheim	946	903	134		2461	4444	249	343	106		1488	2186	697	560	27		973	2257	Veg	Öko		
9274	Landshut	3372	824	272		5479	9947	888	313	220		3429	4849	2484	511	52		2050	5097	Veg	Öko		
9275	Passau	3195	1069	270		5729	10263	841	406	219		4219	5686	2354	663	51		1509	4577	Veg	Öko		
9276	Regen	875	354	93		1607	2928	230	134	74		1573	2012	644	220	18		34	916	Veg	Öko		
9277	Rottal-Inn	3128	598	258		5388	9372	824	227	212		3426	4688	2304	371	46		1962	4683	Veg	Öko		
9278	Straubing-Bogen	1490	700	200		3307	5697	392	266	161		2338	3157	1098	434	39		969	2540	Veg	Öko		
9279	Dingolfing-Landau	1682	490	157		3269	5598	443	186	128		1895	2651	1239	304	30		1374	2947	Veg	Öko		
9371	Amberg-Sulzbach	1391	628	165		2766	4950	366	238	131		2522	3258	1025	390	33		244	1692	Veg	Öko		
9372	Cham	2382	567	222		4565	7735	627	215	182		3262	4287	1754	352	40		1302	3448	Veg	Öko		
9373	Neumarkt i.d. OPf.	1344	730	175		3080	5330	354	277	140		2808	3579	990	453	35		272	1751	Veg	Öko		
9374	Neustadt (Waldnaab)	1650	868	178		3075	5770	434	330	143		2515	3421	1215	539	35		560	2349	Veg	Öko		

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ^f NH ₃ NO _x	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	größer wegen	
9375	Regensburg	1508	1201	208		3137	6054	397	456	164		2258	3275	1111	745	44		879	2779	Veg	Öko
9376	Schwandorf	1989	873	193		3526	6581	524	331	155		2590	3600	1466	541	38		936	2981	Veg	Öko
9377	Tirschen- reuth	1414	600	138		2764	4916	372	228	113		2253	2967	1042	372	25		511	1950	Veg	Öko
9471	Bamberg	831	893	153		2109	3986	219	339	119		1864	2541	612	554	34		244	1445	Veg	Öko
9472	Bayreuth	1429	895	174		3046	5545	376	340	138		2822	3677	1053	556	36		224	1869	Veg	Öko
9473	Coburg	782	445	101		1691	3019	206	169	79		1422	1876	576	276	22		269	1143	Veg	Öko
9474	Forchheim	478	374	83		1192	2127	126	142	65		1119	1452	352	232	18		73	675	Veg	Öko
9475	Hof	1245	766	149	1331	2753	6243	328	291	118	1129	2548	4414	917	475	31	202	204	1829	Veg	Öko
9476	Kronach	319	413	62		682	1476	84	157	46		678	965	235	256	15		4	511	Veg	Öko
9477	Kulmbach	616	368	86		1341	2411	162	140	69		1282	1653	453	229	17		58	758	Veg	Öko
9478	Lichtenfels	433	265	66		936	1701	114	101	52		838	1105	319	165	14		98	595	Veg	Öko
9479	Wunsiedel Fichtelgb.	557	425	77	714	1138	2910	147	161	60	714	1074	2155	410	264	17	0	64	755	Veg	Öko
9571	Ansbach	4010	1226	376		7441	13053	1056	465	306		4914	6741	2954	760	70		2528	6312	Veg	Öko
9572	Erlangen- Höchststadt	506	1053	101		948	2608	133	199	73		799	1204	373	854	28		149	1405	Veg	Ge- sund
9573	Fürth	492	467	71		1196	2226	130	118	54		670	971	363	349	18		526	1255	Veg	Ge- sund
9574	Nürnberger- Land	615	1821	153		1320	3908	162	289	105		1271	1827	453	1532	48		49	2082	Veg	Ge- sund
9575	Neustadt a.d. Aisch- Bad Winds- heim	2163	517	206		4032	6918	570	196	169		2391	3326	1594	321	37		1641	3592	Veg	Öko
9576	Roth	945	902	124		1699	3669	249	316	96		1443	2104	696	586	28		256	1565	Veg	Ge- sund

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ^f NH ₃ NO _x	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	größer wegen
9577	Weißenburg-Gunzenh.	1542	378	154		3074	5148	406	143	126		2069	2744	1136	235	29		1005	2404	Veg	Öko
9671	Aschaffenburg	320	1178	92		810	2400	84	251	64		733	1132	236	927	28		77	1268	Veg	Gesund
9672	Bad Kissingen	569	506	105		1332	2513	150	192	83		1288	1713	419	314	22		45	800	Veg	Öko
9673	Rhön-Grabfeld	574	362	114		1608	2659	151	137	92		1535	1916	423	225	22		73	742	Veg	Öko
9674	Haßberge	779	398	111		1718	3007	205	151	90		1491	1937	574	247	21		227	1070	Veg	Öko
9675	Kitzingen	746	629	106		1599	3080	196	230	84		1026	1536	549	399	22		574	1544	Veg	Gesund
9676	Miltenberg	349	458	68		740	1615	92	174	51		711	1027	257	284	18		29	588	Veg	Öko
9677	Main-Spessart	436	843	105		1111	2495	115	320	82		1094	1611	321	523	22		17	883	Veg	Öko
9678	Schweinfurt	671	775	131		1679	3255	177	281	102		1327	1886	494	494	29		352	1369	Veg	Gesund
9679	Würzburg	911	1145	171		2302	4529	240	350	131		1674	2395	671	795	40		628	2135	Veg	Gesund
9771	Aichach-Friedberg	1634	630	153		3286	5703	430	239	123		2014	2806	1204	391	30		1272	2896	Veg	Öko
9772	Augsburg	1776	1543	232		3734	7284	468	379	173		2467	3486	1308	1164	59		1267	3799	Veg	Gesund
9773	Dillingen a.d. Donau	1636	331	146		3152	5266	431	126	120		1625	2301	1205	206	27		1527	2965	Veg	Öko
9774	Günzburg	1325	530	135		2603	4593	349	201	107		1682	2340	976	329	27		921	2253	Veg	Öko
9775	Neu-Ulm	773	743	101		1557	3174	204	134	76		1026	1440	570	609	25		531	1735	Veg	Gesund

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ⁱ NH ₃ NO _x	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	größer wegen	
9776	Lindau (Bo- densee)	644	285	64		1336	2328	169	108	51		1336	1665	474	177	13		0	664	Veg	Öko
9777	Ostallgäu	3104	909	282		6360	10655	817	345	227		6042	7432	2286	564	55		318	3223	Veg	Öko
9778	Unterallgäu	3517	923	293		6928	11661	926	350	238		4870	6384	2591	572	55		2059	5277	Veg	Öko
9779	Donau-Ries	2349	689	231		5012	8281	618	262	188		2616	3684	1730	427	44		2396	4597	Veg	Öko
9780	Oberallgäu	2010	877	230		4164	7281	529	333	177		4164	5203	1481	544	53		0	2078	Veg	Öko
10041	Reg.ver- band Saar- brücken	115	973	60		237	1384	39	153	38		237	466	76	820	22		0	918	Öko	Ge- sund
10042	Merzig-Wa- dern	338	398	61		843	1640	115	109	47		843	1114	224	289	14		0	527	Öko	Öko
10043	Neunkir- chen	140	385	38		324	888	48	65	27		323	462	93	320	12		0	425	Öko	Ge- sund
10044	Saarlouis	244	1472	72		602	2391	83	282	50		600	1014	161	1190	22		3	1376	Öko	Ge- sund
10045	Saarpfalz- Krs	192	410	52		535	1189	65	112	38		535	750	127	298	14		0	439	Öko	Öko
10046	St. Wendel	272	261	50		685	1268	92	71	39		685	888	180	189	11		0	380	Öko	Öko
11000	Berlin	444	5891	439	3244	173	10191	1	48	255	1385	73	1762	443	5844	184	1859	100	8429	Öko	Ge- sund
12060	Barnim	689	666	133	924	2004	4415	48	9	105	790	1122	2073	641	657	28	134	881	2342	Öko	Öko
12061	Dahme- Spreewald	1698	982	221	983	3555	7439	118	13	177	923	1140	2371	1580	969	44	60	2415	5068	Öko	Öko
12062	Elbe-Elster	1630	438	224	895	4293	7479	113	6	183	698	1301	2300	1517	432	41	197	2992	5179	Öko	Öko
12063	Havelland	1081	672	226	828	3499	6305	75	9	182	653	1038	1957	1007	663	44	175	2460	4348	Öko	Öko
12064	Märkisch- Oderland	1799	1133	291	1302	5005	9530	125	15	236	1224	1309	2909	1674	1118	55	77	3696	6621	Öko	Öko

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung								
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ^f		
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	größer wegen	größer wegen
12065	Oberhavel	911	747	180	859	2869	5566	63	10	144	714	1193	2125	848	738	36	145	1675	3442	Öko	Öko	
12066	Oberspreewald-Lausitz	712	926	132	532	1830	4131	49	12	99	513	753	1426	663	913	33	19	1077	2705	Öko	Öko	
12067	Oder-Spree	1404	1516	242	1180	3949	8292	97	20	189	1117	1659	3083	1307	1496	53	63	2289	5209	Öko	Öko	
12068	Ostprignitz-Ruppin	1992	1081	320	1113	5304	9810	138	14	257	1081	2082	3572	1854	1067	62	32	3223	6238	Öko	Öko	
12069	Potsdam-Mittelmark	1656	2102	338	1494	4898	10487	115	27	260	1206	1822	3431	1541	2074	77	288	3076	7056	Öko	Öko	
12070	Prignitz	2193	551	320	1405	6326	10795	152	7	265	1163	2905	4492	2041	544	55	242	3421	6303	Öko	Öko	
12071	Spree-Neiße	1019	6588	336	886	2660	11490	71	86	226	852	1084	2318	948	6502	110	34	1576	9171	Öko	Öko	
12072	Teltow-Fläming	1458	1106	249	1055	4199	8067	101	14	196	898	1282	2492	1357	1092	53	157	2917	5575	Öko	Öko	
12073	Uckermark	2075	1362	406	2056	6844	12744	144	18	334	1910	3032	5438	1931	1344	73	146	3812	7306	Öko	Öko	
13071	Mecklenburgische Seenplatte	2143	1506	621	4139	11827	20236	0	93	504	3784	6069	10450	2557	1413	117	355	5758	10200	Öko	Öko	
13072	Rostock	2685	1694	1035	3517	10509	19439	0	104	720	2617	5915	9356	3203	1590	314	900	4594	10602	Öko	Öko	
13073	Vorpommern-Rügen	1967	976	458	3022	7695	14118	0	60	377	2289	4743	7469	2347	916	81	733	2952	7029	Öko	Öko	
13074	Nordwestmecklenburg	2598	1090	419	2311	5777	12195	0	67	345	1509	3842	5763	3100	1023	73	803	1935	6934	Öko	Öko	
13075	Vorpommern Greifswald	2357	1590	553	2970	9152	16623	0	98	441	2486	3574	6599	2812	1493	112	485	5578	10479	Öko	Öko	
13076	Ludwigslust-Parchim	3243	1707	647	4432	14314	24343	0	105	524	3366	7173	11169	3870	1602	122	1065	7141	13801	Öko	Öko	

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung								
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ⁱ		
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	NH ₃ größer wegen	NO _x
14521	Erzgebirgs- krs	602	1477	196	3035	3901	9210	0	368	147	2356	3742	6612	696	1109	50	678	159	2692	Öko	Öko	
14522	Mittelsachs.	1099	1223	287	3309	6535	12453	0	304	225	1658	4799	6986	1271	919	62	1651	1736	5639	Öko	Öko	
14523	Vogtland- krs.	1027	722	160	1837	2819	6564	0	180	126	1276	2326	3908	1187	542	33	561	493	2817	Öko	Öko	
14524	Zwickau	571	874	138	1748	2586	5916	0	218	104	743	1774	2839	660	657	34	1004	811	3166	Öko	Öko	
14625	Bautzen	872	1187	234	2220	4258	8772	0	295	183	1843	2868	5190	1008	892	52	377	1390	3718	Öko	Öko	
14626	Görlitz	835	4580	299	2175	3975	11864	0	1140	214	1861	2469	5685	966	3440	86	313	1505	6310	Öko	Öko	
14627	Meißen	883	1061	200	2261	4018	8424	0	264	158	734	1628	2784	1022	797	42	1528	2390	5778	Öko	Öko	
14628	Sächs. Schweiz Osterzgeb.	720	1887	262	2948	3569	9385	0	470	189	1721	2920	5300	833	1417	72	1227	649	4198	Öko	Öko	
14729	Leipzig	1049	3695	381	2323	4280	11728	0	875	268	943	1819	3904	1213	2821	113	1380	2460	7988	Öko	Ge- sund	
14730	Nordsach- sen	1401	1129	271	1764	5397	9962	0	281	215	681	1615	2792	1620	848	56	1082	3782	7389	Öko	Öko	
15081	Altmark- kreis Salz- wedel	2347	678	335	1471	5643	10473	504	68	274	814	2366	4026	1843	610	61	657	3277	6447	Öko	Öko	
15083	Börde	3130	2061	455	2558	6921	15126	672	206	360	709	1646	3593	2458	1856	96	1849	5275	11533	Öko	Öko	
15084	Burgenland- kreis	1512	1584	326	1284	3644	8351	325	158	242	340	1123	2188	1188	1426	84	944	2521	6163	Öko	Öko	
15085	Harz	1332	917	266	2587	3668	8770	286	92	212	1046	1453	3088	1046	826	54	1541	2215	5682	Öko	Öko	
15086	Jerichower Land	1924	1267	280	777	3625	7874	413	126	221	561	991	2312	1511	1141	59	216	2634	5562	Öko	Öko	
15087	Mansfeld- Südharz	879	745	202	1241	2427	5495	189	74	162	488	943	1856	691	671	40	754	1485	3640	Öko	Öko	
15088	Saale	1750	2373	332	1533	4336	10324	376	237	251	330	531	1724	1375	2136	81	1203	3805	8600	Öko	Öko	

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung								
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ^f NH ₃ NO _x		
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	größer wegen	
15089	Salzland- kreis	1741	1147	253	1535	4424	9100	374	114	200	296	321	1305	1367	1032	53	1238	4104	7795	Öko	Öko	
15090	Stendal	2404	966	370	1299	7449	12488	516	96	305	830	1841	3588	1888	870	65	469	5608	8899	Öko	Öko	
15091	Wittenberg	3595	2187	568	2146	8353	16850	771	218	437	1309	2176	4912	2824	1969	132	837	6177	11939	Öko	Öko	
16051	Erfurt	115	481	51	210	499	1357	26	76	36	92	148	379	89	405	15	118	351	978	Öko	Ge- sund	
16061	Eichsfeld	719	709	129	958	1519	4034	161	146	102	648	1493	2552	558	563	27	310	26	1482	Öko	Öko	
16062	Nordhausen	564	310	91	779	1572	3317	127	64	73	619	1068	1952	438	246	18	160	504	1365	Öko	Öko	
16063	Wartburg- krs.	868	838	178	1221	2488	5594	195	173	137	990	2100	3595	673	665	41	230	389	1999	Öko	Öko	
16064	Unstrut-Hai- nich-Kreis	733	396	146	958	2431	4664	165	82	117	496	1179	2038	568	314	29	463	1252	2626	Öko	Öko	
16065	Kyffhäuser- kreiss	603	271	133	875	2090	3972	135	56	109	325	1015	1641	468	215	24	550	1074	2331	Öko	Öko	
16066	Schmalkal- den-Mein.	776	396	123	1087	2165	4546	174	82	98	977	1867	3198	602	314	24	111	298	1349	Öko	Öko	
16067	Gotha	832	467	120	1061	1957	4438	187	96	96	701	913	1994	646	371	24	360	1044	2444	Öko	Öko	
16068	Sömmerda	585	321	130	571	1906	3512	131	66	105	225	330	858	454	255	24	346	1576	2654	Öko	Öko	
16069	Hild- burghau- sen	622	397	106	1083	1560	3768	140	82	84	954	1424	2683	482	315	22	129	136	1085	Öko	Öko	
16070	Ilm-Kreis	442	464	87	788	1165	2947	99	96	69	496	882	1642	343	368	19	292	283	1305	Öko	Öko	
16071	Weimarer Land	857	593	143	881	2260	4735	192	122	114	387	990	1805	665	471	30	494	1271	2930	Öko	Öko	
16072	Sonneberg	183	246	34		368	831	41	51	26		353	471	142	195	8		14	359	Öko	Öko	
16073	Saalfeld-Ru- dolstadt	562	307	91	784	1729	3473	126	63	73	553	1302	2118	436	243	19	230	427	1355	Öko	Öko	

AGS	Kreis/ Kreisregion	Emission (aktuell) ^a						zulässige Emission (Obergrenze)						Erforderliche Verminderung							
		NH ₃	NO _x ^c	N ₂ O	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^{f, g}	NO _x ^{f, g}	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	NH ₃ ^f	NO _x ^f	N ₂ O ^h	N(ges) ^d	NO ₃ ^e	Insges.	Minderungs- bedarf ⁱ NH ₃ NO _x	
		t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	t N a ⁻¹	größer wegen	
16074	Saale-Holz- land	947	941	139	741	1977	4745	213	194	106	286	1177	1975	734	747	33	455	800	2770	Öko	Öko
16075	Saale-Orla- Kreis	1062	728	143	1107	2603	5643	238	150	115	914	1960	3378	824	578	28	193	643	2265	Öko	Öko
16076	Greiz	1079	561	151	1155	3018	5964	242	116	120	600	1648	2725	837	445	30	555	1370	3239	Öko	Öko
16077	Altenburger Land	570	308	93	809	1559	3340	128	64	75	339	743	1348	442	245	18	471	816	1992	Öko	Öko
Summen		469.620	62.424		973.373		83.314	48.260		599.643		390.620	14.163	373.730							
		343.128			215.085		2.063.630	62.227		138.394		931.838	281.015	76.691					1.136.220		

^a Qualitätsziele der einzelnen Schutzgüter: s. jeweils erstes Unterkapitel in den Kapiteln 2 bis 7.

^b Schutzgüter: Terrestrische Ökosysteme, marine Ökosysteme in den Küsten-Zonen, Oberflächengewässer, Grundwasser, Klima, Vegetation, Menschliche Gesundheit; Zuordnung der Stickstoffverbindungen zu den Schutzgütern s. Text.

^c NO_x-Emissionen für Jahr 2019 (wurden für die Berechnungen zu Schutzgut Terrestrische Ökosysteme verwendet); für das Schutzgut Menschliche Gesundheit wurden die Emissionen 2020 verwendet, da auch die NO₂-Konzentrationsdaten aus 2020 stammen; die Werte unterscheiden sich zum Teil geringfügig zu 2019.

^d Ohne Wert: Kreis liegt (vollständig) im Flussgebiet Donau oder Rhein, für die keine Minderungerfordernis besteht.

^e NO₃: relevante N_r-Spezies ist der N-Überschuss der Landwirtschaftsflächen

^f Für N-Verbindungen, die zwei Schutzgüter beeinträchtigen, gilt für die zulässigen Emissionen der niedrigere Wert der beiden Obergrenzen im Kreis und für die erforderliche Verminderung der größere der beiden Werte im Kreis.

^g Wert = 0: die erforderliche Emissionsminderung ist größer als die aktuelle Emission. Für die Rückrechnung "Emission aktuell" minus "erforderliche Verminderung" würde sich für diese Kreisregionen rechnerisch ein negativer Wert für die "zulässige Emission" ergeben; in der Tabelle gleich Null gesetzt.

^h Mit Berücksichtigung des Verschlechterungsverbotes: wenn das Qualitätsziel aktuell bereits eingehalten wird, dann entspricht die zulässige Emission (Obergrenze) der aktuellen Emission.

ⁱ Minderungsbedarf für NH₃ wird bestimmt durch den größeren Minderungsbedarf für Schutzgut Vegetation ("Veg") oder für Terrestrische Ökosysteme ("Öko"); für NO_x wird bestimmt durch den größeren Minderungsbedarf für Schutzgut Menschliche Gesundheit ("Gesund") oder für Terrestrische Ökosysteme ("Öko").

Tabelle 45: Flächenbezogener Minderungsbedarf (in kg N ha⁻¹) für reaktive Stickstoff-Verbindungen nach Hauptbelastungsquellen in den Kreisen/Kreisregionen mit dem höchsten Minderungsbedarf^a.

ARS ^b	Kürzel ^b	Kreis/Kreisregion	Hauptbelas- tungsquelle	Minderungsbedarf								Insgesamt (einschl. N ₂ O) ^c
				NH ₃	NO ₃ N-Über- schuss	Summe NH ₃ + NO ₃ Landwirtschaft		NO ₂ Urban (Verkehr, Industrie)		N(ges) Urban (Siedlungs- wasserwirtschaft)		
				kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	% ^c	kg N ha ⁻¹	% ^d	kg N ha ⁻¹	% ^d	
3460	VEC	Kreis Vechta	Landwirtschaft	99	51	151	89 %	9	5 %	8	5 %	169
2000	HH	Hamburg	Urban	42	9	51	30 %	88	52 %	26	15 %	168
4011	HB	Bremen	Urban	35	15	51	33 %	76	50 %	24	15 %	153
3453	CLP	Kreis Cloppenburg	Landwirtschaft	78	47	126	89 %	6	4 %	8	6 %	140
5112	E	Kreisregion Duisburg, Essen, Mülheim, Oberhausen	Urban	7	0	7	5 %	122	94 %	e		130
7338	RP	Rhein-Pfalz-Kreis mit Stadt Ludwigshafen	Urban, Landwirt- schaft	5	35	40	37 %	60	55 %	e		108
3456	GBH	Grafschaft Bentheim (Kreis)	Landwirtschaft	47	43	90	92 %	7	7 %	e		98
3458	OL	Kreis und Stadt Oldenburg	Landwirtschaft	43	37	80	83 %	9	10 %	7	7 %	96
11000	B	Berlin	Urban	5	1	6	6 %	65	69 %	21	22 %	94
5162	NE	Neuss (mit Mönchengladb.)	Urban	8	10	18	19 %	74	80 %	e		93
3454	EL	Kreis Emsland	Landwirtschaft	44	32	76	85 %	8	8 %	5	6 %	89
5554	BOR	Kreis Borken	Landwirtschaft	45	35	80	92 %	7	8 %	e		87
5362	REK	Rhein-Erft-Kreis, Stadt Köln	Urban	5	5	11	13 %	73	86 %	e		85
3461	WEM	Kreis Wesermarsch	Landwirtschaft	29	45	74	90 %	6	7 %	2	3 %	83
3352	CUX	Kreis Cuxhaven	Landwirtschaft	35	35	71	88 %	7	8 %	2	3 %	80
5570	WAF	Kreis Warendorf	Landwirtschaft	36	30	66	82 %	7	9 %	7	9 %	80

^a Hier aufgeführt: Kreise mit flächenbezogenem Minderungsbedarf von insgesamt 80 kg N ha⁻¹ und mehr, in absteigender Reihenfolge sortiert.

^b ARS: Amtliche Regionalschlüsselnummer; Kürzel: Kennzeichnung der Kreise/Kreisregionen in Abbildung 40.

^c Die Summe beinhaltet auch den Minderungsbedarf für N₂O, der jedoch in den meisten Kreisen/Kreisregionen mit weniger als 1 kg N ha⁻¹ gering ist (in der Tabelle nicht separat aufgeführt). Nur für die KR Rhein-Pfalz-Kreis (mit 8 kg N ha⁻¹) sowie für Hamburg und Bremen (jew. rund 3 kg ha⁻¹) spielt der N₂O-Minderungsbedarf eine etwas größere Rolle.

^d Anteil am gesamten Minderungsbedarf im Kreis/Kreisregion.

^e Für Kreise im Flussgebiet Rhein besteht kein Minderungsbedarf der N-Einträge in Bezug auf Schutzgut Oberflächengewässer.