

TEXTE

96/2020

Integrierter Stickstoffindikator, nationales Stickstoffziel und IST-Zustand (DESTINO Teilbericht 1)

TEXTE 96/2020

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 51 200 0
FB000254/1

Integrierter Stickstoffindikator, nationales Stickstoffziel und IST-Zustand (DESTINO Teilbericht 1)

von

Jürg Heldstab, Bettina Schächli, Judith Reutimann
INFRAS, Zürich

Martin Bach, Uwe Häußermann, Lukas Knoll, Laura Klement, Lutz Breuer
Justus-Liebig Universität, Gießen

Stephan Fuchs, Tatyana Weber
KIT Karlsruhe Institut für Technologie

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

INFRAS
Binzstraße 23
8045 Zürich Schweiz

Abschlussdatum:

März 2020 – Korrekturen in den Kapiteln 3.2 und 4 im Dezember 2020

Redaktion:

Fachgebiet II 4.3 Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme
Markus Geupel

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2020

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

Kurzbeschreibung

Die übermäßige Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt durch landwirtschaftliche Produktion, Energieumwandlung und Mobilität führt zu Problemen, die dringend gelöst werden müssen: Verlust aquatischer und terrestrischer Biodiversität, Beeinträchtigung der Luftqualität, Freisetzung von Treibhausgasen und erschwerte Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser. Die planetare Belastbarkeitsgrenze (Planetary Boundary) für Stickstoff ist deutlich überschritten.

Die Bundesregierung hat im Frühjahr 2017 in ihrem ersten Stickstoff-Bericht auf die Problematik hingewiesen und einen ressortübergreifenden Handlungsbedarf für Deutschland festgestellt. Im Zuge dessen hat das Umweltbundesamt dazu mehrere Projekte lanciert, unter anderem das Projekt DESTINO mit zwei Zielen: Erstens die Herleitung eines integrierten Stickstoffindikators, der sektor- und medienübergreifend die aktuellen Belastungen charakterisiert mitsamt einem nationalen Stickstoffziel, das die Belastungsgrenze aufzeigt (Teilbericht 1). Zweitens die Aktualisierung des nationalen Stickstoff-Budgets entlang internationaler Vorgaben aus dem Göteborg-Protokoll (Teilbericht 2).

Der vorliegende Bericht ist der Teilbericht 1 des DESTINO Projekts und dokumentiert die Herleitung des integrierten Stickstoffindikators. Dieser orientiert sich an Stickstoff-sensitiven Schutzgütern: Erhaltung der biologischen Vielfalt, Vermeidung von Eutrophierung der Ökosysteme, Erhaltung von Grundwasser-, Oberflächengewässer- und Luftqualität sowie Einhaltung der Klimaschutzziele. Der Zielwert des integrierten Stickstoffindikators, das nationale Stickstoffziel, beziffert die Belastungsgrenze, um die Schutzziele einhalten zu können. Mit diesem wirkungsbasierten, nationalen Stickstoffziel wird erstmalig ein der Planetary Boundary komplementärer Wert für die nationale Ebene vorgeschlagen.

Aus dem Ausmaß der Überschreitung von Schutzziele (z.B. Immissionsgrenzwerte) und aus den aktuellen Stickstofffreisetzungen (z. B. Emissionen) gelingt es mit Hilfe von Rückwärtsrechnungen, die Belastungsgrenzen zu quantifizieren (DESTINO-Zielwerte), mit denen die Schutzziele im räumlichen Mittel einzuhalten wären.

Der integrierte Stickstoffindikator entspricht der Summe der jährlichen Stickstoffverluste in die Umwelt in Deutschland und beläuft sich aktuell (IST-Zustand) auf 1.574 kt N a⁻¹ (1 kt = 1.000 Tonnen), was rund 19 kg N pro Einwohner pro Jahr entspricht. Die summierten Belastungsgrenzen für die einzelnen Schutzgüter ergeben für das nationale Stickstoffziel den Wert von 1.053 kt N a⁻¹. Einige der verwendeten Teilziele sind bisher nur als Etappenziele vorhanden, die langfristigen gesundheitlichen und ökologischen Schutzziele wären noch ambitionierter, sind aber noch nicht festgelegt. Wären sie bekannt, läge das nationale Stickstoffziel noch niedriger. Aufgrund der benutzten Methoden stellt der Zielwert zudem nur den Mindestwert dar, der für die Betrachtung im räumlichen Mittel des Bundesgebietes gilt. Um die Schutzziele überall in Deutschland tatsächlich flächendeckend einhalten zu können, wären noch stärkere Reduktionen der Stickstoffverluste erforderlich. Mit dem berechneten nationalen Stickstoffziel von 1.053 kt N a⁻¹ müssen die aktuellen Stickstoffverluste um mindestens ein Drittel verringert werden. Das nationale Stickstoffziel dient als Ergänzung bestehender, sektorspezifischer Indikatoren und Ziele und soll die dringend nötige Kommunikation unterstützen, die es braucht, um die Verluste reaktiven Stickstoffs zu verringern. Für kommunikative und politische Zwecke ist die Verwendung eines gerundeten Wertes von 1.000 kt N a⁻¹ zulässig. Die parallele Weiterführung und die Überprüfung bestehender Indikatoren für stickstoffbezogenen Schutzgüter, inklusive der Überwachung der räumlichen Komponente, sind dabei unerlässlich.

Abstract

The excessive release of reactive nitrogen into the environment by agricultural production, energy conversion, and mobility leads to problems which have to be urgently addressed, including the loss of aquatic and terrestrial biodiversity, increasing air pollution, the release of greenhouse gases, and the increased difficulties faced when treating groundwater to provide drinking water. The planetary boundary for nitrogen has clearly been crossed.

In 2017, the German Federal Government drew attention to these problems in its first Nitrogen Report and established the need for inter-departmental action, and since then the German Environment Agency (UBA) has launched a number of projects. These include this DESTINO project, which has two objectives: firstly to derive an integrated nitrogen indicator across all sectors and for all media characterising the current situation, together with a national nitrogen target (Report 1), and secondly to update the National Nitrogen Budget in line with the requirements of the Gothenburg Protocol (Report 2).

Report 1 of the DESTINO project documents the process of deriving the integrated nitrogen indicator. This is oriented on nitrogen-sensitive environmental sectors: Maintaining biodiversity, avoiding eutrophication of ecosystems, preserving the quality of groundwater, surface waters, and air, and meeting climate action objectives. The national nitrogen target quantifies the limits which must not be exceeded if the objectives are to be met. This effect-based national nitrogen target is the first to be proposed for Germany which is complementary to the planetary boundary.

Starting from data for the exceedance of target values and for current nitrogen releases (e.g. emissions), back-calculations are used to quantify the maximum DESTINO target values as a spatial mean for the environmental sectors.

The value of the integrated nitrogen indicator for Germany (corresponding to the total annual nitrogen losses into the environment) is currently 1574 kt N a⁻¹ (1 kt = 1000 tonnes), which is equivalent to ~19 kg N per person per year. Adding together the critical loads for the environmental sectors gives a total value of 1053 kt N a⁻¹ for the national nitrogen target. Some of the sectoral targets are only valid for the next stage, but the long-term targets for the protection of human health and the environment, which would be more ambitious, have not yet been specified. If they were known, then the national nitrogen target would be even lower. Because of the methods used, the target values also represent minimum values, applicable for the national spatial average. In order to be able to meet the target values everywhere in Germany, greater reductions in nitrogen losses would be necessary. With the calculated national nitrogen target of 1053 kt N a⁻¹, the nitrogen losses must be reduced by at least a third. The national nitrogen target serves to augment existing sector-specific indicators and targets, showing the direction in which Germany should proceed with regard to reactive nitrogen. For communicative and political purposes a rounded figure of 1000 kt N a⁻¹ can be used. It is essential that the existing indicators for environmental sectors are supervised and updated in parallel, including the monitoring of the spatial components.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis | 6 |
| Abbildungsverzeichnis | 9 |
| Tabellenverzeichnis | 12 |
| Abkürzungsverzeichnis | 14 |
| Zusammenfassung..... | 16 |
| Summary..... | 22 |
| 1 DESTINO: Deutsche Stickstoffflüsse, Indikatoren und Objectives..... | 27 |
| 1.1 Projektziele und Arbeitspakete..... | 27 |
| 1.2 DESTINO-Aktivitäten | 28 |
| 2 Schutzgüter, Schutzziele und DESTINO-Indikatoren..... | 30 |
| 2.1 Übersicht..... | 30 |
| 2.2 Methodische Hinweise | 31 |
| 2.2.1 Zeitliche und räumliche Abhängigkeit der DESTINO-Teilindikatoren | 31 |
| 2.2.2 Umrechnungsfaktoren und Einheiten..... | 32 |
| 2.2.3 DESTINO-Teilindikatoren im Verhältnis zu anderen Stickstoff-Indikatoren der deutschen Umweltpolitik – Thema Analyse und Synthese | 33 |
| 3 DESTINO-Teilindikatoren und ihre Zielwerte..... | 34 |
| 3.1 Terrestrische Ökosysteme: Schadenswirkung durch Ammoniak | 34 |
| 3.1.1 Schadensmechanismus | 34 |
| 3.1.2 Schutzziel und DESTINO-Zielwert..... | 34 |
| 3.1.3 Methode zur Berechnung der maximalen Ammoniak-Emissionen | 34 |
| 3.1.4 Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert terrestrische Ökosysteme / Critical Level..... | 38 |
| 3.1.5 Interpretation und Beurteilung | 39 |
| 3.2 Terrestrische Ökosysteme: Schadenswirkungen durch Stickstoff-Einträge | 40 |
| 3.2.1 Schadensmechanismus | 40 |
| 3.2.2 Schutzziel und DESTINO-Zielwert..... | 41 |
| 3.2.3 Methoden zur Berechnung der maximalen Ammoniak- und Stickstoffoxid-Emissionen..... | 42 |
| 3.2.3.1 Bestimmung der stickstoffhaltigen Einträge in Böden | 42 |
| 3.2.3.2 Berechnung des Emissionsziels aus Depositionsdaten | 43 |
| 3.2.4 Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung..... | 46 |
| 3.2.5 Interpretation und Beurteilung | 49 |
| 3.3 Oberflächengewässerqualität: Schadenswirkung durch Stickstoff-Einträge..... | 51 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3.1 | Schadensmechanismus | 51 |
| 3.3.2 | Schutzziel und DESTINO-Zielwert..... | 51 |
| 3.3.3 | Methode zur Berechnung der maximalen N-Frachten | 53 |
| 3.3.4 | Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert Oberflächengewässerqualität | 54 |
| 3.3.5 | Interpretation und Beurteilung | 55 |
| 3.4 | Grundwasserqualität: Beeinträchtigung durch Nitrat | 57 |
| 3.4.1 | Schadensmechanismus | 57 |
| 3.4.2 | Schutzziel und DESTINO-Zielwert..... | 57 |
| 3.4.3 | Methode zur Berechnung des maximalen N-Überschusses | 57 |
| 3.4.4 | Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert Grundwasserqualität | 59 |
| 3.4.5 | Interpretation und Beurteilung | 61 |
| 3.5 | Klima: Erwärmung durch Lachgas-Emissionen | 64 |
| 3.5.1 | Schadensmechanismus | 64 |
| 3.5.2 | Schutzziel und DESTINO-Zielwert..... | 64 |
| 3.5.3 | Methode zur Berechnung der maximalen Lachgas-Emissionen | 67 |
| 3.5.4 | Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert Klima | 67 |
| 3.5.5 | Interpretation und Beurteilung | 68 |
| 3.6 | Menschliche Gesundheit: Beeinträchtigung/Gefährdung durch Stickstoffdioxid- Immissionen..... | 69 |
| 3.6.1 | Schadensmechanismus | 69 |
| 3.6.2 | Schutzziel und DESTINO-Zielwert..... | 70 |
| 3.6.3 | Methode zur Berechnung der maximalen NO ₂ -Emissionen | 70 |
| 3.6.4 | Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert menschliche Gesundheit | 74 |
| 3.6.5 | Interpretation und Beurteilung | 75 |
| 4 | Integrierter Stickstoffindikator und nationales Stickstoffziel | 77 |
| 4.1 | Konstruktion eines integrierten Stickstoffindikators und dessen Zielwert | 77 |
| 4.1.1 | Anforderungen an den integrierten Stickstoffindikator | 77 |
| 4.1.2 | Konstruktion des integrierten Stickstoffindikators | 77 |
| 4.1.3 | Flächenbezogene statt frachtbezogene DESTINO-Teilindikatoren | 79 |
| 4.2 | Resultate für den integrierten Stickstoffindikator und für das nationale Stickstoffziel..... | 80 |
| 4.2.1 | DESTINO-Teilindikatoren IST-Zustand und Zielwerte..... | 80 |
| 4.2.2 | Nationales Stickstoffziel | 82 |
| 4.2.3 | Unsicherheiten der DESTINO-Indikatoren | 84 |
| 4.2.4 | Vergleich mit den Daten in der nationalen Stickstoffbilanz (DESTINO Teilbericht 2)..... | 85 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.2.5 | Nachführung der DESTINO-Teilindikatoren | 86 |
| 4.3 | Bewertung des integrierten Stickstoffindikators..... | 87 |
| 4.3.1 | Generelle Bewertung | 87 |
| 4.3.2 | Räumliche Aspekte..... | 89 |
| 4.3.3 | Frachten in Küsten- und Meeresgewässer..... | 90 |
| 4.3.4 | Importe und Exporte reaktiver Stickstoff-Verbindungen | 90 |
| 4.3.5 | Flächenbezogene DESTINO-Teilindikatoren..... | 92 |
| 4.3.6 | Nutzbarkeit des nationalen Stickstoffziels im Kontext aktueller politische Zwecke und für die Kommunikation mit der Öffentlichkeit..... | 93 |
| 4.3.6.1 | Umrechnung des integrierten Stickstoffziels an die politischen Vorgaben des Nationalen Luftreinhalteprogramms | 93 |
| 4.3.6.2 | Umrechnung des integrierten Stickstoffziels an die zeitlichen Vorgaben des geplanten „Aktionsprogramms Stickstoffminderung“ | 94 |
| 4.3.6.3 | Anpassung des integrierten Stickstoffziels an die Anforderungen für die Kommunikation mit Politik und Öffentlichkeit | 95 |
| 4.4 | Weitere Stickstoff-Gesamtindikatoren: Planetare Grenzen und Stickstoffeffizienz | 95 |
| 5 | Anhänge..... | 97 |
| 5.1 | Stickstoff-Indikatoren | 97 |
| 5.1.1 | DESTINO-Teilindikatoren, die zur Nachführung des integrierten Stickstoffindikators erforderlich sind | 97 |
| 5.1.2 | Weitere Indikatoren, die zur Nachführung des DESTINO-Zielwerts erforderlich sind..... | 101 |
| 5.1.3 | Zeitreihen für die Emissionen von NH ₃ , NO _x und N ₂ O | 105 |
| 5.2 | Ergänzungen zum Schutzgut terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung..... | 107 |
| 5.3 | Ergänzungen zum Schutzgut menschliche Gesundheit | 108 |
| 5.4 | Flächendeckende Ermittlung der Nitratkonzentration im Grundwasser | 110 |
| 5.4.1 | Material und Methodik | 110 |
| 5.4.1.1 | Modellansatz | 110 |
| 5.4.1.2 | Punktdaten (Grundwassermessstellen) | 111 |
| 5.4.1.3 | Flächendaten | 112 |
| 5.4.2 | Ergebnisse | 114 |
| 6 | Quellenverzeichnis..... | 118 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1: | Die sechs Schutzgüter und ihre DESTINO-Teilindikatoren im IST-Zustand und ihre Zielwerte (100 %) in relativer Darstellung..... | 19 |
| Abbildung 2: | Integrierter Stickstoffindikator IST-Zustand und Zielwert (nationales Stickstoffziel) absolut (in kt N a ⁻¹) und relativ (in Prozent)..... | 20 |
| Abbildung 3: | Karten der Ammoniak-Emissionen und -Immissionen 2015 | 36 |
| Abbildung 4: | Herleitung der maximalen Ammoniak-Emissionen (Daten für 2015, Datenstand 2017) | 38 |
| Abbildung 5: | DESTINO-Teilindikator terrestrische Ökosysteme / Critical Level (Biodiversität) für NH ₃ -Emissionen für IST-Zustand (2015) und DESTINO-Zielwert. | 39 |
| Abbildung 6: | Regionale Verteilung der Stickstoff-Gesamtdeposition (links) und der Überschreitungen der „simple mass balance“ - Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff (rechts). | 42 |
| Abbildung 7: | Stickstoffhaltige Deposition auf Flächen Deutschlands mit definiertem kritischem Eintragungswert Critical Load (grüne Linie) und maximal erlaubte Deposition (D_{max}), sodass im räumlichen Mittel keine Überschreitungen vorkommen (rote Linie). Im zeitlichen Mittel beträgt die maximal erlaubte Deposition D_{max} ca. 105 kt N a ⁻¹ (punktirierte Linie). | 44 |
| Abbildung 8: | Summe der NO _x - und NH ₃ -Emissionen Deutschlands (blaue Linie) und maximal erlaubte Emissionen (violette Linie). Im zeitlichen Mittel beträgt die maximal erlaubte Emission ca. 598 kt N a ⁻¹ (punktirierte Linie). | 44 |
| Abbildung 9: | Deposition und Überschreitungen auf CL-Flächen der Emissionen: Links reduzierte Komponenten (NH ₄ -Deposition vs. NH ₃ -Emission), rechts oxidierte Komponenten (NO ₃ -Deposition vs. NO _x -Emission). Jeder Punkt markiert ein Jahr in der Periode 2000-2015..... | 47 |
| Abbildung 10: | DESTINO-Teilindikator terrestrische Ökosysteme / Critical Load, Summe NH ₃ - und NO _x -Emissionen. IST-Zustand (2015) und DESTINO-Zielwert..... | 49 |
| Abbildung 11: | DESTINO-Teilindikator Oberflächengewässer, N-Fracht in Zuflüssen zu Nordsee und Ostsee. IST-Zustand (Mittel 2011 - 2015) und DESTINO-Zielwert..... | 55 |
| Abbildung 12 | Verteilung der nach Random-Forest-Klassifikation geschätzten Nitratkonzentration im Grundwasser in Deutschland (s. Abbildung 31) | 60 |
| Abbildung 13: | DESTINO-Teilindikator Grundwasser, N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche in Gebieten (Rasterzellen) mit Überschreitung des Zielwerts. IST-Zustand (Mittel 2011 - 2014) und DESTINO-Zielwert..... | 61 |
| Abbildung 14: | Deutschlands Treibhausgas-Emissionen inkl. Ziele 2020 bis 2050. | 65 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 15: | Lachgas-Emissionen nach Sektoren und DESTINO-Zielwert für das Schutzgut Klima. Die Emissionen sind in $\text{kt N}_2\text{O-N a}^{-1}$ angegeben. | 67 |
| Abbildung 16: | DESTINO-Teilindikator Klima, Lachgas-Emissionen (N_2O). IST-Zustand (2015) und DESTINO-Zielwert..... | 68 |
| Abbildung 17: | Standorte der NO_2 -Hintergrundimmissionsmessstationen mit einer durchgehenden Zeitreihe von 2002 - 2015 | 72 |
| Abbildung 18: | Karten der modellierten flächenhaften NO_2 -Immissionen 2015 (Kombination aus Messung und Ausbreitungsmodell). Die Kreise markieren Messwerte von Stationen, die nur lokal repräsentativ sind (Jahresmittelwerte). Der Jahresgrenzwert liegt bei $40 \mu\text{g NO}_2 \text{ m}^{-3}$. Die von der Weltgesundheitsorganisation ermittelte Wirkungsschwelle für die Hintergrundbelastung beträgt $20 \mu\text{g NO}_2 \text{ m}^{-3}$. Datenquelle: UBA | 73 |
| Abbildung 19: | Zeitlicher Verlauf der NO_x -Emissionen (grüne Linie) und der maximal erlaubten NO_x -Emission (rote Linie) zur Einhaltung der von der WHO ermittelten Wirkungsschwelle für die NO_2 -Hintergrundbelastung. Im zeitlichen Mittel beträgt die maximal erlaubte Emission $236 \text{ kt NO}_x\text{-N a}^{-1}$ (punktierte Linie). | 74 |
| Abbildung 20: | DESTINO-Teilindikator menschliche Gesundheit, Stickstoffoxid-Emissionen (NO_x). IST-Zustand (2015) und DESTINO-Zielwert. | 75 |
| Abbildung 21: | Fiktives Beispiel zur Erklärung der verlangsamten Dynamik des integrierten Stickstoffindikators. Die mögliche Entwicklung der IST-Werte zweier Teilindikatoren sind dargestellt (gestrichelte Linien, IST-Werte). Sobald sie ihren Zielwert erreichen (Teilindikator 1 im Jahr 2025, Teilindikator 2 2030), wird bei der Berechnung des integrierten Indikators nur noch ihr Zielwert eingesetzt (ausgezogene Linien), nicht mehr ihr (niedrigerer) IST-Wert. Dadurch hinkt der Wert des integrierten Indikators (ausgezogene violette Linie) der dann zumal realen Entwicklung nach..... | 79 |
| Abbildung 22: | Die sechs Schutzgüter und ihre DESTINO-Teilindikatoren im IST-Zustand und ihre Zielwerte (100 %) in relativer Darstellung..... | 81 |
| Abbildung 23: | Die sechs Schutzgüter und ihre DESTINO-Teilindikatoren im IST-Zustand und ihre Zielwerte in absoluter Darstellung (Emissionen, Depositionen, Frachten in kt N a^{-1})..... | 81 |
| Abbildung 24: | Integrierter Stickstoffindikator IST-Zustand und Zielwert (nationales Stickstoffziel) absolut (in kt N a^{-1}) und relativ (in Prozent)..... | 84 |
| Abbildung 25: | NH_3 -Emissionen nach Quellenkategorien (in 1.000 t NH_3), Datenstand 2017. | 105 |
| Abbildung 26: | NO_x (gerechnet als NO_2) -Emissionen nach Quellenkategorien (in 1.000 t NO_x). Datenstand 2017..... | 106 |
| Abbildung 27: | N_2O -Emissionen nach Quellenkategorien (in $1.000 \text{ t N}_2\text{O}$). Datenstand 2017. | 106 |
| Abbildung 28: | Regression des 98. Perzentils der gemessenen NO_2 -Immissionen und der NO_x -Emissionen (nationales Total) für die Jahre 2002 bis 2015 | 109 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 29: | Verteilung der für die Modellerstellung verwendeten Messstellen in Deutschland..... | 113 |
| Abbildung 30: | Ranking der Prädiktoren nach Einflussstärke (relativ zum stärksten Faktor) auf die Schätzung der Nitratkonzentration..... | 114 |
| Abbildung 31: | Verteilung der Nitratkonzentration im Grundwasser in Deutschland (1 x 1 km ² Raster), prognostiziert mit Random-Forest-Klassifikation... | 115 |
| Abbildung 32: | Grundwasserkörper in Deutschland, die im Hinblick auf den Parameter Nitrat in einem schlechten chemischen Zustand (rote Bereiche) sind (UBA 2017e)..... | 116 |
| Abbildung 33: | Gemessene vs. nach Random-Forest-Klassifikation geschätzte Nitratkonzentration im Grundwasser (n = 8.106 Messstellen, s. Kap. 5.4.2)..... | 117 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1: | Schutzgüter, Schutzziele und DESTINO-Teilindikatoren als Komponenten des integrierten Stickstoffindikators | 17 |
| Tabelle 2: | Die vier DESTINO-Teilindikatoren mit den schärfsten Zielwerten je Stickstoff-Spezies tragen zur Berechnung des integrierten Stickstoffindikators bei. Die beiden Teilindikatoren terrestrische Ökosysteme / biologische Vielfalt (NH ₃ -Emissionen) und menschliche Gesundheit (NO _x -Emissionen) bleiben unberücksichtigt, weil deren Zielwerte höher liegen als bei den terrestrischen Ökosystemen / Eutrophierung..... | 19 |
| Tabelle 3: | Schutzgüter, Schutzziele und DESTINO-Teilindikatoren als Komponenten des integrierten Stickstoffindikators. | 30 |
| Tabelle 4: | Umrechnungsfaktoren für N-Verbindungen | 32 |
| Tabelle 5: | Deposition reduzierter und oxidiertes N-Verbindungen auf Flächen für die kritischen Eintragungswerte (Critical Loads) ausgewiesen sind; Höhe der Überschreitungen der Critical Loads auf diesen Flächen, sowie NH ₃ - und NO _x -Emissionen Deutschlands..... | 45 |
| Tabelle 6: | Illustrative Zahlen, wie das Reduktionsziel, 388 kt N a ⁻¹ , auf unterschiedliche Weise erreicht werden kann. Alle Werte beziehen sich auf die Emissionen im Jahr 2015 (361 kt NO _x -N a ⁻¹ , 625 kt NH ₃ -N a ⁻¹ , Summe 986 kt N a ⁻¹) und sind gerundet. | 46 |
| Tabelle 7: | Reduktionsziele und Zielwerte für stickstoffhaltige Luftschadstoffemissionen gemäß NEC-Richtlinie für 2030. Die Ziele für NO _x und NH ₃ sind einzeln festgelegt, nicht für die Summe; deshalb sind die Zahlen für „N total“ kursiv angegeben..... | 49 |
| Tabelle 8: | Stickstoff-Minderungsbedarf in den deutschen Zuflüssen in die Nordsee und Ostsee, verschiedene Zeiträume (LAWA, 2018) | 54 |
| Tabelle 9: | Quellen und Verbleib von Stickstoff-Einträgen in Oberflächengewässer in Deutschland nach MoRE-Modellberechnung, Mittel 2010 – 2014 (Fuchs et al. 2017; Zusammenstellungen in DESTINO-Teilbericht 2, UBA 2020). | 56 |
| Tabelle 10: | Klimaschutzplan, Zwischenziele 2030 des BMUB je Sektor..... | 65 |
| Tabelle 11: | DESTINO-Teilindikatoren und ihre Zielwerte..... | 80 |
| Tabelle 12: | Die DESTINO-Teilindikatoren mit den schärfsten Zielwerten je Stickstoff-Spezies tragen zur Berechnung des integrierten Stickstoffindikators bei. Die beiden übrigen Teilindikatoren (unterste Zeilen) bleiben unberücksichtigt. | 83 |
| Tabelle 13: | Vergleich der DESTINO-Teilindikatoren mit den Daten der nationalen Stickstoffbilanz..... | 86 |
| Tabelle 14: | Sensitivitätsanalyse des Zielwerts für das Schutzgut menschliche Gesundheit in Bezug auf den Anteil an importierten N-Verbindungen. | 91 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 15: | NO _x -Emissionen 2005, 2015 und Zielstellung 2030 mit und ohne Landwirtschaft in Abhängigkeit vom Datenstand der Emissionsberichterstattung..... | 94 |
| Tabelle 16: | NH ₃ -Emissionen 2005, 2015 und Zielstellung 2030 in Abhängigkeit vom Datenstand der Emissionsberichterstattung..... | 94 |
| Tabelle 17: | Rechnerisch ermittelte Zielstellungen und Umrechnung an die Vorgaben des NLRP, an den Zielhorizont 2030 und an die Anforderungen für die Kommunikation..... | 95 |
| Tabelle 18: | Indikator NH ₃ -Emissionen..... | 97 |
| Tabelle 19: | Indikator NO _x -Emissionen..... | 98 |
| Tabelle 20: | Indikator Gesamt-Stickstoff-Frachten in deutschen Zuflüssen zu Nord- und Ostsee..... | 98 |
| Tabelle 21: | Karte Nitrat-Konzentration im Grundwasser..... | 99 |
| Tabelle 22: | Karte N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche | 100 |
| Tabelle 23: | Indikator N ₂ O-Emissionen..... | 100 |
| Tabelle 24: | Karte der NH ₃ -Immissionen | 101 |
| Tabelle 25: | Karte der NH ₃ -Emissionen | 102 |
| Tabelle 26: | Indikator Messdaten NO ₂ -Immissionen | 103 |
| Tabelle 27: | Indikator NO _x - und NH _y -Depositionen | 103 |
| Tabelle 28: | Anzahl der übermittelten und der für die Modellerstellung verwendeten Messstellen nach Bundesländern (nur Flächenländer berücksichtigt) | 111 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--|---|
| a | Jahr |
| a⁻¹ | pro Jahr |
| BMEL | Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit |
| BMUB | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit |
| CLRTAP | Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung, Genfer Konvention 1979) |
| CO₂ | Kohlendioxid |
| Critical Levels (CL_{ev}) | Wirkungsschwellenwerte zum Schutz der Vegetation, die im Rahmen der Genfer Luftreinhaltkonvention definiert wurden |
| Critical Loads (CL) | Critical Loads sind Stofffrachten. Sie geben an, welche Menge eines Schadstoffs pro Fläche und Zeitraum in ein Ökosystem eingetragen werden kann, ohne dass nach gegenwärtigem Wissensstand langfristig Schädwirkungen auftreten. |
| CTM | Chemie-Transportmodell |
| D | Deposition |
| DE | Deutschland |
| DESTINO | DEutsche STickstoffflüsse, INdikatoren und Objectives |
| DFG | Deutsche Forschungsgemeinschaft |
| DIN | Dissolved Inorganic Nitrogen |
| DON | Dissolved Organic Nitrogen |
| EMEP | European Monitoring and Evaluation Programme (wissenschaftliches Programm unter der CLRTAP) |
| EU | Europäische Union |
| EUA | Europäische Umweltagentur |
| GW | Grundwasser |
| GWK | Grundwasserkörper: Im Sinne der WRRL: abgegrenztes Grundwasservolumen innerhalb eines oder mehrerer Grundwasserleiter; kleinste (nicht teilbare) räumliche Einheit, auf die sich die Zustands-Bewertung und die Maßnahmenplanung nach WRRL beziehen |
| ggü | gegenüber |
| IGW | Immissionsgrenzwert |
| ha | Hektar |
| kt | Kilotonne |
| L | Liter |
| LAWA | Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser |
| LF | landwirtschaftlich genutzte Fläche |

| | |
|--------------------------|--|
| m³ | Kubikmeter |
| MAK | Maximale Arbeitsplatz Konzentration |
| mg | Milligramm |
| µg | Mikrogramm (Millionstel Gramm) |
| µg m⁻³ | Mikrogramm pro Kubikmeter |
| MONERIS | Modelling Nutrient Emissions into River Systems |
| MoRE | Modelling Regional Emissions |
| MRSL | Meeresschutz-Richtlinie |
| N | Stickstoff |
| NEC | National Emission Ceilings |
| NEC-RL | Richtlinie (EU) 2016/2284 des Europ. Parlaments und des Rates vom 14.12.2016 |
| NERC | National Emission Reduction Commitments |
| NH₃ | Ammoniak |
| NH₄ | Ammonium |
| NH_y | Reduzierte Stickstoffverbindungen |
| NLRP | Nationales Luftreinhalteprogramm |
| NMVOC | Nicht-Methan Kohlenwasserstoffe |
| NO | Stickstoffmonoxid |
| NO₂ | Stickstoffdioxid |
| NO_x | Stickstoffoxide |
| NO₃ | Nitrat |
| N₂O | Lachgas (Distickstoffoxid) |
| NÜ | Nutzungsspezifische Überschüsse |
| OI | Optimale Interpolation |
| PM2.5 | Feinstaub mit aerodynamischem Durchmesser kleiner als 2,5 Mikrometer |
| RCG | REM/CALGRID: spezifisches Chemie-Transportmodell |
| TN | Total Nitrogen (Gesamtstickstoff) |
| UBA | Umweltbundesamt |
| UNECE | United Nations Economic Commission for Europe |
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change |
| WHO | World Health Organization; Weltgesundheitsorganisation |
| WRRL | Wasserrahmenrichtlinie |

Zusammenfassung

DESTINO-Projekt (Kap. 1)

Die übermäßige Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt durch landwirtschaftliche Produktion, Energieumwandlung und Mobilität führt zu Problemen, die dringend gelöst werden müssen: Verlust aquatischer und terrestrischer Biodiversität, Beeinträchtigung der Luftqualität, Freisetzung von Treibhausgasen und erschwerte Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser.

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen hat im Januar 2015 mit seiner Veröffentlichung „Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem“ eindringlich dazu aufgerufen, eine Stickstoffminderungsstrategie für Deutschland zu entwickeln und umzusetzen (SRU 2015). Bei vielen dieser Umweltprobleme sind in Deutschland nach wie vor keine oder nur geringe positive Entwicklungen erkennbar, wie das UBA zeigt (UBA 2017).

Auch die Bundesregierung hat ihre Aktivitäten im Umfeld der Stickstoff-Problematik intensiviert. Im Frühjahr 2017 hat sie in ihrer Veröffentlichung „Stickstoffeintrag in die Biosphäre – Erster Stickstoff-Bericht der Bundesregierung“ (BMUB 2017) auf die Dringlichkeit des ressort-übergreifenden Handlungsbedarfs aufmerksam gemacht. Der 1. Stickstoff-Bericht der Bundesregierung wurde auf Initiative und unter Federführung des Bundesumweltministeriums erarbeitet. Im Zuge des Berichts hat das Umweltbundesamt (UBA) mehrere Projekte lanciert, unter anderem auch das vorliegende Vorhaben mit dem Ziel, naturwissenschaftliche Fragen für die Erarbeitung einer integrierten Strategie zur Minderung von reaktiven Stickstoff-Emissionen zu beantworten. Die Ergebnisse dieses Vorhabens sind in zwei Teilberichten dokumentiert. Es wird unter dem Akronym DESTINO (**DE**utsche **ST**ickstoffflüsse, **IN**dikatoren und **O**bjectives) geführt und verfolgt zwei Ziele:

- ▶ **Herleiten eines Gesamtindikators für Stickstoff:** Ein sektor- und medienübergreifender Wert für den Gesamteintrag oder die Gesamtemission reaktiven Stickstoffs auf der nationalen Ebene Deutschlands soll maximale Belastungsgrenzen bzw. den sicheren Handlungsrahmen markieren (Teilbericht 1).
- ▶ **Aktualisierung der nationalen Stickstoffbilanz:** Eine nationale Stickstoffbilanz wurde im Jahr 2015 vom Umweltbundesamt auf Grundlagendaten der Jahre 2005 – 2010 zusammengestellt (Umweltbundesamt 2015). Das Göteborg Protokoll, das im Jahr 2012 überarbeitet wurde, empfiehlt den Signatarstaaten, regelmäßig nationale Stickstoffbilanzen zu erarbeiten und deren Entwicklungen zu berichten. Das zugehörige „Guidance document on national nitrogen budgets“ gibt methodische Leitlinien zur Erstellung solcher Bilanzen vor (ECE 2013). Im DESTINO-Projekt wurde die nationale Stickstoffbilanz gemäß diesen Vorgaben aktualisiert (Teilbericht 2; UBA 2020).

Der vorliegende erste Teilbericht dokumentiert die Herleitung des integrierten Stickstoffindikators und präsentiert die Ergebnisse für den IST-Zustand. Der Zielwert, das nationale Stickstoffziel, wird berechnet und mit dem IST-Zustand verglichen.

Das UBA erhebt und beobachtet diverse Stickstoff-Indikatoren zum Zustand der Umwelt. Ein Teil davon wird jährlich im „Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt“ publiziert, letztmals im Jahr 2017 (UBA 2017). Das Ziel des DESTINO-Projekts ist nicht, solche Indikatoren zu ersetzen, sondern dazu **ergänzend** einen Satz von kompatiblen Indikatoren samt Zielwerten zu generieren, sodass daraus ein integrierter Stickstoffindikator mit einem entsprechenden (Gesamt)Zielwert hergeleitet werden kann. Der integrierte Stickstoffindikator verdichtet Indikatoren für unterschiedliche Schutzziele zu einem einzigen Indikator. Er stellt damit einen Versuch dar, die vielfältigen Schadenswirkungen der reaktiven Stickstoffverbindungen zu integrieren. Er geht von den einzelnen Aspekten aus und versucht, daraus eine Synthese zu erstellen, die es bisher in dieser Form für die nationale Ebene in Deutschland noch nicht gegeben hat.

Im Laufe der Arbeiten stellte das Projektteam sein methodisches Vorgehen und provisorische Ergebnisse zum integrierten Stickstoffindikator anlässlich eines Fachgesprächs in Berlin (6. Sept. 2017) einem Kreis nationaler und internationaler Fachleute vor. Verschiedene Anregungen wurden geäußert und dienten der Verbesserung des Vorgehens.

Schutzgüter, Schutzziele und DESTINO-Teilindikatoren (Kap. 2)

Tabelle 1 zeigt die Stickstoff-sensitiven Schutzgüter, für die quantitative Schutzziele vorgegeben sind und zu denen im DESTINO-Projekt Teilindikatoren und Zielwerte bestimmt wurden.

Tabelle 1: Schutzgüter, Schutzziele und DESTINO-Teilindikatoren als Komponenten des integrierten Stickstoffindikators

| Schutzgüter | Schutzziele | Grundlagen | DESTINO-Teilindikatoren |
|---|--|--|---|
| Terrestrische Ökosysteme/Biolog. Vielfalt | NH ₃ -Immissionskonzentration: Critical Level für höhere Pflanzen ^a 3 µg m ⁻³ NH ₃ | Göteborg-Protokoll ^b | NH ₃ -Emissionen |
| Terrestrische Ökosysteme/Eutrophierung | Stickstoff-Deposition: Critical Load N _{total} (Werte sind Ökosystem-spezifisch unterschiedlich) | NEC-Richtlinie ^c | Summe NH ₃ - und NO _x -Emissionen |
| Oberflächengewässer | Nitrat-Konzentration Nordsee 2,8 mg N _{gesamt} l ⁻¹ und Ostsee: 2,6 mg N _{gesamt} l ⁻¹ | Oberflächengewässerverordnung ^d | N-Fracht |
| Grundwasser | Nitrat-Konzentration im Grundwasser: 50 mg l ⁻¹ | Grundwasserverordnung ^e | Nitrat-Eintrag (N-Überschuss) |
| Klima | N ₂ O-Emission: Langfristziel Klimaschutzplan | Klimaschutzplan ^f | N ₂ O-Emissionen |
| Menschliche Gesundheit | NO ₂ -Immissionskonzentration Luft: WHO-Wirkungsschwelle Hintergrundbelastung 20 µg m ⁻³ | HRAPIE Studie der WHO ^g | NO _x -Emissionen |

^a Neben dem Critical Level für höhere Pflanzen gibt es den Critical Level für niedrigere Pflanzen (1 µg NH₃ m⁻³). Für die Herleitung eines nationalen Zielwerts wird nur das Schutzziel für höhere Pflanzen berücksichtigt (siehe Kap. 3.1.5)

^b <http://www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlrapwelcome/guidance-documents-and-other-methodological-materials/gothenburg-protocol.html> [31.08.2018]

^c Richtlinie (EU) 2016/2284 des Europ. Parlaments und des Rates vom 14.12.2016

^d Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (OGewV), 20.06.2016

^e Verordnung zum Schutz des Grundwassers (GrwV), 09.11.2010

^f Klimaschutzplan 2050, Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). November 2016

^g Recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide (WHO 2013)

DESTINO-Teilindikatoren und Zielwerte (Kap. 3)

Zu jedem Schutzgut und dem zugehörigen Schutzziel wurde im DESTINO-Projekt eine Rückwärtsrechnung entwickelt, mit der die maximal erlaubten Stickstoffverluste (Emissionen, Überschüsse, Einträge)

je Stickstoffspezies aus den Schutzziele berechnen werden können. Überschreiten die Stickstoffverluste die zur Erreichung des Schutzziele maximal erlaubte Menge, d.h. den Zielwert, besteht ein Handlungsbedarf.

Für jedes Schutzgut wurde zunächst untersucht, welche Daten verfügbar sind welche sich eignen, um die maximal zulässigen Stickstoffverluste für die jeweilige Stickstoffspezies bzw. den jeweiligen DESTINO-Teilindikator bestimmen zu können. Anschließend wurden Schutzgut-spezifische Methoden entwickelt und damit die gesuchten Größen berechnet. Für die Einzelheiten wird auf die entsprechenden Kapitel im Hauptteil des vorliegenden Berichts verwiesen.

Nationales Stickstoffziel (Kap. 4)

Für den integrierten Stickstoffindikator hat das UBA eine Liste von Anforderungen erstellt. Der Zielwert, das nationale Stickstoffziel, soll unter anderem wirkungsbasiert (d.h. auf Schutzziele bezogen) abgeleitet werden und soll die betrachteten Schutzgüter gleichwertig behandeln. Der integrierte Stickstoffindikator soll auch periodisch nachführbar sein.

Abbildung 1 zeigt die Auswahl der berücksichtigten Schutzgüter mit den zugehörigen DESTINO-Teilindikatoren (siehe auch Tabelle 1). Dargestellt sind ihre auf 100 % skalierten DESTINO-Zielwerte sowie ihre Werte im IST-Zustand.

Zur Herleitung des nationalen Stickstoffziele wird eine Selektion vorgenommen: Pro Stickstoff-Spezies wird nur ein DESTINO-Teilindikator selektiert und zwar derjenige mit dem niedrigsten Zielwert für die jeweilige Stickstoff-Spezies. Das heißt, die Ziele für NH_3 - und NO_x -Emissionen werden vom empfindlicheren der beiden Schutzgüter, denen diese beiden Teilindikatoren zugeordnet wurden, übernommen. Die Summe über alle vorkommenden Spezies ergibt den Zielwert des integrierten Stickstoffindikators, das heißt das nationale Stickstoffziel (Tabelle 2 und Abbildung 2). Ergebnisse:

- ▶ Das nationale Stickstoffziel ist die Summe von berechneten, maximal zulässigen NO_x -, NH_3 -, N_2O -Emissionen und Nitratüberschüssen, um Ziel- bzw. Grenzwerte für insgesamt sechs stickstoffempfindliche Schutzgüter einzuhalten.
- ▶ Der Wert des integrierten Stickstoffindikators im IST-Zustand beträgt 1.574 kt N a⁻¹, der Zielwert, das nationale Stickstoffziel liegt bei 1.053 kt N a⁻¹. Bezogen auf die Bevölkerung betragen die Stickstoffverluste 19,2 kg N pro Einwohner im Jahr 2015. Für die Zielerreichung wäre eine Reduktion auf maximal 12,8 kg N pro Einwohner und Jahr erforderlich gewesen.
- ▶ Für kommunikative und politische Zwecke ist die Anpassung und die Verwendung eines gerundeten Wertes von 1.000 kt N a⁻¹ zulässig.

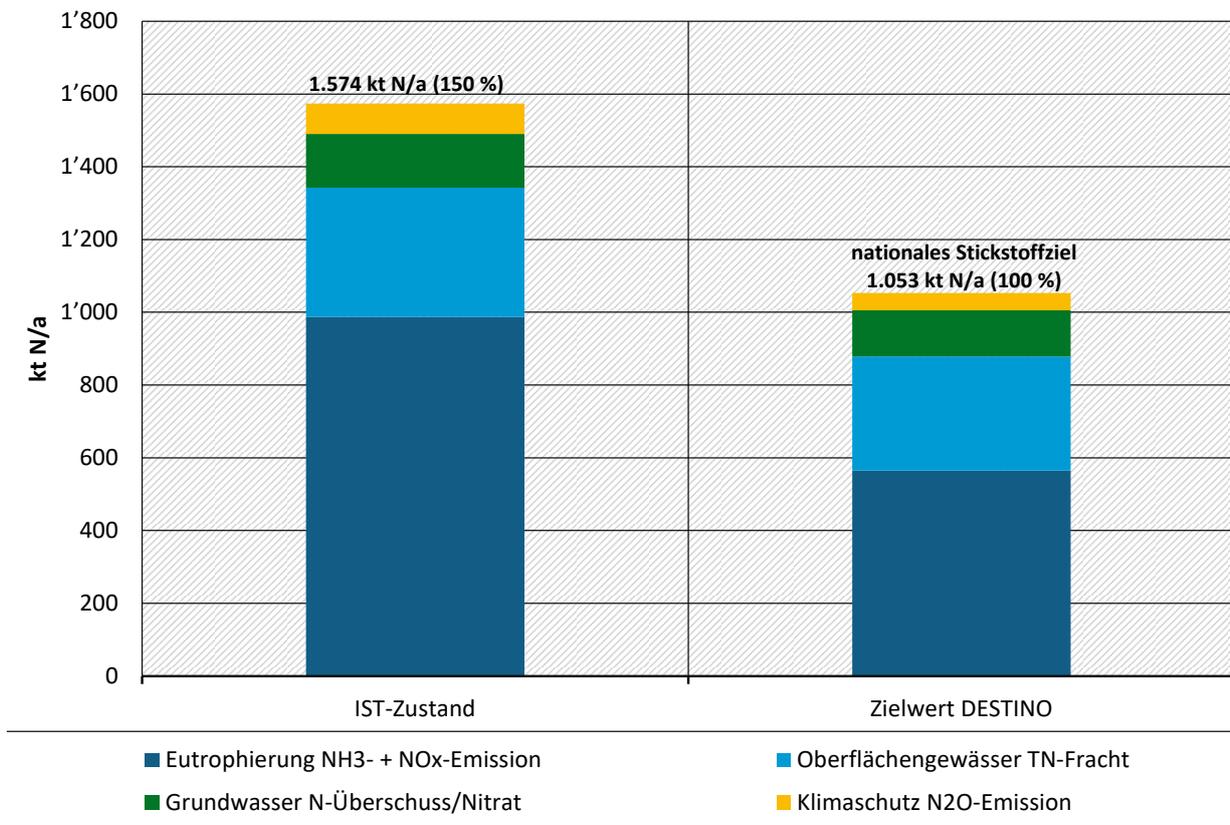
Abbildung 1: Die sechs Schutzgüter und ihre DESTINO-Teilindikatoren im IST-Zustand und ihre Zielwerte (100 %) in relativer Darstellung.



Tabelle 2: Die vier DESTINO-Teilindikatoren mit den schärfsten Zielwerten je Stickstoff-Spezies tragen zur Berechnung des integrierten Stickstoffindikators bei. Die beiden Teilindikatoren terrestrische Ökosysteme / biologische Vielfalt (NH₃-Emissionen) und menschliche Gesundheit (NO_x-Emissionen) bleiben unberücksichtigt, weil deren Zielwerte höher liegen als bei den terrestrischen Ökosystemen / Eutrophierung.

| Schutzgüter | Stickstoffspezies | DESTINO-Teilindikatoren | |
|---|---|--|--|
| | | IST-Zustand (in kt N a ⁻¹) | niedrigster Zielwert (in kt N a ⁻¹) |
| Terrestr. Ökosysteme / Eutrophierung | Summe NH ₃ - und NO _x -Emissionen | 625,3 kt NH ₃ -N a ⁻¹ 361,4 kt NO _x -N a ⁻¹ | 396,4 kt NH ₃ -N a ⁻¹ 168,0 kt NO _x -N a ⁻¹ |
| Oberflächengewässer | TN-Fracht | 356,2 kt TN a ⁻¹ | 314,0 kt TN a ⁻¹ |
| Grundwasser | N-Überschuss / Nitrat | 147,6 kt N a ⁻¹ | 126,6 kt N a ⁻¹ |
| Klimaschutz | N ₂ O-Emissionen | 83,4 kt N ₂ O-N a ⁻¹ | 47,8 kt N ₂ O-N a ⁻¹ |
| integrierter Stickstoffindikator | | 1.574 kt N a⁻¹ (150 %) | 1.053 kt N a⁻¹ (100 %) |

Abbildung 2: Integrierter Stickstoffindikator IST-Zustand und Zielwert (nationales Stickstoffziel) absolut (in kt N a⁻¹) und relativ (in Prozent).



Die vorliegenden Methoden und Ergebnisse stellen den ersten Versuch dar, einen integrierten Stickstoffindikator zu schaffen, mit dem der IST-Zustand und ein nationales Ziel für die gesamten Stickstoff-Verluste angegeben werden können. Das Ergebnis zeigt, dass ein solcher integrierter Stickstoffindikator möglich ist. Die vorgeschlagenen Methoden sind relativ einfach anwendbar, sie setzen aber voraus, dass eine Reihe von Datengrundlagen (Messwerte, Modellierungen) vorhanden sind. Für die Nachführung des integrierten Stickstoffindikators müssen keine ad hoc Daten erhoben werden, alle benötigten Informationen werden im Rahmen der laufenden Umweltbeobachtung beschafft. Um den Zielwert zu überprüfen oder präzisieren, sind zusätzliche Messungen und Modellierungen erforderlich, aber auch diese werden derzeit von den zuständigen Behörden in anderen Programmen durchgeführt oder in Auftrag gegeben werden. In den vorliegenden Analysen wurden mögliche Einflüsse von Import und Export von Schadstoffen ausgeklammert. Die Methoden sind dadurch einfacher und zusätzlich sind die Berechnungen nicht von ausländischen Messungen und Modellrechnungen abhängig. Im Kap. 4.3.2 wird auf die Problematik und die möglichen Auswirkungen auf die DESTINO-Indikatoren eingegangen.

Die vorliegenden Ergebnisse entsprechen mehrheitlich den Erwartungen: Die heutigen Stickstoffverluste sind wesentlich zu hoch. Gemessen an dem berechneten Zielwert ist eine generelle Reduktion um mindestens ein Drittel notwendig. Diese Reduktion ist aber aus zweierlei Gründen noch nicht hinreichend: 1) Der berechnete Zielwert basiert auf Teilzielen, die ihrerseits erst als Etappenziele festgelegt sind, mit denen die langfristigen, gesundheitlichen und ökologischen Schutzziele noch nicht erreicht werden. Damit wird auch **das nationale Stickstoffziel zu einem Etappenziel**. 2) Die Mehrheit der Teilziele wird aus räumlichen Daten zu Mittelwerten oder Summen hochgerechnet, die selber keinen Raumbezug mehr enthalten. Mit diesem Konzept sind Emissionskonstellationen denkbar, mit denen das nationale Stickstoffziel eingehalten wird, indem in einzelnen Gebieten Deutschlands das Ziel unterschritten wird und gleichzeitig in anderen Gebieten noch Zielwertüberschreitungen vorkommen. Mit

anderen Worten: Für die flächendeckende Einhaltung der Schutzziele ist die Erreichung des Zielwerts für den integrierten Stickstoffindikator zwar eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung. Aus dem Erreichen des Zielwerts beim integrierten Stickstoffindikator darf deshalb nicht geschlossen werden, dass das Schutzziel überall (flächendeckend) eingehalten wird, sondern bloß im räumlichen Mittel. **Für eine flächendeckende Einhaltung aller Schutzziele sind weitergehende Reduktionen erforderlich.** Aus den beiden genannten Gründen ist das nationale Stickstoffziel als Ergänzung bestehender, sektorspezifischer, räumlicher Indikatoren und Ziele zu betrachten. Die parallele Weiterführung und Überprüfung bestehender Indikatoren für stickstoffbezogene Schutzgüter, inklusive der Überwachung der räumlichen Komponente, ist dabei unerlässlich. Das Konzept eines integrierten Stickstoffindikators dient dem Versuch, die komplexe Problematik von Stickstoff in der Umwelt in einer einzigen Zahl zu integrieren, um damit die dringend nötige Kommunikation zu unterstützen, die nötig ist, um die Verluste reaktiven Stickstoffs zu verringern.

Im Bericht wird auch auf die „Planetare Grenzen“ (planetary boundaries) verwiesen (Kap. 4.4). In diesem Konzept wird unter anderem auch für Stickstoff eine planetare Grenze hergeleitet. Diese kann zwar auf Deutschland umgerechnet werden, aber das Ergebnis ist außerordentlich stark von der Wahl der Bezugsgröße (z. B. pro Kopf, pro landwirtschaftliche Nutzfläche, pro Kopf Konsum) abhängig, was zu einer entsprechend großen Unsicherheit des Resultats führt. Das Konzept der Planetaren Grenzen beschränkt sich auf „absichtlich fixierten“ Stickstoff, während Schutzgüter und Schutzziele, auf die der integrierte Stickstoffindikator fokussiert, nicht berücksichtigt werden.

Summary

DESTINO Project (Chapter 1)

The excessive release of reactive nitrogen into the environment by agricultural production, energy conversion, and mobility has led to problems that must be solved as a matter of urgency, such as the loss of aquatic and terrestrial biodiversity, air pollution, the release of greenhouse gases, and the increased difficulties faced when treating groundwater to provide drinking water.

In January 2015, the German Advisory Council on the Environment proposed strategies for resolving the urgent environmental problem of nitrogen (SRU 2015). However, little or no progress has been made in tackling many of the environmental problems faced in Germany, as UBA has shown (UBA 2017).

The German federal government is intensifying its efforts with regard to nitrogen. In “Nitrogen input in the biosphere” (BMUB 2017), attention was drawn to the urgent need for inter-departmental action. The first governmental nitrogen report was produced on the initiative of the Federal Environment Ministry and following this the German Environment Agency (UBA) launched a number of initiatives. One of these was this **DESTINO** project, which has had the remit of answering scientific questions relating to the development of an integrated strategy for the reduction of reactive nitrogen emissions. The results of are documented in two reports:

- ▶ **Deriving an integrated indicator for nitrogen:** A cross-sector and cross-media value for the total emissions of reactive nitrogen at the national level should mark the critical level for Germany or the limits of safe activity (Report 1).
- ▶ **Updating the national nitrogen budget:** A national nitrogen budget was drawn up in 2015 by the German Environment Agency using data for the period 2005 – 2010 (UBA 2015). The Gothenburg Protocol, which was revised in 2012, recommends that the signatory states should regularly update the national nitrogen budgets and report on developments. The “Guidance document on national nitrogen budgets” provides guidelines for producing such a budget (ECE 2013). In the DESTINO Project, the national nitrogen budget has been updated using this methodology (Report 2; UBA 2020).

This DESTINO Report 1 documents the derivation of the integrated nitrogen indicator and presents the data for the current situation. The national nitrogen target is calculated and compared with the current level.

The German Environment Agency monitors various environmental indicators relating to reactive nitrogen. A selection of the results is published annually in the “Data on the Environment – Indicator report” (UBA 2017). The DESTINO Project does not aim to replace such indicators, but rather to generate a set of compatible indicators and target values from which to derive an integrated nitrogen indicator with a corresponding (total) target value. The integrated nitrogen indicator combines indicators for various sectors. It represents an attempt to integrate the many impacts of reactive nitrogen species. It aims to synthesise the individual aspects, which has not previously been done in this form at the national level in Germany.

The project team presented its methodology and the provisional results for an integrated nitrogen indicator to a group of national and international experts in Berlin (6 September 2017). Various suggestions were made which contributed to the improvement of the approach.

Environmental sectors, targets, and DESTINO indicators (Chapter 2)

Table 1 shows the nitrogen-sensitive environmental sectors which have been allocated quantitative sectoral targets, and in this project DESTINO indicators and target values have been determined.

Table 1: Environmental sectors, targets, and DESTINO indicators as components of the integrated nitrogen indicator

| Sector | Target values | Basis | DESTINO indicators |
|---------------------------------------|---|--|---|
| Terrestrial ecosystems/Biodiversity | NH ₃ ambient pollution level: Critical Level for vascular plants ^a 3 µg m ⁻³ NH ₃ | Gothenburg Protocol ^b | NH ₃ emissions |
| Terrestrial ecosystems/Eutrophication | Nitrogen deposition: Critical Load N _{total} (values are ecosystem specific) | NEC-Directive ^c | Total NH ₃ and NO _x emissions |
| Surface waters | Nitrate concentration North Sea 2.8 mg N _{total} l ⁻¹ and Baltic Sea: 2.6 mg N _{total} l ⁻¹ | Ordinance on the Protection of Surface Waters (OGewV) ^d | N-load |
| Groundwater | Nitrate concentration in groundwater: 50 mg l ⁻¹ | Groundwater Ordinance ^e | Nitrate inputs (N-exceedance) |
| Climate | N ₂ O emission: Climate Action Plan long-term goal | Climate action plan ^f | N ₂ O emissions |
| Human health | NO ₂ ambient pollution level in air: WHO-Background response threshold 20 µg m ⁻³ | HRAPIE Study of WHO ^g | NO _x emissions |

^a There is also a critical level for non-vascular plants (1 µg NH₃ m⁻³). On the use of the critical level for vascular plants see Section 3.1.5

^b <http://www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlrapwelcome/guidance-documents-and-other-methodological-materials/gothenburg-protocol.html> [31.08.2018]

^c Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and the Council, 14.12.2016s

^d Ordinance on the Protection of Surface Waters (OGewV), 20.06.2016

^e German Groundwater Ordinance (GrwV), 09.11.2010

^f Climate Action Plan 2050, Principles and goals of the German government's climate policy. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB). November 2016

^g Recommendations for concentration response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide (WHO 2013)

DESTINO indicators and targets (Chapter 3)

For each environmental sector and its associated target, a back calculation is developed with which the maximum permitted nitrogen losses (emissions, exceedances, inputs) can be calculated for each nitrogen species. Wherever the nitrogen losses exceed maximum permitted values then there is a need for action.

For each sector, we first investigated what data were available for the calculation of the maximum permissible nitrogen losses for the relevant nitrogen species or DESTINO-indicator. Specific methods were then developed for the environmental sectors, and the appropriate values were determined. The details are explained in the relevant chapters.

National nitrogen target (Chapter 4)

UBA has formulated a list of requirements for the integrated nitrogen indicator. Among other things, the national nitrogen target should be affect-based, and should treat the various environmental sectors equally. It should also be possible to upgrade the integrated nitrogen indicator periodically.

Abbildung 1 shows the selected environmental sectors with the DESTINO indicators (see also Tabelle 1). These are presented relative to the six DESTINO-target values 100 %.

In order to derive the national nitrogen target, only the DESTINO-indicator is chosen which has the lowest target value for each specific nitrogen species. This means that the targets for NH_3 and NO_x emissions are adopted from the more sensitive of the two environmental sectors to which two indicators were allocated. The total for all nitrogen species gives the national nitrogen target value for the integrated nitrogen indicator (Table 2 and Abbildung 2):

- ▶ The national nitrogen target is the sum of the calculated, maximum permitted NO_x , NH_3 , N_2O emissions, and nitrate exceedances, in order to remain below the target values or critical levels for the six nitrogen sensitive environmental sectors.
- ▶ The current value for the integrated nitrogen indicator is 1574 kt N a^{-1} , compared with the national nitrogen target of 1053 kt N a^{-1} . For the German population, this is equivalent to nitrogen losses of 19.2 kg N per person in the year 2015. Achieving the target would have required a reduction to 12.8 kg N per person per year or lower.
- ▶ For communicative and political purposes a rounded figure of 1000 kt N a^{-1} can be used.

Figure 1: The six environmental sectors and the current status of the DESTINO-indicators relative to the target values (100 %)

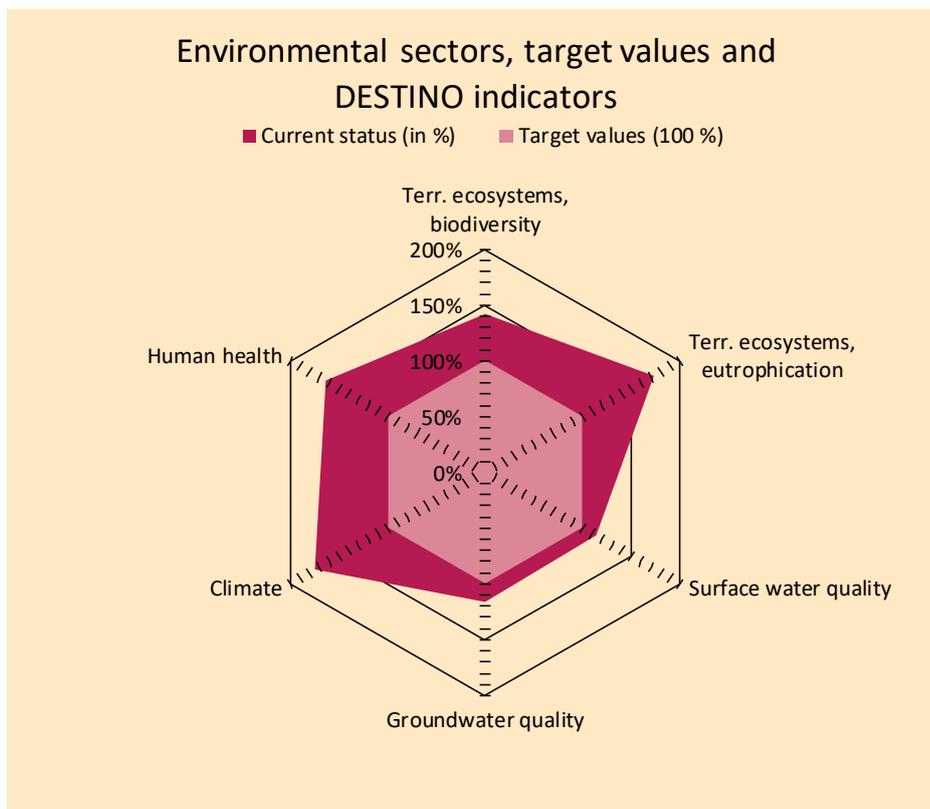
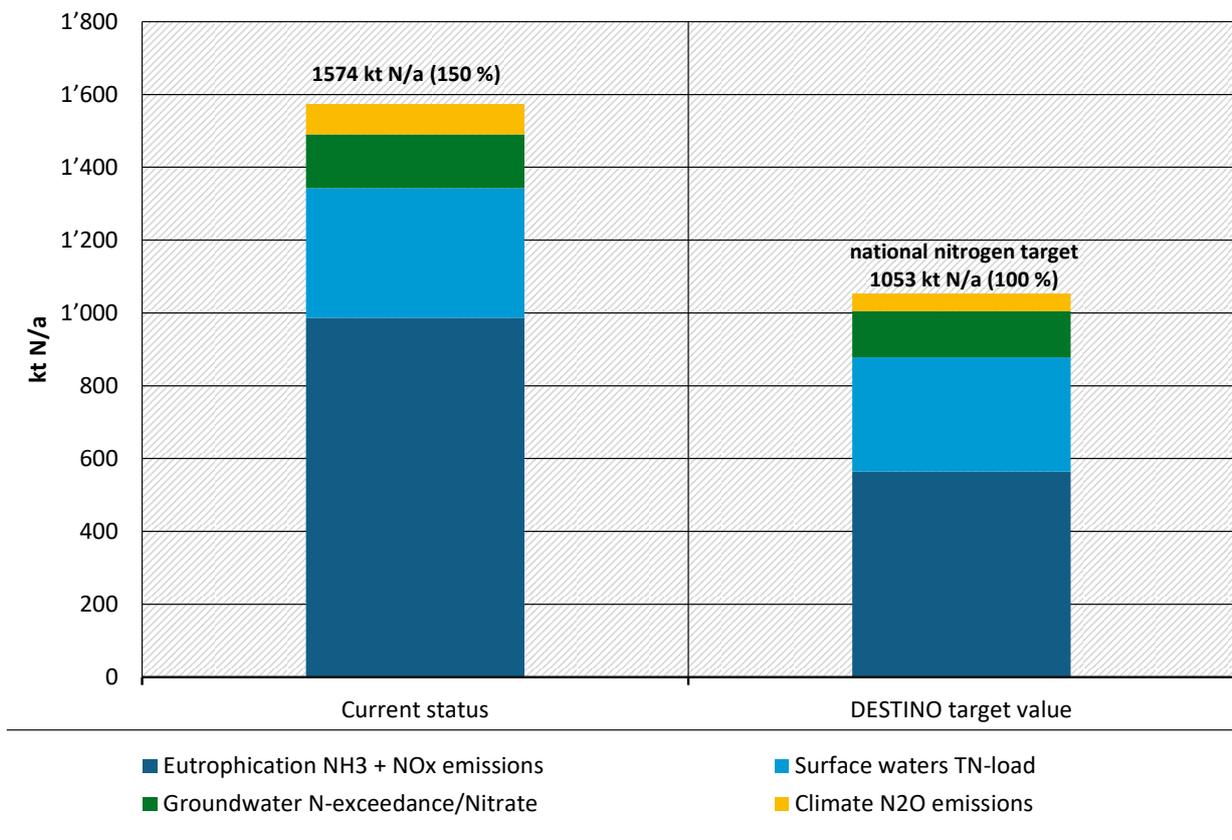


Table 2: The four DESTINO-indicators with the most demanding target values for each nitrogen species are used to calculate the integrated nitrogen indicator. Terrestrial ecosystems / biodiversity (NH₃ emissions) and Human health (NO_x emissions) are not taken into consideration because their target values are higher than for Terrestrial ecosystems / Eutrophication.

| Sector | Nitrogen species | DESTINO-indicators | |
|---|---|--|--|
| | | Current status (in kt N) | Lowest target value (in kt N) |
| Terrestrial ecosystems / eutrophication | NH ₃ and NO _x emissions | 625.3 kt NH ₃ -N a ⁻¹ 361.4 kt NO _x -N a ⁻¹ | 396.4 kt NH ₃ -N a ⁻¹ 168.0 kt NO _x -N a ⁻¹ |
| Surface waters | Total nitrogen load | 356.2 kt TN a ⁻¹ | 314.0 kt TN a ⁻¹ |
| Groundwater | N-exceedance / Nitrate | 147.6 kt N a ⁻¹ | 126.6 kt N a ⁻¹ |
| Climate | N ₂ O emissions | 83.4 kt N ₂ O-N a ⁻¹ | 47.8 kt N ₂ O-N a ⁻¹ |
| Integrated nitrogen indicator | | 1574 kt N a⁻¹ (150 %) | 1053 kt N a⁻¹ (100 %) |

Figure 2: Integrated nitrogen indicator current status and target value (national nitrogen target): in absolute terms (kt N a⁻¹) and as a percentage.



The methods and results in this report represent a first attempt to create an integrated nitrogen indicator which describes the current situation and with which a national target for the total nitrogen-losses can be specified. The result shows that such an integrated nitrogen indicator is feasible. The

proposed methods are relatively straightforward, but they require suitable data (measurements, modelling results). No ad-hoc data needs to be collected to update the integrated nitrogen indicator, because all the necessary information is collected in the course of on-going environmental observations. Additional measurements or modelling will be required in order to check or refine the target value, but this work is being carried out or commissioned by the relevant public authorities and agencies. In our analyses, possible influences of imports and exports of pollutants are not taken into consideration. The methods are then simpler and the calculations are not dependent on measurements and model calculations from other countries. In Section 4.3.2 we discuss possible consequences of this for the DESTINO indicators.

For the most part, the results we obtained corresponded to our expectations: in short, nitrogen losses are currently much too high. On the basis of the calculated target values, a general reduction of at least one third is required. However, such a reduction is insufficient for two reasons: 1) The calculated target values are based on sectoral targets which are in turn only specified for an initial stage and fall short of the long-term goals for the protection of human health and the environment. This means that the **national nitrogen target is an interim target**. 2) The majority of the sectoral targets are calculated using spatial data and expressed as mean values or total which no longer have a spatial dimension. With this concept, emissions constellations are still conceivable in which the national nitrogen target could be met in general, but at the same time the levels over (larger) areas of Germany levels were still in excess of the target values for some or all of the sectoral indicators. In other words, the target value for the integrated nitrogen indicator, as a spatial mean, represents a necessary but not sufficient condition for meeting the sectoral targets at every location. Further reductions will be needed if all sectoral targets are to be met everywhere. Therefore, the national nitrogen target can only augment existing, sector-specific spatial indicators and targets. It is essential that the existing indicators for environmental sectors are supervised and updated in parallel, including the monitoring of the spatial components. An integrated nitrogen indicator serves to express the complexities of the environmental problems posed by nitrogen in a single parameter, supporting the urgently necessary communications on reducing the losses of reactive nitrogen.

Reference is made in the report to planetary boundaries (Chapter 4.4), one of which is a planetary boundary for nitrogen. It is possible to scale these down to the German level, but the result is very highly dependent on the frame of reference used (e.g. per capita, per utilised agricultural areas, per capita consumption), so that the results have a correspondingly large uncertainty. Das Konzept beschränkt sich auf „absichtlich fixierten“ Stickstoff, während Schutzgüter und Schutzziele, auf die der integrierte Stickstoffindikator fokussiert, nicht berücksichtigt werden.

1 DESTINO: Deutsche Stickstoffflüsse, Indikatoren und Objectives

1.1 Projektziele und Arbeitspakete

Der Mensch hat den natürlichen Stickstoffkreislauf in den letzten gut 100 Jahren massiv verändert; die Menge reaktiven Stickstoffs in der Umwelt hat dadurch dramatisch zugenommen (UBA 2015). Die übermäßige Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt durch zahlreiche anthropogene Prozesse – vor allem landwirtschaftliche Produktion, Energieumwandlung und Mobilität – führt zu einer Reihe von Problemen, die dringend gelöst werden müssen. Dazu gehören der Verlust aquatischer und terrestrischer Biodiversität, eine Beeinträchtigung der Luftqualität und damit der menschlichen Gesundheit, die erhöhte Freisetzung von Treibhausgasen, welche zu einer weltweiten Erwärmung des Klimas führen, und eine erschwerte Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser durch Verschmutzung mit Nitrat. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen hat im Januar 2015 in einem Sondergutachten mit dem Titel „Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem“ eindringlich dazu aufgerufen, eine Stickstoffminderungsstrategie für Deutschland zu entwickeln und umzusetzen (SRU 2015). Bei vielen dieser Umweltprobleme sind in Deutschland, wie das UBA (2017) zeigt, nach wie vor keine oder nur geringe positive Entwicklungen erkennbar (UBA 2017). Der Sachverständigenrat schreibt dazu:

„Stickstoffrelevante Ziele sollten gebündelt und das Zielsystem weiterentwickelt werden. Als Leitgröße sollte ein übergeordnetes Ziel für den noch akzeptablen Gesamteintrag von reaktivem Stickstoff in die Umwelt in Deutschland definiert werden. Dieses übergeordnete Ziel sollte sich an der Belastbarkeit der Ökosysteme orientieren und in einem interaktiven Prozess unter Beteiligung von Wissenschaft und gesellschaftlichen Gruppen festgelegt werden. Basis dieses Prozesses sollte eine medienübergreifende Modellierung der Einträge und Wirkungen reaktiver Stickstoffverbindungen sein. Das übergeordnete Ziel sollte mit Zielen für den Stickstoffeinsatz in der Landwirtschaft und für Stickstoff-Emissionen aus dem Verkehrs- und Energiesektor untersetzt werden.“ (SRU 2015)

Auch die Bundesregierung hat ihre Aktivitäten im Umfeld der Stickstoff-Problematik intensiviert. Im Frühjahr 2017 hat sie den Bericht „Stickstoffeintrag in die Biosphäre – Erster Stickstoff-Bericht der Bundesregierung“ (Bundesregierung 2017) beschlossen und auf die Dringlichkeit des Ressort-übergreifenden Handlungsbedarfs aufmerksam gemacht. Im Zuge dessen hat das Umweltbundesamt (UBA) mehrere Projekte lanciert, unter anderen auch ein Vorhaben mit dem Ziel, naturwissenschaftliche Fragen für die Erarbeitung einer integrierten Strategie zur Minderung von Stickstoff-Emissionen zu beantworten. Das UBA hat unter der Forschungskennzahl 3716 51 200 0 bereits im Jahr 2016 ein Projekt unter dem Akronym DESTINO (**DE**utsche **ST**ickstoffflüsse, **IN**dikatoren und **OB**jectives) ausgeschrieben und ausgelöst, das zwei wichtige Beiträge zu einer Stickstoffminderungsstrategie leisten soll:

1. Beitrag: Herleiten eines integrierten Stickstoffindikators.

Ein sektor- und medienübergreifender Zielwert für den Gesamteintrag oder die Gesamtemission reaktiven Stickstoffs auf der nationalen Ebene Deutschlands soll maximale Belastungsgrenzen bzw. den sicheren Handlungsrahmen markieren. Bisher gibt es zwar viele Einzel-Indikatoren zur Stickstoffproblematik, aber keinen integrierten Stickstoffindikator. In der Diskussion um den Klimawandel gibt es einen Gesamtindikator, nämlich den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur gegenüber dem vorindustriellen Niveau mit dem Ziel, den Anstieg auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen. Dieser Indikator hat sich in der Kommunikation bewährt, weil er sämtliche, komplexen (wärmenden und kühlenden) Effekte in sich vereint und die aggregierte Wirkung mit einer einzigen Zahl beschreiben kann. Damit spielt dieser Indikator zum Klimawandel eine wichtige Rolle in der politischen Kommunikation des Problems. Ziel des DESTINO-Projekts ist die Entwicklung eines vergleichbaren Stickstoffindikators, welcher die Kommunikation der nicht minder komplexen Umweltproblematik des Stickstoffs unterstützen soll. Der Gesamtindikator, im Folgenden als **integrierter Stickstoffindikator** bezeichnet,

soll den aktuellen Zustand beschreiben, den Zielwert aufzeigen und positive oder negative Entwicklungen, die Effekte technischer Maßnahmen und politischer Instrumente im Laufe der Zeit zum Ausdruck bringen. Der Zielwert wird im Folgenden als **nationales Stickstoffziel** benannt,

2. Beitrag: Aktualisierung der nationalen Stickstoff-Flussbilanzierung

In Artikel 7, "Reporting", des 2012 überarbeiteten Göteborg Protokolls („Multikomponenten Protokoll“) der CLRTAP (§ 3, UNECE 2012) wird den Signatarstaaten empfohlen, regelmäßig nationale Stickstoffbudgets oder auch „Stickstoffbilanzen“ und deren Entwicklungen zu berichten. Darüber hinaus werden solche Stickstoffbilanzen auch ein zentrales Element der nationalen Stickstoffstrategie sein. Nationale Stickstoffbilanzen verdeutlichen Problembereiche und Handlungsmöglichkeiten innerhalb des komplexen Stickstoffkreislaufs, indem sie über alle Stickstoffflüsse in allen Umweltmedien integrieren. Aus einer nationalen Stickstoffbilanz lassen sich Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Verbraucher ableiten. Die aktuell vorliegende nationale Stickstoffbilanz wurde im Jahr 2015 vom Umweltbundesamt zusammengestellt (Umweltbundesamt, 2015) und basiert auf Grundlagendaten der Jahre 2005 – 2010. Zur wissenschaftlichen Unterstützung der nationalen Stickstoffstrategie muss dieser Datensatz aktualisiert werden z. B. vor dem Hintergrund weiterentwickelter Emissionsinventare. So enthalten die gegenwärtigen landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen neue Informationen zu Emissionsfaktoren und neue Quellgruppen, und unterscheiden sich somit substantziell von berichteten Werten früherer Jahre. Außerdem wurden im bisherigen nationalen Stickstoffbudget grenzüberschreitende Stickstoffflüsse nicht konsequent berücksichtigt. Dies betrifft insbesondere grenzüberschreitende Stickstoff-Importe und -Exporte in Form von landwirtschaftlichen Produkten. Diese Wissenslücken sollen mit der vorliegenden Studie geschlossen werden, weil die nationale Strategie auf aktuellsten Datengrundlagen aufbauen und neben den nationalen Stickstoffflüssen auch alle für nationale Aktivitäten relevanten grenzüberschreitenden Stickstoffflüsse berücksichtigen soll.

Zur Erreichung dieser beiden Ziele ist das DESTINO-Projekt in vier Arbeitspakete gegliedert:

1. Herleiten eines Gesamtindikators für Stickstoff („integrierter Stickstoffindikator“) inklusive dessen Zielwert („nationales Stickstoffziel“) aus Schutzgutbetrachtungen.
2. Charakterisieren der Indikatoren, die zur Bestimmung und Aktualisierung des integrierten Stickstoffindikators notwendig sind.
3. Aktualisieren der nationalen Stickstoff-Flussbilanzierung für Deutschland im Sinne eines nationalen Stickstoff-Budgets, wie es im Guidance Document und dessen Annexe zum revidierten Göteborg-Protokoll beschrieben ist (UNECE 2013) und den Mitgliedstaaten empfohlen wird.
4. Durchführen zweier Fachgespräche mit externen Experten zu den Arbeitspaketen 1, 2 und 3. Das Fachgespräch zu den Indikatoren hat am 6. September 2017 im Bundespresseamt in Berlin stattgefunden, jenes zur Stoffflussanalyse am 2. Mai 2018 im UBA ebenfalls in Berlin.

Der vorliegende Abschlussbericht umfasst die Punkte 1 und 2 sowie die Konsequenzen aus dem Fachgespräch zum integrierten Stickstoffindikator (Punkt 4). Die Ergebnisse zu Punkt 3 werden gesondert veröffentlicht (UBA 2020).

1.2 DESTINO-Aktivitäten

Die Ausführung der Arbeitspakete wurden bei einem Kick-off-Meeting im UBA in Dessau besprochen (INFRAS 2016a) und in einem Detailkonzept weiterentwickelt (INFRAS 2017).

Im Mai 2017 fand eine Arbeitsbesprechung im UBA in Berlin statt, an der Ideen zur Herleitung des integrierten Stickstoffindikators diskutiert wurden (INFRAS 2017a). Das Fachgespräch fand am 6. September 2017 im UBA in Berlin statt (INFRAS 2017a). Dort wurden Methoden und Vorschläge der Forschungsnehmer für den integrierten Stickstoffindikator diskutiert und Leitlinien für die Weiterentwicklung vorgegeben. Die bis zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Ergebnisse wurden in einem Zwischenbericht dokumentiert (UBA 2017f). Im Dezember 2017 fand eine weitere Arbeitsbesprechung im UBA in Dessau statt, bei der die Methoden verfeinert wurden.

Der vorliegende Abschlussbericht dokumentiert die folgenden DESTINO-Aktivitäten:

- ▶ Kapitel 2 gibt eine Übersicht über die betrachteten Schutzgüter, die Schutzziele und die DESTINO-Indikatoren.
- ▶ Kapitel 3 beschreibt, wie die zur Einhaltung der sechs Schutzziele maximal erlaubten Emissionen stickstoffhaltiger Substanzen in die Atmosphäre, in Gewässer oder in Böden abgeschätzt wurden und wie hoch die Emissionen im IST-Zustand sind.
- ▶ Kapitel 4 zeigt, wie ein geeigneter integrierter Stickstoffindikator konstruiert, dargestellt, für den IST-Zustand berechnet und mit seinem Zielwert verglichen werden kann.
- ▶ Kapitel 5 ist ein ausführlicher Anhang mit Hintergrunddaten und methodischen Ergänzungen zum Kapitel 3 und 4 sowie einer Übersicht über die Stickstoffindikatoren, die benötigt werden, um den integrierten Stickstoffindikator periodisch zu aktualisieren .

Die Ausführung der Stickstoffbilanz und ihre Ergebnisse sind im separaten Abschlussbericht dokumentiert (UBA 2020) und werden hier nicht dargestellt.

2 Schutzgüter, Schutzziele und DESTINO-Indikatoren

2.1 Übersicht

Wie oben erwähnt, wird im DESTINO-Projekt ein integrierter Stickstoffindikator aus Schutzgutbetrachtungen hergeleitet. Im Detailkonzept (INFRAS 2017) wurden sechs Schutzgüter bezeichnet, die zu diesem Zweck berücksichtigt werden sollen. Es handelt sich um jene Schutzgüter, die wesentlich durch Verluste stickstoffhaltiger Substanzen in die Umwelt gefährdet sind. Zu jedem Schutzgut gehört ein Schutzziel, für das es in der Umweltschutzgesetzgebung oder einem verbindlichen Regierungsdokument ein definiertes Ziel gibt. Schutzgüter und Schutzziele sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Schutzgüter, Schutzziele und DESTINO-Teilindikatoren als Komponenten des integrierten Stickstoffindikators.

| Schutzgüter | Schutzziele | Grundlagen | DESTINO-Teilindikatoren |
|---|---|--|---|
| Terrestrische Ökosysteme/Biolog. Vielfalt | NH ₃ -Immissionskonzentration: Critical Level für höhere Pflanzen ^a 3 µg m ⁻³ NH ₃ | Göteborg-Protokoll ^b | NH ₃ -Emissionen |
| Terrestrische Ökosysteme/Eutrophierung | Stickstoff-Deposition: Critical Load N _{total} (Werte sind Ökosystem-spezifisch unterschiedlich) | NEC-Richtlinie ^c | Summe NH ₃ - und NO _x -Emissionen |
| Oberflächengewässer | Nitrat-Konzentration Nordsee 2,8 mg N _{gesamt} l ⁻¹ und Ostsee: 2,6 mg N _{gesamt} l ⁻¹ | Oberflächengewässerverordnung ^d | N-Fracht |
| Grundwasser | Nitrat-Konzentration im Grundwasser: 50 mg l ⁻¹ | Grundwasserverordnung ^e | Nitrat-Eintrag (N-Überschuss) |
| Klima | N ₂ O-Emission: Langfristziel Klimaschutzplan | Klimaschutzplan ^f | N ₂ O-Emissionen |
| Menschliche Gesundheit | NO ₂ -Immissionskonzentration Luft: WHO-Wirkungsschwelle Hintergrundbelastung 20 µg m ⁻³ | HRAPIE Studie der WHO ^g | NO _x -Emissionen |

^a Neben dem Critical Level für höhere Pflanzen gibt es den Critical Level für niedrigere Pflanzen (1 µg NH₃ m⁻³). Für die Herleitung eines nationalen Zielwerts wird nur das Schutzziel für höhere Pflanzen berücksichtigt (siehe Kap. 3.1.5)

^b <http://www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlrapwelcome/guidance-documents-and-other-methodological-materials/gothenburg-protocol.html> [31.08.2018]

^c Richtlinie (EU) 2016/2284 des Europ. Parlaments und des Rates vom 14.12.2016

^d Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (OGewV), 20.06.2016

^e Verordnung zum Schutz des Grundwassers (GrwV), 09.11.2010

^f Klimaschutzplan 2050, Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). November 2016

^g Recommendations for concentration response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide (WHO 2013)

Zu jedem Schutzgut wurde im DESTINO-Projekt eine Rückwärtsrechnung¹ entwickelt, mit der die maximal erlaubten Stickstoffverluste (Emissionen, Überschüsse, Einträge) aus den Schutzziele berechnen werden können. Die zugehörigen Parameter werden im Folgenden als „DESTINO-Teilindikatoren“ bezeichnet. Sie sind ebenfalls in Tabelle 3 angegeben.

Die Zielwerte für die DESTINO-Teilindikatoren („DESTINO-Zielwerte“) werden im Kap. 3 hergeleitet. Dazu gibt es kein eindeutiges Vorgehen, sondern für jedes Schutzgut werden unterschiedliche methodische Ansätze angewendet. Im Rahmen des DESTINO-Projekts wurden jeweils verschiedene Varianten geprüft. Die Auswahl der Variante erfolgte nach den folgenden Kriterien:

- ▶ Hohe Verfügbarkeit der benötigten Inputdaten
- ▶ Keine räumlichen Simulationen erforderlich
- ▶ Hohe Robustheit des Resultats

Für die Schutzgüter terrestrische Ökosysteme und Gesundheit entsprechen die DESTINO-Indikatoren den NO_x- und NH₃-Emissionen. Für diese gibt es in der NEC-Richtlinie (EU 2016/2284) gesetzlich vorgeschriebene Etappenziele für die Jahre 2020 und 2030. Diese können mit den DESTINO-Zielwerten verglichen werden (siehe Kap. 3.2.5 und 3.6.5).

2.2 Methodische Hinweise

2.2.1 Zeitliche und räumliche Abhängigkeit der DESTINO-Teilindikatoren

Aus dem Ziel des DESTINO-Projekts (Kap. 1.1) und den Anforderungen an den integrierten Stickstoffindikator (Kap. 4.1.1) folgt, dass er periodisch fortgeschrieben und jeweils mit seinem Zielwert verglichen werden soll. Der integrierte Stickstoffindikator ist damit vom Bezugsjahr abhängig, kann also als Funktion der Zeit aufgefasst werden (Zeit als unabhängige und diskrete Variable). Der integrierte Stickstoffindikator bezieht sich auf die Fläche Deutschlands, ist aber im Übrigen nicht mehr vom Ort innerhalb Deutschlands abhängig (in der Physik spräche man von einer „extensiven“ Größe). Sonst könnte sein Wert von Ort zu Ort variieren und müsste somit räumlich differenziert betrachtet werden; er wäre jedenfalls nicht mehr als einfache Zahl darstellbar.

Kap. 4.1 beschreibt, wie der integrierte Stickstoffindikator aus ausgewählten Indikatoren, im Folgenden als DESTINO-Teilindikatoren bezeichnet, zusammengesetzt wird. An dieser Stelle sei bereits erwähnt, dass die DESTINO-Teilindikatoren in derselben Einheit wie der integrierte Stickstoffindikator ermittelt werden und ebenfalls nur noch vom Bezugsjahr abhängig sind (auch sie sind extensive Größen). Sie werden zwar teilweise aus räumlichen Daten berechnet, die DESTINO-Teilindikatoren und ihre Zielwerte werden jedoch nicht räumlich differenziert betrachtet. Die Konsequenzen aus diesem Umstand werden im Kap. 4.3.2 erläutert.

¹ Emissionen als Ursache haben Immissionen zur Folge. Mathematisch ausgedrückt: Immissionen sind eine Funktion der Emissionen $c = f(E)$. Im DESTINO-Projekt wurde, wieder mathematisch gesprochen, die Umkehrfunktion gesucht, nämlich $E = f^{-1}(c)$. Um diesen Umstand zu beschreiben, wird hier der Begriff «Rückwärtsrechnung» verwendet, der die Umkehrung von der Wirkung zur Ursache nahelegen soll.

2.2.2 Umrechnungsfaktoren und Einheiten

Bei allen DESTINO-Teilindikatoren handelt es sich um reaktive Stickstoffverbindungen (NO_x , NH_3 , N_2O , Nitrat²), welche im Unterschied zum elementaren Stickstoff (N_2) mit organischen und anorganischen Stoffen reagieren und neue Verbindungen eingehen können. Damit diese verschiedenen Verbindungen bei der Bildung des integrierten Stickstoffindikators kombiniert werden können (Kap. 4.1), werden sie auf die einheitliche Dimension des Massenanteils an Stickstoff umgerechnet. Dazu dienen die folgenden Umrechnungsfaktoren.

Tabelle 4: Umrechnungsfaktoren für N-Verbindungen

| Umrechnung | Rückrechnung |
|--|---|
| 1 t NO_x = 0,304 t $\text{NO}_x\text{-N}$ | 1 t $\text{NO}_x\text{-N}$ = 3,29 t NO_x |
| 1 t NH_3 = 0,824 t $\text{NH}_3\text{-N}$ | 1 t $\text{NH}_3\text{-N}$ = 1,22 t NH_3 |
| 1 t N_2O = 0,636 t $\text{N}_2\text{O -N}$ | 1 t $\text{N}_2\text{O -N}$ = 1,57 t N_2O |
| 1 t NO_3 = 0,226 t $\text{NO}_3\text{-N}$ | 1 t $\text{NO}_3\text{-N}$ = 4,43 t NO_3 |

NO_x -Emissionen werden in NO_2 -Äquivalenten ausgewiesen.

DESTINO-Teilindikatoren und integrierter Stickstoffindikator werden als Jahresfrachten von Stickstoff ausgewiesen. Als Einheit könnten Tonnen (t) benutzt werden, aber in dieser Einheit würden alle Zahlen sehr gross, was der Klarheit des Textes abträglich wäre. Aus diesem Grund wird folgende als Einheit verwendet

1.000 Tonnen Stickstoff = 1 Kilotonne Stickstoff = 1 kt N

Der Vergleich zwischen DESTINO-Teilindikatoren und ihren Zielwerten erfolgt sowohl absolut (in kt N a^{-1}), als auch relativ in Prozentwerten. Für das DESTINO-Projekt wurde folgende Konvention getroffen: Zur Verwendung von Relativwerten werden Prozentzahlen benutzt und die Zielwerte werden auf 100 % gesetzt.

Beispiel DESTINO-Teilindikator Klima (Kap. 3.5.4). Im IST-Zustand hat der Indikator den Wert 83,4 kt $\text{N}_2\text{O-N a}^{-1}$, der Zielwert beträgt 47,8 kt $\text{N}_2\text{O-N a}^{-1}$. Für die Relativbetrachtung wird der Wert 47,8 kt $\text{N}_2\text{O-N a}^{-1}$ auf 100 % gesetzt. Damit hat der Indikator im IST-Zustand den Wert 174 % (= $83,4/47,8 \times 100$ %). Zur Erreichung des Zielwerts ist somit eine Reduktion um 74 %-Punkte erforderlich. Häufiger wäre wohl eine Konvention, bei der der IST-Zustand auf 100 % gesetzt wird (der Zielwert wäre damit 57 % des Ist-Werts und die erforderliche Reduktion³ wäre 43 %). Sie hätte aber den gewichtigen Nachteil, dass sich bei künftigen Fortschreibungen der DESTINO-Teilindikatoren die (relativen) Zielwerte ändern würden (weil sie auf veränderte Ist-Werte Bezug nähmen). Mit der hier benutzten Konvention bleiben die Zielwerte nicht nur absolut, sondern auch relativ im Laufe der Zeit dieselben.

² Im Fall der Oberflächengewässer enthält die N-Fracht auch noch weitere Ionen (z.B. Nitrit), die aber mengenmäßig nicht ins Gewicht fallen und deshalb hier unerwähnt bleiben.

³ Sprachlicher Hinweis: Einer Reduktion um x % bedeutet eine Änderung um -x % (eine Reduktion um -x % wäre faktisch eine Erhöhung um x %).

2.2.3 DESTINO-Teilindikatoren im Verhältnis zu anderen Stickstoff-Indikatoren der deutschen Umweltpolitik – Thema Analyse und Synthese

Das UBA erhebt und beobachtet diverse Stickstoff-Indikatoren zum Zustand der Umwelt. Jene, die „für die deutsche und internationale Umweltpolitik besonders relevant sind“, sind auf seiner Homepage Umwelt-Indikatoren⁴ publiziert. Im Zwei-Jahres-Zyklus gibt das UBA dazu den „Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt“ heraus; die aktuellste Ausgabe ist im Jahr 2017 erschienen (UBA 2017). Mehrere der 50 Umwelt-Indikatoren stehen in Zusammenhang mit der unerwünschten Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen und sind damit auch für das DESTINO-Projekt relevant. Die Indikatoren zielen auf den Zustand von Schutzgüter ab oder auf Verpflichtungen zu maximalen Emissionen, zu denen sich Deutschland in internationalen Vereinbarungen verpflichtet hat. Das DESTINO-Projekt knüpft zwar an den Schutzgütern und deren Schutzziele an und versucht mit geeigneten „Rückwärtsrechnungen“ die maximal erlaubten Emissionen zu berechnen. Je nach Schutzgut ergeben sich maximale Emissionen, die höher oder tiefer liegen als die Obergrenzen aus den internationalen Vereinbarungen. Daher sind die Zielwerte der DESTINO-Teilindikatoren **als Ergänzung** zu den anderen Zielwerten zu betrachten. Das Ziel des DESTINO-Projekts ist nicht, andere Stickstoff-Zielwerte zu ersetzen, sondern einen Satz von kompatiblen Zielwerten zu generieren, aus dem ein Zielwert für den integrierten Stickstoffindikator Stickstoff hergeleitet werden kann. Der integrierte Stickstoffindikator verdichtet Indikatoren für unterschiedliche Schutzziele zu einem einzigen Indikator. Er stellt damit einen Versuch dar, die vielfältigen Schadenswirkungen der reaktiven Stickstoffverbindungen in einer einzigen Größe zu integrieren. Er geht von den einzelnen Aspekten aus und versucht, daraus eine Synthese zu erstellen. Ganz im Sinne des Goethe'schen Aphorismus:

Dich im Unendlichen zu finden, musst unterscheiden, dann verbinden. (J. W. Goethe)

Die Vielfalt der Schadenswirkungen, die durch Stickstoff verursacht werden, erschwert es der Umweltpolitik, die Stickstoff-Problematik – sozusagen in einem einzigen Atemzug – zum Ausdruck zu bringen. Der integrierte Stickstoffindikator und sein Zielwert sollen dazu dienen, dieser Schwierigkeit zu begegnen.

⁴ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren> [31.08.2018]

3 DESTINO-Teilindikatoren und ihre Zielwerte

3.1 Terrestrische Ökosysteme: Schadenswirkung durch Ammoniak

3.1.1 Schadensmechanismus

Ammoniak-Emissionen führen durch Versauerung und Eutrophierung zu Schäden an Land- und Wasserökosystemen. In natürlichen und naturnahen Ökosystemen können übermäßige Ammoniak-Immissionen zu Veränderungen der Artenvielfalt führen und erhöhte Ammoniak-Konzentrationen können auch direkte Schäden an der Vegetation verursachen.

Ammoniak entsteht vor allem beim Abbau von Harnstoff bzw. Harnsäure aus Ausscheidungen von Nutztieren und beim Einsatz von synthetischen Stickstoffdüngern. Dabei ist es vom pH-Wert und der Temperatur abhängig, ob die reaktive Verbindung als Ammoniak (NH_3) oder als Ammonium (NH_4) vorliegt und wie viel davon als NH_3 in die Atmosphäre gelangt.

Aus diesen Gründen wurden für das DESTINO-Projekt die terrestrischen Ökosysteme als Schutzgüter ausgewählt. Der Schadensmechanismus führt von den Ammoniak-Emissionen als Ursache zu den übermäßigen Ammoniak-Immissionen als Wirkung. Mithilfe einer vereinfachten Rückrechnung soll die maximale jährliche Fracht der Ammoniak-Emissionen abgeschätzt werden, unterhalb derer die Zielwerte für die Ammoniak-Immissionen in Deutschland eingehalten werden könnten.

3.1.2 Schutzziel und DESTINO-Zielwert

Zur Sicherung der Luftqualität ist die Konzentration von Ammoniak in der Atmosphäre weder nach der EU-Gesetzgebung noch in Deutschland gesetzlich limitiert. Im Rahmen des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) werden aber auf Basis von aktuellen Wirkungsstudien unschädliche Ammoniak-Konzentrationen in der Luft zum Schutz empfindlicher Vegetation, sogenannte „Critical Levels (C_{Lev})“, in der Höhe von $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ respektive $3 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ im Jahresmittel empfohlen (ICP MODELLING & MAPPING 2017, Table 3.3):

$C_{Lev} = 3 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ für höhere Pflanzen

$C_{Lev} = 1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ für niedrigere Pflanzen (z.B. Flechten und Moose)

Zur Herleitung des nationalen DESTINO-Zielwerts wird nur der Critical Level für höhere Pflanzen betrachtet. Da die Ammoniak-Immissionen stark von den lokalen Emissionen geprägt sind, wäre zur Herleitung eines Zielwerts zur Einhaltung des Critical Levels für niedrigere Pflanzen eine räumlich differenzierte Betrachtung der Emissionen erforderlich. Für die Herleitung des DESTINO-Zielwerts für die nationalen Ammoniak-Emissionen wird daher nur das Schutzziel für höhere Pflanzen ($3 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$) berücksichtigt.

Zusätzlich gibt es im CLRTAP kritische Belastungsgrenzen für Stickstoffeinträge (Critical Loads), welche der Summe von oxidierten (NO_x) und reduzierten (NH_y ; z.B. Ammoniak) Stickstoffverbindungen entsprechen. Eine Limitierung der Ammoniak-Emissionen zur Erreichung der Critical Loads wird im nachfolgenden Kapitel 3.2 diskutiert.

3.1.3 Methode zur Berechnung der maximalen Ammoniak-Emissionen

Grundlage für die Berechnung der maximal zulässigen Ammoniak-Emissionen sind räumlich aufgelöste Emissions- und Immissionsdaten (Abbildung 3). Die räumlich aufgelösten Emissionsdaten basieren auf den nationalen Gesamtemissionen, welche jährlich an die CLRTAP berichtet werden. Die Gesamtmenge ist dabei nach unterschiedlichen Emissionsquellen differenziert. Für jeden Quellentyp werden die spezifischen Emissionsanteile über geeignete Verteilparameter auf einzelne Flächen-,

Punkt- und Linienquellen aufgeteilt, den Gitterzellen eines Rasters zugeordnet und kartografisch dargestellt (UBA 2016, Abbildung 3 links).

Mithilfe eines Immissionsmodells (REM-CALGRID, Abk. RCG⁵) werden die Emissionen ausgebreitet und ebenfalls kartografisch dargestellt (UBA 2015a). Datengrundlage für die Ammoniak-Immissionen sind Modellergebnisse des chemischen Transportmodells RCG. Die zeitliche Auflösung dieser Datengrundlage beträgt 1 Stunde und die räumliche Auflösung 0,03125° Länge und 0,015625° Breite. Daraus werden Karten mit einer räumlichen Auflösung von 2 km x 2 km generiert (Abbildung 3, rechts).

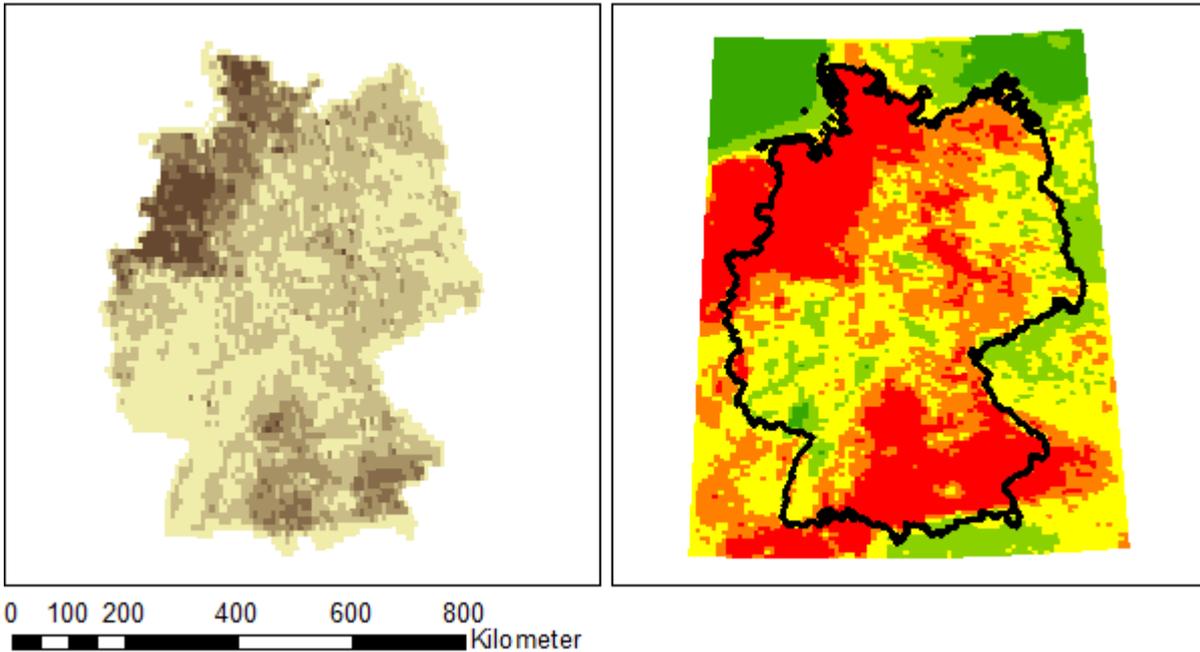
Die Ammoniak-Immissionen in Deutschland überschreiten den Critical Level für niedere Pflanzen ($1 \text{ mg NH}_3 \text{ m}^{-3}$) großflächig. Der Critical Level für höhere Pflanzen wird ebenfalls an vielen Orten überschritten, insbesondere im Nordwesten und Südosten Deutschlands. In diesen Regionen sind auch die höchsten Emissionen zu verzeichnen (Abbildung 3).

⁵ RCG: REM/CALGRID, chemisches Transportmodell

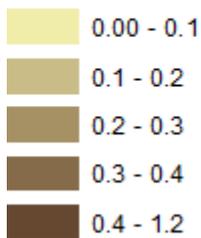
Abbildung 3: Karten der Ammoniak-Emissionen und -Immissionen 2015

a) Ammoniak-Emissionen

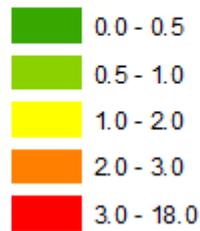
b) Ammoniak-Immissionen



Emission kt NH₃ a⁻¹



Immission µg NH₃ m⁻³



Räumliche Verteilung der Ammoniak-Immissionen (a) und –Emissionen (b).

(a) basiert auf der Berichterstattung vom 15.02.2017⁶ und der räumlichen Verteilung mit GRETA (EMEP Grid)
Datenquelle: UBA (2017a).

(b) basiert auf einer auf a) aufbauenden Modellierung mit dem CTM-Modell RCG

Um den Critical Level für die Ammoniak-Immissionen einhalten zu können, muss ein entsprechender Maximalwert für die Ammoniak-Emissionen hergeleitet werden. Die im EMEP-Grid räumlich aufgelösten Immissionen und Emissionen weisen eine starke Korrelation auf (Abbildung 4). Die maximal erlaubte Emissionsmenge pro Gitterzelle kann daher aus einer linearen Regression der räumlich aufgelösten Immissions- und Emissionsdaten hergeleitet werden.

Über folgende Gleichung können die Immissionen in Abhängigkeit der Emissionen berechnet werden:

$$Im_{NH_3} = a Em_{NH_3} + b \quad [\mu\text{g m}^{-3}] \quad (\text{Gl. 1})$$

⁶ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland> [31.08.2018]

wobei Im_{NH_3} die Ammoniak-Immissionen bezeichnet und Em_{NH_3} die Ammoniak-Emissionen. Die Parameter a und b bezeichnen die Steigung bzw. den Achsenabschnitt der Regressionsgerade.

Anhand dieser Regressionsgleichung kann nun aus dem Immissionsgrenzwert, d.h. dem Critical Level für höhere Pflanzen (C_{Lev}), die entsprechende maximal zulässige Emissionsmenge ($Em_{NH_3,max}$) hergeleitet werden.

$$Em_{NH_3,max} = \frac{C_{Lev} - b}{a} \quad [kt\ a^{-1}] \quad (Gl. 2)$$

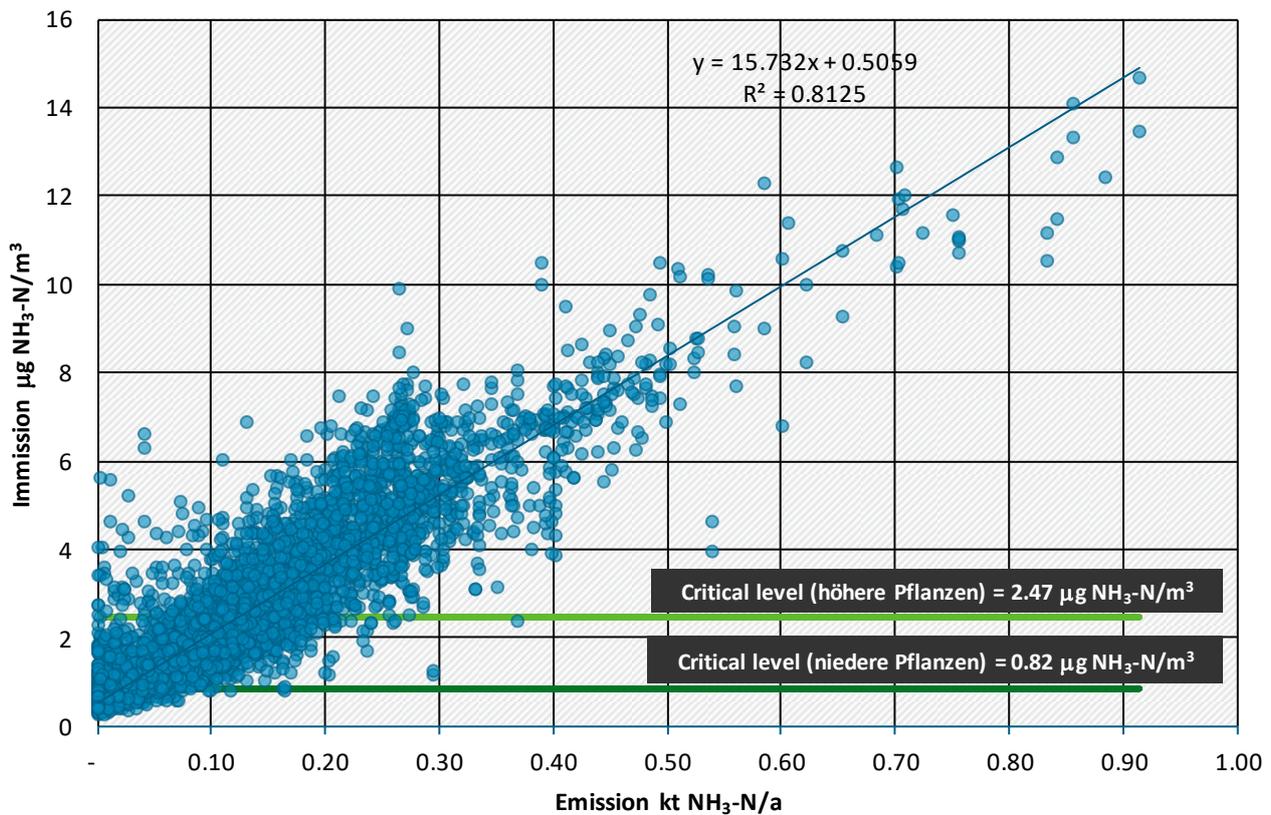
Die Summe der positiven Differenzen zwischen den Emissionen pro Gitterzelle (Em_{NH_3}) und den entsprechenden maximal zulässigen Emissionsmengen ($Em_{NH_3,max}$) über alle N Gitterzellen entspricht der Reduktion der Gesamtemissionen (R_{NH_3}), die zur Einhaltung des Critical Levels notwendig ist.

$$R_{NH_3} = \sum_{i=1}^N (Em_{NH_3,i} - Em_{NH_3,max}) \forall \{i | Em_{NH_3,i} - Em_{NH_3,max} > 0\}, \quad [kt\ a^{-1}] \quad (Gl. 3)$$

$N = 6314$ (Anzahl Gitterzellen)

Bei einer Reduktion der Gesamtemissionen um R_{NH_3} kann jedoch lediglich sichergestellt werden, dass der Critical Level im Mittel eingehalten wird. Da die Reduktion auf einer Betrachtung der Gesamtemissionen beruht, ist es sehr wahrscheinlich, dass der Critical Level lokal trotzdem überschritten wird. Beispielsweise kann die Einhaltung des Critical Levels in der Nähe von größeren Punktquellen mit diesem Reduktionsziel nicht garantiert werden. Dazu müssten die maximal zulässigen Emissionen räumlich differenziert betrachtet werden.

Abbildung 4: Herleitung der maximalen Ammoniak-Emissionen (Daten für 2015, Datenstand 2017)



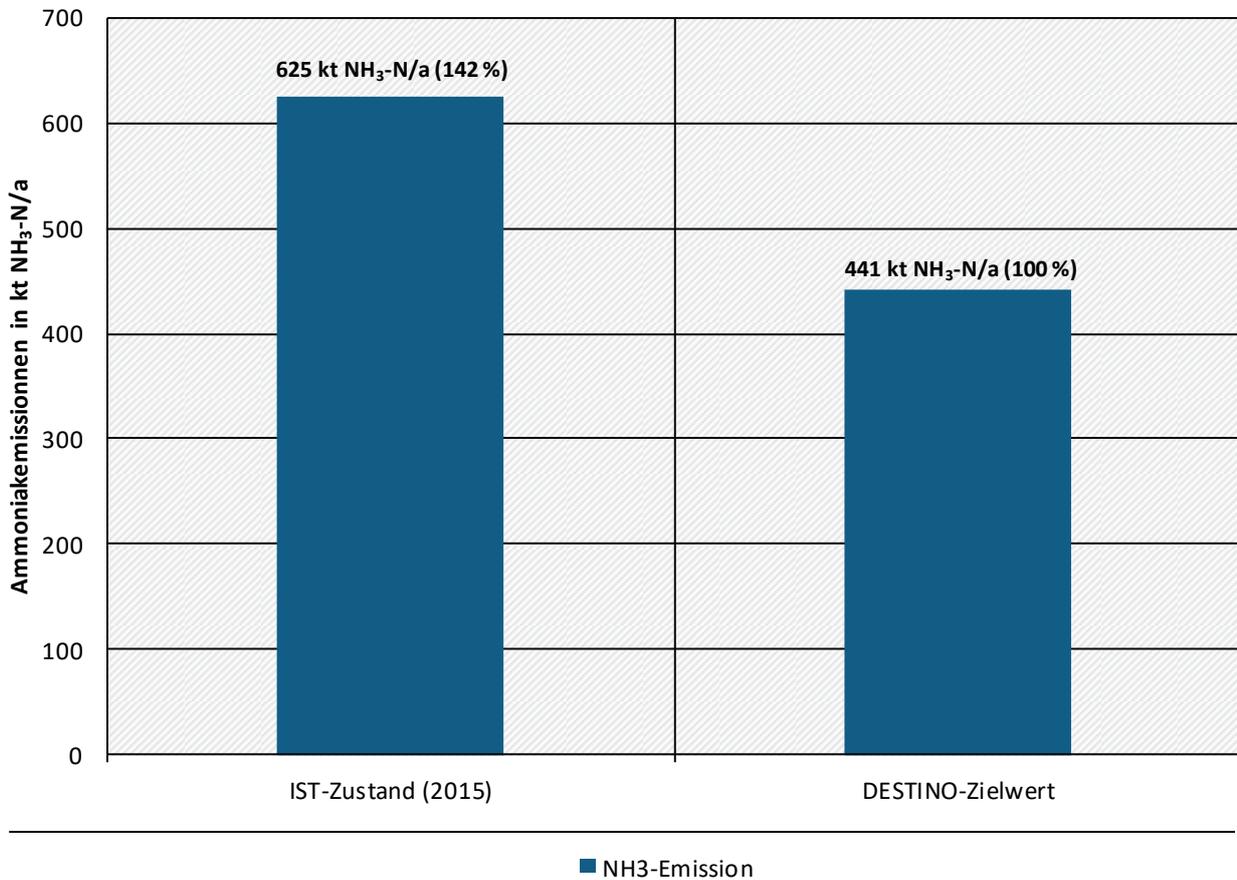
Quelle: UBA 2017a

Die zur Einhaltung des Critical Levels maximal zulässigen NH_3 -Emissionen können aus einer linearen Regression zwischen Ammoniak-Immissionen und Ammoniak-Emissionen pro Gitterzelle hergeleitet werden. Datenquelle: UBA 2017a. Für die Herleitung des Zielwerts wird nur der Critical Level für höhere Pflanzen berücksichtigt. Zu beachten: Dem Critical Level von $3 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ entsprechen $2,47 \mu\text{g NH}_3\text{-N m}^{-3}$, $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ entsprechen $0,82 \mu\text{g NH}_3\text{-N m}^{-3}$.

3.1.4 Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert terrestrische Ökosysteme / Critical Level

Grundlage für die Herleitung des DESTINO-Zielwerts ist der Critical Level für höhere Pflanzen (Abbildung 4). Um den Critical Level von $3 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ ($=2,47 \mu\text{g NH}_3\text{-N m}^{-3}$) einzuhalten, darf pro Gitterzelle die jährliche NH_3 -Emission maximal $0,12 \text{ kt NH}_3\text{-N a}^{-1}$ betragen. Der DESTINO-Zielwert beträgt somit $441 \text{ kt NH}_3\text{-N a}^{-1}$ pro Jahr. Im Jahr 2015 lagen die Ammoniak-Emissionen bei $625 \text{ kt NH}_3\text{-N}$. Der DESTINO-Zielwert war somit um 42 % überschritten (Abbildung 5).

Abbildung 5: DESTINO-Teilindikator terrestrische Ökosysteme / Critical Level (Biodiversität) für NH₃-Emissionen für IST-Zustand (2015) und DESTINO-Zielwert.



Quelle: eigene Berechnungen

NH₃-Emissionen im Jahr 2015 und DESTINO-Zielwert. Datenquelle: Eigene Berechnungen, siehe Abbildung 25.

3.1.5 Interpretation und Beurteilung

- 1) Für die Überprüfung des Emissionsziels empfehlen wir, die Immissionsmodellierungen gelegentlich zu aktualisieren. Die jüngste Submission vom Februar 2018 des deutschen Luftschadstoffinventars zuhanden der CLRTAP die Zeitreihen der NH₃-Emissionen aktualisiert (UBA 2018). Für das Jahr 2015 sind die NH₃-Emissionen aufgrund methodischer Anpassungen um 11,7 % geringer als in der Submission Februar 2017 (UBA 2017b). Das sind beachtliche Unterschiede, die auf die Immissionsmodellierung und damit auch auf die Berechnung des Emissionsziels einen nicht unbedeutenden Einfluss haben können (wir haben es demnach mit einem „Moving Target“ zu tun). Dabei wäre auch zu testen, wie sich mit fortschreitender Reduktion der Emissionen der statistische Zusammenhang zwischen Emission und Immissionen entwickelt.
- 2) Die Einhaltung des nationalen Zielwerts garantiert bei der verwendeten Methode nicht, dass er flächendeckend eingehalten ist, sondern lediglich im räumlichen Mittel über alle betrachteten Gitterzellen. Erreicht der IST-Wert in einem künftigen Jahr den Zielwert, wird der Mittelwert der NH₃-Konzentrationen über alle Gitterzellen den Critical Level unterschreiten, es wird aber sehr wahrscheinlich immer noch Gitterzellen geben, in den er nicht erreicht ist, und wiederum Andere, in

den er entsprechend unterschritten sein wird. Die Einhaltung des Zielwerts ist demnach lediglich ein notwendiges, jedoch noch nicht ein hinreichendes Kriterium.

- 3) Die Methode zur Berechnung des DESTINO-Zielwerts basiert auf dem Critical Level für höhere Pflanzen und ergibt einen Zielwert von 441 kt NH₃-N a⁻¹. Zur Einhaltung des Critical Levels für niedere Pflanzen wäre eine sehr viel stärkere Reduktion der Ammoniak-Emissionen erforderlich. Um den Critical Level von 1 µg NH₃ m⁻³ einhalten zu können, müssten die Ammoniak-Emissionen mit der vorliegenden Methode auf 96 kt NH₃-N a⁻¹ reduziert werden. Relativ ausgedrückt läge der IST-Zustand somit bei 653 %. Dieses Reduktionsziel wäre auch erheblich unterhalb des in der NEC-Richtlinie vorgeschriebenen Ziels für Ammoniak-Emissionen (Kap. 3.2.4). Da die NH₃-Immissionen stark von den lokalen NH₃-Emissionen geprägt sind, ist eine räumlich aggregierte Betrachtung beim Critical Level für niedere Pflanzen aber gar nicht mehr sinnvoll. Um den Critical Level von 1 µg NH₃ m⁻³ zu erreichen, müssen die Emissionen gezielt in der näheren Umgebung der Standorte mit Überschreitung des Critical Levels reduziert werden. Der Critical Level von 1 µg NH₃ m⁻³ eignet sich daher nicht als Grundlage für die Herleitung eines Reduktionsziels auf Ebene der nationalen Ammoniak-Emissionen.
- 4) Um die Robustheit der Methode zu testen, müsste die Sensitivität bezüglich der Größe der Gitterzellen untersucht werden. Vertiefte räumliche Betrachtungen waren im Rahmen des DESTINO-Projekts nicht vorgesehen und daher sollte im Rahmen einer zukünftigen Aktualisierung des Indikators eine Überprüfung der Robustheit dieses Zielwerts eingeplant werden.
- 5) Ein flächenbezogener Indikator für die Belastung der terrestrischen Ökosysteme kann basierend auf der Anzahl Rasterzellen der NH₃-Immissionskarten hergeleitet werden (Kapitel 4.3.5). Der flächenbezogene Indikator lässt jedoch keinen Rückschluss auf die zu reduzierende Emissionsmenge zu und eignet sich daher nicht für die Konstruktion eines integrierten Stickstoffindikators.
- 6) Im Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt 2017 des UBA (UBA 2017) werden die Ammoniak-Emissionen als Indikator für die Eutrophierung ausgewiesen (Indikator „Emission von Luftschadstoffen“). Die Ammoniak-Emissionen zeigen seit 1995 einen Anstieg um 12 %. Zielwert des Indikators sind die in der NEC-Richtlinie vorgeschriebenen Reduktionsziele. Grundlage für die Quantifizierung des Indikators ist die indexierte Entwicklung der betrachteten Luftschadstoffe. Der Indikator „Emission von Luftschadstoffen“ wird als Mittelwert von fünf Luftschadstoffen ausgedrückt (Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Ammoniak, NMVOC, Feinstaub PM_{2.5}). Da dieser Indikator unterschiedliche Luftschadstoffe aggregiert betrachtet und räumliche Unterschiede vernachlässigt, ist er nicht direkt vergleichbar mit dem DESTINO-Teilindikator für terrestrische Ökosysteme / Critical Level (Biodiversität). Für die direkten Schäden an der Vegetation aufgrund von erhöhten Ammoniak-Immissionen wird im Indikatorenbericht kein entsprechender Indikator ausgewiesen.

3.2 Terrestrische Ökosysteme: Schadenswirkungen durch Stickstoff-Einträge

3.2.1 Schadensmechanismus

Luftschadstoffe werden in der Atmosphäre über weite Strecken transportiert. Während des Transports werden sie gasförmig, als Partikel oder in Niederschlag und Luftfeuchtigkeit gelöst aus der Atmosphäre entfernt und in Ökosysteme eingetragen, wo sie Böden, Pflanzen und Tiere in unerwünschter Art beeinflussen oder gar schädigen. Für naturnahe bzw. nicht gedüngte Landökosysteme stellt der Schadstoffeintrag über die Atmosphäre häufig den wichtigsten Belastungspfad dar. Die Einträge der reaktiven Stickstoffverbindungen NH₃ und NO_x gefährden insbesondere wegen ihrer eutrophierenden Wirkung die biologische Vielfalt. „Langanhaltende, erhöhte Stickstoffeinträge über die Luft verändern die Gleichgewichte zwischen Stickstoff und anderen Nährstoffen (wie Magnesium, Phosphor und Kalium) im Boden und damit auch ihre ausgewogene Aufnahme durch die Pflanzen. Der unausgewogene Ernährungsstatus im Ökosystem führt zu geringerer Toleranz gegenüber kurzzeitigen Störungen oder

Stress (Frost, Trockenheit, Schädlinge)“ (zit. aus Website UBA⁷). Zur Bewertung dieser Belastung stellt man ökosystemspezifische Belastungsgrenzen (Critical Loads) den aktuellen Stoffeinträgen aus der Luft gegenüber.

3.2.2 Schutzziel und DESTINO-Zielwert

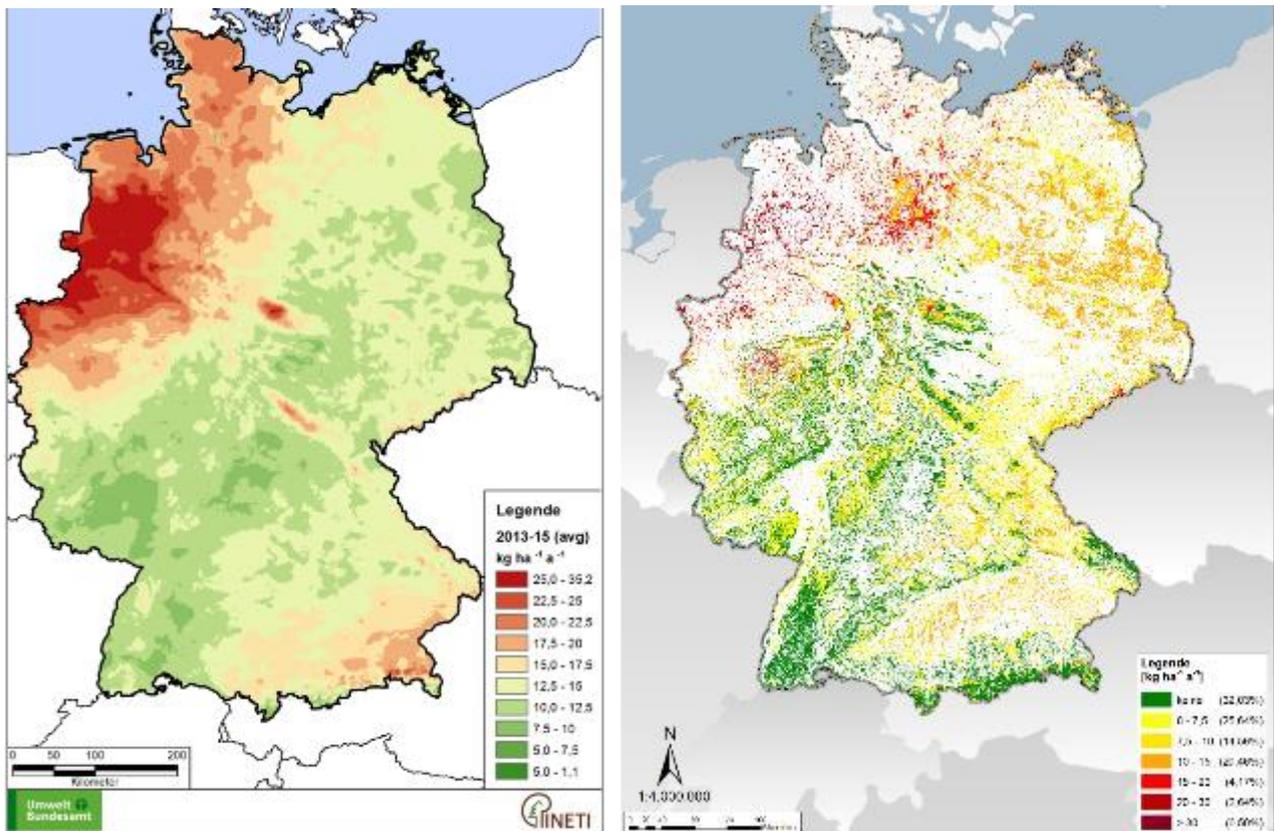
Die Stickstoff-Einträge sind nicht für sich gesetzlich limitiert. Die Bundesregierung hat aber die CLRTAP mit ihren Protokollen ratifiziert und hat sich damit verpflichtet, die empfohlenen Zielwerte für Stickstoff-Einträge langfristig einzuhalten. Die langfristige Einhaltung der Critical Loads für eutrophierende Stickstoffeinträge ist auch Ziel der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie von 2016 sowie der Biodiversitätsstrategie der Bundesregierung von 2007.

Critical Loads sind ökosystemspezifische, unschädliche Stickstoff-Einträge und lassen sich mit Hilfe einer einfachen Massenbilanz modellieren (simple mass balance – SMB) oder experimentell-empirisch ermitteln. Die Zielwerte dieser empirischen Critical Loads sind auf Basis von Wirkungsstudien als Bereichs- oder Einzelwerte festgelegt (ICP MODELLING & MAPPING 2017, Table V.1). Für gemäßigte und boreale Wälder gilt zum Beispiel ein kritischer Bereich von 10-20 kg N pro Hektar und Jahr, für Hochmoore 5-10 kg N pro Hektar und Jahr.

In der folgenden Abbildung 6 sind der Mittelwert der Stickstoffgesamtdeposition für den Zeitraum 2013-2015 (links) und die regionale Verteilung der Überschreitungen der SMB-Critical Loads für Stickstoff (rechts) dargestellt (Schaap et al. 2018).

⁷ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-oekosysteme#text-part-2> [31.08.2018]

Abbildung 6: Regionale Verteilung der Stickstoff-Gesamtdeposition (links) und der Überschreitungen der „simple mass balance“ - Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff (rechts).



Datenquelle: PINETI-3 (Schaap et al. 2018)

3.2.3 Methoden zur Berechnung der maximalen Ammoniak- und Stickstoffoxid-Emissionen

3.2.3.1 Bestimmung der stickstoffhaltigen Einträge in Böden

Die Einträge in terrestrische Ökosysteme erfolgen auf mehrere Arten und werden entsprechend unterschiedlich quantifiziert:

- ▶ Die Einträge via Niederschlag (nasse Deposition) werden u.a. über die gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Niederschlag aus verschiedenen Messnetzen bestimmt. Dazu werden gemessene Konzentrationen im Niederschlag mit den im LOTOS-EUROS Modell berechneten Konzentrationen über ein Kriging-Verfahren miteinander kombiniert und mit Jahres-Niederschlagsdaten ($1 \times 1 \text{ km}^2$) zu deutschlandweiten Karten der nassen Deposition verknüpft (UBA 2014).
- ▶ Der gasförmige Eintrag (trockene Deposition) auf Böden und Vegetation hängt von den Eigenschaften der Oberfläche ab. Er wird nur an wenigen Messstellen ermittelt. Flächendeckende Karten in der Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ werden mit Hilfe von Modellen berechnet.
- ▶ Die Einträge via Luftfeuchtigkeit, das heißt in Nebel- und Wolkenröpfchen (okkulte oder feuchte Deposition) hängt ebenfalls von der Beschaffenheit der Oberflächen ab. Zur flächendeckenden Ermittlung werden Landnutzungs- und meteorologische Daten sowie Daten zur Immissionssituation von Schadstoffen kombiniert.
- ▶ Die Gesamtdeposition wird durch eine Kombination der räumlich interpolierten Messungen der nassen Deposition mit der modellierten trockenen und okkulten Deposition ermittelt. Sie liegt räumlich hoch aufgelöst ($1 \times 1 \text{ km}^2$) und landnutzungsabhängig vor.

Derzeit liegen verschiedene Datengrundlagen für die N-Depositionen vor. Im Projekt PINETI-3 (Schaap et al. 2018), werden die Depositionen modelliert, getrennt nach oxidierten und reduzierten Stickstoff-Verbindungen, sowie auch die Anteile berechnet, die über den erlaubten Critical Loads liegen („exceedances“). Diese Daten liegen als Zeitreihen 2000 bis 2015 vor und werden nachstehend verwendet, um den gesuchten Indikator zu berechnen.

In einem schon früher ausgeführten Teilprojekt von PINETI-3 wurden im Szenarien-Report „Modellgestützte Analyse der Zielstellungen des Göteborg Protokolls und des Verhandlungsstands 2015 zur NEC-Richtlinie“ (Schaap et al. 2017) Daten bereitgestellt, aus denen der gesuchte Indikator ebenfalls abgeschätzt werden kann.

3.2.3.2 Berechnung des Emissionsziels aus Depositionsdaten

Im Projekt PINETI-3 (Schaap et al. 2018) liegen Zeitreihen 2000 bis 2015 zur Deposition $D(t)$ vor. Sie wurden entsprechend der Beschreibungen in Kap. 3.2.3.1 getrennt für reduzierte und oxidierte N-Verbindungen modelliert. Dabei werden auch die Überschreitungen der Critical Loads modelliert.

Für die Bestimmung des Emissionsziels stickstoffhaltiger Emissionen wird die Annahme getroffen, dass der folgende Zusammenhang angenähert gilt: Die Summe der N-Depositionen ist proportional zur Summe der N-haltigen Emissionen. Damit wird eine Linearität zwischen Emissionen $E(t)$ und Depositionen auf der Betrachtungsebene Deutschlands angenommen. Lokal braucht dieser Zusammenhang nicht zu gelten. Die Differenz der gesamten tatsächlichen Deposition und der gesamten Deposition oberhalb der Critical Loads entspricht der maximal zulässigen Deposition.

$$\frac{D(t)}{D_{\max}(t)} = \frac{E(t)}{E_{\max}(t)} \quad \text{mit } D_{\max}(t) = D(t) - Exc(t) \quad [\text{kt N a}^{-1}] \quad (\text{Gl. 4})$$

Daraus und mit den Zahlenwerten in Tabelle 5 lässt sich die maximal erlaubte Emission E_{\max} für jedes Jahr der Zeitreihe bestimmen:

$$E_{\max(2015)} = \frac{D(2015) - Exc(2015)}{D(2015)} \cdot E(2015) = 598 \text{ kt N} \quad [\text{kt N a}^{-1}] \quad (\text{Gl. 5})$$

Die folgende Abbildung 7 zeigt die modellierten N-Depositionen und die maximale erlaubten N-Depositionen $D_{\max}(t)$.

Abbildung 7: Stickstoffhaltige Deposition auf Flächen Deutschlands mit definiertem kritischem Eintragungswert Critical Load (grüne Linie) und maximal erlaubte Deposition (D_{max}), sodass im räumlichen Mittel keine Überschreitungen vorkommen (rote Linie). Im zeitlichen Mittel beträgt die maximal erlaubte Deposition D_{max} ca. 105 kt N a⁻¹ (punktirierte Linie).

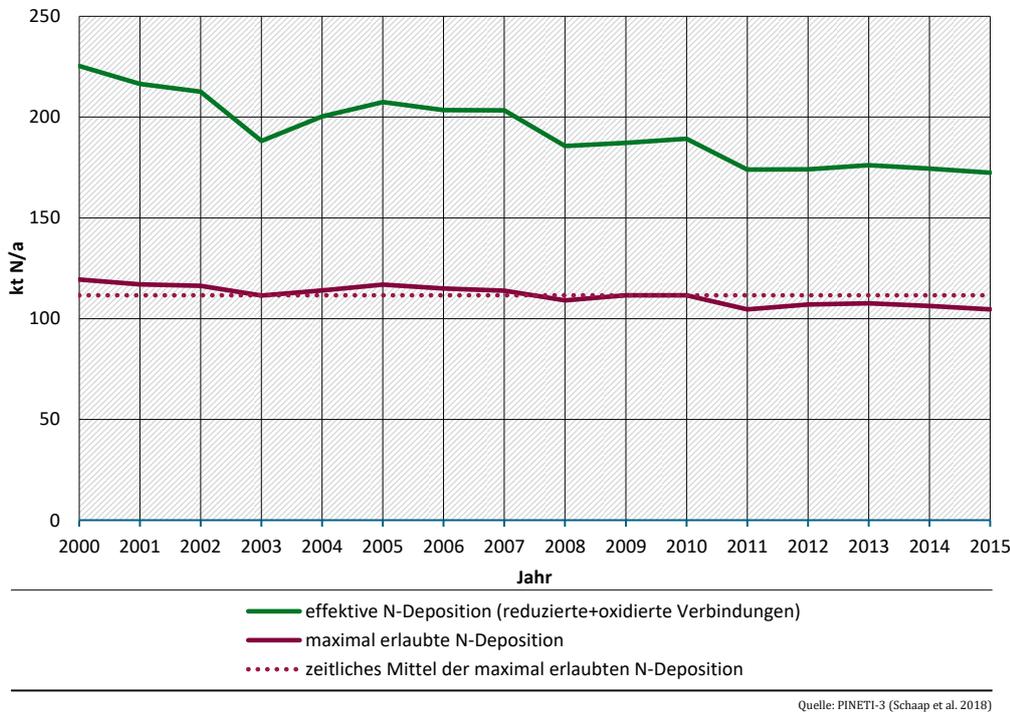


Abbildung 8: Summe der NO_x- und NH₃-Emissionen Deutschlands (blaue Linie) und maximal erlaubte Emissionen (violette Linie). Im zeitlichen Mittel beträgt die maximal erlaubte Emission ca. 598 kt N a⁻¹ (punktirierte Linie).

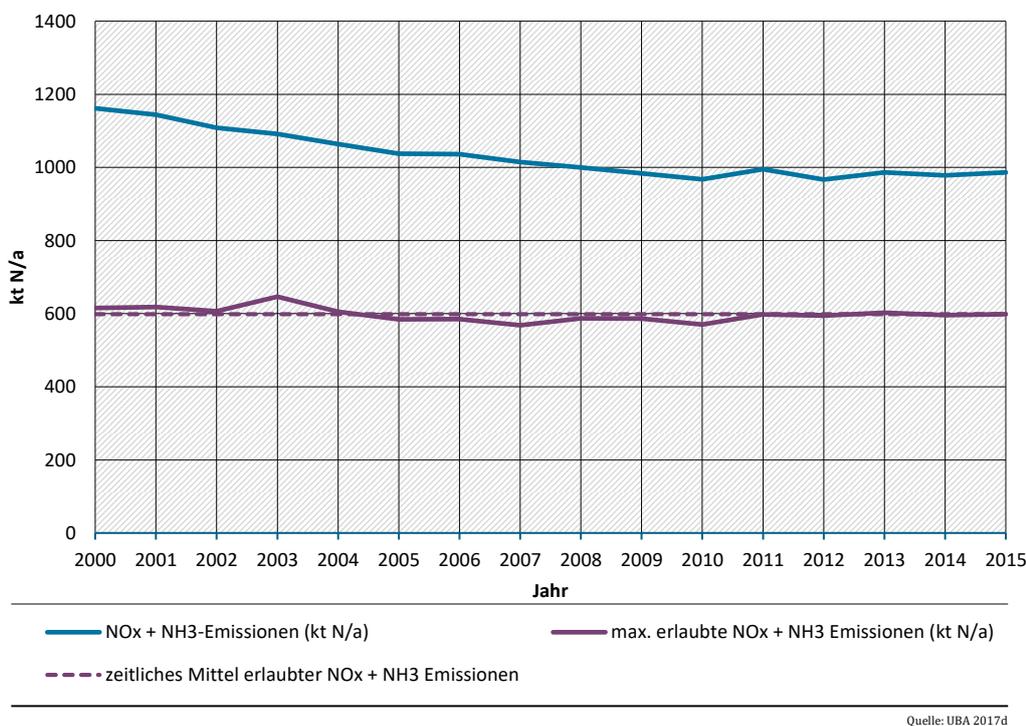


Tabelle 5: Deposition reduzierter und oxidiertes N-Verbindungen auf Flächen für die kritischen Eintragswerte (Critical Loads) ausgewiesen sind; Höhe der Überschreitungen der Critical Loads auf diesen Flächen, sowie NH₃- und NO_x-Emissionen Deutschlands.

| Jahr | Depositionen D(t) | | | Überschreitungen Exc(t) | | | Emissionen E(t) | | |
|------|----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| | N _{gesamt} | NH ₄ ⁺ | NO ₃ ⁻ | N _{gesamt} | NH ₄ ⁺ | NO ₃ | N _{gesamt} | NH ₃ | NO _x |
| | kt N a ⁻¹ | | | | | | | | |
| 2000 | 225 | 133 | 93 | 106 | 63 | 43 | 1.161 | 575 | 587 |
| 2001 | 216 | 128 | 89 | 99 | 59 | 41 | 1.144 | 581 | 563 |
| 2002 | 213 | 123 | 90 | 96 | 56 | 40 | 1.109 | 570 | 539 |
| 2003 | 188 | 111 | 77 | 77 | 46 | 31 | 1.091 | 569 | 522 |
| 2004 | 200 | 121 | 80 | 86 | 52 | 34 | 1.064 | 562 | 502 |
| 2005 | 207 | 126 | 82 | 91 | 55 | 35 | 1.038 | 558 | 479 |
| 2006 | 203 | 126 | 77 | 89 | 55 | 33 | 1.036 | 562 | 474 |
| 2007 | 203 | 126 | 77 | 90 | 56 | 34 | 1.015 | 562 | 452 |
| 2008 | 186 | 117 | 68 | 77 | 49 | 28 | 1.000 | 570 | 430 |
| 2009 | 187 | 120 | 67 | 76 | 49 | 27 | 984 | 585 | 399 |
| 2010 | 189 | 120 | 69 | 78 | 50 | 28 | 967 | 561 | 406 |
| 2011 | 174 | 116 | 58 | 69 | 47 | 23 | 995 | 596 | 400 |
| 2012 | 174 | 115 | 59 | 67 | 45 | 22 | 967 | 580 | 387 |
| 2013 | 176 | 115 | 61 | 69 | 45 | 24 | 986 | 601 | 385 |
| 2014 | 174 | 119 | 56 | 68 | 47 | 22 | 978 | 607 | 371 |
| 2015 | 172 | 119 | 54 | 68 | 47 | 21 | 986 | 625 | 361 |

Datenquellen: Depositionsdaten: PINETI-3, Schaap (2018). Emissionsdaten UBA (2017d)

Es wurde noch eine weitere Methode getestet. Aus dem Projekt PINETI-3 standen in einem Szenarien-Report „Modellgestützte Analyse der Zielstellungen des Göteborg Protokolls und des Verhandlungsstands 2015 zur NEC-Richtlinie“ (Schaap et al. 2017) Depositionen und Überschreitungen zur Verfügung, die für verschiedene Emissionsszenarien mit Hilfe des Modells LOTOS-EUROS ermittelt worden waren. Für die vorliegende Fragestellung konnten Resultate für das Jahr 2010 ausgewertet werden, die insbesondere Interesse verdienen, als sie auch den Anteil der Depositionen ausweisen, der durch ausländische Emissionen verursacht wird. Diese werden mit dem oben beschriebenen Ansatz nicht berücksichtigt. Zwar wäre eine solche Berücksichtigung von Interesse, sie hat aber den Nachteil, dass sie zur Bestimmung der Reduktion der inländischen Emissionen Annahmen erfordert über die künftige Entwicklung der ausländischen Emissionen und der von Deutschland ins Ausland exportierten Schadstofffrachten. Das Ergebnis fürs Emissionsziel wird damit von Annahmen über den internationalen weiträumigen Austausch von Schadstofffrachten abhängig, was für die Einfachheit des DESTINO-Ansatzes unerwünscht ist (siehe Ausführungen im Kap. 3.2.4). Aus diesem Grund wurde die Methode für die Berechnung des integrierten Stickstoffindikators nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Nicht-Berücksichtigen der importierten und exportierten Schadstofffrachten enthält implizit die Annahme, dass in den Nachbarländern eine vergleichbare Entwicklung der Emissionen stattfindet. Das ist auch plausibel, weil alle Nachbarstaaten Deutschlands das Göteborg-Protokoll unterzeichnet haben und die NEC-Richtlinie für alle Staaten Reduktionsziele 2020 und 2030 vorgibt.

Eine dritte Methode wurde ebenfalls geprüft. Wird ein Box-Modell für die Atmosphäre zugrunde gelegt, sind die Summe von Import und Emissionen gleich Depositionen plus Export (Bilanzgleichung für die Stickstoffflüsse). Sind Import, Export und Deposition bekannt, kann daraus die Emission berechnet werden. Import und Export werden aus EMEP Modelldaten (Source-Receptor Relationships⁸) gewonnen. Wird für die Deposition ein maximal erlaubter Wert eingesetzt, kann daraus ein Emissionsziel hergeleitet werden. Eine solche Bilanzgleichung wurde vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt für die Schweiz ausgewertet mit dem Zweck, ein Umweltziel für die Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft herzuleiten. Das derart berechnete Ziel gilt bis heute noch für die Schweiz (BAFU 2007). Die Methode wäre grundsätzlich auch für eine Umsetzung in Deutschland geeignet. Sie hat aber Nachteile: Erstens erfordert sie – wie es bereits bei der zweiten Methode der Fall ist – Annahmen über die Entwicklung der weiträumig verfrachteten Luftschadstoffe, und zweitens muss für ganz Deutschland ein einzelner theoretischer Critical Load angenommen werden. Die naturräumliche und klimaabhängige Regionalisierung ökosystemspezifischer Critical Loads geht dadurch verloren, und das Ergebnis hängt sehr sensitiv von der Wahl des maximal erlaubten Werts für einen Critical Load ab. Die Methode wurde deshalb für eine Anwendung in Deutschland nicht weiterverfolgt.

3.2.4 Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung

Die Zeitreihen für die Emissionen und die mit Gl. 5 berechneten maximal erlaubten Emissionen sind in Abbildung 8 dargestellt. Der Mittelwert beträgt 598 kt N a⁻¹; die einzelnen Werte schwanken nur leicht von Jahr zu Jahr (Variationskoeffizient von 3 %). Dieser Mittelwert wird als Zielwert für den integrierten Stickstoffindikator verwendet. Mit der Emission für das Jahr 2015 (986 kt N a⁻¹, siehe Tabelle 5) ergibt sich damit der folgende Indikatorwert 2015 für die Eutrophierung

$$I(2015) = \frac{E(2015)}{\langle E_{max}(t) \rangle} \cdot 100 \% = \frac{986 \text{ kt N/a}}{598 \text{ kt N/a}} \cdot 100 \% = 165 \% \quad [\%] \quad (\text{Gl. 6})$$

In Bezug auf das Jahr 2015 ist eine Reduktion der Emissionen um ca. 40 % notwendig.

Wie die Reduktion der Emissionen um 388 kt N a⁻¹ erreicht wird, ist nicht weiter spezifiziert. Das Schutzziel für die Eutrophierung ist auf die Summe der oxidierten und reduzierten N-Verbindungen festgelegt. Die oben beschriebene Methode führt zu einer maximalen Emission, die entsprechend als Summe der NO_x- und NH₃-Emissionen berechnet wird. Der Zielwert kann erreicht werden, wenn beide Komponenten um dieselbe Reduktionsrate (40 %) gesenkt werden. Es sind aber auch unterschiedliche Reduktionsraten möglich, solange nur die Summe dieselbe bleibt.

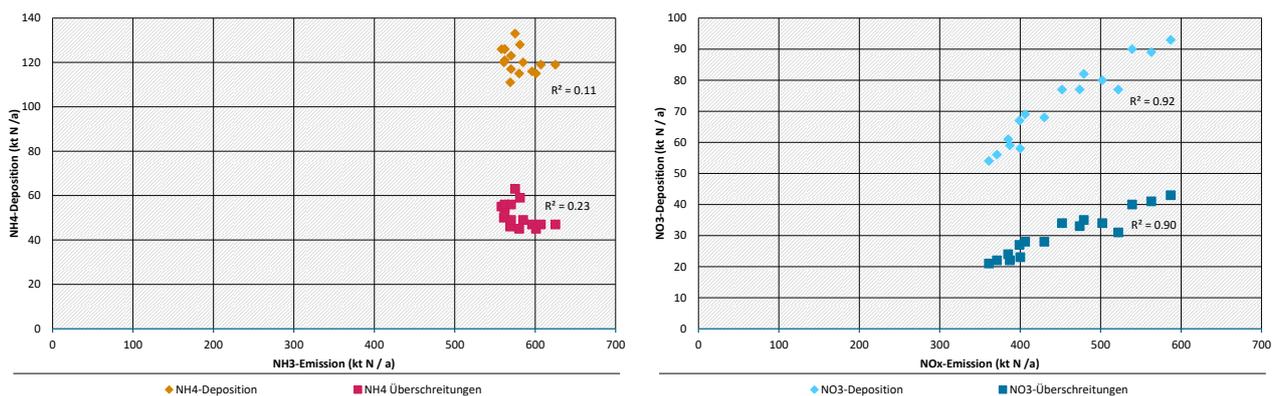
Tabelle 6: Illustrative Zahlen, wie das Reduktionsziel, 388 kt N a⁻¹, auf unterschiedliche Weise erreicht werden kann. Alle Werte beziehen sich auf die Emissionen im Jahr 2015 (361 kt NO_x-N a⁻¹, 625 kt NH₃-N a⁻¹, Summe 986 kt N a⁻¹) und sind gerundet.

| Reduktion NO _x um... | | Reduktion NH ₃ um ... | | Reduktion NO _x + NH ₃ um ... | |
|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|--|---------|
| kt NO _x -N a ⁻¹ | Prozent | kt NH ₃ -N a ⁻¹ | Prozent | kt N a ⁻¹ | Prozent |
| 108 | 30 % | 280 | 45 % | 388 | 40 % |
| 144 | 40 % | 244 | 39 % | 388 | 40 % |
| 181 | 50 % | 208 | 33 % | 388 | 40 % |

⁸ http://www.emep.int/mscw/sr_main.html [31.08.2018]

Die im Kap. 3.2.3.2 beschriebenen Methode mit dem Ergebnis für den DESTINO-Zielwert in (Gl. 6) lässt sich durchführen und führt auch zu einem plausiblen Ergebnis, solange die beiden Ionen NH_4 und NO_3 in der Summe betrachtet werden. Werden sie jedoch einzeln untersucht, so zeigt sich ein zunächst unverständliches und unplausibles Phänomen bei den reduzierten Komponenten: Die Depositionen von NH_4 auf den Flächen mit definiertem Critical Load und auch die Überschreitungen auf diesen Flächen nehmen im Zeitraum 2000 bis 2015 entgegen der Erwartung ab, denn gleichzeitig nehmen die NH_3 -Emissionen im selben Zeitraum zu. Die oxidierten Komponenten verhalten sich hingegen plausibel: Die NO_3 -Depositionen und die NO_x -Emissionen nehmen beide ab (Bestimmtheitsmass $R^2 = 0.92$, Korrelationskoeffizient $R = 0.96$). Abbildung 9 zeigt, dass die NH_3 -Emissionen sich in diesem Zeitraum kaum verändern und dass die Änderungen in den Depositionen und den Überschreitungen ebenso gering und praktisch unkorreliert mit den NH_3 -Emissionen verlaufen (Bestimmtheitsmass $R^2 = 0.23$, der Korrelationskoeffizient ist sogar negativ $R = -0.50$). Das bedeutet: (Gl. 4) trifft zwar für die Summe der reduzierten und oxidierten Depositionen wie auch für die oxidierten Anteile allein (NO_x/NO_3) zu. Wenn aber nur die reduzierten Anteile (NH_3/NH_4) betrachtet werden, treten Effekte auf, welche die Proportionalität zwischen deren Depositionen und Emissionen überdecken und die Korrelation vermindern.

Abbildung 9: Deposition und Überschreitungen auf CL-Flächen der Emissionen: Links reduzierte Komponenten (NH_4 -Deposition vs. NH_3 -Emission), rechts oxidierte Komponenten (NO_3 -Deposition vs. NO_x -Emission). Jeder Punkt markiert ein Jahr in der Periode 2000-2015.



Das Phänomen lässt sich räumlich interpretieren: NH_3 ist ein sehr gut wasserlösliches Gas und wird deshalb effizient via Regen, Nebel und Tau nass deponiert. Die Deposition erfolgt zum größten Teil dort, wo auch die Emission stattfindet, entsprechend werden nur geringe Anteile weiträumig verfrachtet. (Die „Source-receptor tables for 2016“ zeigen, dass 26 % der NH_3 -Emissionen Deutschlands exportiert wurden, EMEP 2018.) Anders bei den Stickstoffoxiden: Regen vermag gasförmiges NO_x nur beschränkt aus der Luft auszuwaschen, NO_x wird deshalb weiträumig verfrachtet. (Die „Source-receptor tables for 2016“ zeigen, dass 53 % der NO_x -Emissionen Deutschlands exportiert wurden, EMEP 2018.) Es gibt nun offenbar zwei Gebiete in Deutschland mit unterschiedlichen räumlichen Konstellationen und unterschiedlicher Entwicklung der NH_3 -Emissionen:

- ▶ Gebiete (G1), deren NH_3 -Emissionen in der Periode 2000-2015 gesunken sind und in deren Nähe sich relativ viele Flächen mit definiertem CL befinden. Dort ist die Korrelation zwischen Emissions- und Depositionsverlauf positiv (beide sinken).
- ▶ Gleichzeitig gibt es aber andere Gebiete (G2), in denen die NH_3 -Emissionen angestiegen sind und in deren näheren Umgebung sich nur wenige Flächen mit definiertem CL befinden. Auch dort sind Emissions- und Depositionsverläufe positiv korreliert (beide steigen an). Weil sich dort aber nur wenige Flächen mit definiertem CL befinden, trägt der Anstieg nur wenig zur nationalen Statistik der Depositionen auf CL-Flächen bei.

- Über das ganze Land gesehen, dominiert der Anstieg der NH_3 -Emissionen der Gebiete G2, während bei den Depositionen der hohe Anteil von CL-Flächen der Gebiete G1 dominiert. Auf diese Weise erklärt sich der Anstieg der nationalen NH_3 -Emissionen und das gleichzeitige Absinken der NH_4 -Depositionen auf Flächen mit definiertem CL. (Werden sämtliche NH_4 -Depositionen in Deutschland, auch solche auf Flächen ohne definierten CL betrachtet, so steigen diese parallel mit den NH_3 -Emissionen an, auch für diese Datenreihen ist die Korrelation positiv.) Das scheinbar unplausible Phänomen erklärt sich damit aus räumlichen Verteilungen von CL-Flächen und Emissionsquellen.

Welche Konsequenzen sind aus diesen Erkenntnissen zu ziehen? Die im Kap. 3.2.3 beschriebene Methode lässt sich zwar auf die Summe der reduzierten und oxidierten Komponenten anwenden, jedoch beeinträchtigt sie die Richtigkeit des berechneten Zielwerts für die N-Emissionen respektive erhöht dessen Unsicherheit. Das lässt sich eindrücklich demonstrieren bei der Wahl des berücksichtigten Zeitfensters: Wird statt 2000-2015 nur der Zeitraum 2005-2015 zur Bestimmung des Emissionsziels benutzt, sinkt der bisherige Zielwert von 598 kt N a^{-1} (Gl. 5) auf 352 kt N a^{-1} und damit steigt der DESTINO-Indikator von 165 % auf 280 %. Wird hingegen der Zeitraum 2000-2010 benutzt, erhöht sich der bisherige Zielwert auf 754 kt N a^{-1} und der DESTINO Indikator sinkt auf 130 %. Der Zielwert hängt damit unter der gegebenen zeitlichen Entwicklung der Emissionen und Depositionen stark von der Wahl des Zeitfensters ab. Das ist unerwünscht und widerspricht den Anforderungen an den integrierten N-Indikator.

Die beobachteten räumlichen Effekte stellen damit die Anwendung einer Methode, die ausschließlich auf Bilanzen ohne Raumbezug funktioniert, in Frage. Die Autoren der Methode haben deshalb in Absprache mit dem UBA entschieden, dass die im Kap. 3.2.3 beschriebene Methode zur Berechnung der maximalen N-Emissionen ohne Raumbezug zu wenig robust ist, um den Zielwert des Teilindikators für das Schutzgut „Terrestrische Ökosysteme/Eutrophierung“, nämlich die Summe der NH_3 - und der NO_x -Emissionen, zu bestimmen.

Eine Erweiterung der Methode wurde getestet, aber ebenfalls als nicht geeignet bezeichnet, Einzelheiten siehe Anhang 5.2.

Für die Bestimmung des Zielwerts wird deshalb auf die politisch bereits verbindlichen Ziele der NEC-Richtlinie der Europäischen Union zurückgegriffen, die Emissionsminderungsverpflichtungen bis zum Jahr 2030 für die Mitgliedsstaaten festlegt. Den in der NEC-Richtlinie festgelegten Nationalen Emissionsreduktionsverpflichtungen“ (EU 2016) liegen räumliche Modellrechnungen des IIASA mit dem GAINS-Modell zu Grunde (IIASA 2012). Demnach verbessert sich der Zustand der Ökosysteme im Hinblick auf die Eutrophierungswirkung um 35 % durch diese Emissionsminderungen (COM, 2013). Die Ziele für Deutschland, die ab 2030 eingehalten werden sollen, sind in Tabelle 7 angegeben. In der ersten Zeile stehen sie mit Bezug auf das Basisjahr 2005 der NEC-Richtlinie, in der zweiten Zeile mit Bezug auf die Emissionen im Jahr 2015, wie es in der vorliegenden Studie als Basis dient: Die Summe der NO_x - und NH_3 -Emissionen ist zur Erreichung des Zielwerts um 42 % gegenüber dem Wert 2015 zu reduzieren. Dieser Werte ist zufällig fast identisch mit dem Wert 40 %, wie er im Kap. 3.2.2 mit der ursprünglichen Methode bestimmt worden war. Allerdings sind die Ziele der einzelnen Komponenten unterschiedlich. Hier zeigt sich ein Vorteil bei der Verwendung der NEC-Ziele gegenüber der bisherigen Methode (Kap. 3.2.3), denn die NEC-Richtlinie gibt für jede NO_x und NH_3 je eigene Ziele vor und lässt für die Aufteilung keinen Spielraum, wie er in Tabelle 6 angedeutet ist. Der bisherige Vorschlag sah vor, die notwendige Reduktion relativ (und nicht absolut) von 40 % auf die beiden Komponenten zu übertragen, also für beide dasselbe (relative) Ziel von 40 % zu setzen. Das NEC-Ziel lautet für NO_x nun aber 54 %, ist also strenger als unter der bisherigen Methode, während das NEC-Ziel für NH_3 eine Reduktion um lediglich 36 % erfordert. Jedoch, auch die Einhaltung der Zielstellungen der NEC-Richtlinie garantiert nicht, dass die CL auf allen CL-Flächen eingehalten werden. Siehe dazu den Kommentar im folgenden Kap. 3.2.5.

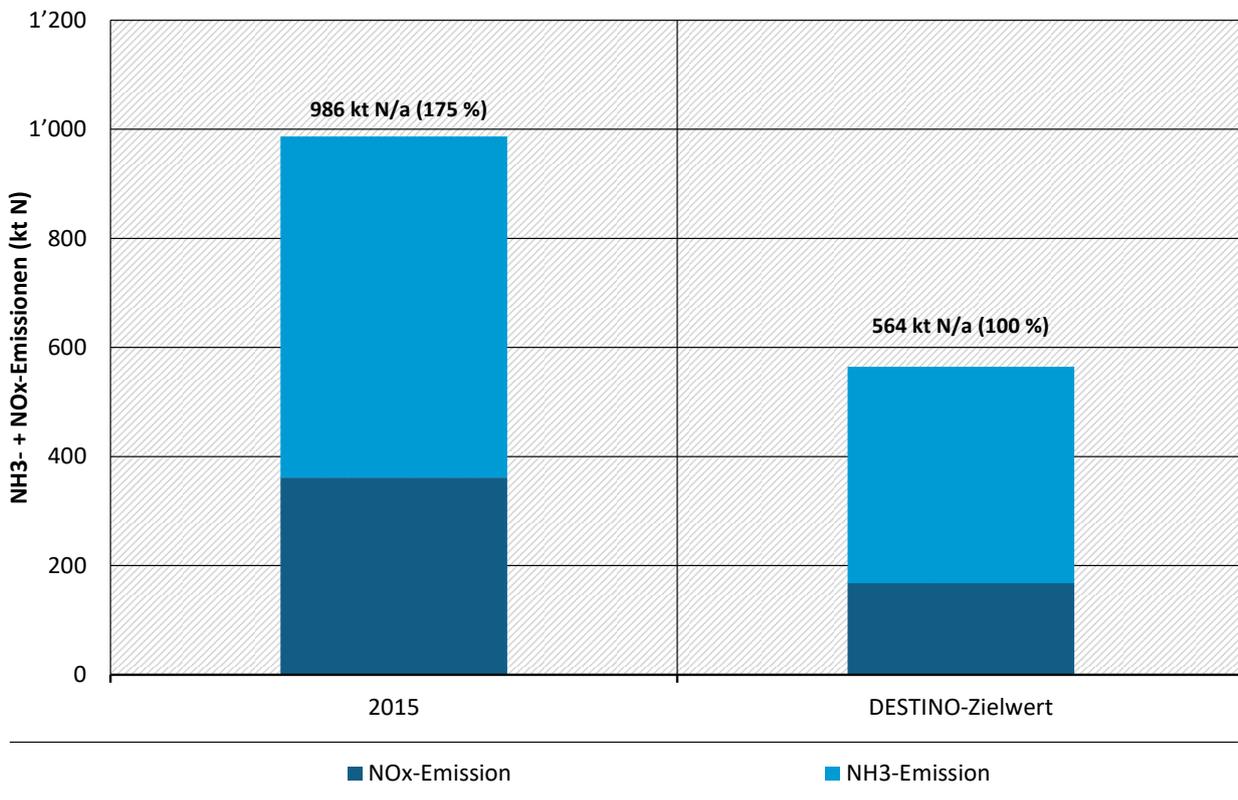
Tabelle 7: Reduktionsziele und Zielwerte für stickstoffhaltige Luftschadstoffemissionen gemäß NEC-Richtlinie für 2030. Die Ziele für NO_x und NH₃ sind einzeln festgelegt, nicht für die Summe; deshalb sind die Zahlen für „N total“ kursiv angegeben.

| Grundlage | NO _x | NH ₃ | <i>N total</i> |
|--|--|--|------------------------------------|
| NEC-RL (EU 2016/2284), zu erreichen ab 2030 ggü. 2005 | 65 % | 29 % | <i>(43 %)</i> |
| Zielwert absolut (ber. auf Basis des Datenstands 2017) | 168 kt NO _x -N a ⁻¹ | 396 kt NH ₃ -N a ⁻¹ | <i>564 kt N a⁻¹</i> |
| Notwendige Reduktionsrate bezüglich der Emissionen 2015 (Datenstand 2017, UBA 2017d) | 54 % | 37 % | <i>43 %</i> |

Zielwert absolut (auf Basis des Datenstands UBA 2017)

Der DESTINO-Teilindikator, die Summe der NO_x- und der NH₃ -Emissionen, hat im Jahr 2015 den Wert 986 kt N a⁻¹, das entspricht 175 % des Zielwerts.

Abbildung 10: DESTINO-Teilindikator terrestrische Ökosysteme / Critical Load, Summe NH₃- und NO_x-Emissionen. IST-Zustand (2015) und DESTINO-Zielwert.



3.2.5 Interpretation und Beurteilung

- Mehrere Methoden wurden getestet, um aus der Kenntnis der Depositionsdaten und des Anteils, der die kritische Eintragswerte übersteigt, auf eine maximale Fracht der NO_x- und NH₃-Emissionen zu schließen. Zunächst wurde die einfachste Methode für die Verwendung im integrierten Stickstoffindikator benutzt (Annahme einer linearen Beziehung zwischen den N-Depositionen auf CL-Flächen und den nationalen N-Emissionen). Ihr Ergebnis lautete, dass die Summe der NO_x- und NH₃-Emissionen von 986 kt N a⁻¹ (2015) auf den Wert von 598 kt N a⁻¹ gesenkt werden müssen um

das Schutzziel für terrestrische Ökosysteme in Bezug auf Eutrophierung notwendigerweise zu erreichen. Damit wäre eine Reduktion der Emissionen um 40 % in Bezug auf das Jahr 2015 erforderlich und der Wert des DESTINO-Teilindikators wäre 165 % im Jahr 2015. Eine verfeinerte Analyse ergab jedoch, dass die Methode wegen der bisher kaum reduzierten NH₃-Emissionen und damit auch wenig veränderten NH₄-Depositionen (siehe Abbildung 9) sensitiv von der Wahl des benutzten Zeitfensters abhängig ist, sodass der Zielwert mit der Methode nicht robust bestimmt werden kann. Auch Erweiterungen der Methode änderten nichts an dieser Tatsache. Aus diesem Grund wurde der DESTINO-Zielwert auf Basis der Zielwerte für die NO_x- und NH₃-Emissionen der politisch verbindlichen NEC-Richtlinie übernommen. Daraus folgt, dass die Summe der NO_x- und die NH₃-Emissionen gegenüber 2015 um 43 % reduziert werden müssen, und der aktuelle Wert des Teilindikators beträgt 175 %.

- 2) Wichtig ist die folgende Ergänzung. Die NEC-Richtlinie schreibt wörtlich: „Die überarbeitete TSAP gibt neue strategische Ziele für die Zeit bis 2030 vor, um dem langfristigen Ziel der Union zur Luftqualität näher zu rücken.“ Auch mit der Erreichung der NEC-Zielwerte sind die langfristigen Ziele noch nicht erreicht. Die Simulationen des IIASA (IIASA, 2012) zeigen für ein MTFR-Szenario 2030 (Maximum Technically Feasible Reduction) mit einer Reduktion der N-Emissionen um 50 % gegenüber 2015 (58 % gegenüber 2005, verhandelt wurden 43 %), dass noch auf ca. 30 % der CL-Flächen Deutschlands die CL nicht eingehalten werden können. Das bedeutet, dass der nach NEC-Richtlinie verwendete Zielwert für die N-Emissionen als **Etappenziel** verstanden werden muss. Die Einhaltung des Zielwerts garantiert nicht, dass die CL auf allen CL-Flächen unterschritten sind.
- 3) Wie schon beim Schutzgut terrestrische Ökosysteme / biologische Vielfalt empfehlen wir die regelmäßige Überprüfung der Emissions- und der Depositionsentwicklung. In den jüngsten Submissionen (Februar 2018 und 2019) des deutschen Luftschadstoffinventars zuhanden der CLRTAP wurden aufgrund methodischer Anpassungen die Zeitreihen der NO_x- und NH₃-Emissionen aktualisiert. Für das Jahr 2015 sind die NO_x-Emissionen in der Submission 2018 (UBA 2018a) um 4,5 % höher, die NH₃-Emissionen gar um 12 % geringer als in der Submission 2017 (UBA 2017b). Diese Unterschiede wirken sich unmittelbar auf den DESTINO-Teilindikator aus. Wenn größere Änderungen auftreten, sollten auch die Auswirkungen auf die Depositionen bestimmt werden, weil die Zielwerte der NEC-Richtlinie u.a. auf eine Einhaltung der Critical Loads ausgerichtet sind.
- 4) Die Einhaltung des Schutzziels: Die NO_x-Emissionen haben in der Zeitspanne 2000 bis 2015 bereits um ca. 40 % abgenommen haben, während die NH₃-Emissionen in derselben Zeitspanne um 9 % zugenommen haben (Tabelle 5). Die NO_x-Emissionen um weitere 54 % zu senken, wird deshalb keine leichte Aufgabe, die zurzeit wachsenden NH₃-Emissionen ebenfalls um 37 % zu senken, dürfte aber eine noch wesentlich schwierigere Aufgabe werden. Die Erreichung des Schutzziels terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung muss deshalb als große Herausforderung zur Kenntnis genommen werden.
- 5) Im Indikatorenbericht „Daten zur Umwelt 2017“ schreibt das UBA zum Indikator „Eutrophierung durch Stickstoff“: Die „Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt“ (NBS) enthält das Ziel, die Belastungsgrenzen ab 2020 nicht mehr zu überschreiten (BMU 2007⁹). Dieses Ziel kann nicht mehr erreicht werden, sollte aber aus Sicht des Umweltbundesamtes als Langfristziel weitergeführt werden“. Im vorliegenden Projekt DESTINO wird eben dieses Ziel anvisiert. Der Indikatorenbericht zitiert im Weiteren ein neues Etappenziel der Bundesregierung: „Der Anteil der Flächen, die von zu hohen Stickstoffeinträgen betroffen sind, soll zwischen 2005 und 2030 um 35 % sinken“ (Bundesregierung 2016). Der bereits zitierte Bericht des IIASA enthält zwei Szenarien (Baseline und

⁹ «Bis zum Jahre 2020 werden die Belastungswerte (Critical Levels und Loads) für Versauerung, Schwermetall- und Nährstoffeinträge (Eutrophierung) und für Ozon eingehalten, so dass auch empfindliche Ökosysteme nachhaltig geschützt sind.» BMU (2007), S. 54

MTFR), bei denen die N-Emissionen mit Bezug zum Jahr 2005 um 26 % respektive um 58 % gesenkt werden. Dabei bleiben noch 48 % respektive 30 % CL-Flächen mit übermäßiger Deposition bestehen. Mit der Realisierung des Baseline Szenarios wäre damit das neue Etappenziel erreicht. Der Indikatorenbericht hat aber auch für Luftschadstoffe einen Indikator: „Deutschland muss die Emissionen der fünf Schadstoffe zwischen 2005 und 2030 demnach um durchschnittlich 45 % reduzieren“, und weiter heißt es: „Die Ziele der europäischen NEC-Richtlinie für 2030 zu erreichen, ist eine große Herausforderung für die deutsche Umweltpolitik. Dafür müssen vor allem die Ammoniak-Emissionen verringert werden“ (S. 44 f., UBA 2017). Die nun für den integrierten Stickstoffindikator berechneten Ergebnisse (42 % Reduktion auf den NO_x - und NH_3 -Emissionen in Bezug auf das Jahr 2015) liegen in einem vergleichbaren Bereich, wenn auch die betrachtete Schadstoffpalette nicht deckungsgleich und der Zeithorizont nicht derselbe ist.

- 6) Bei den Schutzziele mit einem Flächenbezug (terrestrische Ökosysteme / Schadenswirkung durch Ammoniak und Eutrophierung, Grundwasserqualität, Gesundheit) könnte alternativ zur Methode mit Frachtbezug ein Indikator mit Flächenbezug gewählt werden (siehe dazu auch Kap. 4.1.3). Im hier vorliegenden Fall des Schutzguts terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung liegt ein solcher Indikator im Bericht Schaap et al. (2018) bereits vor. Im Jahr 2015 sind 68 % aller Flächen mit definierter Belastungsgrenze über dem kritischen Eintragungswert (Critical Load). Ein einfacher Indikator mit Flächenbezug wäre damit im Jahr 2015 auf dem Wert 312 % (= $100 \% / [1 - 0,68]$), der Zielwert 100 %, was sehr viel höher wäre als beim Frachtbezug. (Der Flächenbezug hat allerdings den wesentlichen Nachteil, dass er nicht mit den nationalen Emissionen korreliert und deshalb mit dem hier gewählten Vorgehen über Emissionsfrachten nicht kompatibel ist.)

3.3 Oberflächengewässerqualität: Schadenswirkung durch Stickstoff-Einträge

3.3.1 Schadensmechanismus

Die Eutrophierung von Oberflächengewässern (Fließgewässern, Seen, Übergangs- und Küstengewässern), das heißt die Anreicherung des Wassers mit Nährstoffen (Stickstoff und Phosphor), bewirkt ein beschleunigtes Wachstum des Phytoplanktons und der Makrophyten und führt zu Störungen der aquatischen Lebensgemeinschaften. Als Folge des verstärkten Algenwachstums verschiebt sich das Artenspektrum und durch den bakteriellen Abbau von abgestorbenen Algen tritt Sauerstoffmangel ein, der insbesondere die bodenlebenden Tiere (Zoobenthos) beeinträchtigt. In extremen Fällen kann Fischsterben auftreten und es kann giftiger Schwefelwasserstoff gebildet werden (UBA 2013).

3.3.2 Schutzziel und DESTINO-Zielwert

Die Ziel- bzw. Schwellenwerte der Konzentration reaktiver N-Verbindungen für die verschiedenen Typen von Oberflächengewässern sind in der Oberflächengewässerverordnung festgelegt.

A) Oberirdische Gewässer (ohne Übergangs- und Küstengewässer)

In der Oberflächengewässerverordnung (Anlagen 7 und 8) werden folgende Schwellenwerte bzw. Umweltqualitätsnormen für N-Verbindungen aufgeführt:

Nitrat $\text{NO}_3 \leq 50 \text{ mg l}^{-1}$

Nitrit-Stickstoff $\text{NO}_2\text{-N} \leq 10 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$

Ammonium-Stickstoff $\text{NH}_4\text{-N} \leq 0,04 \text{ mg l}^{-1}$

Ammoniak-Stickstoff $\text{NH}_3\text{-N} < 2 \text{ bzw. } < 1 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ (unterschiedlich für Fließgewässertypen);

jeweils ermittelt als Jahresdurchschnittswert.

Die Umweltqualitätsnorm der WRRL von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ als Jahresmittelwert wurde im Zeitraum 2011 - 2014 an keiner der 256 Fließgewässer-Messstellen des EUA-Messnetzes überschritten. Im Hinblick auf die ökologische Qualität der Binnengewässer wird der Parameter Nitrat daher nicht als Komponente eines Indikators berücksichtigt.

Die Grenzwerte für Ammoniak und Nitrit werden nach Stand der Kenntnis in keinem Oberflächengewässer in Deutschland überschritten. Eine Überschreitung der Ammonium-Konzentration wurde 2011 an weniger als 3 % der Messstellen des LAWA-Messnetzes festgestellt (eig. Auswertung n. Abb. 33 in UBA 2013). Die Frachten dieser drei N-Verbindungen im Gewässersystem sind sehr gering, so dass sie bei der Berechnung eines mengenbezogenen N-Zielwertes kaum in Erscheinung treten würden.

Für die Ermittlung eines Oberflächengewässer-Indikators werden daher die Binnengewässer (Flüsse und Seen) nicht berücksichtigt.

B) Übergangs- und Küstengewässer

Nord- und Ostsee

Etwa 80 % des Stickstoffs in den deutschen Küstenbereichen sind anthropogenen Ursprungs (Fuchs et al. 2010). Für die Nordsee und die Ostsee werden keine Stickstoffspezies-spezifischen Konzentrations-Zielwerte angegeben, sondern folgende Zielwerte für die Summenparameter Gesamt-Stickstoff (TN) für die Nordsee bzw. gelöster anorganischer Stickstoff (DIN) für die Ostsee.

Nordsee: Gelöste anorganische Stickstoff-Konzentration (DIN) $\leq 0,19$ bis $\leq 0,80 \text{ mg l}^{-1}$ (im Winter-Durchschnitt, 01.11. bis 28.02.), unterschiedlich für die Küstengewässer-Typen.

Ostsee: Gesamt-Stickstoff-Konzentration (TN) $\leq 0,2$ bis $\leq 0,53 \text{ mg l}^{-1}$ (im Jahres-Durchschnitt), unterschiedlich für die einzelnen Küstengewässer-Typen.

Diese meeresökologischen Zielwerte sind umgesetzt worden in zulässige Gesamt-Stickstoff-Konzentrationen (jeweils als Jahres-Durchschnitt) in den deutschen Zuflüssen in die Küstengewässer (Oberflächengewässerverordnung § 14):

Nordsee: Gesamt-Stickstoff-Konzentration (TN) $\leq 2,8 \text{ mg l}^{-1}$

Ostsee: Gesamt-Stickstoff-Konzentration (TN) $\leq 2,6 \text{ mg l}^{-1}$

jeweils als mittlere Jahreskonzentration am Übergabepunkt limnisch/marin (für Flüsse, die im deutschen Hoheitsgebiet in die Nord- oder Ostsee münden) oder am Grenzpunkt, an dem ein Fluss das Bundesgebiet verlässt (Anmerkung: der Rhein wird als Übergangsgewässer in die Niederlande behandelt). Für den Grenzfluss Oder wurde bisher noch kein Zielwert für die Stickstoffkonzentration international abgestimmt. Dieser Minderungsbedarf konnte deshalb noch nicht in die Berechnung einbezogen werden, was zu einer (geringfügigen) Unterschätzung führt.

Gegenwärtig wird davon ausgegangen, dass die festgelegten meeresökologischen Zielwerte ausreichend sind, um die Stickstoffreduktionsanforderungen der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie und des Ostseeaktionsplans für die offene Nord- und Ostsee zu erreichen. Für die Ostsee unterliegt diese Annahme der Voraussetzung, dass die atmosphärischen Stickstoffeinträge durch die Umsetzung des Göteborg-Protokolls und der EU NEC-Richtlinie um mindestens 20 % gesenkt werden. Darüber hinaus berücksichtigt die Ableitung der meeresökologischen Zielwerte nur einen Teil der Indikatoren, die zur Beschreibung des guten Zustands hinsichtlich Eutrophierung herangezogen werden. Es kann deshalb sein, dass auch bei Erreichen der Zielwerte noch Eutrophierungseffekte auftreten und die Zielwerte deshalb abgesenkt werden müssen. Letztendlich werden auch die Effekte des Klimawandels mit großer Wahrscheinlichkeit eine Revision der meeresökologischen Zielwerte erforderlich machen.

Schwarzes Meer (Donau-Einzugsgebiet)

Der deutsche Anteil am Donau-Einzugsgebiet beträgt etwa 7 %, der Anteil entspricht 17 % des Bundesgebietes. Aufgrund der langen Fließzeiten der Donau von der deutschen Grenze bis zur Mündung ins Schwarze Meer sind N-Abbau und N-Rückhaltung von sehr hoher Bedeutung. Die Nährstoffausträge aus Deutschland sind daher für das Erreichen der meeresökologischen Ziele im Schwarzen Meer von eher untergeordneter Bedeutung (LAWA 2016). Für den deutschen Teil des Donau-Einzugsgebiets stellt die LAWA (2016) fest, dass im Hinblick auf die meeresökologischen Anforderungen keine weitere Verminderung der Gesamt-Stickstoffkonzentrationen im deutschen Einzugsgebiet der Donau erforderlich ist.

3.3.3 Methode zur Berechnung der maximalen N-Frachten

Für jedes Flussgebiet k kann die erforderliche relative Minderung der Gesamt-N-Konzentration $\Delta c_k(\%)$ aus der aktuellen Konzentration und dem jeweiligen Zielwert für die Nordsee bzw. die Ostsee berechnet werden:

$$\Delta c_k(\%) = (c_k - c_k(\text{Zielwert}))/c_k \cdot 100 \quad \text{für alle } c_k > c_k(\text{Zielwert}) \quad [\%] \quad (\text{Gl. 7})$$

Die mittlere Gesamt-N-Jahreskonzentration c_k ist proportional zur Gesamt-N-Jahresfracht $M_{N,k}$ im Gewässer. Unter der Voraussetzung, dass die Jahresfracht nicht mit der Abflussmenge korreliert ist, entspricht dann die erforderliche jährliche Verminderung der N-Fracht $\Delta M_{N,k}$ in einem Flussgebiet der relativen Konzentrationsänderung:

$$\Delta M_{N,k} = M_{N,k} * \Delta c_k(\%) \quad [\text{kg N a}^{-1}] \quad (\text{Gl. 8})$$

Die insgesamt zu vermindernde N-Eintragsmenge $\Delta M_N(\text{DE})$ in Deutschland – Einzugsgebiete von Nordsee und Ostsee – entspricht dann der Summe der zu vermindernenden N-Einträge über alle Flussgebiete:

$$\Delta M_N(\text{DE}) = \sum_{\text{DE}} M_{N,k} \quad [\text{kg N a}^{-1}] \quad (\text{Gl. 9})$$

Als Indikator I wird schließlich das Verhältnis des IST-Wertes der jährlichen N-Frachten $M_N(\text{DE})$ zum Zielwert (N-Einträge vermindert um die zu reduzierenden N-Einträge $\Delta M_N(\text{DE})$) definiert:

$$I = \frac{M_N(\text{DE}) \cdot 100 \%}{[M_N(\text{DE}) - \Delta M_N(\text{DE})]} = \frac{100 \%}{[1 - \Delta M_N(\text{DE})/M_N(\text{DE})]} \quad [\%] \quad (\text{Gl. 10})$$

Wenn der Zielwerte von 2,6 bzw. 2,8 mg N l⁻¹ an allen Übergabepunkten limnisch/marin (bzw. an den Grenzübertritten) erreicht wird, dann ist $I = 100 \%$, solange der Zielwerte nicht erreicht wird, ist $I > 100 \%$.

3.3.4 Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert Oberflächengewässerqualität

Ausgangspunkt der Berechnung sind die Gesamt-Stickstoff-Konzentrationen und -Frachten in den deutschen Zuflüssen zu Nord- und Ostsee (Tabelle 8). Gemäß Bestandsaufnahme zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie werden für die deutschen Nordsee- und Ostseezuflüsse folgende Werte berichtet:

Tabelle 8: Stickstoff-Minderungsbedarf in den deutschen Zuflüssen in die Nordsee und Ostsee, verschiedene Zeiträume (LAWA, 2018)

| Flussgebiet | IST-Fracht ^a kt N a ⁻¹ | Ziel-Fracht ^a kt N a ⁻¹ | Minderungsbedarf ^a kt N a ⁻¹ |
|---|---|--|---|
| Nordsee – Zielwert Konzentration 2,8 mg N l⁻¹ | | | |
| Rhein | 198,3 ^b | 196,6 | -1,7 |
| Elbe | 78,8 ^b | 66,6 | -12,2 |
| Ems | 15,1 ^c | 7,8 | -7,3 |
| Weser | 44,4 ^b | 28,5 | -15,9 |
| Eider | 5,7 ^b | 4,7 | -1,0 |
| Summe Nordsee | 342,3 | 304,2 | -38,1 |
| Ostsee – Zielwert Konzentration 2,6 mg N l⁻¹ | | | |
| Schlei / Trave | 6,3 ^b | 4,0 | -2,3 |
| Warnow / Peene | 7,6 ^d | 5,8 | -1,8 |
| Summe Ostsee | 13,9 | 9,8 | -4,1 |
| Insgesamt | 356,2 | 314,0 | -42,2 |

^a Quelle: Meldungen der Flussgebietsgemeinschaften (FGG) Eider, Elbe, Weser, Ems, Rhein, Schlei/Trave und Warnow/Peene, Stand: März 2018 (LAWA, 2018)

^b Abflussnormierte mittlere Stickstofffracht 2012 - 2016.

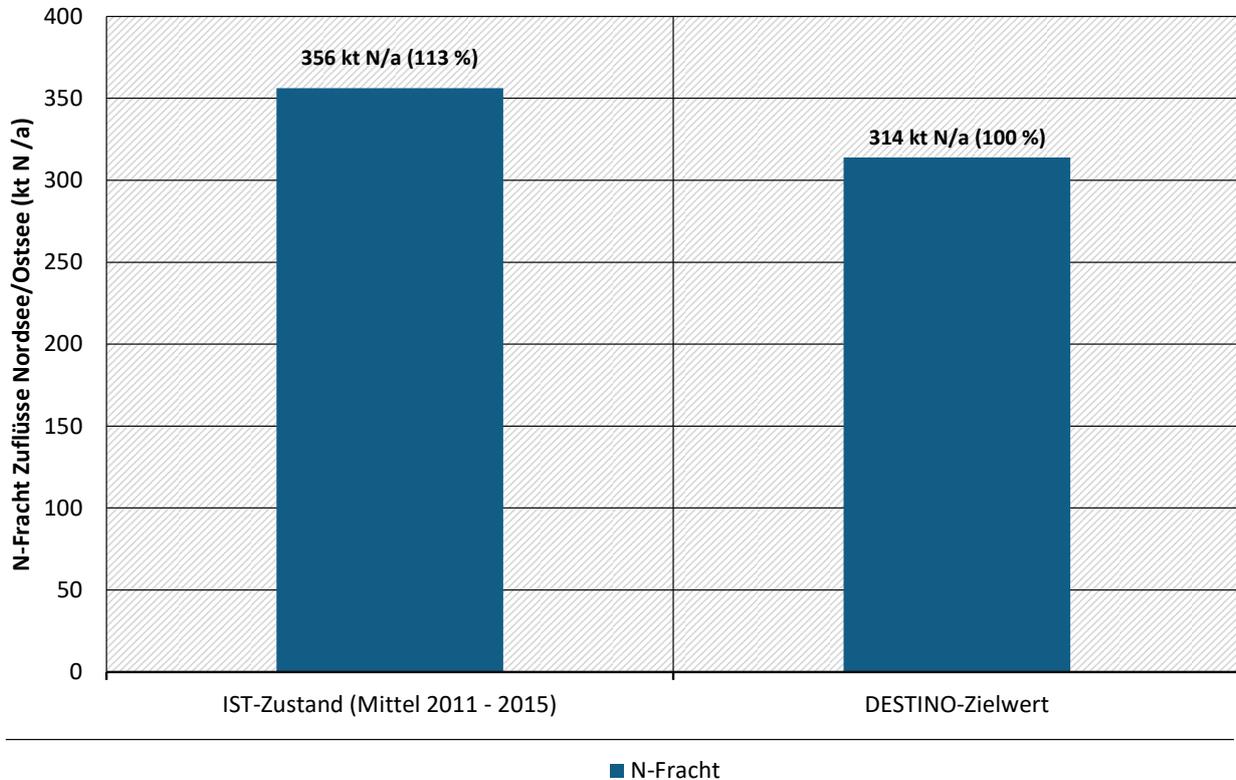
^c Mittlere Stickstofffracht 2008 – 2012.

^d Mittlere Stickstofffracht 2012 – 2015.

Gemäß den Angaben der Tabelle 8 betrug die Gesamt-N-Fracht mit den Zuflüssen aus Deutschland in Nordsee und Ostsee und dem Abfluss des Rheins in die Niederlande 356,2 kt N a⁻¹ (unterschiedliche Bezugszeiträume für die einzelnen Flussgebiete). Zur Einhaltung der Zielwerte im Übergangspunkt limnisch/marin bzw. am Grenzpunkt Bimmen/Lobith müsste die N-Fracht um 42,2 kt N a⁻¹ entsprechend 11,8 % auf eine Ziel-Fracht von 314,0 kt N a⁻¹ vermindert werden. Als Wert des DESTINO-Teilindicators für Oberflächengewässer ergibt sich I = 113,4 % (siehe Abbildung 11). Es ist zu berücksichtigen, dass die Ist-Frachten gemäß dem Abfluss stark schwanken können, so dass sich damit auch der Minderungsbedarf je nach Berechnungszeitraum stark ändern kann. Zukünftig müsste sich die Berechnung des Minderungsbedarfs auf abflussnormalisierte Stickstofffrachten und eine statistische Unsicherheitsbetrachtung stützen, um solche Schwankungen zu minimieren.

Abbildung 11: DESTINO-Teilindikator Oberflächengewässer, N-Fracht in Zuflüssen zu Nordsee und Ostsee. IST-Zustand (Mittel 2011 - 2015) und DESTINO-Zielwert.

Oberflächengewässer



Quelle: eig. Berechnungen

3.3.5 Interpretation und Beurteilung

- 1) In der getroffenen Wahl des Indikators für Oberflächengewässer werden Übergangs-, Küsten- und Meeresgewässer von Nord- und Ostsee und deren Schutzziele erfasst. Wenn auch die übrigen Oberflächengewässer berücksichtigt werden sollten, wäre auch die Liste der Schutzziele entsprechend zu erweitern.
- 2) Der Ansatz zur Berechnung des Indikators geht von der Voraussetzung aus, dass die Jahreswerte von N-Fracht und Abfluss und somit auch die mittlere N-Jahreskonzentration in den Flüssen nicht miteinander korreliert sind. Für den Rhein, Station Bimmen/Lobith, wurde das für die Jahresreihe 1991 – 2016 untersucht und kann bestätigt werden.
- 3) Aufgrund des relativ langsamen Austauschs des Wasserkörpers erfolgt die Reaktion der Küsten- und Meeresgewässer auf reduzierte N-Einträge nur mit einer zeitlichen Verzögerung (analog zu den Grundwasserkörpern, s. Kap. 3.4.5, Punkt 1). Auch ab dem Zeitpunkt, ab dem die Zuflüsse in Nordsee und Ostsee den Zielwert der N-Konzentration einhalten oder unterschreiten, wird es noch einen längeren Zeitraum dauern, bis auch das Küstengewässer insgesamt den Zielwert erreicht. Für die Umsetzung des HELCOM Ostseeaktionsplans gibt es eine modellbasierte Abschätzung, die zeigt, dass es selbst bei einer sofortigen Implementierung der Nährstoffreduktionsvorgaben bis zu 100 Jahre dauern kann, bis die Nährstoffzielwerte in der offenen Ostsee erreicht werden (HELCOM 2013).

- 4) Im Prinzip kann auch ein weiterer Ansatz zur Ermittlung der erforderlichen Minderung herangezogen werden, der sich nicht auf die N-Gewässerfrachten (am Übergangs- bzw. Grenzpunkt) bezieht, sondern auf die Einleitungen in den Flussgebieten. Mit Hilfe von Modellsystemen wie MONE-RIS (Modelling Nutrient Emissions in River Systems, Venohr et al. 2011) oder MoRE (Modelling Regionalized Emissions, Fuchs et al. 2017) können in den einzelnen Flussgebieten die Gesamt-N-Konzentrationen oberhalb der Übergangs- bzw. Grenzpunkte berechnet werden, die eingehalten werden müssen, um die Zielwerte von 2,6 bzw. 2,8 mg TN l⁻¹ am Übergangspunkt limnisch/marin bzw. am Grenzübertritt zu erreichen. Maßgeblicher Faktor ist dabei die Höhe der N-Retention im Gewässersystem, die im Wesentlichen von der Fließzeit (Verweilzeit) vom Ort des N-Eintrags in ein Oberflächengewässer bis zum Übergangspunkt abhängt (weitere Faktoren wie unter anderem C-Gehalt und pH-Wert des Gewässers werden hier vernachlässigt). Von der LAWA (2016) ist bereits eine Karte vorgestellt worden, welche zulässigen jährlichen Gesamt-N-Konzentrationen für die Planungseinheiten der WRRL sich nach diesem Ansatz ergeben. Derzeit sind allerdings noch nicht alle für die Berechnung erforderlichen Daten verfügbar, so dass dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde.
- 5) Die N-Gesamtfracht in Oberflächengewässern stammt aus mehreren Eintragsquellen. Der Indikator Oberflächengewässer beziffert nur die insgesamt erforderliche Reduktion der N-Einträge. Welchen Beitrag die verschiedenen Quellen (Landwirtschaft, Siedlungswasserwirtschaft) bzw. die einzelnen Eintragspfade zur gesamten Verminderung leisten sollen, ist Gegenstand der WRRL-Maßnahmenplanung. Die Beiträge werden auf Bundesebene quellen- bzw. eintragspfadspezifisch mit Hilfe des Modells MoRE (Fuchs et al. 2017) geschätzt. Die Einträge in Oberflächengewässer aus Quellen im Inland summieren sich den Modellergebnissen zufolge auf jährlich rund 500.000 t N, wovon rund 54 % auf den Übertritt von Grundwasser zurückgeht (Tabelle 9).

Tabelle 9: Quellen und Verbleib von Stickstoff-Einträgen in Oberflächengewässer in Deutschland nach MoRE-Modellberechnung, Mittel 2010 – 2014 (Fuchs et al. 2017; Zusammenstellungen in DESTINO-Teilbericht 2, UBA 2020).

| Quellen und Verbleib | kt N a ⁻¹ |
|--|---------------------------|
| Nitrat-Eintrag in Oberflächengewässer mit grundwasserbürtigem Abfluss | 268,2 |
| Eintrag in Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft | 114,3 |
| Oberflächenabfluss (Runoff), Erosion und Drainage aus Landwirtschaftsflächen | 112,0 |
| Atmosphärische N-Deposition auf Oberflächengewässer | 4,8 |
| Summe Einträge in Oberflächengewässer im Bundesgebiet | 499,3 |
| zzgl. N-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss (von Oberliegern) | 67,3 |
| abzgl. N-Retention im Oberflächengewässersystem | -66,0 |
| N-Fracht im Abfluss in Nordsee und Ostsee bzw. zu Unterliegern | 500,6^{a)} |

^{a)} N-Fracht unterscheidet sich von der Angabe in Tabelle 8, da (i) in Tabelle 8 die N-Frachten in Donau, Maas und dem deutschen Anteil in der Oder nicht berücksichtigt sind und (ii) die Werte der Tabelle 9 auf Modellberechnungen für alle Gebiete inklusive der Kleingewässer zurückgehen.

Infolge dieses relativen hohen Anteils der GW-bürtigen N-Fracht in Oberflächengewässern würde eine Verbesserung des Indikators „Grundwasserqualität“ theoretisch auch den Indikator „Oberflächengewässer“ entsprechend verbessern, das heißt, es würde ein additiver Effekt zwischen den beiden Indikatoren auftreten. In der Praxis wird das aber mutmaßlich kaum eine Rolle spielen: wie in Kap. 3.4.5

(Punkt 1) erläutert wird, bewertet der Indikator „Grundwasser“ nicht die tatsächliche NO_3 -Konzentration im Grundwasser, sondern aus pragmatischen Gründen den N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche. Aufgrund der langen Reaktionszeit der NO_3 -Konzentration im Grundwasser auf Veränderungen der Nitratauswaschung aus der Landwirtschaft ist davon auszugehen, dass Veränderungen des N-Überschusses und damit des Grundwasser-Indikators erheblich schneller stattfinden (können) als eine Änderung der Nitrat-Fracht, die aus dem GW in die Oberflächengewässer übertritt.

3.4 Grundwasserqualität: Beeinträchtigung durch Nitrat

3.4.1 Schadensmechanismus

Trinkwasser ist unser wichtigstes Lebensmittel. Der mit Abstand größte Teil des Trinkwassers in Deutschland wird aus Grundwasser (61 %) gefördert. Der Schutz der Grundwasservorkommen für die Trinkwasserversorgung stellt daher ein wesentliches Schutzgut dar. Nitrat selbst ist im menschlichen Organismus unbedenklich. Allerdings kann im Magen Nitrat zu Nitrit umgewandelt werden. Nitrit blockiert das Hämoglobin und damit den Sauerstofftransport im Blut. Eine hohe Aufnahme von Nitrat kann bei Säuglingen und Kleinkindern zum Krankheitsbild der Blausucht führen. Weiterhin bilden sich im Magen aus Nitrit mit anderen Nahrungsbestandteilen Nitrosamine, die als krebserregend gelten. Aus Vorsorgegründen wird daher empfohlen, generell so wenig Nitrat wie möglich mit dem Trinkwasser und mit anderen Nahrungsmitteln aufzunehmen.

3.4.2 Schutzziel und DESTINO-Zielwert

Die Trinkwasserverordnung schreibt einen Grenzwert von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ für das Trinkwasser vor. Für den vorsorgenden Schutz der Grundwasservorkommen für die Trinkwassergewinnung wurde dieser Wert in der WRRL als Schwellenwert der „guten“ Grundwasserqualität übernommen (Grundwasserverordnung vom 09.11.2010). Die Bewertung der Grundwasserbelastung durch Nitrat als Komponente eines integrierten Stickstoffindikators bezieht sich auf diesen Schwellenwert von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$.

Die Grundwasserverordnung legt auch Schwellenwerte für Ammonium und Nitrit von jeweils $0,5 \text{ mg l}^{-1}$ fest. Es gibt aber keine Hinweise, dass diese Schwellenwerte in Deutschland in einem GWK überschritten werden; diese N-Verbindungen werden daher bei der Ermittlung eines Grundwasser-Indikators nicht berücksichtigt.

3.4.3 Methode zur Berechnung des maximalen N-Überschusses

Der Teilindikator zur Grundwasserqualität wird definiert, als das Verhältnis des aktuellen N-Flächenbilanzüberschusses zu einem reduzierten N-Überschuss, bei dem rechnerisch keine Überschreitungen der Nitrat-Qualitätsnorm von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ im GW mehr auftritt, summiert über alle Gebiete, in denen die Qualitätsnorm derzeit überschritten wird. Ausgangspunkt ist die flächendeckende Darstellung der Nitrat-Konzentrationen im GW ($1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster, Abbildung 31 in Kap. 5.4.2) in Deutschland. Eine derartige Darstellung wurde im Rahmen dieses Vorhabens erstmalig nach einem einheitlichen Ansatz für das Bundesgebiet entwickelt. Die Karte basiert auf den Nitrat-Konzentrationswerten von rund 8.100 GW-Messstellen der Bundesländer, die mit Hilfe des „Random Forest“-Regressionsverfahrens unter Verwendung von Flächendaten (Karten) zur Hydrogeologie, Landnutzung usw. regionalisiert wurden (ausführliche Beschreibung s. Kapitel 5.4).

Für jede Rasterzelle j mit $c_j > 50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ kann die relative NO_3 -Konzentrationsverminderung Δc_j (%) berechnet werden, die zur Einhaltung der Qualitätsnorm von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ notwendig ist:

$$\Delta c_j(\%) = (c_j - 50)/c_j \cdot 100 \quad \text{für alle Rasterzellen } j \text{ mit } c_j > 50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1} \quad [\%] \quad (\text{Gl.11})$$

Aus der Berechnung der Bilanzüberschüsse für die Landwirtschaft in Deutschland mit Regionalgliederung Kreise (Häußermann et al. 2019) ist für jede Rasterzelle der jährliche Stickstoff-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche (LF) bekannt (in kg N ha⁻¹ LF a⁻¹, Mittel der Jahre 2011 – 2014).

Für die Berechnung des Teilindikators wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Nitrat-Konzentration im GW im Wesentlichen auf die Nitrat-Auswaschung aus der Landwirtschaft zurückzuführen ist; das heißt, dass der Beitrag von Wald-, Siedlungs- und sonstigen Flächen zur Nitratmenge im GW vernachlässigbar ist. Diese Vereinfachung erscheint auch unter dem Gesichtspunkt gerechtfertigt, dass im Prozessgeschehen der GW-Nitratbelastung die landwirtschaftliche Bewirtschaftung – deren Wirkung auf das GW mit der Indikatorgröße N-Überschuss charakterisiert wird – die einzige Ansatzstelle für Maßnahmen darstellt, mit denen die NO₃-Konzentration in GWK vermindert werden kann.

Der N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche wird als potenzieller Nitrat-Eintrag in das GW betrachtet, von dem aber im Regelfall nur ein gewisser Anteil tatsächlich in das Grundwasser gelangt bzw. eine Messstelle erreicht. Wie groß dieser Anteil ist, hängt von zahlreichen Faktoren ab wie unter anderem Bodenart, Witterungsverhältnisse, Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Aquifer sowie N-Festlegung im Bodenhumus. Welche Nitrat-Konzentration im Grundwasser sich durch diesen Nitratreintrag einstellt, wird schließlich von der Verdünnung, das heißt von der Sickerwassermenge bestimmt. Für eine Rasterzelle mit $c_j > 50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ wird angenommen, dass die potenzielle Nitrat-Eintragsmenge und damit der N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche $N\ddot{U}_j$ in der betreffenden Rasterzelle um den gleichen Prozentsatz wie die Konzentration c_j reduziert werden muss, das heißt, dass sich die Nitrat-Konzentration im GW – zeitlich verzögert - proportional zum N-Flächenbilanzüberschuss vermindert (Gl. 12):

$$\Delta N\ddot{U}_j(\%) = \Delta c_j(\%) \quad [\%] \quad (\text{Gl. 12})$$

Die zu vermindern absolute N-Überschussmenge $\Delta M_{N,j}$ (in kg N a⁻¹) in jeder Rasterzelle j berechnet sich dann aus der Verminderung des N-Überschusses $N\ddot{U}_j$ auf der LF (kg N ha⁻¹ LF a⁻¹) und der Landwirtschaftsfläche LF_j (ha LF) in der Rasterzelle:

$$\Delta M_{N,j} = N\ddot{U}_j * \Delta c_j(\%)/100 * LF_j \quad [\text{kg N a}^{-1}] \quad (\text{Gl. 13})$$

Die insgesamt in Deutschland zu vermindern N-Überschussmenge $\Delta M_N(\text{DE})$ wird über die zu vermindern N-Überschussmengen in allen Rasterzellen j mit $c_j > 50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ summiert.

$$\Delta M_N(\text{DE}) = \sum_j \Delta M_{N,j} \quad \text{für alle Rasterzellen } j \text{ mit } c_j > 50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1} \quad [\text{kg N a}^{-1}] \quad (\text{Gl. 14})$$

Als DESTINO-Teilindikator I wird schließlich das Verhältnis des IST-Wertes des N-Überschuss $M_N(DE)$ zum Zielwert (Überschuss vermindert um die bundesweit zu reduzierende N-Überschussmenge $\Delta M_N(DE)$) in allen Rasterzellen j mit $c_j > 50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ definiert.

$$I = \frac{M_N(DE) \cdot 100 \%}{[M_N(DE) - \Delta M_N(DE)]} = \frac{100 \%}{[1 - \Delta M_N(DE)/M_N(DE)]} \quad [\%] \quad (\text{Gl. 15})$$

Wenn das Ziel „alle Rasterzellen $c_j \leq 50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ “ erreicht ist, dann ist $I = 100 \%$, solange das Ziel nicht erreicht wird, ist $I > 100 \%$.

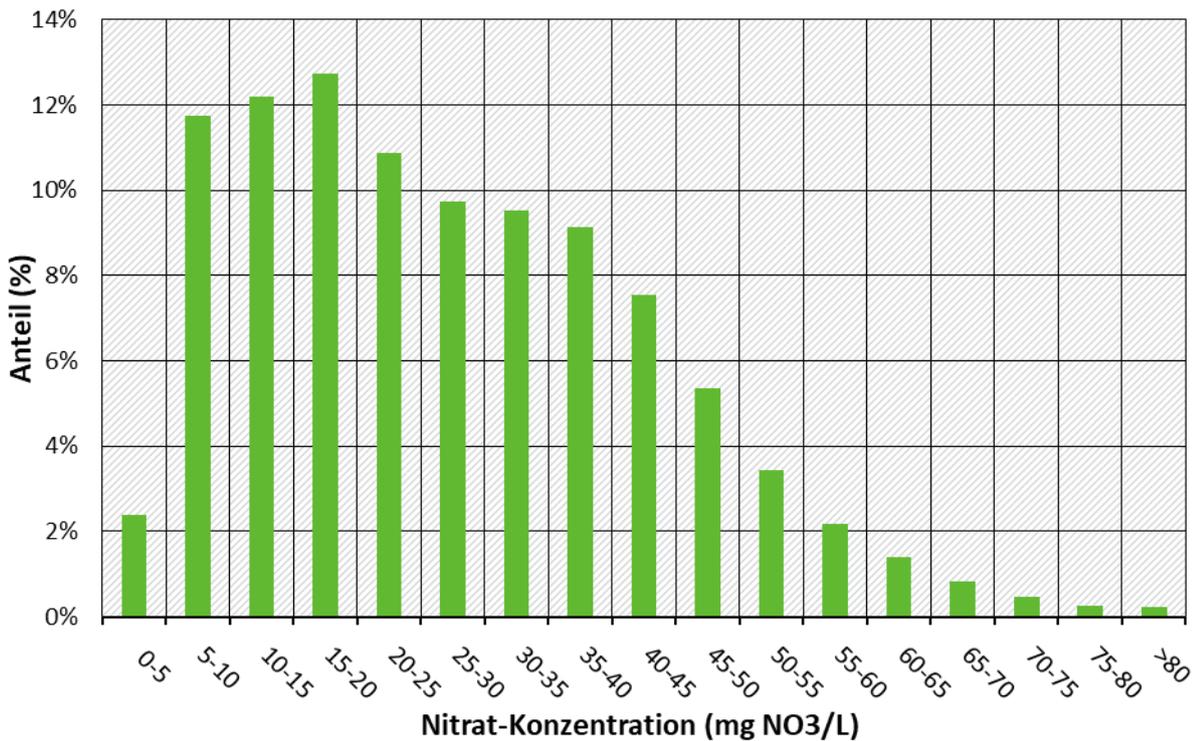
Für die Berechnung des DESTINO-Teilindikators wurden folgende Daten (jeweils $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Raster) verwendet:

- ▶ Karte „Nitrat-Konzentration im Grundwasser“, geschätzt mit Random-Forest-Klassifikation (Abbildung 31)
- ▶ Karte „N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche (LF)“, Regionalgliederung Kreise, Mittel 2011 - 2014 (unveröff., Methodik s. Häußermann et al. 2019)
- ▶ Karte „Anteil der Landwirtschaftsfläche im Raster“, ermittelt aus der Karte Landbedeckungsmodell DE2012 (LBM-DE), Stand 2012, Codes 211 und 231 (BKG 2016).

3.4.4 Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert Grundwasserqualität

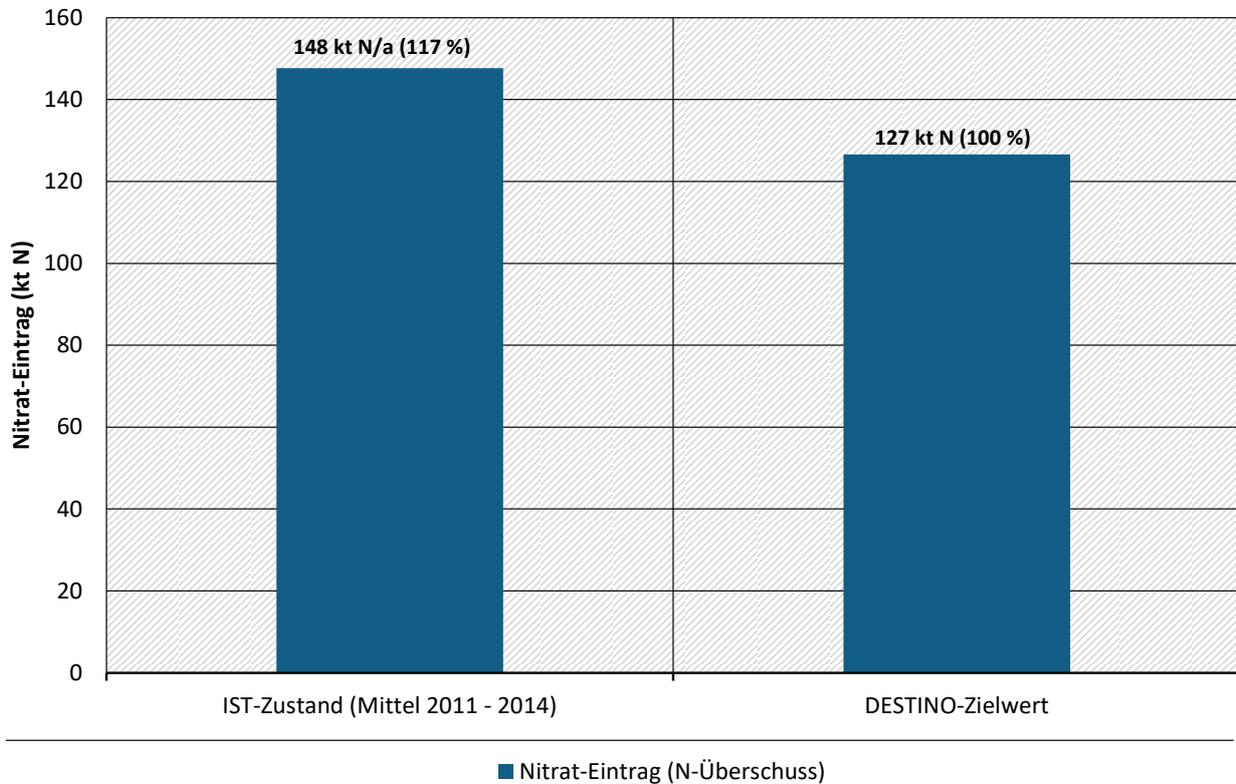
Die Häufigkeitsverteilung der Rasterkarte der Nitratkonzentration im Grundwasser in Deutschland (Abbildung 31, Kap. 5.4.2) zeigt 8,8 % der Fläche (Rasterzellen) mit $c(\text{NO}_3) > 50 \text{ mg l}^{-1}$. Dieser Anteil ist wesentlich geringer als Ergebnisse anderer Karten bzw. Messnetze, die zwischen 18,2 % und 28 % Überschreitungen anzeigen (s. Kap. 3.4.5, Ziffer 5). Wertet man nur die Rasterzellen mit dominierender landwirtschaftlicher Nutzung (50 % und mehr LF) aus, dann ist in 14,4 % der Rasterzellen die Qualitätsnorm überschritten.

Abbildung 12 Verteilung der nach Random-Forest-Klassifikation geschätzten Nitratkonzentration im Grundwasser in Deutschland (s. Abbildung 31)



Die mittlere NO₃-Konzentration in den Rasterzellen mit Überschreitung des Zielwertes beträgt 59,4 mg NO₃ l⁻¹. Für diese Raster mit $c(NO_3) > 50$ mg l⁻¹ wird eine notwendige Verminderung des N-Überschuss im Mittel von 15,8 % entsprechend 9,1 kg N ha⁻¹ LF a⁻¹ berechnet. Summiert über diese Rasterzellen ergibt das eine notwendige Verminderung des N-Überschuss in Deutschland von 21.046 t N a⁻¹. Bezogen auf den gesamten N-Flächenbilanzüberschuss (Mittel 2011 - 2014) von 147.638 t N a⁻¹ in den Rasterzellen mit $c(NO_3) > 50$ mg l⁻¹ entspricht das 14,3 %. Der Wert des Teilindikators beträgt damit I = 116,6 % (siehe Abbildung 13).

Abbildung 13: DESTINO-Teilindikator Grundwasser, N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche in Gebieten (Rasterzellen) mit Überschreitung des Zielwerts. IST-Zustand (Mittel 2011 - 2014) und DESTINO-Zielwert.



Quelle: eig. Berechnungen

3.4.5 Interpretation und Beurteilung

Zu Ansatz, Berechnungsverfahren und Ergebnissen des DESTINO-Teilindikators „Grundwasserqualität“ sind eine Reihe von Anmerkungen und Einschränkungen anzuführen.

- 1) Im Prinzip sollte ein Indikator "Überschreitung Nitrat-Qualitätsnorm im GW" zum Ausdruck bringen, welche Nitrat-Menge (Masse) aktuell in allen Grundwasserkörpern (GWK) in Deutschland vorhanden ist (als Summe über die Produkte aus mittlerer Nitrat-Konzentration c_{GWK} und Volumen V_{GWK} der Grundwasserkörper in allen GWK_i) und um wie viel diese Menge reduziert werden müsste, damit für alle c_{GWK} gilt: $c_{GWK} \leq 50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$. Die Berechnung der Nitrat-Menge in den GWK ist jedoch deutschlandweit aus zwei Gründen nicht möglich: (i) Das Volumen ist für die meisten GWK nicht bekannt (nur für einzelne, hydrologisch gut dokumentierte GWK). (ii) NO_3 -Konzentrationen werden überwiegend im oberflächennahen Grundwasser gemessen, d.h. der Konzentrationswert stellt keine Tiefen-repräsentative Angabe für den gesamten GWK dar.
 - ▶ Der Indikator „Verminderung des N-Flächenbilanzüberschuss“ bewertet daher nicht die Zielerreichung des eigentlichen Schutzgutes (wie viele GWK bzw. welcher Flächenanteil sind im „guten Zustand“ in Bezug auf Nitrat), sondern bewertet die Verminderung der (potenziellen) Nitrat-Immission in das Grundwasser. Durch die Verminderung des N-Überschusses auf der Landwirtschaftsfläche wird die Qualitätsnorm zunächst nur (rechnerisch) im Sickerwasser bzw. im neu gebildeten Grundwasser eingehalten. Wann das gesamte

Grundwasser in einem Aquifer dann die Qualitätsnorm erreicht, hängt davon ab, in welchem Zeitraum das Grundwasser (annähernd) vollständig ausgetauscht wird, und ob während dieser Zeit eventuell zusätzlich Nitratabau im Grundwasser stattfindet.

- ▶ Diesem Ansatz wird jedoch der Vorzug gegeben, da die Grundwasservorkommen in der Regel nur sehr langsam auf Veränderungen der Stoffeinträge mit dem Sickerwasser reagieren. 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 in der Nitrat-Konzentration im Grundwasser abzeichnet – „Grundwasser hat ein langes Gedächtnis“. Mit Blick auf die politische Steuerungswirkung, die der integrierte Stickstoffindikator entfalten soll, erscheint es jedoch zielführender, nicht den Zustand des Grundwassers als Bewertungsmaßstab anzulegen, sondern den (potenziellen) Nitrat-Eintrag.
 - ▶ Der Teilindikator bezieht sich daher nicht auf das Schutzgut Grundwasser selbst, sondern beschreibt die Wirkung der Maßnahmen, die beispielsweise zur Umsetzung der WRRL bzw. der EU-Nitrat-Richtlinie ergriffen werden und mit denen der (potenzielle) Nitrat-Eintrag in das GW auf ein vertretbares Maß reduziert werden soll. Dass der Effekt dieser Maßnahmen unter Umständen erst nach einer längeren Zeitspanne dann auch im eigentlichen Schutzgut „Grundwasser“ tatsächlich messbar wird, ist der langen hydrologischen Reaktionszeit des Systems Grundwasser geschuldet und sollte nicht den gegenwärtig bzw. in Zukunft handelnden Akteuren angelastet werden. Umgekehrt unterstreicht diese Sichtweise die große Verantwortung der aktuellen Umweltpolitik für die langfristige Sicherung und Verbesserung der Grundwasserqualität für die kommenden Generationen.
- 2) Solange die GW-Datenbanken der Länder keine einheitliche Struktur aufweisen, wird eine Aktualisierung des Teilindikators nur in größeren Zeitabständen praktikabel sein, da dafür derzeit 16 Datenbanken einzeln abgefragt und händisch zusammengeführt werden müssen.
 - 3) Die Reduzierung des Nitratreintrags in das GW bzw. die Verminderung der Nitrat-Konzentrationen im GW beeinflusst beide Schutzziele: Oberflächengewässer und Grundwasser. Maßnahmen zur Verminderung des N-Überschusses in der Landwirtschaft verändern daher im Prinzip auch den DESTINO-Teilindikator für Oberflächengewässer. Die Größenordnung dieses additiven Effekts zwischen den beiden Indikatoren ist allerdings gering, wie in Kap. 3.3.5 (Punkt 5) ausgeführt wird.
 - 4) Der Berechnungsansatz nach Kap. 3.4.3 kann grundsätzlich auch für beliebige andere Qualitätsnormen angewendet werden, bspw. für einen Vorsorgewert von $40 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ bzw. $37,5 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$, den etliche Bundesländer bereits in ihrer WRRL-Maßnahmenplanung als Schwellenwert vorsehen, ab dem Maßnahmen eingeleitet werden.
 - 5) In der Diskussion um das Ausmaß der Nitratbelastung des Grundwassers in Deutschland wurden bzw. werden verschiedene Messnetze und Datengrundlagen für die Bewertung herangezogen, die zu unterschiedlichen Aussagen führen.
 - ▶ Der Nitratbericht der Bundesregierung (BMU/BMEL 2016) basiert auf den 697 Messstellen des neu konzipierten EU-Nitratmessnetzes. Im Berichtszeitraum 2012 bis 2014 wiesen in diesem Messnetz 28,0 % der Messstellen mittlere Nitratwerte über $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ auf.
 - ▶ In den „Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt“ des UBA (2017) wird auch ein Indikator „Nitrat im Grundwasser“ aufgeführt. Dieser Indikator bezieht sich auf die rund 1200 Messstellen des sog. EUA-Grundwassermessnetzes, deren Werte von Deutschland an die Europäische Umweltagentur (EUA) berichtet werden. Im Jahr 2014 wurde in diesem Messnetz an 18,2 % der Messstellen der Nitratwert von $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ überschritten.

- ▶ Eine flächenbezogene Auswertung der Karte „chemischer Zustand der Grundwasserkörper in Deutschland in Bezug auf den Parameter Nitrat“ (Abbildung 32, Kap. 5.4.2) ergibt 29,9 % „rote“ Flächen, das heißt GWK, die nach WRRL den guten Zustand für Nitrat verfehlen. Bezogen auf die Anzahl der insgesamt 1.168 GWK sind 313 GWK entsprechend 26,8 % nicht im guten Zustand. Die Abweichungen gegenüber den Anteilen, die sich aus der Auswertung von anderen Messnetzen ergeben, kann unter anderem wie folgt erklärt werden: Die Einstufung eines GWK nach WRRL erfolgt in der Mehrzahl der GWK auf Basis mehrerer Messstellen, die innerhalb des betreffenden GWK liegen. Üblicherweise wird der gesamte GWK als „schlecht“ bewertet, auch wenn nur eine (von mehreren) Messstellen die Nitrat-Qualitätsnorm überschreitet; das heißt in einem GWK, der „nicht im guten Zustand“ ist, können auch Messstellen vorhanden sein, die keine Überschreitung zeigen.
 - ▶ In früheren Veröffentlichungen, unter anderem auch in früheren Nitratberichten der Bundesregierung (u.a. BMELV 2012), wurde häufig das sog. „alte“ Nitratmessnetz dargestellt. Dieses Nitratmessnetz umfasste 2012 nur 162 Messstellen, von denen rund 50 % Nitratgehalte über 50 mg l^{-1} aufwiesen. Ziel dieses Messnetzes war es ausdrücklich, die Belastungssituation in landwirtschaftlich geprägten Gebieten und die Wirkung von Maßnahmen in diesem Bereich zu erfassen; es wurden daher überwiegend Messstellen mit hohen Nitratwerten ausgewählt. Dieses Messnetz ist daher gänzlich ungeeignet, die Gesamtsituation der GWK repräsentativ zu beschreiben.
 - ▶ Offensichtlich ist die Frage, in welchem Ausmaß das Grundwasser in Deutschland zu hohe Nitratkonzentrationen aufweist, nicht eindeutig zu beantworten. Je nachdem, ob ein GWK-flächenbezogener oder ein Messstellen-bezogener Ansatz gewählt und welches Messnetz zugrunde gelegt wird, variiert der Anteil des Nitrat-belasteten GW deutlich.
 - ▶ Wahrscheinlich wird es auf absehbare Zeit auch nicht möglich sein, auf Basis der Messwerte der Bundesländer durch eine einzige Institution eine Kartendarstellung zu erarbeiten, die mit dem Verteilungsmuster der „roten“ GWK-Karte in Abbildung 32 exakt übereinstimmt. Aufgrund unzureichender Dokumentation ist es derzeit nicht möglich, die Verfahren für die Ableitung "vom Punkt zur Fläche" für alle Bundesländer exakt nachzuvollziehen.
- 6) Als Alternative zur flächenbezogenen Auswertung, aufbauend auf der Karte der geschätzten NO_3 -Konzentrationen (Abbildung 31), kommt grundsätzlich auch ein Messstellen-bezogener Ansatz in Betracht. Dieser Ansatz wurde jedoch nicht weiterverfolgt: Zum einen ist die Messstellendichte in den Bundesländern sehr unterschiedlich (s. Kap. 5.4.1.2, Tabelle 28). Diesem Problem könnte zwar zum Teil begegnet werden, indem das EUA-Messnetz herangezogen würde, womit die Datengrundlage zum Indikator auch konsistent wäre mit den Messwerten für die Darstellung in "Daten zur Umwelt". Allerdings ist dieses Messnetz mit nur rund 1.200 Messstellen, entsprechend rund einer Messstelle pro 300 km^2 , relativ stark ausgedünnt. Zum anderen stellt sich für beide Messnetze die Frage, nach welchem Ansatz jeder Messstelle eine bestimmte Flächenrepräsentanz zugewiesen werden sollte, die zur Ermittlung der Menge des zu mindernden N-Überschuss erforderlich ist. Nach Meinung der Autoren ist die in Kap. 5.4 beschriebene Methodik der bessere Ansatz, um eine flächendeckende Darstellung der NO_3 -Konzentration im GW zu erzeugen.

3.5 Klima: Erwärmung durch Lachgas-Emissionen

3.5.1 Schadensmechanismus

Als Treibhausgas trägt Lachgas (N_2O) zur Klimaerwärmung bei. Das Treibhauspotenzial ist rund 298-mal¹⁰ höher als jenes von CO_2 . Der Strahlungsantrieb von Lachgas beträgt rund $0,2 \text{ W/m}^2$, dies entspricht rund 7 % des gesamten durch Treibhausgase verursachten Strahlungsantriebs. Diese Änderungen in der Strahlungsbilanz der Erde führen zu einer globalen Erwärmung (Myhre et al. 2013). Als Folge davon sind zum einen direkte, lokale Auswirkungen zu erwarten. Beispielsweise eine Häufung extremer Wetterereignisse, vermehrte Trocken- und Hitzeperioden sowie negative Auswirkungen auf die Biodiversität und verschiedene Ökosystemdienstleistungen. Neben den direkten klimabedingten Veränderungen werden aber auch indirekte Auswirkungen eintreten, da sich beispielsweise aufgrund klimabedingter Veränderungen in anderen Weltregionen das Angebot an Importgütern (Rohstoffe, Nahrungsmittel usw.) und die Nachfrage nach Exportgütern verändern wird.

Neben der erwärmenden Wirkung von Lachgas auf das Klima, trägt N_2O auch zum Abbau von stratosphärischem Ozon bei. Da andere ozonabbauende Chemikalien reduziert werden konnten, hat Lachgas mittlerweile die größte Rolle beim Abbau stratosphärischen Ozons übernommen (UNEP 2013).

Lachgas entsteht hauptsächlich in der Landwirtschaft, beim Einsatz stickstoffhaltiger Düngemittel und aus landwirtschaftlich genutzten Böden. 1990 stammten 52 % der N_2O -Emissionen Deutschlands aus der Landwirtschaft. Weitere relevante Lachgas-Quellen sind die chemische Industrie (36 %) und Verbrennungsprozesse (10 %). Im Jahr 2015 lag der Anteil der Landwirtschaft bei 81%, der Anteil des Energiesektors bei 14 % und der Anteil der Industrie bei 2% (UNFCCC 2017). Bei den Emissionen aus der Landwirtschaft ist zwischen direkten und indirekten Lachgas-Emissionen zu unterscheiden. Direkte Emissionen stammen aus organischen und mineralischen Düngemitteln, atmosphärischer N-Deposition sowie reaktiven Stickstoffverbindungen in Böden aus Pflanzenreststoffen und biologischer N-Fixierung von Eiweißpflanzen (Leguminosen). Indirekte Lachgas-Emissionen entstehen im Boden bei der mikrobiellen Umsetzung von Stickstoffverbindungen wie Nitrat und Ammoniak¹¹.

3.5.2 Schutzziel und DESTINO-Zielwert

Momentan gibt es noch keine gesetzlich verabschiedeten Ziele für die Treibhausgas-Emissionen. Der Klimaschutzplan 2050 des BMUB (2016) enthält jedoch ein Langfristziel 2050 und ein Zwischenziel für das Jahr 2030. Das Zwischenziel liegt für die Gesamtemissionen vor und für die einzelnen Sektoren. Das Langfristziel ist nur für die Gesamtemissionen definiert.

- ▶ Langfristziel: Die Treibhausgas-Emissionen sollen bis 2050 im Vergleich zu 1990 um 80 % bis 95 % vermindert werden.
- ▶ Zwischenziel für 2030: Die gesamten Treibhausgas-Emissionen Deutschlands müssen bis spätestens 2030 um mindestens 55 % gegenüber 1990 gemindert werden. Die Zwischenziele je Sektor sind in Tabelle 10 dargestellt.

¹⁰ Exakter Wert für das Treibhausgaspotenzial von Lachgas ist 298 gemäß 4. Sachstandsberichtes der IPCC im 100-Jahrehorizont.

¹¹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/lachgas-methan> [31.08.2018]

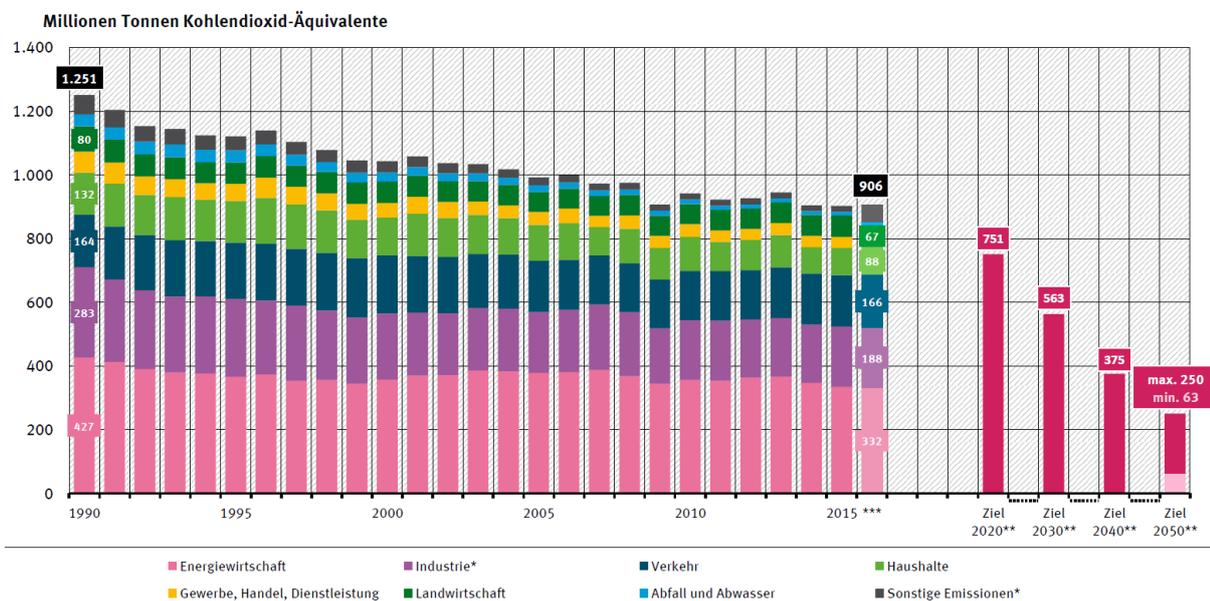
Tabelle 10: Klimaschutzplan, Zwischenziele 2030 des BMUB je Sektor.

| Handlungsfeld | 1990 (in Mio. Tonnen CO ₂ -Äq.) | 2014 (in Mio. Tonnen CO ₂ -Äq.) | 2030 (in Mio. Tonnen CO ₂ -Äq.) | 2030 (Minderung in % gegenüber 1990) |
|--------------------|---|---|---|---|
| Energiewirtschaft | 446 | 358 | 175 – 183 | 62 – 61 % |
| Gebäude | 209 | 119 | 70 – 72 | 67 – 66 % |
| Verkehr | 163 | 160 | 95 – 98 | 42 – 40 % |
| Industrie | 283 | 181 | 140 – 143 | 51 – 49 % |
| Landwirtschaft | 88 | 72 | 58 – 61 | 34 – 34 % |
| Teilsumme | 1209 | 890 | 538 – 557 | 56 – 54 % |
| Sonstige | 39 | 12 | 5 | 87 % |
| Gesamtsumme | 1248 | 902 | 543 – 562 | 56 – 55 % |

Quelle: Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung (BMUB 2016)

Die zeitliche Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen seit 1990 zeigt, dass vor allem bei der Energiewirtschaft, in der Industrie, bei den privaten Haushalten und beim Sektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ Reduktionen realisiert werden konnten (Abbildung 14). Die Treibhausgas-Emissionen aus der Landwirtschaft haben in diesem Zeitraum nur leicht abgenommen.

Abbildung 14: Deutschlands Treibhausgas-Emissionen inkl. Ziele 2020 bis 2050.



Emissionen nach Kategorien der UN-Berichterstattung ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
 * Industrie: Energie- und prozessbedingte Emissionen der Industrie (1.A.2 & 2);
 Sonstige Emissionen: Sonstige Feuerungen (CRF 1.A.4 Restposten, 1.A.5 Militär) & Diffuse Emissionen aus Brennstoffen (1.B)
 ** Ziele 2020 bis 2050: Energiekonzept der Bundesregierung (2010)
 *** Schätzung 2016, Emissionen aus Gewerbe, Handel & Dienstleistung in Sonstige Emissionen enthalten

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Inventarberichte zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 bis 2015 (Stand 02/2017) und Schätzung für 2016 (Stand 03/2017)

Quelle: UBA¹²

Ein Langfristziel für Lachgasemissionen liegt nicht vor, denn das Langfristziel gemäß Klimaschutzplan bezieht sich nur auf die gesamten Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten. Daher musste im

¹² <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#textpart-1> [31.08.2018]

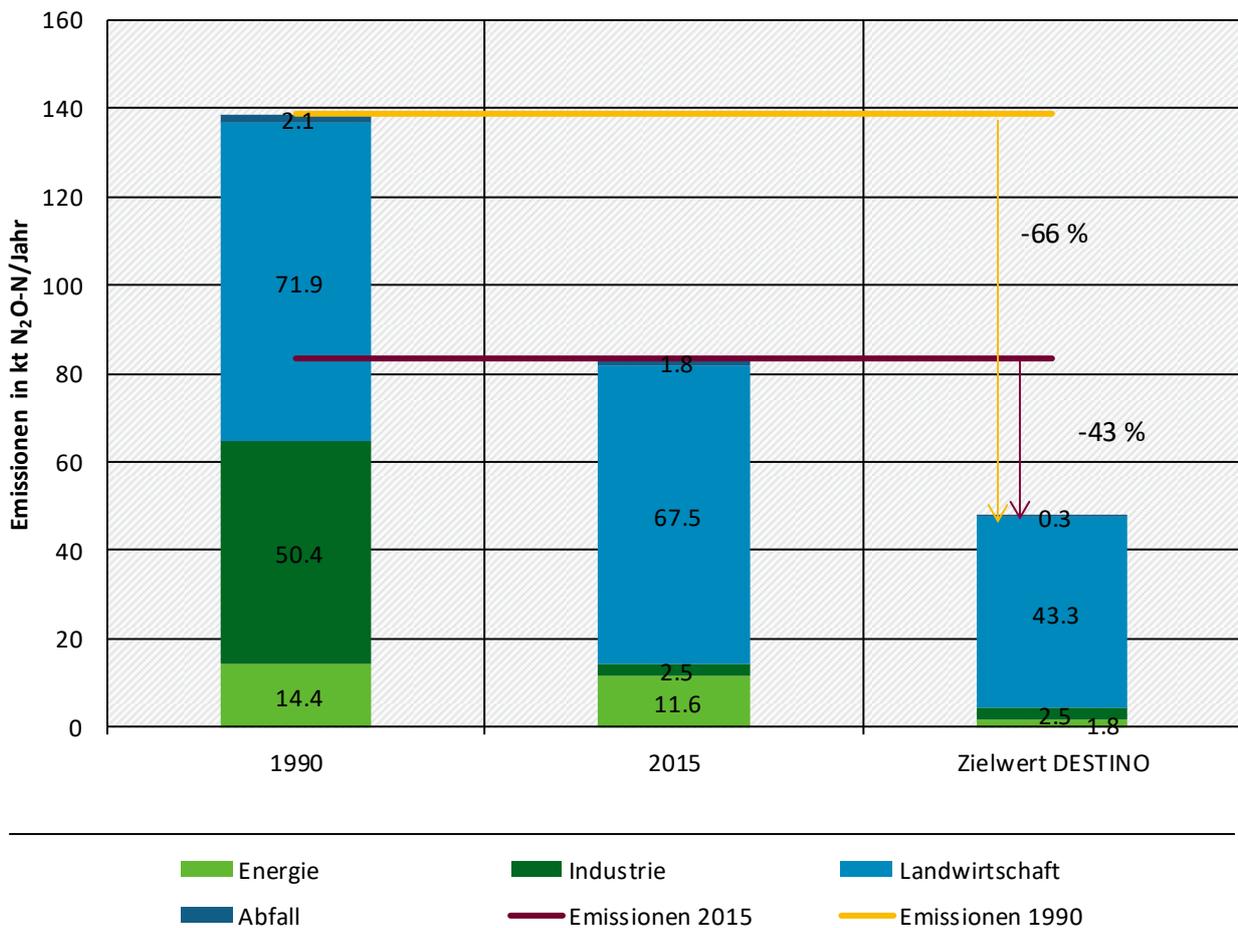
Rahmen des DESTINO-Projekts ein entsprechendes Ziel hergeleitet werden. Grundlage für die Herleitung der Zielwerte für die Lachgas-Emissionen pro Sektor sind die historischen Daten zu den Lachgas-Emissionen gemäß dem nationalen Treibhausgasinventar (UNFCCC 2017), die sektoriellen Zwischenziele 2030 und das Langfristziel 2050 gemäß Klimaschutzplan des BMUB (2016), siehe Tabelle 10. Das DESTINO-Ziel für die Lachgas-Emissionen orientiert sich am Langfristziel 2050.

Für das Jahr 2050 sind keine Sektorziele definiert, sondern nur ein umfassendes Reduktionsziel von 80 bis 95 %. Zur Herleitung der sektoriellen Langfristziele für die Lachgas-Emissionen wurden folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Für die Lachgas-Emissionen im **Energiesektor** wird als Langfristziel eine mittlere Reduktion von 87,5 % gegenüber 1990 vorausgesetzt. Dieses Reduktionsziel ist somit konsistent mit dem Langfristziel 2050 für die gesamten Treibhausgasemissionen.
- ▶ Bei den Lachgas-Emissionen aus der **Landwirtschaft** wird angenommen, dass das sektorielle Reduktionsziel für 2030 bis ins Jahr 2050 linear extrapoliert werden kann¹³. Unter dieser Annahme kann das landwirtschaftliche Sektorziel anhand einer linearen Extrapolation bis ins Jahr 2050 berechnet werden. Mit dem sektoriellen Reduktionsziel von 32,5 % im Jahr 2030 gegenüber 1990 ergibt sich somit für das Jahr 2050 eine Reduktion um rund 40 % gegenüber 1990.
- ▶ Die Lachgas-Emissionen aus der **Industrie** konnten bis zum Jahr 2015 gegenüber 1990 bereits um 95 % reduziert werden. Daher liegen die Emissionen im Jahr 2015 bereits auf sehr tiefem Niveau. Der Anteil der Industrie beträgt in diesem Jahr nur ca. 2 % der gesamten Lachgas-Emissionen. Der Beitrag der Industrie zur Erreichung des Sektorziels 2030 von 50% gegenüber 1990 ist somit bereits erfüllt und daher wird zur Herleitung des Zielwerts angenommen, dass ab 2015 keine weitere Reduktion erfolgen wird und somit die Lachgas-Emissionen aus der Industrie ab 2015 konstant bleiben.
- ▶ Für die Lachgas-Emissionen aus dem Sektor **Abfall** wird der sektorielle Absenkpfad der Kategorie „Sonstige“ gemäß Klimaschutzplan angenommen. Dies entspricht einer Reduktion um 87 % bis ins Jahr 2050 gegenüber 1990.
- ▶ Über sämtliche Sektoren ergibt sich eine gesamthafte Reduktion der Lachgas-Emissionen um 66 % gegenüber 1990. Bezogen auf die Lachgas-Emissionen im Jahr 2015 entspricht dies einer Reduktion um 43 %. Dieses Reduktionsziel wird als DESTINO-Zielwert übernommen.

¹³ Ob die getroffenen Annahmen gerechtfertigt sind, ist jedoch eine kaum zu beantwortende Frage. Sie ist jedenfalls nur im Zusammenhang mit einer langfristigen Strategie zur Landwirtschaft und zur Ernährungssicherheit Deutschlands zu diskutieren

Abbildung 15: Lachgas-Emissionen nach Sektoren und DESTINO-Zielwert für das Schutzgut Klima. Die Emissionen sind in kt N₂O-N a⁻¹ angegeben.



Quelle: Eigene Berechnungen, UNFCCC 2017

Historische Daten der Lachgas-Emissionen (1990, 2015) und DESTINO-Zielwert.

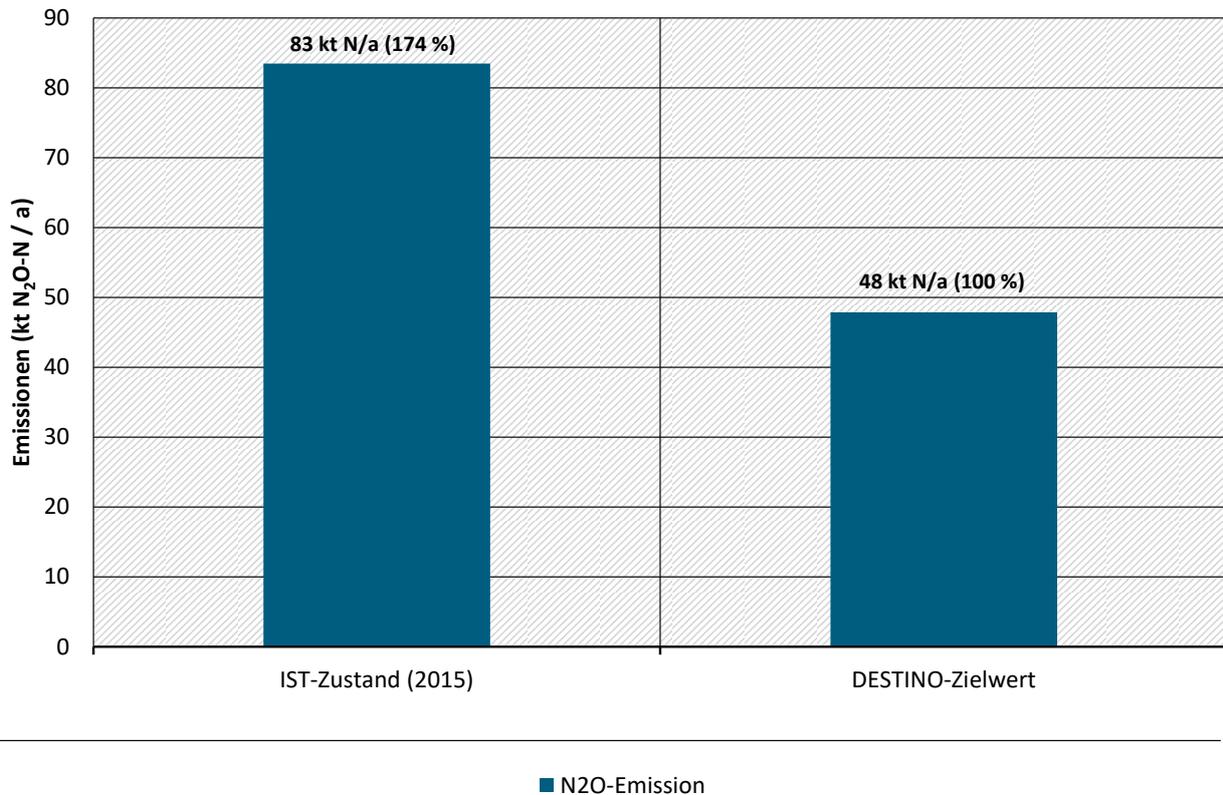
3.5.3 Methode zur Berechnung der maximalen Lachgas-Emissionen

Zur Herleitung der maximal zulässigen Lachgas-Emissionen ist keine Rückrechnung notwendig, weil das Schutzziel für das Schutzgut Klima bereits als N₂O-Emission vorgegeben ist.

3.5.4 Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert Klima

Im Jahr 2015 betragen die Lachgas-Emissionen 83,4 kt N₂O-N a⁻¹. Der DESTINO-Zielwert liegt bei 47,8 kt N₂O-N a⁻¹. Somit lagen die Emissionen im Jahr 2015 um 35,6 kt N₂O-N a⁻¹ zu hoch, eine entsprechende Reduktion ist notwendig, um das Klimaschutzziel bezüglich Lachgas-Emissionen zu erreichen. Als Wert des DESTINO-Teilindicators für Klima ergibt sich 174 % (83,4/47,8 x 100 %, siehe Abbildung 16).

Abbildung 16: DESTINO-Teilindikator Klima, Lachgas-Emissionen (N₂O). IST-Zustand (2015) und DESTINO-Zielwert.



Quelle: Eigene Berechnungen, UNFCCC 2017

Historische Daten der Lachgas-Emissionen (2015) und DESTINO-Zielwert.

3.5.5 Interpretation und Beurteilung

- 1) Da das Reduktionsziel bereits als N₂O-Emission vorgegeben wird, braucht es im Fall des Schutzguts Klima keine Rückrechnung. Weil aber kein Langfristziel für die einzelnen Treibhausgase vorgegeben ist, wird es anhand der historischen Daten und Annahmen zur zukünftigen Entwicklung hergeleitet. Der hier vorgeschlagene Weg zur Zielsetzung ist zu diskutieren respektive vom UBA zu beurteilen. Die gewählte Methode berücksichtigt, dass Emissionen aus der Bewirtschaftung lebender Systeme (Landwirtschaft) nicht im selben Maße reduzierbar sind, wie dies bei technischen Systemen der Fall ist. Ob die getroffenen Annahmen (siehe Kap. 3.5.2) gerechtfertigt sind, ist jedoch eine kaum zu beantwortende Frage. Sie ist jedenfalls nur im Zusammenhang mit einer langfristigen Strategie zur Landwirtschaft und zur Ernährungssicherheit Deutschlands zu diskutieren¹⁴.
- 2) Im Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt 2017 des UBA (UBA 2017) werden die Gesamtemissionen von Treibhausgasen ausgewiesen und zu den nationalen Zielen für die gesamten Treibhausgase in Bezug gesetzt. Da die Lachgas-Emissionen mit rund 4 % nur einen geringen Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen ausmachen, ist dieser Indikator nicht direkt vergleichbar mit dem DESTINO-Zielwert für das Schutzgut Klima.

¹⁴ Ob eine solche Diskussion schon stattgefunden hat oder nicht, entzieht sich unserer Kenntnis.

- 3) Beim Schutzgut Klima ist keine räumlich differenzierte Betrachtung notwendig, da die Auswirkungen nur von den globalen Gesamtemissionen an Treibhausgasen abhängig sind und räumliche Unterschiede in den Emissionen somit keinen Einfluss haben.
- 4) Für die Überprüfung des Emissionsziels empfehlen wir, die Immissionsmodellierungen gelegentlich zu aktualisieren. Die jüngste Submission vom Februar 2018 des deutschen Treibhausgasinventars zuhanden der UNFCCC hat aufgrund methodischer Aktualisierungen die Zeitreihen der N₂O-Emissionen aktualisiert (UNFCCC 2018). Für das Jahr 2015 sind die N₂O-Emissionen um 0,7 % geringer und für das Jahr 1990 um 0,1 % höher als in der Submission Februar 2017 (UNFCCC 2017b). Dieser Unterschied hat auf die Berechnung des Emissionsziels für Lachgas einen vernachlässigbaren Einfluss. Bei zukünftigen Submissionen empfiehlt sich jeweils zu prüfen, ob sich die Emissionen in den Jahren 1990 oder 2015 stark ändern. Gegebenenfalls müsste dann der Zielwert entsprechend aktualisiert werden.

3.6 Menschliche Gesundheit: Beeinträchtigung/Gefährdung durch Stickstoffdioxid-Immissionen

3.6.1 Schadensmechanismus

Eine erhöhte Konzentration an Stickstoffoxiden kann sich sowohl direkt als auch indirekt auf die menschliche Gesundheit auswirken. Sie kann zu einer Reizung und Schädigung der Atemorgane führen und verstärkt nachweislich die Wirkungen von Allergenen. Besonders betroffen sind Asthmatiker, da sich eine Bronchienverengung einstellen kann, die ihre Symptome verschärft. Eine Studie des Umweltbundesamts (UBA 2018e) zeigt, dass erhöhte NO₂-Immissionen in Deutschland zu erheblichen Gesundheitsbelastungen führen¹⁵. Im Jahr 2014 sind rund 6000 vorzeitige Todesfälle aufgrund von Herz-Kreislauf-Erkrankungen auf die NO₂-Hintergrundbelastung im ländlichen und städtischen Raum zurückzuführen. Außerdem wurde in dieser Studie auf Publikationen verwiesen, die einen Zusammenhang zwischen der Belastung mit Stickstoffdioxid und Krankheiten wie Diabetes mellitus, Bluthochdruck, Schlaganfall, der chronisch obstruktiven Lungenerkrankung (COPD) und Asthma nachgewiesen haben (UBA 2018e).

Zusätzlich wird unter Einwirkung von UV-Strahlung aus Stickstoffoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen Ozon gebildet. Erhöhte Ozonkonzentrationen vermindern die Lungenfunktion und können zu entzündlichen Reaktionen in den Atemwegen und somit zu Atemwegsbeschwerden führen. Bei körperlicher Anstrengung können sich diese Auswirkungen verstärken. Wegen der hohen Reaktionsfreudigkeit des Ozons liegt die Vermutung nahe, dass es krebserregend sein könnte. Die MAK-Kommission (MAK = maximale Arbeitsplatz-Konzentration) der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) beurteilte Ozon als einen Stoff, der „im Verdacht steht, beim Menschen Krebs auszulösen“¹⁶.

Nicht zuletzt tragen Ammoniak- und Stickstoffdioxidemissionen dazu bei, dass sich sekundärer Feinstaub in der Atmosphäre bildet. Diese Partikel werden also nicht direkt bei der Verbrennung in Autos, Holzheizungen oder Kraftwerken freigesetzt, sondern bilden sich durch Reaktion der beiden (Vorläufer)Gase untereinander zu partikulärem Ammoniumnitrat oder mit weiteren Vorläufersubstanzen wie Schwefeldioxid und Kohlenwasserstoffen (zu partikulärem Ammoniumsulfat und organischem Material), Luftgetragener Feinstaub birgt ein Gesundheitsrisiko in Deutschland. Die kleinen Staubpartikel

¹⁵ <https://www.umweltbundesamt.de/no2-krankheitslasten> [31.08.2018]

¹⁶ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-die-gesundheit#text-part-2> [31.08.2018]

können Entzündungen im Atemtrakt verursachen, allergische Atemwegserkrankungen verstärken und am Entstehen von chronischen Lungenerkrankungen, Lungenkrebs und Herz-Kreislaufkrankungen beteiligt sein¹⁷.

Im Folgenden werden nur die direkten Schadenwirkungen von NO₂-Immissionen auf die menschliche Gesundheit betrachtet. Die Ozonbildung ist je nach Umweltbedingungen durch Stickstoffmonoxid oder durch flüchtige Kohlenwasserstoffe limitiert. Hohe Ozonwerte sind deshalb auch durch Emissionen flüchtiger Kohlenwasserstoffe mitverursacht; solche können aber im vorliegenden Konzept des integrierten Stickstoffindikators nicht berücksichtigt werden (weitere Bemerkungen zum Ozon findet sich im Kap. 3.6.5.) Auch Schadenwirkungen durch Nitrat- und Ammoniumanteile im Feinstaub lassen sich nicht in einfacher Weise in das Konzept aufnehmen: Ihr Anteil im Feinstaub ist beschränkt, während Primärfeinstaub und sekundäre, organische Anteile durch andere Schadstoffe (als Stickstoff) verursacht werden.

3.6.2 Schutzziel und DESTINO-Zielwert

Der NO₂-Immissionsgrenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit ist in der Luftqualitätsrichtlinie verankert und beträgt 40 µg NO₂ m⁻³ im Jahresmittel. Der Grenzwert für kurzfristige Belastungen beträgt 200 µg NO₂/m³ im Stundenmittel und darf pro Jahr nicht mehr als 18-mal überschritten werden. Zur Herleitung eines Zielwerts für NO_x-Emissionen eignet sich dieses Schutzziel jedoch nicht, da Grenzwertüberschreitungen bzw. Konzentrationsspitzen räumlich eng begrenzt im direkten Einflussbereich von lokalen Emissionsquellen (z. B. Verkehr) auftreten und Werte von solchen verkehrsnahen Messstationen daher nicht gut mit den nationalen NO_x-Emissionen korrelieren. Hingegen korreliert die Hintergrundkonzentration an NO₂ stark mit den nationalen NO_x-Emissionen. Daher erfolgt die Herleitung des Zielwerts auf Basis von Daten zur Hintergrundbelastung an NO₂.

Die Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, WHO) veröffentlichte eine Wirkungsschwelle von 20 µg NO₂ m⁻³ für die Hintergrundbelastung (WHO 2013). Diese Wirkungsschwelle wird für die Berechnung des DESTINO-Zielwerts für NO_x-Emissionen herangezogen.

3.6.3 Methode zur Berechnung der maximalen NO₂-Emissionen

Die Herleitung des DESTINO-Zielwerts für die nationalen NO_x-Emissionen basiert auf NO₂-Immissionsdaten zur Hintergrundbelastung. Die NO_x-Immissionen werden nur an wenigen Standorten gemessen und daher wäre mit diesen Daten keine robuste Herleitung eines Zielwerts möglich. Zudem ist das Schutzziel für die Hintergrundbelastung bereits auf NO₂ bezogen. Daher basiert die angewendete Methode zur Herleitung des DESTINO-Zielwerts für die nationalen NO_x-Emissionen auf den NO₂-Immissionen und nicht auf den NO_x-Immissionen.

Für die Bestimmung des Emissionsziels für NO_x-Emissionen wird angenommen, dass der folgende Zusammenhang angenähert gilt: Der 98. Perzentilwert der NO₂-Immissionen aller Hintergrundimmissions-Messstationen ist proportional zur Summe der nationalen NO_x-Emissionen. Die Wahl des 98. Perzentilwerts basiert auf folgenden Überlegungen. Das Schutzziel der Einhaltung der Wirkungsschwelle von 20 µg NO₂ m⁻³ für die Hintergrundbelastung soll an allen Standorten erreicht werden. Gleichzeitig soll der nationale Zielwert möglichst nicht von lokalen Einflüssen beeinträchtigt werden. Da die Messstationen nicht in jedem Fall eindeutig einer der Belastungskategorien zugeordnet werden können, ist davon auszugehen, dass auch die Hintergrundmessstationen teilweise einer Belastung

¹⁷ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltschutz-in-der-landwirtschaft>

durch lokale Emissionsquellen ausgesetzt sind. Die Auswertung der Immissionsdaten der Hintergrundmessstationen zeigt, dass in allen betrachteten Jahren dieselben Stationen die höchste Belastung aufweisen. Bei diesen Stationen wäre im Rahmen einer zukünftigen Aktualisierung der Zielwerte die Klassifizierung zu überprüfen, damit sichergestellt werden kann, dass an allen Messstandorten nur die reine Hintergrundbelastung erfasst wird.

Um zu vermeiden, dass der nationale Zielwert durch lokale Einflüsse geprägt wird, wird in der angewendeten Methode daher nicht der 100. Perzentilwert, sondern der 98. Perzentilwert der Immissionsmessdaten verwendet.

Unter der Annahme, dass der 98. Perzentilwert der NO_2 -Immissionen aller Hintergrundimmissions-Messstationen sich proportional zur Summe der nationalen NO_x -Emissionen verhält, wird eine Linearität zwischen NO_x -Emissionen $E(t)$ und NO_2 -Immissionen $c(t)$ auf der Betrachtungsebene Deutschlands angenommen. Lokal braucht dieser Zusammenhang nicht zu gelten. Um den Zielwert (E_{\max}) möglichst robust zu bestimmen, basiert die gewählte Methode auf dem über mehrere Jahre gemittelten Verhältnis zwischen jährlichen NO_x -Emissionen und NO_2 -Immissionen.

$$E_{\max} = c_{\max} \left\langle \frac{E(t)}{c(t)} \right\rangle \text{ mit } c_{\max} = 20 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3 \quad [-] \quad (\text{Gl. 16})$$

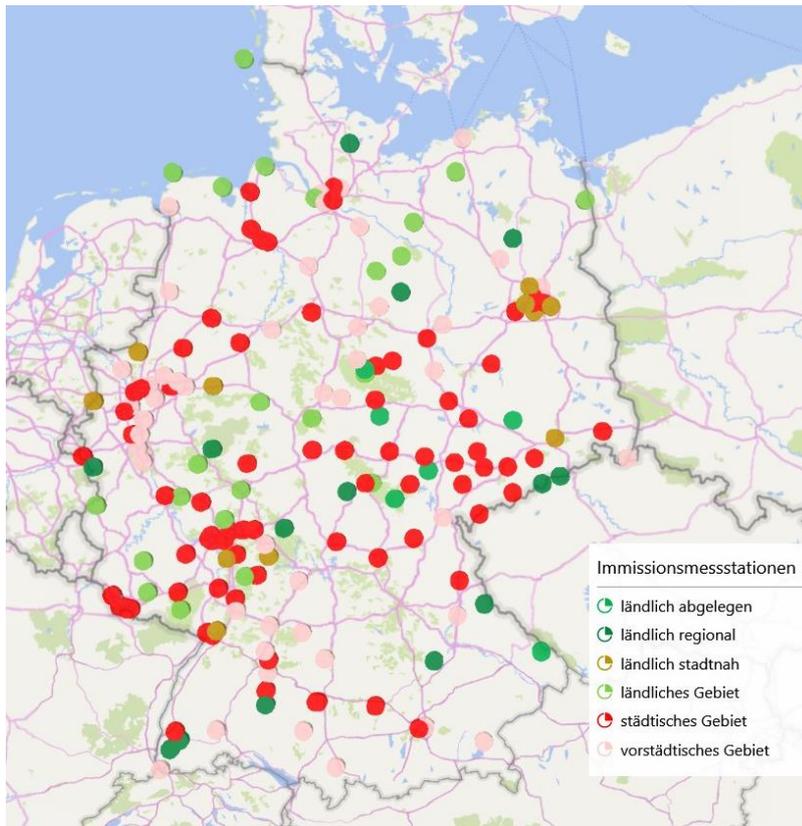
Mit einem durchschnittlichen Verhältnis von NO_x -Emission zu NO_2 -Immission von $11,8 (\text{kt N} \cdot \text{m}^3)/(\mu\text{g NO}_2 \cdot \text{a})$ in der gewählten Zeitperiode lässt sich die maximal erlaubte NO_x -Emission, E_{\max} , bestimmen:

$$E_{\max} = c_{\max} \left\langle \frac{E(t)}{c(t)} \right\rangle = 20 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3 \cdot 11,8 \frac{\text{kt N} \cdot \text{m}^3}{\text{a} \cdot \mu\text{g NO}_2} = 235,8 \text{ kt N/a} \quad [\text{kt N a}^{-1}] \quad (\text{Gl. 17})$$

In Deutschland werden die NO_2 -Immissionen an rund 500 Stationen gemessen¹⁸. Die Länge der Zeitreihen unterscheidet sich je nach Standort. Für die Herleitung des Zielwerts wurden lückenlos vorhandene Zeitreihen für möglichst viele Messstationen gesucht. Berücksichtigt werden dabei nur diejenigen Stationen, welche die Hintergrundbelastung erfassen. Eine Durchsicht aller vorhandenen Messdaten ergab als optimale, durchgehende Zeitreihe für die NO_2 -Immissionen das Intervall von 2002 bis 2015 mit insgesamt 179 Stationen (Abbildung 17).

18 <http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/stickstoffdioxid-belastung#textpart-5> [31.08.2018]

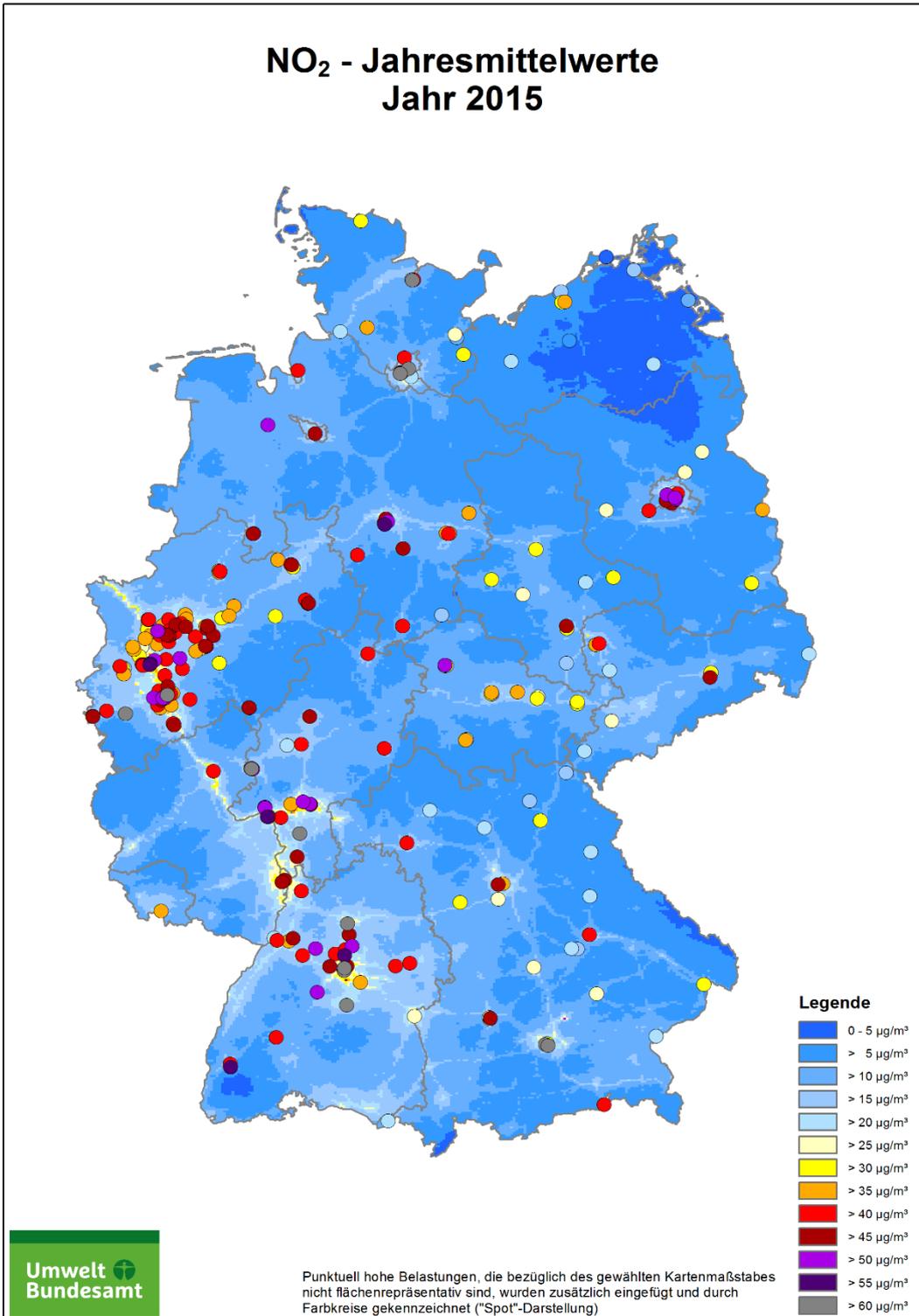
Abbildung 17: Standorte der NO₂-Hintergrundimmissionsmessstationen mit einer durchgehenden Zeitreihe von 2002 - 2015



Dargestellt sind die 179 NO₂-Immissionsmessstationen, bei welchen Messdaten als vollständige Zeitreihe von 2002 bis 2015 vorliegen. Berücksichtigt werden nur Messstandorte, die die Hintergrundbelastung erfassen. Davon liegen 78 Stationen in städtischem Gebiet, 47 in vorstädtischem Gebiet, 23 in ländlichem Gebiet, 11 Stationen liegen ländlich stadtnah, 14 Stationen liegen ländlich regional und 6 Stationen liegen ländlich abgelegen. Datenquelle: UBA (2017b)

Die NO₂-Immissionskarten zeigen, dass der verbindliche Jahresgrenzwert für NO₂-Immissionen ($40 \mu\text{g m}^{-3}$) großräumig mehrheitlich eingehalten wird, jedoch an exponierten Stellen noch immer überschritten wird (Abbildung 18).

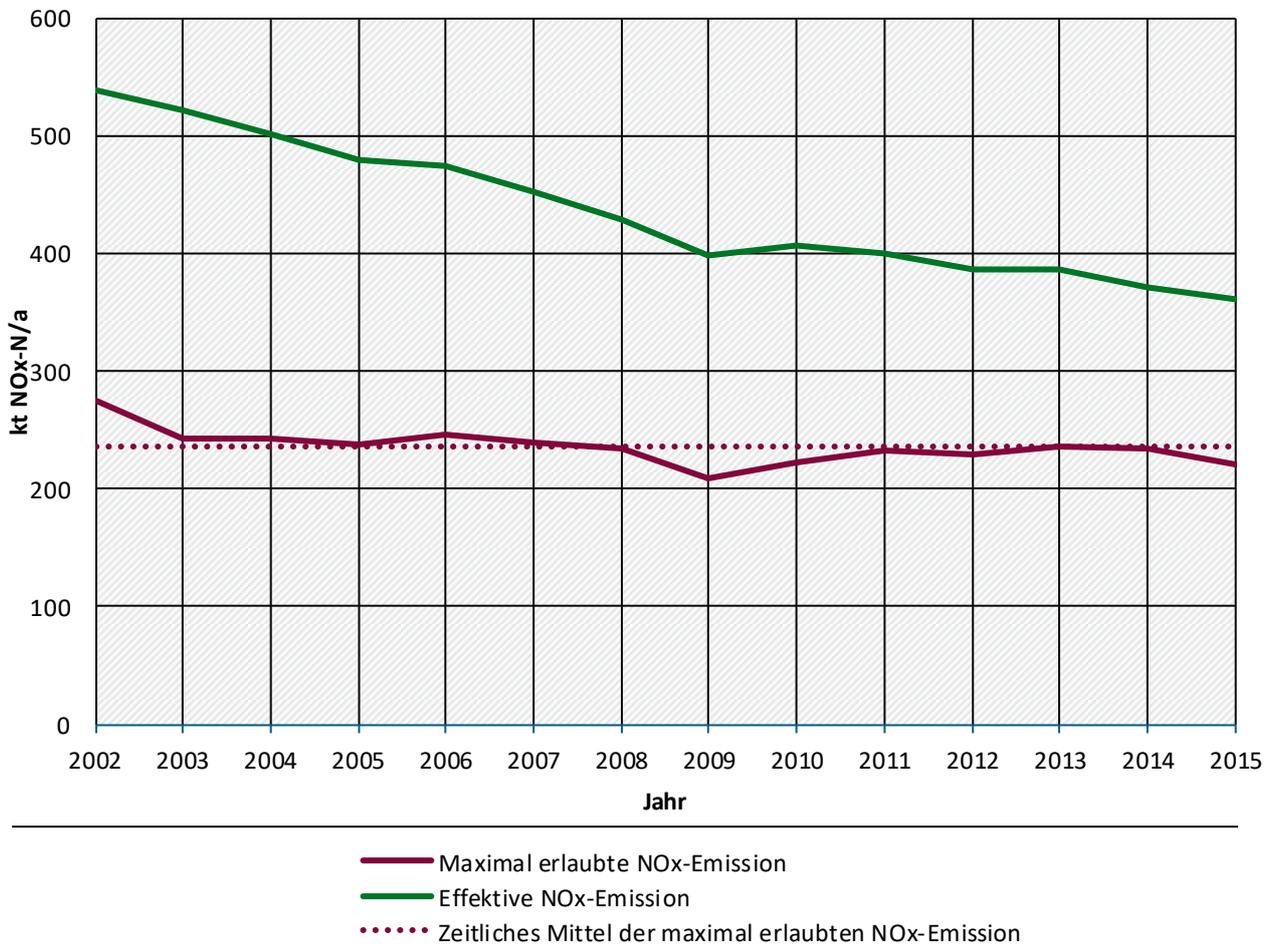
Abbildung 18: Karten der modellierten flächenhaften NO₂-Immissionen 2015 (Kombination aus Messung und Ausbreitungsmodell). Die Kreise markieren Messwerte von Stationen, die nur lokal repräsentativ sind (Jahresmittelwerte). Der Jahresgrenzwert liegt bei 40 µg NO₂ m⁻³. Die von der Weltgesundheitsorganisation ermittelte Wirkungsschwelle für die Hintergrundbelastung beträgt 20 µg NO₂ m⁻³. Datenquelle: UBA¹⁹



19 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide> [31.08.2018]

Die folgende Abbildung 19 zeigt den Zeitverlauf der NO_x-Emissionen und die maximal erlaubte NO_x-Emission E_{max} gemäß (Gl. 16) pro Jahr, welche sich aus der oben beschriebenen Methode ergibt.

Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf der NO_x-Emissionen (grüne Linie) und der maximal erlaubten NO_x-Emission (rote Linie) zur Einhaltung der von der WHO ermittelten Wirkungsschwelle für die NO₂-Hintergrundbelastung. Im zeitlichen Mittel beträgt die maximal erlaubte Emission 236 kt NO_x-N a⁻¹ (punktierete Linie).

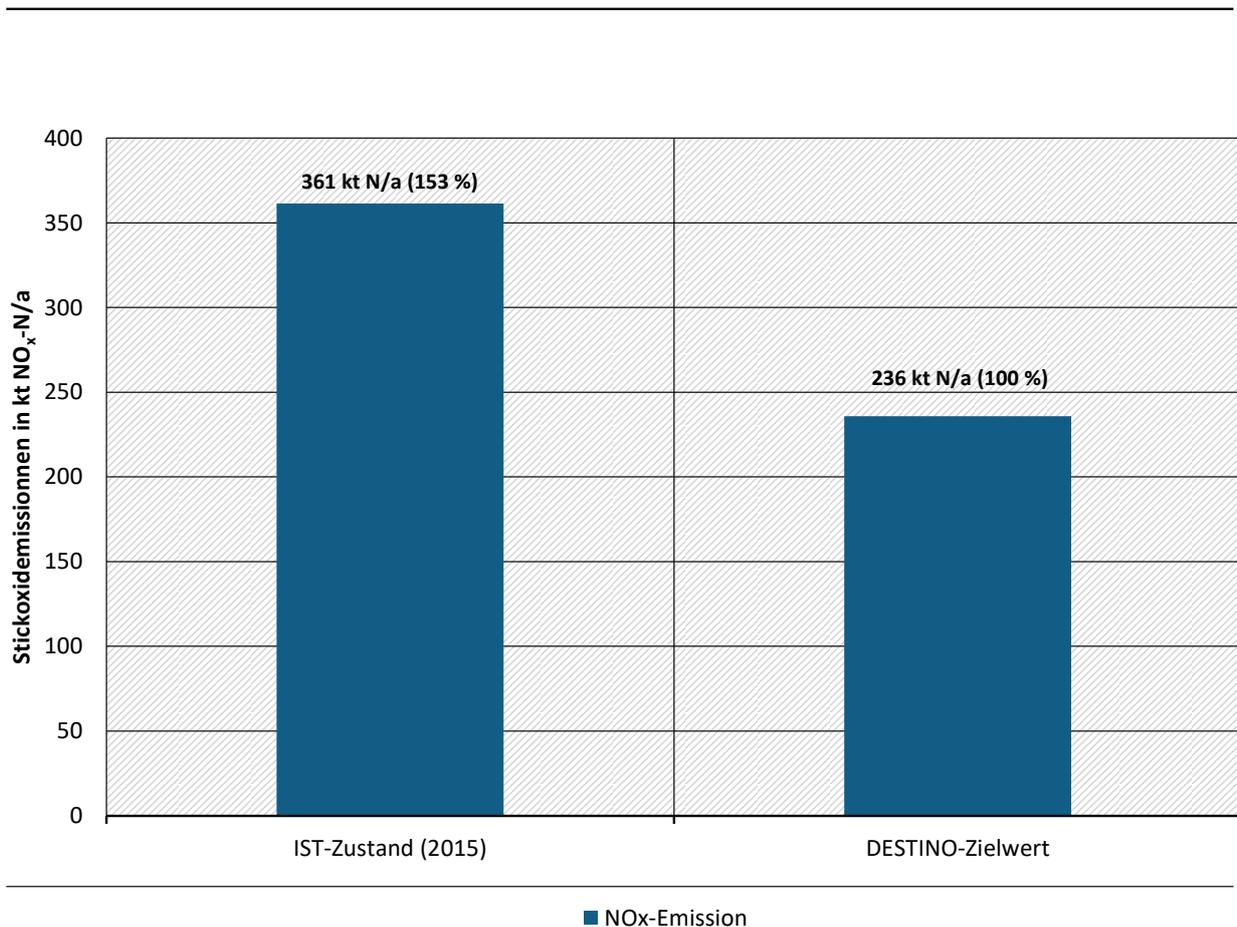


Quelle: UBA 2017b, Eigene Berechnung

3.6.4 Ergebnis für DESTINO-Teilindikator und -Zielwert menschliche Gesundheit

Der DESTINO-Zielwert für die NO_x-Emissionen beträgt 235,8 kt NO_x-N a⁻¹. Im Jahr 2015 lagen die NO_x-Emissionen mit 361,4 kt NO_x-N a⁻¹ um 125,6 kt N a⁻¹ über dem DESTINO-Zielwert, eine entsprechende Reduktion ist notwendig, um das Schutzziel menschliche Gesundheit bezüglich NO_x-Emissionen zu erreichen. Als Wert des DESTINO-Teilindikators für Gesundheit ergibt sich 153 % (361,4/235,8 x 100 %, siehe Abbildung 20).

Abbildung 20: DESTINO-Teilindikator menschliche Gesundheit, Stickstoffoxid-Emissionen (NO_x). IST-Zustand (2015) und DESTINO-Zielwert.



Quelle: eigene Berechnungen

DESTINO-Zielwert für Stickstoffoxid-Emissionen im Vergleich zu den Emissionen im Jahr 2015.

3.6.5 Interpretation und Beurteilung

- 1) Die vorgestellte Methode beschränkt sich auf die direkten Schadenswirkungen der NO₂-Immissionen auf die menschliche Gesundheit. Wie im Kap. 3.6.1 erwähnt, gibt es aber eine zusätzliche, indirekte Wirkung, weil Stickstoffoxide wichtige Vorläufersubstanzen von **Ozon** sind, welches seinerseits die menschliche Gesundheit beeinträchtigt. Aufgrund einer Simulation der Ozon-Immissionen für mehrere Emissionsszenarien durch Aksoyoglu et al. (2008) lässt sich eine Abschätzung der Wirkungen durchführen. Für DESTINO ist insbesondere das Szenario 6 (Table 1 in der Publikation von Aksoyoglu et al. 2008) bedeutsam, das davon ausgeht, dass im Jahr 2010 alle Mitgliedstaaten des Göteborg Protokolls ihre NO_x-, NMVOC-, NH₃- SO₂-Emissionen auf 50 % der Zielwerte reduziert gehabt hätten. Unter dieser Annahme wären in der Schweiz die Ozon-Peaks um 10 % bis 20 % reduziert worden (in der Publikation im Kap. 3.4.3), und die Anzahl der Stunden mit Mittelwerten von mehr als 120 µg m⁻³ wäre auf 0 bis 6 reduziert worden. In Süddeutschland hingegen, wo die maximalen 8-Stunden-Mittelwerte am häufigsten überschritten werden (siehe UBA 2017a), wären noch bis 18 solcher Spitzenstunden vorgekommen. Gemäß Luftqualitätsrichtlinie wäre damit das

Langfristziel allerdings noch nicht erreicht²⁰. Der Göteborg-Zielwert für die NO_x-Emissionen Deutschlands 2010 war 1.051 kt NO_x a⁻¹²¹, 50 % davon wären 525 kt NO_x a⁻¹ (d.h. 160 kt NO_x-N a⁻¹). Als maximale Emissionen interpretiert, liegt dieser Wert aber deutlich tiefer als die oben angegebenen 361 kt NO_x-N a⁻¹, und er liegt sogar noch tiefer als das NEC-RL Ziel von 550 kt NO_x a⁻¹ (d.h. 167 kt NO_x-N a⁻¹). Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse nicht nur von den NO_x-, sondern auch von den übrigen Emissionen mit Göteborg-Zielen abhängig sind. Die maximalen NO_x-Emissionen wären noch in Funktion zumindest der NMVOC-Emissionen zu analysieren. Für Deutschland liegen momentan keine spezifischen und aktuellen Ozon-Simulationen vor, welche quantitative Rückschlüsse auf maximale NO_x-Emissionen ermöglichen würden.

- 2) Im Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt 2017 des UBA (UBA 2017) wird der Indikator Luftqualität in Ballungsräumen ausgewiesen. Der Indikator basiert auf Immissionsmessdaten aller Messstellen in Ballungsräumen, welche die Belastung im städtischen oder vorstädtischen Hintergrund messen. Für diese Messstellen wird unter anderem die Über- oder Unterschreitung der WHO-Wirkungsschwelle in Höhe von 20 µg NO₂ m⁻³ für NO₂ berechnet. Für jeden Ballungsraum wird der mittlere Abstand der Werte aller Hintergrund-Messstationen zur WHO-Wirkungsschwelle errechnet. Die mittleren Abstände werden dann über alle Ballungsräume gemittelt und mit dem Wert der WHO-Empfehlung normiert. Für NO₂ zeigt der Indikator für das Jahr 2015 eine Überschreitung von 9,2 %. Die Herleitung des DESTINO-Zielwerts für das Schutzgut menschliche Gesundheit basiert hingegen auf dem 98. Perzentil der Immissionsmessdaten und setzt somit ein deutlich schärferes Reduktionsziel, welches im Jahr 2015 eine Überschreitung von 63 % aufweist.
- 3) Als Alternative zum vorliegenden methodischen Ansatz wurde eine weitere Methode zur Herleitung des Zielwerts geprüft (Kap. 5.3). Sie basiert auf einer linearen Regression zwischen dem 98. Perzentil der NO₂-Immissionen und der nationalen NO_x-Emissionen. Die Ergebnisse zeigen, dass für die Herleitung eines Zielwerts anhand einer linearen Regression eine sehr starke Extrapolation notwendig wäre und der resultierende Zielwert entsprechend mit hohen Unsicherheiten behaftet wäre. Dieser methodische Ansatz ist daher nicht genügend robust und eignet sich somit nicht für die Herleitung eines Zielwerts für das Schutzgut der menschlichen Gesundheit.
- 4) Die Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit durch NO₂-Immissionen hängt stark ab von der räumlichen Verteilung der Immissionen und der Bevölkerungsdichte. Um die tatsächliche Belastungssituation abbilden zu können, ist somit die Quantifizierung der Exposition der Bevölkerung gegenüber erhöhten Stickstoffdioxidkonzentrationen notwendig. Im Rahmen des DESTINO-Projekts erfolgte keine räumlich differenzierte Betrachtung der Indikatoren. Ein möglicher Ansatz zur Berücksichtigung der Exposition der Bevölkerung gegenüber erhöhten Stickstoffdioxid-Immissionen ist in Kapitel 4.3.5 skizziert.
- 5) Für die Überprüfung des Emissionsziels empfehlen wir, die Immissionsmodellierungen gelegentlich zu aktualisieren. Die jüngste Submission vom Februar 2018 des deutschen Luftschadstoffinventars zuhanden der CLRTAP hat aufgrund methodischer Aktualisierungen auch die Zeitreihen der NO_x-Emissionen aktualisiert (UBA 2018). Für das Jahr 2015 sind die NO_x-Emissionen um 4.5 % höher als in der Berichterstattung Februar 2017 (UBA 2017b). Das sind beachtliche Unterschiede, die auf die Immissionsmodellierung und damit auch auf die Berechnung des Emissionsziels einen nicht unbedeutenden Einfluss haben können (wir haben es demnach mit einem „Moving Target“ zu tun). Dabei wäre auch zu testen, wie sich mit fortschreitender Reduktion der Emissionen der statistische Zusammenhang zwischen NO_x-Emission und NO₂-Immissionen entwickelt.

²⁰ Richtlinie 2008/50/EG. Anhang VII/B: 120 µg m⁻³ dürfen an höchstens 25 Tagen im Kalenderjahr überschritten werden, gemittelt über drei Jahre. Anhang VII/C Langfristziel: 120 µg m⁻³ als höchster 8-Stunden-Mittelwert pro Tag innerhalb eines Kalenderjahres.

²¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Luftreinhaltung>

- 6) Um die Robustheit des Emissionsziels zu erhöhen, bietet sich in etwaigen künftigen Entwicklungsschritten eine Monte Carlo Simulation an. Es gibt in der Auswahl der Stationen, im Zeitfenster und bei der Wahl des Perzentilwerts gewisse Spielräume. Diese können benutzt werden, um aus der Gesamtheit von verfügbaren Messwerten zufällige Stichproben zu ziehen, wobei auch unterschiedliche Perzentilwerte zwischen 95 % und 100 % gewählt werden können. Es soll eine große Zahl von Stichproben gezogen werden, Für jede Stichprobe wird das Emissionsziel berechnet, sodass ein entsprechend großes Sample von Emissionszielen entsteht. Aus diesem Sample wird der wahrscheinlichste Wert ausgewählt, der dann statistisch robust ist und nicht mehr von einer bestimmten Auswahl der Parameter (Stationen, Zeitfenster, Perzentilwert) abhängig ist.

4 Integrierter Stickstoffindikator und nationales Stickstoffziel

4.1 Konstruktion eines integrierten Stickstoffindikators und dessen Zielwert

4.1.1 Anforderungen an den integrierten Stickstoffindikator

Der integrierte Stickstoffindikator soll folgende Anforderungen erfüllen:

- ▶ Er soll wirkungsbasiert abgeleitet werden, soll sich also auf die Schutzziele beziehen.
- ▶ Erreicht er seinen Zielwert, sollen im räumlichen Mittel in Deutschland die Schutzziele eingehalten werden.
- ▶ Er soll die betrachteten Schutzgüter gleichwertig berücksichtigen.
- ▶ Er soll möglichst keine Überlagerungen (Doppelzählungen) enthalten.
- ▶ Er soll periodisch für den aktuellen Zustand erhoben werden können, sodass seine zeitliche Entwicklung sichtbar wird.
- ▶ Er soll seinen Zielwert nur erreichen können, wenn alle Teilindikatoren ihre Ziele einzeln erreicht haben.

4.1.2 Konstruktion des integrierten Stickstoffindikators

In den Kap. 3.1 bis 3.6 wurde aufgezeigt, wie durch Rückwärtsrechnungen von den Schutzzielen auf die Belastungsgrenzen in Form von Verlusten reaktiver Stickstoffverbindungen in verschiedene Umweltmedien geschlossen werden kann. Der integrierte Stickstoffindikator und sein Zielwert sollen unter Verwendung dieser Verluste bzw. deren Belastungsgrenzen konstruiert werden. Die oben genannten Anforderungen können mit der folgenden Konstruktion berücksichtigt werden:

1. Für alle Schutzgüter wurden im Kap. 2.1 die relevanten Belastungsgrößen – DESTINO-Teilindikatoren – identifiziert und deren aktuellen Werte und Zielwerte beziffert (Kapitel 3). Dazu gehören die Luftschadstoff- und Klimagasemissionen (NH_3 , NO_x , N_2O), die Gesamtstickstoff-Fracht im Gewässerabfluss aus Deutschland sowie die Stickstoffmenge, die als Nitrat mit dem Sickerwasser ausgewaschen wird und die ins Grundwasser gelangen kann, kurz als Nitrat-Eintrag bezeichnet (im Wesentlichen generiert durch N-Überschüsse aus der Landwirtschaft).
2. Die abgeleiteten Zielwerte gewährleisten für jeden Teilindikator mit räumlicher Komponente (nur die Zielstellung zu den klimawirksamen N_2O -Emissionen ist unabhängig vom Ort ihres Entstehens und Wirkens) die Erreichung des Schutzzieles (Grenzwerte) im räumlichen Mittel. Die abgeleiteten Zielwerte sind nicht hinreichend dafür, dass die jeweiligen zugrunde liegenden Grenzwerte auch regional aufgelöst überall eingehalten werden können.

3. Die NH_3 - und NO_x -Emissionen kommen unter den betrachteten Schutzgütern je zweimal vor²² und damit resultieren auch je zwei abgeleitete Zielwerte für die gleiche Stickstoff-Spezies. Im integrierten Stickstoffindikator wird jede Stickstoff-Spezies aber nur einmal berücksichtigt. Liegen für eine Spezies aus der Schutzgutbetrachtung mehrere Zielwerte vor, wird für den integrierten Stickstoffindikator der **niedrigste Zielwert** ausgewählt.
4. Der Zielwert des integrierten Stickstoffindikators ergibt sich aus der Summe der strengsten Zielwerte pro Spezies (summiert wird über die Spezies, nicht über die Schutzgüter²³). Er wird in der Einheit kt N a^{-1} ausgedrückt.
5. In gleicher Weise werden die einzelnen DESTINO-Teilindikatoren bzw. Schutzgüter zum IST-Zustand des integrierten Stickstoffindikators addiert (Einheit kt N a^{-1}), sodass jede Spezies nur einmal vorkommt. Die Summe repräsentiert den Wert des integrierten Stickstoffindikators im IST-Zustand. Die übrigen DESTINO-Teilindikatoren, die zu doppelt vorkommenden Spezies mit höheren Zielwerten vorhanden sind, bleiben unberücksichtigt.
6. Für die Schutzziele Grundwasser und Oberflächengewässer sind die Teilindikatoren zwar begrifflich unterschieden (N-Überschuss und N-Fracht), tatsächlich ist aber die N-Fracht teilweise eine Folge des N-Überschusses. Die Gesamtstickstoff-Fracht im Gewässerabfluss und die N-Überschüsse (Nitrat-Einträge) werden zwar zu einem überwiegenden Teil durch Ausbringung von Düngern verursacht, aber sie enthalten zum Beispiel auch noch Anteile aus der Deposition von N-haltigen Luftschadstoffen (die bei den Schutzziele Biodiversität und Eutrophierung vorkommen), die ihrerseits durch N-haltige Emissionen verursacht werden. Diese quantitativen geringen Überlagerungen stören aber die Dynamik des integrierten Stickstoffindikators nicht. Eine Reduktion, zum Beispiel bei den NH_3 -Emissionen, wird sich im Wert des integrierten Stickstoffindikators nicht nur beim Beitrag aus der Deposition, sondern auch zu einem, wenn auch wesentlich kleineren Beitrag bei der N-Fracht in den Oberflächengewässern äußern, und zeitlich stark verzögert auch beim Nitrat im Grundwasser. Die entsprechenden Reduktionen werden in den einzelnen DESTINO-Teilindikatoren zum Ausdruck kommen und zur Reduktion im integrierten Stickstoffindikator beitragen (siehe Ausführungen im Kap. 3.4.3.).

Während der Umsetzung der Stickstoffminderungsstrategie kann von einer Verringerung der N-Verluste ausgegangen werden. Es kann dann vorkommen, dass ein DESTINO-Teilindikator unter seinen Zielwert sinkt. In diesem Fall kommt noch eine zusätzliche Regel zur Anwendung:

7. Unterschreitet ein Teilindikator seinen Zielwert, fließt nicht sein IST-Wert, sondern der Zielwert in die Berechnung des integrierten Stickstoffindikators ein. Mit dieser Vorschrift wird vermieden, dass mit Maßnahmen, die sich lediglich auf ein Schutzziel beziehen, Kompensationswirkungen auf die übrigen Schutzziele ausgeübt werden können. (Das würde dem Sinn des integrierten Stickstoffindikators widersprechen, die Schutzziele **aller** Schutzgüter zu erreichen.)

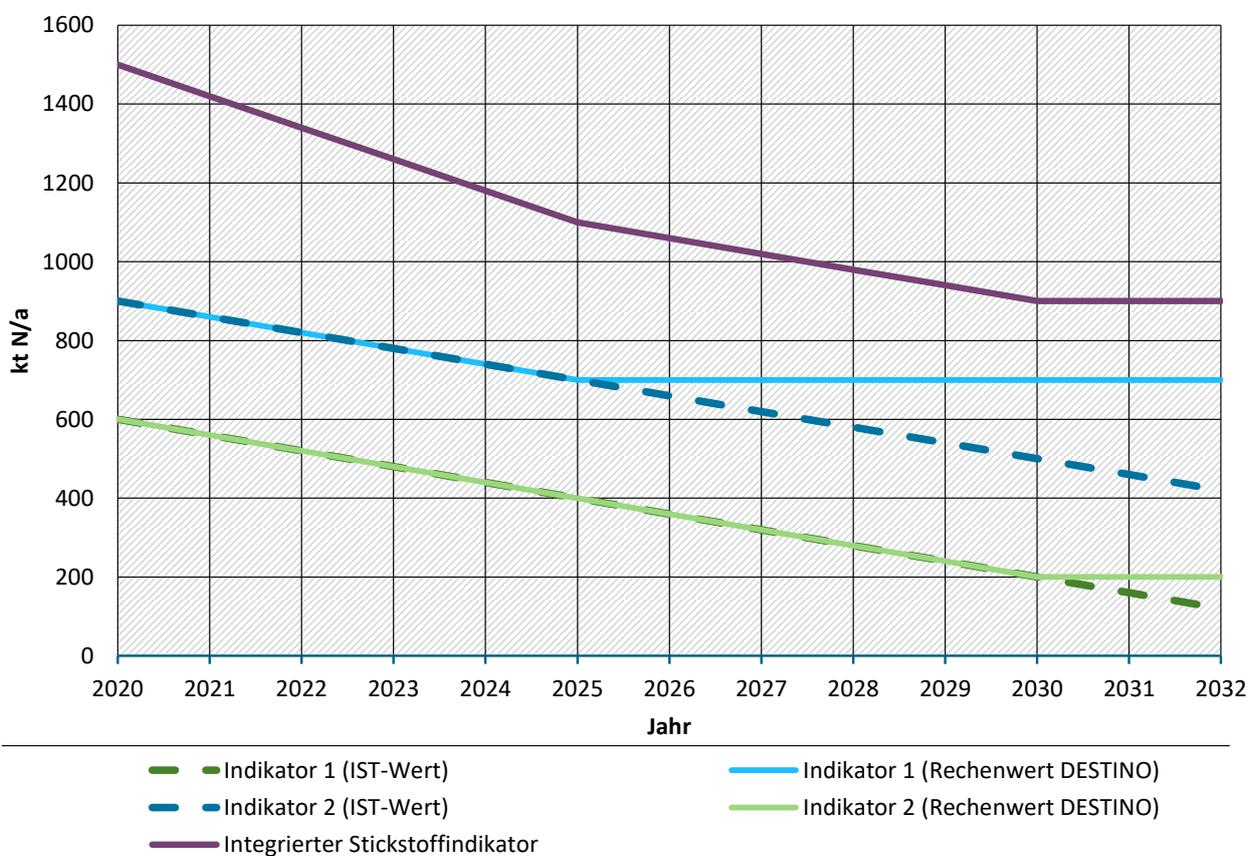
Aus dieser letztgenannten Vorschrift folgt eine spezifische Verlangsamung in der Dynamik des integrierten Stickstoffindikators, sollten alle relevanten DESTINO-Teilindikatoren in Zukunft abnehmen.

²² Beispielsweise sind die NO_x -Emissionen sowohl für das Schutzgut der menschlichen Gesundheit als auch für das Schutzgut der terrestrischen Ökosysteme maßgeblich. Die notwendige Reduktion im Mittel über Deutschland ist jedoch nicht bei beiden Schutzgütern gleich, sondern für den Schutz der Ökosysteme höher. Für den Schutz der menschlichen Gesundheit muss die Belastung hauptsächlich an Hotspots (verkehrsnahe Messstationen) reduziert werden. Daher wird für den Gesamtindikator der Zielwert für das Schutzgut gewählt, welches eine strengere Reduktion erfordert. Damit wird sichergestellt, dass der Zielwert des Gesamtindikators erst dann erreicht wird, wenn die Zielwerte aller einzelnen Schutzgüter erreicht sind.

²³ Die Zielwerte von Schutzgütern, die im Vergleich zu den anderen Schutzgütern für eine bestimmte Stickstoff-Spezies weniger strenge Zielwerte haben, fließen somit nicht in den Zielwert des Gesamtindikators ein.

Abbildung 21 illustriert den Fall lediglich zweier Teilindikatoren: Erreichen diese ihren Zielwert, verharren ihre Werte zur Berechnung des integrierten Stickstoffindikators auf ihrem Zielwert, auch wenn der IST-Wert in Zukunft weiter abnimmt. Der integrierte Stickstoffindikator verlangsamt in diesem Fall seine Abnahme und erreicht seinen Zielwert erst, wenn **sämtliche** DESTINO-Teilindikatoren ihren Zielwert erreicht haben.

Abbildung 21: Fiktives Beispiel zur Erklärung der verlangsamt dynamik des integrierten Stickstoffindikators. Die mögliche Entwicklung der IST-Werte zweier Teilindikatoren sind dargestellt (gestrichelte Linien, IST-Werte). Sobald sie ihren Zielwert erreichen (Teilindikator 1 im Jahr 2025, Teilindikator 2 2030), wird bei der Berechnung des integrierten Indikators nur noch ihr Zielwert eingesetzt (ausgezogene Linien), nicht mehr ihr (niedrigerer) IST-Wert. Dadurch hinkt der Wert des integrierten Indikators (ausgezogene violette Linie) der dann zumal realen Entwicklung nach.



4.1.3 Flächenbezogene statt frachtbezogene DESTINO-Teilindikatoren

Der Vollständigkeit halber soll erwähnt werden, dass noch weitere Möglichkeiten für die Bildung des integrierten Stickstoffindikators geprüft wurden. Zum Beispiel wurde getestet, ob sich die Teilindikatoren statt auf Frachten (Emissionen) auf Flächen beziehen könnten. Für einige Indikatoren gäbe es solche Varianten. Die Ergebnisse sind im Kap. 4.3.5 zusammenfassend dargestellt. Allerdings gibt es nicht für alle Schutzziele flächenbezogene Indikatoren. Damit ist die Konstruktion eines integrierten Stickstoffindikators aus rein flächenbezogenen Indikatoren aus technischen Gründen nicht möglich. Diese Variante hätte aber auch einen gewichtigen Nachteil: Der Bezug auf Flächen enthält keine Information zur Frage, um welche Anteile die treibenden Stickstoffflüsse (Emissionen, N-Überschüsse) reduziert werden müssen, um die Zielwerte zu erreichen. Der integrierte Stickstoffindikator respektive sein Zielwert enthielte damit keine Leitlinien für mengenmäßige Reduktionsziele von Maßnahmen.

4.2 Resultate für den integrierten Stickstoffindikator und für das nationale Stickstoffziel

4.2.1 DESTINO-Teilindikatoren IST-Zustand und Zielwerte

Die DESTINO-Teilindikatoren, wie sie in den Kap. 3.1 bis Kap. 3.6 hergeleitet wurden, sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: DESTINO-Teilindikatoren und ihre Zielwerte

| Schutzgüter | DESTINO-Teilindikatoren | | | |
|--|--|--|---------|--|
| | Stickstoffspezies | IST-Zustand absolut | relativ | Zielwerte (100 %) |
| Terr. Ökosysteme / Biolog. Vielfalt | NH ₃ -Emissionen | 625,3 kt NH ₃ -N a ⁻¹ | 142 % | 441,1 kt NH ₃ -N a ⁻¹ |
| Terr. Ökosysteme / Eutrophierung | Summe NH ₃ - und NO _x -Emissionen | 625,3 kt NH ₃ -N a ⁻¹ 361,4 kt NO _x -N a ⁻¹ | 175 % | 396,4 kt NH ₃ -N a ⁻¹ 168,0 kt NO _x -N a ⁻¹ |
| Oberflächenge- wässer | TN-Fracht | 356,2 kt TN a ⁻¹ | 113% | 314,0 kt TN a ⁻¹ |
| Grundwasser | N-Überschuss/ Nitrat | 147,6 kt NO ₃ -N a ⁻¹ | 117 % | 126,6 kt NO ₃ -N a ⁻¹ |
| Klimaschutz | N ₂ O-Emissionen | 83,4 kt N ₂ O-N a ⁻¹ | 174 % | 47,8 kt N ₂ O-N a ⁻¹ |
| menschliche Ge- sundheit | NO _x -Emissionen | 361,4 kt NO _x -N a ⁻¹ | 153 % | 235,8 kt NO _x -N a ⁻¹ |

Die Ergebnisse lassen sich in Netzdarstellungen visualisieren, siehe Abbildung 22 und Abbildung 23.

Abbildung 22: Die sechs Schutzgüter und ihre DESTINO-Teilindikatoren im IST-Zustand und ihre Zielwerte (100 %) in relativer Darstellung.

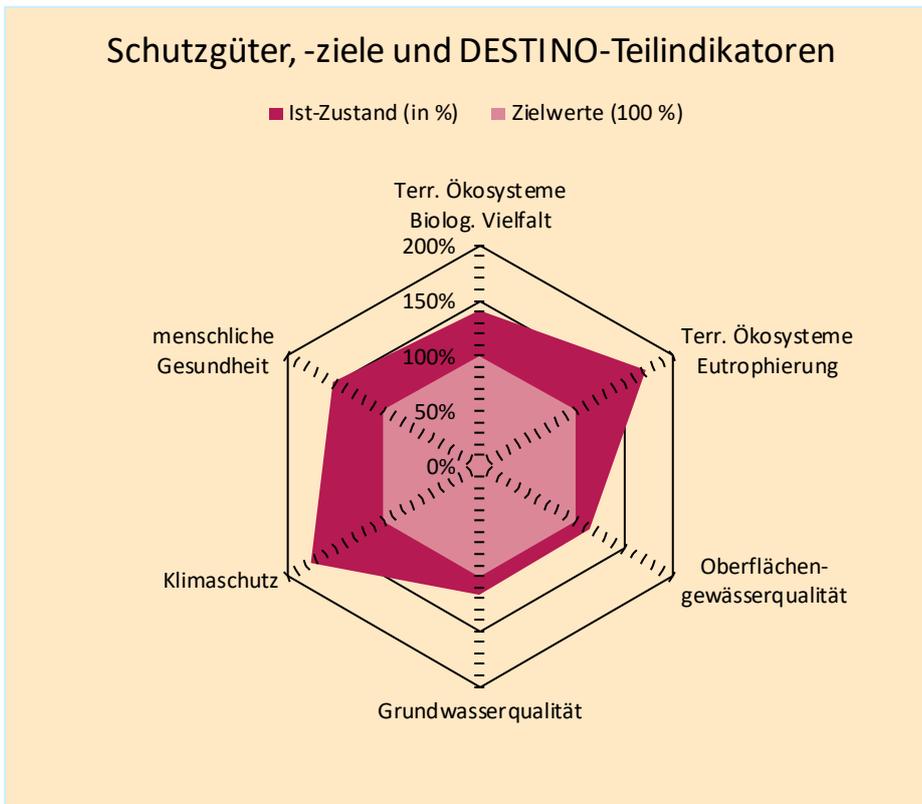


Abbildung 23: Die sechs Schutzgüter und ihre DESTINO-Teilindikatoren im IST-Zustand und ihre Zielwerte in absoluter Darstellung (Emissionen, Depositionen, Frachten in kt N a⁻¹).

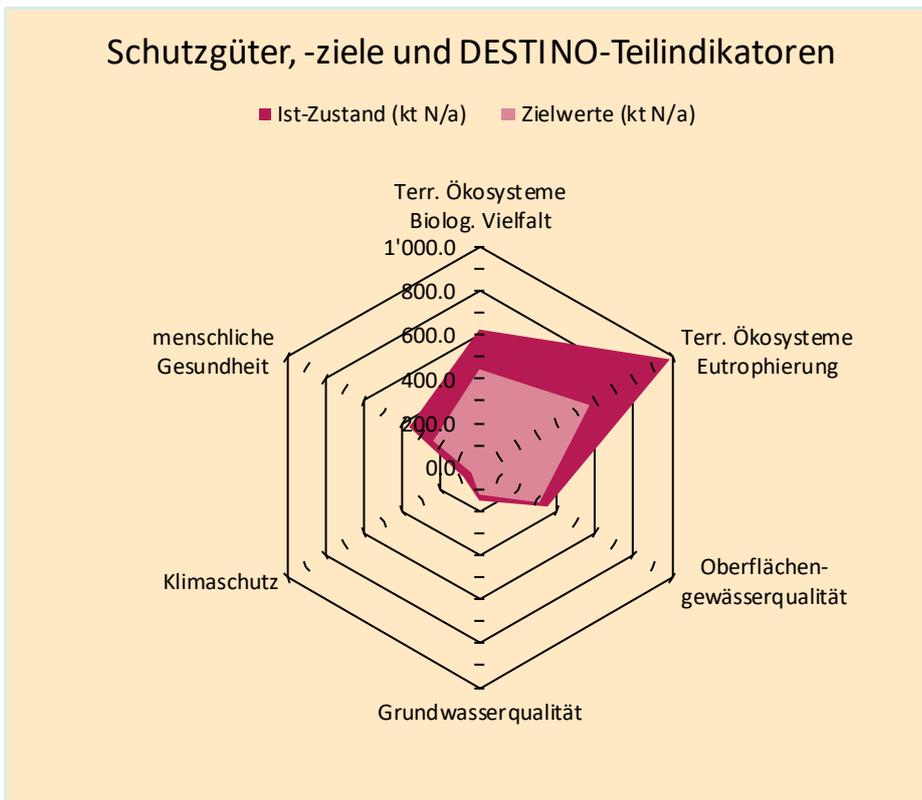


Abbildung 22 zeigt die relativen Werte der DESTINO-Teilindikatoren, die Zielwerte sind mit 100 % für alle sechs Schutzgüter dieselben. In dieser Darstellung kommt zum Ausdruck, dass die beiden größten relativen Überschreitungen aktuell bei den Schutzgütern terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung (175 %) und Klima (174 %), auftreten. Bei menschlicher Gesundheit (153 %) und terrestrischen Ökosystemen/ biologische Vielfalt (142 %) sind die Überschreitungen ebenfalls noch sehr hoch, beim Grundwasser (117 %) und den Oberflächengewässern (113 %) liegen sie tiefer.

In Abbildung 23 sind die Werte der DESTINO-Teilindikatoren absolut (in kt N a^{-1}) eingetragen. In dieser Sichtweise zeigt sich, dass die mengenmäßig mit Abstand stärkste Reduktion bei den terrestrischen Ökosystemen / Eutrophierung (422 kt N a^{-1}) nötig ist. Bei den Schutzgütern terrestrische Ökosysteme / biologische Vielfalt (184 kt N a^{-1}) und menschliche Gesundheit (125 kt N a^{-1}) sind mittlere Reduktionen nötig, bei Oberflächengewässern (42 kt N a^{-1}), beim Klimaschutz (36 kt N a^{-1}) und beim Grundwasser (21 kt N a^{-1}) die geringsten.

Zur Interpretation und Beurteilung der abgeleiteten Werte sei an dieser Stelle auf die jeweiligen Kapitel 3.1 bis 3.6 verwiesen. Dort finden sich auch Anmerkungen und Einschränkungen zur Anwendbarkeit. Hervorgehoben werden sollte auch an dieser Stelle auch noch einmal, dass mit dem **vorliegenden Instrumentarium bestehende Indikatoren ergänzt und nicht ersetzt werden** sollen (siehe Kap. 1.1 und Kap. 2.2.3).

4.2.2 Nationales Stickstoffziel

Entsprechend den im Kap. 4.1.2 formulierten Regeln zur Bildung des integrierten Stickstoffindikators werden zunächst für diejenigen Stickstoffspezies, welche die Zielerreichung von zwei Schutzgütern respektive ihrer DESTINO-Teilindikatoren beeinflussen, die empfindlicheren und damit vorsorgeorientierteren Teilindikatoren identifiziert (NH_3 - und NO_x -Emissionen). Die weniger sensitiven Teilindikatoren werden im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Dies ist der Fall bei den Schutzgütern terrestrische Ökosysteme / biologische Vielfalt und menschliche Gesundheit:

- ▶ Für die terrestrischen Ökosysteme / biologische Vielfalt ist der Zielwert $441 \text{ kt NH}_3\text{-N a}^{-1}$, er ist damit höher als beim Schutzgut terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung ($396 \text{ kt NH}_3\text{-N a}^{-1}$) und wird damit nicht weiter berücksichtigt.
- ▶ Für die menschliche Gesundheit ist der Zielwert $235,8 \text{ kt NO}_x\text{-N a}^{-1}$. Er ist höher als bei den terrestrischen Ökosystemen / Eutrophierung ($168 \text{ kt NO}_x\text{-N a}^{-1}$) und wird deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Die Teilindikatoren und Zielwerte der verbleibenden Schutzgüter werden zur Berechnung des integrierten Stickstoffindikators und dessen Zielwert benutzt (Tabelle 12).

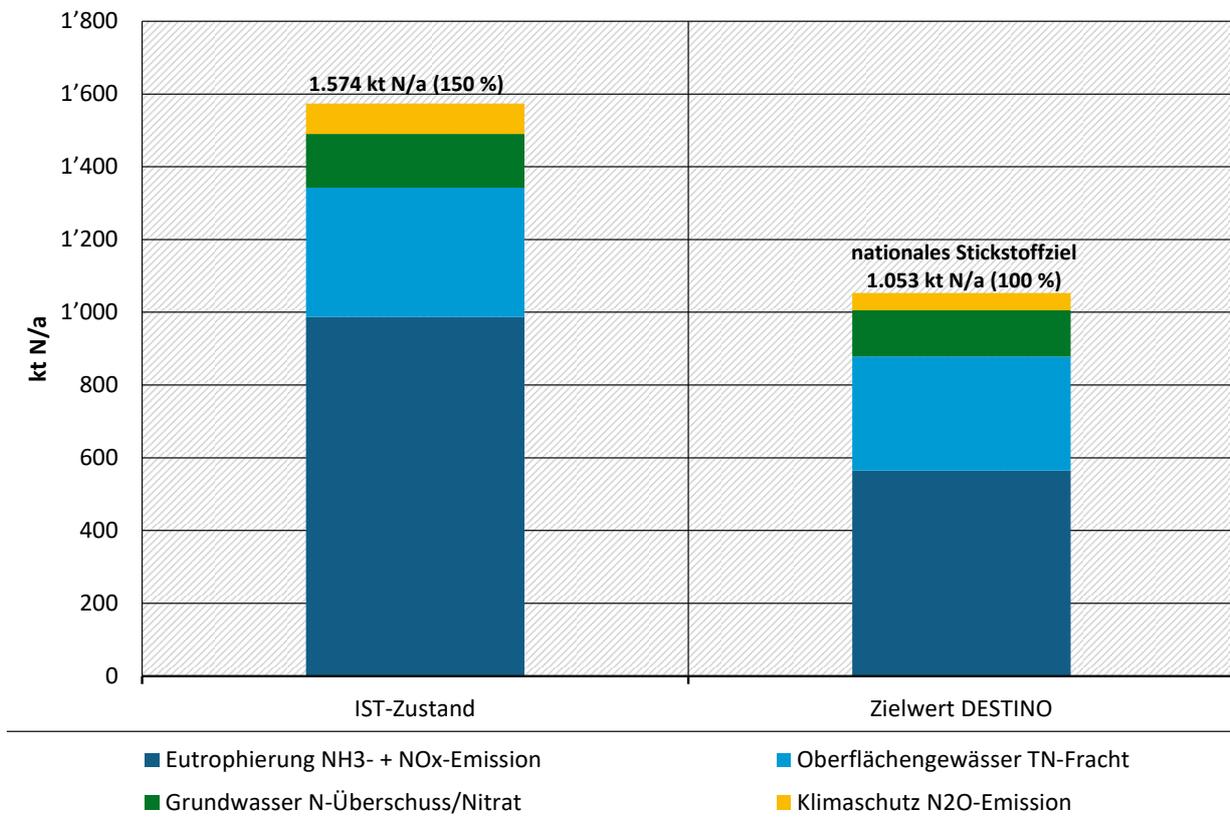
Tabelle 12: Die DESTINO-Teilindikatoren mit den schärfsten Zielwerten je Stickstoff-Spezies tragen zur Berechnung des integrierten Stickstoffindikators bei. Die beiden übrigen Teilindikatoren (unterste Zeilen) bleiben unberücksichtigt.

| Schutzgüter | Stickstoffspezies | DESTINO-Teilindikatoren | |
|---|---|--|--|
| | | IST-Zustand (in kt N) | niedrigster Zielwert (in kt N) |
| Terrestr. Ökosysteme / Eutrophierung | Summe NH ₃ - und NO _x - Emissionen | 625,3 kt NH ₃ -N a ⁻¹ 361,4 kt NO _x -N a ⁻¹ | 396,4 kt NH ₃ -N a ⁻¹ 168,0 kt NO _x -N a ⁻¹ |
| Oberflächengewässer | TN-Fracht | 356,2 kt TN a ⁻¹ | 314,0 kt TN a ⁻¹ |
| Grundwasser | N-Überschuss / Nitrat | 147,6 kt N a ⁻¹ | 126,6 kt N a ⁻¹ |
| Klimaschutz | N ₂ O-Emissionen | 83,4 kt N ₂ O-N a ⁻¹ | 47,8 kt N ₂ O-N a ⁻¹ |
| integrierter Stickstoffin- dikator | | 1.574 kt N a⁻¹ (150 %) | 1.053 kt N a⁻¹ (100 %) |
| unberücksichtigt bleiben (höhere Zielwerte!) | | | |
| Terrestr. Ökosysteme / Biologische Vielfalt | NH ₃ -Emissionen | 625,3 kt NH ₃ -N a ⁻¹ | 441,1 kt NH ₃ -N a ⁻¹ |
| menschliche Gesundheit | NO _x -Emissionen | 361,4 kt NO _x -N a ⁻¹ | 235,8 kt NO _x -N a ⁻¹ |

Integrierter Stickstoffindikator und Zielwert (nationales Stickstoffziel) sind in Abbildung 23 dargestellt. Der integrierte Stickstoffindikator hat im IST-Zustand den Wert 1.574 kt N a⁻¹. Er repräsentiert die Summe der Stickstoff-Verluste Deutschlands in die verschiedenen Umweltmedien. Bezogen auf die Zahl der Einwohner (ca. 82,18 Mio. im Jahr 2015) ergibt das 19,2 kg N pro Einwohner und Jahr. Der DESTINO-Zielwert des Gesamtstickstoffindikators beträgt lediglich 1.053 kt N a⁻¹ oder 12,8 kg N pro Einwohner für das Jahr 2015. Wird der DESTINO-Zielwert auf 100 % gesetzt, beträgt der integrierte Stickstoffindikator im IST-Zustand 150 %. Um den Zielwert zu erreichen, müssen die N-Verluste um 50 Prozentpunkte respektive um 521 kt N a⁻¹ reduziert werden. Wird vom IST-Zustand ausgegangen (1.574 kt N a⁻¹), muss der Indikator zu Zielerreichung um etwa ein Drittel gesenkt werden.

Im folgenden Kapitel 4.2.3 wird noch auf die Unsicherheitsbereiche hingewiesen. Sie zeigen, dass für die Angabe des integrierten Stickstoffindikators und für das nationale Stickstoffziel zwei signifikante Stellen ausreichen. In der Kommunikation dürfte deshalb der **IST-Wert des integrierten Stickstoffindikators mit 1.600 kt N a⁻¹ und das nationale Stickstoffziel mit 1.000 kt a⁻¹** bezeichnet werden.

Abbildung 24: Integrierter Stickstoffindikator IST-Zustand und Zielwert (nationales Stickstoffziel) absolut (in kt N a⁻¹) und relativ (in Prozent).



Unter den Schutzgütern stehen DESTINO-Teilindikatoren und Schutzziele in sehr unterschiedlichen Verhältnissen. Den überwiegenden Anteil, ungefähr zwei Drittel, am integrierten Stickstoffindikator und am DESTINO-Zielwert machen mengenmäßig die NH₃- und die NO_x-Emissionen aus. Die N-Verluste in Böden und Gewässer machen etwa einen Viertel (IST-Zustand) respektive ein Drittel (Zielwert) aus, der Anteil Lachgas-Emissionen (N₂O) ist demgegenüber mengenmäßig gering.

Werden die Verhältnisse relativ betrachtet (Tabelle 11 und Abbildung 22) so fällt auf, dass beim Lachgas die höchsten Reduktionsraten notwendig sind, gefolgt von den NH₃- und NO_x-Emissionen. Eher gering sind die erforderlichen Reduktionsraten bei den Gewässersystemen.

4.2.3 Unsicherheiten der DESTINO-Indikatoren

Eine eigene Unsicherheitsanalyse wurde im DESTINO-Projekt nicht durchgeführt. Mindestens zu den DESTINO-Teilindikatoren sind aber Unsicherheitsabschätzungen aus anderen Untersuchungen vorhanden:

- ▶ NH₃-, NO_x-Emissionen: Ihre Unsicherheiten werden im Luftschadstoff-Reporting für die CLRTAP geschätzt. Sie betragen für die nationalen Emissionstotale 15 % für NH₃ respektive 27 % für NO_x (UBA 2018)
- ▶ N₂O-Emissionen: Die Unsicherheiten in der Landwirtschaft und im Sektor Wald und Landnutzung sind sehr hoch, für das nationale Total zwar geringer, aber immer noch beträchtlich (UBA 2018a).

- ▶ N-Fracht in Zuflüssen Nord- und Ostsee, Nitrat-Eintrag ins Grundwasser: In der nationalen Stickstoffbilanz (DESTINO Teilbericht 2, UBA 2020) werden den N-Flüssen semi-quantitativen Unsicherheitsbereiche zugeordnet. Die beiden Flüsse werden dem „Bereich 3“ zugeordnet, in dem die Unsicherheiten zwischen 50 % und 200 % liegen.

Eine einfache Unsicherheitsabschätzung (Gauss'sche Fehlerfortpflanzung) ergibt für den integrierten Stickstoffindikator (Summe über die Teilindikatoren) einen Unsicherheitsbereich von $\pm 25\%$ bis $\pm 30\%$. Die Unsicherheit des Zielwerts wird noch etwas höher liegen, weil für die Bestimmung der Zielwerte zusätzlich (unsichere) Annahmen einfließen.

Sind die beiden Unsicherheiten bekannt, kann auch die Unsicherheit der Differenz zwischen IST-Wert und Zielwert abgeschätzt werden, also die Unsicherheit des Sanierungs- oder Handlungsbedarfs. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die Unsicherheiten von IST- und Zielwert stark positiv korreliert sind. Unter Berücksichtigung der Korrelation beträgt die Unsicherheit je nach Korrelationsstärke $\pm 20\%$ bis $\pm 30\%$.

Diese Angaben mögen als Hinweis auf die Größenordnungen für die Unsicherheiten gelten. Eine robuste, quantitative Abschätzung der Unsicherheiten des integrierten Stickstoffindikators (sowohl IST- als auch Zielwert) müsste mit einer Monte Carlo Simulation durchgeführt werden, denn die Voraussetzung für die einfache Fehlerfortpflanzung (Unsicherheiten sind klein im Vergleich mit den Mittelwerten) sind im vorliegenden Fall nur ungenügend erfüllt.

4.2.4 Vergleich mit den Daten in der nationalen Stickstoffbilanz (DESTINO Teilbericht 2)

Die DESTINO-Teilindikatoren zum IST-Zustand finden sich teilweise auch in der nationalen Stickstoffbilanz, wie sie im Arbeitspaket AP3 des DESTINO-Projekts erarbeitet wurden und im Teilbericht 2 dokumentiert sind (UBA 2020). Tabelle 13 zeigt, welche DESTINO-Teilindikatoren mit welchen Stickstoffflüssen verknüpft sind. Die Zahlenwerte im vorliegenden Teilbericht 1 zeigen im Vergleich zur Stickstoffbilanz allerdings gewisse Abweichungen, weil die Stickstoffbilanz die Stoffflüsse über die Periode 2010 bis 2014 mittelt, während beim integrierten Stickstoffindikator, bei dem die Dynamik interessiert, soweit möglich die Jahreswerte 2015 verwendet werden (Ausnahme: Oberflächengewässer und Grundwasser).

Tabelle 13: Vergleich der DESTINO-Teilindikatoren mit den Daten der nationalen Stickstoffbilanz.

| Schutzgüter | Stickstoffspezies | Teilbericht 1 | Teilbericht 2 | |
|--|-----------------------------|--|---|---------------------------|
| | | integrierter Stickstoffindikator | nat. Stickstoffbilanz | |
| | | IST-Zustand | IST-Zustand | Ref. UBA 2018d |
| Terr. Ökosysteme / biolog. Vielfalt ^a | NH ₃ -Emissionen | 625 kt NH ₃ -N a ⁻¹ (2015) | 589 kt NH ₃ -N a ⁻¹ (2010-2014) | Tab. 3-5 (Zeile "Summe") |
| menschliche Gesundheit ^a | NO _x -Emissionen | 361 kt NO _x -N a ⁻¹ (2015) | 380 kt NO _x -N a ⁻¹ (2010-2014) | Tab. 3-4 (Zeile "Summe") |
| Oberflächengewässer | TN-Fracht | 356 kt TN a ⁻¹ (2011-2015) | 334 ^b kt TN a ⁻¹ (2010-2014) | Tab 10-5 (Sub-Pool HY.SW) |
| Grundwasser | N-Überschuss / Nitrat | 148 kt N a ⁻¹ (2011-2014) | 1091 ^c kt N a ⁻¹ (2010-2014) | Tab. 7-5 (Sub-Pool AG.SM) |
| Klimaschutz | N ₂ O-Emissionen | 83 kt N ₂ O-N a ⁻¹ (2015) | 83 kt N ₂ O-N a ⁻¹ (2010-2014) | Tab. 3-4 (Zeile "Summe") |

Die Jahreszahlen in Klammern weisen auf den Wert im Bezugsjahr 2015 respektive auf Mittelwerte über die Jahre 2011-2015 oder 2010-2014 hin

^a) Zum Schutzgut terr. Ökosysteme / Eutrophierung (das in der Tabelle nicht explizit auftritt) gehört der DESTINO-Indikator Summe NH₃- und NO_x-Emissionen. Für die beiden Anteile gelten die in den Zeilen terr. Ökosysteme /biolog. Vielfalt und menschliche Gesundheit genannten Bezüge zur Ref. UBA (2020).

^b) Berechnung: Summen N(ges) im Abfluss minus N(ges) im Zufluss minus N(ges) im Abfluss der Donau (=334 kt Na⁻¹). Unterschiede ggü. 356 kt N a⁻¹ sind: Unterschiedliche Bezugszeiträumen, unterschiedliche Datenquellen (der DESTINO-Indikator geht auf LAWA (2018) zurück, während der Stickstoffbilanz die Frachtberechnung im MoRE-Modellansatz zugrunde liegt).

^c) Die Werte für das Schutzgut Grundwasser sind nicht vergleichbar (deshalb kursiv): Der N-Überschuss nach Stickstoffbilanz bezieht sich auf die gesamte Landwirtschaftsfläche in Deutschland, für den DESTINO-Indikator wird dagegen nur der N-Überschuss in den Rasterzellen mit Überschreitung der kritischen Nitratkonzentration im Grundwasser summiert.

4.2.5 Nachführung der DESTINO-Teilindikatoren

Die DESTINO-Teilindikatoren ändern sich von Jahr zu Jahr (Abbildung 8, Abbildung 14, Abbildung 19), und ihre Änderungen übertragen sich auf den IST-Zustand des integrierten Stickstoffindicators. Ähnlich wie bei den Treibhausgasemissionen, bei denen periodisch die Entwicklung auf die Ziele des Kyoto-Protokolls und des Pariser Abkommens beobachtet werden, kann auch die Entwicklung des integrierten Stickstoffindicators auf seinen Zielwert hin untersucht werden. Aus Sicht Umweltschutz soll das Ziel möglichst bald erreicht werden. Läuft die Entwicklung langsam oder stagnierend, sind Gesetzgeber und Behörden aufgefordert, (weitergehende) Maßnahmen zu planen und umzusetzen. Deshalb ist es wichtig, den Gesamtstickstoffindikator periodisch nachzuführen und seinen Wert zu kommunizieren.

Für die Nachführung sind diverse Umweltdaten erforderlich. **Im Anhang 5.1.1 sind alle Daten aufgelistet**, die es dazu braucht. Grundsätzlich müssen für das DESTINO-Projekt keine ad hoc Daten erhoben werden, alle benötigten Daten werden im Rahmen der laufenden Umweltbeobachtung erhoben, allerdings mit unterschiedlichen Nachführungszyklen. Grundsätzlich könnte der integrierte Stickstoffindikator jährlich nachgeführt werden, aber nicht alle Daten werden effektiv jährlich nachgeführt:

- Emissionen von NH₃, NO_x und N₂O werden jährlich aktualisiert (Verpflichtungen unter der CLRTAP und der UNFCCC).

- ▶ Gesamt-Stickstoff-Frachten in deutschen Zuflüssen zu Nord- und Ostsee werden im Turnus von 6 Jahren erhoben.
- ▶ N-Überschüsse: Die agrarstatistische Datengrundlage zur Berechnung der N-Überschüsse wird jährlich auf Basis von Stichprobenerhebungen und voraussichtlich alle fünf Jahre als Vollerhebung aktualisiert.

Größere Änderungen sind bei den NO_x-Emissionen zu erwarten. Sie tragen momentan zu 23 % des integrierten Stickstoffindikators bei. Eine Verringerung der NO_x-Emissionen um jährlich 5 %²⁴zöge eine Reduktion des integrierten Stickstoffindikators um 1 % nach sich, die übrigen Indikatoren dürften sich weniger ändern. Eine Reduktion des integrierten Stickstoffindikators in dieser Größenordnung erscheint aber gering und legt nahe, den Turnus für die Nachführung weniger häufig als jährlich vorzusehen, zum Beispiel alle fünf Jahre.

Die Inventare der Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen müssen wie oben erwähnt unter den beiden Konventionen CLRTAP und UNFCCC jährlich von allen Mitgliedstaaten bei der UNO eingereicht werden. Bei jeder Submission werden die gesamten Emissionszeitreihen ab Basisjahr (1990) bis zum aktuellen Jahr eingereicht. Dabei gilt das Prinzip, dass bei verbesserten Modellrechnungen stets auch alle vergangenen Jahre nachgerechnet werden müssen. Gerade bei den NH₃-Emissionen Deutschlands hat es in der jüngsten Vergangenheit größere Neuberechnungen gegeben, siehe Kap. 3.1.5. Solche Änderungen haben Konsequenzen für die Modellierung der Immissionen und Depositionen, die ihrerseits für die Bestimmung der DESTINO-Zielwerte bedeutsam sind (im Kap. 3.1.5 wird dieser Umstand als „Moving Target“ bezeichnet). In diesem Fall müssen nicht nur die IST-Werte der DESTINO-Teilindikatoren, sondern auch deren Zielwerte neu berechnet werden. Das wiederum erfordert zusätzliche Daten. **Im Anhang 5.1.2 werden deshalb auch jene Daten aufgeführt, die es für eine solche Neuberechnung der Zielwerte braucht.** Dazu gehören die Karten für NH₃-Emissionen und NH₃-Immissionen (regelmäßige Modellierung beim UBA), NO₂-Immissionsmessungen (permanente Nachführung beim UBA), NO_x- und NH_y-Depositionen (regelmäßige Modellierung beim UBA). Auch für diesen Nachführungsschritt scheint eine Periode angemessen, die länger dauert als bloß ein Jahr (fünf Jahre).

Sowohl für die Nachführung der DESTINO-Teilindikatoren als auch für deren Zielwerte gilt aber, dass sich neben der regelmäßigen auch eine zusätzliche Aktualisierung empfiehlt, falls sich einzelne der Indikatoren besonders stark oder sogar in ihrer Entwicklungsrichtung ändern.

4.3 Bewertung des integrierten Stickstoffindikators

4.3.1 Generelle Bewertung

Der erste Versuch eines integrierten Stickstoffindikators

Die vorliegenden Methoden und Ergebnisse stellen den ersten Versuch dar, einen integrierten Stickstoffindikator zu schaffen, mit dem ein übergeordneter Zielwert für die gesamten Stickstoff-Verluste respektive ein nationales Stickstoffziel angegeben werden kann. Das Ergebnis zeigt, dass ein solcher integrierter Stickstoffindikator möglich ist. Die vorgeschlagenen Methoden sind relativ einfach anwendbar, sie setzen aber voraus, dass eine Reihe von einzelnen Indikatoren vorhanden ist. Für die Nachführung des integrierten Stickstoffindikators sind die Datenansprüche mit Ausnahme der Gewässersysteme relativ bescheiden. Soll hingegen der Zielwert überprüft oder präzisiert werden, sind Messungen und Modellrechnungen erforderlich, die derzeit von den zuständigen Behörden durchgeführt

²⁴ Zur Einhaltung des Reduktionsziels der NEC-Richtlinie für das Bezugsjahr 2020 sollten die NO_x-Emissionen jährlich um etwa diesen Betrag reduziert werden.

oder in Auftrag gegeben werden. Sie sind teils aufwendig und finden nicht regelmäßig statt (siehe Kap. 5.1).

Ein wichtiger Vorteil der DESTINO-Teilindikatoren und des integrierten Stickstoffindikators ist, dass sich deren Werte auf die „**treibenden**“ Stickstoffflüsse beziehen, das heißt auf solche, die durch Reduktionsmaßnahmen beeinflusst werden können.²⁵ Auf diese Weise wird es möglich, für Emissionszenarien die mutmaßliche Entwicklung des integrierten Stickstoffindikators abzuschätzen.

Es ist zu erwarten, dass in der Diskussion um Herleitung und Ergebnisse die gewählten Methoden in Zukunft weiterentwickelt und damit auch die Werte des integrierten Stickstoffindikators und des Ziels verändert werden. Es wäre auch wünschenswert, dass die Idee für einen integrierten Stickstoffindikator auch von anderen Ländern aufgenommen und realisiert wird. Auf diese Weise könnten standardisierte Methoden entwickelt werden.

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die gegenwärtige Freisetzung von reaktivem Stickstoff wesentlich zu hoch ist. Gemessen an einem Zielwert von 1.053 kt N a⁻¹ (100 %) liegen die Belastungen aktuell und kumuliert bei 1.574 kt N a⁻¹ (150 %), eine generelle Reduktion um mindestens ein Drittel ist notwendig. Wie mehrfach betont (und im nachfolgenden Kapitel weiter ausgeführt) ist diese Reduktion aber nicht hinreichend dafür, dass die den Teilindikatoren zugrunde liegenden Ziel- und Grenzwerte auch regional aufgelöst überall eingehalten werden:

- ▶ Terrestrische Ökosysteme /Critical Level: Die Erreichung des Zielwerts ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung dafür, dass der Critical Level überall eingehalten wird. Für eine hinreichende Reduktion müsste der Zielwert gesenkt werden (siehe Kap. 3.1.5).
- ▶ Terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung: Im Kap. 3.2.5 wird darauf hingewiesen, dass selbst mit der Erreichung der NEC-Zielwerte die langfristigen Ziele noch nicht eingehalten sind, sondern verbessern den Zustand der Ökosysteme im Hinblick auf Eutrophierung nur um 35 % gegenüber 2005. Die NEC-Zielwerte sind daher in der NEC-Richtlinie explizit als strategische Ziele für die Zeit bis 2030 vorgegeben, „um dem langfristigen Ziel der Union zur Luftqualität näher zu rücken“ (Erwägung Nr. 3, S. RL 2016/2284, siehe EU (2016)).
- ▶ Oberflächengewässer: Bei der Festlegung der meeresökologischen Zielwerte wurde davon ausgegangen, dass die atmosphärischen Stickstoffeinträge durch die Umsetzung des Göteborg-Protokolls und der EU NEC-Richtlinie um mindestens 20 % gesenkt werden. Tritt dieser Fall nicht ein, müssten die Zielwerte gesenkt werden. Auch ist die Entwicklung der meeresökologischen Zielwerte, nicht zuletzt vor dem Hintergrund des sich ändernden Klimas noch nicht abgeschlossen. (siehe Kap. 3.3.2).
- ▶ Grundwasser: Der Indikator „Verminderung des N-Flächenbilanzüberschuss“ bewertet nicht die Zielerreichung des eigentlichen Schutzgutes (wie viele GWK bzw. welcher Flächenanteil sind im „guten Zustand“ in Bezug auf Nitrat), sondern bewertet die Verminderung der (potenziellen) Nitrat-Immission in das Grundwasser (siehe Kap. 3.4.5). Erreicht der Indikator seinen Zielwert, ist damit noch nicht garantiert, dass der Schwellenwert von 50 mg NO₃ l⁻¹ in allen Grundwasserkörpern erreicht ist.
- ▶ Menschliche Gesundheit: Für die Bestimmung des Zielwerts wurde die von der WHO (2016) empfohlene Wirkungsschwelle von 20 µg/m³ benutzt. In der Empfehlung steht: „...evidence is lacking on the possible threshold for quantification of effects for the other

²⁵ im Unterschied zu den induzierten Stickstoffflüssen, die als Folge der treibenden Stickstoffflüsse (z. B. Deposition oder Auswaschung) auftreten und nicht direkt beeinflussbar sind.

outcomes associated with NO₂“ (WHO 2016). Sollte die WHO aufgrund weiterer Studien zu einer anderen Empfehlung kommen, wäre der DESTINO-Zielwert anzupassen.

Fazit: Das nationale Stickstoffziel, wie es in der vorliegenden Untersuchung hergeleitet wird, muss als **Etappenziel** verstanden werden. Es garantiert noch nicht, dass die Schutzziele überall eingehalten werden können.

Bewertung im Hinblick auf das Sondergutachten „Stickstoff“ des Sachverständigenrats

Das Sondergutachten des Sachverständigenrats äußert sich zur notwendigen Reduktion wie folgt: „Es ist davon auszugehen, dass in Deutschland mindestens eine Halbierung der Stickstoffeinträge notwendig ist, um bestehende nationale und europäische Qualitätsziele zu erreichen.“ (SRU 2015, Kurzfassung S. 7). Ein unmittelbarer Vergleich mit den Aussagen im Sondergutachten des Sachverständigenrats ist zwar nicht möglich; werden aber Stickstoffeinträge mit Stickstoffverlusten gleichgesetzt, so sind SRU-Forderung und DESTINO-Ziel insofern kompatibel als das DESTINO-Ziel eine Etappe auf dem Weg zur Erreichung der langfristigen Ziele des SRU darstellt. Der Unterschied zwischen SRU und DESTINO ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass der SRU fordert, dass die Schutzziele überall (flächendeckend) eingehalten werden, nicht nur im räumlichen Mittel.

4.3.2 Räumliche Aspekte

Im Verlauf der Fachgespräche, die während der Entwicklung des integrierten Stickstoffindikators stattgefunden haben, wurde daraufhin gewiesen, dass er seinen Zielwert erreichen kann, bevor alle Schutzziele **überall** (in allen räumlichen Bezugseinheiten) eingehalten sind. Dieser Einwand ist richtig und hat zur Konsequenz, dass die Erreichung des Zielwerts zwar notwendig, aber nicht hinreichend ist, um alle Schutzziele überall einhalten zu können.

Wie bereits im Kap. 1.1 erwähnt, ist der integrierte Stickstoffindikator aufgrund der Anforderungen eine nicht verortete Größe (er ist eine aus mehreren Komponenten zusammengesetzte Jahresfracht reaktiven Stickstoffs gültig für Deutschland). Der Wert des Indikators wird zwar aus räumlichen Daten hergeleitet und integriert diese, enthält selber aber keinen Raumbezug mehr (extensive Größe).

- ▶ Im Fall des Schutzguts terrestrische Ökosysteme / Critical Level (NH₃) könnte dank Reduktionsmaßnahmen der Critical Level in einigen Landesteilen unterschritten werden, in anderen jedoch überschritten bleiben. Bei genügend vielen Unterschreitungen könnte der Zielwert erreicht werden, auch wenn noch einzelne Gebiete über dem Critical Level bleiben.
- ▶ Oberflächengewässer: Würde die Zielfracht für den Gesamt-Stickstoff in den Mündungsgebieten dank besonders wirksamer Reduktionsmaßnahmen erreicht, die allein das Einzugsgebiet des Rheins umfassen, wäre das Schutzziel (2,8 mg l⁻¹ TN) in der Nordsee mehr als nur eingehalten. Wenn die Reduktionsmaßnahmen aber die Ostsee-Zuflüsse Schlei/Trave und Warnow/Peene nicht erreichen, bliebe das Schutzziel in der Ostsee (2,6 mg l⁻¹ TN) jedoch weiterhin überschritten.

Diese Beispiele sollen in überspitzter Weise die Einschränkung des integrierten Stickstoffindikators verdeutlichen: **Für die flächendeckende Einhaltung der Schutzziele ist die Erreichung des Zielwerts für den integrierten Stickstoffindikator zwar notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung.** Aus dem Erreichen des Zielwerts beim integrierten Stickstoffindikator darf deshalb nicht geschlossen werden, dass das Schutzziel **überall (flächendeckend)** eingehalten wird, sondern bloß im räumlichen Mittel.

Grundsätzlich ließe sich der integrierte Stickstoffindikator auch mit aufwendigen, räumlichen Modellrechnungen so konstruieren, dass er seinen Zielwert erst dann erreicht, wenn die Schutzziele überall eingehalten werden. Das Gebiet Deutschlands wäre dafür in eine Vielzahl von Raumeinheiten (z. B. Rasterzellen) zu unterteilen und für jede Einheit wäre eine eigene Betrachtung zur Erreichung des Reduktionsziels durchzuführen. Diese Aufgabe wäre nicht allerdings mehr eindeutig lösbar. Das Ziel könnte auf unterschiedliche Arten realisiert werden. Im Fall des Schutzguts menschliche Gesundheit bspw. könnte ein Absinken der NO₂-Immissionen an ländlichen Orten unter 20 µg m⁻³ mit verschiedensten Emissionsreduktionen (Verkehr, Industrie, Gewerbe, Haushalte) erzielt werden. Für eine einzelne Zelle wäre es nicht mehr sinnvoll, die nationalen Emissionen als Verursacher der Einträge auf diese Zelle zu bezeichnen, sondern nur noch jenen Teil der Emissionen, der die Einträge in der betreffenden Zelle effektiv verursacht. Für jede mögliche Realisierung eines Zielzustands resultierte ein eigenes Emissionsszenario mit unterschiedlicher Summe für das nationale Total (Mehrdeutigkeit). Ein solches Vorgehen war im Rahmen des Auftrags des DESTINO-Projekts nicht zu leisten.

Dieser Umstand ist ein Grund dafür, weshalb der integrierte Stickstoffindikator nicht etwa die bisherigen N-Indikatoren ersetzt, sondern diese lediglich ergänzt. Das Konzept eines integrierten Stickstoffindikators dient dem Versuch, die komplexe Problematik von Stickstoff in der Umwelt in einer einzigen Zahl zu integrieren. Das soll helfen, die dringend nötige Kommunikation in dieser Sache zu erleichtern, aber die Kommunikation darf nicht beim integrierten Stickstoffindikator stehen bleiben. Daher ist das **nationale Stickstoffziel zum jetzigen Zeitpunkt der Entwicklung lediglich als Ergänzung bestehender, sektorspezifischer Indikatoren und Ziele zu sehen, welche die Richtung vorgibt, in die Deutschland sich bei der Verminderung reaktiven Stickstoffs bewegen sollte. Die parallele Weiterführung und Überprüfung bestehender Indikatoren für stickstoffbezogenen Schutzgüter, inklusive der Überwachung der räumlichen Komponente, ist dabei unerlässlich.**

4.3.3 Frachten in Küsten- und Meeresgewässer

Wie im Kap. 3.3.4 erwähnt, können die N-Frachten gemäß dem Abfluss stark schwanken. Je nachdem, welcher Zeitraum für die Berechnung des Minderungsbedarfs gewählt wird, ergeben sich damit unterschiedliche Zielwerte. Um solche Schwankungen zu minimieren, müsste sich die Berechnung des Minderungsbedarfs zukünftig auf abflussnormierte Stickstofffrachten und eine statistische Unsicherheitsbetrachtung stützen.

4.3.4 Importe und Exporte reaktiver Stickstoff-Verbindungen

Stickstoffhaltige Schadstoffe werden via Ferntransport (Atmosphäre, Flüsse, Grundwasserströme) nach Deutschland importiert und aus Deutschland exportiert. Die Importe tragen zur Erhöhung der Belastungen im Inland bei, während Exporte die Belastungen vermindern und gleichzeitig jene im Ausland erhöhen. Importierte Beiträge zur Belastung sind mit Emissionsreduktionen im Inland nicht beeinflussbar und bilden einen Sockel. Bleibt dieser Sockel unverändert, müssten die inländischen Emissionen umso stärker reduziert werden, je höher der Sockel ist. In der vorliegenden ersten Version des integrierten Stickstoffindikators sind die Methoden zur Bestimmung der Zielwerte ohne Berücksichtigung von Import / Export angesetzt. Das impliziert, dass die erforderlichen Reduktionen auch für die importierten Beiträge gelten und sich auch auf die exportierten Beiträge übertragen. Im Fall des Schutzguts terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung sind Importe und Exporte bereits berücksichtigt (IIASA 2012). Für die zwei Schutzgüter Oberflächengewässer und menschliche Gesundheit wurden einige Überlegungen durchgeführt, um die möglichen Einflüsse von Import-/Exporteinflüssen auf die DESTINO-Teilindikatoren abschätzen zu können.

Der Einfluss importierter N-Verbindungen auf das Schutzgut Oberflächengewässer

Die N-Fracht von 356,2 kt N a⁻¹ im Abfluss in Nordsee und Ostsee bzw. zu Unterliegern (s. Tabelle 8) setzt sich zu rund 84 % aus Einträgen aus inländischen Quellen und zu rund 16 % aus dem grenzüberschreitenden Zufluss von Oberliegern (vor allem mit Rhein und Elbe) zusammen (abgeleitet aus den Angaben in Tabelle 6). Wenn man diese importierte (zufließende) N-Fracht bei der Berechnung von IST- und Zielwert nicht berücksichtigt, das heißt die notwendige N-Frachtminderung von 42 kt N a⁻¹ nur auf die inländischen Einträge umlegt, dann beträgt der (inländische) Zielwert 252,7 kt N a⁻¹ und der Wert des DESTINO-Teilindicators steigt damit von 113,4 % auf 138,6 %. Wie beim Schutzgut menschliche Gesundheit müsste damit auch der DESTINO-Zielwert des integrierten Stickstoffindicators reduziert werden, sodass der integrierte Stickstoffindikator im IST-Zustand dadurch zusätzlich erhöht (verschlechtert) würde.

Der Einfluss importierter N-Verbindungen auf das Schutzgut menschliche Gesundheit

Unter der Annahme, dass die aus dem Ausland importierten NO₂-Immissionen nicht reduziert werden, müssten die inländischen Emissionen entsprechend stärker reduziert werden, um die von der WHO ermittelte Wirkungsschwelle von 20 µg NO₂ m⁻³ einhalten zu können.

Als Sensitivitätsbetrachtung wurde ein landesweit durchschnittlicher Importanteil von 1 µg NO₂ m⁻³ berücksichtigt. Rechnerisch wird der entsprechende Zielwert ermittelt, indem die maximal zulässigen NO₂-Immissionen (I_{max}) um den Importanteil (I_{imp}) reduziert werden. Der um den Importanteil korrigierte Zielwert für die NO_x-Emissionen (E_{max}) ergibt sich somit aus der folgenden Gleichung:

$$E_{max} = (I_{max} - I_{imp}) \left\langle \frac{E(t)}{I(t)} \right\rangle \text{ mit } I_{max} = 20 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3 \text{ und } I_{imp} = 1 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3 \quad [-] \quad (\text{Gl. 18})$$

Diese Sensitivitätsbetrachtung ergibt, dass bei Annahme eines durchschnittlichen Importanteils an den NO₂-Immissionen von 1 µg m⁻³ das Reduktionziel DESTINO sinken und der DESTINO-Teilindikator von 153 % auf 161 % ansteigen würde. Mit diesem Ergebnis bliebe das Emissionsziel des Schutzguts menschliche Gesundheit weniger streng als jenes des Schutzguts terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung und würde demnach für die Berechnung des nationalen Zielwerts nicht berücksichtigt.

Tabelle 14: Sensitivitätsanalyse des Zielwerts für das Schutzgut menschliche Gesundheit in Bezug auf den Anteil an importierten N-Verbindungen.

| | Annahme: Importanteil von 0 µg NO ₂ m ⁻³ | Annahme: Importanteil von 1 µg NO ₂ m ⁻³ |
|---|---|---|
| Zielwert absolut | 235,8 kt NO _x -N | 224,0 kt NO _x -N |
| Zielwert Überschreitung im IST-Zustand (DESTINO Indikator 2015) | 153 % | 161 % |

Konkrete Informationen über die Höhe des Importanteils an den NO₂-Immissionen sind derzeit nicht verfügbar. Der oben angegebene Hinweis auf sinkende NO_x-Emissionen in wichtigen Nachbarländern Deutschlands in den letzten Jahren und den damit einhergehenden Reduktionen beim Import zeigt, dass sich bei den derzeitigen Verhältnissen die Berücksichtigung des Imports nicht aufdrängt.

Fazit der Überlegungen

Wird der integrierte Stickstoffindikator zu einem späteren Zeitpunkt aktualisiert, sollte der Einfluss importierter und exportierter Schadstofffrachten mindestens im Sinne von Sensitivitätsbetrachtungen modelliert werden, um dessen Bedeutung quantitativ abschätzen zu können. Solange er gering bleibt

und solange die Entwicklung der stickstoffhaltigen Emissionen im Ausland parallel mit der Entwicklung in Deutschland verläuft, können die Methoden zur Berechnung des integrierten Stickstoffindikators und des nationalen Stickstoffziels ohne Berücksichtigung von Import und Export angewendet werden. Das bedeutet eine Vereinfachung und ist deshalb erwünscht.

4.3.5 Flächenbezogene DESTINO-Teilindikatoren

Flächenbezogene Indikatoren wurden im Rahmen dieser Studie nicht weiter vertieft, weil es nicht für alle Schutzziele flächenbezogene Indikatoren gibt und somit die Konstruktion eines integrierten Stickstoffindikators aus rein flächenbezogenen Indikatoren technisch nicht möglich ist. Zudem kann aus der flächenbezogenen Information kein mengenmäßiges Reduktionsziel auf Stufe Emissionen hergeleitet werden. Vorteil der flächenbezogenen Indikatoren wäre die Berücksichtigung der kleinräumigen Unterschiede in der Belastung der Schutzgüter. Auch bei Einhaltung der nationalen Zielwerte sind lokal Überschreitungen der zur Erreichung der Schutzziele maximal zulässigen Stickstoff-Einträge möglich. Diese Überschreitungen werden bei der Aggregation auf die nationale Ebene kompensiert durch Regionen, welche nur einer geringen Belastung ausgesetzt und somit im integrierten Stickstoffindikator nicht mehr sichtbar sind. Solche Überschreitungen können daher nur durch flächenbezogene Indikatoren abgebildet werden; deren Anwendung sind deshalb eine sinnvolle Ergänzung zum integrierten Stickstoffindikator.

Flächenbezogene Indikatoren für die sechs Schutzgüter sind:

- a) Terrestrische Ökosysteme / biologische Vielfalt: Ein flächenbezogener Indikator für die Belastung der terrestrischen Ökosysteme kann basierend auf der Anzahl Rasterzellen der NH₃-Immissionskarten hergeleitet werden. Über das Verhältnis zwischen den Gitterzellen, welche eine Überschreitung des Critical Levels vorweisen, und dem Total aller Gitterzellen, lässt sich der Flächenanteil mit einer übermäßigen NH₃-Immission berechnen. Im Jahr 2015 war der Critical Level von 3 µg NH₃ m⁻³ bei 38 % aller Gitterzellen überschritten. Der Flächenindikator-Indikator im IST-Zustand wäre damit 100% / [1 - 0,38] = 161 %, wäre also höher als der Frachtindikator (142 %).
- b) Terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung: Zur Bildung eines Indikators können die Flächen der sensitiven Ökosysteme verwendet werden, für die eine kritische Eintragungsgrenze (Critical Load) definiert ist (siehe Kap. 3.2.5). Der Indikatorwert für den IST-Zustand beträgt 100 % / [1 - 0,68] = 312 %, wobei 0,68 bedeutet, dass die N-Einträge auf derzeit 68 % der Flächen über dem Critical Load liegen. Der Flächenindikator (312 %) wäre damit wesentlich höher als der Frachtindikator (175 %).
- c) Oberflächengewässer: Kein Indikator mit Flächenbezug möglich.
- d) Grundwasser: Die Berechnung des DESTINO-Teilindikators benutzt bereits Flächendaten, der Indikator im IST-Zustand beträgt 117 %.
- e) Klima: Kein Indikator mit Flächenbezug möglich.
- f) Menschliche Gesundheit: Der prozentuale Anteil der NO₂-Immissionsmessstationen mit Überschreitung der von der WHO ermittelten Wirkungsschwelle von 20 µg NO₂ m⁻³ betrug 39 % im Jahr 2015. Berücksichtigt wurden dabei alle Stationen, welche im Zeitraum zwischen 2000 - 2015 eine durchgehende Messreihe aufweisen. Für das Schutzgut menschliche Gesundheit ist jedoch nicht nur die räumliche Verteilung der Belastung mit NO₂-Immissionen relevant, sondern auch die Zahl der Personen, die von einer übermäßigen Belastung betroffen ist. Erforderlich ist somit die Quantifizierung der Exposition der Bevölkerung gegenüber erhöhten Stickstoffdioxidkonzentrationen. Für Deutschland liegen für den Zeitraum von 2007 - 2014 Daten der Stickstoffdioxid-Exposition vor (UBA 2018e). Aus diesen Daten könnte grundsätzlich die Anzahl Einwohner in Gebieten mit einer NO₂-Hintergrundkonzentration von 20 µg NO₂ m⁻³ berechnet werden; im DESTINO-Projekt fanden solche Berechnungen aufgrund des Budgetrahmens aber nicht statt, sie müssten in einer weiterführenden Studie untersucht werden.

4.3.6 Nutzbarkeit des nationalen Stickstoffziels im Kontext aktueller politische Zwecke und für die Kommunikation mit der Öffentlichkeit

Der berechnete Wert des integrierten Stickstoffziels beträgt $1.053 \text{ kt N a}^{-1}$ (Tabelle 12). Dieser spiegelt das rechnerische Ergebnis sechs unabhängig voneinander durchgeführter Wege zur Ermittlung von sechs Teilzielen und deren Zusammenführung zum integrierten Stickstoffziel wider. Er wurde unter Einbeziehung aller Quellen von Stickstoffemissionen und mit dem Ziel, für jeden Teilindikator ein bestimmtes Schutzniveau zu erreichen, berechnet. Der Zielwert hat, wie oben dargestellt (Kap. 4.2.3), einen Unsicherheitsbereich von $\pm 30 \%$.

Für die Anwendung im politischen Kontext ist es notwendig, diesen, auf der Datenbasis aus dem Jahr 2017 berechneten Wert an die inzwischen aktualisierten Zahlen²⁶ und an die geltenden politischen Rahmenbedingungen umzurechnen. Um die Kommunikation mit der Öffentlichkeit zu vereinfachen, ist zudem eine Rundung des rechnerisch ermittelten Zielwerts sinnvoll. Im Folgenden sind die Anpassungsschritte beschrieben, welche den integrierten Stickstoffzielwert an die aktuelle Datenbasis und an die geltenden politischen Rahmenbedingungen umrechnen sowie im Ergebnis zu einem für die Kommunikation gut geeigneten Zielwert von $1.000 \text{ kt N a}^{-1}$ führen:

1. Umrechnung des integrierten Stickstoffziels an die politischen Vorgaben des Nationalen Luftreinhalteprogramms und damit auch an die aktualisierte Datenbasis,
2. Umrechnung des integrierten Stickstoffziels an zeitlichen Vorgaben des in Erarbeitung befindlichen „Aktionsprogramms Stickstoffminderung“,
3. Anpassung des integrierten Stickstoffziels an die Anforderungen für die Kommunikation.

Der resultierende Zielwert von $1.000 \text{ kt N a}^{-1}$ liegt innerhalb des Fehlerbereichs des berechneten nationalen Zielwerts. Die rechnerischen Anpassungen haben somit keine Änderung an der Grundaussage des integrierten Stickstoffziels zur Folge.

4.3.6.1 Umrechnung des integrierten Stickstoffziels an die politischen Vorgaben des Nationalen Luftreinhalteprogramms

Die verwendete Zielstellung zum Teilindikator „Terrestrische Ökosysteme: Schadenswirkungen durch Stickstoff-Einträge“ (Kapitel 3.2) basiert auf den prozentualen Reduktionsverpflichtungen der NEC-Richtlinie und des Nationalen Luftreinhalteprogramms (NLRP; BMU, 2019) für NO_x und NH_3 , welche Deutschland bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 2005 einhalten muss. Mit den NO_x -Emissionsdaten für 2005 und 2015 des Datenstandes 2017 (UBA 2017d) und der in der NEC-Richtlinie vorgegebenen Minderungsverpflichtung um 65% bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2005 wurde die absolute Zielgröße von NO_x im Jahr 2030 berechnet. (Durch Erreichen der Zielstellung ließe sich die Fläche der durch zu hohe atmosphärische Stickstoffdeposition betroffenen Gebiete in Deutschland um 35% gegenüber dem Basisjahr 2005 reduzieren.)

Im Nationalen Luftreinhalteprogramm (NLRP), werden die Vorgaben der NEC-Richtlinie in nationales Recht überführt. Als Vorgabe ist dort auch die prozentuale Reduktionsverpflichtung für NO_x um 65% bis 2030 gegenüber 2005 maßgeblich. Jedoch, weder nach NEC-Richtlinie noch nach nationalem Luftreinhalteprogramm wird der landwirtschaftliche Sektor verpflichtet, seine NO_x -Emissionen zu reduzieren. Dieser politischen Vorgabe folgend, müssen die NO_x -Emissionen aus der Landwirtschaft bei der Berechnung der Zielstellung für den Teilindikator „Terrestrische Ökosysteme: Schadenswirkungen

²⁶ Das Göteborg Protokoll verlangt, dass die Mitgliedstaaten der CLRTAP ihre nationalen Emissionsdaten jährlich fortschreiben und bei Bedarf die gesamte Zeitreihe aktualisieren. Im Zuge solcher Aktualisierungen wurden seit der Submissionen 2017 auch die NH_3 - und NO_x -Emissionen verbessert (siehe auch Kap. 4.2.5)

durch Stickstoff-Einträge“ ausgeklammert werden. Zudem basiert das Nationale Luftreinhalteprogramm auf einem neueren Datenstand (2018), der für die NO_x- und die NH₃-Emissionen in allen betrachteten Jahren geringfügige Abweichungen zum Datenstand 2017 aufweist. Eine Übersicht über die maßgeblichen Emissionsdaten und Zielwerte findet sich in Tabelle 15 (NO_x) und Tabelle 16 (NH₃). Für die Anwendung im politischen Kontext und zur Berechnung einer Differenz zwischen Ist- und Zielzustand (z. B. im geplanten BMU Aktionsprogramm für Stickstoffminderung) sind jeweils die aktuellsten Daten für das Jahr 2015 maßgeblich (jeweils unterste Zeile aus Tabelle 15 und Tabelle 16).

Tabelle 15: NO_x-Emissionen 2005, 2015 und Zielstellung 2030 mit und ohne Landwirtschaft in Abhängigkeit vom Datenstand der Emissionsberichterstattung

| | 2005 | 2015 | Ziel 2030 | Einheit |
|---|------|------|-----------|---------------------------------------|
| Minderungsverpflichtung für NO _x nach NEC-Richtlinie | 0 % | - | 65 % | Prozent |
| NO _x mit Landwirtschaft (Tabelle 12, Datenstand 2017, UBA 2017d) | 479 | 361 | 168 | kt NO _x -N a ⁻¹ |
| NO _x ohne Landwirtschaft (Datenstand 2017, UBA 2017d) | 444 | 322 | 155 | kt NO _x -N a ⁻¹ |
| NO _x ohne Landwirtschaft (Datenstand 2018, BMU, 2019) | 444 | 337 | 156 | kt NO _x -N a ⁻¹ |

Tabelle 16: NH₃-Emissionen 2005, 2015 und Zielstellung 2030 in Abhängigkeit vom Datenstand der Emissionsberichterstattung.

| | 2005 | 2015 | Ziel 2030 | Einheit |
|---|------|------|-----------|---------------------------------------|
| Minderungsverpflichtung für NH ₃ nach NEC-Richtlinie | 0 % | - | 29 % | Prozent |
| NH ₃ (DESTINO, Datenstand 2017, UBA 2017d) | 558 | 625 | 396 | kt NH ₃ -N a ⁻¹ |
| NH ₃ (Datenstand 2018, BMU, 2019) | 515 | 552 | 366 | kt NH ₃ -N a ⁻¹ |

4.3.6.2 Umrechnung des integrierten Stickstoffziels an die zeitlichen Vorgaben des geplanten „Aktionsprogramms Stickstoffminderung“

Im Rahmen der parallel zum DESTINO-Projekt bei BMU und UBA laufenden Entwicklung eines Aktionsprogramms Stickstoffminderung mit dem BMU einigte man sich auf die Festlegung eines Zeithorizonts zur Zielerreichung im Jahr 2030. Der Zielwert für den Teilindikator „Klima: Erwärmung durch Lachgas-Emissionen“ (Kapitel 3.5) orientiert sich an den Zielstellungen des Nationalen Klimaschutzplans und ist bisher auf das Zieljahr 2050 ausgerichtet. Alle anderen Teilziele orientieren sich entweder direkt am Jahr 2030 oder lassen sich problemlos für dieses Zieljahr verwenden.

Um auch das Teilziel „Lachgas-Emissionen“ für den integrierten Stickstoffindikator nutzbar zu machen, muss ein Wert für das Zieljahr 2030 hergeleitet werden. Da das nationale Klimaschutzprogramm für das Jahr 2030 kein explizites Reduktionsziel für die Lachgasemissionen definiert, wird der Wert für das Zieljahr 2030 zwischen dem Basisjahr 2015 und 2050 linear interpoliert. Eine Übersicht über Ergebnisse dieser Anpassung findet sich in Tabelle 17.

4.3.6.3 Anpassung des integrierten Stickstoffziels an die Anforderungen für die Kommunikation mit Politik und Öffentlichkeit

Für kommunikative Zwecke ist es sinnvoll, einen gerundeten, einprägsamen Wert des integrierten Stickstoffziels zu verwenden. Werden die Teilziele in einem ersten Schritt auf ganze Zahlen gerundet und anschließend summiert, ergibt sich ein integrierter Zielwert von 1.059 kt N a⁻¹. Unter Vorsorgegesichtspunkten ist zudem eine Abrundung des Wertes von 1.059 auf 1.000 kt N a⁻¹ angezeigt; der gerundete Wert ist knapp 6 % geringer als der rechnerisch ermittelte Zielwert und liegt damit im Unsicherheitsbereich von ±30 % (740 bis 1.380 kt N a⁻¹).

Um die Konsistenz zwischen dem Gesamtziel und den Teilzielen zu gewährleisten, müssen auch die Teilziele einzeln skaliert werden. Um das nach Kapitel 4.3.6.1 und Kapitel 4.3.6.2 angepasste Gesamtziel von 1.031 kt N a⁻¹ auf 1.000 kt N a⁻¹ zu skalieren, muss es mit einem Skalierungsfaktor von 0,97 multipliziert werden (siehe Tabelle 17). Dies gilt genauso auch für die Teilziele. Die resultierenden skalierten Teilziele und das Gesamtziel sind in der letzten Spalte der Tabelle 17 dargestellt. Für das geplante nationale Aktionsprogramm zur Stickstoffminderung sind die auf das Gesamtziel von 1.000 kt N a⁻¹ skalierten Teilziele maßgeblich.

Tabelle 17: Rechnerisch ermittelte Zielstellungen und Umrechnung an die Vorgaben des NLRP, an den Zielhorizont 2030 und an die Anforderungen für die Kommunikation.

| Stickstoffverbindungen | DESTINO rechnerisch (auf ganze Zahlen gerundet) | DESTINO NH ₃ und NO _x angepasst an NLRP, ohne NO _x Landwirtschaft | DESTINO N ₂ O umgerechnet auf Zielhorizont 2030 | DESTINO angepasst für Kommunikation |
|---|---|--|--|-------------------------------------|
| | kt N a ⁻¹ | kt N a ⁻¹ | kt N a ⁻¹ | kt N a ⁻¹ |
| NH ₃ | 396 | 366 | 366 | 355 |
| NO _x | 168 | 156 | 156 | 151 |
| NO ₃ (Oberflächengewässer / Meere) | 314 | 314 | 314 | 305 |
| NO ₃ (Grundwasser) | 127 | 127 | 127 | 123 |
| N ₂ O | 48 | 48 | 68 | 66 |
| N Gesamt | 1.053 | 1.011 | 1.031 | 1.000 |

4.4 Weitere Stickstoff-Gesamtindikatoren: Planetare Grenzen und Stickstoffeffizienz

Die Idee eines Gesamtindikators für Stickstoff ist nicht neu. Die Arbeiten zu den Planetary Boundaries²⁷ enthalten Stickstoff bereits im Konzept, in dem eine der neun planetaren Grenzen dem Stickstoff zukommt. Das Planetary Boundary Konzept, ist ein in der Umweltpolitik beliebte Kommunikationsele-

²⁷ Das Konzept der planetaren Grenzen geht zurück auf Johan Rockström von Stockholm Resilience Center; für eine Einführung siehe etwa Steffen (2015)

ment, um Handlungsbedarf in insgesamt neun Umweltbereichen zu visualisieren. Der Handlungsbedarf zur Erreichung des jeweils sicheren Handlungsraum für die neun Umweltbereiche wird vereinfacht für die globale Ebene aggregiert angegeben. Für Stickstoff wird auch auf der globalen Ebene der Versuch unternommen, Wirkungsindikatoren zur Ableitung der Belastbarkeitsgrenze zu Grunde zu legen (de Vries 2013). Die derzeit diskutierte Grenze („Nitrogen Boundary“) liegt bei 62 Millionen Tonnen absichtlich fixierten Stickstoffs (intentional N-fixation per year) pro Jahr. Wie die Bezeichnung planetare Grenze andeutet, gilt sie für den gesamten Planeten; das Herunterbrechen auf einen einzelnen Staat ist aber keineswegs eindeutig. Am Fachgespräch „Gesamtreduktionsziel für Stickstoff“ in Berlin am 6. Sept. 2017 hat H. Hoff vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung in einem Referat gezeigt, dass je nach Wahl der Bezugsgröße (z. B. pro Kopf, pro landwirtschaftliche Nutzfläche, pro Kopf Konsum etc.²⁸) die Grenze für Deutschland zwischen 500 kt N a⁻¹ und 2.800 kt N a⁻¹ liegen würde. Der aktuelle Wert liegt im Bereich zwischen 1.700 und 2.500 kt N a⁻¹ (Hoff 2017)²⁹. Die Diskussion um die Anwendung und Verankerung einer solchen Grenze für Deutschland ist noch nicht abgeschlossen (Hoff et al. 2017). Sicher ist, dass ein solcher Wert komplementär zum integrierten Stickstoffindikator wäre, weil die planetare Grenze auf „absichtlich fixierten“ Stickstoff eingeschränkt ist, während Schutzgüter und Schutzziele, auf die der integrierte Stickstoffindikator fokussiert, nicht berücksichtigt werden.

Eine anderer Stickstoffindikator wurde von W. de Vries am Fachgespräch „Gesamtreduktionsziel für Stickstoff“ in Berlin am 6. Sept. 2017 vorgestellt (de Vries 2017). Es handelt sich um ein Konzept des EU Nitrogen Expert Panels unter dem Titel «Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems» (EU Nitrogen Expert Panels 2015). Das Konzept befasst sich mit Stickstoff in der Landwirtschaft. Es basiert auf der Idee, den Stickstoffinput (Dünger) auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen zu optimieren, wobei die Optimierung nicht bloß auf möglichst geringe Verluste (als Emissionen in die Luft, N-Einträge in Böden und Gewässer) zielt, sondern auf die Kombination von minimalen Verlusten und maximalen Produktionsmengen. Je nach Bodentyp gibt es einen Bereich im Diagramm N Output (landwirtschaftliche Produkte) versus N Input (Dünger) mit optimaler Stickstoffeffizienz (NUE, nitrogen use efficiency).

Wie im Fall der planetaren Grenzen sind die Ergebnisse dieses Konzepts komplementär zum integrierten Stickstoffindikator, das heisst, sie ergänzen ihn, können ihn aber nicht ersetzen. Die optimale Stickstoffeffizienz in der Landwirtschaft ergänzt die Überlegungen zum integrierten Stickstoffindikator, da sie nicht nur die Stickstoffverluste in die Umwelt berücksichtigt, sondern auch die landwirtschaftliche Produktion integriert. Andererseits ist der Indikator der NUE aber mit seiner Beschränkung auf Stickstoff in der Landwirtschaft thematisch wesentlich enger als der integrierte Stickstoffindikator, der sämtliche Schutzgüter umfasst.

²⁸ In seinem Referat nennt Hoff folgende Prinzipien für das Downscaling: equity, fair shares, environmental justice, historic resource use or emissions („debt“), common but differentiated responsibility, capacity/ability, right to development, different resource endowment (Hoff 2017).

²⁹ 1.700 resp. 2.500 kt N a⁻¹ entsprechen ca. 20 resp. 30 kg N a⁻¹ pro Kopf.

5 Anhänge

5.1 Stickstoff-Indikatoren

5.1.1 DESTINO-Teilindikatoren, die zur Nachführung des integrierten Stickstoffindikators erforderlich sind

Tabelle 18: Indikator NH₃-Emissionen

| Spezifikation | Beschreibung |
|-------------------------|--|
| Name | Ammoniak-Emissionen (NH ₃ Emissionen) |
| Betroffene Schutzgüter | terrestrische Ökosysteme / biologische Vielfalt terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung Grundwasser Oberflächengewässer |
| Definition | Die nationalen, jährlichen Ammoniak-Emissionen aus allen Quellen (Energiewirtschaft, Industrie und Gewerbe, Haushalte, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft). Systemgrenze: Territorialprinzip (nicht Absatzprinzip) |
| Einheit | Angabe in 1.000 Tonnen NH ₃ -N |
| Begründung | Schadenswirkungen NH ₃ -Emissionen siehe Kap. 3.1.1, 3.2.1, 3.3.1, 3.4.1 |
| Kontextuelle Angaben | siehe z. B. Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt 2017(UBA), Kap. Emission von Luftschadstoffen Kap. Eutrophierung von Nord- und Ostsee durch Stickstoff, Kap. Nitrat im Grundwasser Website UBA Emissionen prioritärer Luftschadstoffe |
| Datenquelle | UBA https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland [31.08.2018] |
| Aufbereitungsschritte | Die Datenquelle gibt die Daten in der Einheit 1.000 Tonnen NH ₃ . Die Daten müssen auf die Einheit NH ₃ -N umgerechnet werden: $1 \text{ kt NH}_3\text{-N} = 1 \text{ kt NH}_3 * 14 / 17 = 1 \text{ kt NH}_3 * 0,8235$ |
| Dateneigner, Kontakt | Umweltbundesamt (UBA), Fachgebiet I 2.6 Hauptsitz Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau buergerservice@uba.de |
| Häufigkeit der Erhebung | NH ₃ -Emissionen werden jährlich erhoben und rapportiert |

Tabelle 19: Indikator NO_x-Emissionen

| Spezifikation | Beschreibung |
|-------------------------|--|
| Name | Stickstoffoxid-Emissionen (NO _x Emissionen) |
| Betroffene Schutzgüter | Terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung menschliche Gesundheit |
| Definition | Die nationalen, jährlichen NO _x - Emissionen aus allen Quellen (Energie- wirtschaft, Industrie und Gewerbe, Haushalte, Landwirtschaft, Abfall- wirtschaft). Systemgrenze: Territorialprinzip (nicht Absatzprinzip) |
| Einheit | Angabe in 1.000 Tonnen NO _x -N |
| Begründung | Schadenswirkungen NO _x -Emissionen siehe Kap. 3.2.1, 3.6.1 |
| Kontextuelle Angaben | siehe z. B. Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt 2017(UBA), Kap. Emission von Luftschadstoffen Luftqualität in Ballungsräumen, Website UBA <u>Emissionen prioritärer Luftschadstoffe</u> |
| Datenquelle | UBA https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland [31.08.2018] |
| Aufbereitungsschritte | Die Datenquelle gibt die Daten in der Einheit 1.000 Tonnen NH ₃ . Die Daten müssen auf die Einheit NO _x -N umgerechnet werden: $1 \text{ kt NO}_x\text{-N} = 1 \text{ kt NO}_x \cdot 14 / 46 = 1 \text{ kt NO}_x \cdot 0,3043$ |
| Dateneigner, Kontakt | Umweltbundesamt (UBA), Fachgebiet I 2.6 Hauptsitz Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau buergerservice@uba.de |
| Häufigkeit der Erhebung | NO _x -Emissionen werden jährlich erhoben und rapportiert |

Tabelle 20: Indikator Gesamt-Stickstoff-Frachten in deutschen Zuflüssen zu Nord- und Ostsee

| Spezifikation | Beschreibung |
|------------------------|--|
| Name | Gesamt-Stickstoff-Frachten in deutschen Zuflüssen zu Nord- und Ostsee |
| Betroffene Schutzgüter | Übergangs- und Küstengewässer (Nordsee und Ostsee) / N-Eutrophierung |
| Definition | Gesamt-N-Jahresfracht (TN) bzw. gelöste anorganische N-Jahresfracht (DIN), die in den Zuflüssen am Übergangspunkt limnisch/marin bzw. am Grenzübertritt unterschritten werden müssen, damit die meeres-ökologischen Zielwerte der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) eingehalten werden |
| Einheit | Tonnen N a ⁻¹ |
| Begründung | Eutrophierung der Küstengewässer durch übermäßigen N-Eintrag, s. Kap. 3.3.1 |
| Kontextuelle Angaben | siehe z. B. |

| Spezifikation | Beschreibung |
|-------------------------|--|
| | Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt 2017 (UBA), Kap. Eutrophierung von Nord- und Ostsee durch Stickstoff |
| Datenquelle | Berichterstattung zur MSRL (s. Kap. 3.3.4) |
| Aufbereitungsschritte | Auswertung der Berichterstattung zur MSRL (s. Kap. 3.3.4) |
| Dateneigner, Kontakt | LAWA, Bundesländer, UBA FG II 2.3 und II 2.4 |
| Häufigkeit der Erhebung | Im Turnus der Berichterstattung zur WRRL (alle sechs Jahre) |

Tabelle 21: Karte Nitrat-Konzentration im Grundwasser

| Spezifikation | Beschreibung |
|------------------------|---|
| Name | Nitrat-Konzentration im Grundwasser |
| Betroffene Schutzgüter | Grundwasser / Nitrat menschliche Gesundheit (Trinkwasserversorgung) |
| Definition | Karte „Nitrat-Konzentration im Grundwasser“, geschätzt mit Random-Forest-Klassifikation |
| Einheit | mg NO ₃ l ⁻¹ |
| Begründung | Gesundheitsgefährdung; Nichterreichen des „guten Zustands“ nach Wasserrahmenrichtlinie, s. Kap. 3.4.1 |
| Kontextuelle Angaben | siehe z. B. Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt 2017 (UBA), Kap. Nitrat im Grundwasser UBA (2017g): Landwirtschaftlich verursachte Kosten der Trinkwasserbereitstellung Website WasserBLick.net |
| Datenquelle | zu a) jew. zuständige Einrichtungen der Bundesländer zu b) s. Quellenangaben zu den in Kap. 6.5.1.3 aufgeführten Karten zu c) s. Tabelle 17. |
| Aufbereitungsschritte | Karte der geschätzten Verteilung der Nitrat-Konzentration im Grundwasser wird mittels Random-Forest-Klassifikation ermittelt, das folgende Daten erfordert: a) Messwerte der Nitrat-Konzentration im Grundwasser aus den Messnetzen der Bundesländer (s. Kap. 5.4.1.2) b) 10 digitale Karten zu bundesweit vorliegenden hydrogeologischen und weiteren Kenngrößen (s. Kap. 5.4.1.3) c) Karte des N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche. Random-Forest-Klassifikation; Methodenbeschreibung s. Kap. 5.4.1 |

| Spezifikation | Beschreibung |
|----------------------|--|
| Dateneigner, Kontakt | <p>a) Bundesländer</p> <p>b) Quellenangaben zu den in Kap. 5.4.1.3 aufgeführten Karten</p> <p>c) UBA (Karte N-Überschuss wurde in den vergangenen Jahren regelmäßig aktualisiert von Univ. Gießen, Inst. f. Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement, und dem UBA im Rahmen von Projekten bereitgestellt).</p> <p>Ergebniskarte (1 x 1 km²-Raster) „Nitrat-Konzentration im Grundwasser“: Univ. Gießen, Inst. f. Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement (Martin Bach); wird dem UBA im Rahmen des vorliegenden Projekts zur Verfügung gestellt.</p> |

Tabelle 22: Karte N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche

| Spezifikation | Beschreibung |
|-------------------------|---|
| Name | Überschuss der Stickstoff-Flächenbilanz der Landwirtschaft |
| Betroffene Schutzgüter | Grundwasser / Nitrat sowie Übergangs- und Küstengewässer / N-Fracht (Eutrophierung) |
| Definition | Karte „N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche (LF)“, Regionalgliederung Kreise, Mittel 2011 – 2014, Regionalgliederung Kreise und kreisfreie Städte (unveröff., Methodik s. Häußermann et al. 2019) |
| Einheit | kg N/(ha LF * a) |
| Begründung | Zentrale Größe zur Berechnung der Nitrat-Konzentration im Grundwasser und des Indikators „Grundwasserbelastung durch Nitrat“ |
| Kontextuelle Angaben | siehe z. B. UBA (2016b): Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von Nitratreinträgen |
| Datenquelle | Basisdaten: Agrarstatistische Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes und weiterer Quellen (Einzelheiten s. Methodenbeschreibung) |
| Aufbereitungsschritte | Methodenbeschreibung u.a. Häußermann et al. (2019) |
| Dateneigner, Kontakt | Univ. Gießen, Inst. f. Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement (Martin Bach); Ergebnisse (Karte) stehen jederzeit frei zur Verfügung. |
| Häufigkeit der Erhebung | Basisdaten der Agrarstatistik: jährlich; Aktualisierung der N-Flächenbilanzen (Regionalgliederung Kreise): Projektbezogen, i.d.R. zwei- bis dreijährlich (Zeitreihe umfasst derzeit Jahre 1995 – 2016) |

Tabelle 23: Indikator N₂O-Emissionen

| Spezifikation | Beschreibung |
|------------------------|---|
| Name | Lachgas-Emissionen (N ₂ O-Emissionen) |
| Betroffene Schutzgüter | Klima |
| Definition | <p>Die nationalen, jährlichen Lachgas-Emissionen aus allen Quellen (Energiewirtschaft, Industrie und Gewerbe, Haushalte, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft).</p> <p>Systemgrenze: Territorialprinzip (nicht Absatzprinzip)</p> |

| Spezifikation | Beschreibung |
|-------------------------|--|
| Einheit | Angabe in 1.000 Tonnen N ₂ O-N |
| Begründung | Schadenswirkungen N ₂ O-Emissionen siehe Kap. 3.5.1 |
| Kontextuelle Angaben | siehe z. B. Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt 2017 (UBA), Kap. Emission von Treibhausgasen Website UBA Klima |
| Datenquelle | UBA https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland [31.08.2018] |
| Aufbereitungsschritte | Die Datenquelle gibt die Daten in der Einheit 1.000 Tonnen N ₂ O. Die Daten müssen auf die Einheit N ₂ O-N umgerechnet werden: $1 \text{ kt N}_2\text{O-N} = 1 \text{ kt N}_2\text{O} * 28 / 44 \approx 1 \text{ kt N}_2\text{O} * 0,6364$ |
| Dateneigner, Kontakt | Umweltbundesamt (UBA), Fachgebiet I 2.6 Hauptsitz Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau buergerservice@uba.de |
| Häufigkeit der Erhebung | N ₂ O-Emissionen werden jährlich erhoben und rapportiert |

5.1.2 Weitere Indikatoren, die zur Nachführung des DESTINO-Zielwerts erforderlich sind

Tabelle 24: Karte der NH₃-Immissionen

| Spezifikation | Beschreibung |
|------------------------|---|
| Name | Karte der NH ₃ -Immissionen |
| Betroffene Schutzgüter | Terrestrische Ökosysteme / Biodiversität |
| Definition | Räumlich aufgelöste NH ₃ -Immissionsdaten |
| Einheit | µg NH ₃ m ⁻³ |
| Begründung | Der NH ₃ -Zielwert wird basierend auf einer Regression zwischen NH ₃ -Immissionen und -Emissionen hergeleitet. Daher ist zur Aktualisierung des DESTINO-Zielwerts eine aktualisierte Karte der NH ₃ -Immissionen erforderlich. |
| Kontextuelle Angaben | siehe z. B. UBA-Website zu Luftschadstoffemissionen: https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland [31.08.2018] |
| Datenquelle | Modellierung mit dem Immissionsmodell CTM-Modell RCG: Datengrundlage sind die Modellergebnisse des chemischen Transportmodells REM-CALGRID mit einer räumlichen Auflösung von 2 km x 2 km. |
| Aufbereitungsschritte | <ol style="list-style-type: none"> 1. Jeder Gitterzelle wird ein entsprechender Immissionswert zugeordnet. 2. Regression zwischen NH₃-Immission und NH₃-Emission pro Gitterzelle 3. Berechnung des Schnittpunkts zwischen der Regressionsgerade und dem Immissionsgrenzwert von 3 µg NH₃ a⁻¹ |

| Spezifikation | Beschreibung |
|-------------------------|--|
| Dateneigner, Kontakt | Umweltbundesamt, II 4.2 "Beurteilung der Luftqualität" Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau Kontaktperson: Stefan Feigenspan |
| Häufigkeit der Erhebung | regelmäßig |
| | |

Tabelle 25: Karte der NH₃-Emissionen

| Spezifikation | Beschreibung |
|-------------------------|--|
| Name | Karte der NH ₃ -Emissionen |
| Betroffene Schutzgüter | Terrestrische Ökosysteme / Biodiversität |
| Definition | Räumlich aufgelöste NH ₃ -Emissionsdaten |
| Einheit | kt NH ₃ a ⁻¹ |
| Begründung | Der NH ₃ -Zielwert wird basierend auf einer Regression zwischen NH ₃ -Immissionen und -Emissionen hergeleitet. Daher ist zur Aktualisierung des DESTINO-Zielwerts eine aktualisierte Karte der NH ₃ -Emissionen erforderlich. |
| Kontextuelle Angaben | siehe z. B. UBA-Website zu Luftschadstoffemissionen: https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland [31.08.2018] |
| Datenquelle | Die Emissionskarten basieren auf einer räumlichen Interpolation der nationalen Emissionen, welche jährlich an die CLRTAP berichtet werden. Für jeden Quelltyp werden die spezifischen Emissionsanteile über geeignete Verteilparameter auf einzelne Flächen-, Punkt- und Linienquellen aufgeteilt, den Gitterzellen eines Rasters zugeordnet und kartografisch dargestellt (UBA 2016). |
| Aufbereitungsschritte | <ol style="list-style-type: none"> 1. Jeder Gitterzelle wird ein entsprechender Immissionswert zugeordnet. 2. Regression zwischen Immission und Emission pro Gitterzelle 3. Berechnung des Schnittpunkts zwischen der Regressionsgerade und dem Immissionsgrenzwert von 3 µg NH₃ a⁻¹ |
| Dateneigner, Kontakt | Umweltbundesamt, II 4.2 "Beurteilung der Luftqualität" Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau Kontaktperson: Stefan Feigenspan |
| Häufigkeit der Erhebung | regelmäßig |
| | |

Tabelle 26: Indikator Messdaten NO₂-Immissionen

| Spezifikation | Beschreibung |
|-------------------------|--|
| Name | Messdaten NO ₂ -Immissionen |
| Betroffene Schutzgüter | Menschliche Gesundheit |
| Definition | Messdaten der NO ₂ -Immissionen an allen Standorten, die die NO ₂ -Hintergrundbelastung erfassen. |
| Einheit | µg NO ₂ m ⁻³ |
| Begründung | Die Herleitung des NO _x -Zielwerts basiert auf dem Verhältnis zwischen dem 98. Perzentil der NO ₂ -Immissionsmessung und dem Grenzwert für die Hintergrundbelastung. Zur Aktualisierung des Zielwerts ist daher eine erweiterte Zeitreihe der NO ₂ -Immissionsmessdaten erforderlich. |
| Kontextuelle Angaben | siehe z. B. UBA-Website zu Luftschadstoffemissionen: https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland [31.08.2018] |
| Datenquelle | Modellierung mit dem Immissionsmodell CTM-Modell RCG: Datengrundlage sind die Modellergebnisse des chemischen Transportmodells REM-CALGRID mit einer räumlichen Auflösung von 2 km x 2 km. |
| Aufbereitungsschritte | <ol style="list-style-type: none"> 1. Identifikation durchgängiger Messreihen 2. Bestimmung des 98. Perzentilwerts 3. Berechnung des Verhältnisses zwischen dem 98. Perzentilwert der gemessenen NO₂-Hintergrundkonzentrationen und der WHO-Wirkungsschwelle von 20 µg NO₂ m⁻³ |
| Dateneigner, Kontakt | Umweltbundesamt, II 4.2 "Beurteilung der Luftqualität" Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau Kontaktperson: Stefan Feigenspan |
| Häufigkeit der Erhebung | jährlich |

Tabelle 27: Indikator NO_x- und NH_y-Depositionen

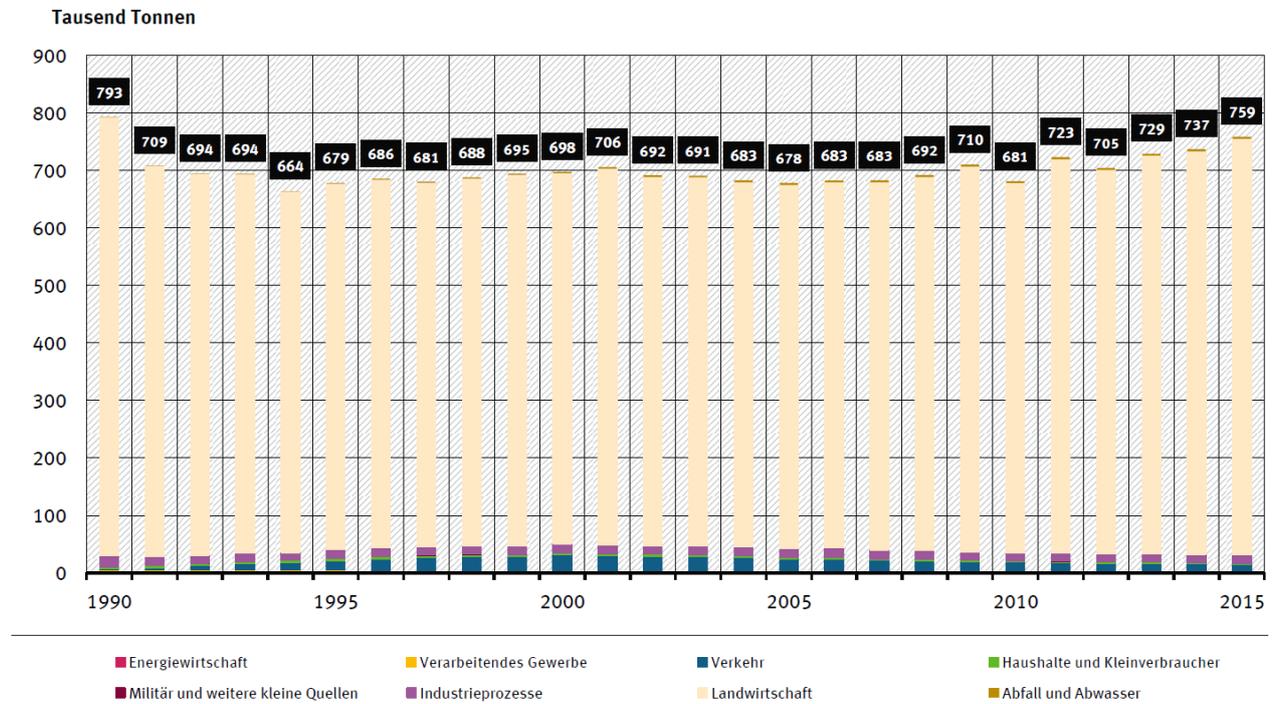
| Spezifikation | Beschreibung |
|------------------------|--|
| Name | Atmosphärische Deposition von Stickstoff |
| Betroffene Schutzgüter | Terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung |
| Definition | Die jährliche Depositionsfracht, unterteilt nach oxidierten NO _y und reduzierten NH _x Stickstoffverbindungen auf die Böden (Gesamtfläche Deutschlands) inklusive Anteile von NO _y und NH _x , die über den kritischen Eintragungsgrenzen (Critical Loads) liegen. Weitere Aufteilung der Daten erwünscht nach Herkunftsland oder mindestens Aufteilung nach inländischen und ausländischen Emissionen. |
| Einheit | kt N a ⁻¹ |
| Begründung | Die Deposition von Stickstoff ist schädigt Böden auf unterschiedliche Arten. Im Zusammenhang mit DESTINO steht die eutrophierende Wirkung im Vordergrund, die im betroffenen Ökosystem zu geringerer Toleranz gegenüber Frost, Trockenheit, Schädlinge führt. |

| Spezifikation | Beschreibung |
|-------------------------|---|
| Kontextuelle Angaben | <p>siehe z. B. UBA-Websites zu Einträgen von Schadstoffen: https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland [31.08.2018] https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-oekosysteme/kartendienst-stickstoffdeposition-in-deutschland [31.08.2018] Indikatorenbericht - Daten zur Umwelt 2017(UBA), Kap. Eutrophierung von Nord- und Ostsee durch Stickstoff.</p> |
| Datenquelle | <p>PINETI-III: Modellierung und Kartierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität in Deutschland Martijn Schaap, Carlijn Hendriks, Richard Kranenburg, Jeroen Kuenen, Arjo Segers TNO, Utrecht Angela Schlutow, Hans-Dieter Nagel, Anja Ritter ÖKO-DATA, Strausberg Sabine Banzhaf Freie Universität Berlin, Berlin Im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ 3714 64 2010. Juli, 2018.</p> |
| Aufbereitungsschritte | <p>Der Eintrag atmosphärischer Verbindungen in Ökosysteme erfolgt über trockene, nasse und feuchte Deposition. Vorgehen in 5 Schritten:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Berechnung der Depositions- und Konzentrationsfelder aus Emissions- und Meteorologiedaten mit dem Chemie-Transport-Modell LOTOS-EUROS. 2. Berechnung der nassen Depositionsfelder auf Basis von Messdaten 3. Verwendung eines heuristischen Ansatzes zur Abschätzung der Nebeldeposition 4. Verwendung eines scavenging ratio Ansatzes zur Berechnung der trockenen Deposition 5. Transformation der Ergebnisse der trockenen und feuchten Deposition auf das feiner aufgelöste 1x1 km²-Raster und Addition aller Teilflüsse zur Gesamtdeposition mit einer räumlichen Auflösung von 1x1 km² |
| Dateneigner, Kontakt | <p>Umweltbundesamt. Fachgebiet II 4.3 „Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme“, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau Kontaktperson: Markus Geupel</p> |
| Häufigkeit der Erhebung | <p>regelmäßig</p> |

5.1.3 Zeitreihen für die Emissionen von NH₃, NO_x und N₂O

Die im Text verwendeten Emissionszahlen sind auf die folgenden Daten abgestützt. Diese sind auf der Homepage des UBA publiziert.

Abbildung 25: NH₃-Emissionen nach Quellenkategorien (in 1.000 t NH₃), Datenstand 2017.

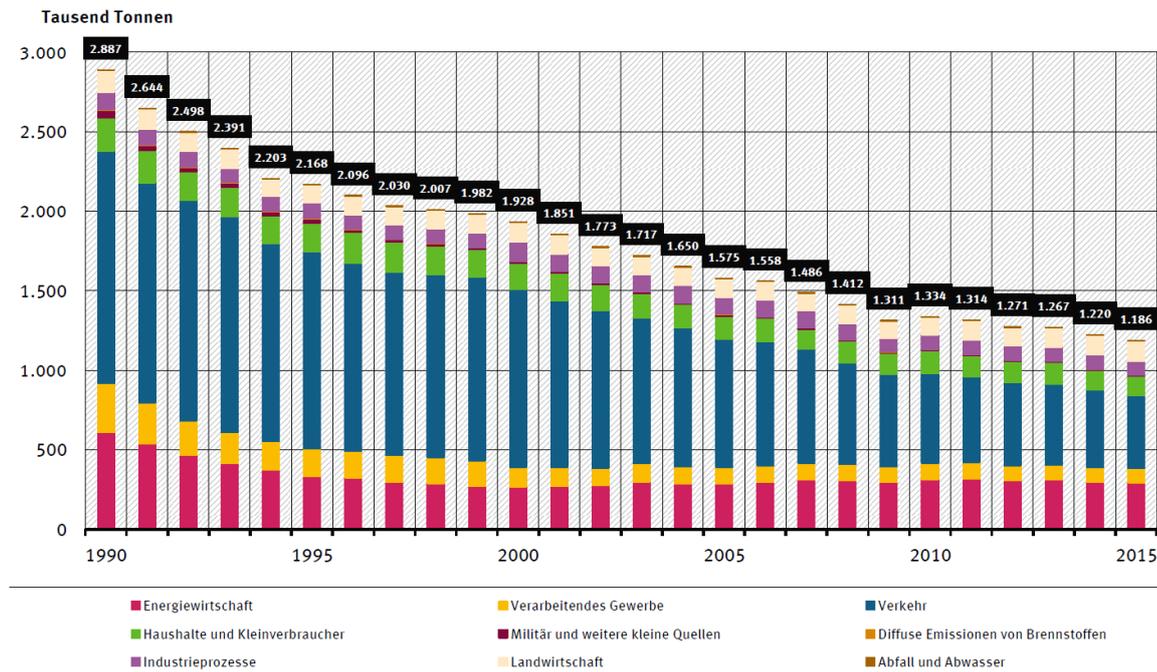


Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
 Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen
 Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer
 Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2015 (Stand 02/2017)

Quelle: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2017_02_15_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_luft_v1.0.xlsx [10.10.2018]

Abbildung 26: NO_x (gerechnet als NO₂) -Emissionen nach Quellenkategorien (in 1.000 t NO_x). Datenstand 2017.

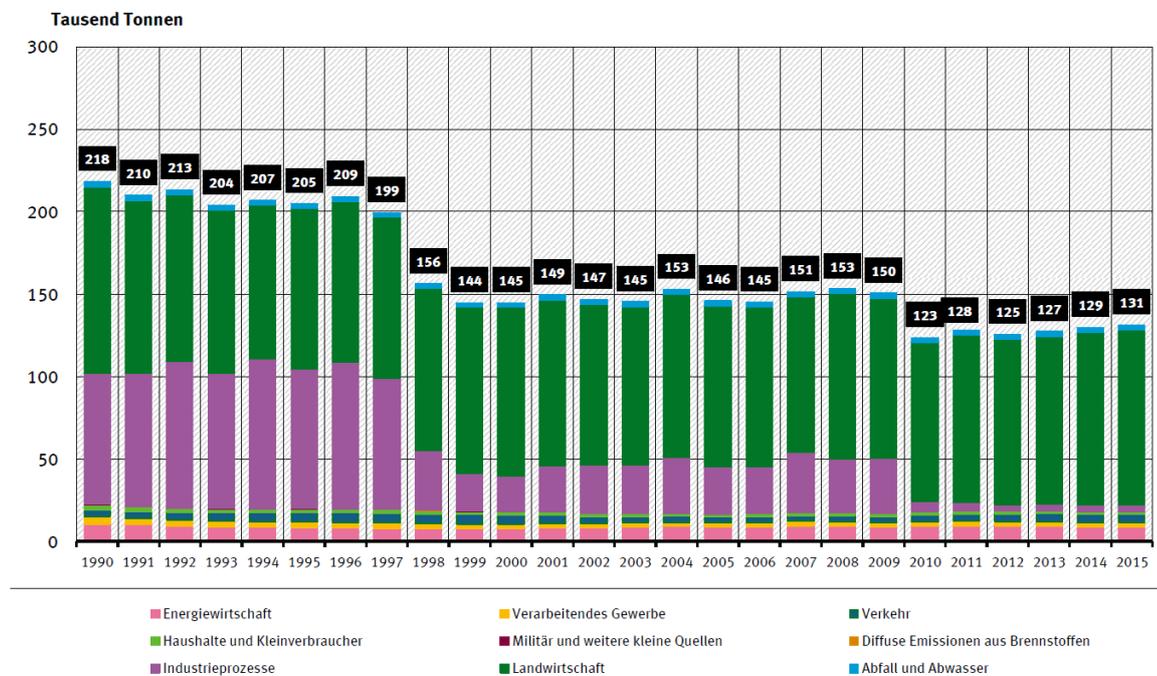


Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
 Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2015 (Stand 02/2017)

Quelle: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2017_02_15_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_luft_v1.0.xlsx [10.10.2018]

Abbildung 27: N₂O-Emissionen nach Quellenkategorien (in 1.000 t N₂O). Datenstand 2017.



Emissionen ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
 Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
 Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2015 (Stand 02/2017)

Quelle: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2017_01_23_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v1.0.xlsx [10.10.2018]

5.2 Ergänzungen zum Schutzgut terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung

Erweiterungen der Methode zur Berechnung des Emissionsziels aus Depositionsdaten (Kap. 3.2.3.2)

a) Flächen mit Überschreitungen der Critical Loads reduzieren

Das Ergebnis der im Kap. 3.2.3.2 beschriebenen Methode besagt, dass die Reduktion der NO_x - und NH_3 -Emissionen um 40 % eine notwendige Bedingung für die Erreichung des Ziels darstellt. Sie ist aber nicht hinreichend, denn die Überschreitung wird damit bloß im räumlichen Mittel auf Null gesenkt.³⁰ In (Gl. 4) könnte nun anstelle der maximal erlaubten Deposition ein tieferer Wert eingesetzt werden mit der Begründung, dass damit die Zahl der Flächen mit Überschreitungen weiter reduziert werden können. Eine Simulation mit den räumlichen Depositionsdaten (PINETI-III) wurde durchgeführt. Dazu ein Zahlenbeispiel: Würden anstelle der CL-Werte nur ihre halbierten Werte eingesetzt, wäre eine Reduktion der N-Emissionen nicht um 40 % sondern 56 % erforderlich. Der Zielwert würde sich von 598 kt N a⁻¹ auf 433 kt N a⁻¹ verringern und der DESTINO-Indikator von 165 % auf 227 % erhöhen. Mit anderen Annahmen für noch tiefere Werte anstelle der CL ergeben sich entsprechend noch niedrigere Zielwerte und die Anzahl CL-Flächen mit Überschreitungen würde weiter reduziert. Die Iteration könnte bis zur Spitze getrieben werden, bei der keine einzige Überschreitung mehr vorkäme. Die Eliminierung der Überschreitung auf dem letzten Hektar würde mit einer Reduktion auf der Basis der nationalen N-Emissionen erreicht. Eine derartige Ausreizung der Methode wäre natürlich absurd. Für eine sinnvolle Anwendung der Methode müsste aber in jedem Fall eine willkürliche Annahme getroffen werden, nämlich um wie viel die CL-Werte gesenkt werden sollen oder welcher Anteil von CL-Flächen mit Überschreitungen noch akzeptiert werden soll. Das ist ebenfalls nicht im Sinne der Anforderungen an den integrierten N-Indikator. Aus diesem Grund wird von einer solchen erweiterten Anwendung der Methode abgesehen.

b) Importe und Exporte von Luftschadstoffen

Sollen Importe und Exporte berücksichtigt werden, so ist Gleichung (Gl. 5) wie folgt zu erweitern

$$E_{\max} = \frac{D(t) - Exc(t) - Imp(t) + Exp'(t)}{D(t) - Imp(t) + Exp(t)} \cdot E(t) \quad [\text{kt N a}^{-1}] \quad (\text{Gl. 19})$$

In der Studie von Schaap et al. (2017) wurde der ausländische Anteil an den Überschreitungen der Critical Loads mit 33,7 % für das Jahr 2010 angegeben. Mit $Imp(t)$ und $Exp(t)$ sind die Importe und Exporte von NO_x - und NH_3 -Emissionen bezeichnet, wobei $Exp'(t)$ den Export unter der Bedingung $E = E_{\max}$ bezeichnet. Diese sind aus der neuen Stickstoffbilanz für 2010 bis 2014 zwar bekannt (Teilbericht 2; UBA 2020), sodass die maximalen Emissionen mit und ohne Berücksichtigung des importierten Anteils berechenbar wären. Allerdings fehlen die Daten 2015 zu Import, Export und Exceedance, sodass Gl. 18 nicht konsistent für 2015 ausgewertet werden kann.

Es sei noch bemerkt, dass die Entwicklungen der stickstoffhaltigen Emissionen in den Nachbarländern Deutschlands in den vergangenen Jahren (2010 – 2015) sich positiv verändert, sprich reduziert haben. Eine Auswertung der Emissionsinventare von Dänemark, Frankreich, Niederlande und Polen ergibt³¹, dass in der Periode 2010 – 2015 die Summe ihrer NO_x - und NH_3 -Emissionen um 10 % gesunken ist, sodass der Import im Trend absinkt. Im Fall des Schutzguts terrestrische Ökosysteme / Eutrophierung

³⁰ Es gäbe sehr wohl noch Stellen, an denen die CL überschritten wären, denn gleichzeitig gäbe es andere Stellen, an denen sie so weit unterschritten würden, dass im Mittel die CL eingehalten wären.

³¹ CLRTAP, Submissions 2018: http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/status_reporting/2018_submissions/ [31.08.2018]

stützt diese Feststellung die Nutzung der einfachen Methode ohne spezifische Berücksichtigung von Importen und Exporten.

5.3 Ergänzungen zum Schutzgut menschliche Gesundheit

Als Alternative zu der in Kapitel 3.6 beschriebenen Methode zur Herleitung des DESTINO-Zielwerts für das Schutzgut der menschlichen Gesundheit wurde eine weitere Methode geprüft. Sie basiert auf einer Regression des 98. Perzentils der NO₂-Immissionsmessdaten und den nationalen NO_x-Emissionen. Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der beiden Methoden sicherzustellen, basiert der Ansatz auf der gleichen Datengrundlage, d.h. es wurden die NO₂-Immissionsmessdaten der Messstationen mit Hintergrundbelastung verwendet, welche zwischen 2002 und 2015 eine durchgängige Zeitreihe aufweisen.

Der Zielwert wird gemäß dieser alternativen Methode anhand einer Regression zwischen den jährlichen NO_x-Emissionen und dem 98. Perzentil der NO₂-Immissionen berechnet. Um sicherzustellen, dass dieser Zielwert die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte an möglichst vielen Standorten sicherstellt, wird das 98. Perzentil der gemessenen NO₂-Immissionen berücksichtigt.

Die nationalen NO_x-Gesamtemissionen und das 98. Perzentil der Immissionsmessungen weisen eine hohe Korrelation auf (Abbildung 28). Die maximal zulässige Emissionsmenge kann somit über eine Regression des 98. Perzentils der NO₂-Immissionsmessreihe ($Im_{NO_2,98.Perzentil}$) und der jährlichen Stickstoffoxid-Emissionen (Em_{NO_x}) abgeleitet werden. Das höchste Bestimmtheitsmaß R^2 (respektive der höchste Korrelationskoeffizient R) wird mit einer linearen Regression erreicht:

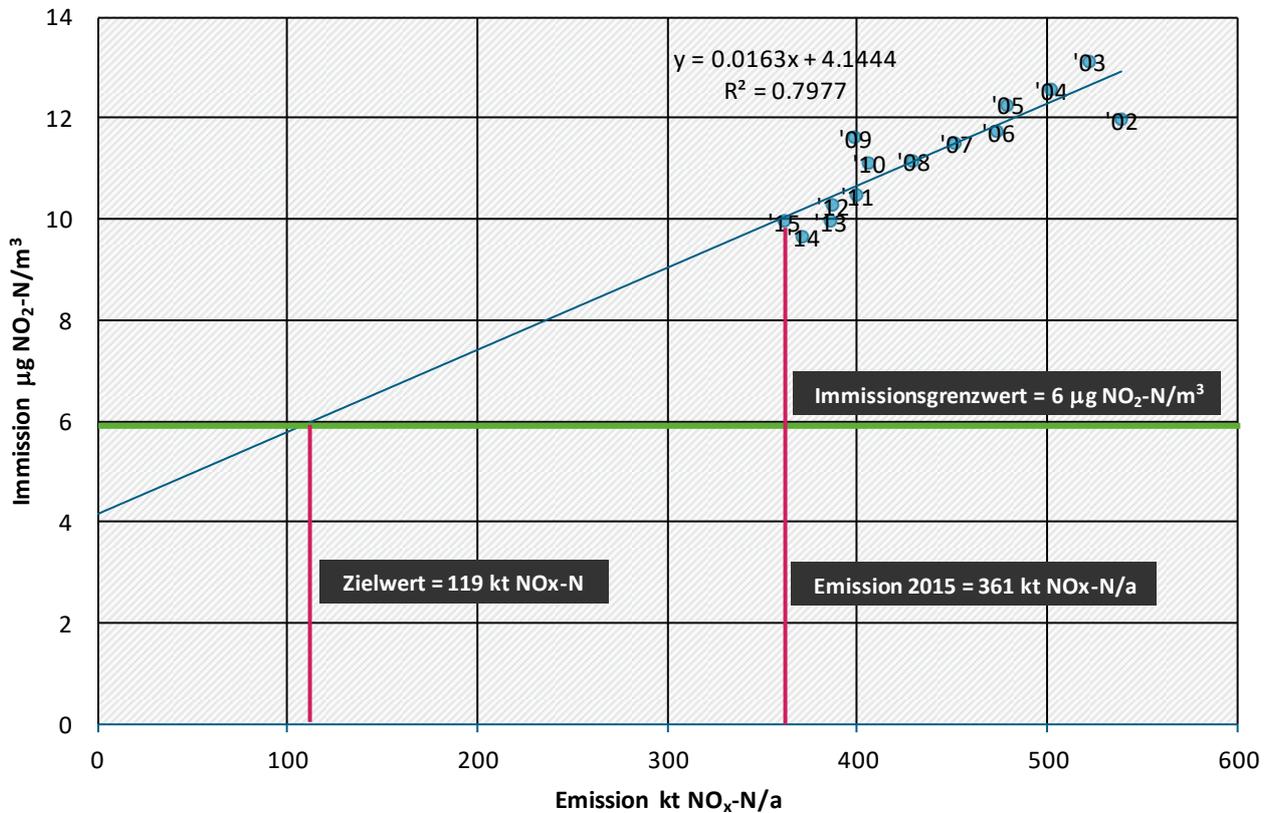
$$Im_{NO_2,98.Perzentil} = a + b Em_{NO_x} \quad [\mu\text{g NO}_2 \text{ m}^{-3}] \quad (\text{Gl. 20})$$

Die Regressionskoeffizienten werden mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Anschließend kann mit der Gleichung (Gl. 20) berechnet werden, wie hoch die Emissionen maximal sein dürfen, damit der von der WHO empfohlene Immissionsgrenzwert (IGW) von 20 $\mu\text{g NO}_2 \text{ m}^{-3}$ bei 98 % aller Stationen im Mittel eingehalten wird. Aufgelöst nach der maximalen Emissionsmenge ($Em_{NO_2,max}$) ergibt sich die folgende Gleichung:

$$Em_{NO_2,max} = \frac{Im_{NO_2,98.Perzentil} - a}{b} = \frac{IGW - a}{b} = \frac{6.087 - 4.1444}{0.0163} = 119 \text{ kt NO}_2 - N/a \quad \left[\frac{\text{kt NO}_2}{\text{a}^{-1}} \right] \quad (\text{Gl. 21})$$

Da ein Teil der Immissionen über die Landesgrenzen hinweg verfrachtet wird, basiert diese Berechnung der maximalen Emissionsmengen auf der Annahme, dass der aus dem Ausland importierte Anteil im Ursprungsland in gleichem Ausmaß reduziert wird wie die Immissionen im Inland. Der aus dem Ausland importierte Anteil an Emissionen wird bei dieser Methode vernachlässigt.

Abbildung 28: Regression des 98. Perzentils der gemessenen NO₂-Immissionen und der NO_x-Emissionen (nationales Total) für die Jahre 2002 bis 2015



Quelle: UBA 2017a

Regressionsanalyse der 98. Perzentilwerte der gemessenen NO₂-Immissionen und entsprechenden NO_x-Emissionen. Für die Regressionsanalyse wurden die Daten aller Immissionsmessstationen an Hintergrundstandorten verwendet, bei welchen eine durchgängige Zeitreihe von 2002 - 2015 verfügbar ist. Die Punktebeschriftung bezeichnet die Jahreszahl. Datenquelle: UBA 2017b

Der Regressionsanalyse liegt die Annahme zugrunde, dass die Fehlerterme voneinander unabhängig sind. Das heißt, die Residuen dürfen nicht autokorreliert sein. Mit dem Durbin-Watson-Test kann geprüft werden, ob eine Autokorrelation zwischen aufeinanderfolgenden Residuen vorliegt. Die Analyse der Residuen der Regression von NO₂-Immissionen vs. NO_x-Emissionen zeigt (Durbin-Watson Koeffizient $D = 1,57 < 2,0$), dass keine Autokorrelation vorhanden ist, womit diese Voraussetzung der Regressionsanalyse erfüllt ist.

Ergebnisse

Unter der Annahme, dass die Stickstoffoxid-Emissionen im Ausland gleich stark reduziert werden wie in Deutschland, ergibt sich mit der oben beschriebenen Regressionsanalyse eine maximale Stickstoffoxid-Emissionsmenge ($Em_{NOx,max}$) von 119 kt NO_x-N a⁻¹. Die Emissionen im Jahr 2015 liegen bei 361 kt NO_x-N a⁻¹. Der Zielwert ist somit um rund 200 % überschritten und die Emissionen müssten um 242 kt NO_x-N a⁻¹ reduziert werden.

Zur Bestimmung des Zielwerts ist eine starke Extrapolation notwendig, und daher ist der resultierende Zielwert mit einer sehr hohen Unsicherheit behaftet. Daher wurde dieser methodische Ansatz nicht zur Herleitung des DESTINO-Zielwerts verwendet.

An dieser Stelle soll noch erwähnt werden, dass ursprünglich noch eine weitere Methode zur Bestimmung der maximalen NO_x -Emissionen getestet wurde. Ausgehend von den mit RCG modellierten NO_2 -Immissionen wurde eine Korrelationsanalyse auf dem EMEP-Grid für die NO_x -Emissionen und die NO_2 -Immissionen (RCD) durchgeführt. Die Methode sollte in Analogie zur Methode bei den terrestrischen Ökosystemen/Critical Levels für NH_3 (siehe Kapitel 3.1) zeigen, um welchen Anteil die NO_x -Emissionen je Grid-Zelle reduziert werden müssten, sodass keine Überschreitungen des NO_2 -Immissionsgrenzwerts mehr vorkommen. Es zeigte sich, dass die Modelldaten für eine solche Analyse nicht geeignet sind, weil sie auf einer räumlichen Auflösung von $2 \times 2 \text{ km}^2$ basieren. Diese Auflösung ist zu grob, denn sie führt zu einer derart starken Glättung der Spitzenwerte, dass praktische keine Überschreitungen mehr sichtbar sind – obwohl lokal vorhanden³². Demgegenüber hat die in Kapitel 3.6 verwendete Methode den Vorteil, dass sie auf Messwerten basiert, welche die realen Immissionsverhältnisse abbilden.

5.4 Flächendeckende Ermittlung der Nitratkonzentration im Grundwasser

5.4.1 Material und Methodik

Für die Darstellung der räumlichen Verteilung der Nitratkonzentrationen im Grundwasser in Deutschland ($1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster) wird das „Random Forest“-Klassifikationsverfahren herangezogen (Kap. 5.4.1.1). Die Entwicklung des Klassifikationsalgorithmus basiert auf rund 8.100 Punktdaten zur Nitratkonzentration in Grundwassermessstellen (Kap. 5.4.1.2), als Entscheidungskriterien dienen 13 Variablen, sogenannte Prädiktoren, die aus Flächendaten (Karten) zur Hydrogeologie, Landnutzung usw. ermittelt werden (Kap. 5.4.1.3).

5.4.1.1 Modellansatz

Die „Random Forest“-Methode gehört zu den statistischen Verfahren der „Classification and Regression Trees“ (CART). Mit dem Verfahren kann eine Menge von Objekten (Daten) mit Hilfe von Entscheidungsregeln automatisch klassifiziert werden, so dass die Objekte innerhalb einer Klasse untereinander möglichst ähnlich und zwischen den Klassen möglich unterschiedlich sind (Breiman 1984). Für die Nutzung von CART als Regressionsverfahren wird zunächst anhand eines Trainingsdatensatzes der Klassifikationsbaum entwickelt. Anschließend kann mittels dieses Entscheidungsbaumes die Zielgröße (hier: NO_3 -Konzentration) für alle Objekte geschätzt werden, für die die Werte der Prädiktoren des Entscheidungsbaumes bekannt sind (hier: Flächendaten, s. Kap. 5.4.1.3). Im Unterschied zur „klassischen“ linearen Regressionen gelten CART-Verfahren als relativ robust und ermöglichen es, sowohl kategorische als auch numerische Variablen für die Klassifikation zu verwenden. Als Nachteil ist der eingeschränkte Wertebereich für die prognostizierten Werte zu nennen: Es können nur Werte geschätzt werden, die auch innerhalb der Spannbreite des Trainingsdatensatzes liegen (Peterson 2005). Weiterhin ist die „Prognosestärke“ der Prädiktoren (wie beispielsweise die Steigung in einem linearen

³² «Die Karten geben die Konzentrationsverhältnisse mit der Mittelwertcharakteristik der räumlichen Auflösung von ca. $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ wieder. Dadurch werden hohe Messwerte, die nur an einer Station auftreten (sog. „hot-spots“), in den flächenhaften Darstellungen für ganz Deutschland nicht erfasst. Alle Stationen des Typs 'Straße' und 'Straße extrem' wurden nach der von Flemming entwickelten Klassifikation bei der Kartenerstellung nicht verwendet. Messungen im Einflussbereich stark befahrener Straßen werden daher in der OI-Darstellung nicht wiederzufinden sein, da solche Messungen in der Regel aus dem Immissionsniveau der umliegenden Stationen herausfallen.» zit. aus UBA «Kartographische Darstellung der flächenhaften Immissionsbelastung in Deutschland.» (UBA 2015a)

Regressionsmodell) für den Nutzer nicht nachvollziehbar, es wird nur deren relative Bedeutung angegeben.

Als eine Weiterentwicklung von CART, bei dem nur ein einziger Entscheidungsbaum gebildet wird, werden bei „Random Forest“ (RF) viele Bäume erzeugt. Deren Vorhersagewerte werden gemittelt, um eine Ensemble-Modell-Vorhersage und somit kontinuierliche Schätzwerte zu erhalten (Breiman 2001). RF liefert zudem ein Ranking der Prädiktoren in Bezug auf deren relativer Einflussstärke auf die Schätzung. Dieses Ranking wird anhand einer Quantifizierung der Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit mit und ohne Berücksichtigung des jeweiligen Prädiktors ermittelt.

Zur Abschätzung der Vorhersagegenauigkeit des statistischen Modells wurde eine Kreuzvalidierung durchgeführt, die Bewertung der Modellgüte erfolgt mit dem Gütemaß R^2 . Die hier vorgestellten Berechnungen wurden mit der Software R vers. 4.4.1, Prozedur „randomForest“ durchgeführt. Die Entwicklung des RF-Modells wurde mit einer dreimal wiederholten 10-fachen Kreuzvalidierung durchgeführt. Für den RF-Algorithmus wurden die Modellparameter „Anzahl Bäume“ ($n_{\text{tree}} = 1.000$) und die Anzahl der zufällig ausgewählten Prädiktoren aus dem Datensatz für jede Teilung des Entscheidungsbaumes ($m_{\text{try}} = 5$) definiert.

5.4.1.2 Punktdaten (Grundwassermessstellen)

Von den Bundesländern wurden freundlicherweise die Stammdaten sowie Zeitreihen der Nitrat-Konzentrationen für Grundwassermessstellen übermittelt (Stadtstaaten wurden nicht einbezogen). Die Daten wurden aufbereitet, in eine Datenbank überführt und nach den folgenden Kriterien selektiert:

- ▶ Eindeutig zugeordneter Messstellentyp: Grundwassermessstelle (GWM), Brunnen oder Quelle
- ▶ Angabe zur Messstellentiefe bzw. Ausbau der Filterstrecke vorhanden (ausgenommen Quellen)
- ▶ Messstellentiefe <100 m
- ▶ Mindestens zwei Messwerte im Zeitraum 2010 bis 2017
- ▶ Nitratkonzentration >0,5 mg l⁻¹ im Mittel der Zeitreihe
- ▶ Wenn der Mittelwert der Nitrat-Konzentration einer Messstelle in der Zeitreihe >10 mg l⁻¹ ist, dann muss der Variationskoeffizient < 1 sein
- ▶ Für die Modellerstellung wird der Mittelwert der Nitratkonzentration der Messstelle im Zeitraum 2010 – 2017 verwendet.

Tabelle 28 zeigt eine Übersicht der übermittelten und nach Anwendung der Auswahlkriterien verbliebenen Messstellen der jeweiligen Bundesländer. In Abbildung 29 ist die räumliche Verteilung der Messstellen dargestellt.

Tabelle 28: Anzahl der übermittelten und der für die Modellerstellung verwendeten Messstellen nach Bundesländern (nur Flächenländer berücksichtigt)

| Bundesland | Anzahl der übermittelten Messstellen | Anzahl der zur Modellerstellung verwendeten Messstellen |
|------------------------|--------------------------------------|---|
| Gesamt | 19.742 | 8.106 |
| Baden-Württemberg | 2.205 | 1.668 |
| Bayern | 574 | 493 |
| Brandenburg | 223 | 52 |
| Hessen | 5.793 | 2.113 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 401 | 249 |
| Niedersachsen | 5.363 | 986 |

| Bundesland | Anzahl der übermittelten Messstellen | Anzahl der zur Modellerstellung verwendeten Messstellen |
|---------------------|--------------------------------------|---|
| Nordrhein-Westfalen | 1.561 | 1.148 |
| Rheinland-Pfalz | 2.194 | 379 |
| Saarland | 52 | 40 |
| Sachsen | 472 | 382 |
| Sachsen-Anhalt | 431 | 300 |
| Schleswig-Holstein | 258 | 126 |
| Thüringen | 214 | 170 |

5.4.1.3 Flächendaten

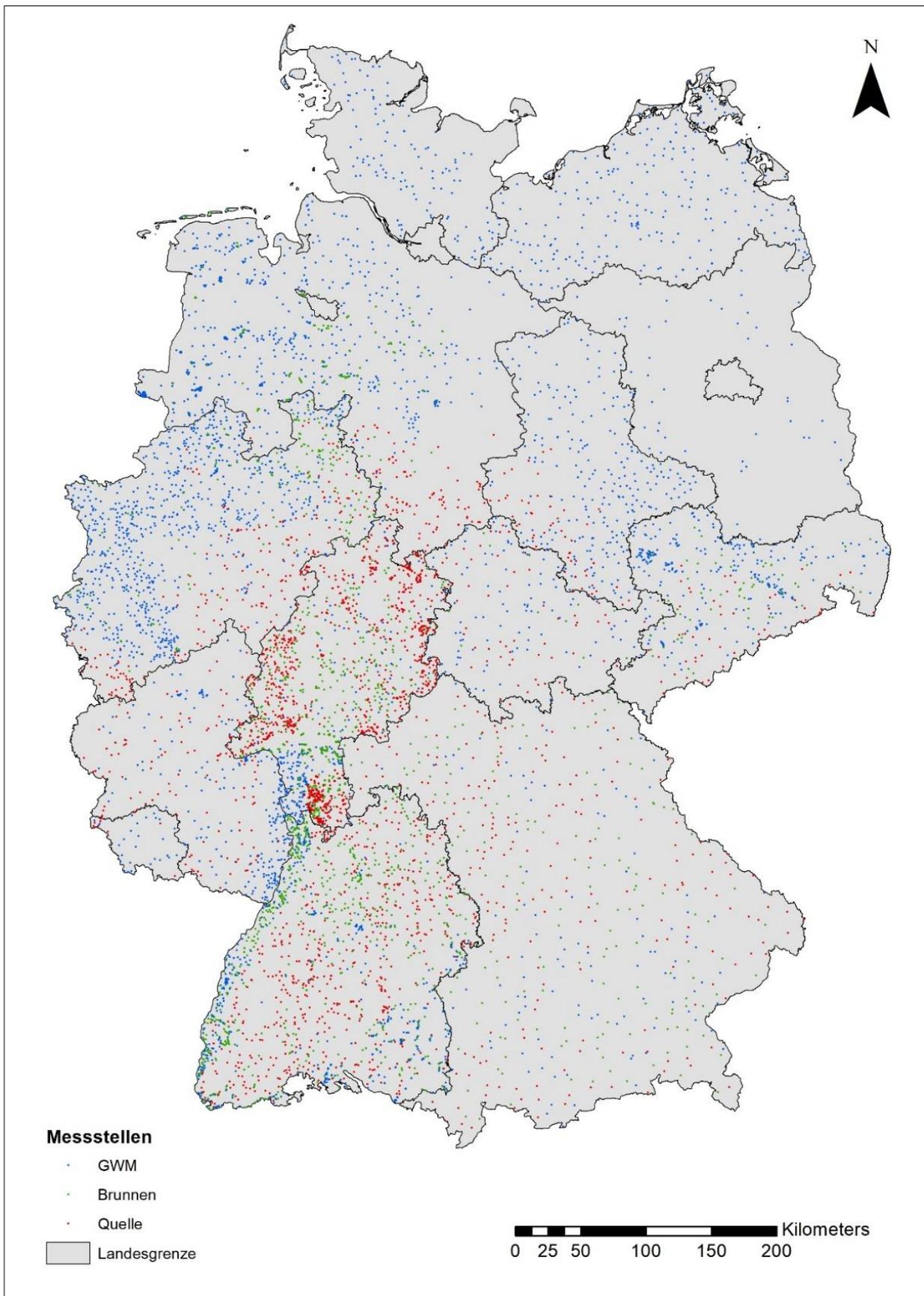
Als Prädiktoren für die RF-Klassifikation und Prognose wurden die folgenden bundesweit verfügbaren Flächeninformationen (digitale Karten) verwendet:

- ▶ Landbedeckungsmodell Deutschland (BKG 2016b), Merkmal „Landnutzung“, aggregiert zu fünf Landnutzungsklassen (Ackerland, Grünland, Sonderkulturen, Siedlung und Wald)
- ▶ HYRAUM - Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland (BGR 2015a, AD-HOC-AG HYDROGEOLOGIE 2016), Merkmal „hydrogeologische Räume“ (36 Kategorien)
- ▶ BÜK1000 - Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BGR 2018a), Merkmal „Bodengroßlandschaften“ (38 Kategorien)
- ▶ Sickerwasserrate (BGR 2003a)
- ▶ Grundwasserneubildung (BGR 2003b)
- ▶ Wasserspeicherfähigkeit (Feldkapazität) der Böden Deutschlands bis 1 m Tiefe (BGR 2015b)
- ▶ Humusgehalt - Gehalte an organischer Substanz der Böden in Deutschland (BGR 2016a, 2016b)
- ▶ Stickstoff-Überschuss auf der landwirtschaftlich genutzten Fläche, Regionalgliederung Kreise, Mittel 2011 - 2014 (Häußermann et al. 2019)
- ▶ Sickerwasserkonzentration (berechnet aus Sickerwasserrate und N-Überschuss)
- ▶ NO₃-Konzentration Grundwasserneubildung (berechnet aus Sickerwasserrate und N-Überschuss).

Für die Entwicklung der Klassifikation im RF-Verfahren müssen die Punktdaten zur Nitratkonzentration mit Werten der Flächendaten verknüpft werden. Dazu wurden für jede der 8.100 Messstellen in einem Kreisbuffer mit 1.000 m Radius die Ausprägungen der Prädiktoren aus den aufgeführten Karten ermittelt (ArcGIS 10.2, Prozedur „Buffer Analysis“ - „Intersect Analysis“ bzw. „Spatial Join Analysis“ und „Spatial Join - Largest Over-lap Analysis“). Für die fünf Landnutzungsklassen (Ackerland, Grünland, Sonderkulturen, Siedlung, Wald) wurde deren prozentualer Flächenanteil im Buffer berechnet; für die Merkmale hydrogeologischer Raum und Bodengroßlandschaft wurde der Wert des dominierenden Flächenanteils übernommen; für die Variablen Sickerwasserrate, Grundwasserneubildung, Feldkapazität, Humusgehalt und Stickstoff-Überschuss wurden die Werte flächengewichtet gemittelt innerhalb der Buffer.

Das RF-Klassifikationsverfahren wurde anschließend dazu verwendet, die Verteilung der Nitrat-Konzentration im Grundwasser in Deutschland (für ein 1 x 1 km² Raster) zu prognostizieren. Dazu wurden die Werte der Prädiktoren - in gleicher Weise wie für die Buffer - für jede 1 x 1 km² Rasterzelle ermittelt. Als Maske für die Auswertung der digitalen Flächendaten sowie die Darstellung der Ergebnisse zur NO₃-Konzentration dient die Karte „GeoGitter Deutschland 1 km“ (BKG 2017).

Abbildung 29: Verteilung der für die Modellerstellung verwendeten Messstellen in Deutschland.



5.4.2 Ergebnisse

In der Abbildung 30 ist das Parameterranking für das erstellte RF-Modell dargestellt. Der Prädiktor „hydrogeologischer Raum“ hat die mit Abstand größte Bedeutung für Abschätzung der Nitrat-Konzentration, gefolgt von den Merkmalen „Bodengroßlandschaft“, „Anteil Grünland“ und „Anteil Ackerland“. Unter den verwendeten Prädiktoren ist der „Stickstoff-Überschuss der landwirtschaftlich genutzten Fläche (Regionalgliederung Kreise)“ die einzige Größe, die durch Managementmaßnahmen beeinflusst werden kann (die Umwandlung von Ackerland oder Grünland in andere Nutzungsformen einmal außen vor gelassen). Diese Größe zeigt allerdings nur eine eher nachrangige Bedeutung im Vergleich zu den naturräumlich, nutzungsstrukturell bzw. klimatisch vorgegebenen Einflussfaktoren.

Abbildung 30: Ranking der Prädiktoren nach Einflussstärke (relativ zum stärksten Faktor) auf die Schätzung der Nitratkonzentration

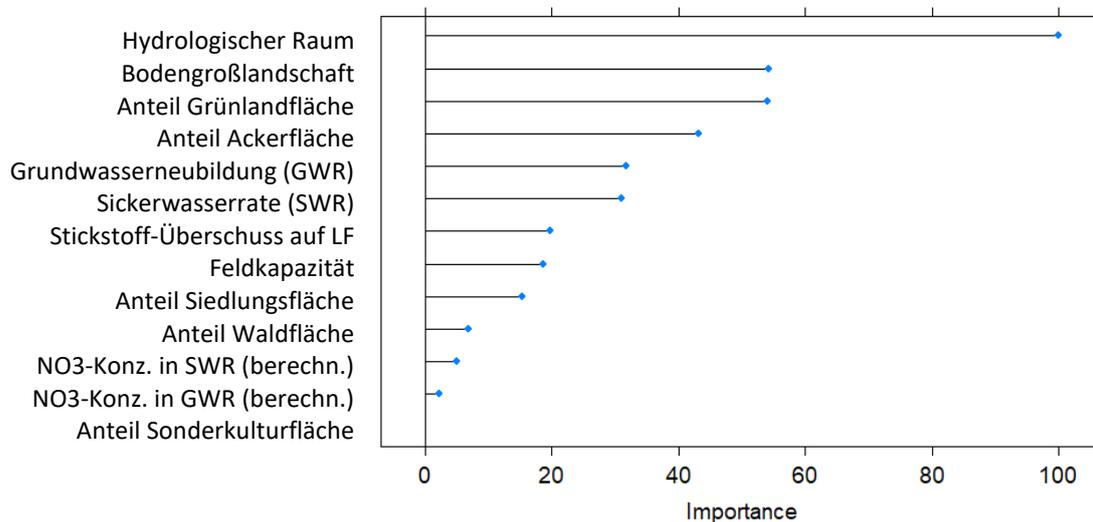
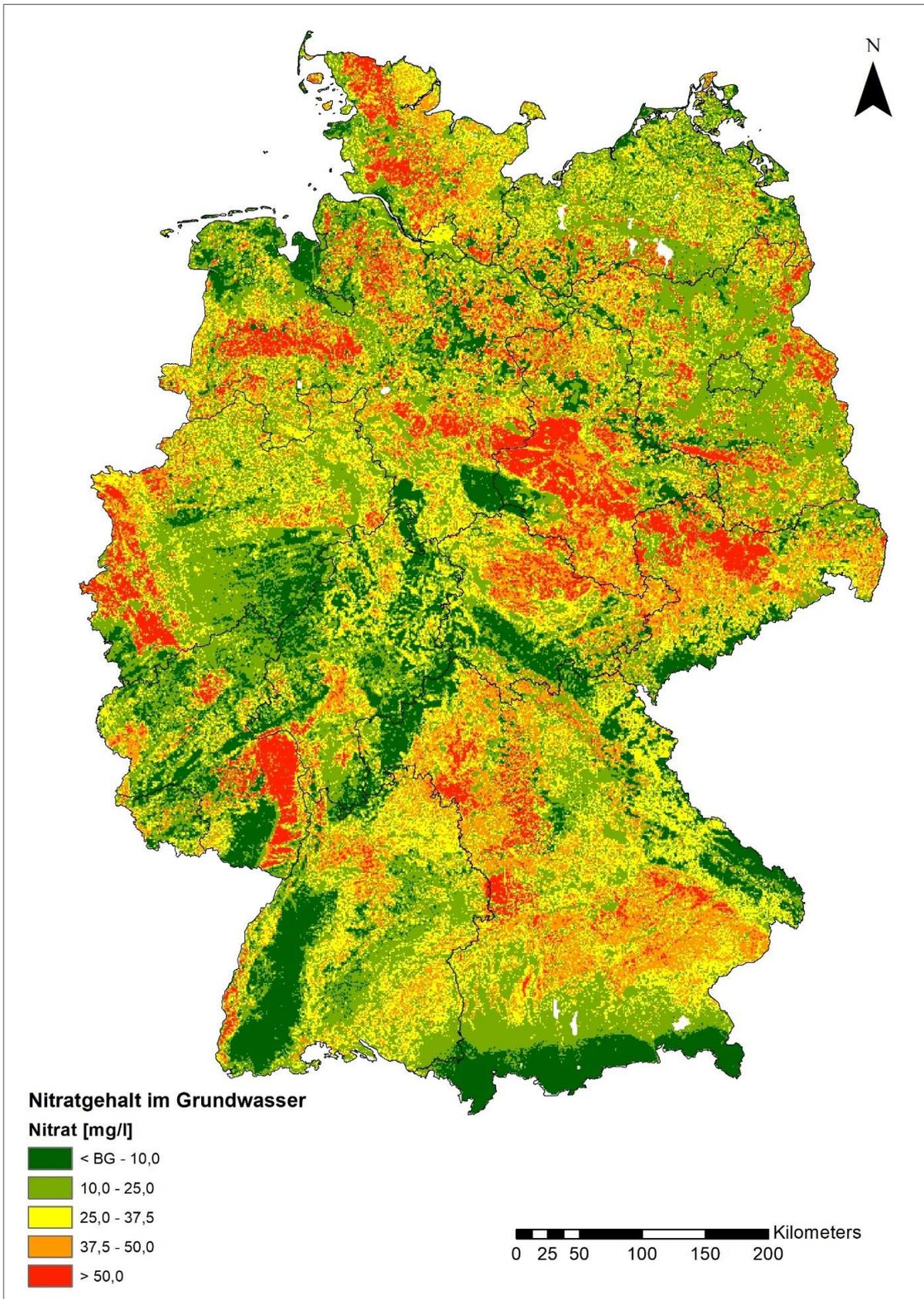


Abbildung 31 zeigt die Verteilung der nach diesem Verfahren geschätzten Nitratkonzentrationen im Bundesgebiet. Das Verteilungsmuster stimmt visuell gut überein mit der Darstellung der Grundwasserkörper (Abbildung 32), die gemäß WRRL-Einstufung aufgrund von Überschreitung der Nitrat-Qualitätsnorm im „schlechten Zustand“ sind (UBA 2017e).

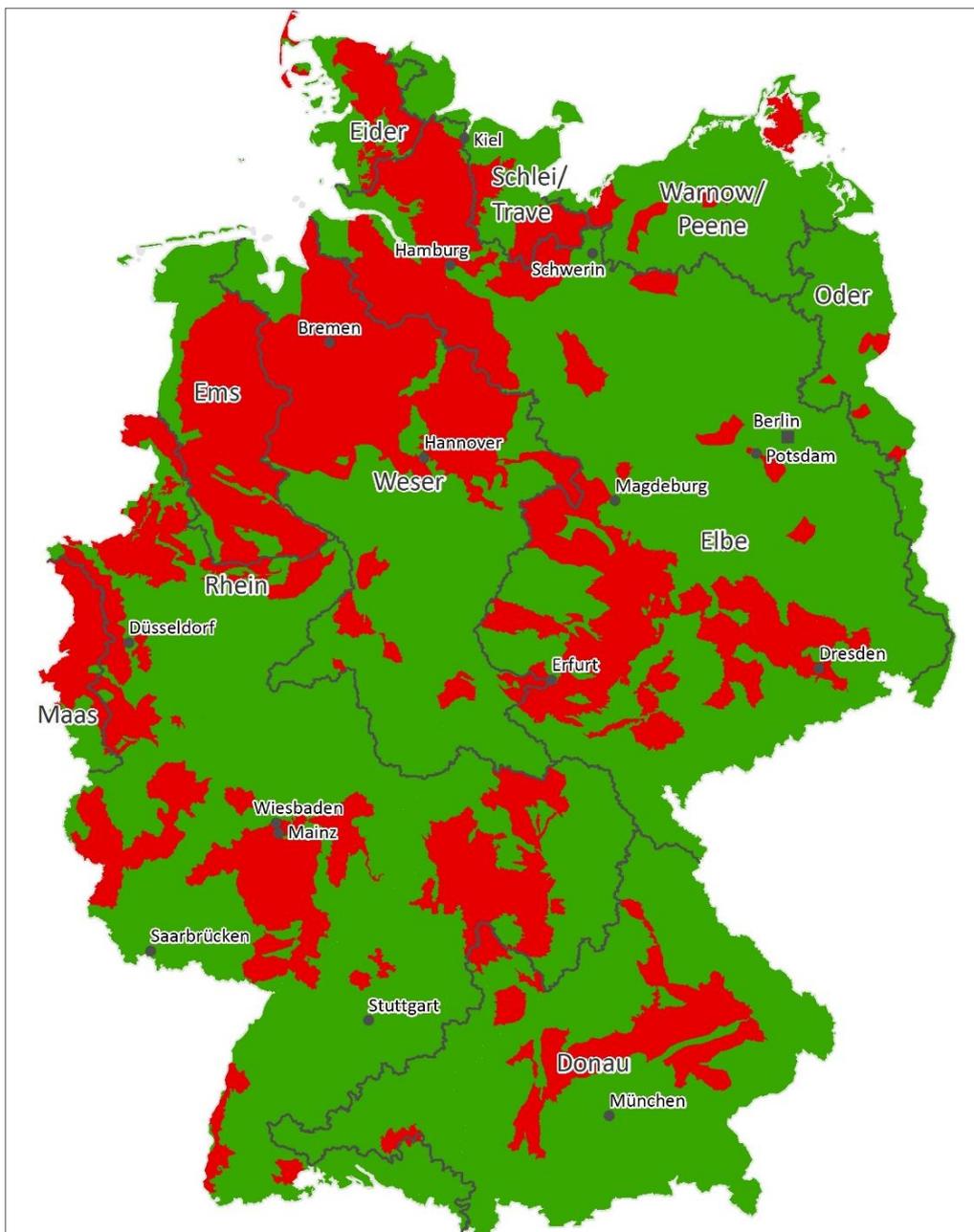
Abbildung 31: Verteilung der Nitratkonzentration im Grundwasser in Deutschland (1 x 1 km² Raster), prognostiziert mit Random-Forest-Klassifikation



Hinweis: die Karte wurde mit einem Modell berechnet und dient der großräumigen Übersichtsdarstellung; die örtliche Nitrat-Konzentration im Grundwasser kann von der Darstellung abweichen.

Nitrat-Konzentrationen über 50 mg l^{-1} werden vor allem für die intensiv landwirtschaftlich genutzten Bördegebiete, die Regionen mit hohem Viehbesatz (insbesondere in Nordwestdeutschland) sowie für Gebiete mit hohem Anteil an Sonderkulturen (wie bspw. Rheinhessen, Oberrheinebene) ausgewiesen. Für die Mittelgebirge bzw. die Regionen mit vorherrschender Grünlandnutzung werden niedrige Konzentrationen geschätzt. Neben der visuellen Beurteilung kann die Prognosegüte quantitativ anhand eines Vergleichs mit Karten der Nitratkonzentration im Grundwasser verglichen werden, die mit anderen Methoden entwickelt worden sind, wie beispielsweise dem geostatistischen Interpolationsverfahren SIMIK (Bardossy et al. 2003, Usländer et al. 2003).

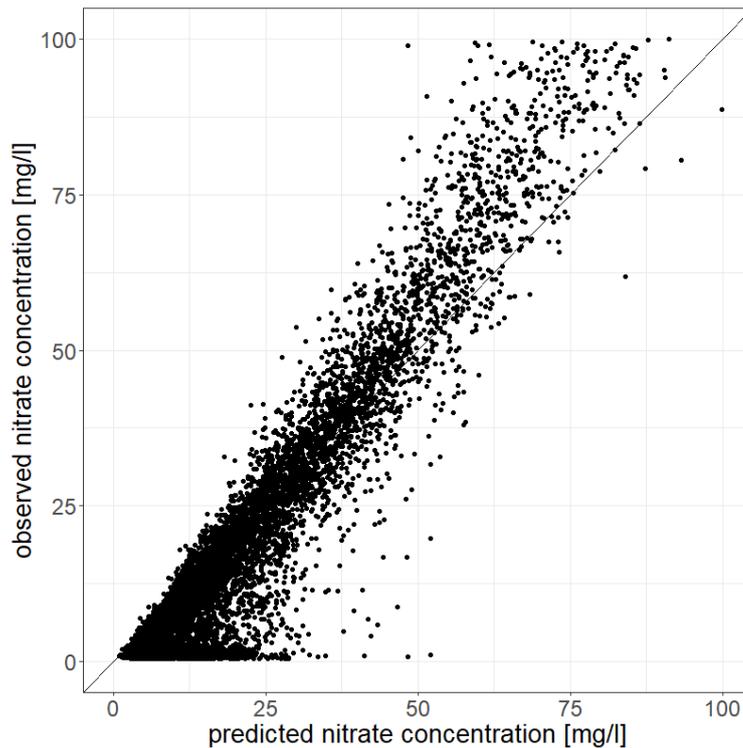
Abbildung 32: Grundwasserkörper in Deutschland, die im Hinblick auf den Parameter Nitrat in einem schlechten chemischen Zustand (rote Bereiche) sind (UBA 2017e)



Geodatenbasis: GeoBasis DE / BKG 2015; Fachdaten: Berichtsportal WasserBLick/BfG, Stand 23.3.2016; Bearbeitung: UBA, LAWA. Die Einstufung wird von den Bundesländern nach z.T. unterschiedlichen Bewertungsverfahren vorgenommen.

Für die Klassifikation der rund 8.100 Stützwerte (i.e. Messstellen) des Trainingsdatensatzes wird ein R^2 von 0,9 als Gütemaß ausgewiesen, was als sehr hoch anzusehen ist (s. Abbildung 33). Für die Anwendung als Prognosemodell wird allerdings mit einem R^2 von 0,3 nur ein wesentlich niedrigeres Bestimmtheitsmaß erreicht. Für dessen Ermittlung wird mit dem Trainingsdatensatz eine Kreuzvalidierung durchgeführt, das heißt der Datensatz wird zufällig aufgeteilt in Trainings- und Testdaten. Mit den Trainingsdaten wird ein Prognosemodell entwickelt, anschließend auf die Testdaten angewendet und die Vorhersagegüte wird für diese Testdaten bestimmt. Diese Prozedur wird mehrfach wiederholt und das Bestimmtheitsmaß schließlich über alle Kreuzvalidierungen gemittelt. Diese eingeschränkte Prognosegüte muss bei der Interpretation der Abbildung 31 berücksichtigt werden.

Abbildung 33: Gemessene vs. nach Random-Forest-Klassifikation geschätzte Nitratkonzentration im Grundwasser (n = 8.106 Messstellen, s. Kap. 5.4.2)



6 Quellenverzeichnis

- AD-HOC-AG HYDROGEOLOGIE (2016): Regionale Hydrogeologie von Deutschland - Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. Geol. Jb., Reihe A, 163: 456 S.; Hannover.
- Aksoyoglu et al. (2008): Influence of various emission scenarios on ozone in Europe. Sebnem Andreani-Aksoyoglu, Johannes Keller, Carlos Ordóñez, Michel Tinguely, Martin Schultz, André S.H. Prévôt. Ecological modelling 217 (2008) pp. 209–218.
- BAFU (2007): Grundlagen zur Bestimmung der ökologischen Ziele für N-haltige Luftschadstoffe. Beat Achermann, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Sektion Luftqualität. N-Workshop Bundesamt für Landwirtschaft. Bern, 6. Dezember 2007.
- Bardossy A, Giese H, Grimm-Strehle J, Barufke LP (2003). SIMIK+ - GIS-implementierte Interpolation von Grundwasserparametern mit Hilfe von Landnutzungs- und Geologiedaten. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 47(1), 13-20.
- BGR (2003a). Mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden. Digitales Archiv FISBo BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover. Erarbeitet für Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Hydrologischer Atlas von Deutschland, Tafel 4.5.
- BGR (2003b). Mittlere jährliche Grundwasserneubildung. Digitales Archiv FISBo BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover. Erarbeitet für Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Hydrologischer Atlas von Deutschland, Tafel 5.5.
- BGR (2015a). HYRAUM - Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/Beratung/Hyraum/hyraum_projektbeschreibung.html; aufgerufen 13.7.2018).
- BGR (2015b). Wasserspeicherfähigkeit (Feldkapazität) der Böden Deutschlands bis in 1 m Tiefe (Kurztitel FK10dm1000_250). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (produktcenter.bgr.de/terraCatalog/OpenSearch.do?search=5a75335e-ba46-452f-8792-ac7e9b49da88&type=/Query/OpenSearch.do; aufgerufen 17.7.2018)
- BGR (2016a). Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands 1:1.000.000 (Kurztitel HUMUS1000 OB). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (<https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/OpenSearch.do?search=a2b39d17-661b-426f-929e-36d2925a029a&type=/Query/OpenSearch.do>; aufgerufen 13.7.2018).
- BGR (2016b). Bodenatlas Deutschland - Böden in thematischen Karten. Koordinator: Klaus Kruse; Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 144 S.
- BGR (2018). BÜK1000 – Bodenübersichtskarte 1:1.000.000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (services.bgr.de/wms/boden/buek1000d; aufgerufen 13.7.2018).
- BKG (2016a). CORINE Land Cover 10 ha - CLC10 (2012). Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Frankfurt a.M. ([sg.geodatenzentrum.de/web_download/dlm/clc10/clc10.pdf](http://www.geodatenzentrum.de/web_download/dlm/clc10/clc10.pdf); aufgerufen 20.7.2018).
- BKG (2016b). Landbedeckungsmodell für Deutschland (LBM-DE). Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Frankfurt a.M. (<http://www.geodatenzentrum.de/docpdf/lbm-de2012.pdf>; aufgerufen 13.7.2018).
- BKG (2017). Geographische Gitter für Deutschland – GeoGitter. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Frankfurt a.M. (<http://www.geodatenzentrum.de/docpdf/geogitter.pdf>; aufgerufen 16.7.2018).
- BMELV (2012). Nitratbericht 2012. Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Bonn, 94 S.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Kabinettsbeschluss vom 7. November 2007. (Neuaufgabe 2015 durch BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.) http://www.biologischevielfalt.de/fileadmin/NBS/documents/broschuere_biolog_vielfalt_strategie_bf.pdf [31.08.2018].
- BMU (2018a). Zustand der deutschen Nordseegewässer. Aktualisierung der Anfangsbewertung nach § 45c WHG, der Beschreibung des guten Umweltzustands nach § 45d WHG und der Festlegung von Umweltzielen nach § 45e WHG zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. Anlage 1 – Ergänzende Indikatorblätter für die Nordsee. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Bonn (www.meeresschutz.info/oeffentlichkeitsbeteiligung.html?file=files/meeres_schutz/berichte/art8910/zyklus18/Nationale_Indikatoren_Nordsee_Anlage_1.pdf; aufgerufen 27.7.2018).

- BMU (2018b). Zustand der deutschen Ostseegewässer. Aktualisierung der Anfangsbewertung nach § 45c WHG, der Beschreibung des guten Umweltzustands nach § 45d WHG und der Festlegung von Umweltzielen nach § 45e WHG zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. Anlage 1 – Ergänzende Indikatorblätter für die Ostsee. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Bonn (www.meeresschutz.info/oeffentlichkeitsbeteiligung.html?file=files/meeresschutz/berichte/art8910/zyklus18/Nationale_Indikatoren_Ostsee_Anlage_1.pdf; aufgerufen 27.7.2018).
- BMU (2019). Nationales Luftreinhalteprogramm der Bundesrepublik Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Berlin.
- BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050, Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin. November 2016.
- BMUB/BMEL (2016). Nitratbericht 2016. Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn, 138 S.
- Breiman L (1984). Classification and Regression Trees. Routledge.
- Breiman L (2001). Random Forests. Machine Learning 45, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Bundesregierung (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Neuauflage 2016. http://www.bundesregierung.de/Content/Infomaterial/BPA/Bestellservice/Deutsche_Nachhaltigkeitsstrategie_Neuauflage_2016.html [31.08.2018]
- Bundesregierung (2017): Stickstoffeintrag in die Biosphäre – Erster Stickstoff-Bericht der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin. 31. Mai 2017.
- COM (2013). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über ein Programm „Saubere Luft für Europa“. Brüssel, Europäische Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52013DC0918>. Aufgerufen 13.01.2020
- de Vries, W. (2017): An integrated nitrogen target for Europe, Referat am «Fachgespräch Gesamtreduktionsziel für Stickstoff. Im Rahmen des FE Projekts 3716 51 200 0 - Wissenschaftliche Unterstützung zur Umsetzung einer ressortübergreifenden integrierten Stickstoffemissionsminderungsstrategie DESTINO. 6. September 2017, Bundespresseamt, Berlin.
- Düring I., Bächlin W., Ketzler M., Baum A., Friedrich U., Wurzler S. (2011): A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 20, No. 1, 067-073. February 2011.
- ECE (2013): Guidance document on national nitrogen budgets. Economic Commission for Europe Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. ECE/EB.AIR/119. Geneva. 17 June 2013.
- EMEP (2017): Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components. EMEP Status Report 1/2017. Joint MSC-W & CCC & CEIP Report (emep.int/publ/reports/2017/EMEP_Status_Report_1_2017.pdf, aufgerufen 10.03.2018)
- EMEP (2018): Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components. EMEP Status Report 1/2018. Joint MSC-W & CCC & CEIP Report (emep.int/publ/reports/2018/EMEP_Status_Report_1_2018.pdf, aufgerufen 11.09.2019)
- EU Nitrogen Expert Panel (2015) Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems. Wageningen University, Alterra, PO Box 47, NL-6700 Wageningen, Netherlands.
- EU 2016: Richtlinie (EU) 2016/2284 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2016 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe. Strassburg 14.12.2016.
- Flemming, J., Stern, R. (2004): Anwendung modellgestützter Beurteilungssysteme für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität und ihrer Tochterrichtlinien. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 201 43 250 auf dem Gebiet des Umweltschutzes. Datenassimilation auf der Basis der Optimalen Interpolation für die Kartierung von Immissionsbelastungen in UBA-FB. Freie Univ., Inst. für Meteorologie, Troposphärische Umweltforschung, Berlin.
- Fuchs F, Scherer U, Wander R, Behrendt H, Venohr M, Opitz D, Hillenbrand T, Marscheider-Weidemann F (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS. Nährstoffe, Schwermetalle und Polzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. Umweltbundesamt, UBA-Texte 45/2010, 243 S.

- Fuchs S, Toshovski S, Wander R, Kittlaus S, Reid L (2016): Aktualisierung der Stoffeintragsmodellierung (Regionalisierte Pfadanalyse) für die Jahre 2012 bis 2014. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütwirtschaft, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- Fuchs S, Weber T, Wander R, Toshovski S, Kittlaus S, Reid L, Bach M, Klement L, Hillenbrand T, Tettenborn F (2017). Effizienz von Maßnahmen zur Reduktion von Stoffeinträgen. Umweltbundesamt, UBA-Texte 05/2017, 385 S.
- GrwV (2017): Grundwasserverordnung - Verordnung zum Schutz des Grundwassers (GrwV) v. 9. Nov. 2010 (BGBl. I S. 1513), zuletzt geändert durch Verordnung v. 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1044).
- Häußermann U, Bach M, Klement L, Breuer L (2019). Stickstoff-Flächenbilanzen für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (UBA project FKZ 3714 43 2020), UBA-Texte 131/2019.
- HELCOM (2013): Summary report on the development of revised Maximum Allowable Inputs (MAI) and updated Country Allocated Reduction Targets (CART) of the Baltic Sea Action Plan. Baltic Marine Environment Protection Commission, 23 Seiten.
<http://www.helcom.fi/Documents/Ministerial2013/Associated%20documents/Supporting/Summary%20report%20on%20MAI-CART.pdf>, aufgerufen 13.01.2020
- Hoff (2017): Operationalizing the Planetary Boundaries for National Nitrogen Activities ("strategy"). Referat Dr. Holger Hoff (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung), am Fachgespräch Gesamtreduktionsziel für Stickstoff. Im Auftrag des Umweltbundesamts. Berlin. 6. Sept. 2017.
- Hoff et al. (2017): Die planetare Stickstoff-Leitplanke als Bezugspunkt einer nationalen Stickstoffstrategie. H. Hoff, B. Keppner, W. Kahlenborn. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. TEXTE 75/2017. Dessau-Roßlau, August 2017.
- ICP Modelling & Mapping (2017): Mapping Critical Levels for Vegetation. ICP Modelling & Mapping 2007. http://icpvegetation.ceh.ac.uk/publications/documents/Chapter3-Mappingcriticallevelsforvegetation_000.pdf. Aufgerufen am 24.11.2017.
- IIASA (2012): TSAP-2012 Baseline: Health and Environmental Impacts. TSAP Report #6, Version 1.0. Editor: Markus Amann, International Institute for Applied Systems Analysis IIASA. Report produced under the Service Contract on Monitoring and Assessment of Sectorial Implementation Actions (ENV.C.3/SER/2011/0009) of DG-Environment of the European Commission. Laxenburg. November 2012.
- INFRAS (2016): Integrierte Betrachtung der nationalen Stickstoffbilanz: Offerte für die wissenschaftliche Unterstützung zur Umsetzung einer nationalen integrierten Stickstoffemissionsminderungsstrategie. Zürich.
- INFRAS (2016a): Beschlussprotokoll Kickoff-Meeting 15.11.2016 zum Projekt «Integrierte Betrachtung der nationalen N-Bilanz»: Wissenschaftliche Unterstützung zur Umsetzung einer nationalen integrierten Stickstoffemissionsminderungsstrategie. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- INFRAS (2017): Detailkonzept für das UBA-Projekt „DESTINO – Integrierte Betrachtung der nationalen Stickstoffbilanz“. Zürich.
- INFRAS (2017a): Protokoll vom 24.5.2017 der Besprechung des Projektes «DESTINO (Fachgespräche AP4 und Gesamt-N-Indikator AP1)» mit dem UBA. Umweltbundesamt, Berlin.
- LAWA 2016. Empfehlung zur Übertragung flussbürtiger, meeresökologischer Reduzierungsziele ins Binnenland. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), LAWA-Arbeitsprogramm Flussgebietsbewirtschaftung, Produktdatenblatt WRRL-2.4.7, ENTWURF vom Nov. 2016.
- LAWA (2018): Protokoll der 56. Sitzung des ständigen Ausschusses „Oberirdische Gewässer und Küstengewässer“ - LAWA-AO - am 12./ 13.06.2018 in Wernigerode; Punkt 4.4.3. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).
- Myhre G., Shindell D., F.-M. Bréon, Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T. and Zhang H. (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nendel C, Berg M, Kersebaum KC, Mirschel W et al. (2011): The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. Ecological Modelling 222(9), 1614-1625.
- OGewV (2016): Oberflächengewässerverordnung - Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (OGewV) vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373).

- Petersohn H (2005). Data Mining: Verfahren, Prozesse, Anwendungsarchitektur. Oldenbourg Verlag.
- Schaap et al. (2017): Modellgestützte Analyse der Zielstellungen des Göteborg Protokolls und des Verhandlungsstands 2015 zu NERC-Richtlinie, Düngeverordnung und TA Luft im Hinblick auf zu erwartende Depositionen und Critical Load Überschreitungen in terrestrischen Ökosystemen. Berichtsentwurf zuhanden des UBA zum Projekt unter dem Umweltforschungsplan, FKZ 3710 64 2010. Utrecht und Strausberg, September 2016.
- Schaap R., Wichink Kruit R., Hendriks C., Kranenburg R., Segers A., Bultjes R., Banzhaf S. (2017a) Modelling and assessment of acidifying and eutrophying atmospheric deposition to terrestrial ecosystems (PINETI-II). Part I: Atmospheric deposition to German natural and semi-natural eco-systems during 2009, 2010 and 2011. UBA-Texte 62/2017.
- Schaap, M., Banzhaf, S., Hendriks, C., Kranenburg, R., Kuenen, J., Nagel, H.-D., Schlutow, A., and Segers, A. (2018). PINETI-III: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland. UBA-Texte 79/2018. Abschlussbericht zum BMUB/UBA UFOPLAN-Projekt 3714 60 2010. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- SRU (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sondergutachten. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Berlin. Januar 2015. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2012_2016/2015_01_SG_Stickstoff_HD.pdf?__blob=publicationFile&v=26 [24.08.2018]
Kurzfassung: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2012_2016/2015_01_SG_Stickstoff_KF.pdf?__blob=publicationFile&v=7 [24.08.2018]
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., De Vries, W., De Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., and Sörlin, S. (2015). Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. ScienceXpress DOI: 10.1126/science.1259855.
- UBA (2013): Wasserwirtschaft in Deutschland – Teil 2: Gewässergüte. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2014): Wichink Kruit, R., et al. (2014). Modelling and mapping of atmospheric nitrogen and sulphur deposition and critical loads for ecosystem specific assessment of threats to biodiversity in Germany - PINETI (Pollutant INput and EcosysTem Impact) Teilbericht 1. UBA-Texte. Umweltbundesamt. Dessau-Rosslau.
- UBA (2015): Reaktiver Stickstoff in Deutschland. Ursachen, Wirkungen, Maßnahmen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/reaktiver-stickstoff-in-deutschland> [27.08.2018]
- UBA (2015a): Kartographische Darstellung der flächenhaften Immissionsbelastung in Deutschland durch Kombination von Messung und Rechnung für das Jahr 2015. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2016): Schneider C. et al. im Auftrag des UBA: ArcGIS basierte Lösung zur detaillierten, deutschlandweiten Verteilung (Gridding) nationaler Emissionsjahreswerte auf Basis des Inventars zur Emissionsberichterstattung, Forschungskennzahl 3712 63 240 2 UBA-FB-002360. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2016b): Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von Nitrateinträgen in die Gewässer auf Basis regionalisierter Stickstoff-Überschüsse Teil I: Beitrag zur Entwicklung einer Ressortübergreifenden Stickstoffstrategie». Zwischenbericht. Martin Bach et al. Dessau-Roßlau, Juni 2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_55_2016_bewertung_von_massnahmen_zur_verminderung_von_nitrateintraegen.pdf [30.10.2018]
- UBA (2017): Indikatorenbericht, Daten zur Umwelt 2017. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-zur-umwelt-2017>. Aufgerufen am 7.7.2017.
- UBA (2017a): Gitterdaten NO_x- und NH₃-Emissionen und -Immissionen. Datenlieferung S. Feigenspan am 3.5.2017, erstellt mit dem GRETA-Tool auf Basis der Emissionsberichterstattung 2016. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2017b): Daten der Messnetze der Länder und des Bundes, Immissionsmessdaten. Datenlieferung S. Feigenspan am 30.5.2017. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2017d): Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland: Datenstand 2017. Umweltbundesamt. <https://iir-de-17.wikidot.com/>

UBA (2017e). FAQs zu Nitrat im Grund- und Trinkwasser. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau (www.umweltbundesamt.de/faqs-zu-nitrat-im-grund-trinkwasser#textpart-1 [Abb. 4], aufgerufen 19.7.2018).

UBA (2017f): DESTINO Deutsche Stickstoffflüsse, Indikatoren und Objectives – Zwischenbericht. J. Heldstab, B. Schächli, J. Reutemann, M. Bach im Auftrag des Umweltbundesamts. FKZ 3716 51 200 0. November 2017.

UBA (2017g): Quantifizierung der landwirtschaftlich verursachten Kosten zur Sicherung der Trinkwasserbereitstellung. M. Oelmann et al. Im Auftrag des Umweltbundesamts. TEXTE 43/2017. Dessau-Roßlau
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-05-24_texte-43-2017_kosten-trinkwasserversorgung.pdf [18.09.2019]

UBA (2018): German Informative Inventory Report 2018 (IIR 2018). Umweltbundesamt (Federal Environment Agency)
<https://iir-de.wikidot.com/download>

Daten einsehbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen> [31.08.2018]

UBA 2018a Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2018. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016. Umweltbundesamt – UNFCCC-Submission. Dessau-Roßlau, Mai 2018. ISSN 1862-4359.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-24_climate-change_12-2018_nir_2018.pdf [12.10.2018]

UBA (2018e): Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid- Exposition in Deutschland - Abschlussbericht. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, UMWELT & Gesundheit 01/2018, Forschungskennzahl 3715 61 201 0 UBA-FB 002600, ISSN 1862-4340, März 2018.

UBA (2020). Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010 – 2014 (DESTINO Bericht 2). Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. Forschungskennzahl 3716 51 200 0. März 2020.

UNECE (1979): 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution

<https://www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlrapwelcome/the-air-convention-and-its-protocols/the-convention-and-its-achievements.html> [25.08.2018]

UNECE (1999): The 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone

https://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.html [25.08.2018]

UNECE (2012): Amendment of the text and annexes II to IX to the Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. Geneva 4 May 2012.

https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-1-k&chapter=27&clang=en [25.08.2018]

UNECE (2013): Guidance document on national nitrogen budgets. Economic Commission for Europe, Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. ECE/EB.AIR/119. 17 June 2013.

UNECE (2016): Detailed Annexes to ECE/EB.AIR/119 – “Guidance document on national nitrogen budgets”. Expert Panel on Nitrogen Budgets (EPNB) under the Task Force on Reactive Nitrogen (TFRN).

http://www.clrtap-tfrn.org/sites/clrtap-tfrn.org/files/documents/EPNB_new/EPNB_annex_20160921_public.pdf. Aufgerufen am 10.7.2017.

UNEP (2013). Drawing Down N₂O To Protect Climate and the Ozone Layer. A UNEP Synthesis Report. Nairobi, Kenya, United Nations Environment Programme (UNEP).

https://www.researchgate.net/publication/268213461_Drawing_Down_N2O_to_Protect_Climate_and_the_Ozone_Layer_A_UNEP_Synthesis_Report [10.10.2018]

UNFCCC (2017): CRF DEU Submission 2017, http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/zip/deu-2017-crf-11apr17.zip. Aufgerufen am 7.7.2017.

UNFCCC (2018): CRF DEU Submission 2018, http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/zip/deu-2018-crf-11apr18.zip. Aufgerufen am 15.10.2018.

Usländer T, Grimm-Strehle J, Sonnentag O (2003). SIMIK+ ArcView-Erweiterung zur flächenhaften Darstellung der Grundwasserbeschaffenheit – Benutzerhandbuch. Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB), Karlsruhe.

Venohr M, Hirt U, Hofmann J, Opitz D et al. (2011). Modelling of Nutrient Emissions in River Systems – MONERIS – Methods and Background. *Int. Rev. Hydrobiol.* 96:435–483.

WHO (2013): Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project, Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide, World health organization 2013.