

TEXTE

30/2026

Abschlussbericht

National Nitrogen Budget: Fortschreibung des nationalen Stickstoff-Inventars für die Jahre 2015 - 2020

von:

Martin Bach
Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement, Universität Gießen
Maximilian Kanig, Richard Beisecker
Ingenieurbüro für Ökologie und Landwirtschaft (IfÖL), Kassel

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 30/2026

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3722 63 201 1
FB001702

Abschlussbericht

National Nitrogen Budget: Fortschreibung des nationalen Stickstoff-Inventars für die Jahre 2015 - 2020

von

Martin Bach

Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanage-
ment, Universität Gießen

Maximilian Kanig, Richard Beisecker

Ingenieurbüro für Ökologie und Landwirtschaft (IfÖL), Kassel

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

Durchführung der Studie:

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

Abschlussdatum:

Mai 2024

Redaktion:

Fachgebiet II 4.3, Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme
Markus Geupel

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7861>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2026

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

Kurzbeschreibung

Der Eintrag von Stickstoff in die Umwelt verursacht vielfältige Probleme. Für die Konzeption von Minderungsmaßnahmen ist es eine wesentliche Voraussetzung, die Quellen, Senken und Flüsse reaktiver Stickstoffverbindungen (N_r) zu quantifizieren. Im Rahmen des überarbeiteten Göteborg-Protokolls zur Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLTRAP) wurde 2012 vereinbart, die nationalen Stickstoff-Flüsse zu erfassen. Das „Guidance document on national nitrogen budgets“ der Economic Commission for Europe bildet dafür den Ausgangspunkt (ECE 2013). Die nationalen N-Flüsse für Deutschland wurden vom UBA erstmals für die Periode 2000 - 2004 erfasst (UBA 2009a) und dann für Folgeperioden fortgeschrieben (UBA 2015). Das erste nationale N-Inventar - synonym: die nationale N-Bilanz (NNB) - für die Jahre 2010 - 2014 von Bach et al. (2020) orientierte sich eng am Guidance Document der ECE (2013). Mit der vorliegenden vierten NNB wird die Bilanzierung für die Jahre 2015 - 2020 aktualisiert. In der NNB werden für acht Pools die ein- und ausgehenden N_r -Flüsse berechnet: Atmosphäre, Energiewirtschaft und Verkehr, Industrielle Produktion, Ernährung und Konsum, Landwirtschaft, Wald und semi-natürliche Flächen, Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung, Gewässer sowie die grenzüberschreitenden N-Flüsse (Importe und Exporte). Die N-Flüsse werden aus statistischen Berichten, Veröffentlichungen etc. direkt entnommen oder als Produkt aus transportierten bzw. umgesetzten Stoffmengen und deren mittleren N-Gehalten berechnet. Insgesamt werden für Deutschland rund 150 N-Flüsse beschrieben. In Deutschland werden jährlich $5.192 \text{ kt } N_r \text{ a}^{-1}$ in Umlauf gebracht (Mittelwert 2015 bis 2020), davon 51 % über die Ammoniak-Synthese. Die inländische Förderung und der Import von N-haltigen fossilen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle, Rohöl) tragen $1.246 \text{ kt } N \text{ a}^{-1}$ (24 %) dazu bei. Mit der Stickstoff-Fixierung als einzigem natürlichen Prozess werden $329 \text{ kt } N \text{ a}^{-1}$ in organisch gebundenen Stickstoff überführt. Als bedeutendste Senke von N_r werden mit der Verbrennung von fossilen und regenerativen Energieträgern sowie mit der Verarbeitung von Rohöl zu Mineralölprodukten $1.415 \text{ kt } N \text{ a}^{-1}$ wieder in N_2 überführt. In Gewässern, Böden und Kläranlagen werden $1.228 \text{ kt } N \text{ a}^{-1}$ denitrifiziert. Über die Atmosphäre und den Gewässerabfluss exportiert Deutschland netto $643 \text{ kt } N \text{ a}^{-1}$ in seine Nachbarländer und in die Küstenmeere. Die Änderung des N-Bodenvorrats wurde bislang nur für Waldböden ermittelt, für die ein Abbau von $293 \text{ kt } N \text{ a}^{-1}$ berechnet wird. Der NNB zufolge werden in Deutschland jährlich mehr als $1.800 \text{ kt } N_r \text{ a}^{-1}$ freigesetzt. Die NNB ist allerdings durch größere Unsicherheiten gekennzeichnet, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

Abstract

Emissions of reactive nitrogen (N_r) give rise to a wide range of environmental problems. In order to develop reduction measures it is necessary to quantify sources, sinks and flows of N_r , and as part of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLTRAP) it was agreed in the Gothenburg Protocol to construct national nitrogen budgets. The “Guidance document on national nitrogen budgets” of the Economic Commission for Europe forms the starting point for this task. The N_r -flows are determined for the following pools: Atmosphere, Energy and fuels, Material and products in industry, Humans and settlements, Agriculture, Forest and semi-natural vegetation, Waste, and Hydrosphere, as well as for the trans-boundary N-flows (imports and exports). The N-flows are taken directly from statistical reports, publications, etc., or are calculated as the product of the quantity of transported or converted substance and the mean nitrogen contents. Some 150 N-flows are described, and the uncertainty of the results is graded in four levels from “very low” to “high”. In Germany, approximately $5,192 \text{ kt } N_r$ is introduced into the nitrogen cycle every year (mean value from 2010 to 2014), of which 51% is by ammonia synthesis. Domestic extraction of nitrogenous fossil fuels (lignite, coal, crude oil) and imports

contribute ca. 1,246 kt N a⁻¹ (24%). Natural nitrogen fixation converts 329 kt N a⁻¹ into organically bound nitrogen. Conversely, processes involving the combustion of fossil fuels and regenerative fuels and the refining of crude oil to mineral oil products result in 1,415 kt N a⁻¹ being transformed to N₂. In waters, soils, and wastewater treatment plants, denitrification leads to the release of 1,228 kt N a⁻¹ as molecular nitrogen. Via the atmosphere and hydrosphere, Germany exports net 643 kt N a⁻¹ to neighbouring countries and the coastal waters. The changes in N-stock in soils have to date only been determined for forest soils, where they are calculated to 293 kt N a⁻¹. On balance, reactive nitrogen totalling more than 1,800 kt N_r is released in Germany every year, with negative impacts on the ecosystems and their functions. The national nitrogen budget involves considerable uncertainties, and this should be taken into consideration when interpreting the results.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	17
Zusammenfassung.....	19
Summary	23
1 Einleitung.....	27
2 Flüsse reaktiven Stickstoffs in Deutschland - Übersicht.....	29
2.1 Stickstoff-Pools, Sub-Pools und N-Flüsse	29
2.2 Ermittlung der N-Flüsse	33
2.3 Änderungen im nationalen N-Inventar 2015 - 2020 gegenüber Vorperiode	34
3 Atmosphäre (AT)	36
3.1 Landnutzung Deutschland	38
3.2 N ₂ O- und NO _x -Emissionen in die Atmosphäre	43
3.2.1 N ₂ O- und NO _x -Emissionen.....	43
3.2.2 NO _x -Bildung durch Blitze.....	44
3.3 NH ₃ -Emissionen in die Atmosphäre	44
3.4 Atmosphärische NH _y - und NO _x -Deposition.....	44
3.5 Import und Export von NH _y und NO _x	46
3.6 Zusammenfassung der N-Flüsse Atmosphäre (AT).....	47
3.7 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Atmosphäre	49
4 Energiewirtschaft und Verkehr (EF)	51
4.1 Energiewirtschaft (EF.EC).....	52
4.1.1 Herkunft und Verwendung fossiler Energieträger (XX-EF.EC-fuel, EF.EC-XX-fuel)	53
4.1.2 Bildung von thermischem NO _x	57
4.1.3 Herstellung von Kraftstoffen aus Biomasse (MP.FP-EF.EC-fuel).....	57
4.1.4 Ammoniak-Verbrauch für die Rauchgas-Entstickung (MP.NC-EF.EC-prod).....	58
4.1.5 Oxidation/Reduktion von Stickstoff bei Verbrennung und Entstickung (EF.EC-SINK-N ₂).....	59
4.2 Sub-Pools Industrielle Energieerzeugung (EF.IC), Transport und Verkehr (EF.TR) und Sonstige Energieerzeugung (EF.OE)	60
4.3 Zusammenfassung der N-Flüsse Energiewirtschaft und Verkehr (EF)	61
4.4 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Energiewirtschaft und Verkehr	63
5 Industrielle Produktion (MP)	65
5.1 Nahrungs- und Futtermittelindustrie (MP.FP)	67

5.1.1	Nahrungsmittel Humanernährung (MP.FP-HS.HB-food)	67
5.1.2	Futtermittel für Heimtiere (MP.FP-HS.HB-feed)	68
5.1.3	Landwirtschaftliche Pflanzen als industrielle Rohstoffe (MP.FP-MP.OP-crop)	69
5.1.4	Verwertung tierischer Nebenprodukte	69
5.1.5	Import und Export der Ernährungswirtschaft (RW-MP.FP-prod, MP.FP-RW-prod)	70
5.2	Stickstoff-Chemie (MP.NC)	71
5.2.1	Ammoniak-Synthese (SOURCE-MP.NC-NH3)	71
5.2.2	Produktion, Import und Export chemischer Erzeugnisse (MP.NC-MP.OP-prod, RW-MP.NC-prod, MP.NC-RW-prod)	72
5.2.3	Stickstoff-Mineraldünger (MP.NC-AG.SM-minFert; MP.NC-HS.MV-minFert)	73
5.3	Sonstige industrielle Produktion (MP.OP)	77
5.4	Zusammenfassung der N-Flüsse industrielle Produktion (MP)	78
5.5	Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Industrielle Produktion	80
6	Ernährung und Konsum (HS)	82
6.1	Menschliche Ernährung (HS.HB)	83
6.2	Konsumgüter (HS.MW)	83
6.3	Zusammenfassung der N-Flüsse Ernährung und Konsum (HS)	84
6.4	Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Ernährung und Konsum	85
7	Landwirtschaft (AG)	87
7.1	Tierproduktion (AG.AH)	90
7.1.1	Landwirtschaftliche Tierproduktion (XX.XX-AG.AH, AG.AH-XX.XX)	90
7.1.2	Aquakultur und Binnenfischerei (AG.AH-fish)	90
7.2	Bodenproduktion (AG.SM)	91
7.2.1	Bodenproduktion (XX.XX-AG.SM, AG.SM-XX.XX)	91
7.2.2	NO ₃ -Zufuhr mit Beregnungswasser (HY.GW-AG.SM-irrig)	92
7.2.3	Denitrifikation in landwirtschaftlich genutzten Mineralböden und organischen Böden (AG.SM-AT-N2)	92
7.2.4	Eintrag in Gewässer (AG.SM-HY.GW-leach, AG.SM-HY.GW-runoff)	92
7.3	Biogasproduktion (AG.BP)	93
7.4	Zusammenfassung der N-Flüsse Landwirtschaft (AG)	94
7.5	Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Landwirtschaft	96
7.5.1	Bilanzierung der N-Flüsse in der Landwirtschaft	96
7.5.2	N-Bodenvorrat und Vorratsänderung	97
7.5.3	Vergleich mit der N-Bilanzierung des BMEL	98

8	Wald und semi-natürliche Flächen (FS).....	99
8.1	Wald (FS.FO).....	100
8.1.1	Waldfläche	100
8.1.2	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden (AT-FS.FO-Nfix).....	101
8.1.3	Denitrifikation in Waldflächen (AT-FS.FO.N2)	101
8.1.4	Nitratauswaschung aus Waldböden (FS.FO-HY.SW-leach).....	101
8.1.5	Holzentnahme und Holzverwendung (FS.FO-MP.OP-wood, FS.FO-EF.OE-wood, FS.FO-RW-wood, RW-FS.FO-wood)	103
8.1.6	Bilanzierung und Vorratsänderungen Wald (Holzbestand und Waldböden)	104
8.1.7	Bilanzierung für Sub-Pool Wald	106
8.2	Semi-natürliche Flächen (FS.OL)	107
8.2.1	Biologische Stickstofffixierung in semi-natürlichen Flächen (AT-FS.OL-Nfix).....	107
8.2.2	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen (AT-FS.OL.N2).....	108
8.2.3	Nitratauswaschung aus semi-natürlichen Flächen (FS.OL-HY.SW-leach)	108
8.3	Feuchtgebiete (FS.WL)	108
8.3.1	Biologische Stickstofffixierung in Feuchtgebieten (AT-FS.WL-Nfix).....	108
8.3.2	N-Eintrag mit dem Zufluss von Oberflächenabfluss (AG.SM-FS.WL-runoff)	109
8.3.3	Denitrifikation in Feuchtgebieten (AT-FS.WL.N2)	109
8.3.4	Nitratauswaschung aus Feuchtgebieten (FS.WL-HY.SW-leach).....	109
8.4	Zusammenfassung der N-Flüsse Wald und semi-natürliche Flächen (FS)	109
9	Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung (WS)	112
9.1	Abfallwirtschaft (WS.SW).....	114
9.1.1	Aufkommen an Abfällen (XX.XX-WS.SW-waste).....	114
9.1.2	Verbleib der Abfälle (WS.SW-XX.XX-waste).....	116
9.1.3	Import und Export von Abfällen (RW-WS.SW-waste, WS.SW-RW-waste)	119
9.2	Abwasserentsorgung (WS.WW).....	119
9.2.1	Abwasser aus Haushalten, Industrie (Direkt- und Indirekteinleiter) und von den versiegelten Flächen	120
9.2.2	Klärschlammanfall und Verwertung (WS.WW-HS.MW-sludge, WS.WW-AG.SM- sludge, WS.WW-WS.SW-sludge).....	122
9.2.3	N-Eintrag in die Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft.....	123
9.2.4	Denitrifikation in kommunalen und nichtöffentlichen Kläranlagen (WS.WW-AT-N2) ...	123
9.3	Zusammenfassung der N-Flüsse Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung (WS)	124
9.4	Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung	125

10	Gewässer (HY)	129
10.1	Grundwasser (HY.GW)	131
10.1.1	Nitratauswaschung (AG.XX-HY.GW-leach, FS.XX-HY.GW-leach)	131
10.1.2	N-Flüsse aus dem Grundwasser (HY.GW-AT-N2, HY.GW-AG.SM-abstr, HY.GW-AG.SM-irrig, HY.GW-HY.SW-discharge)	132
10.2	Oberflächengewässer (HY.SW) und Küstengewässer (HY.CW).....	133
10.2.1	Eintrag in Oberflächengewässer aus Landwirtschaftsflächen (AG.SM-HY.SW-runoff) ..	133
10.2.2	Denitrifikation (Retention) in Oberflächengewässern und Küstengewässern (HY.SW-AT-N2, HY.CW-AT-N2).....	133
10.2.3	Grenzüberschr. Zu- und Abflüsse (RW-HY.SW-discharge, HY.SW-RW-discharge)	134
10.2.4	Meeresfischerei (HY.CW-MP.FP-fish)	135
10.3	Zusammenfassung der N-Flüsse Gewässer (HY).....	135
10.4	Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Gewässer.....	136
11	Grenzüberschreitende N-Flüsse (RW)	138
12	Darstellung der N-Flüsse mit STAN	141
13	Übersicht und Bilanzierung der N-Flüsse Deutschland	150
14	Fazit und Schlussfolgerungen.....	156
15	Danksagung	159
16	Quellenverzeichnis	160
A	Anhang	167

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Gliederung und Bezeichnungen der Pools der Inventarisierung der Stickstoffflüsse in Deutschland sowie in der Vorlage der ECE (2013), mit Angabe der Nummer des jeweiligen Anhangs (Annex) zum Guidance document on National Nitrogen Budgets (NNB), in dem der Pool erläutert wird.....	30
Tabelle 2-2:	Gliederung und Bezeichnungen der Sub-Pools des nationalen Stickstoff-Inventars Deutschland, Einteilung und Bezeichnungen nach ECE (2013, 2016; z.T. verändert).	31
Tabelle 2-3:	Kurzbezeichnungen der Matrices bzw. Transportprozesse in der Nomenklatur der N-Fluss-Codes.....	32
Tabelle 3-1:	Eingehende (Pool(in)) und ausgehende (Pool(ex)) N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“	36
Tabelle 3-2:	Flächen der CORINE Land Cover 2018-Nutzungsklassen (Mindestkartiergröße 5 ha), gruppiert nach IPCC-Landnutzungskategorien, und Zuordnung der PINETI-4 Rezeptortypen.	39
Tabelle 3-3:	Flächenangaben der Nutzungsarten nach verschiedenen Informationsquellen (Erläuterungen und Quellen s. Text).	42
Tabelle 3-4:	N ₂ O- und NO _x -Emissionen in Deutschland nach Quellbereichen (Sektoren), Mittel 2015 - 2020 (Quelle: NIR, UBA 2023, CRF-Tables 1 bis 5; UNFCCC 2023). ..	43
Tabelle 3-5:	NH ₃ -Emissionen in Deutschland, Mittel 2015 – 2020 (Quelle s. Text; für Pool Landwirtschaft s.a. Vos et al. 2022, Tab. 2.4). Zuordnung der CRF-Kategorien zu Quellbereichen s. Tabelle 3-4.	44
Tabelle 3-6:	Spezifische Depositionsraten reaktiven Stickstoffs pro Hektar für die Rezeptortypen im Modell PINETI-4, Mittel 2015 – 2019 (Quelle: Kranenburg et al. 2024).....	45
Tabelle 3-7:	N-Flüsse mit der atmosphärischen N-Deposition nach PINETI-4 (Kranenburg et al. 2024), Mittel 2015 – 2019.	46
Tabelle 3-8:	Import und Export von reduzierten (NH _y) und oxidierten (NO _x) atmosphärischen N-Verbindungen nach EMEP Source-Receptor-Tables, Mittel 2016 – 2020.	47
Tabelle 3-9:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“, Mittel 2016 – 2020.....	47
Tabelle 3-10:	Bilanzierung der reaktiven N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“ (ohne N-Flüsse mit Denitrifikation), Mittel 2015 – 2020.....	50
Tabelle 4-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“.	51
Tabelle 4-2:	Energiebilanz der Bundesrepublik (Auszug für fossile N-haltige Energieträger) - zusammengefasste und z.T. vereinfachte Ergebnisse und Zuordnung zu N-Flüssen, Mittel 2015 – 2020 (Quelle: AGEb 2022; verändert).....	54

Tabelle 4-3:	N-Flüsse mit der Einfuhr von Rohöl und Mineralölprodukten sowie den aus Rohöl hergestellten Mineralölprodukten (Umwandlungsbilanz), Mittel 2015 – 2020 (Quelle: AGEB 2022; veränd.).	56
Tabelle 4-4:	Anteil des thermischen NO _x am insgesamt bei der Verbrennung gebildeten NO _x .	57
Tabelle 4-5:	Anbauflächen, Erträge und N-Fluss mit nachwachsenden Rohstoffen zur Herstellung von Kraftstoffen (FNR 2022), Mittel 2015 - 2020.	58
Tabelle 4-6:	Abschätzung der N _r -Mengen, die mit der Verbrennung von fossilen Energieträgern und Holz (in Großfeuerungsanlagen) und der Rauchgas-Entstickung (Pool Energiewirtschaft) zu N ₂ oxidiert bzw. reduziert werden, Mittel 2015 – 2020.	60
Tabelle 4-7:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“, Mittel 2015 – 2020.	61
Tabelle 4-8:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“, Mittel 2015 - 2020.	63
Tabelle 5-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Industrielle Produktion“.	65
Tabelle 5-2:	Stickstoff-Fluss mit dem Verbrauch von Nahrungsmitteln (BMEL 2022a, Tab. 207), Mittel 2015 - 2020; nur zusammengefasste Produktgruppe dargestellt.	67
Tabelle 5-3:	Stickstoff-Fluss mit Futtermitteln für Hunde und Katzen, Mittel 2015 - 2020.	68
Tabelle 5-4:	Stickstoff-Fluss mit dem Anbau von landwirtschaftlichen Pflanzen als industrielle Rohstoffe (ohne Rohstoffe für Kraftstoffe), Mittel 2015 – 2020 (BMEL 2022a, Tab. 47 ff.).	69
Tabelle 5-5:	Verwendung tierischer Nebenerzeugnisse - Proteine (Mittel 2015 - 2020) und Zuordnung zu N-Flüssen (Quelle: Niemann; versch. J.).	70
Tabelle 5-6:	Import und Export der Ernährungswirtschaft (ohne Futtermittel) und Netto-Import Futtermittel, Mittel 2014 – 2020 (BMEL 2022a).	71
Tabelle 5-7:	Produktion, Import und Export von Erzeugnissen der Stickstoff-Chemie, Mittel 2015 – 2020 (Quelle: DESTATIS 2023, 2023b; IVA 2020, 2024).	74
Tabelle 5-8:	Produktion, Import und Export von N-haltigen Erzeugnissen der Konsumgüterindustrie, Mittel 2015 – 2020 (Quelle: DESTATIS 2023; 2023b).	77
Tabelle 5-9:	Eingehende und ausgehende N-Mengen der N-Flüsse im Pool „Industrielle Produktion“, Mittel 2015 – 2020.	78
Tabelle 5-10:	Summen der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse in den Sub-Pools sowie des Pools „Industrielle Produktion“ insgesamt (ohne interne N-Flüsse), Mittel 2015 - 2020.	80
Tabelle 6-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Ernährung und Konsum“.	82
Tabelle 6-2:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Ernährung und Konsum“, Mittel 2015 – 2020.	84
Tabelle 6-3:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse (ohne landwirtschaftliche Produkte) im Pool „Ernährung und Konsum“, Mittel 2015 – 2020.	86

Tabelle 7-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Landwirtschaft“	88
Tabelle 7-2:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse im Sub-Pool „Tierproduktion“ (Landwirtschaft ohne Binnenfischerei und Aquakultur), Mittel 2015 – 2020.....	90
Tabelle 7-3:	N-Flüsse des N-Inventars für Sub-Pool „Bodenproduktion“, Mittel 2015 – 2020.....	91
Tabelle 7-4:	N-Flüsse des N-Inventars für Sub-Pool „Biogasproduktion“, Mittel 2015 – 2020.....	93
Tabelle 7-5:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Landwirtschaft“, Mittel 2015 – 2020.....	94
Tabelle 7-6:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Pool „Landwirtschaft“, Mittel 2015 – 2020; <i>kursiv: als Differenz berechneter N-Fluss</i>	96
Tabelle 8-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“.....	99
Tabelle 8-2:	Waldfläche (in 1000 ha) nach Kohlenstoffinventur 2017 (Riedel und Hennig 2019).....	101
Tabelle 8-3:	Literaturergebnisse zur Nitratauswaschung unter Waldflächen (nach Beisecker et al. 2012; ergänzt).....	102
Tabelle 8-4:	Berechnung der jährlichen N-Flüsse mit der Entnahme und Verwendung sowie dem Import und Export von Holz (Thünen-Institut 2016a), Mittel 2015 - 2020.....	103
Tabelle 8-5:	Mittelwert, Standardfehler und Median der jährlichen Stickstoff-Vorratsänderung ($\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) im Auflagehumus und im Boden (nach Tiefenstufen) der Wälder in Deutschland, Veränderung gem. Ergebnis der zweiten Bodenzustandserhebung Wald (BZE II, 2006 - 2008) im Vergleich zur BZE I (1987 - 1993) (Andreae et al. 2016, Tab. I-5-1).....	105
Tabelle 8-6:	Holzvorrat (2017) und Änderung des Vorrats 2017 gegenüber der 3. Bundeswaldinventur (2012) im Wald nach Kohlenstoffinventur 2017 (Thünen-Institut 2019).....	106
Tabelle 8-7:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse sowie Vorratsänderungen im Sub-Pool „Wald“, Mittel 2015 - 2020.....	107
Tabelle 8-8:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“, Mittel 2015 – 2020.....	109
Tabelle 9-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“.....	112
Tabelle 9-2:	Aufkommen an Abfällen (Auszug, nur mutmaßlich N-haltige Abfallarten aufgeführt) und Zuordnung der Herkunft zu vier Sub-Pools, Mittel 2014/2016/2018/2020 (Quelle: DESTATIS 2022b).....	115
Tabelle 9-3:	Verbleib der Abfälle, Zuordnung zu drei N-Flüssen (nur mutmasslich N-haltige Abfallarten aufgeführt, jew. „gefährliche“ und „nicht gefährliche“ Abfälle zusammen), Mittel 2015 - 2020 (Quelle: DESTATIS 2022b).....	117

Tabelle 9-4:	N-Flüsse mit dem Import und Export von zustimmungspflichtigen Abfallstoffen, Mittel 2015 – 2020 (UBA 2022b).....	119
Tabelle 9-5:	N-Anfall im Abwasser (Schmutzwasser) aus Haushalten, von versiegelten Flächen und von industriellen Einleitern.....	121
Tabelle 9-6:	Klärschlammentsorgung insgesamt aus öffentlicher und nichtöffentlicher Abwasserbehandlung, Jahr 2016-2019 (DESTATIS 2022c; Tab. 1.1, schriftl. Mitteilung DESTATIS 2024) und Zuordnung zu N-Flüssen.....	122
Tabelle 9-7:	Stickstoff-Einträge in Oberflächengewässer mit dem Ablauf aus kommunalen Kläranlagen sowie aus dem Kanalisationssystem (Siedlungswasserwirtschaft) nach MoRE-Modellierung, Mittel 2016 - 2018 (Morling et al. 2024).....	123
Tabelle 9-8:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“, Mittel 2015 – 2020.	124
Tabelle 9-9:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Sub-Pool „Abfallwirtschaft“, Mittel 2015 – 2020	126
Tabelle 9-10:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Sub-Pool „Abwasserentsorgung“, 2016 – 2019 (teilweise 2015 - 2020); <i>kursiv: als Differenz berechneter N-Fluss</i>	127
Tabelle 10-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Gewässer“.....	129
Tabelle 10-2:	N-Flüsse mit der Nitratauswaschung in den Sub-Pool „Grundwasser“.....	131
Tabelle 10-3:	Ausgehende N-Flüsse aus dem Sub-Pool „Grundwasser“ (Mittel 2016 – 2018); <i>kursiv: als Differenz berechneter N-Fluss</i>	133
Tabelle 10-4:	Stickstoff-Einträge in Oberflächengewässer aus der Landwirtschaft über lateralen Stofftransport nach MoRE-Modellierung, Mittel 2016 – 2018 (Morling et al. 2024).....	133
Tabelle 10-5:	N-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss und Abfluss oberirdischer Gewässer, Mittel 2015 – 2020.....	134
Tabelle 10-6:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Gewässer“, Mittel 2015 – 2020.	135
Tabelle 10-7:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Pool „Gewässer“, Mittel 2015 – 2020; <i>kursiv: geschätzte bzw. als Differenz berechnete N-Flüsse</i>	137
Tabelle 11-1:	Importe und Exporte (eingehende und ausgehende N-Flüsse) im Pool „Grenzüberschreitende N-Flüsse“, Mittel 2015 – 2020.	138
Tabelle 11-2:	Saldierung der Importe und Exporte von reaktivem Stickstoff nach Pools bzw. Sub-pools, Mittel 2015 – 2020.	139
Tabelle 13-1:	Erzeugung (Neubildung, Netto-Importe und Förderung aus Lagerstätten) und Entsorgung (Reduktion zu N ₂ , grenzüberschreitender Transport, Deponierung) von reaktivem Stickstoff in Deutschland, Mittel 2015 – 2020.	150
Tabelle 13-2:	Gegenüberstellung der Summen der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse auf der Ebene der Pools, Mittel 2015 – 2020.....	152
Tabelle 13-3:	Mengen und Anteile der wichtigsten N-Verbindungen und Emittentengruppen an der Gesamtemission reaktiven Stickstoffs aus anthropogenen Quellen in Luft und Gewässer, Mittel 2015 – 2020.....	153

Tabelle A-1:	Gegenüberstellung der N-Flüsse (alle Pools) des ersten (Mittel 2010 - 2014) und zweiten (Mittel 2015 – 2020) nationalen N-Inventars Deutschland (in kt N a ⁻¹) und Bemerkungen zu Veränderungen.	167
--------------	---	-----

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 12-1:	Stickstoff-Pools und N-Flüsse (in kt N a ⁻¹ , Mittel 2015 – 2020) des nationalen N-Inventars Deutschland.	141
Abbildung 12-2:	Pool „Atmosphäre“ (AT, Atmosphere) mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a ⁻¹ , Mittel 2015 – 2020).	142
Abbildung 12-3:	Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ (EF, Energy and Fuels) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a ⁻¹ , Mittel 2015 – 2020).	143
Abbildung 12-4:	Pool „Industrielle Produktion“ (MP, Materials and Products) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a ⁻¹ , Mittel 2015 – 2020).	144
Abbildung 12-5:	Pool „Ernährung und Konsum“ (HS, Humans and Settlements) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a ⁻¹ , Mittel 2015 – 2020).	145
Abbildung 12-6:	Pool „Landwirtschaft“ (AG, Agriculture) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a ⁻¹ , Mittel 2015 – 2020).	146
Abbildung 12-7:	Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“ (FS, Forest and Semi-natural Vegetation) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a ⁻¹ , Mittel 2015 – 2020).	147
Abbildung 12-8:	Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“ (WS, Waste) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a ⁻¹ , Mittel 2015 – 2020).	148
Abbildung 12-9:	Pool „Gewässer“ (HY, Hydrosphere) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a ⁻¹ , Mittel 2015 – 2020).	149
Abbildung 13-1:	Emission von reaktivem Stickstoff aus anthropogenen Quellen nach Stickstoff-Spezies und Emittentengruppen in die Luft (NO _x , NH ₃ , N ₂ O) und in Gewässer (NO ₃), Mittel 2015 - 2020.	154
Abbildung 13-2:	Gesamtmenge und sektorale Anteile der Emissionen von reaktiven Stickstoffverbindungen aus anthropogenen Quellen in Luft und Oberflächengewässer in Deutschland in fünf Inventurperioden.	155

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BZE I	Erste Bodenzustandserhebung Wald 1987 - 1993
BZE II	Zweite Bodenzustandserhebung Wald 2006 - 2008
CLC2006	CORINE Land Cover 2006 (digitale Karte der Landbedeckung Deutschland, Stand 2006)
CLC2012	CORINE Land Cover 2012 (digitale Karte der Landbedeckung Deutschland, Stand 2012)
(C)LRTAP	(Convention on) Long-Range Transboundary Air Pollution (Genfer Luftreinhalteabkommen)
CO₂(eq)	CO ₂ -Äquivalent
CRF	Common Reporting Format (GHG Inventory Submissions data tables)
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
ECE	Economic Commission for Europe (UN-Wirtschaftskommission für Europa)
EMEP	European Monitoring and Evaluation Program
EPNB	Expert Panel on Nitrogen Budgets
EVA	EG-Abfallstatistikverordnung
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GENESIS	Datenbank des Statistischen Bundesamts
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
kt	Kilotonne (1 kt = 10 ⁶ kg)
LULCC	Land Use and Land Cover Change
n.b.	nicht berücksichtigt; nicht berechnet
N	Stickstoff
N₂O	Distickstoffoxid (Lachgas)
NH₃	Ammoniak
NH₄	Ammonium
NH_y	Reduzierte gasförmige Stickstoffverbindungen (NH ₃ , NH ₄)
NIR	Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar
NNB	National Nitrogen Budget (Nationales Stickstoff-Inventar)
NO₂	Stickstoffdioxid (als Atmosphäregas); Nitrit (im Gewässer gelöst)
NO₃	Nitrat
NO_x	Oxidierter gasförmiger Stickstoffverbindungen (NO, N ₂ O)
N_r	Reaktive Stickstoffverbindungen allgemein
N(org)	Stickstoffhaltige organische Verbindungen
N(ges)	N-Gesamtmenge (Summe aller N-Spezies)
PINETI	Pollutant Input and Ecosystem Impact (Modellierung der atmosphärischen Deposition)

Abkürzung	Erläuterung
PRTR	Pollutant Release and Transfer Register (Europäisches Schadstoffregister)
TJ	Terajoule (1 TJ = 10^{12} J)
UBA	Umweltbundesamt (Deutschland)
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

Zusammenfassung

Stickstoff ist als Bestandteil von Proteinen und anderen Verbindungen für alle Lebensformen unentbehrlich. Der Mensch hat in den letzten einhundert Jahren in keinen anderen geochemischen Stoffkreislauf so stark eingegriffen wie in den Stickstoffkreislauf. Der übermäßige Eintrag von reaktiven Stickstoffverbindungen in die Umwelt verursacht zahlreiche Probleme wie unter anderem den Verlust aquatischer und terrestrischer Biodiversität, die Bildung von Treibhausgasen, die Verschlechterung der Luftqualität sowie die Nitratbelastung des Grundwassers und von Meeresökosystemen. Die Belastungsgrenzen der globalen Ökosysteme für Stickstoff gelten mittlerweile als deutlich überschritten. Die Verminderung der Stickstoffemissionen ist daher eine zentrale Aufgabe der Umweltpolitik. Stickstoff tritt in der Umwelt in zahlreichen Bindungsformen (N-Spezies) in Erscheinung: Ammoniak/Ammonium (NH_3/NH_4), Stickstoffoxide (NO , NO_2), Distickstoffoxid bzw. Lachgas (N_2O), Nitrat (NO_3), Nitrit (NO_2) sowie organisch gebundener Stickstoff (N_{org}) in vielfältigen Verbindungen in Boden, Pflanzen, Tieren, Nahrungs- und Futtermitteln, Industrieprodukten usw. Für die Entwicklung von Minderungsstrategien ist es eine wesentliche Voraussetzung, zunächst die relevanten Quellen, Senken und Flüsse reaktiver Stickstoffverbindungen (N_r) zu identifizieren.

Im Rahmen des überarbeiteten Göteborg-Protokolls zur Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLTRAP) wurde 2012 vereinbart, die nationalen Stickstoff-Flüsse zu erfassen. Mit dem „Guidance document on national nitrogen budgets“ (ECE 2013) ist dazu ein Handbuch zur Ermittlung von Nationalen Stickstoff-Bilanzen erarbeitet worden, das den Ausgangspunkt der vorliegenden Untersuchung darstellt.

In der vorliegenden Struktur wurde das nationale N-Inventar erstmalig für die Jahre 2010 - 2014 berechnet (Bach et al. 2020). Die vorliegende Aktualisierung führt das N-Inventar für die Jahre 2015 - 2020 weiter. Die N_r -Flüsse in Deutschland werden für acht sogenannte Pools (Wirtschaftssektoren bzw. Umweltbereiche) ermittelt, die im Regelfall in Sub-Pools untergliedert sind. Für jeden Pool bzw. Sub-Pool werden der N-Austausch (eingehende und ausgehende N-Flüsse) mit den anderen Pools bzw. Sub-Pools sowie die grenzüberschreitenden N-Flüsse (Import und Export) ermittelt. Die N-Flüsse werden in den meisten Fällen entweder unmittelbar aus statistischen Berichten und anderen Veröffentlichungen entnommen oder berechnet, als Produkt aus der transportierten bzw. umgesetzten Stoffmenge (Matrix) multipliziert mit dem mittleren N-Gehalt der Matrix. Transportmedien sind Luft, Wasser, Biomasse (bspw. pflanzliche und tierische Agrarprodukte, Nahrungsmittel) und industrielle Erzeugnisse (wie z.B. Mineraldünger, Kunststoffe, Konsumgüter usw.). Insgesamt werden rund 150 N-Flüsse beschrieben, die Ergebnisse geben im Regelfall jeweils den Mittelwert der Jahre 2015 bis 2020 wieder.

Der Pool „Atmosphäre“ umfasst die Emissionen und Depositionen von NO_x , N_2O und NH_y . Datenquelle zu NO_x - und N_2O -Emissionen ist der Nationale Inventarbericht (UBA 2023), die NH_3 -Emissionen werden dem CLRTAP-Report entnommen (EEA 2022) und die NH_y - und NO_x -Deposition gehen auf PINETI-4 (Kranenburg et al. 2024) zurück. In der Summe wurden in Deutschland 927 kt N a^{-1} emittiert und 550 kt N a^{-1} aus der Atmosphäre deponiert, im Saldo der grenzüberschreitenden N-Flüsse haben 296 kt N a^{-1} das Bundesgebiet über die Atmosphäre verlassen.

Der Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ beschreibt die N-Flüsse, die im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Brennstoffen und der Energieerzeugung durch Verbrennungsprozesse auftreten. Datenbasis ist die Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland (AGEB 2022). Die Zufuhr von 1.674 kt N a^{-1} erfolgt fast ausschließlich mit den importierten bzw. im Inland geförderten fossilen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle, Rohöl). Es wird davon ausgegangen, dass der in den Energieträgern in großer Menge enthaltene Stickstoff während der Verbrennung

respektive bei der Verarbeitung von Rohöl zu Mineralölprodukten nahezu vollständig - bis auf das dabei gebildete NO_x - zu N_2 umgewandelt wird. Dieser Annahme kann jedoch im Rahmen des Projekts nicht weiter überprüft werden, so dass die Bilanzierung für diesen Pool als unsicher einzustufen ist.

Im Pool „Industrielle Produktion“ werden die N-Flüsse erfasst, die mit der Herstellung und (nicht-energetischen) Verwendung von N-haltigen Erzeugnissen verbunden sind. Der N-Abfluss des Sub-Pools „Nahrungs- und Futtermittelindustrie“ über die Herstellung von Nahrungsmitteln für die menschliche Ernährung sowie von Futtermitteln für landwirtschaftliche Nutztiere und Heimtiere beträgt $2.532 \text{ kt N a}^{-1}$. Die Produktionsmengen sind verschiedenen Tabellen des Statistischen Jahrbuchs Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMEL 2022) zu entnehmen. Im Zentrum des Sub-Pools „Stickstoff-Chemie“ steht die Synthese von $2.627 \text{ kt N a}^{-1}$ Ammoniak mittels des Haber-Bosch-Verfahrens. Dies ist die Ausgangsmenge an N_r , aus der alle weiteren N-haltigen Verbindungen im Bereich der Chemie- und der Konsumgüterindustrie synthetisiert werden. Mit $1.282 \text{ kt N a}^{-1}$ wird ein bedeutender Teil davon für die Herstellung von Mineraldüngern verwendet. Zentrale Statistik zu den Produktionsmengen des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland ist die Produktionserhebung (DESTATIS 2023). Die Auswertung der Produktionserhebung für die hier vorliegende Fragestellung ist allerdings nur eingeschränkt möglich. Zum einen kann in der Produktionserhebung nicht eindeutig zwischen Gütern als Vorprodukten und zum Endabsatz unterschieden werden, so dass Doppelzählungen auftreten, zum anderen sind viele Angaben aus Datenschutzgründen gesperrt. Diese Problematik verursacht eine erhebliche Diskrepanz in der Bilanzierung: der N-Fluss mit chemischen Grundstoffen und Erzeugnissen (Vorprodukten) aus dem Sub-Pool „Chemische Industrie“ in den dritten Sub-Pool „Sonstige industrielle Produktion“ (i.e. Konsumgüter) hinein beträgt $1.553 \text{ kt N a}^{-1}$, während der N-Fluss mit den daraus hergestellten Konsumgütern zum Absatz an Endverbraucher nach Produktionserhebung nur mit 150 kt N a^{-1} berechnet wird.

Der Pool „Ernährung und Konsum“ beinhaltet die N-Flüsse von zusammen $1.032 \text{ kt N a}^{-1}$, die mit Ernährung, Wohnen, Haushalt und Güterkonsum der Bevölkerung verknüpft sind. Importe und Exporte werden in diesem Pool nicht berücksichtigt, da Einfuhr und Ausfuhr von Nahrungs- und Konsumgütern bereits im Pool „Industrielle Produktion“ erfasst sind, weitere grenzüberschreitende N-Flüsse in den privaten Bereich hinein bzw. heraus treten nicht auf. Die N-Abflüsse aus diesem Pool erfolgen im Wesentlichen mit Abwasser und Abfällen aus den Haushaltungen.

Der Pool „Landwirtschaft“ nimmt eine zentrale Stellung im N-Flussschema ein, mit den N-Flüssen in und aus dem Sektor Landwirtschaft wird die größte Menge an reaktivem Stickstoff in die Umwelt eingebracht. Die N-Flüsse werden weitgehend aus der Veröffentlichung der nationalen Stickstoff-Bilanzierung des BMEL übernommen. Für den Pool „Landwirtschaft“ wird als Prämisse angenommen, dass die Summen der Zufuhren der Summe der Abfuhren entspricht (jeweils $3.200 \text{ kt N a}^{-1}$). Bezieht man die N-Flüsse zwischen den drei Sub-Pools „Tierproduktion“, „Pflanzenproduktion“ und „Biogas“ mit ein, dann beläuft sich der N-Umsatz innerhalb der Landwirtschaft auf rund $6.000 \text{ kt N a}^{-1}$. Einer ersten, vorläufigen Abschätzung zufolge könnte der Abbau des N-Bodenvorrats in den landwirtschaftlich genutzten Mineral- und Moorböden in einer Größenordnung von ca. 500 kt N a^{-1} liegen. Aufgrund der großen Unsicherheit wird dieser Wert in der N-Inventarisierung allerdings nicht weiter berücksichtigt.

Der Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“ fasst die N-Flüsse in allen natürlichen und naturnahen Ökosystemen außerhalb der Landwirtschaft zusammen. Die N-Flüsse mit der Holzentnahme und Holzverwendung gehen auf eine Untersuchung des Thünen-Instituts (2023) zurück.

Im Vergleich zu den übrigen Pools ist der N-Zufluss in diesen Bereich mit rund 312 kt N a⁻¹ gering; der Abbau des N-Vorrats von 293 kt N a⁻¹ in den Waldböden wird dabei nicht berücksichtigt.

Im Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“ werden die N-Flüsse mit der Sammlung, Behandlung und Entsorgung von festen und flüssigen Abfällen dargestellt. Die Statistik über die Abfallentsorgung erlaubt es allerdings nicht, den Materialfluss vom Primär-Aufkommen an Abfallstoffen über die verschiedenen Aufbereitungs- und Sortierschritte, das Recycling von Material und schließlich den Endverbleib (Deponie, Verbrennung) schlüssig nachzuvollziehen. Weiterhin sind die Annahmen zu den N-Gehalten der einzelnen Abfallarten nur grobe Schätzwerte. Die Ergebnisse von 277 kt N a⁻¹ als Input und 686 kt N a⁻¹ als Output der Abfallwirtschaft stellen daher nur Anhaltswerte dar. Im Bereich der Abwasserentsorgung werden rund 500 kt N a⁻¹ umgesetzt, wobei der N-Zufluss mit Schmutzwasser nur geschätzt werden kann.

Der Pool „Gewässer“ umfasst die N-Einträge und den Transport in Grundwasser (einschließlich der ungesättigten Zone), Oberflächengewässern und Küstenmeeren. Wesentliche N-Flüsse in der Hydrosphäre werden dabei modellbasiert mit dem Flussgebietsmanagementsystem MoRE (Modeling of Regionalized Emissions; Fuchs et al. 2017a) ermittelt. Von den gesamten N-Einträgen in das Gewässersystem von 1.148 kt N a⁻¹ entfallen rd. 910 kt N a⁻¹ auf die Nitratauswaschung ins Grundwasser, wovon ca. 88 % aus der Landwirtschaft stammen. Die Bilanzierung für den Pool „Gewässer“ geht von der Prämisse aus, dass die NO₃-Menge im Grundwasser in Deutschland zeitlich konstant ist, das heißt, dass Zufluss, Abbau durch Denitrifikation und Abfluss von Nitrat sich im Fließgleichgewicht befinden und somit keine Änderung des NO₃-Vorrats im Aquifer stattfindet. Mit dieser Prämisse wird eine Denitrifikation (Retention) in der ungesättigten Zone (unterhalb der Wurzelzone), im Grundwasser und in Oberflächengewässern von zusammen 722 kt N a⁻¹ berechnet. Mit der N-Fracht im Gewässerabfluss verlassen 382 kt N a⁻¹ das Bundesgebiet in die Nordsee und Ostsee bzw. zu Unterliegern.

Im Pool „grenzüberschreitende N-Flüsse“ sind die N_r-Importe nach Deutschland und N_r-Exporte aus Deutschland für alle Pools zusammengefasst, das heißt N-Flüsse mit Ursprung oder Verbleib außerhalb des Bundesgebietes. Der Import-Export-Saldo Deutschlands beträgt 283 kt N a⁻¹ (ohne Berücksichtigung des N-Fluss mit Energieträgern). Dieser Saldo setzt sich aus zwei gegensätzlichen Komponenten zusammen: (i) Mit dem atmosphärischen Transport von gasförmigen N_r-Verbindungen sowie mit dem N-Abfluss in den Gewässern „exportiert“ Deutschland (netto) mit 517 kt N a⁻¹ eine beträchtliche Menge an reaktivem Stickstoff (NO₃, NH₃, NO_x) in seine Nachbarländer bzw. in die Meere (Anmerkung: abweichend vom N-Flussschema in ECE (2013) wird hier die N-Einleitung in die Küstenmeere ebenfalls dem Export zugerechnet). (ii) Diesem Netto-Export im Bereich der N_r-Flüsse in der Biosphäre steht ein Netto-Import von 799 kt N a⁻¹ mit Erzeugnissen der Nahrungs- und Futtermittelindustrie sowie der chemischen Industrie gegenüber (Energieträger ausgeklammert). Die Landwirtschaft weist zwar einen Futtermittelimport von 382 kt N a⁻¹ auf, was ca. 19 % der Gesamtmenge an Stickstoff (Rohprotein) in den insgesamt eingesetzten Futtermitteln entspricht. Auf der anderen Seite ist Deutschland aber auch Exporteur von unverarbeiteten und verarbeiteten Agrarprodukten (Getreide, Fleisch, Milchprodukte), so dass mit Lebensmitteln und Futtermitteln im Saldo nur ein vergleichsweise geringer Import-Überschuss von 229 kt N a⁻¹ auftritt.

Mit Hilfe der Inventarisierung der N-Flüsse kann unter anderem ermittelt werden, welche Menge an reaktivem Stickstoff jährlich neu geschaffen bzw. in Umlauf gebracht wird und wieviel von diesem N_r wieder zu molekularem Stickstoff (N₂) reduziert bzw. oxidiert wird. An der Gesamtmenge von jährlich 5.192 kt „frischem“ N_r hat die Ammoniak-Synthese (Haber-Bosch-Ver-

fahren) mit rund 51 % den größten Anteil. In ähnlicher Größenordnung liegt der Beitrag der inländischen Förderung bzw. des (Netto-)Imports von N-haltigen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle, Rohöl). Bei der Verbrennung dieser Energieträger werden ca. 190 kt N a^{-1} thermisches NO_x gebildet. Auf die Stickstoff-Fixierung in Böden als einzigem natürlichen Prozess gehen mit $329 \text{ kt N}_r \text{ a}^{-1}$ nur rund 6 % der gesamten N_r -Zufuhr zurück (die NO_x -Bildung durch Blitzschlag ist vernachlässigbar). Als bedeutendste Senke tritt die Energiewirtschaft in Erscheinung, in deren Bereich infolge der Entstickung der Rauchgase $1.415 \text{ kt N}_r \text{ a}^{-1}$ mit der Verbrennung von Energieträgern in N_2 überführt werden. Trotzdem besteht hier weiteres Minderungspotential. Die Denitrifikation in Gewässern, Böden und Kläranlagen von zusammen $1.293 \text{ kt N a}^{-1}$ trägt als natürlicher Vorgang mit rund 38 % zum Verschwinden von N_r bei. Mit chemischen Produkten und mit Erzeugnissen der Nahrungs- und Futtermittelindustrie (incl. Rohholz, Abfallstoffen und Wirtschaftsdünger) werden zusammen 799 kt N a^{-1} (netto) importiert, während über die Gewässer und die Atmosphäre (netto) zusammen 643 kt N a^{-1} an Nachbarstaaten bzw. in die Küstemeere abgegeben werden, so dass der gesamte Import-Export-Saldo (ohne Energiewirtschaft) 283 kt N a^{-1} beträgt, bezogen auf die Nordsee und Ostsee als räumliche Systemgrenze der Inventarisierung.

Zwischen der Erzeugung (einschließlich Förderung und Netto-Import) von jährlich 5.192 kt reaktivem Stickstoff und dem Abbau von 3.353 kt N tritt eine Differenz von 1.839 kt N auf. Diese Differenz von rund 35 % (bezogen auf die N_r -Erzeugung) kann unter zwei Blickwinkeln interpretiert werden.

- (i) Die Differenz entspricht dem Überschuss der Nationalen N-Bilanz Deutschlands, das heißt die Menge an reaktivem N in der Umwelt wird jährlich um diesen Betrag vermehrt („die N-Kaskade befeuert“).
- (ii) Die Differenz ist auf die Unsicherheiten in der Ermittlung der N-Flüsse zurückzuführen. Das betrifft zum einen die unzureichenden statistischen Datengrundlagen zu den Warenströmen und deren N-Gehalten im Bereich der Güterwirtschaft, zum anderen die unzureichende Kenntnis über die Einflussfaktoren und Umsatzraten der biochemischen Prozesse, mit den Stickstoff sowohl gebunden als auch wieder denitrifiziert wird.

Bei der Interpretation der Ergebnisse der Inventarisierung der nationalen N-Flüsse sind diese Unsicherheiten zu berücksichtigen. Für besser abgesicherte Werte bzw. für zukünftige Aktualisierungen muss die statistische Datenbasis für eine Reihe von N-Flüssen verbessert werden, wobei die fachliche Unterstützung durch die entsprechenden Einrichtungen unabdingbar ist.

Unbeschadet dieser Einschränkungen ist aber festzuhalten, dass die jährliche Netto-Freisetzung von reaktivem Stickstoff in Deutschland in einer Größenordnung von etwa $1.800 \text{ kt N a}^{-1}$ anzusetzen ist. Das wirft die Frage auf, in welchen Umweltmedien und in Form welcher N-Spezies dieser jährliche N_r -Zuwachs verbleibt. Es ist unstrittig, dass dringend wirksame Maßnahmen ergriffen werden müssen, mit denen die Emission reaktiven Stickstoffs in die Umwelt deutlich vermindert wird.

Summary

Nitrogen is essential for all forms of life, and it forms an integral part of proteins and many other compounds. Over the past century, humans have intervened in the nitrogen cycle more than in any other geochemical cycle. The excessive release of reactive nitrogen into the environment causes numerous problems, including the loss of aquatic and terrestrial biodiversity, the formation of greenhouse gases, air pollution, and increased nitrate levels in groundwater and marine ecosystems. The planetary boundaries for nitrogen have clearly been crossed, and the reduction of nitrogen emissions must therefore be a key goal of environmental policies. Nitrogen occurs in a variety of forms (N-species) such as ammonia/ammonium ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$), nitrogen oxides (NO , NO_2), nitrous oxide (N_2O), nitrate (NO_3^-), nitrite (NO_2^-) as well as nitrogen in organic compounds (N_{org}) in soils, vegetation, animals, food and feed, manufacturing products, etc. For the development of a reduction strategy it is necessary first to identify the relevant sources, sinks, and flows of reactive nitrogen (N_r).

In the revised Gothenburg Protocol to the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLTRAP) it was agreed to develop national nitrogen budgets. The “Guidance document on national nitrogen budgets” (ECE 2013) forms the starting point for our investigation. Reactive nitrogen flows in Germany are determined for eight pools (economic sectors or environmental media).

In the present structure, the national N inventory was calculated for the first time for the years 2010 - 2014 (Bach et al. 2020). The present update continues the N inventory for the years 2015 - 2020. For each pool and the relevant sub-pools, the nitrogen inflows and outflows to and from the other pools and sub-pools are determined, as well as trans-boundary N-flows (imports and exports). In most cases, the values for the N-flows are either taken directly from statistical reports and other publications, or they are calculated as the product of the transported or converted quantity of matrix multiplied by the mean N-contents of the matrix. Transport media are air, water, biomass (e.g. agricultural products, foodstuffs) and industrial products (e.g. mineral fertiliser, plastics, or consumer goods). A total of some 150 nitrogen flows are described, and the results usually are given as the annual mean over the period 2015 to 2020.

The “Atmosphere” pool includes the emissions and depositions of NO_x , N_2O , and NH_y . Data for NO_x and N_2O emissions are taken from the National Inventory Report (UBA 2023), for NH_3 emissions from the CLRTAP Report (EEA 2022), and figures for NH_y and NO_x depositions are based on PINETI-4 (Kranenburg et al. 2024). In total, 927 kt N a^{-1} were emitted in Germany and 550 kt N a^{-1} deposited from the atmosphere. Net trans-boundary N-flows of 296 kt N a^{-1} left federal territories via the atmosphere.

The “Energy and Fuels” pool includes the N-flows arising in the course of energy conversion and the use of fuels in combustion processes. Data is drawn from the Energy Balance for Germany (AGEB 2022). The inflow of 1,674 kt N a^{-1} is almost exclusively contained in the imported and domestically extracted fossil fuels (lignite, coal, crude oil). We assume that the large amounts of nitrogen in the fuels are mostly converted to molecular nitrogen during combustion processes or the refining of crude oil, with the exception of NO_x that is formed. However, this assumption could not be tested further, so that the balance for this pool remains very uncertain.

The “Materials and Products in Industry” pool includes the N-flows associated with the production and (non-energetic) use of products containing nitrogen. The N-outflow of the sub-pool “Food and Feed Processing” from the production of food for human consumption and feed for agricultural livestock and pets totals 2,532 kt N a^{-1} . The production quantities are provided in various tables of the Annual Statistics on Food, Agriculture and Forests (BMEL 2022). The main

contributor in the “Nitrogen Chemistry” sub-pool is the synthesis of 2,627 kt N a⁻¹ of ammonia by means of the Haber-Bosch process. This is the starting quantity of N_r from which all further compounds containing nitrogen in the chemical and consumer goods industry are produced. Nearly half of this (1,282 kt N a⁻¹) is used for the production of mineral fertiliser. The main source of statistics on production in the manufacturing sector in Germany is the Production Survey (DESTATIS 2023). However, this is not very well suited to our purposes. One problem is that the Production Survey does not clearly distinguish between precursor products and end products, which leads to double counting. In addition, many details are not disclosed for reasons of data protection. This results in a considerable discrepancy in the balance. The N-flow with chemicals and (intermediate) products from the sub-pool “Nitrogen Chemistry” into the third sub-pool “Other Producing Industry” is 1,553 kt N a⁻¹, whereas the N-flow with the resultant consumer goods for sale to consumers according to the Production Survey is only 150 kt N a⁻¹.

The “Humans and Settlements” pool contains N-flows totalling 1,032 kt N a⁻¹ that are associated with nutrition, housing, households, and domestic consumption. Imports and exports of food, feed and consumer goods are already included in the pool “Material and Products in Industry”, and there are no further trans-boundary N-flows into or out of the private sector. The N-out-flows from this pool are mainly contained in sewage and waste from the households.

The “Agriculture” pool is a central element of the nitrogen budget, accounting for the largest quantities of reactive nitrogen released into the environment. The figures for N-flows in this case are mostly taken from the National Nitrogen Budget for Agriculture of BMEL. For the “Agriculture” pool, it is assumed that the sum of the inflows equals to the sum of the outflows (3,200 kt N a⁻¹ in each case). Including the N-flows between the sub-pools “Animal husbandry”, “Soil management”, and “Biogas production”, the nitrogen turnover within agriculture is about 6,000 kt N a⁻¹. As a preliminary estimate, the depletion of N-stocks in the agriculturally used mineral soils and organic soils could be in the order of 500 kt N a⁻¹. However, in view of the considerable uncertainty, this value is not considered for inclusion in the N-budget.

The “Forest and semi-natural vegetation” pool comprises the N-flows in natural and near-natural ecosystems apart from agriculture. The N-flows associated with wood removals and wood use are based on the report of the Thünen Institute (2023). The N-inflow of 312 kt N a⁻¹ is small in comparison with the other pools. The depletion of the N-stock of 293 kt N a⁻¹ in the forest soils is not taken into consideration.

The “Waste” pool includes the N-flows occurring with the collection, treatment, and disposal of solid waste and wastewater. However, it is not possible to draw reliable conclusions from the statistics regarding the material flows from the primary waste materials through the various stages of sorting and treatment, the recycling of materials, until final disposal (waste depots, incineration). Furthermore, only rough estimates could be made of the nitrogen contents of the various types of waste. The figures of 277 kt N a⁻¹ as input and 686 kt N a⁻¹ as solid waste output are therefore only approximate estimates. In the “Wastewater” sub-pool there is a turnover of ~500 kt N a⁻¹, although the N-inflow with sewage can only be estimated.

The “Hydrosphere” pool includes the N inputs and transported quantities in groundwater (including the unsaturated zone), surface waters, and coastal seas. Key N-flows in the “Hydrosphere” are determined on the basis of the river basin management system MoRE (Modelling of Regionalized Emissions; Fuchs et al. 2017a). Of the total N inputs into the “Hydrosphere” of 1,148 kt N a⁻¹, nitrate leaching accounts for 910 kt N a⁻¹, with nearly 88% of this is attributable to agriculture. The “Hydrosphere” budget is based on the premise that the amount of NO₃⁻ in the groundwater in Germany is constant over time, i.e. that inflow, denitrification, and outflow of nitrate are in dynamic equilibrium and there is thus no change in the NO₃⁻ stock in the aquifer. On

this basis, denitrification totalling 722 kt N a⁻¹ was calculated in the unsaturated zone (below the root zone), in groundwater and in surface waters. With the N-contents in surface waters, 382 kt N a⁻¹ leaves German territories and flows into the North Sea or Baltic Sea or to downstream neighbours.

Finally, "Trans-boundary N-flows" are the N_r imports and N_r exports for all pools, i.e. N-flows which originate or end outside Germany. The balance of imports and export accounts to 283 kt N a⁻¹ (not including the N-flow with fuels). This balance is made up of two opposing components: (i) With the atmospheric transport of gaseous N_r and the N-outflow in its waters, Germany "exports" net 517 kt N a⁻¹ of reactive nitrogen (NO₃⁻, NH₃, NO_x) to neighbouring countries or into the sea. (As a simplification, the N-discharges into coastal waters are also classed as exports, in contrast to the nitrogen flow scheme). (ii) Against this export of N_r flows in the biosphere, there is a net import of 799 kt N a⁻¹ with products from food and feed processing and the chemical industry (excluding fuels). Agriculture imports in feed account for 382 kt N a⁻¹, corresponding to 19% of the nitrogen (crude protein) in the total amount of animal feed. At the same time, Germany is also an exporter of unprocessed and processed agricultural produce (cereals, meat, dairy products), so that food and feed only accounts for a relatively small trade deficit of 229 kt N a⁻¹.

An aim of the national balance of N-flows is to determine what amounts of reactive nitrogen are newly created every year or are brought into circulation, and how much of this N_r is reduced or oxidised to molecular nitrogen (N₂). Of the annual total of 5,192 kt "fresh" N_r, some 51% is the result of ammonia synthesis (Haber-Bosch process). Domestic extraction of fossil fuels or net import of fuels containing nitrogen (lignite, coal, crude oil) make a similar contribution. The combustion of this fuel results in the formation of 190 kt N a⁻¹ of thermal NO_x. Nitrogen fixation in soils totalling 329 kt N_r a⁻¹, accounts for only about 6% of the total N_r increase. The most important reductions in reactive nitrogen are made in the energy sector, where molecular nitrogen is released by flue gas denoxing plants after the conversion of 1,415 kt N_r a⁻¹ from the combustion of fuels. Denitrification in waters, soils, and wastewater treatment plants totalling 1,293 kt N a⁻¹ accounts as a natural process for some 38 % of the conversion of N_r into molecular N₂. With chemical products and food and feed (including raw timber, waste materials and sludge) 799 kt N a⁻¹ (net) are imported, while 643 kt N a⁻¹ (net) are exported to neighbouring states or coastal seas via hydrosphere and atmosphere. Thus, the overall import-export-balance (without the energy-pool) is calculated to 283 kt N a⁻¹, in relation to the North Sea and Baltic Sea as the spatial system boundary of the inventory.

Between the production (including extraction and net imports) of 5,192 kt a⁻¹ of reactive nitrogen annually and the reduction of 3,353 kt N a⁻¹, there is a difference of 1,839 kt N a⁻¹, which can be interpreted in two ways:

- (i) The difference corresponds to the surplus in Germany's National N budget, i.e. the amount of reactive N in the environment is increased annually by this amount ("accelerating the N-cascade").
- (ii) The difference is attributable to the uncertainties in determining N-flows as the result of inadequate statistics about goods flows and the N-contents of commodities, and the lack of knowledge about factors influencing the biochemical processes with which nitrogen is bound and denitrified.

When interpreting the results, these uncertainties should be taken into consideration. In order to obtain more reliable and updated values in future, the statistical data for N-flows must be improved, which will require the support of specialists from the relevant institutions.

However, despite these limitations, it can be concluded that the annual net release of reactive nitrogen in Germany is currently in the order of 1,800 kt N a⁻¹. There is a consensus that effective measures should be adopted as a matter of urgency in order to significantly reduce the amounts of reactive nitrogen emitted into the environment.

1 Einleitung

Seit der Entwicklung des Haber-Bosch-Verfahrens zur großtechnischen Ammoniak-Synthese vor rund 100 Jahren hat der Mensch den natürlichen Stickstoffkreislauf massiv verändert. Durch die wachsende landwirtschaftliche Produktion, die Energiegewinnung aus Verbrennungsprozessen sowie den Verkehr wird, der Einschätzung von Galloway et al. (2008) zufolge, mittlerweile jährlich zwei- bis dreimal mehr reaktiver Stickstoff (N_r) in die Umwelt freigesetzt als durch natürliche Prozesse. Damit hat der Mensch in keinen anderen geochemischen Stoffkreislauf so stark eingegriffen wie in den Stickstoffkreislauf. Die Belastungsgrenzen der globalen Ökosysteme (planetary boundaries) für reaktiven Stickstoff sind mittlerweile deutlich überschritten (Steffen et al. 2015).

Der Eintrag von reaktiven Stickstoffverbindungen in die Umwelt verursacht zahlreiche Probleme, die dringend einer Lösung bedürfen. Dazu zählen der Verlust aquatischer und terrestrischer Biodiversität, Schäden für die menschliche Gesundheit infolge der Verschlechterung der Luftqualität, die verstärkte Freisetzung von Treibhausgasen mit den bekannten Folgen für die weltweite Klimaerwärmung, der Verlust an Artenvielfalt durch überhöhte N-Depositionen aus der Atmosphäre und nicht zuletzt die Belastung von Grundwassersvorkommen und Küstenökosystemen mit Nitrat. Bei den meisten dieser Umweltprobleme sind in Deutschland nach wie vor keine oder nur geringe positive Entwicklungen erkennbar (UBA 2021a).

Das Thema „Stickstoff“ steht daher - neben dem Klimawandel - im Fokus der Umweltpolitik. Als grundlegende Bestandsaufnahmen und Problembeschreibungen sind unter anderem das Hintergrundpapier des Umweltbundesamtes zu einer multimedialen Stickstoff-Emissionsminderungsstrategie (UBA 2009b), das European Nitrogen Assessment (Sutton et al. 2011), das Sondergutachten des SRU (2015) „Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem“, das Strategiepapier des Umweltbundesamtes (2015) „Reaktiver Stickstoff in Deutschland“ sowie der Erste Stickstoffbericht der Bundesregierung (BMUB 2017) zu erwähnen. Auch Salomon et al. (2016) betonen die Notwendigkeit einer integrierten Stickstoffstrategie für Deutschland.

Wesentliche Voraussetzung einer derartigen Strategie ist es, die relevanten Quellen, Senken und Flüsse reaktiver Stickstoffverbindungen innerhalb eines Betrachtungsraums zu kennen. Diese Aufgabe soll die hier vorgestellte Untersuchung leisten, mit der die Flüsse der einzelnen N_r -Spezies (NH_3/NH_4 , NO_3 , N_2O , NO , NO_2 , N_{org}) erfasst werden, die in Deutschland mit der Herstellung und Verwendung von Gütern sowie durch natürliche Prozesse jährlich umgesetzt werden. Dazu werden acht Wirtschaftssektoren bzw. Umweltbereiche betrachtet, im Folgenden als Pools bezeichnet, für welche die eingehenden und ausgehenden N-Flüsse ermittelt werden.

Die Berechnung von N-Flüssen wurde auf der internationalen Ebene im Rahmen des Göteborg-Protokolls zur Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLTRAP) vereinbart. Mit dem „Guidance document on national nitrogen budgets“ (ECE 2013) wurde vom Expert Panel on Nitrogen Budgets (EPNB) innerhalb der Task Force on Reactive Nitrogen ein Handbuch zur Ermittlung von Nationalen Stickstoff-Inventaren (National Nitrogen Budget, NNB) erarbeitet. Erste Ansätze für Deutschland wurden vom UBA (2009a, 2009b, 2015) vorgestellt. In der vorliegenden Struktur wurde das nationale N-Inventar erstmalig für die Jahre 2010 - 2014 berechnet (Bach et al. 2020). Die hier vorgestellte Aktualisierung führt das N-Inventar für die Jahre 2015 - 2020 weiter. Die Aktualisierung ist in Bezug auf Methodik und verwendete Datenquellen weitgehend identisch mit dem nationalen N-Inventar 2010 - 2014, der vorliegende UBA-Text ist daher in vielen Abschnitten - bis auf die aktuelleren Zahlenwerte - m.o.w. identisch mit UBA-Texte 64/2020 (Bach et al. 2020). Die wichtigsten Unterschiede zwischen den beiden Inventaren sind im Kapitel 2.3 und in Tabelle A-1 (Anhang A) zusammengefasst.

Mit der Inventarisierung der nationalen N-Flüsse wird die ökosystemare Stickstoff-Kaskade (vgl. Galloway et al. 2003; Leip et al. 2011) nicht nur für die Landwirtschaft, sondern auch für die übrigen Wirtschaftssektoren beschrieben. Die Ermittlung der N-Flüsse zwischen den Sektoren sowie des Austauschs mit Atmosphäre und Hydrosphäre dient unter anderem folgenden Fragestellungen:

- ▶ Wie viel reaktiver Stickstoff wird jährlich neu in Umlauf gebracht („mit welcher Menge an N_r wird die Stickstoffkaskade befeuert“)?
- ▶ Mit welchen Emissionsmengen der unterschiedlichen N_r -Spezies ist derzeit jährlich zu rechnen?
- ▶ Aus welchen Quellen stammt dieser N_r und über welche Prozesse wird er erzeugt?
- ▶ Wo verbleibt der N_r ? Welche Menge wird wieder in molekularen Stickstoff (N_2) überführt (über Verbrennung oder Denitrifikation), wieviel wird in Speichern (u.a. Böden, Deponien, Holzzuwachs) als organisch gebundener N längerfristig festgelegt, und welche N_r -Menge bleibt in Biosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre im Umlauf und kann (potenziell) Umweltbelastungen verursachen?
- ▶ Wie belastbar ist die Datenbasis zur Abschätzung der genannten Mengen bzw. Flüsse: ist die N_r -Massenbilanz für Deutschland insgesamt (einigermaßen) geschlossen, oder sind Datenlücken zu Herkunft und/oder Verbleib von N_r insgesamt oder einzelnen N-Spezies festzustellen?

2 Flüsse reaktiven Stickstoffs in Deutschland - Übersicht

2.1 Stickstoff-Pools, Sub-Pools und N-Flüsse

Die Methodik zur Ermittlung der Stickstoff-Flüsse für Deutschland sowie die Terminologie orientieren sich am „Guidance document on national nitrogen budgets“ (ECE 2013). Folgende Begriffe werden verwendet:

- ▶ *Reaktiver Stickstoff* (N_r) bezeichnet Stickstoff in allen Bindungsformen (N-Spezies), die für Organismen potenziell leicht verfügbar sind: Ammoniak/Ammonium (NH_3/NH_4 , teilw. zusammengefasst als NH_y), Stickstoffoxide (NO , NO_2 , zusammengefasst als NO_x), Distickstoffoxid (N_2O), Nitrat (NO_3) sowie Stickstoff in vielfältigen organischen Verbindungen in Boden, Pflanzen, Tieren, Nahrungs- und Futtermitteln, industriellen Produkten usw (N_{org}).
- ▶ *Pools* bezeichnen hier die betrachteten Systemelemente, die in relevantem Umfang reaktiven Stickstoff mit anderen Pools bzw. Sub-Pools austauschen und/oder intern umsetzen. Pools entsprechen Umweltmedien (Atmosphäre, Hydrosphäre), Wirtschaftssektoren (Produzierende Industrie, Haushalt und Konsum, Landwirtschaft) oder Landnutzungsformen (Wald, Feuchtgebiete). Mit dem Begriff Pool wird vorrangig ein Umsatzraum bzw. eine Systemeinheit abgegrenzt; das Verständnis von Pool im engeren Sinne als „Vorrat“ (Bestand an N_r) trifft nur für wenige Pools zu (Wald, Landwirtschaft, Gewässer), in denen tatsächlich eine - im Vergleich zu den ein- und ausgehenden N-Flüssen – größere Menge an N_r gespeichert ist (in Böden, Holzbestand, Grundwasser).
- ▶ Pools werden gegebenenfalls in *Sub-Pools* untergliedert, um interne N-Flüsse zwischen Untereinheiten eines Pools zu erfassen. Sub-Pools sind die kleinsten Inventareinheiten, für welche eingehende und ausgehende N-Flüsse (sowie gegebenenfalls Bestandsänderungen) erfasst werden.
- ▶ *N-Flüsse* beschreiben die Transport- bzw. Umsatzmengen der einzelnen reaktiven N-Spezies zwischen den Pools bzw. Sub-Pools innerhalb des nationalen N-Inventars (Territorium der Bundesrepublik Deutschland einschließlich der Küstengewässer) und über die Systemgrenzen hinweg (Importe und Exporte) sowie die Quellen, Senken und Vorratsänderungen von N_r . Weiterhin werden auch die Transformation von molekularem Stickstoff (N_2) in reaktiven Stickstoff (über Ammoniaksynthese, biologische N-Fixierung oder durch Verbrennungsprozesse) sowie der umgekehrte Prozess (z.B. Denitrifikation) als N-Flüsse aufgeführt.

Die Einteilung der Pools und Sub-Pools orientiert sich weitgehend an der Gliederung der Wirtschaftssektoren, die von IPCC und UNFCCC für die nationalen Treibhausgas-Emissionsinventare vorgegeben werden (IPCC 2003, 2006; EEA 2013). Die Pools werden durch eine zweibuchstabile Pool-ID gekennzeichnet (Tabelle 2-1), die Sub-Pools durch eine nachgestellte zweibuchstabile ID (Tabelle 2-2). Das nationale N-Inventar für Deutschland verwendet die gleichen ID's wie die englischen Vorgaben des NNB Annex 0 (ECE 2013).

Die N-Flüsse zwischen Pools bzw. Sub-Pool werden codiert in der Form: **AB.CD-EF.GH-matrix**, mit

AB.CD	Pool.Sub-Pool, von dem der N-Fluss ausgeht (Pool(ex))
EF.GH	Pool.Sub-Pool, in den der N-Fluss eingeht (Pool(in))
matrix	Transportmatrix, Medium, Güterstrom.

Die Bedeutungen der Endungen „-matrix“ sind in Tabelle 2-3 aufgeführt.

In den Kapiteln 3 bis 11 sind die Ergebnisse für die insgesamt acht Pools sowie die grenzüberschreitenden N-Flüsse dargestellt (Übersicht s. Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Gliederung und Bezeichnungen der Pools der Inventarisierung der Stickstoffflüsse in Deutschland sowie in der Vorlage der ECE (2013), mit Angabe der Nummer des jeweiligen Anhangs (Annex) zum Guidance document on National Nitrogen Budgets (NNB), in dem der Pool erläutert wird.

Pool-ID	Bezeichnung N-Inventar Deutschland	Bezeichnung NNB Annex 0 (ECE 2013)	Kapitel
AT	Atmosphäre	Atmosphere (Annex 8)	3
EF	Energiewirtschaft und Verkehr	Energy and Fuels (Annex 1) ^a	4
MP	Industrielle Produktion	Materials and Products in Industry (Annex 2)	5
HS	Ernährung und Konsum	Human and Settlements (Annex 6)	6
AG	Landwirtschaft	Agriculture (Annex 3)	7
FS	Wald und semi-natürliche Flächen	Forest and Semi-natural Vegetation (Annex 4)	8
WS	Abfall- und Abwasserwirtschaft ^b	Waste (Annex 5) ^a	9
HY	Gewässer	Hydrosphere (Annex 7)	10
RW ^b	Grenzüberschreitende N-Flüsse (N-Importe und Exporte)	„Rest of the World“, trans-boundary nitrogen flows	11

^a Zum Redaktionsschluss des vorliegenden Inventars lag der Anhang „Waste“ (Annex 5) noch nicht vor.

^b „Grenzüberschreitende N-Flüsse“ sind kein Pool in der Definition des ECE (2013).

In jedem Kapitel wird einführend eine Übersicht zu den N-Flüssen des betreffenden Pools gegeben. Diese Tabellen (Tabelle 3-1, Tabelle 4-1 usw.) sind einheitlich aufgebaut: Für jeden Pool bzw. Sub-Pool werden zunächst alle N-Flüsse aufgeführt, die in den Pool bzw. Sub-Pool eingehen (Inflows), anschließend die ausgehenden N-Flüsse (Outflows), jeweils in der Reihenfolge des Ausgangs- und des Eingangs-Pools bzw. -Sub-Pools wie in Tabelle 2-2 gelistet. In Spalte 5 der Tabellen sind die relevanten N_r-Spezies aufgeführt, die mit der jeweiligen Matrix transportiert werden. In Spalte 6 ist das Kapitel angegeben, in dem die Berechnung des N-Flusses erläutert wird.

Tabelle 2-2: Gliederung und Bezeichnungen der Sub-Pools des nationalen Stickstoff-Inventars Deutschland, Einteilung und Bezeichnungen nach ECE (2013, 2016; z.T. verändert).

Pool-ID	Sub-Pool-ID	Bezeichnung im nationalen N-Inventar Deutschland	Bezeichnung in den NNB Annexes (ECE 2013)	Kapitel
AT	--	Atmosphäre	Atmosphere	3
EF	EF.EC	Energiewirtschaft	Energy and Fuels – Energy Conversion	4.1
	EF.IC	Industrielle Energieerzeugung	Energy and Fuels – Manufacturing Industries and Construction	4.2
	EF.TR	Transport und Verkehr	Energy and Fuels – Transport	4.3
	EF.OE	Sonstige Energieerzeugung	Energy and Fuels – Other Energy and fuels	4.4
MP	MP.FP	Nahrungsmittel- und Futtermittelindustrie	Materials and Products in Industry – Food and Feed Processing	5.1
	MP.NC ^a	Stickstoff-Chemie (stickstoffhaltige Produkte)	Materials and Products in Industry – Nitrogen Chemistry ^a	5.2
	MP.OP	Sonstige industrielle Produktion	Materials and Products in Industry – Other Producing industry	5.3
HS	HS.HB ^b	Menschliche Ernährung und Heimtiere	Humans and Settlements – Human Body	6.1
	HS.MW	Konsumgüter, Wohnen, urbane Gebiete	Humans and Settlements – Material World	6.2
AG	AG.AH	Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement)	Agriculture – Animal Husbandry ^c	7.1
	AG.SM	Bodenproduktion	Agriculture – Soil Management	7.2
	AG.BG	Biogaserzeugung	(in Annex 6 kein Sub-Pool definiert)	7.3
FS	FS.FO	Wald (Forst)	Forest and Semi-natural vegetation – Forest	8.1
	FS.OL	Semi-natürliche Flächen (außer Wald und Feuchtgebieten)	Forest and Semi-natural vegetation – Other land	8.2
	FS.WL	Feuchtgebiete	Forest and Semi-natural vegetation – Wetland	8.3
WS	WS.SW	Abfallwirtschaft	Waste – Solid waste	9.1
	WS.WW	Abwasserentsorgung	Waste – Wastewater	9.2
HY	HY.GW	Grundwasser	Hydrosphere – Groundwater	10.1
	HY.SW	Oberflächengewässer	Hydrosphere – Surface water	10.2
	HY.CW	Küstengewässer	Hydrosphere – Coastal water	10.3
RW^d	--	Grenzüberschreitende N-Flüsse (N-Importe und Exporte)	„Rest of the World“, Transboundary nitrogen flows	11

^a Abweichende Bezeichnung in ECE (2013) Annex 2: MP.CI, Industrial Processes - Chemical Industry.

^b Definition hier weicht ab von ECE (2013, 2016).

^c ECE (2013) definiert weiteren Sub-pool „Manure Management and Storage“, wird hier in „Animal Husbandry“ integriert.

^d „Grenzüberschreitende N-Flüsse“ sind kein Pool in der Definition des ECE (2013).

Tabelle 2-3: Kurzbezeichnungen der Matrices bzw. Transportprozesse in der Nomenklatur der N-Fluss-Codes.

Flusscode Endung	Matrix	Beschreibung
-abstr	Wasser	Grundwasserförderung zur Trinkwasserversorgung
-animProd	Tierische Erzeugnisse	Erzeugnisse aus der Haltung von landwirtschaftlichen Nutztieren (Milch, Fleisch, Eier, Wolle, Leder)
-atmDep	Luft	Atmosphärische N-Deposition (NO _x , NH _y)
-compost	Komposte	Kompost (aus Siedlungsabfällen)
-cosub	Biomasse	Cosubstrate außerlandwirtschaftlicher Herkunft für Biogasanlagen
-crop	Pflanzliche Biomasse	Erntesubstanz landwirtschaftlicher Nutzpflanzen
-digest	Gärreste	Gärreste aus Biogasanlagen
-discharge	Wasser	Wasserfluss in Oberflächengewässern und Grundwasser; Einleitung von (gereinigtem) Abwasser aus Kläranlagen
-feed	Futtermittel	Futtermittel für landwirtschaftliche Nutztiere und Heimtiere
-fish	Fisch	Fischereierzeugnisse (aus Fischerei und Aquakultur)
-food	Nahrungsmittel	Nahrungsmittel für die menschliche Ernährung
-fuel	Rohöl; Brennstoff	Rohöl, Steinkohle, Braunkohle und sonstige Energieträger; zur Verwendung zur Energieerzeugung
-gasEm	Luft	Emission gasförmiger N-Verbindungen (NH ₃ , NO _x , N ₂ O) in die Atmosphäre
-gasN	Luft	Gasförmige N _r -Verbindungen in der Atmosphäre insges. (NH ₃ , NO _x , N ₂ O)
-irrig	Wasser	Bewässerung (Grundwasser und Oberflächenwasser zur Feldberegnung)
-leach	Wasser	Nitratverlagerung mit dem Sickerwasser
-manure	Gülle, Mist	Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung (Gülle, Jauche, Mist, Trockenkot)
-minFert	Mineraldünger	N-haltige Mineraldüngemitteln (Handelsdünger)
-N2	Luft	Denitrifikation (Freisetzung von N ₂)
-Nfix	Biomasse	Symbiotische Stickstofffixierung in Böden
-orgFert	Organische Dünger	N-haltige organische Düngemittel
-prod	Industrie- und Konsumgüter	N-haltige Industrieprodukte (Vorprodukte) und Konsumgüter (non-food)
-runoff	Wasser	Lateraler Wasserabfluss von Landoberflächen, umfasst Oberflächenabfluss (Runoff) und Bodenerosion sowie Ausfluss aus Drainagen
-seed	Pflanzen	Saat- und Pflanzgut in der Landwirtschaft

Flusscode Endung	Matrix	Beschreibung
-sewage	Abwasser	Abwasser (Schmutzwasser und Tagwasser) aus Haushalten und Industrie
-sludge	Klärschlamm	Klärschlamm aus der Abwasserbehandlung
-waste	Abfallstoffe	Abfallstoffe aus der Industrie und dem Siedlungsbereich
-wood	Holz	Entnahme (Einschlag auf Forstflächen) und Verwendung von Holz

2.2 Ermittlung der N-Flüsse

Die N-Flüsse werden in der Regel entweder unmittelbar aus statistischen Veröffentlichungen übernommen oder nachfolgendem Ansatz berechnet:

$$\text{N-Fluss (kt N a}^{-1}\text{)} = \text{Transportierte/umgesetzte Stoffmenge (t Matrix a}^{-1}\text{)} \\ * \text{mittlerer N-Gehalt in der Matrix (kg N t}^{-1}\text{)} * 10^{-6}.$$

Transportmedien (Matrices) sind Luft, Wasser, Biomasse (bspw. pflanzliche und tierische Agrarprodukte) und industrielle Erzeugnisse (bspw. Mineraldünger, Kunststoffe, Konsumgüter usw.). Bezugszeitraum sind im Regelfall die Kalenderjahre 2015 bis 2020, für welche die N-Flüsse einzeln ermittelt wurden. Im vorliegenden Bericht werden nur die über den Zeitraum 2015 - 2020 gemittelten Werte der N-Flüsse dargestellt, die Einzelwerte der Jahre 2015 - 2020 können auf Anfrage vom UBA bezogen werden. Das Kapitel, in dem die Datenquellen bzw. die Berechnung eines N-Flusses erläutert wird, ist jeweils in Spalte 6 der einführenden Übersichtstabelle zu den N-Flüssen jedes Pools angegeben.

Soweit wie möglich wurden die Angaben zu N-Flüssen bzw. zu den transportierten/umgesetzten Stoffmenge und zugehörigen N-Gehalten aus offiziellen Statistiken und Berichten herangezogen. Dies betrifft insbesondere Berichte etc., deren Berechnungsmethodik bzw. Modellansätze seit längerem etabliert und gut dokumentiert sind und deren Ergebnisse in der umweltpolitischen Debatte auf der nationalen bzw. internationalen Ebene als Referenzwerte dienen. Dabei sind insbesondere zu erwähnen:

- ▶ Emission klimarelevanter und luftqualitätsbeeinflussender N-Verbindungen: Deutsche Berichterstattung zu atmosphärischen Emissionen (UBA 2022)
- ▶ Gasförmige Emissionen aus der Landwirtschaft: Thünen Report 91 (Vos et al. 2022)
- ▶ Atmosphärische Deposition (NH_y , NO_x): Modell LOTOS-EUROS (UBA-Projekt PINETI-4; Kranenburg et al. 2024)
- ▶ N-Bilanzierung für die Landwirtschaft: Stickstoffbilanzierung für Deutschland (BMEL 2022b)
- ▶ N-Einträge in Oberflächengewässer und Grundwasser: Modell MoRE (Fuchs et al. 2017a, Morling et al. 2024).

Die Ermittlung der N-Flüsse bzw. die Aufbereitung und Zuordnung von statistischen Angaben orientiert sich im Regelfall an der Struktur und den Inhalten der verwendeten Statistiken. Für jeden Pool sind in einer Übersichtstabelle am Ende des betreffenden Kapitels alle berücksichtigten N-Flüsse aufgeführt; als untere Erfassungsgrenze gilt in der Regel ein N-Fluss von 1 kt N pro Jahr (wobei aus Gründen der vollständigen Abbildung von Statistiken teilweise auch kleinere N-Flüsse aufgenommen wurden).

Im Idealfall sollten die Bilanzen sowohl für die einzelnen Pools auch für das nationale N-Inventar als Ganzes geschlossen sein, das heißt

$$\Sigma N(\text{Inflows}) - \Sigma N(\text{Outflows}) \pm \Delta \text{Vorrat} = 0.$$

In der Praxis zeigt sich, dass diese Annahme häufiger nicht zutrifft. Dies kann mehrere Ursachen haben:

- ▶ Lücken, Fehler oder Inkonsistenzen in den statistischen Datengrundlagen zur Mengenangabe von N-Flüssen (Naturalmengen der Matrix) bzw. der Vorratsänderungen
- ▶ Nicht erfasste N-Flüsse
- ▶ Unsicherheiten in den Angaben bzw. natürlicherweise vorhandene Schwankungsbreiten des (mittleren) N-Gehalts in der transportierten Matrix
- ▶ Kenntnislücken zu einzelnen N-Umsatzprozessen.

Eine größere Abweichung der Bilanzgleichung von Null ist ein Hinweis darauf, dass die Ergebnisse mit einer gewissen Vorsicht interpretiert werden sollten und dass die Datengrundlagen für den betreffenden Pool noch Verbesserungsbedarf aufweisen.

Für die Interpretation und Bewertung der Ergebnisse zu N-Flüssen ist, neben deren absoluten Werten, auch die Güte bzw. die Unsicherheit der berechneten Daten maßgeblich. Angaben zu den Stoffflüssen (Mengengerüst) basieren im Regelfall auf statistischen Quellen und weisen methodisch bedingte Ungenauigkeiten in der Erfassung bzw. der Abgrenzung der betrachteten Stoffflüsse (Matrices) auf. Auch für die Werte der N-Gehalte in den betrachteten Matrices liegen häufig unterschiedliche Angaben aus verschiedenen Quellen vor. Für einige N-Flüsse sind derzeit überhaupt noch keine belastbaren Daten verfügbar, in diesen Fällen wurde für die vorliegende Untersuchung Schätzwerte verwendet. Im Bericht zum ersten nationalen N-Inventar 2010 - 2014 (Bach et al. 2020) wird die Unsicherheit der einzelnen N-Flüsse semi-quantitativ bewertet. Diese Bewertungen gelten für das nationale N-Inventar 2015 - 2020 unverändert und werden daher hier nicht erneut aufgeführt, interessierte Leser*innen seien auf Bach et al. (2020) verwiesen.

Anmerkung: Mit der Inventarisierung der N-Flüsse in Deutschland wurde und wird teilweise methodisches Neuland betreten. Als Datengrundlagen zu Materialflüssen und N-Gehalten wurden zahlreiche Statistiken, Tabellenwerke und Berichte ausgewertet, teilweise werden Annahmen in die Berechnungen eingeführt. Trotz größtmöglicher Sorgfalt bei der Bearbeitung kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Autorinnen und Autoren in einigen Fällen Statistiken oder Tabellenwerte nicht korrekt interpretiert oder übernommen haben. Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass gegebenenfalls zu einzelnen Sachverhalten aussagekräftigere Daten oder Annahmen verfügbar sind, die bei der Bearbeitung der vorliegenden Untersuchung aber übersehen worden sind. Die Autorinnen und Autoren sind daher dankbar für Hinweise und Anregungen, die zur Verbesserung des nationalen N-Inventars Deutschland beitragen.

2.3 Änderungen im nationalen N-Inventar 2015 - 2020 gegenüber Vorperiode

In der vorliegenden Veröffentlichung wird durchgängig die Bezeichnung "Nationales N-Inventar" verwendet, im Unterschied zum ersten Inventar, in dem von der "Nationalen N-Bilanzierung" gesprochen wurde. Nach Auffassung der Autorinnen und Autoren beschreibt der Begriff "Inventar" die Zusammenstellung der N-Flüsse zwischen Pools bzw. Sub-Pools zutreffender (analog zum NIR - National Inventory Report zur Erfassung der Emission von Treibhausgasen);

"Bilanz" bzw. "Bilanzierung" werden nur dann verwendet, wenn tatsächlich der Saldo zwischen ein- und ausgehenden N-Flüssen berechnet und interpretiert wird.

Die N-Flüsse des nationalen N-Inventars für den aktuellen Zeitraum 2015 - 2020 und die Vorperiode 2010 - 2014 (Bach et al. 2020) sind in Tabelle A-1 (Anhang A) gegenübergestellt. Für einzelne N-Flüsse werden in den Fußnoten zur Tabelle methodische Aspekte bzw. Veränderungen zwischen den beiden Perioden erläutert. Die größte Änderung betrifft die Annahme zum N-Gehalt im Rohöl, für den statt 1,0 % jetzt 0,1 % angesetzt wurde. Mit dem Wert von 1,0 % wurde eine N-Einfuhr mit Rohöl von 930 kt N und für die anschließende Umwandlung von Energieträgern (Verarbeitung von Rohöl zu Mineralölprodukten) ein N_r -Schwund von 818 kt N berechnet wurde (Tab. 4-3 in Bach et al. 2020). Mangels anderweitiger Informationen wurde dieser Schwund als Denitrifikation betrachtet und als eigener N-Fluss in das N-Inventar 2010 - 2014 aufgenommen. Mit einem N-Gehalt von 0,1 % (in Verbindung mit einem geringfügigen Rückgang der Rohöl-Importmenge) reduziert sich der N-Fluss mit dem Import von Rohöl auf 90 kt N im Mittel der Jahre 2015 - 2020 und die Umwandlungsbilanz wird mit rund -20 kt negativ (Tabelle 4-3). Diese Differenz liegt in der Größenordnung der statistischen Datenunsicherheiten und erfordert keine gesonderte Betrachtung, der N-Fluss EF.EC-SINK-N₂ wird daher im N-Inventar 2015 - 2020 nicht mehr aufgeführt. Infolge dieser Änderung reduzieren sich auch die Summen zum N-Import mit Energieträgern (Tabelle 11-1), dem Saldo von Import und Export der Energiewirtschaft (Tabelle 11-2) um rund 800 kt N a⁻¹.

Der Sub-Pool „Stickstoff-Chemie“ und der Pool „Landwirtschaft“ wurden, abweichend von der Vorperiode, nicht mehr mit der Vorgabe berechnet, dass die Summen der Zuflüsse und der Abflüsse übereinstimmen müssen (das heißt, dass keine Differenz auftritt).

Die Klassifikation der Unsicherheit der einzelnen N-Flüsse im N-Inventar 2010 - 2014 ist in die vorliegende Veröffentlichung nicht übernommen worden; die Tabellen mit den Klassifikationen in Bach et al. (2020) gelten unverändert.

3 Atmosphäre (AT)

Der Pool „Atmosphäre“ umfasst den Austausch (Emissionen und Depositionen) reaktiver Stickstoffverbindungen in gasförmiger Form zwischen der Atmosphäre und den übrigen Pools (s. Tabelle 3-1). Die Atmosphäre dient dabei im Wesentlichen als Transportmedium und wird nicht weiter in Sub-Pools untergliedert. Stickstoff liegt in der Atmosphäre zum weit überwiegenden Teil in molekularer (inert) Form als N_2 vor, es werden jedoch nur die Flüsse der reaktiven N-Formen quantifiziert. Umwandlungen zwischen verschiedenen N-Spezies werden nicht betrachtet mit Ausnahme der Überführung von N_2 in organische N-Verbindungen durch die biologische N-Fixierung in Böden sowie die Bildung von NO_x durch Blitzschlag, für die der Pool Atmosphäre die Quelle darstellt. Umgekehrt ist die Atmosphäre der aufnehmende Pool für die N-Flüsse mit der Denitrifikation von N_r aus Böden und Gewässern.

Tabelle 3-1: Eingehende (Pool(in)) und ausgehende (Pool(ex)) N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
Emissionen in die Atmosphäre					
EF.EC	AT	EF.EC-AT-gasEm	NO_x -, N_2O -Emission aus der Energiewirtschaft	NO_x , N_2O	3.2.1
EF.EC	AT	EF.EC-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus der Energiewirtschaft	NH_3	3.3
EF.IC	AT	EF.IC-AT-gasEm	NO_x -, N_2O -Emission aus der industriellen Energieerzeugung	NO_x , N_2O	3.2.1
EF.IC	AT	EF.IC-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus der industriellen Energieerzeugung	NH_3	3.3
EF.TR	AT	EF.TR-AT-gasEm	NO_x -, N_2O -Emission aus Transport und Verkehr	NO_x , N_2O	3.2.1
EF.TR	AT	EF.TR-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus Transport und Verkehr	NH_3	3.3
EF.OE	AT	EF.OE-AT-gasEm	NO_x - und N_2O -Emission aus sonstiger Energieerzeugung	NO_x , N_2O	3.2.1
EF.OE	AT	EF.OE-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus sonstiger Energieerzeugung	NH_3	3.3
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NO_x -, N_2O -Emission aus der chem. Industrie	NO_x , N_2O	3.2.1
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NO_x -, N_2O -Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NO_x , N_2O	3.2.1
HS.MW	AT	HS.MW-AT-gasEm	NO_x -, N_2O -Emission aus dem Siedlungsbereich (LULCC) ^b	NO_x , N_2O	3.2.1
HS.HB	AT	HS.HB-AT-gasEm	NH_3 -Ausscheidung durch den Menschen	NH_3	6.1
AG.AH	AT	AG.AH-AT-gasEm	NO_x -, N_2O -Emission aus Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement)	NO_x , N_2O	3.2.1
AG.AH	AT	AG.AH-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus dem Stall und der Lagerung von tier. Ausscheidungen	NH_3	3.3
AG.SM	AT	AG.SM-AT-gasEm	NO_x -, N_2O -Emission aus der Bodenproduktion	NO_x , N_2O	3.2.1

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
AG.SM	AT	AG.SM-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus Ausbringung von mineralischen und organischen Düngemitteln	NH ₃	3.3
AG.SM	AT	AG.SM-AT-N2	Denitrifikation aus bewirtschafteten landwirtschaftlich genutzten Mineral-Böden sowie organischen Böden	N ₂	7.2.3
AG.BG	AT	AG.BG-AT-gasEm	NO _x -, N ₂ O-Emission aus der Biogaserzeugung	NO _x , N ₂ O	3.2.1
AG.BG	AT	AG.BG-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus Biogaserzeugung	NH ₃	3.3
FS.FO	AT	FS.FO-AT-gasEm	NO _x -, N ₂ O-Emission aus Waldflächen (LULCC)	NO _x , N ₂ O	3.2.1
FS.FO	AT	FS.FO-AT-N2	Denitrifikation in Waldböden	N ₂	8.1.3
FS.OL	AT	FS.OL-AT-N2	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen	N ₂	8.2.2
FS.WL	AT	FS.WL-AT-gasEm	NO _x -, N ₂ O-Emission aus Feuchtgebieten (LULCC) ^b	NO _x , N ₂ O	3.2.1
FS.WL	AT	FS.WL-AT-N2	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N ₂	8.3.3
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NO _x -, N ₂ O-Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NO _x , N ₂ O	3.2.1
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NH ₃ -Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NH ₃	3.3
WS.WW	AT	WS.WW-AT-gasEM	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Kläranlagen	NO _x , N ₂ O	3.2.1
WS.WW	AT	WS.WW-AT-N2	Denitrifikation in Kläranlagen	N ₂	9.2.4
HY.GW	AT	HY.GW-AT-N2	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N ₂	10.1.2
HY.SW	AT	HY.SW-AT-N2	Denitrifikation in Oberflächengewässern	N ₂	10.2.2
RW	AT	RW-AT-gasN	Grenzüberschreitender Import von gasförmigen N-Verbindungen	NH _y , NO _x , N ₂ O	3.5
N-Depositionen aus der Atmosphäre und N-Fixierung					
AT	HS.MW	AT-HS.MW-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Siedlungsflächen	NH _y , NO _x	3.4
AT	AG.SM	AT-AG.SM-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NH _y , NO _x	3.4
AT	AG.SM	AT-AG.SM-Nfix	Biologische N-Fixierung in landwirtschaftlich genutzten Flächen	N(org)	7.2.1
AT	FS.FO	AT-FS.FO-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Waldflächen	NH _y , NO _x	3.4
AT	FS.FO	AT-FS.FO-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden	N(org)	8.1.2

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
AT	FS.OL	AT-FS.OL-atmDep	Atmosphär.N-Deposition auf semi-natürliche Flächen	NH _y , NO _x	3.4
AT	FS.OL	AT-FS.OL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in semi-natürlichen Flächen	N(org)	8.2.1
AT	FS.WL	AT-FS.WL-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Feuchtgebiete	NH _y , NO _x	3.4
AT	FS.WL	AT-FS.WL-Nfix	Biolog. Stickstofffixierung in Feuchtgebieten	N(org)	8.3.1
AT	HY.SW	AT-HY.SW-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Oberflächengewässer	NH _y , NO _x	3.4
AT	HY.CW	AT-HY.CW-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Küstengewässer	NH _y , NO _x	3.4
AT	RW	AT-RW-gasN	Grenzüberschreitender Export von gasförmigen N-Verbindungen	NH _y , NO _x , N ₂ O	3.5

LULCC: Land Use and Land Cover Change; N₂O-Emissionen infolge Landnutzungsänderungen und Humusabbau

Anmerkung: Im Unterschied zur biologischen N-Fixierung wird die Transformation (N-Fixierung) von N₂ in reaktive Stickstoffverbindungen in Form von mineralischen Stickstoffdüngern sowie anderen N-haltigen Chemieprodukten mittels Ammoniak-Synthese (Haber-Bosch-Verfahren) nicht als N-Fluss aus der Atmosphäre aufgeführt; Quell-Pool dieser N_r-Inputs ist der Pool „Industrielle Produktion“ (MP.NC).

3.1 Landnutzung Deutschland

Die Menge der atmosphärischen N_r-Emissionen und -Immissionen hängt unter anderem wesentlich von der Landnutzung bzw. der Beschaffenheit der Landoberfläche (Vegetationstypen, Bebauung usw.) ab. Für Deutschland stehen verschiedene Datenquellen zur Landnutzung zur Verfügung, die sich in der Definition von Landnutzungs- bzw. Landbedeckungskategorien, der Methodik der Datenerhebung, dem Zeitpunkt (Referenzjahr), dem Maßstab und der räumlichen Auflösung unterscheiden (vgl. Arnold 2015). Relevante Quellen sind das Basis-DLM, das LBM-DE2018 (BKG 2020), das daraus abgeleitete CLC2018 (BKG 2022) sowie die Flächenerhebung (Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung; DESTATIS, versch. Jahre). Mit Ausnahme der Flächenerhebung werden die verschiedenen Landnutzungserhebungen nur in größeren Zeitabständen aktualisiert (und i.d.R. dabei auch methodisch weiterentwickelt), so dass dafür keine Zeitreihen mit Jahreswerten zur Verfügung stehen.

Das Basis Digitale Landschaftsmodell (**Basis-DLM**) ist die Grundlage des Amtlich Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS®) Deutschlands (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder). ATKIS® beschreibt die Oberfläche Deutschlands mit digitalen Landschafts- und Geländemodellen.

Im digitalen Landbedeckungsmodell für Deutschland (**LBM-DE2018**) werden die im Basis-DLM vorhandenen Landbedeckungs- und Landnutzungsinformationen in ein Klassifikationssystem überführt, das die Ableitung der Landbedeckungs- und Landnutzungsklassen gemäß der Nomenklatur des pan-europäischen Datensatzes CORINE Land Cover (CLC) ermöglicht. Die Geometrie des LBM-DE verwendet das ATKIS Basis-DLM als Grundlage. Um einen einheitlichen Zeitstand

zu gewährleisten, wird die Landbedeckung auf Basis von Satellitendaten aktualisiert; die CLC-Klasse wird dann aus der Kombination der Landbedeckungs-/Landnutzungs-Information abgeleitet (BKG 2020). Die Mindestkartiergröße eines (flächenhaften) Objekts im LBM-DE beträgt 1 ha und die Mindestkartierbreite 15 m.

Im **CLC2018** (5 ha) werden die Objekte des LBM-DE2018 zu Kartiereinheiten mit einer Mindestgröße von 5 ha zusammengefasst, d.h. Flächen einer Kartiereinheit werden erst ab einer Objektgröße von 5 ha im Datensatz erfasst (BKG 2022). Im ersten nationalen N-Inventar (Bach et al. 2020) wurde die Vorläuferversion CLC2012 verwendet, in der noch die beiden Nutzungsklassen 242 „Komplexe Parzellenstrukturen“ und 243 „Landwirtschaftlich genutzte Flächen mit Flächen natürlicher Vegetation von signifikanter Größe“ ausgewiesen werden. Diese beiden CLC-Klassen sind in der CLC2018 in anderen Klassen aufgegangen.

Die **Flächenerhebung** nach Art der tatsächlichen Nutzung des Statistischen Bundesamtes werdet jährlich zum 31.12. das Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS®) aus, das von den Vermessungs- und Katasterverwaltungen der Länder geführt wird.

Für einzelne Landnutzungen existieren darüber hinaus spezielle Erhebungen. Von den Statistischen Ämtern des Bundes und der Länder wird regelmäßig die fragebogenbasierte Bodennutzungshaupterhebung (Agrarstatistik) durchgeführt, mit der die landwirtschaftlich genutzten Flächen aller registrierten Landwirtschaftsbetriebe (oberhalb einer Mindestgröße) erfasst werden.

Die aufgeführten Informationsquellen zur Flächennutzung bzw. Landbedeckung verwenden unterschiedliche Datengrundlagen sowie Klassifikationssysteme (Begriffsbestimmungen) der Nutzungsarten. Für Auswertungen wie bspw. Der Berichterstattung zum Treibhausgas-Emissionsinventar (NIR, UNFCCC 2022); entspricht den IPCC-Kategorien in Tabelle 3-2) oder für die Berechnung der atmosphärischen Deposition in Deutschland (PINETI-4, Kranenburg et al. 2024) müssen zudem unterschiedliche Flächennutzungs- bzw. Landbedeckungsklassen zusammengefasst werden, woraus weitere Divergenzen zwischen den Flächenangaben der verschiedenen Informationsquellen entstehen.

Tabelle 3-2: Flächen der CORINE Land Cover 2018-Nutzungsklassen (Mindestkartiergröße 5 ha), gruppiert nach IPCC-Landnutzungskategorien, und Zuordnung der PINETI-4 Rezeptortypen.

IPCC-Kategorien CORINE Land Cover Landnutzungsklassen	CLC-Code	Fläche ^a (ha)	Fläche ^a (%)	Rezeptor- typ ^b
IPCC-Kategorie Siedlungen		3.806.157	10,50 %	
Städtische Prägung	111, 112	2.484.648	6,86 %	urb
Industrie, Gewerbe, Infrastruktur	121-124	841.259	2,32 %	urb
Abbauflächen, Deponien, Abraumhalden	131-133	135.033	0,37 %	urb
Städtische Grünanlagen, Sport/Freizeitanlagen	141, 142	345.217	0,95 %	grs
IPCC-Kategorie Ackerland		13.220.454	36,48 %	
Ackerland (nicht bewässert)	211	12.897.837	35,59 %	ara
Weinbauflächen	221	126.923	0,35 %	crp
Obst/Beerenobstbestände	222	195.695	0,54 %	crp

IPCC-Kategorien CORINE Land Cover Landnutzungsklassen	CLC-Code	Fläche ^a (ha)	Fläche ^a (%)	Rezeptor- typ ^b
IPCC-Kategorie Grünland		6.748.728	18,62 %	
Wiesen und Weiden	231	6.386.877	17,62 %	grs
Natürliches Grünland	321	180.728	0,50 %	grs
Heiden und Moorheiden	322	96.823	0,27 %	sem
Sümpfe	411	58.304	0,16 %	sem
Salzwiesen	421	25.996	0,07 %	sem
IPCC-Kategorie Wald		11.356.995	31,34 %	
Laubwälder	311	3.648.263	10,07 %	dec
Nadelwälder	312	5.725.515	15,80 %	cnf
Mischwälder	313	1.584.334	4,37 %	mix
Wald/Strauch Übergangsstadien	324	398.883	1,10 %	sem
IPCC-Kategorie Sonstiges Land		120.041	0,33 %	
Strände, Dünen, Sandflächen	331	18.073	0,05 %	oth
Felsflächen ohne Vegetation	332	9.702	0,03 %	oth
Flächen mit spärlicher Vegetation, Gletscher	333, 335	11.065	0,03 %	oth
Torfmoore	412	81.201	0,22 %	sem
IPCC-Kategorie Feuchtgebiete		678.867	1,87 %	
In der Gezeitenzone liegende Flächen ^c	423	311.998	0,86 %	wat
Gewässerläufe	511	115.708	0,32 %	wat
Wasserflächen	512	403.112	1,11 %	wat
Lagunen	521	116.286	0,32 %	wat
Mündungsgebiete	522	43.760	0,12 %	wat
Meer und Ozean ^c	523	(2.003.329)		
Summe		36.243.240	100 %	

^a Flächenangaben gemäß Auswertung CLC2018 (5 ha Mindestkartiereinheit).

^b Vegetationsklassen (Rezeptortyp) der LOTOS-EUROS-Modellierung der atmosphärischen N-Depositionen (Kranenburg et al. 2024), Erläuterung s. Tabelle 3-6.

^c Fläche wird bei der Erfassung der N-Flüsse nicht berücksichtigt.

Für die Berechnung der flächenbezogenen N-Flüsse in Deutschland werden im Folgenden die Einteilung der Landnutzungen und die Flächenangaben nach CLC2018 (5 ha) (s. Tabelle 3-2) herangezogen. Infolge der Mindestkartiergröße von 5 ha werden in der CLC-Karte die Landnutzungen mit einer großen Verbreitung (in erster Linie Landwirtschaftsflächen und Wald) gegenüber den Landnutzungen, die nur mit einem kleinen Flächenanteil bzw. stärker dispersiert in der Landschaft vorkommen, systematisch übererfasst. Der CLC-Karte wurde trotzdem gegenüber anderen Flächennutzungsangaben der Vorzug gegeben, da (i) diese Flächenangaben auch für das Treibhausgas-Emissionsinventar verwendet werden, (ii) die Klassifikation der Flächen-

nutzung auf Satellitenszenen basiert, d.h. auf die tatsächliche Bedeckung/ Nutzung der Erdoberfläche zurückgeht, (iii) die Rezeptortypen der N-Depositionsmodellierung (PINETI-4, Kranenburg et al. 2024) sich auf diese Nutzungsklassen beziehen, und (iv) die Landbedeckung stärker differenziert ist als in den ATKIS-Objektarten oder der Flächennutzungsstatistik des Statistischen Bundesamtes (bspw. Sind die Waldflächen unterschieden in Laub-, Nadel und Mischwald; Landwirtschaftsfläche nach Ackerland und Grünland). Die Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3 verdeutlichen, dass (i) die Definitionen bzw. Abgrenzung von Nutzungsarten zwischen den Klassifikationssystemen nur eingeschränkt vergleichbar sind, und (ii) die Flächenangaben sich auch für Nutzungsarten wie „Wald“ oder „Landwirtschaftsfläche“, die nach landläufigem Verständnis eindeutig definiert sind, je nach Datenquelle nicht unerheblich unterscheiden können.

Tabelle 3-3: Flächenangaben der Nutzungsarten nach verschiedenen Informationsquellen (Erläuterungen und Quellen s. Text).

CORINE Land Cover 5 ha (CLC) 2018		Digitales Landbedeckungsmodell (LBM-DE) 2018		DESTATIS Flächenerhebung (31.12.2018)		Landwirtschaftszählung 2020	Kohlenstoffinventur 2017
CLC-Klassen ^a	Fläche (km ²)	Landbedeckungsklasse	Fläche (km ²)	Nutzungsarten	Fläche (km ²)	Fläche (km ²)	Fläche (km ²)
Siedlungs-, Verkehrs-, Deponieflächen	38.062	B110, B121, B122, B242	16.108	Siedlungsfläche, Verkehrsfläche	51.315		
Landwirtschaftsfläche	196.073	B211, B221, B222, B224, B231, B233, B321	213.960	Landwirtschaftsfläche	181.625	165.950 ^b	
Wald	113.570	B310, B311, B312, B313	114.397	Waldfläche, Gehölz	110.667		114.443 ^c
Natürliches Grünland, Salzwiesen, Sumpf, Gehölz, Moor, sonstiges Land	4.819	B322, B324, B330, B332, B334, B335, B412, B414	6.446	Moor, Heide, Sumpf, Unland, vegetationslose Flächen	5.772		
Gewässer, Feuchtgebiete (ohne Flächen in der Gezeitenzone ^d)	6.789 ^d	B423, B511, B512, B521, B522, B523	6.583	Gewässer	8.202		
Insgesamt	359.312^d		357.493		357.582		

^a Vegetationsklassen (Rezeptortyp) der LOTOS-EUROS-Modellierung der atmosphär. N-Deposition (Kranenburg et al. 2024).

^b Landwirtschaftliche genutzte Fläche nach Landwirtschaftszählung 2020.

^c Waldfläche nach Kohlenstoffinventur 2017 (Riedel und Hennig 2019); s.a. Kap. 8.1.1.

^d Flächen in der Gezeitenzone zur besseren Vergleichbarkeit mit der Flächensumme des LBM-DE bzw. der DESTATIS Flächenerhebung hier nicht mit summiert.

3.2 N₂O- und NO_x-Emissionen in die Atmosphäre

3.2.1 N₂O- und NO_x-Emissionen

Datenquelle für die Angaben zu den N₂O- und NO_x-Emissionen sind die Berichtstabellen zum Nationalen Inventarbericht enthalten (UNFCCC 2022). Für Erläuterungen zur Methodik sowie den Datenquellen wird auf den NIR (UNFCCC 2022) verwiesen. Für die Darstellung der N-Flüsse (Tabelle 3-4) wurden die Angaben der CRF-Table 1 bis Table 5 ausgewertet; die Einteilung der CRF-Kategorien wird für die N-Flüsse weitgehend übernommen. Zum besseren Abgleich sind alle in den CRF-Tabellen aufgeführten Emissionen im nationalen N-Inventar aufgeführt, auch wenn deren Wert unterhalb der hier gewählten Erfassungsschwelle von 1 kt N a⁻¹ liegt. Die N₂O- und NO_x-Emissionen aus „Product Use“ werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dem Pool HS, sondern MP zugeordnet. Für die Sub-Pools Nahrungsmittel- und Futtermittelindustrie (MP.FP) und semi-natürliche Flächen (FS.OL) sowie den Pool Hydrosphäre (HY) werden in den CRF-Tables keine Emissionen aufgeführt.

Tabelle 3-4: N₂O- und NO_x-Emissionen in Deutschland nach Quellbereichen (Sektoren), Mittel 2015 - 2020 (Quelle: NIR, UBA 2023, CRF-Tables 1 bis 5; UNFCCC 2023).

Flusscode	Quellbereich (Sektor) der N ₂ O- und NO _x -Emissionen	CRF-Kategorien	N ₂ O kt N a ⁻¹	NO _x ^a kt N a ⁻¹
EF.EC-AT-gasEm	Energiewirtschaft	1.A.1	5,0	81,1
EF.IC-AT-gasEm	Industrielle Energieerzeugung	1.A.2	1,8	27,5
EF.TR-AT-gasEm	Transport und Verkehr	1.A.3	3,6	161,8
EF.OE-AT-gasEm	Sonstige Energieerzeugung	1.A.4, 1.A.5, 1.B	1,0	39,6
MP.NC-AT-gasEm	Chemische Industrie (N-haltige Produkte)	2.B	1,4	1,3
MP.OP-AT-gasEm	Sonstige industrielle Produktion	2.A, 2.C-2.H	0,6	16,1
HS.MW-AT-gasEm	Siedlungsbereich (LULCC) ^b	4.E, 4.H	0,6	n.b.
AG.AH-AT-gasEm	Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdünger- management)	3.A,3.B	6,4	n.b.
AG.SM-AT-gasEm	Bodenproduktion ^c	3.D, 4.B, 4.C	43,7	35,4
AG.BG-AT-gasEm	Biogaserzeugung	3.J	0,6	0,5
FS.FO-AT-gasEm	Waldflächen (LULCC)	4.A	0,4	0,1
FS.OL-AT-gasEm	Feuchtgebiete (LULCC)	4.D	0,1	n.b.
WS.SW-AT-gasEm	Müllverbrennungsanlagen u. Mülldeponien	5.B, 5.C	0,7	0,2
WS.WW-AT-gasEm	Kläranlagen	5.D, 5.E	1,0	n.b.
Summen NO_x- und N₂O-Emissionen^d			66,8	363,6

^a NO_x berechnet als NO₂.

^b LULCC: Land Use and Land Cover Change; N₂O-Emissionen infolge Landnutzungsänderungen und Humusabbau.

^c Einschließlich LULCC von cropland and grassland.

^d NO_x-Bildung durch Blitzschlag beträgt weniger 1 kt NO_x pro Jahr (s. Kap. 3.2.2) und wird daher hier nicht aufgeführt.

3.2.2 NO_x-Bildung durch Blitze

Nach Blitz-Informationsdienst der Fa. Siemens (BLIDS) wurden in Deutschland 2013 – 2015 im Mittel jährlich rund 550.000 Blitzeinschläge (Erdblitze) gezählt (Siemens 2024), was einer mittleren Blitzdichte von rund 1,5 km⁻² a⁻¹. Entspricht. Mit einem Emissionsfaktor der NO_x-Bildung von 0,7 kg NO_x (im Bereich Bodenoberfläche bis 1 km Höhe) pro Blitzschlag nach EEA (2016; Part B: Sectoral guidance chapters – 11.C Other natural sources) ergibt das rund 0,12 kt NO_x-N a⁻¹ in Deutschland.

3.3 NH₃-Emissionen in die Atmosphäre

Die Daten zu Ammoniak-Emissionen werden den LRTAP-Reports entnommen (EEA 2022) (Tabelle 3-5). Für den Bereich Landwirtschaft wird die Berechnung dafür im Nationalen Emissionsinventar vorgenommen. Das NIR betrachtet allerdings die NH₃-Emission nur in ihrer Bedeutung als Vorstufe für die Bildung von Treibhausgasen; in Vos et al. (2022) wird daher nur in Tab. 2.4 eine zusammenfassende Darstellung der gesamten NH₃-Emissionen aus der Landwirtschaft gegeben (in allen detaillierten Tabellen zum NIR werden keine NH₃-Emissionen aus Stall und Lagerung aufgeführt).

Tabelle 3-5: NH₃-Emissionen in Deutschland, Mittel 2015 – 2020 (Quelle s. Text; für Pool Landwirtschaft s.a. Vos et al. 2022, Tab. 2.4). Zuordnung der CRF-Kategorien zu Quellbereichen s. Tabelle 3-4.

Flusscode	Quellbereich (Sektor) der NH ₃ -Emissionen	N-Spezies	NH ₃ kt N a ⁻¹
EF.EC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der Energiewirtschaft	NH ₃	1,1
EF.IC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der Industriellen Energieerzeugung	NH ₃	0,4
EF.TR-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus Transport und Verkehr	NH ₃	9,6
EF.OE-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der sonstigen Energieerzeugung	NH ₃	1,6
MP.NC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus Chemische Industrie (N-haltige Produkte)	NH ₃	5,0
MP.OP- AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus sonstiger industrieller Produktion	NH ₃	2,7
AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus dem Stall und der Lagerung von tierischen Ausscheidungen	NH ₃	210,7
AG.SM-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus der Ausbringung von organischen und mineralischen Düngemitteln (einschl. Weidegang)	NH ₃	258,6
AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der Lagerung von Gärresten	NH ₃	2,7
WS.SW- AT-gasEm	Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NH ₃	2,9
Summe NH₃-Emissionen			495,2

3.4 Atmosphärische NH_y- und NO_x-Deposition

Die Daten zur atmosphärischen Deposition von Stickstoff in reduzierter (NH_y) und oxidierten Form (NO_x) in Deutschland werden aus den Ergebnissen des UBA-Projekts PINETI-4 (Pollutant Input and EcosysTem Impact; Kranenburg et al. 2024) ermittelt. Ausgehend von Emissionsdaten, chemischen Transportmodellen, interpolierten Messdaten zur Nassdeposition sowie hochaufgelösten Landnutzungsdaten wird mit dem Modell LOTOS-EUROS die jährliche Gesamtdosition von NH_y- (NH₃, NH₄) und NO_x-Verbindungen (HNO₃, NO₃, NO₂, NO, N₂O₅) für verschiedene

Rezeptoroberflächen modelliert (Kranenburg et al. 2024). Die Ergebnisse stehen als Rasterkarten (Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$) der jährlichen Gesamt-Deposition (nass, feucht und trocken) von $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ in den Jahren 2000 bis 2015 für zehn Rezeptortypen zur Verfügung. Den Rezeptortypen wurden die entsprechenden Landnutzungsklassen der Karte CLC2012 zugeordnet (s. Tabelle 3-2).

Für die Ermittlung der N-Depositionen in Deutschland wurden in ArcGIS die PINETI-4 Rasterkarten ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) zur jährlichen N-Deposition der einzelnen Rezeptortypen überlagert mit der Landnutzungskarte CLC2018 (5 ha Mindestobjektgröße). Für jeden Rezeptortyp wurde der Flächenanteil in jeder Rasterzelle ermittelt und daraus der flächengewichtete Mittelwert der NH_y -, NO_x - und $\text{N}(\text{ges})$ -Deposition für die Vegetationsklassen in Deutschland im Mittel 2015 – 2019 berechnet (Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Spezifische Depositionsraten reaktiven Stickstoffs pro Hektar für die Rezeptortypen im Modell PINETI-4, Mittel 2015 – 2019^a (Quelle: Kranenburg et al. 2024).

Rezeptortyp ^b (Landnutzungskategorie bzw. Vegetationsklasse)	Kurz- bezeichnung	Depositionsraten ^c		
		NH_y $\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	NO_x $\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$\text{N}_r \text{ gesamt}$ $\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Ackerland	ara	8,4	4,7	13,1
Grünland	grs	7,7	4,5	12,3
Dauerkulturen	crp	9,8	5,4	15,2
Semi-natürliche Vegetation	sem	8,1	4,9	13,0
Nadelwald	cnf	12,8	6,4	19,2
Laubwald	dec	10,9	5,9	16,9
Mischwald	mix	11,9	6,2	18,1
Gewässer	wat	9,1	4,0	13,2
Siedlungsfläche	urb	13,4	6,3	19,7
Sonstige Nutzungen	oth	8,1	4,2	12,3

^a Ergebnisse für 2020 wurden nicht modelliert.

^b Vegetationsklassen (Rezeptortyp) der LOTOS-EUROS-Modellierung der atmosphärischen N-Depositionen (Kranenburg et al. 2024).

^c Die Depositionsraten entsprechend weitgehend den Werten der Tabelle 10 für „reale Landnutzungsverteilung“ in Kranenburg et al. (2024; geringfügige Differenzen aufgrund unterschiedlicher Bezugsjahre der Mittelung).

Aus den Flächenangaben zur Landbedeckung (Tabelle 3-2) und den rezeptorspezifischen N-Depositionsraten (Tabelle 3-6) werden die N-Flüsse mit den atmosphärischen NO_x - und NH_y -Depositionen berechnet (Tabelle 3-7).

Tabelle 3-7: N-Flüsse mit der atmosphärischen N-Deposition nach PINETI-4 (Kranenburg et al. 2024), Mittel 2015 – 2019^a.

Flusscode	Beschreibung	Fläche ha	N-Spezies	N-Deposition kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	N-Fluss kt N a ⁻¹
AT-AG.SM-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	19.788.059	NH _y	8,2	162,0
			NO _x	4,7	92,6
			N(ges)	12,9	254,6
AT-HS.MW-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Siedlungsflächen	3.806.157	NH _y	12,9	49,0
			NO _x	6,2	23,5
			N(ges)	19,0	72,5
AT-FS.FO-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Waldflächen	10.958.112	NH _y	12,1	132,2
			NO _x	6,2	68,1
			N(ges)	18,3	200,3
AT-FS.OL-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf seminatürliche Flächen	615.747	NH _y	8,1	5,0
			NO _x	4,9	3,0
			N(ges)	13,0	8,0
AT-FS.WL-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Feuchtgebiete	84.300	NH _y	8,1	0,7
			NO _x	4,9	0,4
			N(ges)	13,0	1,1
AT-HY.SW-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Oberflächengewässer	635.106	NH _y	9,1	5,8
			NO _x	4,0	2,6
			N(ges)	13,2	8,4
AT-HY.CW-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Küstengewässer	355.758	NH _y	9,1	3,2
			NO _x	4,0	1,4
			N(ges)	13,2	4,7
Summen Deutschland		36.243.240 ^a	NH _y	9,9	357,9
			NO _x	5,3	191,6
			N(ges)	15,2	549,5

^a Summe unterscheidet sich von Tabelle 3-3: beinhaltet hier auch die „Flächen in der Gezeitenzone“ (CLC-Code 423).

3.5 Import und Export von NH_y und NO_x

Im Rahmen des European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP 2022) werden mit vom MSC-W (Meteorological Synthesizing Centre – West) jährlich die grenzüberschreitenden Flüsse von NH_y und NO_x in Europa berechnet (für 2015 wurden keine Ergebnisse veröffentlicht). Die Ergebnisse stehen als EMEP Source-Receptor-Tables zur Verfügung (EMEP 2022 und wurden für Deutschland ausgewertet (Tabelle 3-8).

Tabelle 3-8: Import und Export von reduzierten (NH_y) und oxidierten (NO_x) atmosphärischen N-Verbindungen nach EMEP Source-Receptor-Tables, Mittel 2016^a – 2020.

Import			Export		
NH _y kt N a ⁻¹	NO _x kt N a ⁻¹	Summe kt N a ⁻¹	NH _y kt N a ⁻¹	NO _x kt N a ⁻¹	Summe kt N a ⁻¹
97,6	103,3	200,9	253,7	243,2	496,8
Differenz: Netto-Export 295,9 kt N a ⁻¹					

^a 2015 wurden keine Ergebnisse veröffentlicht.

Mit dem EMEP-Ansatz werden rund 327 kt NH_y-N a⁻¹ und 179 kt NO_x-N a⁻¹ Deposition für Deutschland berechnet (Mittel 2016 – 2020). Diese Mengen stimmen gut überein mit den Ergebnissen von PINETI-4 (Kranenburg et al. 2024), wonach jährlich rund 356 kt NH_y-N und 192 kt NO_x-N-Deposition in Deutschland auftreten (Mittel 2015 – 2019).

3.6 Zusammenfassung der N-Flüsse Atmosphäre (AT)

In Tabelle 3-9 sind die N-Flüsse des Pools Atmosphäre zusammengefasst.

Tabelle 3-9: Eingehende und ausgehende N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“, Mittel 2016 – 2020^a.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Emission in die Atmosphäre					
EF.EC	AT	EF.EC-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Energiewirtschaft	NO _x N ₂ O	81,1 5,0
EF.EC	AT	EF.EC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der Energiewirtschaft	NH ₃	1,1
EF.EC	AT	EF.EC-AT-N2	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Verbrennung und Entstickung	N ₂	1146,2
EF.IC	AT	EF.IC-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der industriellen Energieerzeugung	NO _x N ₂ O	27,5 1,8
EF.IC	AT	EF.IC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der industriellen Energieerzeugung	NH ₃	0,4
EF.TR	AT	EF.OE-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Transport und Verkehr	NO _x N ₂ O	161,8 3,6
EF.TR	AT	EF.OE-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus Transport und Verkehr	NH ₃	9,6
EF.OE	AT	EF.OE-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der sonstigen Energieerzeugung	NO _x N ₂ O	39,6 1,0
EF.OE	AT	EF.OE-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der sonstigen Energieerzeugung	NH ₃	1,6
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der chemischen Industrie	NO _x N ₂ O	1,3 1,4
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der chemischen Industrie	NH ₃	5,0

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NO _x N ₂ O	16,1 0,6
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NH ₃	2,7
HS.MW	AT	HS.MW-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus dem Siedlungsbereich (LULCC) ^b	NO _x N ₂ O	n.b. 0,6
HS.HB	AT	HS.HB-AT-gasEm	NH ₃ -Ausscheidung durch den Menschen	NH ₃	1,4
AG.AH	AT	AG.AH-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement)	NO _x , N ₂ O	n.b. 6,4
AG.AH	AT	AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus dem Stall und der Lagerung von tier. Ausscheidungen	NH ₃	210,7
AG.SM	AT	AG.SM-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Bodenproduktion	NO _x N ₂ O	35,4 43,7
AG.SM	AT	AG.SM-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus Ausbringung von organischen und mineralischen Düngemitteln	NH ₃	258,6
AG.SM	AT	AG.SM-AT-N2	Denitrifikation aus bewirtschafteten landwirtschaftlich genutzten Mineral-Böden sowie organischen Böden	N ₂	232,3
AG.BG	AT	AG.BG-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Biogaserzeugung	NO _x N ₂ O	0,5 0,6
AG.BG	AT	AG.BG-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus Biogaserzeugung	NH ₃	2,7
FS.FO	AT	FS.FO-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Waldflächen (LULCC) ^b	NO _x N ₂ O	0,1 0,4
FS.FO	AT	FS.FO-AT-N2	Denitrifikation in Waldböden	N ₂	12,2
FS.OL	AT	FS.OL-AT-N2	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen	N ₂	0,4
FS.WL	AT	FS.WL-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Feuchtgebieten (LULCC) ^b	NO _x N ₂ O	n.b. 0,1
FS.WL	AT	FS.WL-AT-N2	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N ₂	1,6
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NO _x N ₂ O	0,2 0,7
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NH ₃ -Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NH ₃	2,9
WS.WW	AT	WS.WW-AT-gasEM	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Kläranlagen	NO _x N ₂ O	n.b. 1,0
WS.WW	AT	WS.WW-AT-N2	Denitrifikation in Kläranlagen	N ₂	259,6
HY.GW	AT	HY.GW-AT-N2	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N ₂	635,9
HY.SW	AT	HY.SW-AT-N2	Denitrifikation (Retention) in Oberflächengewässern	N ₂	85,7

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
RW	AT	RW-AT-gasN	Grenzüberschreitender Import von gasförmigen N-Verbindungen	NH _y NO _x	97,6 103,3

N-Depositionen und N-Fixierung aus der Atmosphäre

AT	HS.MW	AT-HS.MW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Siedlungsflächen	NH _y NO _x	49,0 23,5
AT	AG.SM	AT-AG.SM-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NH _y NO _x	162,0 92,6
AT	AG.SM	AT-AG.SM-Nfix	Biologische N-Fixierung in landwirtschaftlich genutzten Flächen	N(org)	216,5
AT	FS.FO	AT-FS.FO-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Waldflächen	NH _y NO _x	132,2 68,1
AT	FS.FO	AT-FS.FO-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden	N(org)	110,8
AT	FS.OL	AT-FS.OL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf seminatürliche Flächen	NH _y NO _x	5,0 3,0
AT	FS.OL	AT-FS.OL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in seminatürlichen Flächen	N(org)	1,2
AT	FS.WL	AT-FS.WL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Feuchtgebiete	NH _y NO _x	0,7 0,4
AT	FS.WL	AT-FS.WL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Feuchtgebieten	N(org)	0,8
AT	HY.SW	AT-HY.SW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Oberflächengewässer	NH _y NO _x	5,8 2,6
AT	HY.CW	AT-HY.CW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Küstengewässer	NH _y NO _x	3,2 1,4
AT	RW	AT-RW-gasN	Grenzüberschreitender Export von gasförmigen N-Verbindungen	NH _y NO _x	253,7 243,2

^a Deposition (PINETI-4): Mittel 2015 – 2019; Import/Export: Mittel 2016 – 2010.

^b LULCC: Land Use and Land Cover Change; N₂O-Emissionen infolge Landnutzungsänderungen und Humusabbau.

3.7 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Atmosphäre

Die Bilanz der gasförmigen reaktiven N-Verbindungen in der Atmosphäre über Deutschland umfasst auf der Zufuhrseite die inländischen Emissionen und den Import in der Atmosphäre, auf der Abfuhrseite die Depositionen und den Export (Tabelle 3-10).

Tabelle 3-10: Bilanzierung der reaktiven N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“ (ohne N-Flüsse mit Denitrifikation), Mittel 2015 – 2020.

N-Flüsse	NO _x kt N a ⁻¹	N ₂ O kt N a ⁻¹	NH _y kt N a ⁻¹	Summe kt N a ⁻¹
Emissionen in DE	364	67	497	927
Import	103	n.b.	98	201
Summe Zufluss	467	67	594	1.128
Deposition auf Fläche DE	- 192	0	- 358	- 550
Export	- 243	n.b.	- 254	- 497
Summe Abfluss	- 435	0	- 611	- 1.046

Offensichtlich ist die Bilanz nicht ganz geschlossen, zwischen der Summe der Zuflüsse und der Abflüsse tritt eine Differenz von 82 kt N a⁻¹ auf. Diese Differenz kann erklärt werden zum einen mit unterschiedlichen Annahmen bei der Modellierung von atmosphärischen NO_x- und NH_y-Umsätzen mit LOTOS-EUROS (PINETI-4, Kranenburg et al. 2024) und EMEP (EMEP 2022), zum anderen in den teilweise abweichenden Perioden für die Mittelung der verschiedenen Flüsse. Ein Unsicherheitsbereich von rund 8 % beim Vergleich von zwei großräumigen Modellen liegt in der gängigen Größenordnung für Unterschiede in Modellvergleichsstudien.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass effektiv etwa 72 % der nationalen NH₃- und ca. 53 % der nationalen NO_x-Emissionen auch wieder in Deutschland deponieren. Insgesamt betrachtet ist Deutschland also ein Netto-Exporteur von Luftschadstoffen. Vereinfacht kann dies damit begründet werden, dass Deutschland eine hohe Emissionsdichte aufweist (mit den Hotspots der Emissionen im Nord-Westen und Süd-Osten), ein großer Teil der Emissionen in den atmosphärischen Ferntransport übergeht (u.a. durch Partikelbildung) und bei vorherrschender Windrichtung Süd-West dann über die Landesgrenzen verfrachtet wird.

4 Energiewirtschaft und Verkehr (EF)

Der Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ beschreibt die N-Flüsse, die im Zusammenhang mit Erzeugung von Energie durch Verbrennungsprozesse sowie deren Bereitstellung (Konversion von Erdöl und anderen Energierohstoffen) auftreten. Die N-Flüsse entstehen vor allem durch die Bildung von NO_x und N₂O aus N₂ und O₂ bei Hochtemperaturprozessen. Der Pool wird in vier Sub-Pools gegliedert; Tabelle 4-1 gibt eine Übersicht der relevanten Stickstoffflüsse.

- Energiewirtschaft (fossile Energieträger) (EF.EC)
- Industrielle Energieerzeugung (EF.IC)
- Transport und Verkehr (EF.TR)
- Sonstige Energieerzeugung (EF.OE).

Tabelle 4-1: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
Sub-Pool Energiewirtschaft (EF.EC)					
SOURCE ^a	EC.EF	SOURCE-EC.EF-fuel	Förderung fossiler Energieträger im Inland	N(org)	4.1.1
SOURCE ^a	EC.EF	SOURCE-EC.EF-gasEM	Bildung von thermischem NO _x	NO _x	4.1.2
MP.FP	EF.EC	MP.FP-EF.EC-fuel	Landwirtschaftliche Produkte zur Erzeugung von Kraftstoffen	N(org)	4.1.3
MP.NC	EF.EC	MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Entstickung von Rauchgasen	NH ₃	4.1.4
FS.FO	EF.EC	FS.FO-EF.EC-wood	Holz zur energetischen Nutzung – Großfeuerungsanlagen	N(org)	8.1.5
RW	EF.EC	RW-EF.EC-fuel	Import von fossilen Energieträgern und Mineralölprodukten	N(org)	4.1.1
EF.EC	SINK ^a (AT)	EF.EC-AT-N2	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Verbrennung und Entstickung	N ₂	4.1.5
EF.EC	AT	EF.EC-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Verbrennungsprozessen in der Energiewirtschaft	NH ₃ , NO _x , N ₂ O	3.2.1
EF.EC	EF.IC	EF.EC-EF.IC-fuel	Fossile Energieträger zur Energieerzeugung in der Industrie	N(org)	4.1.1
EF.EC	EF.TR	EF.EC-EF.TR-fuel	Fossile Energieträger zur Verwendung in Transport und Verkehr	N(org)	4.1.1
EF.EC	EF.TR	EF.EC-EF.TR-fuel	Fossile Energieträger zur Verwendung in Haushalt, Gewerbe und Handel	N(org)	4.1.1
EF.EC	MP.FP	EF.EC-MP.FP-prod	Reststoffe der Erzeugung von Kraftstoffen aus landwirtschaftlichen Produkten	N(org)	4.1.3
EF.EC	MP.NC	EF.EC-MP.NC-prod	Rohöl- und Mineralölprodukte als Rohstoffe für die chemische Industrie	N(org)	4.1.1

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
EF.EC	WS.SW	EF.EC-WS.SW-waste	Abfälle aus der Erzeugung von Energieträgern und Raffinerieprodukten	N(org)	9.1.1
EF.EC	WS.WW	EF.EC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Energiewirtschaft	N(org)	9.2.1
EF.EC	RW	EF.EC-RW-fuel	Export von fossilen Energieträgern und Raffinerieprodukten	N(org)	4.1.1
Sub-Pool Industrielle Energieerzeugung (EF.IC)					
EF.EC	EF.IC	EF.EC-EF.IC-fuel	Fossile Energieträger zur Energieerzeugung in der Industrie	N(org)	4.1.1
EF.IC	AT	EF.IC-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Verbrennungsprozessen industrieller Energieerzeugung	NH ₃ , NO _x , N ₂ O	3.2.1
Sub-Pool Transport und Verkehr (EF.TR)					
EF.EC	EF.TR	EF.EC-EF.TR-fuel	Fossile Energieträger zur Verwendung in Transport und Verkehr	N(org)	4.1.1
SOURCE ^a	EC.EF	SOURCE-EC.EF-gasEM	Bildung von thermischem NO _x	NO _x	4.1.2
EF.TR	AT	EF.TR-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Verbrennungsprozessen in Verkehr und Transport	NH ₃ , NO _x , N ₂ O	3.2.1
Sub-Pool Sonstige Energieerzeugung (EF.OE)					
EF.EC	EF.OE	EF.EC-EF.OE-fuel	Fossile Energieträger zur Verwendung in Haushalt, Gewerbe und Handel	N(org)	4.1.1
SOURCE ^a	EC.EF	SOURCE-EC.EF-gasEM	Bildung von thermischem NO _x	NO _x	4.1.2
FS.FO	EF.OE	FS.FO-EF.OE-wood	Holz zur energetischen Nutzung – Privathaushalte	N(org)	8.1.5
EF.OE	AT	EF.OE-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Verbrennungsprozessen in der Energiewirtschaft	NH ₃ , NO _x , N ₂ O	3.2.1

^a Zu Pool(ex) „SOURCE“ bzw. Pool(in) „SINK“ s. Kap. 4.4; wird im STAN-Diagramm (Kap. 12) dem Pool(in) AT zugerechnet.

Abfallstoffe aus der Energiewirtschaft werden nicht als N-Fluss aufgeführt, da keine separaten statistischen Angaben vorliegen. Die in diesem Sektor anfallenden Abfälle und Abwässer sind in den entsprechenden N-Flüssen für den Pool „Industrielle Produktion“ mit enthalten.

4.1 Energiewirtschaft (EF.EC)

Im Sub-Pool „Energiewirtschaft“ (im engeren Sinne) werden die N-Flüsse aus der Erzeugung von elektrischer Energie und Wärme durch Unternehmen der Energiewirtschaft beschrieben, die auf die Verbrennung von fossilen Energieträgern, einschließlich deren Förderung, Herstellung bzw. Aufbereitung (Raffinerien) zurückgehen. Dazu gehört auch die Herstellung von Bioethanol und

Biodiesel. Die Energieerzeugung in Müllverbrennungsanlagen ist dagegen Bestandteil des Pools „Abfallwirtschaft“, Biogasanlagen werden dem Pool „Landwirtschaft“ zugerechnet.

4.1.1 Herkunft und Verwendung fossiler Energieträger (XX-EF.EC-fuel, EF.EC-XX-fuel)

In der Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland werden die Einsatzmengen und die Verwendung von Energieträgern zusammengefasst (Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, AGEB). In Tabelle 4-2 ist die Energiebilanz (AGEB 2022) aggregiert mit den daraus ermittelten N-Flüssen dargestellt. Im ersten Schritt wurde der gesamte Inlandsverbrauch der fossilen N-haltigen Energieträger auf die energetische und die nicht-energetische Verwendung verteilt, im zweiten Schritt anschließend die energetische Verwendung den vier Sub-Pools des Pools „Energiewirtschaft“ zugeordnet.

Tabelle 4-2: Energiebilanz der Bundesrepublik (Auszug für fossile N-haltige Energieträger) - zusammengefasste und z.T. vereinfachte Ergebnisse und Zu-ordnung zu N-Flüssen, Mittel 2015 – 2020 (Quelle: AGEB 2022; verändert).

Flusscode	Position in der Energiebilanz	Naturalmengen				N-Fluss				SUMME kt N a ⁻¹
		Stein- kohlen ^a 1000 t	Braun- kohlen ^b 1000 t	Rohöl 1000 t	Mineralöle zus. 1000 t	Stein- kohlen ^a kt N a ⁻¹	Braun- kohlen ^b kt N a ⁻¹	Rohöl kt N a ⁻¹	Mineralöle zus. kt N a ⁻¹	
	N-Gehalt in kg N t ^{-1c}	14,0	3,0	1,0	0,96 ^d					
SOURCE-EF.EC-fuel	Gewinnung im Inland	2.721	154.308	2.151	0	38,1	462,9	2,2	0,0	503,2
RW-EC.EC-fuel	Import Energieträger und Mineralöl- produkte	48.514	42	87.864	39.095	679,2	0,1	87,9	33,4	800,6
EF.EC-RW-fuel	Export Energieträger u. Mineralöl- produkte, incl. Hochsee- bunkerungen	- 1.027	- 1.503	- 90	- 24.621	- 14,4	- 4,5	- 0,1	- 39,0	- 58,0
Primärenergieverbrauch im Inland insgesamt^e		50.683	152.890	90.050	14.353	709,5	456,7	90,1	-1,6	1.245,7
(EF.EC intern)	Energiewirtschaft (unmittelbar) ^f	39.409	147.974	90.050	7.862	551,7 ^f	443,9 ^f	90,1	44,4 ^f	1.130,1
EF.EC-EF.IC-fuel	Bergbau, Metallverarbeitung, Indust- rie, sonstige Wirtschaft, usw.	11.010	3.588	0	2.144	154,1	10,8	0,0	5,4	170,3
EF.EC-EF.TR-fuel	Verkehr insgesamt	0	0	0	57.981	0,0	0,0	0,0	31,7	31,7
EF.EC-EF.OE-fuel	Haushalt, Gewerbe, Handel	264	678	0	17.903	3,7	2,0	0,0	3,7	9,4
Energetischer Verbrauch insgesamt^g		50.683	152.240	0	85.890	709,5	456,7	0	85,2	1.222,0^g
EF.EC-MP.NC-prod	Mineralölprodukte als Vorpro- dukte der chemischen Industrie	0	0	0	19.158				23,7	23,7
Nichtenergetischer Verbrauch insgesamt		0	0	90.050 ^h	19.158 ^h	0	0	90,1 ^h	23,7 ^h	23,7

^a Kohle, Briketts, Koks und andere Steinkohlenprodukte.

^b Kohle, Briketts und andere Braunkohlenprodukte.

^c N-Gehalte nach GEMIS, Vers. 2 (Fritsche et al. 1994), ECE (2018) und en2x (2023).

^d Gemittelt über alle Produkte; Wert gilt nur für die Mengen des Primärenergieverbrauch Inland gesamt.

^e Präziser: Primärenergieträgerverbrauch, d.h. incl. nichtenergetischem Verbrauch (einschließl. Bestandsänderungen). Entspricht der "Inlandsförderung und (Netto-)Import von fossilen Energieträgern" in Tabelle 13-1.

^f Berechnet als Differenz zw. „Energetischer Verbrauch insges.“ und der Summe(EF.EC-EF.IC-fuel, EF.EC-EF.TR-fuel, EF.EC-EF.OE-fuel); s.a. Kap. 4.1.1.

^g Abweichend zu AGEB (2017): Wert wird berechnet als Differenz zw. Primärenergie[träger]verbrauch im Inland und nichtenergetischem Verbrauch (einschl. statist. Differenzen).

^h Zur N-Bilanz zwischen Umwandlungseinsatz Rohöl und Umwandlungsausstoß mit Mineralölprodukten s. Tabelle 4-3.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Struktur der Energiebilanz in erster Linie dazu dient, die Erzeugung und Verwendung von Energie zu erfassen; in Bezug auf die Stoffflüsse der Energieträger treten bei verschiedenen Positionen Doppelzählungen und nicht eindeutige Zuordnungen auf, worauf in den Erläuterungen der Energiebilanz hingewiesen wird (AGEB 2015). Die Statistik kann jedoch von einem externen Nutzer nicht um diese Doppelzählungen bereinigt werden. Die Aufteilung bzw. Zuordnung der Positionen der Energiebilanz zu N-Flüssen konnte von den Autoren der vorliegenden Studie daher nur auf der Basis ihres (unvollständigen) Informationsstands vorgenommen werden, was leider auch die damit verbundenen N-Flüsse betrifft (Tabelle 4-2).

Die Energiebilanz umfasst auch den Umwandlungseinsatz und -ausstoß von Energieträgern. Dies betrifft vor allem die Verarbeitung von Rohöl (Erdöl) zu Mineralölprodukten (zusammengefasst zu 10 Produktgruppen). Deutschland hat 2015 – 2020 jährlich rund 90 Mio t Rohöl eingeführt, außerdem rund 14,4 Mio t Mineralölprodukte. Bei Annahme eines N-Gehalts von 0,1 % im Rohöl (nach en2x 2023) entspricht das rd. 90 kt N a⁻¹ (Tabelle 4-3).

Tabelle 4-3: N-Flüsse mit der Einfuhr von Rohöl und Mineralölprodukten sowie den aus Rohöl hergestellten Mineralölprodukten (Umwandlungsbilanz), Mittel 2015 – 2020 (Quelle: AGEB 2022; veränd.).

Produkt	N-Gehalt ^a kg N t ⁻¹	Einfuhr		Verbrauch nach Umwandlung	
		Produkt 1000 t	N-Fluss kt N a ⁻¹	Produkt 1000 t	N-Fluss kt N a ⁻¹
Rohöl	1,0	90.050	90,1		
Mineralölprodukte:					
Ottokraftstoffe	1,0	-3.033 ^b	-3,0	22.791	22,8
Rohbenzin (Naphta)	1,0	6.614	6,6	8.405	8,4
Flugturbinenkraftstoff	1,0	4.111	4,1	4.741	4,7
Dieselmkraftstoff	0,2	7.399	1,5	27.622	5,5
Heizöl leicht	0,2	2.308	0,5	14.850	3
Heizöl schwer	4,5	-1.818 ^b	-8,2	7.457	33,6
Petrolkoks	15,5	-163 ^b	-2,5	1.798	27,9
Flüssiggas	0	739	0	3.174	0
Raffineriegas	0	464	0	4.116	0
Andere Mineralölprodukte	0,3	-1.848 ^b	-0,6	10.094	3,0
Summen	(0,96) ^c	104.403	88,5	105.048	108,9

^a N-Gehalte nach GEMIS, Vers. 2 (Fritsche et al. 1994), ECE (2018), en2x (2023).

^b Negativer Wert: Exportüberschuss.

^c Mittlerer N-Gehalt der Mineralölprodukte.

Das Rohöl wird nahezu vollständig zu Mineralölprodukten verarbeitet (Destillation, Konversion). Die N-Gehalte der meisten Konversionsprodukte liegen ebenfalls in der Größenordnung von 0,1 % (nach Fritsche et al. 1994; ECE 2018), summiert über alle Mineralölprodukte beträgt der N-Fluss nach der Verarbeitung des Rohöls 109 kt N a⁻¹.

4.1.2 Bildung von thermischem NO_x

Stickstoffoxide (im Wesentlichen NO und NO₂) entstehen bei Verbrennungsvorgängen zum einen aus dem in der Luft enthaltenen molekularen N₂ (als thermisches NO_x bezeichnet) und zum anderen aus dem im Energieträger enthaltenen Stickstoff (als Brennstoff-NO_x bezeichnet). Für das nationale N-Inventar ist daher zu unterscheiden, welche NO_x-Menge bei Verbrennungsvorgängen tatsächlich neu gebildet wird, das heißt einen Zuwachs an N_r-Emissionen darstellt, und welche NO_x-Menge nur aus anderen, bereits im Brennstoff vorhandenen N_r-Verbindungen transformiert wird, womit aber keine Zunahme der N_r-Menge verbunden ist. Für diese Fragestellung wird in Tabelle 4-4 die Gesamtmenge der NO_x-Emissionen überschlägig aufgeteilt in die Neubildung von N_r in Form von thermischem NO_x und die Transformation von N(org) in den Energieträgern in NO_x.

Tabelle 4-4: Anteil des thermischen NO_x am insgesamt bei der Verbrennung gebildeten NO_x.

Quellbereich	NO _x -Emissionen ^a		Davon thermisches NO _x	
	Brennstoff	kt N a ⁻¹	Anteil ^b	kt N a ⁻¹
Energiewirtschaft und industrielle Energieerzeugung	zusammen	108,6		26,3
- davon Erzeugung durch	- Steinkohle (Trockenfeuerung)	35,8 ^c	20 %	7,2
	- Braunkohle	56,5 ^c	5 %	2,8
	- Gas	16,3 ^c	100 %	16,3
Transport und Verkehr	Diesel/Benzin	161,8	100 % ^d	161,8
Sonstige Energieerzeugung	(verschiedene)	39,6	5 % ^e	2,0
Übrige Quellen	(verschiedene)	53,5	0 %	0,0
Summe NO_x-Emission		363,5	(52 %)^f	190,1

^a S. Tabelle 3-4.

^b Anteil des thermischen NO_x an der gesamten NO_x-Emissionen geschätzt.

^c Aufteilung berechnet aus Energieerzeugung in TJ (Strom, Wärme, Industrie) nach Energiebilanz (AGEB 2017) sowie Brennstoff- und Verfahrens-bezogenen NO_x-Emissionsfaktoren für die Stromerzeugung (Fritsche u. Rausch 2007).

^d Schätzung UBA (schriftl. Mittlg. 2018).

^e Schätzwert.

^f Anteil der Summe thermisches NO_x an der gesamten NO_x-Emission.

Über alle Quellen von NO_x-Emissionen betrachtet, das heißt unter Einbezug der Emissionen außerhalb der Energiewirtschaft, verteilen sich die NO_x-Emissionen zu annähernd gleichen Teilen auf thermisches (rund 190 kt N a⁻¹) und nicht-thermisches NO_x (rund 173 kt N a⁻¹).

4.1.3 Herstellung von Kraftstoffen aus Biomasse (MP.FP-EF.EC-fuel)

In Deutschland wurden 2015 - 2020 im Mittel rd. 3,2 Mio t Biodiesel und rd. 685.000 t Bioethanol aus landwirtschaftlichen Rohstoffen produziert. Die Kraftstoffe selbst sind annähernd N-frei, das heißt der in den Ausgangsprodukten enthaltene Stickstoff verbleibt nahezu vollständig in den Produktionsrückständen.

Biodiesel und Pflanzenölkraftstoff werden praktisch ausschließlich aus Raps gewonnen. Es ist davon auszugehen, dass die Pressrückstände vollständig in die Futtermittelherstellung eingesetzt werden. Bioethanol wird aus verschiedenen Feldfrüchten gewonnen. Bei der Herstellung

aus Futtergetreide fallen proteinhaltige Lebens- und Futtermittel an (z.B. Kleie, Gluten und Getreideschlempe). Nach Auskunft des Bundesverbands der Deutschen Bioethanolwirtschaft e.V. (BDBE) wird Getreideschlempe entweder getrocknet und pelletiert oder als flüssiges Produkt als Einzelfuttermittel oder als Komponente in Mischfutter verwendet. Teilweise wird Getreideschlempe auch zur Biogaserzeugung eingesetzt. Bei der Erzeugung von Bioethanol aus Zuckerrüben werden als Kuppelprodukte insbesondere Zuckerrübenschnitzel und –pellets, Vinasse und Ammoniumsulfat erzeugt. Zuckerrübenschnitzel, Pressschnitzel und Vinasse werden in der Futtermittelindustrie eingesetzt, teilweise auch zur Biogasgewinnung genutzt; Ammoniumsulfat wird als Düngemittel verwertet. Es liegen allerdings keine statistischen Informationen vor, wie sich die Rückstände aus der Bioethanolerzeugung auf die Verwertungswege verteilen. Nach Einschätzung des BDBE wird der größte Teil der Nebenprodukte als Futtermittel (Mischfuttermittelkomponente) verwendet (BDBE 2018). In Tabelle 4-5 sind die N-Flüsse mit der Erzeugung von Kraftstoffen zusammengestellt.

Tabelle 4-5: Anbauflächen, Erträge und N-Fluss mit nachwachsenden Rohstoffen zur Herstellung von Kraftstoffen (FNR 2022), Mittel 2015 - 2020.

Kulturart	Anbaufläche ha	Ertrag dt ha ⁻¹	N-Gehalt %	N-Fluss kt N a ⁻¹
Raps für Biodiesel / Pflanzenöl	614.833	34,4	3,35	70,9
Pflanzen für Bioethanol, davon				
- Zuckerrüben	24.517	737,2	0,18	3,3
- Weizen	80.517	76,1	1,8	11,0
- Roggen	78.017	51,9	1,56	6,3
- Körnermais	18.833	92,7	1,72	3,0
- sonst. Futtergetreide (vor allem Gerste)	47.083	70,2	1,72	5,7
Summe Bioethanol	248.967			29,3
Summe Nachwachsende Rohstoffe für Kraftstoffe	863.800			100,2

Für das nationale N-Inventar wird vereinfachend angenommen, dass die Rückstände der gesamten Herstellung von Kraftstoffen aus landwirtschaftlicher Biomasse in die Futtermittelindustrie gehen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der gesamte Stickstoff, der in der eingesetzten landwirtschaftlichen Biomasse enthalten ist, in den Rückständen verbleibt, d.h. die Kraftstoffe sind N-frei und bei der Herstellung treten keine relevanten N-Verluste auf. Der N-Inflow für die Herstellung von Kraftstoffen aus Biomasse entspricht somit dem N-Outflow.

4.1.4 Ammoniak-Verbrauch für die Rauchgas-Entstickung (MP.NC-EF.EC-prod)

Zur Einhaltung der NO_x-Grenzwerte im Abgas von Kraftwerken werden die Stickstoffoxide durch die Zugabe von Ammoniak zu Wasser (H₂O) und Stickstoff (N₂) reduziert; der Vorgang wird umgangssprachlich auch als Rauchgas-Entstickung bezeichnet. Als Verfahren werden SCR (Selective Catalytic Reduction) bzw. SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction) eingesetzt, wobei in folgenden Kraftwerkarten relevante Mengen an Ammoniak, Ammoniakwasser oder Harnstoff verbraucht werden (Dr. M. Ruhrberg, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., schriftl. Mittgl. 12.04.2018):

- ▶ „Steinkohlekraftwerke mit nasser Rauchgaswäsche und SCR. Hierbei sind Fälle mit Schmelzkammerfeuerung und Trockenstaubfeuerung im Hinblick auf die Höhe des Ammoniak-Einsatzes zu unterscheiden. Aufgrund der höheren Rauchgaskonzentrationen vor Katalysator haben SKF üblicherweise höhere Ammoniakverbräuche als TFG. Kraftwerke mit Wirbelschichtfeuerung und Rostfeuerungen mit weniger als 100 MW Feuerungswärmeleistung setzen üblicherweise kein Ammoniak ein, da die NO_x-Grenzwerte allein mit feuerungsseitigen Maßnahmen eingehalten werden können. Gleiches gilt für alle Braunkohlekraftwerke, die im Regelfall keine sekundären Minderungsmaßnahmen einsetzen.
- ▶ Abfallverbrennungsanlagen (SCR, SNCR) und Altholzkraftwerke (SNCR), die nach 17. BimSchV genehmigt sind - mit Ausnahme einiger Anlagen, die über eine Wirbelschichtfeuerung verfügen.
- ▶ Dampfkessel und Heizwerke, die Schweröl und andere Mineralölprodukte einsetzen (SCR).
- ▶ Dieselmotoren, die leichtes Heizöl oder Dieselmotorkraftstoff und ggf. auch Erdgas oder andere Gase einsetzen (SCR, aber üblicherweise nur geringe Einsatzzeiten und mengenmäßig zu vernachlässigen).“

In der Periode des ersten nationalen N-Inventars wurden insgesamt rd. 100 kt NH₃-N pro Jahr (Mittel 2010 - 2014) für die Rauchgasreinigung in der allgemeinen Strom- und Wärmeversorgung verbraucht, davon rund 86 % in Steinkohlekraftwerken (der übrige Verbrauch entfällt auf die Verbrennung von Abfall und sonstigen Brennstoffen). In den Folgejahren hat diese Menge stark abgenommen von 85,8 kt NH₃-N a⁻¹ in 2015 auf 36,6 kt NH₃-N a⁻¹ in 2020 (Dr. M. Ruhrberg, BDEW, schriftl. Mittlg. 29.08.2023); im Mittel der Jahre 2015 - 2020 liegt der Wert bei 62,7 kt NH₃-N a⁻¹. Folgende Gründe haben laut BDEW zu diesem Rückgang des Ammoniakverbrauchs in Steinkohlekraftwerken geführt:

- ▶ Die Nettostromerzeugung aus Steinkohle ist in den letzten Jahren als Folge von Stilllegungen und Rückgang der Beschäftigung dramatisch gesunken.
- ▶ In den Jahren 2015 bis 2020 sind mehrere hochmoderne Steinkohlekraftwerke mit hohen Wirkungsgraden in Betrieb gegangen.
- ▶ In den letzten Jahren haben viele Steinkohlekraftwerke mit Schmelzkammerfeuerung den Strommarkt verlassen (Stilllegungen, Überführung in Reserven). Diese Altanlagen hatten überproportional hohe Ammoniakverbräuche aufgrund der höheren NO_x-Konzentrationen vor Eintritt in den Katalysator.
- ▶ Im Jahr 2020 lässt sich zudem ein gewisser Pandemieeffekt beobachten (Rückgang beim Stromverbrauch). Für die Folgejahre 2021 und 2022 erwartet der BDEW wieder eine Annäherung an das Niveau von 2019.

Für die Zukunft sind die Folgen der Grenzwertabsenkungen für mittelgroße Verbrennungsmotoren unter der 44. BimSchV (insbesondere für Erdgas und Biogas) zu berücksichtigen, die in vielen Fällen eine Nachrüstung mit Katalysatortechnik erfordern werden. Dieser Effekt wird allerdings erst nach dem Auslaufen der Übergangsregelungen in der Ammoniak-Verbrauchsmenge zu erkennen sein (M. Ruhrberg, BDEW, schrift. Mittlg. vom 29.08.2023).

4.1.5 Oxidation/Reduktion von Stickstoff bei Verbrennung und Entstickung (EF.EC-SINK-N2)

Es wird davon ausgegangen, dass die festen und flüssigen Rückstände (Asche, Filterstäube, Abwässer etc.) aus der Verbrennung von N-haltigen Energieträgern annähernd N-frei sind. Das bedeutet, dass der in den Brennstoffen enthaltene N_r vollständig zu NO_x und N₂ umgesetzt wird (in

Kraftwerken mit Wirbelschichtfeuerung und in Fahrzeugen mit SCR-Katalysatoren kann im Verlauf der Verbrennung daneben auch N_2O gebildet werden, was aber mengenmäßig hier nicht weiter berücksichtigt wird). Der Umsatz von reaktivem Stickstoff über die Förderung und Verbrennung von Energieträgern sowie mit der Verarbeitung von Rohöl wird daher im Folgenden als N_r -neutraler Vorgang betrachtet. In Tabelle 4-6 ist die N_r -Menge hergeleitet, die im Sub-Pool „Energiewirtschaft“ im Zuge der Verbrennung von Energieträgern rechnerisch wieder in N_2 überführt wird.

Insgesamt wurden mit der Inlandsförderung und dem Netto-Import von fossilen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle, Rohöl) 1.245,7 kt $N_r a^{-1}$ in Umlauf gebracht (Tabelle 4-2). Das Rohöl wird vollständig zu Mineralölprodukten verarbeitet, wobei eine geringe rechnerische Differenz von -20,7 kt $N a^{-1}$ zwischen der N-Menge in den eingeführten Produkten und der N-Menge in den daraus erzeugten Mineralölprodukten auftritt (Verbrauch nach Umwandlung, Tabelle 4-3), die hier aber nicht weiter berücksichtigt wird. Energetisch genutzt, das heißt verbrannt werden 1.222,0 kt $N a^{-1}$ in fossilen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle, Mineralölprodukte), zuzüglich einer geringen Menge an Holz als Brennstoff (in Großfeuerungsanlagen). Für die Rauchgasentstickung werden außerdem 62,7 kt $NH_3-N a^{-1}$ der Verbrennung zugeführt (Tabelle 4-6). Bei der Verbrennung werden (geschätzt) 173,4 kt $N a^{-1}$ als NO_x emittiert, das nicht-thermischen Ursprungs ist, das heißt, dass das NO_x aus dem Stickstoff im Brennstoff stammt. Somit verbleibt schließlich eine Menge von rechnerisch 1.114,8 kt $N_r a^{-1}$, die bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern in N_2 überführt wird.

Tabelle 4-6: Abschätzung der N_r -Mengen, die mit der Verbrennung von fossilen Energieträgern und Holz (in Großfeuerungsanlagen) und der Rauchgas-Entstickung (Pool Energiewirtschaft) zu N_2 oxidiert bzw. reduziert werden, Mittel 2015 – 2020.

Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt $N a^{-1}$
Verbrennung fossiler Energieträger (Braunkohle, Steinkohle, Mineralölprodukte; energetischer Verbrauch in Tabelle 4-2)	N(org)	1.222,0
Verbrennung Holz, Großfeuerungsanlagen (Tabelle 4-7)	N(org)	3,4
Rauchgas-Entstickung (Kap. 4.1.4)	NH_3	62,7
Summe Verbrennung und Entstickung		1.288,1
Abzüglich dabei neu gebildetes nicht-thermisches NO_x (Kap. 4.1.2)	NO_x	- 173,4
Oxidation/Reduktion von N_r zu N_2 mit Verbrennung und Entstickung		1.114,8

Zur Vereinfachung der Struktur des nationalen N-Inventars wird die Bildung von nicht-thermischem NO_x ausschließlich dem Sub-Pool „Energiewirtschaft“ zugerechnet (N-Fluss EF.EC-SINK(AT)-N2). Für die Verbrennung von Tiermehl (Tabelle 5-5), Holz (in Privathaushalten, Tabelle 6-3), Klärschlamm (Tabelle 9-6) und Abfall (Tabelle 9-3) wird vereinfachend angenommen, dass der gesamte N(org) im Brennstoff in N_2 überführt wird.

4.2 Sub-Pools Industrielle Energieerzeugung (EF.IC), Transport und Verkehr (EF.TR) und Sonstige Energieerzeugung (EF.OE)

Der Sub-Pool „Industrielle Energieerzeugung“ umfasst die Erzeugung von (Prozess-)Wärme und elektrischer Energie von Industrieunternehmen für die Güterproduktion, unter anderem für die

Herstellung von Zement, Verhüttung von Eisen und NE-Metallen, Papierherstellung, Lebensmittel- und Futtermittelherstellung usw. Hinweis: die Freisetzung von N_r aus der Industrie, die *nicht* auf Verbrennungsvorgänge zurückgeht, wird im Pool „Industrielle Produktion“ behandelt.

Der Sub-Pool „Verkehr und Transport“ erfasst die N-Flüsse, die von Verbrennungsprozessen in Transportfahrzeugen ausgehen. Der Berichterstattung zum NIR folgend werden der internationale Schiffstransport und der grenzüberschreitende Flugverkehr dabei dem territorialen nationalen N-Inventar *nicht* zugerechnet.

Im Sub-Pool „Sonstige Energiewirtschaft“ sind alle N-Flüsse zusammengefasst, die aus Verbrennungsvorgängen in den übrigen Bereichen auftreten, die mit Kap. 4.1 nicht abgedeckt werden. Dazu zählen insbesondere die Energieerzeugung in Privathaushalten (Hauswärme) sowie der Energieverbrauch von mobilen Arbeitsmaschinen (Baustellen, Landwirtschaft, Forst usw.).

In allen drei Sub-Pools treten als eingehender N-Fluss nur die Zufuhr mit der Erzeugung von Energieträgern und als ausgehende N-Flüsse nur die gasförmigen Emissionen auf (in der Sonstigen Energieerzeugung auch noch die Zufuhr mit Holz zur Verfeuerung). Die eingehenden N-Flüsse werden bereits im Rahmen der Energiebilanz ermittelt (Tabelle 4-2); weitere Erläuterungen zu den drei Sub-Pools sind daher nicht erforderlich.

4.3 Zusammenfassung der N-Flüsse Energiewirtschaft und Verkehr (EF)

In Tabelle 4-7 sind die N-Flüsse des Pools „Energiewirtschaft und Verkehr“ zusammengefasst.

Tabelle 4-7: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“, Mittel 2015 – 2020.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Sub-Pool Energiewirtschaft (EF.EC)					
SOURCE	EF.EC	SOURCE-EF.EC-fuel	Förderung fossiler Energieträger im Inland	N(org)	503,2
SOURCE	EF.EC	SOURCE-EF.EC-gasEM	Bildung von thermischem NO _x	NO _x	26,3
MP.FP	EF.EC	MP.FP-EF.EC-fuel	Landwirtschaftliche Produkte zur Erzeugung von Kraftstoffen	N(org)	100,2
MP.NC	EF.EC	MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Entstickung von Rauchgasen	NH ₃	62,7
FS.FO	EF.EC	FS.FO-EF.EC-wood	Holz zur energetischen Nutzung – Großfeuerungsanlagen	N(org)	3,4
RW	EF.EC	RW-EF.EC-fuel	Import von fossilen Energieträgern und Mineralölprodukten	N(org)	800,6
EF.EC	AT	EF.EC-AT-N2	Oxidation/Reduktion von N_r zu N ₂ während der Verbrennung und Entstickung	N ₂	1.114,8 ^a
EF.EC	AT	EF.EC-AT-gasEm	NH ₃ -, NO _x - und N ₂ O-Emissionen aus Verbrennungsprozessen in der Energiewirtschaft	NH ₃ NO _x N ₂ O	1,1 81,1 5,0
EF.EC	EF.IC	EF.EC-EF.IC-fuel	Fossile Energieträger zur Energieerzeugung in der Industrie	N(org)	170,3

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
EF.EC	EF.TR	EF.EC-EF.TR-fuel	Fossile Energieträger zur Verwendung in Transport und Verkehr	N(org)	31,7
EF.EC	EF.TR	EF.EC-EF.TR-fuel	Fossile Energieträger zur Verwendung in Haushalt, Gewerbe und Handel	N(org)	9,4
EF.EC	MP.FP	EF.EC-MP.FP-prod	Reststoffe der Erzeugung von Kraftstoffen aus landwirtschaftlichen Produkten	N(org)	100,2
EF.EC	MP.NC	EF.EC-MP.NC-prod	Rohöl- und Mineralölprodukte als Rohstoffe für die chemische Industrie	N(org)	23,7
EF.EC	WS.SW	EF.EC-WS.SW-waste	Abfälle aus der Erzeugung von Energieträgern und Raffinerieprodukten	N(org)	6,0
EF.EC	WS.WW	EF.EC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Energiewirtschaft	N(org)	6,0
EF.EC	RW	EF.EC-RW-fuel	Export von fossilen Energieträgern und Raffinerieprodukten	N(org)	58,0

Sub-Pool Industrielle Energieerzeugung (EF.IC)^a

EF.EC	EF.IC	EF.EC-EF.IC-fuel	Fossile Energieträger zur Energieerzeugung in der Industrie	N(org)	170,3
EF.IC	AT	EF.IC-AT-gasEm	NH ₃ -, NO _x - und N ₂ O-Emissionen aus Verbrennungsprozessen in der industriellen Energieerzeugung	NH ₃ NO _x N ₂ O	0,4 27,5 1,8

Sub-Pool Transport und Verkehr (EF.TR)^a

EF.EC	EF.TR	EF.EC-EF.TR-fuel	Fossile Energieträger zur Verwendung in Transport und Verkehr	N(org)	31,7
SOURCE	EF.TR	SOURCE-EF.TR-gasEM	Bildung von thermischem NO _x	NO _x	161,8
EF.TR	AT	EF.TR-AT-gasEm	NH ₃ -, NO _x - und N ₂ O-Emissionen aus Verbrennungsprozessen in Verkehr und Transport	NH ₃ NO _x N ₂ O	9,6 161,8 3,6

Sub-Pool Sonstige Energieerzeugung (EF.OE)^a

EF.EC	EF.OE	EF.EC-EF.OE-fuel	Fossile Energieträger zur Verwendung in Haushalt, Gewerbe und Handel	N(org)	9,4
SOURCE	EF.OE	SOURCE-EF.OE-gasEM	Bildung von thermischem NO _x	NO _x	2,0
FS.FO	EF.OE	FS.FO-EF.OE-wood	Holz zur energetischen Nutzung – Privathaushalte	N(org)	11,7
EF.OE	AT	EF.OE-AT-gasEm	NH ₃ -, NO _x - und N ₂ O-Emissionen aus der sonstigen Energieerzeugung	NH ₃ NO _x N ₂ O	1,6 39,6 1,0

^a Eigentlich müsste auch für die Sub-Pools EF.EC, EF.TR und EF.OE jeweils ein Fluss EF.XX-SINK(AT)-N₂ ausgewiesen werden. Der Verbrauch von Energieträgern lässt sich in der Energiebilanz aber nicht immer eindeutig auf diese Bereiche aufteilen (vgl. Tabelle 4-2), so dass zur Vereinfachung der Darstellung die Gesamtmenge der N₂-Oxidation/Reduktion zu N₂ während der Verbrennung und Entstickung ausschließlich dem Sub-Pool EF.EC zugerechnet wird.

4.4 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Energiewirtschaft und Verkehr

In Tabelle 4-8 sind die eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Bereich „Energiewirtschaft und Verkehr“ gegenübergestellt. Die Bilanz weist eine geringfügige Differenz von rund 29 kt N a⁻¹ zwischen Input und Output auf. Der Kenntnisstand zu den tatsächlich ablaufenden Prozessen ist allerdings unzureichend; im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte nicht geklärt werden, ob die Differenz zwischen der N-Menge in den Energieträgern und den bei der Verbrennung emittierten N_r-Verbindungen (NO_x, N₂O) tatsächlich der gebildeten N₂-Menge entspricht.

Tabelle 4-8: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“^a, Mittel 2015 - 2020

Zufluss (N _r -Quellen)	kt N a ⁻¹	Abfluss (N _r -Verbleib)	kt N a ⁻¹
Energieträger - Gewinnung im Inland	503,2	N ₂ O und NO _x -Emissionen in die Atmosphäre	- 321,4
Import von Energieträgern und Mineralölprodukten	800,6	NH ₃ -Emissionen in die Atmosphäre	- 12,7
Bildung von thermischem NO _x (Energieerzeugung, Verkehr)	190,1	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Verbrennung und Entstickung	- 1.114,8
NH ₃ zur Entstickung von Rauchgasen	62,7	Rohöl- und Mineralölprodukte als Rohstoffe für die chemische Industrie	- 23,7
Biomasse zur Erzeugung v. Kraftstoffen	100,2	Rückstände aus der Erzeugung von Kraftstoffen aus Biomasse	- 100,2
Holz zur energetischen Nutzung (Privathaushalte und Großfeuerungsanlagen)	15,1	Abfall, Abwasser	- 12,0
		Export Energieträger und Mineralölprodukte	- 58,0
Summe Zuflüsse	1.671,9	Summe Abflüsse	- 1.642,8
Differenz: 29,1			

^a Einschließlich Hochseebunkerungen.

In mehreren Tabellen wird für den N-Fluss mit der Gewinnung von Energieträgern im Inland (in Deutschland: Förderung von Braunkohle und Steinkohle) sowie die Bildung von thermischem NO_x als Pool(ex) „SOURCE“ aufgeführt. Diese Benennung wird eingeführt, da im nationalen N-Inventarschema der ECE (2013) der Fall einer Pool-internen „Schöpfung“ respektive das In-Verkehr-Bringen von N_r – hier durch die Förderung aus Lagerstätten (Abbau von Vorräten) oder im Zuge von Verbrennungsvorgängen – nicht vorgesehen ist. Im STAN-Diagramm der N-Flüsse (Kap. 12) bildet die Atmosphäre den Pool(in) für diese Flüsse.

Im Unterschied zum NNB Annex 1 (ECE 2013) wird im hier vorgestellten nationalen N-Inventar für Deutschland die Energieerzeugung aus Biogasanlagen nicht im Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“, Sub-Pool „Sonstige Energieerzeugung“ aufgeführt, sondern dem Sektor Landwirtschaft zugerechnet (s. Kap. 7.3).

Im ersten nationalen N-Inventar 2010 - 2014 (Bach et al. 2020) wurde noch eine Differenz in der Umwandlungsbilanz in Höhe von 818 kt N a⁻¹ ausgewiesen, ohne dass dafür eine schlüssige Erklärung angeführt werden konnte. Diese Differenz war darauf zurückzuführen, dass - mangels Deutschland-spezifischer Daten seinerzeit - gemäß ECE (2018) ein N-Gehalt von 1,0 % im Rohöl angesetzt worden war. Mit dem jetzt verwendeten Wert von 0,1 % N im Rohöl vermindert sich diese Differenz in der Umwandlungsbilanz (Einfuhr von Rohöl und Mineralölprodukten sowie Output mit den daraus hergestellten Mineralölprodukten) auf nur noch 20,4 kt N a⁻¹, was im Rahmen der unvermeidlichen statistischen Schwankungsbreite liegt. Diese Differenz wird daher nicht als eigener N-Fluss aufgeführt.

5 Industrielle Produktion (MP)

Im Pool „Industrielle Produktion“ werden die N-Flüsse erfasst, die mit der Erzeugung und stofflichen Verwendung von N-haltigen Produkten verbunden sind. Die Abgrenzung folgt der Definition, die von IPCC (2006) bzw. EEA (2013) für die Berechnung der Emission von Treibhausgasen angewendet wird. Die industrielle Produktion wird in drei Sub-Pools gegliedert; Tabelle 5-1 gibt eine Übersicht der relevanten Stickstoffflüsse.

- Nahrungs- und Futtermittelindustrie (MP.FP)
- Stickstoff-Chemie (MP.NC)
- Sonstige industrielle Produktion (MP.OP).

Die Erzeugung bzw. Umwandlung von Energierohstoffen wird nicht der industriellen Produktion, sondern dem Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ (Kap. 4) zugerechnet.

Tabelle 5-1: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Industrielle Produktion“.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
Sub-Pool Nahrungs- und Futtermittelindustrie (MP.FP)					
EF.EC	MP.FP	EF.EC-MP.FP-prod	Reststoffe aus der Erzeugung von Kraftstoffen aus landwirtschaftlichen Produkten	N(org)	4.1.3
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-an-imProd	Tierische Marktprodukte	N(org)	7.1.1
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-fish	Erzeugung Aquakultur und Binnenfischerei	N(org)	7.1.2
AG.SM	MP.FP	AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte	N(org)	7.2.1
HY.CW	MP.FP	HY.CW-MP.FP-fish	Anlandungen Küsten- und Hochseefischerei	N(org)	10.2.4
RW	MP.FP	RW-MP.FP-prod	Import von Nahrungs- und Futtermitteln	N(org)	5.1.5
MP.FP	EF.EC	MP.FP-EF.EC-fuel	Landwirtschaftliche Produkte zur Erzeugung von Kraftstoffen	N(org)	4.1.3
MP.FP	MP.OP	MP.FP-MP.OP-crop	Landwirtschaftliche Erzeugnisse zur Verwendung als industrielle Rohstoffe	N(org)	5.1.3
MP.FP	HS.HB	MP.FP-HS.HB-food	Nahrungsmittel für die Humanernährung	N(org)	5.1.1
MP.FP	HS.HB	MP.FP-HS.HB-feed	Futtermittel für Heimtiere (Hunde, Katzen)	N(org)	5.1.2
MP.FP	AG.AH	MP.FP-AG.AH-feed	Futtermittel für landwirtschaftl. Nutztiere (aus inländ. Erzeugung u. Importen)	N(org)	7.1.1
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-org-Fert	Tiermehle – Verwendung als organische Düngemittel	N(org)	5.1.4
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-seed	Herstellung von landwirtschaftlichem Saat- u. Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	7.2.1
MP.FP	AG.BP	MP.FP-AG.BP-cosub	Biogas-Cosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	7.3

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
MP.FP	WS.SW	MP.FP-WS.SW-fuel	Tiermehle – Thermische Verwertung	N(org)	5.1.4
MP.FP	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Nahrungs- und Futtermittelindustrie	N(org)	9.2.1
MP.FP	RW	MP.FP-RW-prod	Export von Nahrungs- und Futtermitteln	N(org)	5.1.5
Sub-Pool Stickstoff-Chemie (MP.NC)					
SOURCE ^a	MP.NC	SOURCE-MP.NC-NH3	Ammoniak-Synthese (Haber-Bosch-Verfahren)	NH ₃	5.2.1
EF.EC	MP.NC	EF.EC-MP.NC-fuel	Rohöl- und Raffinerieprodukte als Rohstoffe für die chemische Industrie	N(org)	4.1.1
RW	MP.NC	RW-MP.NC-prod	Import von Produkten der Stickstoff-Chemie	NH ₃ , NO ₃ N(org)	5.2.2
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der chemischen Industrie	NO _x , N ₂ O	3.2.1
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der chemischen Industrie	NH ₃	3.2.1
MP.NC	EF.EC	MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Entstickung von Rauchgasen	NH ₃	4.1.4
MP.NC	MP.OP	MP.NC-MP.OP-prod	Chem. Grundstoffe u. Erzeugnisse zur Herstellung v. Konsumgütern (außer Mineraldünger)	NH ₃ , NO ₃ N(org)	5.2.2
MP.NC	HS.MW	MP.NC-HS.MW-minFert	N-Mineraldünger zur Verwendung in Haus- und Kleingärten	NH ₃ , NO ₃ N(org)	5.2.3
MP.NC	AG.SM	MP.NC-AG.SM-minFert	N-Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	NH ₃ , NO ₃ N(org)	7.2.1 5.2.3
MP.NC	WS.WW	MP.NC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Stickstoff-Chemie	N(org)	9.2.1
MP.NC	RW	MP.NC-RW-prod	Export von Produkten der Stickstoff-Chemie	NH ₃ , NO ₃ N(org)	5.2.2
Sub-Pool Sonstige industrielle Produktion (MP.OP)					
MP.FP	MP.OP	MP.FP-MP.OP-crop	Landwirtschaftliche Erzeugnisse zur Verwendung als industrielle Rohstoffe	N(org)	5.1.3
MP.NC	MP.OP	MP.NC-MP.OP-prod	Chemische Grundstoffe und Erzeugnisse zur Herstellung von Konsumgütern	N(org)	5.2.3
FS.FO	MP.OP	FS.FO-MP.OP-wood	Holz zur stofflichen Nutzung	N(org)	8.1.5
WS.SW	MP.OP	WS.SW-MP.OP-waste	Recycling von Abfallstoffen (stoffliche Verwertung)	N(org)	9.1.2

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
RW	MP.OP	RW-MP.OP-prod	Import von N-haltigen Konsumgütern	N(org)	5.3
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NO _x , N ₂ O	3.2.1
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NH ₃	3.2.1
MP.OP	HS.MW	MP.OP-HS.MW-prod	Produktion / Verbrauch von (N-haltigen) Konsumgütern	N(org)	5.3
MP.OP	WS.SW	MP.OP-WS.SW-waste	Abfälle aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	9.1.1
MP.OP	WS.WW	MP.OP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	9.2.1
MP.OP	RW	MP.OP-RW-prod	Export von N-haltigen Konsumgütern	N(org)	5.3

^a Zur Bedeutung von „SOURCE“ s. Kap. 5.5.

Aufgrund der Struktur der Statistischen Daten zur Abfallentsorgung (s. Kap. 9.1.1) können für die Sub-Pools „Nahrungs- und Futtermittelindustrie“ und „Stickstoff-Chemie“ keine N-Flüsse mit Abfallstoffen in den Sub-Pool „Abfallwirtschaft“ hinein berechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese Mengen (im Wesentlichen) im N-Fluss aus dem Sub-Pool „Sonstige Industrielle Produktion“ (MP.OP-WS.SW-waste) mit enthalten sind. Weiterhin wird mangels besserer Daten der N-Fluss mit dem Recycling von Abfallstoffen ebenfalls nur dem Sub-Pool „Sonstige Industrielle Produktion“ zugerechnet, obwohl wahrscheinlich die Aufbereitung von N-haltigen Abfallstoffen auch in der chemischen Industrie (Sub-Pool „Stickstoff-Chemie“) stattfindet.

5.1 Nahrungs- und Futtermittelindustrie (MP.FP)

Der Sub-Pool „Nahrungs- und Futtermittelindustrie“ umfasst alle N-Flüsse, die mit der industriellen Herstellung oder Verarbeitung von Nahrungs- und Genussmittel sowie Futtermitteln für landwirtschaftliche Nutztiere und Heimtiere verbunden sind.

5.1.1 Nahrungsmittel Humanernährung (MP.FP-HS.HB-food)

Für die Angaben zur Produktion wird der Verbrauch von Nahrungsmitteln nach dem jeweiligen Statistischen Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMEL 2022a) zugrunde gelegt, das eine komprimierte Übersicht bietet. In Tabelle 5-2 sind nur die nach Warengruppen zusammengefassten Ergebnisse dargestellt, die Berechnung der N-Mengen erfolgte in der Ausgangstabelle (BMEL 2022a) für rund 40 Erzeugnisse.

Tabelle 5-2: Stickstoff-Fluss mit dem Verbrauch von Nahrungsmitteln (BMEL 2022a, Tab. 207), Mittel 2015 - 2020; nur zusammengefasste Produktgruppe dargestellt.

Warengruppe	Menge 1000 t	N-Gehalt ^a %	N-Fluss t N a ⁻¹
Getreideerzeugnisse (Mehlwert)	7.015	2,2 ^b	154,2
Reis, Hülsenfrüchte Kartoffeln	5.569	0,4 ^b	26,0
Zucker, Glukose, Isoglukose, Honig, Kakao	3.911	0,2 ^b	7,9

Warengruppe	Menge 1000 t	N-Gehalt ^a %	N-Fluss t N a ⁻¹
Gemüse, Obst (Marktanbau)	17.385	0,2 ^b	34,2
Fleisch und Fleischerzeugnisse (Schlachtgewicht)	7.245	2,7 ^c	231,9
Fische und Fischerzeugnisse (Fanggewicht)	1.178	2,8 ^b	33,0
Milch und Milcherzeugnisse	13.464	1,4 ^{b, d}	146,2
Öle und Fette	1.987	0,0 ^d	0,5
Eier und Eierzeugnisse	1.192	1,9 ^d	22,7
Zusammen	58.946		656,6

^a N-Gehalt jeweils im Mittel der Erzeugnisse.

^b N-Gehalte nach NNB Annex 6, Table 12 (ECE 2013).

^c N-Gehalte nach Stoffstrombilanzverordnung (StoffstromBilV 2017), Anhang 1, Tab. 5.

^d N-Gehalte nach Souci et al. (2018).

Angaben zu Produktionsmengen in der Nahrungsmittelerzeugung sind zwar auch in der Produktionserhebung des Statistischen Bundesamts (DESTATIS 2022b) aufgeführt; in dieser Statistik ist aber erstens die zum Absatz bestimmte Produktion nicht immer eindeutig ersichtlich und zweitens sind etliche Positionen aus Geheimhaltungsgründen gesperrt. Angaben zur Verwendung landwirtschaftlicher Erzeugnisse sind ebenfalls im Statistischen Jahrbuch Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMEL 2022a) in den Statistiken zur "Versorgung mit ..." bzw. "Verwendung von ..." (Tab. 155 bis Tab. 208) zu finden, in denen bspw. Auch die Menge der "Inlandsverwendung" und darunter die Position "Nahrung" angegeben wird. Diese Tabellen sind jedoch wesentlich komplexer und es ist nicht immer eindeutig erkennbar, welche Angaben tatsächlich den Absatz an Verbraucher bezeichnen.

Der N-Fluss von rd. 660 kt N a⁻¹ mit dem Verbrauch von Nahrungsmittel entspricht einer Eiweißversorgung von rund 135 Gramm Protein pro Kopf und Tag (brutto, vor Abzug der Verluste bei der Weiterverarbeitung, im Handel, in den Haushalten und bei der Zubereitung). Dieser Wert steht in einem plausiblen Verhältnis zur Eiweißzufuhr von 0,8 bis 1 Gramm pro Kilogramm Körpergewicht und Tag, entsprechend rund täglich 60 bis 80 Gramm pro Erwachsene, die von der Deutschen Gesell. für Ernährung als Minimalwert zum Erhalt der Muskelmasse empfohlen wird.

5.1.2 Futtermittel für Heimtiere (MP.FP-HS.HB-feed)

Der N-Fluss über die Fütterung von Hunden und Katzen wird anhand NNB Annex 6, Formel 0.9 (ECE 2013) geschätzt (Tabelle 5-3). Der Futterbedarf der weiteren Heimtierarten (Kleintiere, Ziervögel, Aquarien, Terrarien) ist gering und wird in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Tabelle 5-3: Stickstoff-Fluss mit Futtermitteln für Hunde und Katzen, Mittel 2015 - 2020.

Haustierart	Anzahl Tiere ^a 1000 St.	Futterraufnahme kg Tier ⁻¹ a ⁻¹	N-Gehalt ^b %	N-Fluss kt N a ⁻¹
Hunde	9.317	163,3	2,88	43,8
Katzen	14.200	73,0	4,16	43,1
Summen	23.517			86,9

^a Quelle: Industrieverband Heimtierbedarf (2022).

^b Nach NNB Annex 6, Table 18 (ECE 2013).

5.1.3 Landwirtschaftliche Pflanzen als industrielle Rohstoffe (MP.FP-MP.OP-crop)

Die Anbauflächen von Pflanzen zur Verwendung als industrielle Rohstoffe (im Wesentlichen als Industriestärke und technisches Rapsöl) – mit Ausnahme der Herstellung von Kraftstoffen (s. Kap. 4.1.3) - werden in den jeweiligen Statistischen Jahrbüchern (BMEL 2022a, Tab. 47 ff.) ausgewiesen. Zur Berechnung des N-Fluss (Tabelle 5-4) werden als Erträge die Durchschnittserträge der betreffenden Kulturarten angesetzt.

Tabelle 5-4: Stickstoff-Fluss mit dem Anbau von landwirtschaftlichen Pflanzen als industrielle Rohstoffe (ohne Rohstoffe für Kraftstoffe), Mittel 2015 – 2020 (BMEL 2022a, Tab. 47 ff.).

Erzeugnis/Verwendung	Anbaufläche 1000 ha	Ertrag dt ha ⁻¹	N-Gehalt %	N-Fluss kt N a ⁻¹
Industriestärke (als Körnermais gerechnet)	132,2	92,7	1,4	17,2
Industriezucker (Zuckerrüben)	12,0	737,2	0,18	1,6
Technisches Rapsöl	121,3	34,4	3,35	14,0
Technisches Sonnenblumenöl	8,5	20,3	2,9	0,5
Technisches Leinöl	3,8	25 ^a	3,5	0,3
Pflanzenfasern (als Faserlein gerechnet)	2,9	80 ^b	1,0	0,2
Arznei- und Farbstoffe	12,0	10 ^c	1,0 ^a	0,1
Summen	292,7			33,9

^a geschätzt nach: <https://pflanzen.fnr.de/industriepflanzen/oelpflanzen/oellein>

^b geschätzt nach <https://pflanzen.fnr.de/industriepflanzen/faserpflanzen/faserlein>

^c geschätzt

5.1.4 Verwertung tierischer Nebenprodukte

Fleisch und Knochen, die nicht als Nahrungsmittel für den Menschen verwendet werden, werden als Tierische Nebenprodukte bezeichnet und in drei Kategorien eingeteilt:

Kat. 1: Tiere, die von Tierseuchen betroffen waren.

Kat. 2: Tiere, die aus anderen Gründen als durch eine Tierseuche und auch nicht durch Schlachtung gestorben sind („gefallene“ Tiere) oder die nicht zur Schlachtung zugelassen wurden.

Kat. 3: Nebenprodukte aus Schlachtung, Zerlegung und Fleischverarbeitung, die aus wirtschaftlichen Gründen nicht zum menschlichen Verzehr verwendet werden, also bei Schlachtung, Zerlegung und Fleischverarbeitung übrigbleiben.

Die Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte veröffentlicht jährlich Statistiken zu Anfall und Verarbeitung tierischer Nebenprodukte (Niemann, versch. J.), Tabelle 5-5 zeigt die N-Mengen und deren Verwertungswege.

Tabelle 5-5: Verwendung tierischer Nebenerzeugnisse - Proteine^a (Mittel 2015 - 2020) und Zuordnung zu N-Flüssen (Quelle: Niemann; versch. J.)

Flusscode	Verwendung	Produkte (t) Kategorie ^b			N-Fluss (kt N a ⁻¹) Kategorie ^{b, c}			
		K1	K2	K3/LM	K1	K2	K3/LM	Zus.
MP.FP-AG.SM-orgFert ^d	Technische Verwendung (Dünger)		30.771	88.334		2,7	6,4	9,1
MP.FP-WS.SW-fuel	Thermische Verwertung	193.639		905	17,0		0,1	17,1
(in MP.FP intern verarbeitet) ^d	Futtermittel			345.543		0,03	24,9	24,9

^a Nur Nebenprodukte „Proteine“ dargestellt; Tierfette sind annähernd N-frei und werden daher hier nicht aufgeführt.

^b Zur Bedeutung der Kategorien s. Text.

^c N-Gehalte: K1, K2: 8,8 % N; K3: 7,2 % N (Quelle: www.stn-vvtn.de/produkte.php).

^d Verarbeitung als Futtermittel für Heimtiere, d.h. Verwendung innerhalb des gleichen Sub-Pools.

Die Verfütterung von Proteinen aus Tierkörpern an landwirtschaftliche Nutztiere (zur Lebensmittelerzeugung) ist in der EU verboten, diese Futtermittel werden im Wesentlichen für die Ernährung von Heimtieren verwendet. Technische Verwendung bedeutet Absatz als Düngemittel und thermische Verwertung bezeichnet den Einsatz als Brennstoff in Feuerungsanlagen. Da mutmaßlich der Aspekt der Abfallverwertung dabei im Vordergrund steht, wird dieser N-Fluss der Abfallwirtschaft als aufnehmendem Pool zugeordnet (und nicht der Energieerzeugung).

5.1.5 Import und Export der Ernährungswirtschaft (RW-MP.FP-prod, MP.FP-RW-prod)

Tabelle 5-6 gibt die Einfuhr und Ausfuhr der Ernährungswirtschaft nach Warengruppen gemäß Angaben im Statistischen Jahrbuch Ernährung, Landwirtschaft und Forsten wieder (BMEL 2022a). Analog zu Tabelle 5-2 sind hier nur die nach Warengruppen zusammengefassten Ergebnisse dargestellt, die Berechnung der N-Mengen erfolgte in der Ausgangstabelle (BMEL 2022a) für rund 40 einzelne Erzeugnisse. Für die Angabe der Einfuhr mit Futtermitteln wird aus mehreren Gründen auf die Tabelle zur „Futtermittelzufuhr in die Landwirtschaft aus Einfuhren“ zurückgegriffen, die Angaben dort sind bereits Netto-Importe (BMEL 2022a). Dies erfolgt aus zwei Gründen: (i) in Bezug auf die Importmengen an Futtermitteln sind nach Ansicht der Autor*innen die Angaben der Futtermittelzufuhr-Statistik plausibler und vollständiger als die Angaben zur ernährungswirtschaftlichen Einfuhr und Ausfuhr; (ii) auch die Bilanz des BMEL für die Landwirtschaft verwendet diese Angaben zum Futteraufkommen aus der Inlandserzeugung (BMEL 2022a) und aus Einfuhren (Tab. 122).

Tabelle 5-6: Import und Export der Ernährungswirtschaft (ohne Futtermittel) und Netto-Import Futtermittel, Mittel 2014 – 2020 (BMEL 2022a).

Warengruppe	Import 1000 t	Export 1000 t	N-Gehalt % ^a	Import kt N a ⁻¹	Export kt N a ⁻¹
Getreide und Getreideerzeugnisse (einschl. Reis)	13.371,4	16.196,3	2,0	260,7	371,9
Kartoffeln und Kartoffelerzeugnisse	1.171,7	2.724,6	0,6	7,3	12,1
Zucker und Kakao	2.941,5	3.289,4	0,6	25,3	18,9
Obst und Obsterzeugnisse	9.288,1	3.855,8	0,1	10,9	2,0
Gemüse, Gewürze, Sämereien etc.	6.400,6	1.487,3	0,3	22,2	5,6
Bier (1000 hl)	7.120,5	16.529,7	0,1	7,1	16,5
Ölfrüchte, Öle und Fette	12.058,1	2.804,2	0,0	0,2	0,1
Molkereierzeugnisse (ohne Butter)	4.727,1	5.989,7	1,7	57,4	97,4
Eier, Honig	629,9	188,0	1,7	10,4	3,1
Schlachtvieh, Fleisch und Fleischerzeugnisse	3.080,0	4.415,7	3,1	96,1	135,4
Fische und Fischerzeugnisse	960,6	595,2	2,5	23,3	13,9
Lebende Tiere (ohne Schlachttiere)	^b	^b		2,6	11,3
Futtermittel (Netto-Import)				382,4 ^c	(entf.)
Summen Import und Export				905,9	688,2

^a N-Gehalte: s. Fußnote zur Tabelle 5-2.

^b Angabe erfolgt in Stückzahl.

^c Angabe wird aus der Stickstoff-Bilanz des BMEL übernommen (Netto-N-Import).

5.2 Stickstoff-Chemie (MP.NC)

Der Sub-Pool „Stickstoff-Chemie“ behandelt die Herstellung und Verarbeitung einer breiten Palette von stickstoffhaltigen chemischen Grundstoffen, Düngemitteln, Chemiefasern, Kunststoffen in Primärformen, Pflanzenschutzmitteln, Pharmazeutika usw. (zur Klassifikation der Wirtschaftszweige s. auch DESTATIS 2008).

5.2.1 Ammoniak-Synthese (SOURCE-MP.NC-NH3)

Zentrale Größe im Pool „Industrielle Produktion“ ist die Ammoniak-Synthese mittels des Haber-Bosch-Verfahrens: Die Überführung von N₂ in NH₃ als primärer reaktiver N-Verbindung stellt den mit Abstand größten initialen anthropogenen N-Eintrag in den N-Zyklus dar. Daneben wird N₂ auch über die Synthese von Calciumcyanamid (Kalkstickstoff) in eine reaktive Form gebracht.

- Ammoniak-Synthese, Mittel 2015 - 2020 (nach VCI 2021): 2.606,3 kt N a⁻¹
- Calciumcyanamid-Synthese, Mittel 2015 – 2020 (AlzChem 2021), rd. 21,0 kt N a⁻¹.

In der Summe werden somit 2.627,3 kt N a⁻¹ mittels chemischer Synthese in eine reaktive N-Form überführt. Zur Vereinfachung wird im Folgenden dabei durchgängig von Ammoniak-Synthese gesprochen, die geringfügige Menge an Kalkstickstoff wird nicht gesondert erwähnt.

5.2.2 Produktion, Import und Export chemischer Erzeugnisse (MP.NC-MP.OP-prod, RW-MP.NC-prod, MP.NC-RW-prod)

Zentrale Statistik zu den Produktionsmengen des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland ist die Produktionserhebung (DESTATIS 2023, Tab. 42131-0004), in der die Warengruppen detailliert aufgeschlüsselt werden (tiefe fachliche Gliederung, sog. 9-Steller). Die Produktionserhebung unterscheidet auch zwischen Vorprodukten und Endabsatz (Rubrik „darunter zum Absatz bestimmt“ in der Statistik). Es zeigt sich allerdings, dass die Auswertung der Produktionserhebung erhebliche Probleme aufwirft:

- Es kann nicht ermittelt werden, ob bzw. in welchem Umfang Doppelzählungen in der Statistik auftreten: Alle Produkte (präziser: die darin enthaltenen Stickstoffmengen), die nicht „zum Absatz bestimmt“ sind, sind Vorprodukte für weitere Verarbeitungsstufen. Sie werden dann aber in der Produktionsstatistik möglicherweise in derjenigen Warengruppe erneut erfasst, für die das Vorprodukt verwendet wird, das heißt sie werden auf weiteren Verarbeitungs- bzw. Veredelungs-Stufen erneut gezählt. Beispielsweise wird „Ammoniak“ zunächst in der Primärsynthese erfasst, dann auch als „Ammoniak in wässriger Lösung“, dann in den daraus hergestellten Polyamiden usw.
- Andererseits können auch Mengen, die „zum Absatz bestimmt sind“, als Vorprodukte für andere Produktionsverfahren dienen und damit nicht unmittelbar in den Konsum eingehen.
- Für etliche Güterarten werden die Angaben zur Produktionsmenge und/oder „darunter zum Absatz“ bestimmt aus Datenschutzgründen nicht veröffentlicht.

Für die Erfassung des N-Fluss aus der chemischen Industrie (Tabelle 5-7) wurden die „zum Absatz bestimmten“ Produktionsmengen der Produktionserhebung ausgewertet. Zunächst wurden die Angaben der Produktionserhebung (9-Steller) zusammengefasst gemäß der Klassifikation der Warengruppen (Zuordnungstabelle n. Eurostat, o.J.), die in der Import- und Export-Statistik verwendet wird (auf der Ebene der 4-stelligen Codes, WAXxxx). Die Produktionsmengen können damit auch direkt in Beziehung gesetzt werden mit den Import- und Export-Mengen. Zur Umrechnung in N-Flüsse in Tabelle 5-7 wird – soweit sinnvoll – für jede Warengruppe die Summenformel einer idealtypischen chemischen Verbindung dieser Gruppe angenommen. Aus deren stöchiometrischem Verhältnis wird dann der N-Gehalt berechnet, der für die gesamte Stoffmenge in der betreffenden Produktgruppe verwendet wird.

In der Produktionserhebung sind einige Erzeugnisse nicht eindeutig als „Düngemittel“ einzuordnen, die Angaben für die Produktgruppe der N-Düngemittel wurden daher IVA (2020) entnommen.

Hinweis: Die Primär-Produktion von Ammoniak ist in Tabelle 5-7 nicht aufgeführt, da die N-Mengen aller übrigen Positionen der Produktionserhebung darauf zurückgehen (s. Kap. 5.2.1), das heißt zumindest diese Doppelzählung wird dadurch vermieden.

Die Mengenangaben zum Import und Export von N-haltigen chemischen Erzeugnissen wurden der Außenhandelsstatistik (Warenverzeichnis gegliedert als 4-Steller) entnommen (DESTATIS 2023, Tab. 51000-0013).

Gemäß Tabelle 5-7 berechnet sich eine Gesamtmenge von 2.835 kt N a⁻¹ in den „zum Absatz bestimmten“ Produkten der Chemie-Industrie. Diese Menge übersteigt rechnerisch die Bereitstellung von 2.627 kt primärem NH₃-N a⁻¹ mit der Ammoniak-Synthese um rd. 8 %. Diese Differenz ist mutmaßlich sowohl auf mögliche Doppelzählungen als auch auf die Unsicherheiten in den Annahmen zum N-Gehalt der Produktgruppen zurückzuführen.

Aus den Problemen mit der Auswertung der Produktionserhebung ergibt sich als Konsequenz, dass der N-Fluss mit Vorprodukten aus der chemischen Industrie in den Sub-Pool „sonstige industrielle Produktion“ (MP.NC-MP.OP-prod) nicht explizit aus statistischen Angaben ermittelt werden kann. Dieser N-Fluss wird daher als Differenzgröße berechnet: Ausgangspunkt ist die Gesamtmenge an N_r von 3.141,5 kt N a⁻¹, die in die chemische Industrie hineinfließt. Diese Menge setzt sich zusammen aus 2.627,3 kt N a⁻¹ NH₃-Synthese, dem Import-Export-Saldo von 490,5 kt N a⁻¹ mit chemischen Erzeugnissen (s. Tabelle 5-7) sowie 23,7 kt N a⁻¹ in den petrochemischen Erzeugnissen als Ausgangsstoffen der organischen Chemie. Produkte, die die chemische Industrie eindeutig als Endprodukte verlassen, sind Düngemittel (1.567,2 kt N a⁻¹) und NH₃ zur Rauchgas-Entstickung (62,7 kt N a⁻¹) sowie weiterhin die gasförmigen Emissionen (7,7 kt N a⁻¹) und Abwasser (62,7 kt N a⁻¹); diese N-Flüsse betragen zusammen 1.702,4 kt N a⁻¹. Die Differenz von 1.439,1 kt N a⁻¹ wird dann als diejenige N-Menge angesetzt, die zur Weiterverarbeitung in den Sub-Pool „sonstige industrielle Produktion“ eingeht.

5.2.3 Stickstoff-Mineraldünger (MP.NC-AG.SM-minFert; MP.NC-HS.MV-minFert)

In der Düngemittelstatistik wird eine Absatzmenge von 1.567,2 kt N a⁻¹ mit Mineraldüngern an die Landwirtschaft sowie für Haus- und Kleingärten usw. ausgewiesen (DESTATIS 2022). Die Einsatzmenge außerhalb der Landwirtschaft, das heißt in Haus- und Kleingärten, auf Sportplätzen, für kommunale Grünflächen usw., beträgt nach Expertenschätzung ca. 30 kt N a⁻¹ (IVA, Industrieverband Agrar, schriftl. Mittlg. 05.10.2024), so dass für die Landwirtschaft 1.537,2 kt N a⁻¹ angesetzt werden.

Die inländische Düngemittel-Produktion von 1281,9 kt N a⁻¹ (nach IVA 2020, 2024) sowie der Import-Export-Saldo von 308,7 kt N a⁻¹ summieren sich zu 1.590,6 kt N a⁻¹. Damit tritt gegenüber der Absatzmenge (1.567,2 kt N a⁻¹) eine Differenz von 23,4 kt N a⁻¹ auf. Dieser Unterschied kann auf Lagerbestandsveränderungen sowie auf statistische Differenzen zurückgeführt werden.

Tabelle 5-7: Produktion, Import und Export von Erzeugnissen der Stickstoff-Chemie, Mittel 2015 – 2020 (Quelle: DESTATIS 2023, 2023b; IVA 2020, 2024).

Waren-Gruppe (WA)	Bezeichnung	Verbindung ^a	Menge (1000 t)			N-Gehalt ^b (%)	N-Fluss (kt N a ⁻¹)		
			Produktion ^c	Import	Export		Produktion	Import	Export
WA2808	Salpetersäure, Nitriersäuren	HNO ₃	291,0	143,9	170,8	22,2 %	64,6	31,9	37,9
WA2814	Ammoniak, wasserfrei oder in wässriger Lösung	NH ₃	681,1	640,1	328	82,4 %	561,2	527,4	270,3
WA282510	Hydrazin und Hydroxylamin, andere Metalloxide	N ₂ H ₄ , NH ₂ OH	28,5	5,1	25,3	65,0 %	18,5	3,3	16,4
WA2834	Nitrite, Nitrate	NO ₂ , NO ₃	k.A.	56,8	8,1	26,0 %	k.A.	14,8	2,1
WA2837	Cyanide, Cyanioxide und komplexe Cyanide	HCN	k.A.	5,6	0,06	48,3 %	k.A.	2,7	0,0
WA2850	Hydride, Nitride, Azide, Silicide und Boride	Li ₃ N	2,3	1,9	1,0	40,2 %	0,9	0,8	0,4
WA2904	Sulfoderivate, Nitroderivate d. Kohlenwasserstoffe	H ₂ N ₂ O ₂	42,7	49,3	110,5	45,2 %	19,3	22,3	49,9
WA2921	Verbindungen mit Aminofunktion	Anilin u.a.	296,6	500,1	226,6	^d	65,5	150,0	68,0
WA2922	Amine mit Sauerstofffunktionen	C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₂	151,5	240,1	255,9	19,2 %	29,1	46,1	49,1
WA2923	Quartäre organische Ammoniumsalze, Lecithine	C ₅ H ₁₄ ClNO	52,2	86,9	53,0	10,0 %	5,2	8,7	5,3
WA2924	Verbindungen mit Carbonsäureamidfunktion	CH ₃ NO ₂	490	68,4	99,3	23,0 %	112,7	15,7	22,8
WA2925	Verbindungen mit Carbonsäureimidfunktion		24,4	18,6	18,1	10,0 %	2,4	1,9	1,8
WA2926	Verbindungen mit Nitrilfunktion	C ₃ H ₃ N	49,3	101,2	136,7	26,4 %	13,0	26,7	36,1
WA2928	Organische Derivate des Hydrazins, Hydroxylamins	N ₂ H ₄ , NH ₂ OH	k.A.	7,2	3,2	65,0 %	k.A.	4,7	2,1

Waren-Gruppe (WA)	Bezeichnung	Verbindung ^a	Menge (1000 t)			N-Gehalt ^b (%)	N-Fluss (kt N a ⁻¹)		
			Produktion ^c	Import	Export		Produktion	Import	Export
WA2929	Verbindungen mit anderen Stickstofffunktionen	HNCO	538,8	115,3	331,5	32,6 %	175,6	37,6	108,1
WA2930	Organische Thioverbindungen	C ₅ H ₁₁ NO ₂ S	96,1	73,9	94,2	9,4 %	9,0	6,9	8,9
WA2933	Heterocyclische Verbindungen mit Stickstoff	Melamin	171,7	353,0	274,9	47,0 %	80,7	165,9	129,2
WA2934	Nucleinsäure u. ihre Salze, andere heterocycl. Verb.		31,3	19,8	48,0	16,8 %	5,3	3,3	8,1
WA2935	Sulfonamide	H ₂ NSO ₂ NH ₂	0,8	5,6	1,7	29,2 %	0,2	1,6	0,5
WA3402	Grenzflächenaktive Zubereitungen, Waschmittel		2.663,9	1.422,1	1.827,6	2,1 %	55,9	29,9	38,4
WA3501	Casein, Caseinate, Caseinderivate, Caseinleime		11,5	30,0	28,0	15,0 %	1,7	4,5	4,2
WA3502	Albumine, Albuminate und andere Albuminderivate	Eiprotein	17,9	21,3	41,5	16,0 %	2,9	3,4	6,6
WA3503	Gelatine, Leime tierischen Ursprungs		27,2	35,2	30,6	15,0 %	4,1	5,3	4,6
WA3504	Peptone und andere Eiweißstoffe, Hautpulver	Proteine	8,8	39,2	26,7	16,0 %	1,4	6,3	4,3
WA3507	Enzyme, zubereitete Enzyme		8,5	33,0	29,0	15,0 %	1,3	5,0	4,4
WA3908	Polyamide in Primärformen		1.124,1	548,0	794,5	12,0 %	134,9	65,8	95,3
WA3909	Aminoharze, Phenolharze, Polyurethane		1.877,2	863,1	1.298,1	10,0 %	187,7	86,3	129,8
Summen Produktion, Import und Export chemischer Erzeugnisse ohne Düngemittel							1.553,1	1.276,0	1.104,6
(WA3102)	Stickstoffhaltige Düngemittel ^e	rein N	1.281,9	971,3	662,6	100,0 %	1.281,9	971,3	662,6
Summen Produktion, Import und Export insges.							2.835,0	2.247,3	1.767,2

^a Stickstoff-Verbindung, die die Warengruppe repräsentiert und für deren stöchiometrisches Verhältnis der N-Gehalt berechnet wird.

^b N-Gehalt: für Warengruppen mit Angabe einer N-Verbindung in Spalte 3 aus dem stöchiometrischen Verhältnis berechnet; für alle anderen Warengruppen Schätzwerte nach NNB Annex 6, Table 13 und Table 16 (ECE 2013).

^c Gewicht der zum Absatz bestimmten Produktion.

^d N-Fluss summiert aus Angaben für verschiedene Untergruppen mit unterschiedlichen N-Gehalten innerhalb der Warengruppe.

^e Angaben für stickstoffhaltige Düngemittel nach IVA (2020); Mittel 2015-2018.

5.3 Sonstige industrielle Produktion (MP.OP)

Der Sub-Pool „Sonstige industrielle Produktion“ beinhaltet die Herstellung von N-haltigen Gütern, die zum Absatz (an Endverbraucher) oder zum Export bestimmt sind. Die N-Flüsse mit Produktion (MP.OP-HS.MW-prod), Import (RW-MP.OP-prod) und Export (MP.OP-RW-prod) von Konsumgütern werden – analog zu den Erzeugnissen der Chemie-Industrie - ausgehend von der Produktionserhebung ermittelt (DESTATIS 2023b, Tab. 42131-0003) und sind in Tabelle 5-8 zusammengefasst. Zur Problematik möglicher Doppelzählungen sowie der großen Unsicherheit in der Schätzung der N-Gehalte gelten die Ausführungen in Kap. 5.2.2 entsprechend. Bei den Konsumgütern tritt als zusätzliches Problem auf, dass für mehrere Warengruppen die Mengenangabe nicht in der Einheit Gewicht erfolgt, sondern in Stück, Quadratmeter oder Kubikmeter. Diese Angaben wurden unter Annahme eines mittleren Gewichts pro Einheit in Tonnen umgerechnet.

Tabelle 5-8: Produktion, Import und Export von N-haltigen Erzeugnissen der Konsumgüterindustrie, Mittel 2015 – 2020 (Quelle: DESTATIS 2023; 2023b).

Produktionserhebung		Menge (1000 t)			N-Gehalt ^a (%)	N-Fluss (kt N a ⁻¹)		
Warengruppen	Bezeichnung	Produktion ^b	Import	Export		Produktion	Import	Export
WA24	Tabak	158	271,2	240,9	4,0 %	6,3	10,8	9,6
WA41 - WA43, WA50	Textilien (Leder, Seide, Pelze)	20	392	357	15,0 %	3,0	58,8	53,6
WA44xx	Fertigwaren (Holzverarbeitung)	28.894	20.035	19.920	0,1 %	28,9	20,0	19,9
WA47 - WA49	Zellstoff/Papier	31.706	23.051	22.124	0,2 %	63,4	46,10	44,25
WA51	Wolle, feine und grobe Tierhaare	2	46	37	15,0 %	0,3	6,9	5,6
WA52, WA53	Baumwoll-Gewebe	33	256	123	0,2 %	0,1	0,5	0,2
WA54, WA55	Synthetische Fasern und Gewebe	332	826	350	12,0 %	39,8	99,1	42,0
WA56 - WA67	Bekleidung, Stoffe, Teppiche, Schuhe	752	3.513	2.413	0,2 %	1,5	7,0	4,8
WA94xx	Möbel, Beleuchtungskörper usw.	3.174	4.597	2.566	0,2 %	6,3	9,2	5,1
Summen Produktion, Import und Export						149,6	258,4	185,1

^a Gewicht der zum Absatz bestimmten Produktion; für Erzeugnisse bzw. Warengruppen mit Angabe in der Einheit Stück, Fläche oder Volumen wurde die Einheit in Gewicht umgerechnet unter Annahme eines mittleren Gewichts pro Einheit.

^b N-Gehalt: Schätzwerte nach NNB Annex 6, Table 13 und Table 16 (ECE 2013).

Der N-Fluss mit Konsumgütern aus dem Sub-Pool „sonstige industrielle Produktion“ in den Sub-Pool „Konsumgüter“ (MP.OP-HS.MW-prod) entspricht der (inländischen) Produktionsmenge von 149,6 kt N a⁻¹ zuzüglich des Import-Export-Saldos von 73,3 kt N a⁻¹.

5.4 Zusammenfassung der N-Flüsse industrielle Produktion (MP)

In Tabelle 5-9 sind die N-Flüsse des Pools „Industrielle Produktion“ zusammengefasst.

Tabelle 5-9: Eingehende und ausgehende N-Mengen der N-Flüsse im Pool „Industrielle Produktion“, Mittel 2015 – 2020.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Sub-Pool Nahrungs- und Futtermittelindustrie (MP.FP)					
EF.EC	MP.FP	EF.EC-MP.FP-prod	Reststoffe aus der Erzeugung von Kraftstoffen aus landwirtschaftlichen Produkten	N(org)	100,2
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-animProd	Tierische Marktprodukte	N(org)	495,2
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-fish	Erzeugung Aquakultur und Binnenfischerei	N(org)	0,8
AG.SM	MP.FP	AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte	N(org)	1.022,9
HY.CW	MP.FP	HY.CW-MP.FP-fish	Anlandungen Küsten- und Hochseefischerei	N(org)	7,6
RW	MP.FP	RW-MP.FP-prod	Import von Nahrungs- und Futtermitteln	N(org)	905,9
MP.FP	EF.EC	MP.FP-EF.EC-fuel	Landwirtschaftliche Produkte zur Erzeugung von Kraftstoffen	N(org)	100,2
MP.FP	MP.OP	MP.FP-MP.OP-crop	Landwirtschaftliche Erzeugnisse zur Verwendung als industrielle Rohstoffe	N(org)	33,9
MP.FP	HS.HB	MP.FP-HS.HB-food	Nahrungsmittel für die Humanernährung	N(org)	656,6
MP.FP	HS.HB	MP.FP-HS.HB-feed	Futtermittel für Heimtiere (Hunde und Katzen)	N(org)	86,9
MP.FP	AG.AH	MP.FP-AG.AH-feed	Futtermittel für landwirtschaftliche Nutztiere (aus inländ. Erzeugung u. Importen)	N(org)	1.060,8
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-orgFert	Tiermehle – Verwendung als organische Düngemittel	N(org)	9,1
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-seed	Herstellung v. landwirtschaftlichem Saat- u. Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	20,0
MP.FP	AG.BP	MP.FP-AG.BP-cosub	Biogas-Cosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	44,1
MP.FP	WS.SW	MP.FP-WS.SW-fuel	Tiermehle - Thermische Verwertung	N(org)	17,1
MP.FP	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Nahrungs- und Futtermittelindustrie	N(org)	32,8
MP.FP	RW	MP.FP-RW-prod	Export von Nahrungs- und Futtermitteln	N(org)	688,2

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Sub-Pool Stickstoff-Chemie (MP.NC)					
SOURCE ^a (AT)	MP.NC	AT-MP.NC-NH3	Ammoniak-Synthese (Haber-Bosch-Verfahren) ^b	NH ₃	2.627,3
EF.EC	MP.NC	EF.EC-MP.NC-fuel	Rohöl- und Raffinerieprodukte als Rohstoffe für die chemische Industrie	N(org)	23,7
RW	MP.NC	RW-MP.NC-prod	Import von Produkten der Stickstoff-Chemie	NH ₃ , NO ₃ N(org)	2.247,3
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der chemischen Industrie	NO _x , N ₂ O	1,3 1,4
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der chemischen Industrie	NH ₃	5,0
MP.NC	EF.EC	MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Entstickung von Rauchgasen	NH ₃	62,7
MP.NC	MP.OP	MP.NC-MP.OP-prod	Chem. Grundstoffe u. Erzeugnisse zur Herstellung v. Konsumgütern (außer Mineraldünger)	NH ₃ , NO ₃ N(org)	1.439,1
MP.NC	HS.MW	MP.NC-HS.MW-minFert	N-Mineraldünger zur Verwendung in Haus- und Kleingärten	NH ₃ , NO ₃ N(org)	30,0
MP.NC	AG.SM	MP.NC-AG.SM-minFert	N-Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	NH ₃ , NO ₃ N(org)	1.537,2
MP.NC	WS.WW	MP.NC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Stickstoff-Chemie	N(org)	64,8
MP.NC	RW	MP.NC-RW-prod	Export von Produkten der Stickstoff-Chemie	NH ₃ , NO ₃ N(org)	1.756,8
Sub-Pool Sonstige industrielle Produktion (MP.OP)					
MP.FP	MP.OP	MP.FP-MP.OP-crop	Landwirtschaftliche Erzeugnisse zur Verwendung als industrielle Rohstoffe	N(org)	34,0
MP.NC	MP.OP	MP.NC-MP.OP-prod	Chemische Grundstoffe und Erzeugnisse zur Herstellung von Konsumgütern	N(org)	1.439,1
FS.FO	MP.OP	FS.FO-MP.OP-wood	Holz zur stofflichen Nutzung	N(org)	26,4
WS.SW	MP.OP	WS.SW-MP.OP-waste	Recycling von Abfallstoffen (stoffliche Verwertung)	N(org)	361,2
RW	MP.OP	RW-MP.OP-prod	Import von N-haltigen Konsumgütern	N(org)	258,4
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NO _x , N ₂ O	16,1 0,6
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NH ₃	2,7
MP.OP	HS.HB	MP.OP-HS.HB-prod	Verbrauch von (N-haltigen) Konsumgütern	N(org)	149,6

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
MP.OP	WS.SW	MP.OP-WS.SW-waste	Abfälle aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	58,6
MP.OP	WS.WW	MP.OP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	24,6
MP.OP	RW	MP.OP-RW-prod	Export von N-haltigen Konsumgütern	N(org)	185,1

^a Zur Bedeutung von „SOURCE“ s. Kap. 5.5, wird im STAN-Diagramm (Kap. 12) dem Pool(out) AT zugerechnet.

^b Einschließlich Synthese von Calciumcyanamid.

5.5 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Industrielle Produktion

Der Pool „Industrielle Produktion“ ist der mit Abstand größte Umsatzraum für reaktiven Stickstoff (Tabelle 5-10), was vor allem auf die Stickstoff-Chemie zurückzuführen ist.

Tabelle 5-10: Summen der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse in den Sub-Pools sowie des Pools „Industrielle Produktion“ insgesamt (ohne interne N-Flüsse), Mittel 2015 - 2020.

Sub-Pool	Zufluss kt N a ⁻¹	Abfluss kt N a ⁻¹	Differenz kt N a ⁻¹
Nahrungs- und Futtermittelindustrie	2.532,6	- 2.749,7	- 217,1
Stickstoff-Chemie	4.898,3	- 4.898,3	0
Sonstige industrielle Produktion	2.117,0	- 437,3	1.679,7
Summe Pool „Industrielle Produktion“, ohne interne N-Flüsse zwischen Sub-Pools	8.076,9	- 6.614,3	1.462,6

Für den Bereich der „Nahrungs- und Futtermittelindustrie“ ist der Saldo zwischen den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen annähernd ausgeglichen. Dies deutet daraufhin, dass die statistischen Datengrundlagen zu den Mengenflüssen und die Annahmen zu den N-Gehalten in den Erzeugnissen die tatsächliche Situation einigermaßen zutreffend wiedergeben.

Über die Herstellung und den Import von N-haltigen chemischen Erzeugnissen wird die größte N_r-Menge in Umlauf gebracht. Der Inlandsabsatz und Export von Stickstoffdüngern für die Landwirtschaft haben daran den größten Anteil. Mit Ausnahme der Düngemittel ist die Berechnung der N-Flüsse mit der Produktion von N-haltigen chemischen Erzeugnissen (als Vorprodukten oder Fertigwaren) sowie von Konsumgütern (zum Absatz an Endverbraucher) jedoch durch ein sehr hohes Maß an Unsicherheit gekennzeichnet. Zwischen Zufluss und Abfluss im Sub-Pool „Sonstige industrielle Produktion“ besteht eine Diskrepanz von insgesamt rund 1.680 kt N a⁻¹. Ein wesentlicher Teil davon ist auf die Differenz von 1.289 kt N a⁻¹ zurückzuführen, die zwischen der N-Menge in den chemischen Grundstoffen und Erzeugnissen zur Herstellung von Konsumgütern von 1.439 kt N a⁻¹ (MP.NC-MP.OP-prod) und der N-Menge von (nur) rund 150 kt N a⁻¹ in den Konsumgütern zum Absatz an Verbraucher (MP.OP-HS.MW-prod) klafft. Diese Unsicherheit ist auf zwei Ursachen zurückzuführen: zum einen ist die Produktionserhebung (DESTATIS 2022b) aufgrund der Doppelzählungen und der vielen unveröffentlichten Werte offensichtlich nur sehr eingeschränkt geeignet, die Warenströme zur Weiterverarbeitung und zum Endverbrauch sach-

gerecht zu erfassen bzw. zu unterscheiden (s. Kap. 5.2.2 und 5.3). Zum anderen sind für viele Erzeugnisse bzw. Warengruppen die N-Gehalte nicht bekannt, die in den Berechnungen verwendeten Werte haben daher teilweise nur Platzhalterfunktion. Weiterhin trägt auch der hohe Input in die industrielle Produktion von rund 361 kt N a⁻¹ mit dem Recycling von Abfallstoffen (Rückfluss aus Pool WS) zu der o.g. Diskrepanz bei, wobei auch dieser N-Fluss sehr unsicher ist.

In der vorstehenden Erläuterung bzw. in Tabelle 5-10 wird die gesamte Differenz zwischen Zufluss und Abfluss dem Sub-Pool „Sonstige industrielle Produktion“ zugerechnet. Diese Zuschreibung ergibt sich aus der Prämisse, dass in der Stickstoff-Chemie (mit Ausnahme der Düngemittel) keine Produkte zum Absatz an Endverbraucher erzeugt werden, d.h. den Pool verlassen, sondern die chemischen Erzeugnisse vollständig zur Weiterverarbeitung zu Endprodukten in den Sub-Pool „Sonstige industrielle Produktion“ übergeben werden. In der Gesamtbetrachtung sind die Ergebnisse für die beiden Sub-Pools „Stickstoff-Chemie“ und „Sonstige industrielle Produktion“ nur mit großer Vorsicht zu interpretieren. Für den N-Fluss mit der NH₃-Synthese wird in Tabelle 5-1 und Tabelle 5-9 als Pool(ex) „SOURCE“ aufgeführt, da im N-Inventarschema des ECE (2013) eine Pool-interne Erzeugung von N_r (hier: NH₃ aus N₂) nicht vorgesehen ist (s.a. Kap. 4.4). Im STAN-Diagramm (Kap. 12) bildet die Atmosphäre den Pool(ex) für diesen Fluss.

6 Ernährung und Konsum (HS)

Der Pool „Ernährung und Konsum“ beschreibt die N-Flüsse, die mit Ernährung, Haushalt, Wohnen und Konsum der Bevölkerung verbunden sind. Dies umfasst den Verbrauch von Lebensmitteln und Konsumgütern, die Haltung von Heimtieren sowie die N-Flüsse, die auf die Siedlungsfläche bezogen sind. Abweichend von NNB Annex 6 (ECE 2013) wird der Pool „Ernährung und Konsum“ hier nur in zwei Sub-Pools gegliedert; Tabelle 6-1 gibt eine Übersicht der relevanten Stickstoffflüsse.

- Ernährung (Menschen und Heimtiere) (HS.HB)
- Konsumgüter (Material World).

Tabelle 6-1: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Ernährung und Konsum“^a.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
Sub-Pool Menschliche Ernährung und Heimtiere (HS.HB)^a					
MP.FP	HS.HB	MP.FPHS.HB-food	Nahrungsmittel für die Humanernährung	N(org)	5.1.1
MP.FP	HS.HB	MP.FP-HS.HB-feed	Futtermittel für Heimtiere (Hunde u. Katzen)	N(org)	5.1.2
HY.GW	HS.HB	HY.GW-HS.HB-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO ₃	10.1.2
HS.HB	AT	HS.HB-AT-gasEm	Gasförmige Ausscheidung von NH ₃ durch den Menschen	NH ₃	6.1
HS.HB	WS.SW	HS.HB-WS.SW-waste	Abfälle aus Haushalten (menschliche Ernährung)	N(org)	9.1.1
HS.HB	WS.WW	HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser aus Haushalten (Exkrementen)	N(org)	9.2.1
Sub-Pool Konsumgüter (HS.MW)					
AT	HS.MW	AT-HS.MW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Siedlungsflächen	NH ₃ , NO _x	3.4
MP.NC	HS.MW	MP.NC-HS.MW-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in Haus- und Kleingärten	NO ₃ , NH ₃ , N(org)	5.2.2
MP.OP	HS.MW	MP.OP-HS.MW-prod	Verbrauch von Konsumgütern	N(org)	5.3 6.2
FS.FO	HS.MW	FS.FO-HS.MW-wood	Holz zur energetischen Nutzung – Privathaushalte	N(org)	8.1.5
WS.WW	HS.MW	WS.WW-HS.MW-sludge	Klärschlamm zur Verwertung bei landbaulichen Maßnahmen	N(org)	9.2.2
HS.MW	AT	HS.MW-AT-atmEm	NO _x und N ₂ O-Emissionen aus dem Siedlungsbereich	N ₂ O	3.4
HS.MW	WS.SW	HS.MW-WS.SW-waste	Konsumgüter-Abfall aus dem Siedlungsbereich	N(org)	9.1.1

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
HS.MW	WS.WW	HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser aus dem Siedlungsbereich (befestigte Flächen)	N(org)	9.2.1
HS.MW	HY.GW	HS.MW-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus dem Siedlungsbereich	NO ₃	10.1.1

^a Anmerkung: NO_x- und N₂O-Emissionen aus dem Siedlungsbereich werden im National Inventory Report (NIR, UBA 2023) nicht berichtet.

Ein eigener Sub-Pool „Heimtiere“ wurde nicht eingeführt, da der N-Fluss in diesem Bereich nur eine einzige Position umfasst; im Vergleich zu Komplexität der N-Flüsse der Sub-Pools in anderen Sektoren wäre eine derartige Strukturierung übergliedert.

Die Ernährung von Haustieren kann als Teil der Ernährung im Haushaltsbereich insgesamt (Humanernährung und Heimtiere) mitberücksichtigt werden. Wenn kein eigener Sub-Pool „Heimtiere“ vorhanden ist, dann entfällt auch der in NNB Annex 6 (ECE 2013) vorgesehene Sub-Pool „Organische Erzeugnisse“, in dem nur die Nahrungsmittel auf die beiden Verwendungen „menschliche Ernährung“ und „Heimtiere“ verteilt werden.

6.1 Menschliche Ernährung (HS.HB)

In den Sub-Pool „Menschliche Ernährung“ geht die Verwendung von Nahrungsmitteln für die menschliche Ernährung und die Fütterung von Heimtieren (Haustieren) ein. Eigenerzeugte Lebensmittel (Haus- und Kleingärten) sind dabei mengenmäßig vernachlässigbar und werden nicht berücksichtigt. Der Outflow aus dem Sub-Pool erfolgt im Wesentlichen über die Abgabe von Exkrementen in das Abwassersystem (Kläranlagen, Mischwasserentlastungen) bzw. direkt in Oberflächengewässer (für Haushalte ohne Anschluss an eine zentrale Abwasserbehandlungsanlage). N-Anreicherung im menschlichen und tierischen Körper während der Wachstumsphase sowie der Endverbleib von Stickstoff im Leichnam sind mengenmäßig vernachlässigbar und werden nicht berücksichtigt.

In NNB Annex 6 (ECE 2013) wird auch die Abgabe von Ammoniak mit Schweiß und Atmung durch den menschlichen Organismus berücksichtigt. Nach Sutton et al. (2000; zit. Nach NNB Annex 6, Gl. 0.18) beträgt die gasförmige NH₃-Ausscheidung 17 g N pro Erwachsenen und Jahr.

$$\text{NH}_3\text{-Abgabe: } 0,017 \text{ kg NH}_3\text{-N Erw.}^{-1} \text{ a}^{-1} * 82,8 \text{ Mio Einwohner} = 1,4 \text{ kt N a}^{-1}.$$

Zur Vereinfachung wird auf eine differenzierte Berechnung für Babys und Kleinkinder verzichtet.

6.2 Konsumgüter (HS.MW)

Der Sub-Pool „Konsumgüter“ umfasst N-haltige Erzeugnisse (außer Nahrungsmitteln), die in Privathaushalten verwendet werden. Dazu zählen nach NNB (ECE 2013) Möbel, Textilien und Bekleidung, Verpackungsmaterial, Holz- und Zellstoffprodukte sowie Tabak (s. Warengruppen in Tabelle 5-8).

Die Produktion bzw. der Absatz von Konsumgütern werden in der Produktionserhebung (DE-STATIS 2022b, Tab. 42131-0003) erfasst; die Ermittlung der Gütermengen bzw. des N-Fluss sowie die Problematik dieser Statistik werden in Kap. 5.3 erläutert.

N-haltige Kunststoffe können außerdem auch in Geräten der Unterhaltungselektronik, Fahrzeugen, Haushaltsgeräten usw. sowie in Materialien zur Ausstattung von Gebäuden (bspw. Dämmstoffe) enthalten sein. Für diese Produktgruppen sind aber weder Angaben zu den Absatzmengen (Gewicht) noch auch nur halbwegs realistische Annahmen zum N-Gehalt verfügbar.

Weiterhin werden in diesem Sub-Pool auch die N-Flüsse mit der atmosphärischen Deposition von NH_y und NO_x auf Siedlungsflächen, mit der Nitratauswaschung aus Siedlungsflächen sowie mit der landbaulichen Verwertung von Klärschlamm (Rekultivierung von Abbauf Flächen, Depo-nien etc.) aufgeführt. Diese N-Flüsse stellen zwar keinen Güterkonsum dar, in der Strukturierung des nationalen N-Inventars (ECE 2013) ist aber kein anderer Sub-Pool für den Inflow bzw. Out-flow dieser N-Flüsse vorgesehen.

6.3 Zusammenfassung der N-Flüsse Ernährung und Konsum (HS)

In Tabelle 6-2 sind die N-Flüsse des Pools „Ernährung und Konsum“ zusammengefasst.

Tabelle 6-2: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Ernährung und Konsum“, Mittel 2015 – 2020^a.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Sub-Pool Menschliche Ernährung und Heimtiere (HS.HB)					
MP.FP	HS.HB	MP.FP-HS.HB-food	Nahrungsmittel für die Humanernährung	N(org)	656,6
MP.FP	HS.HB	MP.FP-HS.HB-feed	Futtermittel für Heimtiere (Hunde und Katzen)	N(org)	86,9
HY.GW	HS.HB	HY.GW-HS.HB-abstr	NO_3 -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO_3	18,3
HS.HB	AT	HS.HB-AT-gasEm	Gasförmige Ausscheidung von NH_3 durch den Menschen	NH_3	1,4
HS.HB	WS.SW	HS.HB-WS.SW-waste	Abfälle aus Haushalten (menschliche Ernährung)	N(org)	133,3
HS.HB	WS.WW	HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser aus Haushalten (Exkrememente)	N(org)	343,7
Sub-Pool Konsumgüter (HS.MW)					
AT	HS.MW	AT-HS.MW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Siedlungsflächen	NH_y , NO_x	49,0 23,5
MP.NC	HS.MW	MP.NC-HS.MW-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in Haus- und Kleingärten	NO_3 , NH_3 N(org)	30,0
MP.OP	HS.MW	MP.OP-HS.MW-prod	Verbrauch von Konsumgütern	N(org)	149,6
WS.WW	HS.MW	WS.WW-HS.MW-sludge	Klärschlamm zur Verwertung für landbauliche Maßnahmen	N(org)	18,2
HS.MW	AT	HS.MW-AT-atmEm	NO_x und N_2O -Emissionen aus dem Siedlungsbereich	N_2O	0,6

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
HS.MW	WS.SW	HS.MW-WS.SW-waste	Abfall von Konsumgütern	N(org)	50,8
HS.MW	WS.WW	HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser aus dem Siedlungsbereich (befestigte Flächen)	N(org)	5,7
HS.MW	HY.GW	HS.MW-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Siedlungs- und Verkehrsflächen	NO ₃	41,8

^a Anmerkung: NO_x- und N₂O-Emissionen aus dem Siedlungsbereich werden im National Inventory Report (NIR, UBA 2023) nicht berichtet.

6.4 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Ernährung und Konsum

In Tabelle 6-3 sind die Zuflüsse und Abflüsse in und aus dem Pool „Ernährung und Konsum“ in aggregierter Form gegenübergestellt. Es tritt eine erhebliche Differenz von 455 kt N a⁻¹ in Erscheinung, die bezogen auf die eingehende N-Menge rund 44 % entspricht. Diese Differenz ist auf erhebliche Unsicherheiten bei mehreren N-Flüssen zurückzuführen. Dies betrifft zunächst die Nutzung der Produktionserhebung und die Diskrepanz zwischen dem N-Fluss mit N-haltigen Produkten in die Konsumgüterindustrie hinein (MP.NC-MP.OP-prod) und anschließend der Produktionsmenge an Konsumgütern zum Absatz an Endverbraucher (MP.OP-HS.MW-prod); die Erläuterungen in Kap. 5.5 gelten hier in gleicher Weise. Weiterhin stellt auch die N-Menge im Abwasser aus Haushalten und von versiegelten Flächen nur eine Schätzgröße dar. Schließlich steht die N-Menge von (nur) 50,8 kt N a⁻¹ im Abfall an Konsumgütern, die aus der Abfallstatistik ermittelt wurde, in einem eklatanten Gegensatz zum N-Zufluss von rund 223 kt N a⁻¹ mit dem Verbrauch von Konsumgütern (149,6 kt N aus inländischer Produktion zzgl. Import-Export-Saldo von 73,3 kt N gem. Tabelle 5-8). Da für Konsumgüter kein anderer Endverbleib (Abfluss) als die Abfallwirtschaft in Frage kommt, müssten diese beiden Größen eigentlich annähernd gleich sein (von geringfügigen Bestandsänderungen einmal abgesehen). Würde als Konsumgüter-Abfallmenge ein Wert von 223 kt N a⁻¹ angesetzt, dann würde die Abfallgesamtmenge (Nahrungsmittel und Konsumgüter) auf 257,4 kt N a⁻¹ steigen und die Differenz des Pools „Ernährung und Konsum“ vermindert sich auf 381,4 kt N a⁻¹.

Tabelle 6-3: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse^a (ohne landwirtschaftliche Produkte) im Pool „Ernährung und Konsum“, Mittel 2015 – 2020.

Zufluss (N_r-Quellen)	kt N a⁻¹	Abfluss (N_r-Verwendung)^a	t N a⁻¹
Atmosphärische Depositionen	72,5	NH ₃ -, NO _x -, N ₂ O-Emissionen	- 2,0
Nahrungsmittel und Tierfutter	743,5	Abfall (Ernährung und Konsumgüter)	- 184,1
Verbrauch Konsumgüter	149,6	Abwasser (aus Haushalten und von befestigten Flächen)	- 349,4
Verwendung Mineraldünger und Klärschlamm im Siedlungsbereich zus.	48,2	Nitratauswaschung (Siedlungsbereich)	- 41,8
NO ₃ -Entnahme mit Grundwasserförderung zur Trinkwasserversorgung	18,3		
Summe Zuflüsse	1.032,0	Summe Abflüsse	- 577,3
Differenz: 454,7			

^a Gasförmige NH₃-Ausscheidung durch den Menschen nicht aufgeführt.

Importe und Exporte werden im Pool „Ernährung und Konsum“ nicht berücksichtigt: die Einfuhr und die Ausfuhr der entsprechenden Ernährungs- und Konsumgüter sind bereits im Pool „Industrielle Produktion“ erfasst, weitere grenzüberschreitende Stoff-Flüsse in den privaten Bereich hinein bzw. heraus treten nicht auf.

Im Sub-Pool „Konsumgüter“ werden – mangels Alternativen – auch diejenigen N-Flüsse aufgeführt, die nicht mit Konsumaktivitäten (Verbrauch von Nahrungsmitteln und Gütern) verbunden sind, sondern als Emissionen bzw. Immissionen auf die Siedlungsfläche bezogen sind. Dazu zählen die NH_y- und NO_x-Deposition, die Nitratauswaschung und der Einsatz von Klärschlamm bei Rekultivierungsmaßnahmen.

7 Landwirtschaft (AG)

Der Pool „Landwirtschaft“ hat eine zentrale Stellung innerhalb des gesamten N-Kreislaufs. Stickstoffbilanzen für die Landwirtschaft werden in Deutschland seit vielen Jahren regelmäßig berechnet. Nach diesem Ansatz werden drei Komponenten der Gesamtbilanz unterschieden:

(i) Pflanzenproduktion auf Landwirtschaftsflächen (Flächenbilanz), (ii) Haltung von landwirtschaftlichen Nutztieren (Stallbilanz) und (iii) Erzeugung von Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse (Biogasbilanz). Diese drei Bereiche sind über den Austausch von Agrarprodukten (Futtermittel, Wirtschaftsdünger, Biogassubstrate usw.) miteinander verknüpft. Dieser Struktur folgend wird für die Ermittlung der N-Flüsse in Deutschland der Pool „Landwirtschaft“ (Agriculture) – abweichend von NNB Guidance Document Annex 3 Agriculture (ECE 2016) – in drei Sub-Pools untergliedert, die diesen drei Teilbilanzen entsprechen:

- ▶ Tierproduktion (AG.AH)
- ▶ Bodenproduktion (AG.SM)
- ▶ Biogasproduktion (AG.BP).

Das Management von Wirtschaftsdüngern (NH_3 -Verluste während Lagerung, Behandlung und Ausbringung) aus der Tierproduktion und der Biogaserzeugung wird, abweichend vom NNB Annex 3, nicht als separater Sub-Pool aufgeführt, sondern ist in die Berechnung der N-Flüsse in den Sub-Pools Tierproduktion bzw. Bodenproduktion integriert. Dies entspricht der Untergliederung und Berechnungsmethodik, die üblicherweise in der N-Bilanzierung für die Landwirtschaft in Deutschland vorgenommen wird.

Einen weiteren Unterschied betrifft die Biogasanlagen, die im NNB Guidance Document dem Annex 5 Sektor Abfallwirtschaft zugerechnet werden mit der Begründung, dass Biogasanlagen überwiegend der Behandlung bzw. Entsorgung von organischen Reststoffen (Lebensmitteln u. ä.) dienen. In Deutschland werden Biogasanlagen jedoch, gefördert über das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG), weit überwiegend zur Energieerzeugung errichtet, die Anlagen werden im Regelfall entweder direkt von Landwirtschaftsbetrieben oder in sehr enger Verzahnung der Stoffflüsse mit der Landwirtschaft betrieben. Der weitaus größte Teil der fermentierten Biomasse stammt aus der Landwirtschaft und die Gärreste werden vollständig wieder in der Landwirtschaft verwertet. Demzufolge sind auch die statistischen Angaben zum Substrateinsatz in Biogasanlagen überwiegend aus Agrarstatistiken zu entnehmen. Infolgedessen wird die Biogaserzeugung im N-Inventar für Deutschland als Sub-Pool der Landwirtschaft aufgeführt. Tabelle 7-1 gibt eine Übersicht zu den Stickstoffflüssen.

Die Berechnung von Stickstoffbilanzen für die Landwirtschaft ist in Deutschland seit vielen Jahren fachlich etabliert. Referenzgröße sind dabei die N-Bilanzen, die nach der Methodik von Bach et al. (2011), Häußermann et al. (2019), Mielenz und Dieser (2018) und Müller et al. (2024) vom Julius-Kühn-Institut (JKI, Braunschweig) in Abstimmung mit dem Institut für Ressourcenmanagement und Landschaftsökologie, Universität Gießen, berechnet und vom BMEL jährlich veröffentlicht werden. Für das vorliegende nationale N-Inventar werden daher soweit wie möglich die Angaben der nationalen N-Bilanz des BMEL herangezogen.

Die BMEL-Stickstoffbilanzierung für die Landwirtschaft umfasst für jedes Jahr vier Dateien: (1) Daten, (2) Koeffizienten, (3) Berechnung und (4) Bilanzen. Online abrufbar sind nur die Bilanzergebnisse (BMEL 2022b). Für die Erfassung der N-Flüsse werden im Folgenden teilweise Angaben herangezogen, die in den Dateien „Daten“ bzw. „Berechnung“ aufgeführt sind. Die An-

gaben erfolgen dort bereits in Tonnen N pro Jahr, die statistischen Quellen zu den Naturalmengen sowie zu den N-Gehalten sind in diesen Dateien aufgeführt. Auf Nachfrage können diese Dateien von den Autor*innen oder vom JKI bezogen werden.

Tabelle 7-1: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Landwirtschaft“.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
Sub-Pool Tierproduktion (AG.AH)					
MP.FP	AG.AH	MP.FP-AG.AH-feed	Futtermittel aus industrieller Herstellung (inländische Erzeugung und Importe)	N(org)	7.1.1
AG.SM	AG.AH	AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung – Bodenproduktion	N(org)	7.2.1
AG.AH	AT	AG.AH-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement)	NO _x N ₂ O	3.2.1
AG.AH	AT	AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus dem Stall und der Lagerung von tier. Ausscheidungen	NH ₃	3.3
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-animProd	Tierische Marktprodukte	N(org)	7.1.1
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-fish	Erzeugung Aquakultur und Binnenfischerei	N(org)	7.1.2
AG.AH	AG.SM	AG.AH-AG.SM-manure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Wirtschaftsdünger, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	7.1.1
AG.AH	AG.BP	AG.AH-AG.BP-manure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Gärsubstrat, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	7.3
Sub-Pool Pflanzenproduktion (AG.SM)					
AT	AG.SM	AT-AG.SM-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NH _y NO _x	3.4
AT	AG.SM	AT-AG.SM-Nfix	Biologische N-Fixierung in landwirtschaftlich genutzten Flächen	N(org)	7.2.1
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-orgFert	Düngung mit organischen Düngemitteln – Tiermehle	N(org)	5.1.4
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-seed	Zufuhr mit Saat- und Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	7.2.1
MP.NC	AG.SM	MP.NC-AG.SM-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	N(ges)	7.2.1
AG.AH	AG.SM	AG.AH-AG.SM-manure	Wirtschaftsdünger aus innerbetriebl. Erzeugung in der Bodenproduktion, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	7.1.1
AG.BP	AG.SM	AG.BP-AG.SM-di-gest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	7.3

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
HY.GW	AG.SM	HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Zufuhr mit Beregnungswasser	NO ₃	7.2.2
WS.SW	AG.SM	WS.SW-AG.SM-compost	Düngung mit organischen Düngemitteln – Kompost (aus Siedlungsabfällen)	N(org)	7.2.1
WS.WW	AG.SM	WS.WW-AG.SM-sludge	Klärschlamm zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(org)	7.2.1
RW	AG.SM	RW-AG.SM-manure	Import von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung	N(ges)	7.2.1
AG.SM	AT	AG.SM-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Ausbringung von mineral. Und organ. Düngemitteln sowie aus Bewirtschaftung organ. Böden	NO _x N ₂ O	3.2.1
AG.SM	AT	AG.SM-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus der Ausbringung von mineral. Und organ. Düngemitteln sowie aus Bewirtschaftung organischer Böden	NH ₃	3.3
AG.SM	AT	AG.SM-AT-N2	Denitrifikation aus der Bewirtschaftung von landwirtschaftlich genutzten Mineralböden sowie organischen Böden	N ₂	7.2.3
AG.SM	MP.FP	AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte	N(org)	7.2.1
AG.SM	AG.AH	AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung	N(org)	7.2.1
AG.SM	AG.BP	AG.SM-AG.BP-crop	Pflanzliche Biomasse aus innerbetrieblicher Erzeugung als Biogas-Substrat	N(org)	7.2.1
AG.SM	HY.GW	AG.SM-HY.GW-leach	NO ₃ -Auswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen	NO ₃	7.2.4 10.1.1
AG.SM	HY.SW	AG.SM-HY.SW-runoff	N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen	NO ₃ N(org)	7.2.4 10.2.1

Sub-Pool Biogasproduktion (AG.BP)

MP.FP	AG.BP	MP.FP-AG.BP-cosub	Biogas-Cosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	7.3
AG.AH	AG.BP	AG.AHM-AG.BP-manure	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugtem Wirtschaftsdünger, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	7.3
AG.SM	AG.BP	AG.SM-AG.BP-crop	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugter pflanzlicher Biomasse	N(org)	7.3
AG.BP	AT	AG.BP-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Biogaserzeugung	NO _x N ₂ O	3.2.1
AG.BP	AT	AG.BP-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus Biogaserzeugung	NH ₃	3.3
AG.BP	AG.SM	AG.BP-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	7.3

7.1 Tierproduktion (AG.AH)

Der Sub-Pool „Tierproduktion“ umfasst die Haltung von landwirtschaftlichen Nutztieren zur Erzeugung von tierischen Produkten (Milch, Fleisch, Eier, Wolle). Weiterhin wird auch die Haltung von Reitpferden diesem Sub-Pool zugerechnet, da Pferde meist in Landwirtschaftsbetrieben gehalten werden und der Pferdebestand im Rahmen der Landwirtschaftszählung statistisch erfasst wird.

7.1.1 Landwirtschaftliche Tierproduktion (XX.XX-AG.AH, AG.AH-XX.XX)

Eingehende N-Flüsse betreffen die Futtermittel aus der innerbetrieblichen Erzeugung und der Futtermittelindustrie, die N-Abgaben aus der Tierhaltung erfolgen mit den tierischen Marktprodukten, dem Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung (Gülle, Festmist, Jauche) sowie der Ausgasung von Ammoniak (Tabelle 7-2). Die Angaben der Tabelle 7-2 werden bis auf die gasförmigen Emissionen (s. Kap. 3.2.1 und 3.3) aus der Stickstoffbilanzierung Deutschland des BMEL (s. Einleitung zu Kap. 7) übernommen.

Tabelle 7-2: Eingehende und ausgehende N-Flüsse im Sub-Pool „Tierproduktion“ (Landwirtschaft ohne Binnenfischerei und Aquakultur), Mittel 2015 – 2020.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
MP.FP-AG.AH-feed	Futtermittel aus industrieller Herstellung (inländische Erzeugung und Importe)	N(org)	1060,8
AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung – Bodenproduktion	N(org)	920,4
AG.AH-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement)	NO _x N ₂ O	n.b. 6,4
AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus dem Stall und der Lagerung von tierischen Ausscheidungen	NH ₃	210,7
AG.AH-MP.FP-animProd	Tierische Marktprodukte	N(org)	495,2
AG.AH-AG.SM-manure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Wirtschaftsdünger, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	891,3
AG.AH-AG.BP-manure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Gärsubstrat, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	212,8

7.1.2 Aquakultur und Binnenfischerei (AG.AH-fish)

In der Systematik des nationalen N-Inventars des ECE (2013) wird die Erzeugung von Fischen, Krebstieren und Weichtieren in Aquakulturbetrieben (dazu zählt auch die Teichwirtschaft) der Landwirtschaft zugerechnet. Erzeugte Menge nach Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Versorgung mit Fischen (BMEL 2021; Tab. 193), Mittel 2015 – 2020:

Aquakultur und Binnenfischerei: 28.100 t Fanggewicht * 2,8 % N (ECE 2013, Annex 6, Table 12) = 0,8 kt N a⁻¹.

7.2 Bodenproduktion (AG.SM)

Im Sub-Pool „Bodenproduktion“ werden alle N-Flüsse erfasst, die mit dem Anbau von Kulturpflanzen auf Landwirtschaftsflächen verbunden sind. Als N-Zufuhren sind vor allem die Düngung mit Mineraldüngern und Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung und der Biogaserzeugung (Gärreste), die biologische N-Fixierung und die atmosphärische N-Deposition zu nennen (Tabelle 7-3). Auf der Abfuhrseite stehen die Erzeugung von pflanzlichen Produkten, die als Nahrungsmittel, Futtermittel, Substrat für die Biogaserzeugung oder als industrieller Rohstoff verwendet werden, sowie die Emissionen in die Atmosphäre und die Gewässer. In Kapitel 7.2.4 wird die Berechnung der Emissionen in das Gewässersystem erläutert.

7.2.1 Bodenproduktion (XX.XX-AG.SM, AG.SM-XX.XX)

Die Ergebnisse zu den zahlreichen N-Flüssen, die in die Bodenproduktion (Pflanzenproduktion) ein- und davon ausgehen (s. Tabelle 7-3), werden im Wesentlichen aus der Stickstoffbilanzierung Deutschland des BMEL (s. Einleitung zu Kap. 7) übernommen, die Herleitung der übrigen N-Flüsse ist in Tabelle 7-1 bzw. in den Kapiteln 7.2.2 bis 7.2.4 aufgeführt.

Tabelle 7-3: N-Flüsse des N-Inventars für Sub-Pool „Bodenproduktion“, Mittel 2015 – 2020.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
AT-AG.SM-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NH _y NO _x	162,0 92,6
AT-AG.SM-Nfix	Biologische N-Fixierung in Landwirtschaftsflächen	N(org)	216,5
MP.FP-AG.SM-orgFert	Düngung mit organischen Düngemitteln – Tiermehle	N(org)	9,1
MP.FP-AG.SM-seed	Zufuhr mit Saat- und Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	20,0
MP.NC-AG.SM-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	N(ges)	1.537,2 ^a
AG.AH-AG.SM-manure	Wirtschaftsdünger aus innerbetrieblicher Erzeugung in der Bodenproduktion, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	891,3
AG.BP-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	552,7
HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Zufuhr mit Beregnungswasser	NO ₃	2,5
WS.SW-AG.SM-compost	Düngung mit organischen Düngemitteln – Kompost (aus Siedlungsabfällen)	N(org)	26,0
WS.WW-AG.SM-sludge	Düngung mit organischen Düngemitteln – Klärschlamm	N(org)	17,6 ^b
RW-AG.SM-manure	Import von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung	N(ges)	11,7
AG.SM-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Ausbringung von mineralischen und organischen Düngemitteln sowie aus Bewirtschaftung organischer Böden	NO _x N ₂ O	35,4 43,7
AG.SM-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus der Ausbringung von mineralischen und organischen Düngemitteln sowie aus Bewirtschaftung organischer Böden	NH ₃	258,6
AG.SM-AT-N2	Denitrifikation aus der Bewirtschaftung von landwirtschaftl. genutzten Mineralböden u. organischen Böden	N ₂	232,3
AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte	N(org)	1.022,9
AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung	N(org)	920,4

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
AG.SM-AG.BP-crop	Pflanzliche Biomasse aus innerbetrieblicher Erzeugung als Biogas-Substrat	N(org)	303,1
AG.SM-HY.GW-leach	NO ₃ -Auswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen (unterhalb Wurzelzone)	NO ₃	804,9
AG.SM-HY.SW-runoff	N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen	N(org)	85,5

^a Angabe der BMEL-Statistik vermindert um die Mineraldüngermenge, die außerhalb der Landwirtschaft eingesetzt wird (Haus- und Kleingärten, kommunales Grün, Sportplätze; s. Kap. 5.2.3).

^b Geringfügige Differenz zur Angabe in der Statistik „Abwasserbehandlung – Klärschlamm“ (DESTATIS 2022c).

7.2.2 NO₃-Zufuhr mit Beregnungswasser (HY.GW-AG.SM-irrig)

Im Jahr 2016 wurden in der Landwirtschaft 300 Mio m³ Wasser und in 2019 445 Mio m³ für die Feldbewässerung eingesetzt (DESTATIS 2022c). Für die Zwischenjahre liegen keine Daten, die Bewässerungsmengen wurden unter Berücksichtigung der Niederschlagsverhältnisse (Trockenheit) für diese Jahre interpoliert; im Mittel der Periode 2015 – 2020 werden jährlich 450 Mio m³ Feldbewässerung angesetzt. Rund 75 % des Bewässerungswassers werden dem Grundwasser entnommen. Als Schätzwert für den mittleren Nitratgehalt im Grundwasser (und zur Vereinfachung auch für das Beregnungswasser anderer Herkunft) werden 25 mg NO₃ L⁻¹ l entsprechend 5,6 mg N L⁻¹ angenommen, was eine N-Zufuhr mit dem Bewässerungswasser von ca. 2,5 kt N a⁻¹ (Mittel 2015 – 2020) ergibt.

7.2.3 Denitrifikation in landwirtschaftlich genutzten Mineralböden und organischen Böden (AG.SM-AT-N2)

Die möglichen jährlichen Stickstoffverluste durch Denitrifikation im Wurzelraum landwirtschaftlich genutzter Böden unterliegen außerordentlich großen Schwankungen. Je nach Bodentyp, Management und Witterung kann die Denitrifikation zwischen sehr gering (<<10 kg N ha⁻¹ a⁻¹) bis hin zu vollständigem Nitratabbau (>150 kg N ha⁻¹ a⁻¹) in nassen Bereichen von Niedermoorböden variieren (NLfB 2005, Well et al. 2016). Als Größenordnung der mittleren N₂-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland geben Well et al. (2016) einen Wert von 14 kg N ha⁻¹ a⁻¹ an, der in das erste nationale N-Inventar 2010 – 2014 eingeführt wurde. Mangels aktuellerer Ergebnisse wird dieser Wert im vorliegenden Inventar erneut verwendet. Als Flächenbezug wird hier die Landwirtschaftsfläche nach Landwirtschaftszählung (2020) herangezogen (vgl. Tabelle 3-3), da diese Flächenangabe mutmaßlich mit der tatsächlich landwirtschaftlich bewirtschafteten Fläche (mit Denitrifikation im Boden) am besten übereinstimmt.

$$\text{Denitrifikation } 14 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} * 16.595 \text{ kha Landwirtschaftsfläche} = 232,3 \text{ kt N a}^{-1}.$$

Dieser Wert ist mit einer großen Unsicherheit behaftet und als Platzhaltergröße zu betrachten.

7.2.4 Eintrag in Gewässer (AG.SM-HY.GW-leach, AG.SM-HY.GW-runoff)

Die N-Austräge in das Gewässersystem (Hydrosphäre) werden als Differenzgröße aus den Einträgen insgesamt und den übrigen berechneten Austrägen aus dem Pool „Landwirtschaft“ geschätzt (s. Tabelle 7-6: Saldierung der N-Flüsse im Austausch mit anderen Pools, interne Flüsse zwischen den Sub-Pools nicht berücksichtigt). Auf der Zufuhrseite sind das Düngung mit mineralischen und organischen Düngemitteln, Futtermittel (von außerhalb der Landwirtschaft), Saat- und Pflanzgut, Import von Wirtschaftsdünger, Biogas-Cosubstrate, atmosphärische Deposition und N-Fixierung mit zusammen 3.200,1 kt N a⁻¹. Abfahren sind die N-Flüsse in die anderen Pools

mit Ausnahme des Pools Hydrosphäre: pflanzliche und tierische Marktprodukte sowie gasförmige N_r -Emissionen (NH_3 , NO_x), die beide vergleichsweise genau berechnet werden können, und weiterhin die Denitrifikation in der Wurzelzone von Landwirtschaftböden (deren Wert eher eine Platzhaltergröße darstellt). Die genannten N-Flüsse summieren sich auf 2.309,7 kt N a⁻¹ (Zwischensumme Tabelle 7-6, rechte Spalte), die Differenz beträgt 890,4 kt N a⁻¹.

Unter der Prämisse, dass (i) keine weiteren N-Outflows aus dem Pool „Landwirtschaft“ vorhanden sind und (ii) der N-Bodenvorrat sich nicht verändert (s. Kap. 7.5.1), wird diese Differenz von 890,4 kt N a⁻¹ als N-Fluss in die Hydrosphäre interpretiert, das heißt diese N-Menge wird auf die N-Austräge mit Wasserflüssen aus der Landwirtschaft verteilt. Dies sind zum einen die NO_3 -Auswaschung mit dem Sickerwasser aus der Wurzelzone der Böden (als Systemgrenze des Pools „Landwirtschaft“ in diesem Bereich) sowie zum anderen der N-Eintrag in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen.

Für den N-Eintrag in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen, d.h. mit lateralen Abfluss auf bzw. in landwirtschaftlich genutzten Flächen, werden mit dem Modell MoRE 85,7 kt N a⁻¹ berechnet (s. Kap. 10.2.1). Für die vertikale Verlagerung (Auswaschung) mit dem Sickerwasser unterhalb der Wurzelzone als zweitem Transportpfad des Wassers aus Landwirtschaftsflächen ergibt sich dann gemäß Tabelle 7-6 als Restmenge (Differenzgröße) 804,9 kt N a⁻¹.

7.3 Biogasproduktion (AG.BP)

Die Energieerzeugung in Biogasanlagen stellt neben der Bodenproduktion und der Tierproduktion, einen dritten Produktionszweig der Landwirtschaft dar, über den mittlerweile ein beträchtlicher Teil des Stickstoffs in der Landwirtschaft umgesetzt wird. Im Sub-Pool „Biogasproduktion“ werden diese N-Flüsse erfasst (Tabelle 7-4); die Ergebnisse werden aus der Stickstoffbilanzierung Deutschland des BMEL (s. Einleitung zu Kap. 7) übernommen.

Tabelle 7-4: N-Flüsse des N-Inventars für Sub-Pool „Biogasproduktion“, Mittel 2015 – 2020.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
MP.FP-AG.BP-cosub	Biogas-Cosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	44,1
AG.HM-AG.BP- manure	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugtem Wirtschaftsdünger, nach Abzug Stall- u. Lagerungsverluste	N(org)	212,8
AG.SM-AG.BP- crop	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugter pflanzlicher Biomasse	N(ges)	303,1
AG.BP-AT-gasEm	NO_x - und N_2O -Emission aus der Biogaserzeugung	NO_x N_2O	0,5 0,6
AG.BP-AT-gasEm	NH_3 -Emissionen aus Biogaserzeugung	NH_3	2,7
AG.BP-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	552,7

7.4 Zusammenfassung der N-Flüsse Landwirtschaft (AG)

In Tabelle 7-5 sind die N-Flüsse des Pools „Landwirtschaft“ zusammengefasst.

Tabelle 7-5: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Landwirtschaft“, Mittel 2015 – 2020.

Pool (ex)	Pool (in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Sub-Pool Tierproduktion (AG.AH)					
MP.FP	AG.AH	MP.FP-AG.AH-feed	Futtermittel aus industrieller Herstellung (inländische Erzeugung und Importe)	N(org)	1060,8
AG.SM	AG.AH	AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung – Bodenproduktion	N(org)	920,4
AG.AH	AT	AG.AH-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement)	NO _x N ₂ O	n.b. 6,4
AG.AH	AT	AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus dem Stall und der Lagerung von tier. Ausscheidungen	NH ₃	210,7
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-animProd	Tierische Marktprodukte	N(org)	495,2
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-fish	Erzeugung Aquakultur und Binnenfischerei	N(org)	0,8
G.AH	AG.SM	AG.AH-AG.SM-ma-nure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Wirtschaftsdünger, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	891,3
AG.AH	AG.BP	AG.AH-AG.BP-ma-nure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Gärsubstrat, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	212,8
Sub-Pool Pflanzenproduktion (AG.SM)					
AT	AG.SM	AT-AG.SM-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NH _y NO _x	162,0 92,6
AT	AG.SM	AT-AG.SM-Nfix	Biologische N-Fixierung in landwirtschaftlich genutzten Flächen	N(org)	216,5
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-org-Fert	Düngung mit organischen Düngemitteln – Tiermehle	N(org)	9,1
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-seed	Zufuhr mit Saat- und Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	20,0
MP.NC	AG.SM	MP.NC-AG.SM-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	N(ges)	1.537,2
AG.AH	AG.SM	AG.AH-AG.SM-ma-nure	Wirtschaftsdünger aus innerbetriebl. Erzeugung in der Bodenproduktion, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	891,3
AG.BP	AG.SM	AG.BP-AG.SM-di-gest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	552,7

Pool (ex)	Pool (in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
HY.GW	AG.SM	HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Zufuhr mit Beregnungswasser	NO ₃	2,5
WS.SW	AG.SM	WS.SW-AG.SM-compost	Düngung mit organischen Düngemitteln – Kompost (aus Siedlungsabfällen)	N(org)	26,0
WS.WW	AG.SM	WS.WW-AG.SM-sludge	Klärschlamm zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(org)	17,6
RW	AG.SM	RW-AG.SM-manure	Import von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung	N(ges)	11,7
AG.SM	AT	AG.SM-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Ausbringung von mineral. und organ. Düngemitteln sowie aus Bewirtschaftung organ. Böden	NO _x N ₂ O	35,4 43,7
AG.SM	AT	AG.SM-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus der Ausbringung von mineral. Und organ. Düngemitteln sowie aus Bewirtschaftung organischer Böden	NH ₃	258,6
AG.SM	AT	AG.SM-AT-N2	Denitrifikation aus der Bewirtschaftung von landwirtschaftlich genutzten Mineralböden sowie organischen Böden	N ₂	232,3
AG.SM	MP.FP	AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte	N(org)	1.022,9
AG.SM	AG.AH	AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung	N(org)	920,4
AG.SM	AG.BP	AG.SM-AG.BP-crop	Pflanzliche Biomasse aus innerbetrieblicher Erzeugung als Biogas-Substrat	N(org)	303,1
AG.SM	HY.GW	AG.SM-HY.GW-leach	NO ₃ -Auswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen (Wurzelzone)	NO ₃	804,9
AG.SM	HY.SW	AG.SM-HY.SW-runoff	N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen	NO ₃ N(org)	79,3 6,2

Sub-Pool Biogasproduktion (AG.BP)

MP.FP	AG.BP	MP.FP-AG.BP-cosub	Biogas-Kosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	44,1
AG.AH	AG.BP	AG.AHM-AG.BP-manure	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugtem Wirtschaftsdünger, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	212,8
AG.SM	AG.BP	AG.SM-AG.BP-crop	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugter pflanzlicher Biomasse	N(org)	303,1
AG.BP	AT	AG.BP-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Biogaserzeugung	NO _x N ₂ O	0,5 0,6
AG.BP	AT	AG.BP-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus Biogaserzeugung	NH ₃	2,7
AG.BP	AG.SM	AG.BP-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	552,7

7.5 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Landwirtschaft

7.5.1 Bilanzierung der N-Flüsse in der Landwirtschaft

Die Landwirtschaft mit ihren Betriebsbereichen Pflanzenproduktion, Tierproduktion und Energieerzeugung stellt den zweitgrößten Umsatzraum für reaktiven Stickstoff in Deutschland dar; in Tabelle 7-6 sind die eingehenden und ausgehenden N-Flüsse gegenübergestellt.

Tabelle 7-6: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Pool „Landwirtschaft“, Mittel 2015 – 2020; kursiv: als Differenz berechneter N-Fluss.

Zufuhr (N _r -Quellen)	kt N a ⁻¹	Abfuhr (N _r -Verwendung)	kt N a ⁻¹
Mineraldünger	1.537,2	Pflanzliche Marktprodukte	- 1.022,9
Düngung mit organischen Düngemitteln ^{a, b}	55,2	Tierische Marktprodukte ^c	- 496,0
Futtermittel – industrielle Erzeugung	1.060,8	NH ₃ -Emissionen insgesamt	- 471,9
Zufuhr mit Saat- und Pflanzgut	20,0	NO _x - und N ₂ O-Emission insgesamt	- 86,5
Import von Wirtschaftsdüngern	11,7	Denitrifikation in Böden (Wurzelzone)	- 232,3
Biogas-Cosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	44,1	Zwischensumme^d	- 2.309,6^d
Atmosphärische N-Deposition (NO _x , NH _y)	254,6	Lateraler NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer (Runoff, Erosion und Drainage)	- 85,5 ^e
Biologische N-Fixierung	216,5	<i>Nitratauswaschung ins Grundwasser (unterhalb der Wurzelzone)^d</i>	<i>- 804,9^f</i>
Summe Zufuhren	3.200,1	Summe Abfuhren	- 3.200,1
Differenz: 0,0			

^a Kompost (aus Siedlungsabfällen), Klärschlamm, Tiermehl.

^b Einschließlich 2,5 kt N a⁻¹ mit Beregnungswasser.

^c Einschl. 0,8 kt N Erzeugung Aquakultur und Binnenfischerei.

^d Summe Zufuhren abzüglich Summe Abfuhren, ohne Berücksichtigung der N-Flüsse in die Hydrosphäre.

^e Gem. Modell MoRE, s. Kap. 10.2.1.

^f Auswaschung (unterhalb Wurzelzone): 928,0 kt N-Überhang abzügl. lateraler NO₃-Eintrag in Oberflächengewässer (s. Kap. 7.2.4).

Das N-Inventar für den Pool „Landwirtschaft“ (als Ganzes) wird mit der Prämisse durchgeführt, dass die Summe der Abfuhren der Summe der Zufuhren entsprechen muss. Diese Prämisse beruht auf zwei Annahmen:

- Im Pool „Landwirtschaft“ können alle N-Flüsse – mit Ausnahme der Verlagerung mit dem Sickerwasser sowie der Denitrifikation – relativ genau erfasst werden.
- Der N-Bodenvorrat wird als konstant angenommen, das heißt es findet kein N-Fluss mit der Festlegung oder Freisetzung von Stickstoff in bzw. aus der organischen Substanz des Bodens statt (s. zu dieser Annahme Kap. 7.5.2).

Der Bilanzraum Landwirtschaft wird (im Bereich der Bodenproduktion) räumlich abgegrenzt durch die Untergrenze der Wurzelzone der Böden. Es wird (vereinfachend) davon ausgegangen, dass unterhalb dieser Bodentiefe das Sickerwasser in der ungesättigten Zone nur noch abwärts verlagert wird und das mit dem Sickerwasser verlagerte Nitrat damit für eine Aufnahme durch

die Pflanzen nicht mehr zur Verfügung steht. Wenn für die Denitrifikation in der Wurzelzone der landwirtschaftlich genutzten Böden ein bestimmter (unsicherer) Wert in die Bilanz eingeführt wird (Kap. 7.2.4), dann verbleibt als einzige weitere Abfuhrgröße (Output) aus dem Bilanzraum die "Nitratauswaschung ins Grundwasser". Unter der Prämisse einer ausgeglichenen Bilanz ergibt sich dann die „Nitratauswaschung ins Grundwasser“ in Höhe von 804,9 kt N a⁻¹ als Differenzgröße aus der Summe aller Zufuhrgrößen abzüglich der Summe aller bekannten Abfuhrgrößen.

Für eine fundiertere Ermittlung der N-Menge, die aus dem Boden über die ungesättigte Zone in das Grundwasser und von dort schließlich in Oberflächengewässer hinein verlagert wird, sind bis dato keine belastbaren Ansätze verfügbar. Die vielfältigen Umsatzprozesse von organischen und anorganischen Stickstoffverbindungen während des Transports durch diese Kompartimente und deren Einflussfaktoren sind zwar grundsätzlich bekannt, für eine flächendeckende Modellierung der Nitrat-Verlagerung von der Bodenoberfläche bis in ein Oberflächengewässer und des dabei stattfindenden N-Abbaus fehlt es aber bis heute sowohl an den entsprechenden Modellen als auch an der Bereitstellung der dafür benötigten Modelleingangsgrößen (Modelltreiber) mit der erforderlichen hohen räumlich-zeitlichen Auflösung. Bislang haben sich nur sehr wenige Arbeiten mit dieser Fragestellung beschäftigt. Im Projekt AGRUM-DE (Zinnbauer et al. 2023) wird als Denitrifikation in den Böden in Deutschland ein Wert von ca. 630 kt N angegeben, was ca. 52 % der nach AGRUM-DE verlagerbaren N-Menge im Boden entspricht; die Denitrifikationsprozesse in der ungesättigten Zone unterhalb des durchwurzelter Bereichs werden in AGRUM-DE dabei nicht berücksichtigt. Knoll et al. (2024) schätzten eine N-Reduktion von 853 kt N zwischen dem N-Eintrag in den Boden und dem N-Eintrag in Oberflächengewässer (über Dränagen und Grundwasserübertritt) in Deutschland. Die Größenordnung der im vorliegenden N-Inventar verwendeten Werte von 232 kt Denitrifikation in der Wurzelzone der Landwirtschaftsböden sowie anschließend 636 kt N in der ungesättigten Zone und im Grundwasser stimmt mit den beiden Literaturangaben im großen und ganzen gut überein.

7.5.2 N-Bodenvorrat und Vorratsänderung

Die erste und bislang einzige Bodenzustandserhebung Landwirtschaft wurde von 2011 bis 2017 durchgeführt (Jacobs et al. 2018). Nach diesen Ergebnissen beträgt der N_{total}-Vorrat (0 – 100 cm Tiefe) in Landwirtschaftsböden in Deutschland rund 11,9 t N ha⁻¹ (Standardabweichung ca. ±3 t N ha⁻¹, Wert ist geschätzt von den Autoren der vorliegenden Studie), flächengewichtet gemittelt über Mineralböden (differenziert nach Nutzungen Ackerland, Grünland und Sonderkulturen) und Moorböden (differenziert nach sechs Moorbodenklassen). Bezogen auf 16.704 kha Landwirtschaftsfläche entspricht das einem N-Vorrat von rund 200.000 kt N (0 – 100 cm Tiefe).

Bis die zweite Inventurperiode der Bodenzustandserhebung für die Landwirtschaftsböden abgeschlossen sein wird und dann die Veränderung des N-Bodenvorrats in Landwirtschaftsböden aus dem Vergleich der beiden Erhebungen direkt ermittelt werden kann, wird noch mindestens ein Jahrzehnt vergehen. Die mögliche Änderung des N-Vorrats kann daher derzeit nur der Größenordnung nach modellbasiert aus der Veränderung der C-Vorrats geschätzt werden. Für Mineralböden unter Grünland sind die Änderungen der C_{org}-Vorräte (und damit auch der N-Vorräte) nicht signifikant. Für Mineralböden unter Ackernutzung wurde von Jacobs et al. (2018), aus der Auswertung der C_{org}-Änderungen in Bodendauerbeobachtungsflächen, die zu erwartende Entwicklung des C_{org} in den Oberböden (0 – 30 cm) standortspezifisch modelliert. Für rund 80 % der Mineralböden unter Ackernutzung kann damit für einen Zeitraum von 10 Jahren die Entwicklung des C_{org} abgeschätzt werden (rund 20 % der Standorte konnten nicht modelliert werden, da schwarzhumose Sande und grundwassernahe Standorte eine mit den Modellen nicht abbildbare C-Dynamik zeigen; Don 2019). Für diese Mineralböden (unter Ackernutzung) wird

im Mittel ein jährlicher Abbau von $0,21 \text{ t C}_{\text{org}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ modelliert. Bei einem mittleren C:N-Verhältnis von 11:1 im Oberboden von Mineralböden ist damit ein Rückgang des N-Vorrats von $0,019 \text{ t N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ verbunden. Bezogen auf rund 11.200 kha Mineralböden unter Ackernutzung und Sonderkulturen entspricht das einer jährlichen Vorratsänderung von rund 210 kt N a^{-1} in den mineralischen Oberböden (0 – 30 cm); Ergebnisse für die Unterböden (30 – 100 cm) liegen nicht vor.

Die organischen Böden unter Acker- und Grünlandnutzung in Deutschland verlieren, den Messungen und Berechnungen im Verbundprojekt „Organische Böden“ zufolge (Tiemeyer et al. 2016, zit. N. Jacobs et al. 2018), im Mittel ca. $7,5 \text{ t C}_{\text{org}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, das heißt in 20 Jahren verliert ein derartiger Standort mehr C_{org} als in einem typischen Mineralboden insgesamt gespeichert ist (Jacobs et al. 2018). Mit der Annahme eines C:N-Verhältnis von 25:1 (als ungefährender mittlerer Wert für unterschiedliche Moorböden und über verschiedene Tiefenstufen) entspräche das rund $0,3 \text{ t N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Hochgerechnet auf ca. 1000 kha organische Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung (rund 6 % der LF) entspräche dies einem N-Verlust mit Abbau des N-Vorrats in organischen Böden (0 -100 cm) von ca. 300 kt N a^{-1} .

In der Summe der Mineral- und Moorböden unter landwirtschaftlicher Nutzung liegt die geschätzte N-Vorratsänderung somit in einer Größenordnung von ca. 500 kt N a^{-1} . Dieser Wert ist im Vergleich zu den übrigen Größen der N-Bilanz durchaus relevant; die Bodenvorratsänderung wird allerdings (im Unterschied zur N-Vorratsänderung in Waldböden) nicht als N-Fluss im nationalen N-Inventar aufgeführt, da das Ergebnis nur auf Modellabschätzungen zurückgeht und mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

7.5.3 Vergleich mit der N-Bilanzierung des BMEL

Stickstoff-Bilanzierungen für den Sektor Landwirtschaft werden unter anderem in Form der jährlich aktualisierten Bilanzen des BMEL berechnet (s. einführender Abschnitt zu Kap. 7). Kennzeichen der BMEL-Bilanz ist es, dass die N-Emissionen (NH_3 , NO_x , NO_3 , N_2) dort nicht ausgewiesen werden, sondern diese Bilanz dient dazu, aus der Saldierung der (zuverlässig erfassbaren) N-Flüsse in den Produkten den sogenannten „N-Überschuss“ zu berechnen, der dann als Indikatorgröße die potenziellen Emissionen von reaktivem Stickstoff in die Hydrosphäre und die Atmosphäre beschreibt.

Der Gesamtbilanz-Überschuss nach BMEL beträgt $1511,9 \text{ kt N a}^{-1}$ (entsprechend rund 91 kg N/ha LF) im Mittel 2015 – 2020. In der BMEL-Bilanz wird bei der atmosphärischen N-Deposition allerdings nur die NO_x , nicht aber die NH_y -Deposition als Zufuhrgröße berücksichtigt wird. Dies wird vom BMEL damit begründet, dass die NH_y -Deposition auf Landwirtschaftsflächen zum größten Teil aus den NH_y -Emissionen der Landwirtschaft stammt, das heißt einen innerlandwirtschaftlichen N-Kreislauf darstellt. Gemäß BMEL-Methodenkonvention werden aber gasförmige Emissionen nicht saldiert (Begründung: wenn nur die NH_y -Zufuhr, nicht aber die NH_y -Abfuhr, d.h. Emissionen in der Bilanz berücksichtigt würde, dann hätte dies einen überhöhten Wert des N-Überschuss zur Folge). Wenn man den N-Überschuss des hier durchgeführten nationalen N-Inventars analog berechnet, indem die NH_3 -Deposition auf der LF ($162,0 \text{ kt N a}^{-1}$) bei der Summation der N-Emissionen in Hydrosphäre und Atmosphäre nicht berücksichtigt wird, dann ergibt sich ein Überschuss von $1519,1 \text{ kt N a}^{-1}$. Dieser Wert stimmt mit dem BMEL-Überschuss von $1511,9 \text{ kt N a}^{-1}$ gut überein. Die Verteilung des N-Überschuss auf die verschiedenen N-Spezies und deren Einträge in Atmosphäre und Gewässer wird in Tabelle 13-3 dargestellt.

8 Wald und semi-natürliche Flächen (FS)

Der Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“ umfasst alle natürlichen und naturnahen Ökosysteme außerhalb der Landwirtschaft. Die wichtigsten N-Flüsse auf der Zufuhrseite sind die atmosphärische Deposition und die N-Fixierung, denen die Nitratauswaschung in das Grundwasser als größter N-Fluss aus naturnahen Ökosystemen gegenübersteht. Für forstlich genutzte Wälder ist außerdem die Holzentnahme als N-Abfuhrgröße relevant, daneben spielt die N-Vorratsänderung in Waldbeständen, im Vergleich zu den anderen Pools, eine größere Rolle. Der Pool wird in drei Sub-Pools gegliedert; Tabelle 8-1 gibt eine Übersicht der relevanten Stickstoffflüsse.

- Wald (FS.FO)
- Semi-natürliche Flächen (FS.OL)
- Feuchtgebiete (FS.WL).

Für den Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“ sind keine zusammenfassenden Statistiken zu den wichtigsten N-Flüssen verfügbar. Die Erfassung und Auswertung der relevanten Datenquellen werden daher, im Vergleich zu den meisten anderen Pools, ausführlicher dargestellt.

Tabelle 8-1: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
Sub-Pool Wald (FS.FO)^a					
AT	FS.FO	AT-FS.FO-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Waldflächen	NH _y , NO _x	3.4
AT	FS.FO	AT-FS.FO-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden	N(org)	8.1.2
RW	FS.FO	RW-FS.FO-wood	Import von Rohholz	N(org)	8.1.5
SOURCE	FS.FO	SOURCE-FS.FO ^a	Änderung (Abbau) N-Bodenvorrat	N(org)	8.1.6
FS.FO	AT	FS.FO-AT-N2	Denitrifikation in Waldböden	N ₂	8.1.3
FS.FO	AT	FS.FO-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Waldböden	NO _x , N ₂ O	3.2.1
FS.FO	EF.EC	FS.FO-EF.EC-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung - Großfeuerungsanlagen	N(org)	8.1.5
FS.FO	EF.OE	FS.FO-EF.OE-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung - Privathaushalte	N(org)	8.1.5
FS.FO	MP.OP	FS.FO-MP.OP-wood	Holzentnahme zur stofflichen Nutzung	N(org)	8.1.5
FS.FO	HY.GW	FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldböden	NO ₃	8.1.4
FS.FO	RW	FS.FO-RW-wood	Export von Rohholz	N(org)	8.1.5
FS.FO	SINK	FS.FO-SINK ^a	Zunahme Holzbestand (Zuwachs)	N (org)	8.1.6

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
Sub-Pool semi-natürliche Flächen (FS.OL)					
AT	FS.OL	AT-FS.OL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf semi-natürliche Flächen	NH _y , NO _x	3.4
AT	FS.OL	AT-FS.OL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in semi-natürlichen Flächen	N(org)	8.2.1
FS.OL	AT	FS.OL-AT-N2	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen	N ₂	8.2.2
FS.OL	HY.GW	FS.OL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO ₃	8.2.3
Sub-Pool Feuchtgebiete (FS.WL)					
AT	FS.WL	AT-FS.WL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Feuchtgebiete	NH _y , NO _x	3.4
AT	FS.WL	AT-FS.WL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Feuchtgebieten	N(org)	8.3.1
AG.SM	FS.WL	AG.SM-FS.WL-runoff	N-Eintrag mit dem Zufluss von Oberflächenabfluss (Runoff) aus angrenzenden Ackerflächen	NO ₃	8.3.2
FS.WL	AT	FS.WL-AT-N2	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N ₂	8.3.3
FS.WL	AT	FS.WL-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Feuchtgebieten (LULCC)	NO _x , N ₂ O	3.2.1

^a Die Mobilisierung bzw. Festlegung von N(org) infolge von Vorratsabbau bzw. -Aufbau im Bodenumus und im Holzbestand wird im NNB (ECE 2013) nicht als N-Fluss berücksichtigt.

8.1 Wald (FS.FO)

Gemäß Definition im Bundesforstgesetz (§ 2) ist „Wald“ jede mit Forstpflanzen bestockte Grundfläche (mit „Holzboden“ bezeichnet). Zum Wald zählen weiterhin auch die Flächen, auf denen vorübergehend oder dauerhaft keine Bäume stehen, die aber Wald räumlich und/oder funktional zuzuordnen sind. Diese Flächen werden als „Nichtholzboden“ bezeichnet, dazu gehören unter anderem Waldwege, Waldblößen und Lichtungen, Wildäusungsplätze, Waldwiesen, Holzlagerplätze, zugewachsene Heiden, Moore und Weiden. In Katastererhebungen wird eine Fläche erst dann als Wald erfasst, wenn sie mindestens 0,1 Hektar groß und mindestens 10 m breit ist.

8.1.1 Waldfläche

Die Waldflächen in Deutschland wurden zuletzt im Rahmen der 3. Bundeswaldinventur 2012 (Thünen-Institut 2016b) differenziert erfasst (Tabelle 8-2). Eine Zeitreihe bzw. Flächenangaben gemittelt für die Jahre 2015 – 2020 ist nicht verfügbar, für die Berechnung von flächenbezogenen N-Flüssen werden daher die Flächenangaben für das Stichjahr 2012 verwendet.

Tabelle 8-2: Waldfläche (in 1000 ha) nach Kohlenstoffinventur 2017 (Riedel und Hennig 2019).

Waldspezifikation			
Wald (insgesamt)	11.443 ^a	Nichtholzboden ^b	359
		Holzboden ^c	11.084
		Bestockter Holzboden ^d	11.050
		Blöße	34

^a Flächenangabe differiert gegenüber Wert in Tabelle 3-2 infolge abweichender Definition; Flächenumfang und Definition für „Holzboden“ kommt der IPCC-Kategorie „Wald“ am nächsten.

^b Nichtholzboden: Nicht zur Holzerzeugung bestimmte Teile des Waldes, z.B. Waldwege und Schneisen ab 5 m Breite, und Holzlagerplätze.

^c Holzboden: Dauerhaft zur Holzerzeugung bestimmte Fläche; dazu gehören auch Gräben, Leitungstrassen, zeitweilig unbedeckte Flächen (Blößen) sowie Wege und Schneisen unter 5 m Breite.

^d Bestockter Holzboden: Holzboden, auf dem Bäume wachsen.

8.1.2 Biologische Stickstofffixierung in Waldböden (AT-FS.FO-Nfix)

Angaben zur symbiontischen und asymbiontischen Stickstofffixierung in Wäldern sind in der Literatur nur vereinzelt zu finden. In NNB Annex 4, Table 5 (ECE 2016) werden als Referenzwerte für die N-Fixierung in Wäldern der gemäßigten Breiten 6,5 bis 26,6 kg N ha⁻¹ a⁻¹ genannt (Cleveland et al. 1999, zit. nach ECE 2016). Für die Berechnung der N-Flüsse in Deutschland wird als mittlerer Wert 10 kg N ha⁻¹ a⁻¹ angesetzt.

N-Fixierung: 10 kg N ha⁻¹ a⁻¹ Fixierung * 11,084 Mio. ha Holzbodenfläche = 110,8 kt N a⁻¹.

Dieser Wert für die N-Fixierung ist mit einer großen Unsicherheit behaftet und als Platzhaltergröße zu betrachten.

8.1.3 Denitrifikation in Waldflächen (AT.FS.FO.N2)

In einem modifizierten Ansatz zur Berechnung der Critical Loads für Waldflächen verwenden Andreae et al. (2016; Kap. 5.5.3) als mittleren Wert 1,1 kg N ha⁻¹ a⁻¹ Denitrifikation in Waldböden. Dieser Wert deckt sich näherungsweise mit der N-Bilanzierung für die rd. 1200 Standorte der 3. Bundeswaldinventur wird, in der als Median der gasförmigen Emissionen (alle gasförmigen N-Spezies zusammen) 1,4 kg N ha⁻¹ a⁻¹ angegeben wird (Fleck et al. 2019). Als Flächenbezug dient die Holzbodenfläche, da die Denitrifikationsrate für bestockte Waldflächen angenommen wird.

Denitrifikation: 1,1 kg N ha⁻¹ a⁻¹ Denitrifikation * 11,084 Mio. ha Holzbodenfläche = 12,2 kt N a⁻¹.

8.1.4 Nitratauswaschung aus Waldböden (FS.FO-HY.SW-leach)

Die Nitratauswaschung aus Waldböden hängt von zahlreichen Faktoren ab, unter anderem Standortverhältnissen (Niederschlag, Sickerwasserrate, Temperatur), Bodentyp, Stickstoffdeposition und C/N-Verhältnis in Nadeln bzw. Blättern (Dise et al. 2009) stellt. In Tabelle 8-3 sind Ergebnisse zur Nitratauswaschung aus Waldböden zusammengestellt.

Tabelle 8-3: Literaturergebnisse zur Nitratauswaschung unter Waldflächen (nach Beisecker et al. 2012; ergänzt).

Quelle	Region / Zeitraum	Verfahren	Mittel / Median / Spannweite	Bemerkung
Borken und Matzner (2004)	Deutschland 1996-2001	CL-Bilanzmethode 57 Level-II Waldflächen	Median: 4,6 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ (C/N < 25) 0,8 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ (C/N > 25) Spanne: 0 - 26 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	71 % der Flächen < 5 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹
Callesen et al. (2007)	Dänemark 111 Waldstandorte	Mehrjährige Nitratinventur (1986-1993)	30 % der Standorte 2 - 6 kg N-Verlust ha ⁻¹ a ⁻¹	
Fleck et al. (2019)	rd. 1200 Plots der 3. BWI	Bodenwasser-Untersuchung	Median: 2,6 N ha ⁻¹ a ⁻¹	61 % der Plots < 5 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹
Kiese et al. (2011)	Deutschland 2000	Biogeochemisches Modell FOREST-DNDC, 79 Waldstandorte	Mittel: 5,5 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ Spanne: 0 - 80 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	66 % der Flächen < 5 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹
Heldstab et al. (2010)	Schweiz 2005	Stickstoffbilanzierung	Mittel: 6,7 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	Schätzwert
MacDonald et al. (2002)	Europa 1980-1998	181 Wälder Statistische Auswertung	Mittel: 5,8 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ Spanne: 1 - 40 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	64 % der Flächen < 5 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ 23 % der Flächen: 5 - 15 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹
van der Salm et al. (2007)	Europa 2000	110 Flächen, Regressionsanalyse	Median: rd. 2 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ Spanne: 0 – 18 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	

Die Ergebnisse zum Mittelwert bzw. Median der Untersuchungen von Borken und Matzner (2004), Kiese et al. (2011), Heldstab et al. (2010) sowie MacDonald et al. (2002) liegen mit rund 5 bis 7 kg N ha⁻¹ a⁻¹ in einem engen Rahmen. Andreae et al. (2016; Kap. 5.5.3) verwenden in einem modifizierten Ansatz zur Berechnung der Critical Loads für Waldflächen in Deutschland als „durchschnittliche tolerierbare N-Austragsrate“ mit dem Sickerwasser 5,2 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Als Mittelwert für die Berechnung des N-Fluss mit dem Sickerwasser aus Waldflächen wird im Folgenden der Wert von 5,5 kg N ha⁻¹ a⁻¹ nach Kiese et al. (2011) verwendet. Als Flächenbezug wird nur die Holzbodenfläche herangezogen, da die Literaturergebnisse sich jeweils auf bestockte Waldflächen beziehen.

$$\text{NO}_3\text{-Auswaschung aus Waldböden: } 5,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} * 11,084 \text{ Mio. ha Holzbodenfläche} \\ = 61,0 \text{ kt N a}^{-1}.$$

Forstliche Nutzungen, insbesondere der Kahlschlag von größeren Flächen, bedeuten eine Störung des standorttypischen Fließgleichgewichts der N-Umsetzungen. In deren Folge können für einige Jahre Nitratausträge bis über 100 kg N ha⁻¹ a⁻¹ auftreten (Beisecker et al. 2012). Geht man von mittleren Umtriebszeiten von 80 Jahren für Nadelbäume und 120 Jahren für Laubbäume aus, sind im Durchschnitt jährlich ungefähr 1 % der Waldbodenfläche von erhöhten NO₃-Austrägen betroffen. Diese punktuellen temporär erhöhten NO₃-Mengen werden in der Angabe zur Nitratauswaschung unter Wald in den aufgeführten Veröffentlichungen nicht berücksichtigt.

Es zeichnet sich allerdings ab, dass in Zukunft der Holzeinschlag bzw. die Holzentnahme infolge von Klimawandel-bedingten Kalamitäten deutlich zunehmen wird. Beispielsweise hat der massive Borkenkäferbefall aufgrund der Dürrejahre seit 2018 zu einer (nahezu) Verdopplung des Nadelholzeinschlags zwischen 2018 und 2020 geführt hat; im Durchschnittswert für den Betrachtungszeitraum 2015 - 2020 des nationalen N-Inventars ist diese Entwicklung noch abgepuffert. Die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt bearbeitet derzeit eine Metastudie zu den N- und C-Austragsraten unter Forst; diese Daten werden allerdings erst nach Abschluss des vorliegenden N-Inventars veröffentlicht. Bei einer späteren Fortschreibung der Datenreihe wird nach Stand der Kenntnis die verstärkte Nitratauswaschung unter Kahlschlagflächen infolge des Klimawandels mitberücksichtigt werden müssen (NW-FVA 2023, schriftliche Mitteilung).

8.1.5 Holzentnahme und Holzverwendung (FS.FO-MP.OP-wood, FS.FO-EF.OE-wood, FS.FO-RW-wood, RW-FS.FO-wood)

Angaben zum Holzeinschlag bzw. zur Holzentnahme aus Wäldern stehen aus drei Quellen zur Verfügung:

- Statistisches Bundesamt (GENESIS-Tabelle Nr. 41261-0001), Mittel 2015 - 2020: Holzentnahme jährlich rd. 62,5 Mio. m³ (Erntefestmeter unter Rinde).
- Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie (Thünen-Institut 2023), Mittel 2015 - 2020: jährlicher Einschlag 72,6 Mio. m³.
- 3. Bundeswaldinventur (BMEL 2016), Mittel 2002 - 2012: genutzte Rohholzmenge jährlich rd. 76 Mio. m³.

Als Ursache dieser Differenzen werden vom Thünen-Institut Datenlücken in der Erfassung des Statistischen Bundesamtes in verschiedenen Bereichen der Holzverwendung aufgeführt. Beispielsweise wurde laut Thünen-Institut (2015) in den letzten zehn Jahre nur etwa 48 % des Brennholzeinschlags durch das Statistische Bundesamt erhoben, da die Datengrundlage für die energetische Nutzung von Holz aus Privatwäldern lückenhaft ist. Auch die Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur (BMEL 2016) legen den Schluss nahe, dass die verwendete Rohholzmenge pro Jahr durch die amtliche Statistik unterschätzt wird. Für die Berechnung realistischer Einschlagszahlen wurde von Jochem et al. (2015) ein Modell entwickelt, welches durch die Einbeziehung von „amtlichen Statistiken, Verbandsstatistiken sowie Ergebnissen empirischer Untersuchungen eine Rückrechnung der deutschen Holzeinschlagsmenge ermöglicht“ (Thünen-Institut 2016a, revidiert Thünen-Institut 2016b).

Tabelle 8-4: Berechnung der jährlichen N-Flüsse mit der Entnahme und Verwendung sowie dem Import und Export von Holz (Thünen-Institut 2016a), Mittel 2015 - 2020.

Nutzung / Verwendung N-Fluss (Bezeichnung)	Holzart	Holz Mio m ³	Holz Mio t	Holz ^a t N	N-Fluss kt N a ⁻¹
Entnahme insgesamt ^b	Nadelholz	53,27	21,84	26.209	
	Laubholz	18,14	10,52	14.729	
	Zusammen	71,41	32,36	40.938	
Stoffliche Rohholzverwendung, insgesamt ^c	Nadelholz	46,27	18,97	22.764	
	Laubholz	4,48	2,60	3.639	
	Zusammen	50,75	21,57	26.403	
FS.FO-MP.OP-wood	Zusammen	50,75	21,57	26.403	26,4

Nutzung / Verwendung N-Fluss (Bezeichnung)		Holzart	Holz Mio m³	Holz Mio t	Holz ^a t N	N-Fluss kt N a ⁻¹
Energetische Holzverwendung	Privathaushalte ^d	Nadelholz	6,86	2,81	3.374	
		Laubholz	10,26	5,95	8.330	
FS.FO-EF.OE-wood		Zusammen	17,12	8,76	11.704	11,7
	Großfeuerungs- Anlagen	Nadelholz	2,35	0,96	1.156	
		Laubholz	2,74	1,59	2.221	
FS.FO-EF.EC-wood		Zusammen	5,08	2,55	3.377	3,4
Außenhandel Rohholz	Import	Nadelholz	7,69	3,15	3.784	
		Laubholz	0,80	0,46	648	
RW-FS.FO-wood		Zusammen	8,49	3,62	4.432	4,4
	Export	Nadelholz	5,35	2,19	2.630	
		Laubholz	1,33	0,77	1.083	
FS.FO-RW-wood		Zusammen	6,68	2,97	3.713	3,7
Lagerbestands- veränderung	Wald (einschl. Industrie) ^e	Nadelholz	0,12	0,05	61	
		Laubholz	-0,02	-0,01	-13	
Saldo		Zusammen	0,11	0,04	48	0,0

^a Mittlere Dichte Laubholz 0,58 t m⁻³, Nadelholz 0,41 t m⁻³ (Frischmasse) nach ECE (2016), Annex 4, Table 15; mittlerer N-Gehalt (Stamm) Nadelholz 1,2 g kg⁻¹, Laubholz 1,4 g kg⁻¹, nach ECE (2016), Annex 4, Table 16.

^b Entnahme: Einschlag abzüglich nicht verwertbares Derbholz.

^c Zur Verwendung als Furnierholz, Holz- und Zellstoff, Sägeindustrie, Industrieholz.

^d Unterteilung weicht ab von Entnahme-Statistik, Zuordnung erfolgt hier nach Endnutzung, d.h. Holzkohle, Pellets und Briquettes werden auch der energetischen Nutzung zugerechnet.

^e Die Lagerbestandsveränderung „Industrie“ ist geringfügig und wird vereinfachend dem „Wald“ zugerechnet.

Für die Ermittlung der N-Flüsse mit Holz (s. Tabelle 8-4) wird im Folgenden die Statistik zur Holzentnahme (Derbholz und Nichtderbholz) und Holzverwendung des Thünen-Instituts verwendet (gem. Einschlagsrückrechnung nach Jochem et al. 2015; Thünen-Institut 2016b). In dieser Statistik sind auch Angaben zum Import und Export von Holz sowie zu den Lagerbestandsveränderungen enthalten, zur Vereinheitlichung und besseren Übersicht werden die N-Flüsse mit dem Import und Export von Rohholz daher in diesem Sub-Pool und nicht im Pool „Industrielle Produktion“ mit aufgeführt.

8.1.6 Bilanzierung und Vorratsänderungen Wald (Holzbestand und Waldböden)

N-Bodenvorrat und Vorratsänderung

Der Status des Kohlenstoff- und Stickstoff-Pools in den Waldböden (Boden und Auflagehumus) in Deutschland wurde mit der ersten und der zweiten Bodenzustandserhebung Wald (BZE I, 1987-1993 und BZE II, 2006-2008) mit jeweils etwa 1800 systematisch über das Bundesgebiet verteilten Aufnahmepunkten ermittelt (Andreae et al. 2016; Wellbrock und Bolte 2019). In der Kohlenstoffinventur 2017 (Riedel et al. 2019) wurde der Boden - im Unterschied zum oberirdischen Aufwuchs (Baumbestand) und zum Totholz - nicht erfasst, so dass für die Auswertung der N-Vorratsänderung im Boden die Ergebnisse des ersten nationalen N-Inventars 2010 - 2014

(Bach et al. 2020) für das Inventar 2015 - 2020 unverändert übernommen werden. Die Ergebnisse der 3. Bodenzustandserhebung Wald (BZE III) sind voraussichtlich frühestens Ende 2026 zu erwarten.

Die N-Vorräte im Auflagehumus und im Mineralboden bis 60 cm Bodentiefe betragen nach der BZE II durchschnittlich $6,01 \pm 0,08 \text{ t N ha}^{-1}$, in der Schicht 60 – 90 cm sind weitere $1,03 \pm 0,03 \text{ t N ha}^{-1}$ gespeichert. In dieser Tiefenstufe ist jedoch ein großer Teil der N-Gehalte (44 %) unter oder im Bereich der Bestimmungsgrenze und ist daher mit einer großen Unsicherheit behaftet (Andreae et al. 2016, Kap. 5.2.1). Insgesamt entspricht das einem N-Vorrat in den Waldböden von rund 78.000 kt N (Auflagehumus – 90 cm Tiefe). Für rund 1200 Probenahmestellen kann aus dem Vergleich der N-Menge der BZE I mit der BZE II die Änderung des N-Bodenvorrats ermittelt werden (Tabelle 8-5).

Tabelle 8-5: Mittelwert, Standardfehler und Median der jährlichen Stickstoff-Vorratsänderung ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) im Auflagehumus und im Boden (nach Tiefenstufen) der Wälder in Deutschland, Veränderung gem. Ergebnis der zweiten Bodenzustandserhebung Wald (BZE II, 2006 - 2008) im Vergleich zur BZE I (1987 - 1993) (Andreae et al. 2016, Tab. I-5-1).

Schicht	Mittelwert	Standardfehler	Median	Anzahl Proben ^a
Auflagehumus	-1,6	1,4	-2,6	1.244
0 - 5 cm	6,1 ^b	1,3	6,5	1.325
5 - 10 cm	1,1	1,1	1,9	1.327
10 - 30 cm	-6,3	3,4	-3,8	1.312
30 - 60 cm	-22,3 ^b	7,0	-14,8	1.268
(60 - 90 cm)	(-26,7)	(8,7)	(-12,3)	(1.097)
Summe Auflagehumus bis 60 cm	-26,5^c	11,9	-8,9	1.168

^a Stichprobenumfang, Anzahl gepaarter Proben.

^b Änderung signifikant ($p < 5 \%$).

^c Wert für „Summe Auflagehumus bis 60 cm“ aus Andreae et al. (2016), Tab. I-5-1, übernommen; entspricht nicht der Summe der Werte für die Horizonte „Auflagehumus“ bis „30 – 60 cm“.

Aufgrund der großen Unsicherheit der N-Bestimmung für die Tiefenstufe 60 – 90 cm wird für die Berechnung der Änderung des N-Bodenvorrats nur die Summe Auflagehumus bis 60 cm Tiefe herangezogen. Als Flächenbezug dient die bestockte Holzbodenfläche, da in der Bodenzustandserhebung nur Böden unter bestockten Waldflächen beprobt werden.

Jährliche Änderung N-Bodenvorrat (Auflagehumus bis 60 cm Tiefe): $-26,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
 * 11.050 kha Holzbodenfläche = $-292,8 \text{ kt N a}^{-1}$ (entspricht einer Mobilisierung von N_r („SOURCE“)).

Im Mittel lagen zwischen dem ersten und zweiten Aufnahmezeitpunkt der BZE rund 17 Jahre. Berechnet auf diese Zeitspanne entspricht die in Tabelle 8-5 aufgeführte mittlere Abnahme pro Jahr einer Verminderung des N-Bodenvorrats (Auflagehumus bis 60 cm Tiefe) um rund $-450 \text{ kg N ha}^{-1}$. Bezogen auf die rund $6000 \text{ kg N ha}^{-1}$ in Boden insgesamt (Auflagehumus bis 60 cm Tiefe) bedeutet das eine Abnahme von $-7,5 \%$ in ca. 17 Jahren. Ein Humusabbau in Waldböden in ähnlicher Größenordnung wird von Prietzel et al. (2016) für ein Untersuchungsgebiet von 4500 km^2

in den Bayrischen Alpen berichtet, für das ein Humusverlust im Mittel von 14 % in rund drei Jahrzehnten bilanziert wurde, was die Autoren vorrangig auf den Klimawandel zurückführen.

Holzbestand und Bestandsänderung

Der Holzvorrat und die Vorratsänderungen im Wald werden mit der Bundeswaldinventur erfasst, die in 10-jährigem Turnus durchgeführt wird. Die Ergebnisse der 4. Bundeswaldinventur (2022) werden voraussichtlich 2024 veröffentlicht. Das Kyoto-Protokoll schreibt vor, die Veränderungen der nationalen Kohlenstoffbestände in jeder Verpflichtungsperiode, in (ungefähr) 5-jährigen Intervallen zu dokumentieren. Für die Umsetzung in Deutschland wurde dafür die Kohlenstoffinventur 2017 durchgeführt (Riedel et al. 2019).

Tabelle 8-6: Holzvorrat (2017) und Änderung des Vorrats 2017 gegenüber der 3. Bundeswaldinventur (2012) im Wald nach Kohlenstoffinventur 2017 (Thünen-Institut 2019).

	Holzvorrat (2017)			Vorratsänderung 2017 zu 2012		
	Mio m ³	Mio t ^a	kt N ^b	Mio m ³	Mio t ^a	kt N ^b
Laubwald	1.516,2	879,4	1.231,2	95,6	55,5	77,7
Nadelwald	2.353,9	965,1	1.158,1	111,5	45,7	54,8
Wald insgesamt	3.870,1	1.844,5	2.389,3	207,1	101,2	132,5

^a Dichte Laubholz 0,58 t m⁻³, Nadelholz 0,41 t m⁻³ nach NNB Annex 4, Table 15 ECE (2016).

^b Mittlerer N-Gehalt Nadelholz 1,2 g kg⁻¹, Laubholz 1,4 g kg⁻¹, nach NNB Annex 4, Table 16 ECE (2016).

Die mittlere Vorratsänderung pro Jahr entspricht der gesamten Vorratsänderung verteilt auf den Zeitraum von 5 Jahren zwischen den Erfassungsjahren 2017 und 2012 zwischen der Kohlenstoffinventur und der Bundeswaldinventur III.

$$\begin{aligned} &\text{Jährliche N-Menge in der Zunahme des Holzvorrats in Wäldern } 132,5 \text{ kt N a}^{-1} / 5 \\ &= 26,5 \text{ kt N a}^{-1} \text{ (entspricht einer Festlegung von } N_r \text{ („SINK“)).} \end{aligned}$$

Anmerkung: Diese Werte gelten für einen Zeitraum ohne verstärkte Kalamitätsereignisse. Ab 2018 traten jedoch verstärkt Waldschäden durch Sturm, Dürre und Insekten (Borkenkäferbefall) auf, die für die Kohlenstoffinventur 2017 aber noch keine Rolle gespielt haben (Riedel & Hennig 2019).

8.1.7 Bilanzierung für Sub-Pool Wald

In Tabelle 8-7 sind die N-Flüsse sowie die interne Freisetzung bzw. Festlegung von Stickstoff über die Vorratsänderungen im Boden und im Holzbestand gegenübergestellt. In dieser Bilanzierung sind, abweichend vom N-Inventarschema des ECE (2013), die Vorratsänderungen mit dem Abbau des Humus in Waldböden und dem Zuwachs im Holzbestand als N-Flüsse mitberücksichtigt. Die erhebliche Diskrepanz in Höhe von 463 kt N a⁻¹ zwischen den N-Zuflüssen und den N-Abflüssen verdeutlicht, dass Herkunft und vor allem Verbleib von reaktiven Stickstoffverbindungen im Ökosystem Wald derzeit nur mit großer Unsicherheit erfasst werden können. Wesentliche Prozesse wie N-Fixierung, Denitrifikation und Nitratauswaschung können derzeit nicht mit der notwendigen Genauigkeit quantifiziert werden, um eine auch nur ansatzweise geschlossene Massenbilanz der N-Flüsse für den Sub-Pool „Wald“ darzustellen.

Tabelle 8-7: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse sowie Vorratsänderungen im Sub-Pool „Wald“, Mittel 2015 - 2020.

Zufluss (N _r -Quellen)	kt N a ⁻¹	Abfluss (N _r -Verwendung)	t N a ⁻¹
Atmosphärische N-Deposition	200,3	Denitrifikation	- 12,2
Stickstofffixierung	110,8	N ₂ O- und NO _x -Emissionen	- 0,5
Änderung (Abbau) N-Bodenvorrat	292,8	Nitratauswaschung	- 61,0
Netto-Import Rohholz	0,7	Holzentnahme (alle Nutzungen)	- 41,5
		Zunahme Holzvorrat	- 26,5
Summe Zuflüsse	604,6	Summe Abflüsse	- 141,7
Differenz: 462,9			

8.2 Semi-natürliche Flächen (FS.OL)

Im Sub-Pool „Semi-natürliche Flächen“ sind Flächen mit unterschiedlichem Vegetationsbestand sowie vegetationsarme bis -freie Bereiche (bspw. Felsen, Sanddünen) zusammengefasst; gemeinsames Charakteristikum ist, dass es sich (weitgehend) um relativ naturnahe, nicht (oder nur sehr extensiv) anthropogen genutzte Areale handelt, deren N-Umsetzungen nahezu ausschließlich durch natürliche Prozesse (N-Fixierung, Deposition, Auswaschung und Denitrifikation) gesteuert werden. Für die Beschreibung der N-Flüsse in Deutschland werden diesem Sub-Pool die folgenden Klassen der CLC2018 zugeordnet (in Klammern: CLC-Code; s. Tabelle 3-2):

- ▶ natürliches Grünland (321)
- ▶ Heiden und Moorheiden (322)
- ▶ Strände, Dünen, Sandflächen (331)
- ▶ Felsen ohne Vegetation (332)
- ▶ Flächen mit spärlicher Vegetation (333)
- ▶ Gletscher/Dauerschneegebiet (335)
- ▶ Sumpf (411)
- ▶ Salzwiesen (421).

„In der Gezeitenzone liegende Flächen“ (423) wurden im ersten nationalen N-Inventar 2010 - 2014 (Bach et al. 2020) fälschlicherweise berücksichtigt. Dies erklärt den relativ großen Unterschied zwischen 656,5 kha zu jetzt 400,7 kha. Die korrigierte Gesamtfläche der semi-natürlichen Flächen ist tatsächlich um ca. 52 kha gestiegen.

8.2.1 Biologische Stickstofffixierung in semi-natürlichen Flächen (AT-FS.OL-Nfix)

Angaben zur biologischen Stickstofffixierung in Böden mit semi-natürlicher Vegetation sind in der Literatur kaum zu finden. In NNB Annex 4, Table 5 (ECE 2016) werden als Referenzwerte für die N-Fixierung in semi-natürlichen Flächen 2,3 bis 3,1 kg N ha⁻¹ a⁻¹ genannt (Cleveland et al. 1999, zit. nach ECE 2016). Für die Berechnung der N-Flüsse wird als mittlerer Wert 3 kg N ha⁻¹ a⁻¹ für Deutschland angesetzt.

$$\text{N-Fixierung: } 3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ Fixierung} * 400,7 \text{ kha semi-natürliche Flächen} = 1,2 \text{ kt N a}^{-1}.$$

Dieser Wert für die biologische N-Fixierung ist mit einer großen Unsicherheit behaftet und als Platzhaltergröße zu betrachten.

8.2.2 Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen (AT-FS.OL-N2)

Angaben zur Denitrifikation in Flächen mit semi-natürlicher Vegetation sind in der Literatur nur sporadisch zu finden. Für die Berechnung der N-Flüsse wird, analog zu Wald, als mittlerer Wert 1 kg N ha⁻¹ a⁻¹ angesetzt.

$$\begin{aligned} \text{Denitrifikation: } & 1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ Denitrifikation} * 400,7 \text{ kha semi-natürliche Flächen} \\ & = 0,4 \text{ kt N a}^{-1}. \end{aligned}$$

Dieser Wert für die Denitrifikation ist mit einer großen Unsicherheit behaftet und als Platzhaltergröße zu betrachten.

8.2.3 Nitratauswaschung aus semi-natürlichen Flächen (FS.OL-HY.SW-leach)

Literaturangaben zur Nitratauswaschung aus Flächen mit semi-natürlicher Vegetation sind für Deutschland nicht verfügbar. Für die Berechnung der N-Flüsse wird der gleiche Wert wie für Wald von 5 kg N ha⁻¹ a⁻¹ als Nitratauswaschung angesetzt.

$$\begin{aligned} \text{NO}_3\text{-Auswaschung aus semi-nat. Vegetation: } & 5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} * 400,7 \text{ kha Fläche} \\ & = 2,0 \text{ kt N a}^{-1}. \end{aligned}$$

Dieser Wert für die Nitratauswaschung ist mit einer großen Unsicherheit behaftet und als Platzhaltergröße zu betrachten.

8.3 Feuchtgebiete (FS.WL)

Der Begriff „Feuchtgebiet“ als Entsprechung des englischen Begriffs „wetland“ wird in Deutschland nicht einheitlich verwendet, verschiedene Fachdisziplinen führen unterschiedliche Definitionen an:

- Hydrologie: Landoberfläche, die über einen längeren Zeitraum des Jahres vollständig wassergesättigt bzw. mit Wasser bedeckt ist.
- Bodenkunde: Gebiet mit hydromorphologisch geprägten Bodentypen (bspw. Gley).
- Vegetationskunde: Gebiet mit nässegeprägten Vegetationstypen, z. B. Moore, Röhricht, Feuchtwiesen.

In den IPCC (2003) Guidelines zur Systematik der Landnutzungssysteme sind „wetlands“ als Kategorie aufgeführt, der im Nationalen Inventarbericht Deutschland (UNFCCC 2022) die zwei Landnutzungskategorien „Gewässer“ sowie „terrestrische Feuchtgebiete“ zugeordnet werden, letztere mit den beiden Landnutzungsklassen „Torfmoore“ und „Torfabbau“. Für die Berechnung der N-Flüsse wird von dieser Einteilung jedoch abgewichen: im Unterschied zu den IPCC-Guidelines sieht das nationale N-Inventarschema (ECE 2013) einen eigenen Pool „Gewässer“ vor. Die N-Flüsse zwischen Gewässern und Atmosphäre werden daher im Pool „Gewässer“ separat aufgeführt und nicht, wie in der IPCC-Inventur, der Rubrik „Feuchtgebiete“ zugerechnet. Im nationalen N-Inventar entspricht den Feuchtgebieten daher nur die CLC-Landnutzungsklasse „Torfmoore“ (s. Tabelle 3-2).

8.3.1 Biologische Stickstofffixierung in Feuchtgebieten (AT-FS.WL-Nfix)

Angaben zur biologischen Stickstofffixierung in Feuchtgebieten sind in der Literatur kaum zu finden. In NNB Annex 4, Table 19 (ECE 2016) werden als Referenzwerte für die N-Fixierung in

Feuchtgebieten (Typ „peat bog“) 0 bis 22 kg N ha⁻¹ a⁻¹ genannt. Für die Berechnung der N-Flüsse in Deutschland wird als mittlerer Wert 10 kg N ha⁻¹ a⁻¹ angesetzt.

$$\text{N-Fixierung: } 10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ Fixierung} * 81,2 \text{ kha Feuchtgebiete} = 0,81 \text{ kt N a}^{-1}.$$

Dieser Wert für die N-Fixierung ist mit einer großen Unsicherheit behaftet und als Platzhaltergröße zu betrachten.

8.3.2 N-Eintrag mit dem Zufluss von Oberflächenabfluss (AG.SM-FS.WL-runoff)

Charakteristikum von Feuchtgebieten ist in der Regel der Zufluss von Wasser aus angrenzenden Landschaftsbereichen, oberirdisch über Oberflächenabfluss (Runoff) vor allem von Landwirtschaftsflächen, sowie unterirdisch über Zustrom bzw. Austritt von Grundwasser. Mit diesem Wasserfluss ist auch stets eine mehr oder weniger große Zufuhr von NO₃ verbunden. Es sind allerdings keine Anhaltswerte bekannt, in welcher Größenordnung die Wasserflüsse und die damit gekoppelten N-Zuflüsse in Feuchtgebiete anzusetzen wären. In Anbetracht des sehr geringen Flächenumfangs der Feuchtgebiete in Deutschland wird dieser Fluss nicht berücksichtigt.

8.3.3 Denitrifikation in Feuchtgebieten (AT-FS.WL-N2)

Eine Literatursauswertung von Gutknecht et al. (2006) zeigt eine sehr große Spanne der Denitrifikationsraten in Feuchtgebieten (wetlands). Als ein Wert für den unteren Bereich wird eine Rate von 20 kg N ha⁻¹ a⁻¹ angesetzt.

$$\text{Denitrifikation: } 20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ Denitrifikation} * 81,2 \text{ kha Feuchtgebiete} = 1,6 \text{ kt N a}^{-1}.$$

Dieser Wert für die Denitrifikation ist mit einer großen Unsicherheit behaftet und als Platzhaltergröße zu betrachten.

8.3.4 Nitratauswaschung aus Feuchtgebieten (FS.WL-HY.SW-leach)

Das Charakteristikum für Feuchtgebiete ist in der Regel der Zufluss von Wasser, oberirdisch über Oberflächenabfluss (Runoff) und/oder unterirdisch über Zustrom bzw. Austritt von Grundwasser. Es ist daher in erster Näherung davon auszugehen, dass im Jahresverlauf auf derartigen Standorten (netto) keine Grundwasserneubildung und somit auch keine Nitratauswaschung auftritt. In Anbetracht des sehr geringen Flächenumfangs der Feuchtgebiete in Deutschland wird auf eine weitere Betrachtung verzichtet.

8.4 Zusammenfassung der N-Flüsse Wald und semi-natürliche Flächen (FS)

In Tabelle 8-8 sind die N-Flüsse des Pools „Wald und semi-natürliche Flächen“ zusammengefasst.

Tabelle 8-8: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“, Mittel 2015 – 2020.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Sub-Pool Wald (FS.FO)^a					
AT	FS.FO	AT-FS.FO-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Waldflächen	NH _y NO _x	132,2 68,1
AT	FS.FO	AT-FS.FO-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden	N(org)	110,8
RW	FS.FO	RW-FS.FO-wood	Import von Rohholz	N(org)	4,4

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
SOURCE	FS.FO	SOURCE-FS.FO ^a	Änderung (Abbau) N-Bodenvorrat	N(org)	292,8
FS.FO	AT	FS.FO-AT-N2	Denitrifikation in Waldböden	N ₂	12,2
FS.FO	AT	FS.FO-AT-gasEM	N ₂ O- und NO _x -Emissionen aus Waldflächen (LULCC)	N ₂ O NO _x	0,4 0,1
FS.FO	EF.EC	FS.FO-EF.EC-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung - Großfeuerungsanlagen	N(org)	3,4
FS.FO	EF.OE	FS.FO-EF.OE-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung - Privathaushalte	N(org)	11,7
FS.FO	MP.OP	FS.FO-MP.OP-wood	Holzentnahme zur stofflichen Nutzung	N(org)	26,4
FS.FO	HY.GW	FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldböden	NO ₃	61,0
FS.FO	RW	FS.FO-RW-wood	Export von Rohholz	N(org)	3,7
FS.FO	SINK	FS.FO-SINK	Zunahme Holzbestand (Zuwachs)	N (org)	26,5

Sub-Pool semi-natürliche Flächen (FS.OL)

AT	FS.OL	AT-FS.OL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf semi-natürliche Flächen	NH _y NO _x	5,0 3,0
AT	FS.OL	AT-FS.OL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in semi-natürlichen Flächen	N(org)	1,2
FS.OL	AT	FS.OL-AT-N2	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen	N ₂	0,4
FS.OL	HY.SW	FS.OL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO ₃	2,0

Sub-Pool Feuchtgebiete (FS.WL)

AT	FS.WL	AT-FS.WL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Feuchtgebiete	NH _y NO _x	0,7 0,4
AT	FS.WL	AT-FS.WL-Nfix	Biolog. Stickstofffixierung in Feuchtgebieten	N(org)	0,8
AG.SM	FS.WL	AG.SM-FS.WL-runoff	N-Eintrag mit dem Zufluss von Oberflächenabfluss (Runoff) aus Ackerflächen	NO ₃	n.b.
FS.WL	AT	FS.WL-AT-atmDep	N ₂ O- und NO _x -Emissionen aus Feuchtgebieten (LULCC)	N ₂ O NO _x	0,1 n.b.
FS.WL	AT	FS.WL-AT-N2	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N ₂	1,6

^a Die Mobilisierung bzw. Festlegung von N(org) infolge von Vorratsabbau bzw. -Aufbau im Bodenumus und im Holzbestand wird im NNB (ECE 2013) nicht als N-Fluss berücksichtigt.

Für den Sub-Pool „semi-natürliche Flächen“ werden keine NO_x- und N₂O-Emissionen ausgewiesen, da das nationale Emissionsinventar (s. Kap. 3.2) keine entsprechende Landnutzungskategorie ausweist. Die IPCC-Kategorie „Sonstiges Land“ deckt nur einen kleineren Teilbereich der semi-natürlichen Vegetation ab, die NO_x- und N₂O-Emissionen aus den dort aufgeführten Landbedeckungen sind vernachlässigbar.

Eine Metastudie der Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA, Göttingen) zu möglichen N-Austrägen nach Borkenkäferkalamitäten war zum Redaktionsschluß der vorliegenden Veröffentlichung noch nicht abgeschlossen (schriftl. Mitteilung H. Meesenburg, NW-FVA). Die Zunahme des N-Austrags nach Baumsterben bzw. Kahlschlag infolge großflächigem Borkenkäferbefall hängt von verschiedenen Faktoren ab, die jeweils für die betroffenen Waldlandschaften erhoben werden müssen. Die Abschätzung eines pauschalen Wertes ist daher nach Ansicht der Autor*inne zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich.

9 Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung (WS)

Der Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“ umfasst die Sammlung, Behandlung und Entsorgung von festen und flüssigen Abfällen und wird in zwei Sub-Pools gegliedert; Tabelle 9-1 gibt eine Übersicht der relevanten Stickstoffflüsse. Gemäß den Vorgaben des nationalen N-Inventars (ECE 2013) wird die Müllverbrennung nicht der Energieerzeugung, sondern der Abfallbehandlung zugerechnet.

- Abfallwirtschaft (WS.SW).
- Abwasserentsorgung (WS.WW).

Tabelle 9-1: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
Sub-Pool Abfallwirtschaft (WS.SW)					
EF.EC	WS.SW	EF.EC-WS.SW-waste	Abfälle aus der Erzeugung von Energieträgern und Raffinerieprodukten	N(org)	9.1.1
MP.FP	WS.SW	MP.FP-WS.SW-fuel	Tiermehl zur thermischen Verwertung	N(org)	5.1.3
MP.OP	WS.SW	MP.OP-WS.SW-waste	Abfälle aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	9.1.1
HS.HB	WS.SW	HS.HB-WS.SW-waste	Abfälle aus Haushalten (menschliche Ernährung)	N(org)	9.1.1
HS.MW	WS.SW	HS.MW-WS.SW-waste	Abfall von Konsumgütern	N(org)	9.1.1
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(org)	9.2.2
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur thermischen Verwertung	N(org)	9.2.2
RW	WS.SW	RW-WS.SW-waste	Import von Abfallstoffen	N(org)	9.1.3
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NO _x , N ₂ O	3.2
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NH ₃ -Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NH ₃	3.3
WS.SW	AT	WS.SW-AT-N2	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Verbrennung von Abfall	N ₂	9.1.1
WS.SW	AT	WS.SW-AT-N2	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Thermische Verwertung (Verbrennung) von Klärschlamm	N ₂	9.2.2
WS.SW	AT	WS.SW-AT-N2	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Thermische Verwertung (Verbrennung) von Tiermehl	N ₂	5.1.3

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
WS.SW	MP.OP	WS.SW-MP.OP-waste	Recycling von Abfallstoffen (stoffliche Verwertung)	N(org)	9.1.1
WS.SW	AG.SM	WS.SW-AG.SM-comp	Kompost (aus kommunalem Grünabfällen) zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(org)	7.2.1
WS.SW	SINK ^a	WS.SW-SINK-waste	Ablagerung (Deponierung) von Abfall	N(org)	9.1.1
WS.WW	SINK ^a	WS.WW-SINK-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(org)	9.2.2
WS.SW	RW	RW-WS.SW-waste	Export von Abfallstoffen	N(org)	9.1.3

Sub-Pool Abwasserentsorgung (WS.WW)

HS.HB	WS.WW	HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser von Haushalten	N(ges)	9.2.1
HS.MW	WS.WW	HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser aus dem Siedlungsbereich (befestigte Flächen)	N(ges)	9.2.1
EF.EC	WS.WW	EF.EC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Energiewirtschaft	N(ges)	9.2.1
MP.FP	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Nahrungs- und Futtermittelindustrie	N(ges)	9.2.1
MP.NC	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Stickstoff-Chemie	N(ges)	9.2.1
MP.OP	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der sonstigen industriellen Produktion	N(ges)	9.2.1
WS.WW	AT	WS.WW-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Kläranlagen	NO _x , N ₂ O	3.3
WS.WW	HS.MW	WS.WW-HS.MW-sludge	Klärschlamm zur Verwertung bei landbaulichen Maßnahmen	N(org)	9.2.2
WS.WW	AG.SM	WS.WW-AG.SM-sludge	Klärschlamm zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(org)	9.2.2
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(org)	9.2.2
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Thermische Verwertung von Klärschlamm	N ₂ , NO _x	9.2.2
WS.WW	HY.SW	WS.WW-HY.SW-discharge	N-Eintrag in Oberflächengewässer aus Kläranlagen und dem Kanalisationssystem ^b (Siedlungswasserwirtschaft)	N(ges)	9.2.3
WS.WW	AT	WS.WW-AT-N2	Denitrifikation in kommunalen und nicht-öffentlichen Kläranlagen	N ₂	9.2.4

^a Zu Pool(in) "SINK" s. Kap. 9.4.

^b N-Eintrag mit Einleitungen aus kommunalen Kläranlagen sowie über Mischwasserüberläufe und Regenwasserkanäle, aus Gebieten die nur an die Kanalisation angeschlossen sind, aus Gebieten die nicht angeschlossen sind sowie von industriellen Direkteinleitern.

9.1 Abfallwirtschaft (WS.SW)

Das Statistische Bundesamt veröffentlicht jährlich den Bericht zur Abfallentsorgung (DESTATIS 2022a; 2022b, Tab.-Nr. 2190100187005). Die Erhebung der Abfallentsorgung wird bei den Betreibern von zulassungspflichtigen Anlagen durchgeführt, die eigene oder von Dritten übernommene Abfälle oder Teile davon entsorgen, behandeln, verwerten oder beseitigen. Erhoben werden die Abfallmengen, die angeliefert werden und die Anlagen wieder verlassen. Aufgrund dieser Erhebungsstruktur ist der Bericht zur Abfallentsorgung aber nicht dazu geeignet, den Materialfluss in die Abfallwirtschaft hinein, die internen Stoffflüsse zwischen verschiedenen Anlagen zur Behandlung, die stoffliche Verwertung als Recyclingmaterial im verarbeitenden Gewerbe und schließlich die - über Verbrennung oder Deponierung - endgültig beseitigten Mengen eindeutig zu beschreiben, vielmehr treten dabei in unbekanntem Umfang Doppelzählungen auf. In der Abfallbilanz (DESTATIS 2022a; 2022b, Tab.-Nr. 52310001) wird das Abfallaufkommen nach Abfallkategorien und Verwertungs- bzw. Beseitigungspfaden dargestellt. Die Abfallbilanz ist keine Primärerhebung, sondern wird mit Hilfe eines Rechenmodells aus der Abfallentsorgung ermittelt. Für die Erfassung der N-Flüsse im Bereich der Abfallwirtschaft werden nachfolgend mehrere Statistiken aus beiden Veröffentlichungen herangezogen. Alle dort berichteten Mengen beziehen sich auf die Frischmasse der Abfälle.

9.1.1 Aufkommen an Abfällen (XX.XX-WS.SW-waste)

In der Tabelle "Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen" der Abfallbilanz (DESTATIS 2022a; 2022b) wird das Abfallaufkommen nach acht Wirtschaftszeigen unterschieden, von denen vier (mutmaßlich) N-haltige Abfälle produzieren. Diesen vier Wirtschaftszweigen werden N-Flüsse in fünf Sub-Pools des nationalen N-Inventars wie folgt zugeordnet (Tabelle 9-2):

- ▶ „Energieversorgung“: Sub-Pool „Energiewirtschaft“ (EF.EC-WS.SW-waste)
- ▶ „Verarbeitendes Gewerbe“: Sub-Pools „Nahrungs- und Futtermittelindustrie“ (MP.FP-WS.SW-waste) sowie „Sonstige industrielle Produktion“ (MP.OP-WS.SW-waste)
- ▶ „Haushalte“: Sub-Pool „Menschliche Ernährung“ (HS.HB-EC-WS.SW-waste)
- ▶ „Dienstleistungen“: Sub-Pool „Konsumgüter“ (HS.MW-WS.SW-waste).

Die übrigen vier Wirtschaftszweige sind von nachrangiger Bedeutung. Dem Sub-Pool „Chemische Industrie“ kann kein eigenes Abfallaufkommen zugeordnet werden, obwohl davon auszugehen ist, dass auch dort relevante Mengen N-haltiger Abfälle anfallen. Diese Menge ist im N-Fluss der „sonstigen industriellen Produktion“ mit enthalten. Die Klärschlamm-mengen aus dem Wirtschaftszweig „Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke“ werden in der Klärschlammstatistik (s. Kap. 9.2.2) ausgewertet. Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung sind nicht N-haltig und können daher vernachlässigt werden.

Tabelle 9-2: Aufkommen an Abfällen (Auszug, nur mutmaßlich N-haltige Abfallarten aufgeführt) und Zuordnung der Herkunft zu vier Sub-Pools, Mittel 2014/2016/2018/2020 (Quelle: DESTATIS 2022b).

Art des Abfalls	Abfallaufkommen ^a (1000 t)				N-Gehalt ^b (%)	N-Fluss (kt N a ⁻¹)			
	Verarbeitendes Gewerbe	Energieversorgung	Dienstleistungen	Abfallaufkommen Haushalte		MP.FP-, MP.OP-WS.SW-waste	EF.EC-WS.SW-waste	HS.MW-WS.SW-waste	HS.HB-WS.SW-waste
Verbrauchte Lösemittel	505	19	88	4	0,3 %	1,5	0,1	0,3	0,0
Säuren, Laugen oder Salze	935	11	84	2	0,3 %	2,8	0,0	0,3	0,0
Chemische Abfälle	1703	66	332	28	0,3 %	5,1	0,2	1,0	0,1
Medizinische und biologische Abfälle	8	0	354	0	0,3 %	0,0	0,0	1,1	0,0
Papier- und Pappeabfälle	583	7	1694	5227	0,1 %	0,6	0,0	1,7	5,2
Gummiabfälle	239	2	312	0	0,4 %	1,0	0,0	1,2	0,0
Kunststoffabfälle	826	4	653	111	0,4 %	3,3	0,0	2,6	0,4
Holzabfälle	3243	177	992	705	0,1 %	3,2	0,2	1,0	0,7
Textilabfälle	92	0	89	130	0,4 %	0,4	0,0	0,4	0,5
Ausrangierte Geräte (elektrisch, elektronisch)	169	46	229	602	0,4 %	0,7	0,2	0,9	2,4
Tierische und gemischte Nahrungsmittelabfälle	602	3	1116	0	1,0 %	6,0	0,0	11,2	0,0
Pflanzliche Abfälle	1282	87	620	9972	0,5 %	6,4	0,4	3,1	49,9
Tierische Ausscheidungen (Gülle, Jauche, Stallmist)	286	111	165	0	4,0 %	11,4	4,4	6,6	0,0
Hausmüll und ähnliche Abfälle	1442	40	3707	15707	0,4 %	5,8	0,2	14,8	62,8
Gemischte und undifferenzierte Materialien	2593	74	1184	2803	0,4 %	10,4	0,3	4,7	11,2
Summe	14.506	646	11.617	35.290		58,6	6,0	50,8	133,3

^a Ohne tierische Ausscheidungen (Gülle, Jauche, Stallmist).

^b N-Gehalte nach NNB Annex 0, Tab. 4 (ECE 2013); BGK (2006), z.T. geschätzt.

9.1.2 Verbleib der Abfälle (WS.SW-XX.XX-waste)

Der Verbleib von Abfall wird in der Abfallbilanz (DESTATIS 2022a; 2022b) in den Tabellen „Abfallbilanz [Jahr]“ nach Beseitigungs- und Verwertungsverfahren aufgeschlüsselt. Die Abfallbilanz verteilt das Abfallaufkommen auf fünf Wege des Verbleibs:

- ▶ Beseitigungsverfahren:
 - Ablagerung
 - Thermische Beseitigung
 - Behandlung zur Beseitigung
- ▶ Verwertungsverfahren:
 - Energetische Verwertung
 - Stoffliche Verwertung.

Für die Darstellung der N-Flüsse mit dem Verbleib von N-haltigen Abfällen (Tabelle 9-3) wird die Abfallbilanz wie folgt interpretiert:

- ▶ „Ablagerung“ wird als solche übernommen (Deponierung) (WS.SW-SINK-waste).
- ▶ Thermische Beseitigung und energetische Verwertung werden zu „Verbrennung“ zusammengefasst (WS.SW-AT-N2).
- ▶ Unter stofflicher Verwertung wird die Wiederverwendung als Rohstoff in der sonstigen Industriellen Produktion verstanden (WS.SW-MP.OP-waste).
- ▶ Behandlung zur Beseitigung bezeichnet die (Vor-)Behandlung von Abfallstoffen entweder zur Thermischen Beseitigung oder zur Ablagerung; diese Mengen werden nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass dieser Abfall erneut entweder in der Rubrik Ablagerung oder der Rubrik thermische Beseitigung erfasst wird.

Der langfristige Aufbau eines N-Speichers in Form von Deponien ist im nationalen N-Inventarschema des ECE (2013) bislang nicht vorgesehen und wird hier mit „SINK“ als Pool(in) gekennzeichnet (analog zu Kap. 4.4).

Tabelle 9-3: Verbleib der Abfälle, Zuordnung zu drei N-Flüssen (nur mutmasslich N-haltige Abfallarten^a aufgeführt, jew. „gefährliche“ und „nicht gefährliche“ Abfälle zusammen), Mittel 2015 - 2020 (Quelle: DESTATIS 2022b).

Art des Abfalls	Abfall nach Entsorgungsanlagen ^b (1000 t)				N-Gehalt ^c (%)	N-Fluss (kt N a ⁻¹)		
	Ablagerung	Thermische Beseitigung	Energetische Verwertung	Stoffliche Verwertung		Ablagerung (Deponie) WS.SW-SINK ^d -waste	Verbrennung ^e WS.SW-AT-N2	Stoffliche Verwertung WS.SW-MP.OP-waste
Haushaltstypische Siedlungsabfälle, davon:								
- Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle ^f	1	1.080	10.331	2.453	0,4 %	0,0	45,6	9,8
- Sperrmüll	0	56	1.097	1.474	0,4 %	0,0	4,6	5,9
- Abfälle aus der Biotonne	0	0	107	4.428	1,0 %	0,0	1,1	44,3
- Biologisch abbaubare Garten- und Parkabfälle ^g	1	0	105	5.659	0,5 %	0,0	0,5	28,3
- Andere getrennt gesammelte Fraktionen, darunter								
• Papier, Pappe, Kartonagen	0	1	53	7.466	0,1 %	0,0	0,1	7,5
• Gemischte Verpackungen / Wertstoffe	1	35	625	4.943	0,4 %	0,0	2,6	19,8
• Elektroaltgeräte	0	0	0	689	0,4 %	0,0	0,0	2,8
• Sonstiges (Verbunde, Metalle, Textilien usw.)	25	12	414	1.727	0,4 %	0,1	1,7	6,9
Sonstige Siedlungsabfälle, darunter:								
- Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt gesammelt	1	121	1889	1.318	0,4 %	0,0	2,0	1,3
- Straßenkehricht, Garten- und Parkabfälle	88	16	80	537	0,2 %	0,2	0,2	1,1
- Biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle	0	1	101	912	1,0 %	0,0	1,0	9,1
- Marktabfälle	0	5	8	70	1,0 %	0,0	0,1	0,7
- Andere getrennt gesammelte Fraktionen	8	7	31	152	0,4 %	0,0	0,2	0,6

Art des Abfalls	Abfall nach Entsorgungsanlagen ^b (1000 t)				N-Gehalt ^c (%)	N-Fluss (kt N a ⁻¹)		
	Ablagerung	Thermische Beseitigung	Energetische Verwertung	Stoffliche Verwertung		Ablagerung (Deponie) WS.SW-SINK ^d -waste	Verbrennung ^e WS.SW-AT-N2	Stoffliche Verwertung WS.SW-MP.OP-waste
Übrige Abfälle (insbesondere aus Produktion und Gewerbe)	11643	2.757	12398	25.676	0,4 %	46,6	60,6	102,7
Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen (Sekundärabfälle) ^h	4992	572	17812	30.130	0,4 %	20,0	73,5	120,5
Summen	16.760	4.662	45.052	87.634		66,9	193,9	361,2

^a Annahme für die Abfallarten Glas, Leuchtstoffröhren, Abfälle aus Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen sowie Bau- und Abbruchabfälle: kein N enthalten.

^b „Behandlung zur Beseitigung“: wird nicht berücksichtigt, Annahme: Mengen gehen nach der Behandlung entweder in die thermische Beseitigung oder in die Ablagerung, das heißt werden dort erfasst.

^c N-Gehalte nach NNB Annex O, Tab. 4 (ECE 2013); BGK (2006); z.T. geschätzt.

^d Zu Pool(in) "SOURCE" s. Kap. 9.4.

^e Verbrennung: Summe aus thermischer Beseitigung und energetischer Verwertung.

^f Gemeinsam über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt.

^g Einschließlich Friedhofsabfälle.

^h Ohne Abfälle aus Abwasserbehandlungsanlagen, Abfälle aus der Zubereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch oder industriellem Brauchwasser, Abfälle aus der Sanierung von Böden und Grundwasser sowie Sekundärabfälle, die als Rohstoffe/Produkte aus dem Entsorgungsprozess herausgehen.

9.1.3 Import und Export von Abfällen (RW-WS.SW-waste, WS.SW-RW-waste)

Import und Export von Abfällen werden in der Tabelle „Grenzüberschreitende Verbringung von Abfällen nach/aus Deutschland im Notifizierungsverfahren“ als Bestandteil der Abfallentsorgung berichtet (UBA 2022b). Die Angaben erfolgen dort für rund 240 Abfallarten nach Europäischem Abfallverzeichnis (EAV) gemäß der Abfallverzeichnisverordnung. Für die vorliegende Untersuchung wurde eine aggregierte Form herangezogen, die vom Umweltbundesamt veröffentlicht wird (UBA 2022b); Tabelle 9-4 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 9-4: N-Flüsse mit dem Import und Export von zustimmungspflichtigen Abfallstoffen, Mittel 2015 – 2020 (UBA 2022b).

Art des Abfalls	EG-Abfallstatistikverordnung (EVA)	Import 1000 t	Export 1000 t	N- Gehalt	Import kt N a ^{-1 a}	Export kt N a ^{-1 a}
Verbrauchte Lösemittel	01.11, 01.12	51	48	0,3 %	0,2	0,1
Säuren, Laugen oder Salze	01.21, 01.22, 01.24	237	39	0,3 %	0,7	0,1
Chemische Abfälle	01.41, 02.11-14, 02.21, 02.22, 02.31- 33, 03.12-14	166	52	0,3 %	0,5	0,2
Medizinische und biologische Abfälle	05.11, 05.12, 05.21, 05.22	1	0	1,0 %	0,0	0,0
Papier- und Pappeabfälle	07.21-23	0	1	0,1 %	0,0	0,0
Gummiabfälle	07.31, 07.32	0	0	0,4 %	0,0	0,0
Kunststoffabfälle	07.41, 07.42	32	9	0,4 %	0,1	0,0
Holzabfälle	07.51-53	1.004	516	0,1 %	1,0	0,5
Textilabfälle	07.61-63	0	0	0,4 %	0,0	0,0
Ausrangierte Geräte (große elektron. und elektrische Haushaltsgeräte)	08.21, 08.23	55	32	0,4 %	0,2	0,1
Tierische und gemischte Nahrungsmittelabfälle	09.11, 09.12, 09.13	2	2	1,3 %	0,0	0,0
Pflanzliche Abfälle	09.21, 09.22	5	16	1,0 %	0,1	0,2
Tierische Ausscheidungen	09.31	1	16	4,9 %	0,1	0,8
Hausmüll und ähnliche Abfälle	10.11, 10.12	369	185	0,4 %	1,5	0,7
Gemischte und undiff. Materialien	10.21, 10.22	240	66	0,4 %	1,0	0,3
Sortierrückstände	10.32	1.389	675	0,4 %	5,6	2,7
Summe Import und Export		3.553	1.655		10,9	5,7

9.2 Abwasserentsorgung (WS.WW)

Zentrales Instrument zur Abschätzung der N-Flüsse in den Bereichen Hydrologie sowie Siedlungswasserwirtschaft ist das Flussgebietsmanagementsystem MoRE (Modeling of Regionalized Emissions; Fuchs et al. 2016, 2017a, 2017b; Morling et al. 2024). In MoRE werden N-Einträge über die folgenden Pfade modelliert:

► Punktquellen:

- kommunale Kläranlagen
- Industrielle Direkteinleiter.

► Diffuse Quellen:

- Kanalisationssysteme
- Oberflächenabfluss
- Erosion
- Dränagen
- Grundwasser
- Atmosphärische Depositionen auf Gewässeroberfläche.

Die Ergebnisse zu den N-Flüssen im Bereich Siedlungswasserwirtschaft gehen zum einen auf Berechnungen mit allgemein verfügbaren Daten zur Abwasserwirtschaft in Deutschland zurück (u.a. DWA 2019) und zum anderen auf das Flussgebietsmanagementsystem MoRE (s. Kap. 10).

9.2.1 Abwasser aus Haushalten, Industrie (Direkt- und Indirekteinleiter) und von den versiegelten Flächen

Eine geschlossene Erhebung oder Berechnung zur N-Fracht mit dem Schmutzwasser in das Abwassersystem insgesamt bzw. zur Herkunft aus verschiedenen Quellen ist nicht vorhanden. Die N-Zuflüsse im Bereich Abwasserentsorgung und die Aufteilung auf verschiedene Herkünfte (Sub-Pools) in Tabelle 9-5 werden daher zum einen aus dem Modell MoRE übernommen und zum anderen geschätzt.

Ausgangspunkt ist die Abschätzung der gesamten N-Fracht im Schmutzwasser in Kläranlagen. Gemäß MoRE-Modellberechnung beträgt die N-Fracht im Ablauf der kommunalen Kläranlagen (75,4 kt N) und der nichtöffentlichen Kläranlagen (5,8 kt N) zusammen 81,2 kt N a⁻¹. Mit einer Gesamt-Elimination von Stickstoff (über Denitrifikation sowie den Rückhalt im Klärschlamm) im Mittel aller Kläranlagen von 83 % (DWA 2019) ergibt sich daraus eine N-Fracht im Schmutzwasser-Zulauf von 477,6 kt N a⁻¹. Dieser N-Eintrag mit dem Schmutzwasser in Kläranlagen setzt sich zusammen aus dem Zulauf aus den privaten Haushalten, dem Kanalisations-Zufluss von versiegelten Flächen sowie dem Zulauf von industriellen Direkt- und Indirekteinleitern.

N-Fracht im Kläranlagen-Zulauf (Schmutzwasser) aus Haushalten

Aus den Angaben des bundesweiten Leistungsvergleiches kommunaler Kläranlagen (Bezugsjahr 2018) des DWA (2019) zur Jahresabwassermenge von 7.744 Mio. m³ a⁻¹, der mittleren EW-Zulaufmenge von 100,7 Mio. E a⁻¹ und der mittleren Zulaufkonzentration von 54,0 mg N_{ges} l⁻¹ kann die mittlere N_{ges}-Zulauffracht von 4,15 kg E⁻¹ a⁻¹ berechnet werden. Bezogen auf 82,77 Mio Einwohner in Deutschland (Mittel 2016 - 2018) berechnet sich die N-Fracht im Schmutzwasser aus Haushalten zu 343,7 kt N a⁻¹.

N-Fracht im Kanalisations-Zufluss von versiegelten Flächen

Die summierte atmosphärische Deposition von NH_y und NO_x auf versiegelte Flächen beträgt in MoRE 16,7 kg N ha⁻¹ a⁻¹, für das sogenannte Oberflächenpotenzial von Straßen durch Laubfall und tierische Exkrememente wird außerdem ein Zuschlag von 4 kg N ha⁻¹ a⁻¹ (nach Behrendt und Opitz 1999) angesetzt. Bezogen auf die versiegelte Fläche von 16.818 km² in Deutschland

(MoRE-Angabe) entspricht das unter Berücksichtigung des Abflussbeiwertes (0,45 im Bundesmittel) einer N-Fracht im Abfluss von versiegelten Flächen von insgesamt 20,2 kt N a⁻¹. Davon gelangen 10,6 kt N a⁻¹ (rd. 52 %) in ein Mischkanalisationssystem und 9,6 kt N a⁻¹ (rd. 48 %) in ein Trennsystem (d.h. werden nicht in eine Kläranlage eingeleitet). In Mischkanalisationssystemen wird ebenfalls ein Teil des Schmutzwassers direkt in Gewässer entlastet, gemäß MoRE erreichen nur 5,7 kt N a⁻¹ (rd. 54 % von 10,5 kt N a⁻¹) eine Kläranlage. Der Rest (4,8 kt N a⁻¹) gelangt ebenfalls direkt in die Oberflächengewässer.

N-Fracht im Kläranlagen-Zulauf von industriellen Direkt- und Indirekteinleitern

Die N-Fracht im Kläranlagen-Zulauf von industriellen Direkt- und Indirekteinleitern von 128,2 kt N a⁻¹ wird schließlich als Differenz aus der Gesamtfracht (477,6 kt N a⁻¹) und den Frachten im Kläranlagenzulauf aus Haushalten sowie dem Zufluss von versiegelten Flächen über das Kanalisationssystem berechnet.

Für das Nationale N-Inventar gemäß ECE (2013) ist vorgesehen, die N-Flüsse mit dem Abwasser aus der Industrie für die einzelnen Sub-Pools der Pools „Energiewirtschaft und Verkehr“ und „Industrielle Produktion“ zu differenzieren. Dafür ist in Deutschland keine adäquate Datengrundlage vorhanden. Angaben zur N-Fracht mit Abwassereinleitungen nach Sektoren sind nur für die im PRTR-Register (Pollutant Release and Transfer Register; UBA 2023) erfassten Direkteinleiter verfügbar. Die rd. 80 im PTTR-Register erfassten Betriebe mit Angaben zur Total Nitrogen-Fracht im Abwasser haben im Mittel der Jahre 2016 - 2018 11,7 kt N a⁻¹ eingeleitet. Davon entfallen nach Branchenzuordnung im PRTR-Register auf die Betriebe der chemischen Industrie rd. 50 %, der Lebensmittelindustrie rd. 26 %, des Energiesektors rd. 5 % sowie auf die Betriebe der sonstigen Industrie zusammen rd. 19 % der Fracht. Für die Aufteilung der N-Fracht im Schmutzwasser von industriellen Direkt- und Indirekteinleitern insgesamt in Tabelle 9-5 werden dann hilfsweise diese Anteile verwendet. In wieweit diese Annahme gerechtfertigt ist, kann nicht beurteilt werden, die Werte für die vier Sub-Pools in Tabelle 9-5 sind mit Vorsicht zu interpretieren.

Tabelle 9-5: N-Anfall im Abwasser (Schmutzwasser) aus Haushalten, von versiegelten Flächen und von industriellen Einleitern.

N-Fluss	N-Anfall im Abwasser (Schmutzwasser)	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser aus Haushalten	N(ges)	343,7
HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser von versiegelten Flächen	N(ges)	5,7
	Abwasser von industriellen Direkt- und Indirekteinleitern insgesamt, davon aus	N(ges)	128,2
EF.EC-WS.WW-sewage	- Energiewirtschaft (5 %)	N(ges)	6,0
MP.FP-WS.WW-sewage	- Ernährungsindustrie (26 %)	N(ges)	32,8
MP.NC-WS.WW-sewage	- Stickstoff-Chemie (50 %)	N(ges)	64,8
MP.OP-WS.WW-sewage	- Sonstige industrielle Produktion (19 %)	N(ges)	24,6
Summe N-Anfall im Abwasser (Schmutzwasser)			477,6

9.2.2 Klärschlammanfall und Verwertung (WS.WW-HS.MW-sludge, WS.WW-AG.SM-sludge, WS.WW-WS.SW-sludge)

Die anfallenden Mengen von Klärschlamm aus der öffentlichen und nichtöffentlichen Abwasserbehandlung sowie deren Entsorgung (Verwertungswege) werden vom Statistischen Bundesamt in dreijährigem Turnus erhoben (DESTATIS 2023b). Die aktuellsten Angaben beziehen sich auf das Berichtsjahr 2019. Für die Ermittlung der N-Flüsse in Tabelle 9-5 werden die Berichte der Jahre 2016 und 2019 gemittelt. Die Angabe zum N-Gehalt des in der Landwirtschaft verwerteten Klärschlammes ($45,1 \text{ g N}_{\text{ges}} \text{ kg}^{-1} \text{ TS}$) wurde aus dem ersten nationalen N-Inventar 2010 - 2014 (Bach et al. 2020) übernommen und geht auf die Klärschlammberichte der Länder zurück. Der Export von Klärschlamm ist eine zu vernachlässigende Größe.

Tabelle 9-6: Klärschlamm Entsorgung insgesamt aus öffentlicher und nichtöffentlicher Abwasserbehandlung, Jahr 2016-2019 (DESTATIS 2022c; Tab. 1.1, schriftl. Mitteilung DESTATIS 2024) und Zuordnung zu N-Flüssen.

Flusscode	Bezeichnung	Klärschlamm 1000 t TS	N- Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
WS.WW-AG.SM-sludge	Stoffliche Verwertung in der Landwirtschaft ^a	389,8	N(ges)	17,6
WS.WW-HS.MW-sludge	Stoffliche Verwertung bei landschaftsbaulichen Maßnahmen ^b	154,8	N(ges)	7,0
WS.WW-HS.MW-sludge	Sonstige stoffliche Verwertung ^c	249,5	N(ges)	11,2
WS.WW-WS.SW-sludge	Thermische Entsorgung	1.729,1	N(ges)	78,0
WS.WW-WS.SW-sludge	Deponie ^d	168,9	N(ges)	7,6
WS.WW-WS.SW-sludge	Sonstige direkte Entsorgung ^e	17,9	N(ges)	0,8
WS.WW-WS.SW-sludge	Entsorgung als gefährlicher Abfall ^d	112,8	N(ges)	5,1
WS.WW-WS.SW-sludge	Andere Beseitigung / keine Angabe ^d	125,5	N(ges)	5,7
Direkte Klärschlamm Entsorgung insges.		2.948,1		133,0

^a N-Gehalt: $45,1 \text{ kg N}_{\text{ges}}/\text{t TS}$ (nach DESTATIS 2022c; Tab. 2.4, Mittel 2011 - 2014) für Klärschlamm zur Verwertung in der Landwirtschaft (Wert für alle Verwertungswege angesetzt).

^b Z.B. Rekultivierung, Kompostierung.

^c Z.B. Baustoffe, Vererdung, Vergärung.

^d Nur Schlamm aus chemisch-physikalischer nichtöffentlicher Abwasserbehandlung.

^e Öffentliche Abwasserbehandlung: Hierzu zählt auch die Abgabe an Trocknungsanlagen, wenn die weitere Entsorgung nicht bekannt ist. Nichtöffentliche Abwasserbehandlung: Z.B. Deponie, soweit nach Deponieverordnung noch zulässig. Hierzu zählen auch Trocknungsanlagen, wenn keine weitere Entsorgung bekannt ist.

Für die Berechnung der N-Flüsse werden die Verwendungen „stoffliche Verwertung bei landschaftsbaulichen Maßnahmen“ und „sonstige stoffliche Verwertung“ dem aufnehmenden Sub-Pool „Konsumgüter“ zugerechnet, in den auch alle N-Flüsse eingehen, die auf Siedlungsflächen ausgebracht werden. Für die Entsorgungswege „Deponie“, „Sonstige direkte Entsorgung“, „Entsorgung als gefährlicher Abfall“ und „andere Beseitigung / keine Angabe“ wird als Endverbleib Deponierung angenommen.

9.2.3 N-Eintrag in die Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft

Die Ergebnisse zum N-Eintrag in die Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft (Tabelle 9-7) werden aus dem Modell MoRE übernommen (nur Angaben für Mittel der Jahre 2016 - 2018 verfügbar).

Tabelle 9-7: Stickstoff-Einträge in Oberflächengewässer mit dem Ablauf aus kommunalen Kläranlagen sowie aus dem Kanalisationssystem (Siedlungswasserwirtschaft) nach MoRE-Modellierung, Mittel 2016 - 2018 (Morling et al. 2024).

N-Einträge in Oberflächengewässer (Outflow aus Kläranlagen und Kanalisationssystem)	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
N-Eintrag im Ablauf von kommunalen Kläranlagen	N(ges)	75,4
N-Einträge über Kanalisationssysteme zusammen, davon		23,3
- Mischwasserüberläufe	N(ges)	10,6
- Eintrag über Regenwasserkanäle	N(ges)	9,6
- Gebiete, die nur an die Kanalisation angeschlossen sind	N(ges)	0,8
- Gebiete, die nicht an die Kanalisation angeschlossen sind	N(ges)	2,2
N-Eintrag von nichtöffentlichen Kläranlagen (industrielle Direkteinleiter)	N(ges)	5,8
Summe N-Einträge aus Siedlungswasserwirtschaft		104,5

9.2.4 Denitrifikation in kommunalen und nichtöffentlichen Kläranlagen (WS.WW-AT-N2)

Der Vorgang der Denitrifikation findet in Kläranlagen in der biologischen Stufe in nicht belüfteten, anoxischen Becken bzw. Beckenzonen statt. Dabei dient das Nitrat- oder Nitrit-Ion den Denitrifikanten anstelle von Sauerstoff als terminaler Wasserstoff- bzw. Elektronenakzeptor. Die denitrifizierenden Bakterien reduzieren die oxidierten N-Verbindungen (Nitrit, Nitrat) zu molekularem Stickstoff (N₂), der in die Atmosphäre entweicht.

Literaturergebnisse zur Denitrifikationsleistung der öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sind nicht bekannt. Die folgende überschlägige Schätzung folgt dem Berechnungsschema im ersten nationalen N-Inventar 2010 - 2014 (Bach et al. 2020). Die Fracht im Ablauf der kommunalen (75,4 kt N) und nichtöffentlichen Kläranlagen (5,8 kt N) beträgt zusammen 81,2 kt N a⁻¹. Die Gesamt-Elimination von Stickstoff im Mittel aller Kläranlagen beträgt nach DWA (2019) 83 %, mit diesen beiden Angaben wird für Tabelle 9-5 (Kap. 9.2.1) die N-Fracht im Abwasser (Schmutzwasser) von 477,6 kt N a⁻¹ berechnet. Die Elimination von 83 % entspricht 396,4 kt N a⁻¹ und erfolgt zum einen über Denitrifikation und zum anderen über den N-Rückhalt im Klärschlamm. Im Klärschlamm (Primärschlamm und Überschussschlamm) verbleiben davon 136,8 kt N a⁻¹ (s. Tabelle 9-6).

Mit diesen Werten ergibt sich für die kommunalen und nichtöffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen ein geschätzter N-Fluss mit Denitrifikation von 259,6 kt N a⁻¹ (396,4 abzgl. 136,8). Gemäß dieser N-Massenbilanz verteilt sich der N-Eintrag in die Kläranlagen mit dem Schmutzwasser von insgesamt 477,6 kt N a⁻¹ somit zu 54,3 % auf Denitrifikation, 28,7 % auf Klärschlamm und 17,0 % werden mit dem Abwasser in Oberflächengewässer eingeleitet.

9.3 Zusammenfassung der N-Flüsse Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung (WS)

In Tabelle 9-8 sind die N-Flüsse des Pools Abfall- und Abwasserentsorgung zusammengefasst.

Tabelle 9-8: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“, Mittel 2015 – 2020.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Sub-Pool Abfallwirtschaft (WS.SW)					
EF.EC	WS.SW	EF.EC-WS.SW-waste	Abfälle aus der Erzeugung von Energieträgern und Raffinerieprodukten	N(org)	6,0
MP.FP	WS.SW	MP.FP-WS.SW-fuel	Tiermehl zur thermischen Verwertung	N(org)	17,1
MP.OP	WS.SW	MP.OP-WS.SW-waste	Abfälle aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	58,6
HS.HB	WS.SW	HS.HB-WS.SW-waste	Abfälle aus Haushalten (menschliche Ernährung)	N(org)	133,3
HS.MW	WS.SW	HS.MW-WS.SW-waste	Abfall von Konsumgütern	N(org)	50,8
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(org)	19,2
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur thermischen Verwertung	N(org)	78,0
RW	WS.SW	RW-WS.SW-waste	Import von Abfallstoffen	N(org)	10,9
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NO _x N ₂ O	0,2 0,7
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NH ₃ -Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NH ₃	2,9
WS.SW	AT	WS.SW-AT-N2	Verbrennung von Abfall	N ₂	193,9
WS.SW	AT	WS.SW-AT-N2	Thermische Verwertung (Verbrennung) von Klärschlamm	N ₂	78,0
WS.SW	AT	WS.SW-AT-N2	Tiermehl zur thermischen Verwertung	N ₂	17,1
WS.SW	MP.OP	WS.SW-MP.OP-waste	Recycling von Abfallstoffen (stoffliche Verwertung)	N(org)	361,2
WS.SW	AG.SM	WS.SW-AG.SM-compost	Kompost (aus kommunalem Grünabfällen) zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(org)	26,0
WS.SW	SINK ^a	WS.SW-SINK-waste	Ablagerung (Deponierung) von Abfall	N(org)	66,9
WS.SW	SINK ^a	WS.SW-SINK-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(org)	19,2

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
WS.SW	RW	WS.SW-RW-waste	Export von Abfallstoffen	N(org)	5,7
Sub-Pool Abwasserentsorgung (WS.WW)					
HS.HB	WS.WW	HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser aus Haushalten	N(ges)	343,7
HS.MW	WS.WW	HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser aus dem Siedlungsbereich (befestigte Flächen)	N(ges)	5,7
EF.EC	WS.WW	EF.EC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Energiewirtschaft	N(ges)	6,0
MP.FP	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Nahrungs- und Futtermittelindustrie	N(ges)	32,8
MP.NC	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Stickstoff-Chemie	N(ges)	64,8
MP.OP	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der sonstigen industriellen Produktion	N(ges)	24,6
WS.WW	AT	WS.WW-AT-gasEM	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Kläranlagen	NO _x N ₂ O	n.b. 1,0
WS.WW	AT	WS.WW-AT-N2	Denitrifikation in kommunalen und nicht-öffentlichen Kläranlagen	N ₂	259,6
WS.WW	HS.MW	WS.WW-HS.MW-sludge	Klärschlamm zur Verwertung bei landbaulichen Maßnahmen	N(org)	18,2
WS.WW	AG.SM	WS.WW-AG.SM-sludge	Klärschlamm zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(org)	17,6
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(org)	19,2
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Thermische Verwertung von Klärschlamm	N ₂ , NO _x	78,0
WS.WW	HY.SW	WS.WW-HY.SW-discharge	N-Eintrag in Oberflächengewässer aus Kläranlagen und dem Kanalisationssystem ^b (Siedlungswasserwirtschaft)	N(ges)	104,5

^a Zu Pool(in) "SINK" s. Kap. 9.4.

^b N-Eintrag mit Einleitungen aus kommunalen Kläranlagen sowie über Mischwasserüberläufe und Regenwasserkanälen aus Gebieten, die nur an die Kanalisation angeschlossen sind, aus Gebieten, die nicht angeschlossen sind, sowie von industriellen Direkteinleitern.

9.4 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung

Die Ermittlung der N-Flüsse in der Abfallwirtschaft und der Abwasserentsorgung ist insgesamt durch ein hohes Maß an Unsicherheit gekennzeichnet. Aufgrund der völlig unterschiedlichen Datengrundlagen und dem Fehlen von internen N-Flüssen (bis auf Klärschlamm) zwischen diesen beiden Bereichen werden die beiden Sub-Pool getrennt inventarisiert (Tabelle 9-9 und Tabelle 9-10).

Die Statistik über die Abfallentsorgung (DESTATIS 2022b) erlaubt es nicht, den Materialfluss vom Primär-Anfall an Abfallstoffen über die verschiedenen Aufbereitungs- und Sortierschritte, das Recycling von Material und schließlich den Endverbleib (Deponie, Verbrennung) transparent darzustellen. Die Einstufung des Outputs in die einzelnen Kategorien der „Abfälle zur Verwertung“ oder „Abfälle zur Beseitigung“ treffen die Anlagenbetreiber. Über die anschließende weitere Behandlung der Abfallströme sind vom Statistischen Bundesamt keine Informationen verfügbar. Es ist daher nicht möglich, die Mengen für einzelne Abfallarten nachzuvollziehen oder Aussagen über die stoffliche Verwertung zu treffen. Für die Berechnung plausibler N-Flüsse in diesem Bereich müssten zudem diese Flüsse nach verschiedenen Materialgruppen weiter aufgeschlüsselt werden, denen dann plausible mittlere N-Gehalte zugeordnet werden könnten. Den beschriebenen Mängeln in der Statistik über die Abfallentsorgung hat das Statistische Bundesamt zumindest teilweise versucht Rechnung zu tragen, indem mit der Abfallbilanz ein Rechenmodell erarbeitet worden ist, das den Anspruch erhebt, Herkunft und Verbleib der Abfallmengen schlüssiger zu beschreiben.

Die hier gewählten Annahmen zu den N-Gehalten, die den einzelnen Abfallarten zugeordnet wurden, haben eher spekulativen Charakter; die Werte der N-Flüsse in der Abfallbehandlung sind daher im Regelfall durch einen sehr großen Unsicherheitsbereich gekennzeichnet. Beispielsweise sei hier auf die Diskrepanz bei den Konsumgütern hingewiesen (s. Kap. 6.4): nach Absatzstatistik gehen 149,6 kt N a⁻¹ mit Konsumgütern an die Haushalte (Fluss MP.OP-HS.MW-prod), gemäß Abfallstatistik fällt aber nur eine Konsumgüter-Abfallmenge von 50,8 kt N a⁻¹ an (Fluss HS.MW-WW.SW-waste). Da im Bereich des privaten Güterverbrauchs kein (nennenswerter) Vorratsaufbau stattfindet und auch kein anderer Endverbleib für Konsumgüter in Frage kommt, „passen“ diese beiden Zahlen nicht zueinander. In der vorliegenden Form erfüllt die Tabelle 9-8 für den Sub-Pool „Abfallwirtschaft“ daher vorrangig die Funktion, die zu berücksichtigenden N-Flüsse aufzulisten und das N-Inventarschema des ECE (2013) zu bedienen.

Tabelle 9-9: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Sub-Pool „Abfallwirtschaft“, Mittel 2015 – 2020

Zufluss	kt N a ⁻¹	Abfluss ^a	t N a ⁻¹
Abfall-Aufkommen (ohne Klärschlamm, einschl. Tiermehl)	265,8	Stoffliche Verwertung (i.e. Recycling von Abfall und landbauliche Verwertung von Klärschlamm)	- 387,2
Import Abfallstoffe	10,9	Export Abfallstoffe	- 5,7
		Reduktion von N(org) zu N ₂ (im Zuge der Verbrennung von Abfall, Tiermehl und Klärschlamm)	- 289,0
		NH ₃ -, NO _x -, N ₂ O-Emissionen	- 3,8
Summe Zuflüsse	276,7	Summe Abflüsse	- 685,7
Differenz: - 409,0			

^a N-Mengen und Benennung der Flüsse s. Tabelle 9-3 (WS.SW-XX.XX, ausgehende N-Flüsse des Sub-Pools Abfallwirtschaft).

Beim anaeroben Abbau in der Deponie wird der in den Abfällen gebundene Stickstoff sehr weitgehend in NH₃ umgewandelt, in Spuren auch in organische N-Verbindungen. Der Austrag dieser Stickstoffverbindungen erfolgt fast vollständig über das Sickerwasser und nur in sehr geringem Maße über das Deponiegas. Die NH₃-Gehalte im Deponiegas liegen typischerweise im Bereich 10 bis 50 mg m⁻³. Die Sickerwässer der Deponien werden üblicherweise in kommunale

Kläranlagen eingeleitet und sind daher im N-Fluss "Abwasser von industriellen Direkt- und Indirekt-Einleitern insgesamt" mit enthalten.

Auch für die Abwasserentsorgung sind wesentliche N-Flüsse nur ungenau zu schätzen. Der N-Eintrag mit dem Ablauf von öffentlichen und nichtöffentlichen Kläranlagen in die Oberflächengewässer kann auf Basis der Ablaufmengen und der mittleren N-Konzentrationen relativ zuverlässig berechnet werden (Kap. 9.2.3). Ebenso sind die N-Mengen im Klärschlamm statistisch gut erfasst (Kap. 9.2.2). Die N-Menge mit der Einleitung von Schmutzwasser aus Haushalten sowie von industriellen Indirekt- und Direkteinleitern kann aber nur grob überschlägig rückgerechnet werden (Kap. 9.2.1). Als Schlüsselwert wird dabei eine mittlere Gesamt-Elimination von ca. 80 % (über Denitrifikation sowie Rückhalt im Klärschlamm) für Stickstoff in Kläranlagen angenommen (n. DWA 2019). Mit Annahme einer anderen Gesamt-Eliminationsrate ändern sich die N-Fracht im Schmutzwasser und die Denitrifikation (als Differenzgröße) entsprechend. Weiterhin betrifft das auch die N-Abflüsse mit dem Schmutzwasser-Anfall aus den vier Sub-Pools, denen die Einleitungen von industriellen Direkt- und Indirekteinleitern zugerechnet werden. Die Bilanzierungen für diese Umsatzräume würden dadurch ebenfalls verändert. In Tabelle 9-10 sind die Zuflüsse und Abflüsse für die beiden Sub-Pools zusammengestellt.

Tabelle 9-10: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Sub-Pool „Abwasserentsorgung“, 2016 – 2019 (teilweise 2015 - 2020); kursiv: als Differenz berechneter N-Fluss.

Zufluss (N _r -Quellen)	kt N a ⁻¹	Abfluss (N _r -Verwendung)	t N a ⁻¹
Abwasser (Schmutzwasser aus Haushalten, industriellen Direkt- und Indirekteinleitern, versiegelten Flächen)	477,6	Einleitung in Oberflächengewässer aus Kläranlagen und Kanalisationssystem	- 104,5
		Klärschlamm (alle stofflichen Verwertungswege, ohne Verbrennung)	- 55,0
		Klärschlamm zur thermischen Entsorgung (Verbrennung)	- 78,0
		<i>Denitrifikation in Kläranlagen</i>	- 259,6
		NO _x - und N ₂ O-Emission aus Kläranlagen	- 1,0
Summe Zuflüsse	477,6	Summe Abflüsse	- 498,1
Differenz: -20,5			

In der vorherigen Fassung des Nationalen N-Inventars wurde die N-Fracht im Schmutzwasser aus privaten Haushalten aus der einwohnerspezifischen N_{ges}-Zulaufkraft (12,0 g E⁻¹ d⁻¹) und der Einwohnerzahl in Deutschland (82,77 Mio Einwohner im Mittel 2016 - 2018) berechnet, was 362,5 kt N a⁻¹ ergibt. Dieser Wert stimmt mit dem Ergebnis von 343,7 kt N a⁻¹ auf Basis der DWA-Leistungsdaten der Kläranlagen gut überein.

Die in der Literatur dokumentierte Schwankungsbreite zur N₂O-Emission aus Kläranlagen durch denitrifizierende bzw. nitrifizierende Biozönosen ist groß. Die auf großtechnischen Kläranlagen gemessene N₂O-Fracht liegt in einem Messbereich von 0,003 bis 2,6 % der zufließenden N-Zulaufkraft (Parravicini et al. 2015). Eine Messkampagne auf österreichischen Kläranlagen ergab einen Emissionsfaktor von 0,16 % N₂O-N/N_{Zulauf-KA} (Medianwert nach Parravicini et al. 2015). Der in Tabelle 9-10 angesetzte N-Fluss von 1,0 kt N a⁻¹ für die N₂O-Emission aus Kläranlagen (nach Nationalen Inventarbericht, NIR, UBA 2023) liegt, bezogen auf die Gesamteintragsmenge

von 498,1 kt N a⁻¹ (ohne Abfluss von versiegelten Flächen) mit 0,23 % N₂O-N/N_{Zulauf-KA} etwas höher als der Median der Messwerte aus Österreich.

Nitratauswaschung aus Deponien wird nicht berücksichtigt, da in Deponien bei ordnungsgemä-
ßem Bau und Betrieb kein Sickerwasser entsteht, das ins Grundwasser übertritt.

10 Gewässer (HY)

Der Pool „Gewässer“ umfasst Einträge und Transport von Stickstoff in anorganischer und organischer Form im Gewässersystem und wird in drei Sub-Pools gegliedert; Tabelle 10-1 gibt eine Übersicht der relevanten Stickstoffflüsse.

- Grundwasser (HY.GW)
- Oberflächengewässer (HY.SW)
- Küstengewässer (HY.CW).

Im Unterschied zu den übrigen Pools (mit Ausnahme des Pools „Atmosphäre“) werden alle wesentlichen N-Flüsse in der Hydrosphäre modellbasiert bzw. rechnerisch als Differenzgrößen ermittelt. Für diese Aufgabe wird das Modell MoRE (Modelling Regionalized Emissions; Fuchs et al. 2017a, 2017b; Morling et al. 2024) verwendet, das als Eintragsmodell den Stoffeintrag (u.a. Nährstoffe, Schwermetalle) in Oberflächengewässer über verschiedene Eintragspfade schätzt; die ersten Ansätze gehen auf Behrendt und Opitz (1999) zurück. MoRE unterscheidet zwischen punktförmigen Eintragsquellen (kommunale Kläranlagen, industrielle Direkteinleiter) und Eintragspfaden, die stark von diffusen Quellen geprägt sind (Erosion, Oberflächenabfluss, Drainagen, atmosphärische Depositionen, Regenwasserkanäle, Mischwasserüberläufe, Grundwasser sowie nicht angeschlossene Haushalte). Kleinste räumliche Betrachtungseinheit in MoRE sind die 2759 Analysegebiete (mittlere Flächengröße 135 km²), die nach hydrologischen und administrativen Kriterien abgegrenzt wurden (Fuchs et al. 2010). Die aggregierten Ergebnisse für die 2759 Analysegebiete entsprechen (annähernd) der Summe für Deutschland. In die MoRE-Modellergebnisse gehen gemessene Daten zum Wasserabfluss in Oberflächengewässern, im Boden und im Grundwasser sowie zur Konzentration von N-Verbindungen in Gewässern nur indirekt ein, indem diese Messwerte für die Kalibrierung und Validierung des MoRE-Modells herangezogen werden.

Für das nationale Stickstoff-Inventar wurden die MoRE-Ergebnisse für die Jahre 2016 bis 2018 (aktuellster verfügbare MoRE-Modellzeitraum) freundlicherweise von der MoRE-Arbeitsgruppe am Institut für Wasser und Umwelt des Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) zur Verfügung gestellt (Morling et al. 2024).

Tabelle 10-1: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Gewässer“^a.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
Sub-Pool Grundwasser (HY.GW)					
HS.MW	HY.GW	AG.MW-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Siedlungs- und Verkehrsflächen	NO ₃	10.1.1
AG.SM	HY.GW	AG.SM-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen	NO ₃	7.2.4
FS.FO	HY.GW	FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldflächen	NO ₃	8.1.4
FS.OL	HY.GW	FS.OL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO ₃	8.2.3
HY.GW	AT	HY.GW-AT-N2	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N ₂	10.1.2

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
HY.GW	HS.HB	HY.GW-AG.SM-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO ₃	10.1.2
HY.GW	AG.SM	HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit Beregnungswasser für die Landwirtschaft	NO ₃	7.2.2
HY.GW	HY.SW	HY.GW-HY.SW-	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit dem Übertritt von Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss	NO ₃	10.1.2

Sub-Pools Oberflächengewässer (HY.SW)

AT	HY.SW	AT-HY.SW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Oberflächengewässer	NH _y , NO _x	3.2.1
AG.SM	HY.SW	AG.SM-HY.SW-runoff	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer aus Landwirtschaftsflächen	NO ₃ N(org)	10.2.1
WS.WW	HY.SW	WS.WW-HY.SW-sewage	N-Eintrag in Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft	NH ₃ , NO ₃ N(org)	9.2.3
HY.GW	HY.SW	HY.GW-HY.SW-discharge	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit dem Übertritt von Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss	NO ₃	10.1.2
RW	HY.SW	RW-HY.SW-discharge	N(ges)-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss (von Oberliegern)	NO ₃ N(ges)	10.2.3
HY.SW	AT	HY.SW-AT-N2	Denitrifikation (Retention) in Oberflächengewässern	N ₂	10.2.2
HY.SW	RW	HY.SW-RW-discharge	N(ges)-Fracht im grenzüberschreitenden Abfluss (Abgabe an Unterlieger)	NO ₃ , N(ges)	10.2.3
HY.SW	MP.FP	HY.SW-MP.FP-fish	Binnenfischerei	N(org)	7.1.2

Sub-Pool Küstengewässer (HY.CW)

AT	HY.CW	AT-HY.CW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Küstengewässer	NH _y , NO _x	3.2.1
HY.SW	HY.CW	HY.SW-HY.CW-discharge	N(ges)-Fracht im Zufluss in die Küstemeere	NO ₃ , N(org)	10.2.3
HY.CW	MP.FP	HY.CW-MP.FP-fish	Meeresfischerei (Anlandungen)	N(org)	10.2.4

^a N-Retention in Küstengewässern wird nicht berücksichtigt.

Anmerkungen: Der Transport von Stickstoff in Gewässern in partikulärer Form, das heißt gebunden an Sedimente, wird in MoRE aufgrund der unzureichenden Datenbasis nicht betrachtet. Weiterhin wird in der hier durchgeführten Untersuchung der Import/Export von Stickstoff zwischen den Küstenmeeren (als Systemgrenzen des nationalen N-Inventars) und dem offenen Meer nicht aufgeführt, da diese N-Flüsse für die Bewertung der nationalen N_r-Bilanz im Regelfall ohne Bedeutung sind. Die Produktion von Fisch in Aquakulturen (dazu zählt auch die Teichwirtschaft) wird dem Pool „Landwirtschaft“, Sub-Pool „Tierproduktion“ zugerechnet.

10.1 Grundwasser (HY.GW)

10.1.1 Nitratauswaschung (AG.XX-HY.GW-leach, FS.XX-HY.GW-leach)

Die Nitratauswaschung aus dem Boden wird für das nationale N-Inventar für die Flächennutzungen Landwirtschaft, Wald und semi-natürliche Flächen sowie Siedlungs- und Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Ansätzen ermittelt.

Für die Landwirtschaftsflächen wird eine Nitratauswaschung ins Grundwasser (unterhalb der Wurzelzone) von 804,9 kt N a⁻¹ als Differenzgröße (Residualwert) gem. Kap. 7.2.4 (Tabelle 7-6) abgeschätzt. Bezogen auf eine mittlere Sickerwasserrate von rund 220 mm a⁻¹ aus Landwirtschaftsflächen in Deutschland entspricht diese Auswaschungsmenge rechnerisch einer potenziellen Nitrat-Konzentration im Sickerwasser (unterhalb der Wurzelzone) von durchschnittlich 97 mg NO₃ l⁻¹.

Für die Nitratauswaschung aus Waldflächen und semi-natürlichen Flächen werden die entsprechenden Schätzungen aus Literaturangaben für diese beiden Sub-Pools aus Kap. 8.1.4 und 8.2.3 übernommen (Anmerkung: Nitratauswaschung aus Feuchtgebieten wird nicht berücksichtigt).

Die Nitratauswaschung aus Siedlungs- und Verkehrsflächen wird mit MORE modelliert. Dafür wird die urbane nicht versiegelte Fläche von 21.253 km² in Deutschland mit der NO_x- und NH_y-Depositionsrates von zus. 19,7 kg ha⁻¹ a⁻¹ (Tabelle 3-6) auf diesen Flächen beaufschlagt. In der Summe dieser vier Quellen ergibt sich eine N-Nitratauswaschung in das Grundwasser von insgesamt rund 910 kt N a⁻¹ (Tabelle 10-2).

Tabelle 10-2: N-Flüsse mit der Nitratauswaschung in den Sub-Pool „Grundwasser“.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
HS.MW	HY.GW	AG.MW-HY.GW-leach	Nitratauswaschung aus Siedlungs- und Verkehrsflächen	NO ₃	41,8
AG.SM	HY.GW	AG.SM-HY.GW-leach	Nitratauswaschung aus Landwirtschaftsflächen)	NO ₃	804,9
FS.FO	HY.GW	FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung aus Waldflächen	NO ₃	61,0
FS.OL	HY.GW	FS.OL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung aus semi-natürlichen Flächen	NO ₃	2,0
Summe Nitratauswaschung aus der Landnutzung					909,7

Anmerkung: Die Flächenangaben der verschiedenen Landnutzungsklassen (insbesondere der Landwirtschaftsfläche) im Modell MoRE sowie deren Zusammenfassung zu Landnutzungskategorien weichen geringfügig ab von den Angaben der Tabelle 3-2, die unter anderem der Berechnung der atmosphärischen Deposition zugrunde liegen. Aus Gründen der methodischen Konsistenz mit den übrigen MoRE-Modellergebnissen, die dem Pool „Hydrologie“ zugrunde liegen, wird jedoch darauf verzichtet, die unterschiedlichen Ansätze zur Berechnung der Nitratauswaschung für verschiedene Landnutzungen zu vereinheitlichen. Für die Interpretation und die weitere Verwendung der Ergebnisse sind diese Unterschiede ohne Belang.

10.1.2 N-Flüsse aus dem Grundwasser (HY.GW-AT-N2, HY.GW-AG.SM-abstr, HY.GW-AG.SM-irrig, HY.GW-HY.SW-discharge)

Die N-Flüsse aus dem Grundwasser umfassen den Eintrag in Oberflächengewässer über die beiden Abflusskomponenten Zwischenabfluss und grundwasserbürtiger Abfluss sowie die Förderung von Grundwasser für die Trinkwasserversorgung und für die Bewässerung (Beregnung) von Landwirtschaftsflächen.

Der N-Eintrag in Oberflächengewässer über den Zwischenabfluss wird in MoRE als Produkt aus der Konzentration im Zwischenabfluss und dem Abfluss über Zwischenabfluss berechnet; für die Jahre 2016 - 2018 ergibt sich im Mittel 116,8 kt N a⁻¹ Eintrag über den Zwischenabfluss in Oberflächengewässer.

Die Berechnung des N-Eintrags mit dem grundwasserbürtigen Abfluss erfolgt als Produkt aus Grundwasserabfluss und mittlerer N-Konzentrationen im Grundwasser pro Analysegebiet. Für die Konzentrationen im Grundwasser wurde auf die Ergebnisse von Knoll et al. (2020) zurückgegriffen (aktuellere Daten liegen nicht vor). Für den Zeitraum 2016 - 2018 wird ein mittlerer Eintrag über den Grundwasserabfluss von 136,2 kt N a⁻¹ für Deutschland berechnet. In der Summe von Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss ergibt sich ein Eintrag von 253,0 kt N a⁻¹ aus dem Grundwasser in Oberflächengewässer.

Für die Kalkulation der Nitrarentnahme mit der Förderung von Trinkwasser wird eine jährliche Trinkwasserentnahme aus dem Grundwasser von 3.264 Mio m³ a⁻¹ angesetzt (DESTATIS 2022c, 2022d; Mittel 2016/2019). Als Nitratgehalt im Grundwasser wird für die Schätzung dieses N-Flusses (HY.GW-AG.SM-abstr) ein mittlerer Wert von 25 mg NO₃ l⁻¹ entsprechend 5,6 mg N l⁻¹ zugrunde gelegt, womit 18,3 kt N a⁻¹ für die NO₃-Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser berechnet wird. Die Nitrarentnahme mit der Förderung von Grundwasser für die Feldberegnung in der Landwirtschaft (HY.GW-AG.SM-irrig) von 2,5 kt N a⁻¹ wird in Kap. 7.2.2 erläutert.

Die Denitrifikation im durchwurzelten Bodenbereich, in der ungesättigten Zone und im Grundwasser insgesamt wird schließlich als Differenzgröße berechnet, ausgehend von der Nitratauswaschung (unterhalb der Wurzelzone) in das Grundwasser aus den verschiedenen Landnutzungen von zus. 909,7 kt N a⁻¹ (Tabelle 10-2). Von dieser N-Zufuhr in das Grundwasser werden die bekannten N-Abflüsse mit dem N-Übertritt aus dem Grundwasser in Oberflächengewässer von 253,2 kt N a⁻¹, der Entnahme von Trinkwasser (18,3 kt N a⁻¹) und mit dem Beregnungswasser (2,6 kt N a⁻¹) abgezogen. Unter der Annahme (Vereinfachung), dass keine N-Vorratsänderung im Grundwasser stattfindet (d.h., dass die NO₃-Konzentration im Mittel aller Grundwasserkörper in Deutschland konstant ist), bleibt als einziger weiterer N-Austrag aus dem Sub-Pool Grundwasser die Denitrifikation, für die sich nach diesem Vorgehen 635,9 kt N a⁻¹ berechnet. Zur Einordnung der Plausibilität dieses Wertes s. a. Kap. 7.5.1. In Tabelle 10-3 sind die N-Flüsse aus dem Grundwasser zusammengestellt.

Tabelle 10-3: Ausgehende N-Flüsse aus dem Sub-Pool „Grundwasser“ (Mittel 2016 – 2018); kursiv: als Differenz berechneter N-Fluss.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Summe Nitratauswaschung aus der Landnutzung					909,7
HY.GW	AT	HY.GW-HY.SW-discharge	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit dem Übertritt von Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss	NO ₃	- 253,0
HY.GW	HS.HB	HY.GW-AG.SM-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO ₃	- 18,3
HY.GW	AG.SM	HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit Beregnungswasser für die Landwirtschaft	NO ₃	- 2,5
Zwischensumme Nitrat-Flüsse aus dem Grundwasser					- 273,8
HY.GW	HY.SW	HY.GW-AT-N2	<i>Denitrifikation im durchwurzelten Bodenbereich, in der ungesättigten Zone und im Grundwasser</i>	N ₂	- 635,9

10.2 Oberflächengewässer (HY.SW) und Küstengewässer (HY.CW)

Aufgrund der geringen Anzahl von separaten N-Flüssen im Sub-Pool „Küstengewässer“ und der engen Verzahnung mit dem Sub-Pool „Oberflächengewässer“ werden beide in einem Kapitel zusammen behandelt.

10.2.1 Eintrag in Oberflächengewässer aus Landwirtschaftsflächen (AG.SM-HY.SW-runoff)

N-Einträge aus dem Pool „Landwirtschaft“ in Oberflächengewässer finden über drei Pfade statt: mit Oberflächenabfluss, Bodenerosion und über Drainagen. Die drei Pfade werden in MoRE separat modelliert, Tabelle 10-4 zeigt die Ergebnisse. Für die Darstellung der N-Flüsse werden die drei Pfade zusammengefasst zum N-Eintrag mit lateralem Stofftransport.

Tabelle 10-4: Stickstoff-Einträge in Oberflächengewässer aus der Landwirtschaft über lateralen Stofftransport nach MoRE-Modellierung, Mittel 2016 – 2018 (Morling et al. 2024).

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
AG.SM-HY.SW-runoff	Oberflächenabfluss (Runoff)	NO ₃	17,2
	Erosion	N(org)	4,0
	Dränageausfluss	NO ₃	64,5
Summe Einträge Runoff, Erosion und Drainage			85,7

10.2.2 Denitrifikation (Retention) in Oberflächengewässern und Küstengewässern (HY.SW-AT-N2, HY.CW-AT-N2)

Unter der Retention von Stickstoff in Oberflächengewässern werden alle Transformations- und Verlustprozesse (wie u.a. Nitrifikation, Denitrifikation, Pflanzenaufnahme, Sedimentation) verstanden, die zu einer Verminderung der in das Gewässersystem eingetragenen Stickstoffmenge führen. Für Stickstoff ist der dominante Retentionsprozess die Denitrifikation, so dass in der

vorliegenden Untersuchung die gesamte N-Retention vereinfachend als Denitrifikation betrachtet wird. Die Denitrifikation von Stickstoff in Oberflächengewässern wird als Differenz berechnet aus den gesamten Einträgen in Oberflächengewässer im Bundesgebiet nach Modell MoRE von insgesamt 454,0 kt N a⁻¹ (atmosphärische Deposition, Einträge aus Siedlungswasserwirtschaft, Landwirtschaft und Grundwasser) abzüglich der N-Fracht im Abfluss aus Deutschland (in Unterlieger und die Küstenmeere) von 381,5 kt N a⁻¹ (s. Tabelle 10-5) zu 72,5 kt N a⁻¹ ermittelt.

Zur Abschätzung der Denitrifikation in den Küstenmeeren liegen keine Daten vor, deswegen wird dieser N-Fluss im vorliegenden Bericht nicht weiter betrachtet.

10.2.3 Grenzüberschr. Zu- und Abflüsse (RW-HY.SW-discharge, HY.SW-RW-discharge)

Die N(ges)-Gewässerfrachten in den Fließgewässern im grenzüberschreitenden Zufluss (von Oberliegern), im grenzüberschreitenden Abfluss (Abgabe an Unterlieger) sowie bei der Mündung in Nordsee bzw. Ostsee wurden für die größeren Flüsse (Rhein, Donau, Elbe, Weser) aus den im Gewässer gemessenen Abflüssen und Stoffkonzentrationen ermittelt (Tabelle 10-5). Dabei wurden Abflussdaten der Länder sowie der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung verwendet (Bezug über die Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG). Bei den Gütemessstellen handelt es sich um die Daten des LAWA-Überblicksmessnetzes (jährlich beim UBA zusammengeführt) einschließlich weiterer ausgewählter Messstellen der Länder. Zur Berechnung der Gewässerfrachten aus den Messdaten wurde die BfG-Methode verwendet (BfG 2013). Die ursprüngliche Gleichung wurde mit einem Korrekturfaktor angepasst, mit denen die unterschiedliche Lage von Abflusspegeln und Gütemessstellen berücksichtigt wird. Für die kleineren Flüsse im Küstenbereich, die unmittelbar in Nordsee bzw. Ostsee münden, fehlen Abfluss- und Gütemessstellen; für diese Flussgebiete wurden die Gewässerfrachten mit Annahme einer flächenspezifischen Gewässerfracht von 0,8 kt N km⁻² a⁻¹ geschätzt. In der Tabelle 10-5 sind die Ergebnisse für die Flussgebietseinheiten zusammengefasst.

Tabelle 10-5: N-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss und Abfluss oberirdischer Gewässer, Mittel 2015 – 2020.

Flussgebietseinheit	Quelle od. Messstelle Oberlieger / Mündung oder Messstelle Unterlieger	N(ges) im Zufluss ^a nach DE kt N a ⁻¹	N(ges) im Abfluss ^b	
			An Unterlieger kt N a ⁻¹	In Nordsee und Ostsee kt N a ⁻¹
Donau	DE / Schwarzes Meer (Jochenstein)		76,3	
Eider	DE / Nordsee			4,0
Elbe	Schmilka (CZ) Nordsee (Seemannshöft)	23,7		59,5
Ems	DE / Nordsee			11,7
Maas	DE / NL		3,3	
Oder	Polen / Ostsee			2,9 ^c
Rhein	Öhringen (CH) Kleve-Bimmen (NL)	11,1	175,8	
Schlei/Trave	DE / Ostsee			5,1
Warnow/Peene	DE / Ostsee			11,5

Flussgebietseinheit	Quelle od. Messstelle Oberlieger / Mündung oder Messstelle Unterlieger	N(ges) im Zufluss ^a nach DE kt N a ⁻¹	N(ges) im Abfluss ^b	
			An Unterlieger kt N a ⁻¹	In Nordsee und Ostsee kt N a ⁻¹
Weser	DE/ Nordsee (Bremen)			31,4
Summe		34,8	255,4	126,1

^a N(ges)-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss (von Oberliegern).

^b N(ges)-Fracht im grenzüberschreitenden Abfluss (Abgabe an Unterlieger oder Einleitung in Nordsee bzw. Ostsee).

^c Für die Oder als Grenzfluss zwischen Polen und Deutschland wurde eine abweichende Vorgehensweise zur Ableitung der Gewässerfracht aus dem Bundesgebiet vorgenommen.

Der Saldo der N-Fracht in den Zuflüssen von Oberliegern (34,8 kt N a⁻¹) und im Abfluss aus dem Bundesgebiet in die Küstenmeere bzw. zu den Unterliegern (zusammen 381,5 kt N a⁻¹), das heißt der Zuwachs der N(ges)-Fracht in Oberflächengewässer im Verlauf ihrer Passage durch Deutschland beträgt 346,7 kt N a⁻¹. Die N(ges)-Einleitungen unmittelbar in Nordsee und Ostsee aus dem Bundesgebiet mit den Flüssen (gemessene Frachten) sowie aus den Küstengebieten (N-Frachten modelliert) betragen 126,1 kt N a⁻¹.

10.2.4 Meeresfischerei (HY.CW-MP.FP-fish)

Im Statistischen Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Versorgung mit Fischen (BMEL 2021; Tab. 193), Mittel 2015 - 2020, wird die Menge der Anlandungen der deutschen Fischerei im Inland und Ausland ausgewiesen:

Küsten- und Hochseefischerei: 270.033 t Fanggewicht * 2,8 % N (ECE 2013, Annex 6, Table 12) = 7,6 kt N a⁻¹.

10.3 Zusammenfassung der N-Flüsse Gewässer (HY)

In Tabelle 10-6 sind die N-Flüsse des Pools „Gewässer“ zusammengefasst.

Tabelle 10-6: Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Gewässer“, Mittel 2015 – 2020.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Sub-Pool Grundwasser (HY.GW)					
HS.MW	HY.GW	AG.MW-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Siedlungs- und Verkehrsflächen	NO ₃	41,8
AG.SM	HY.GW	AG.SM-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen	NO ₃	804,9
FS.FO	HY.GW	FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldflächen	NO ₃	61,0
FS.WL	HY.GW	FS.WL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO ₃	2,0
HY.GW	AT	HY.GW-AT-N2	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N ₂	635,9

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
HY.GW	HS.HB	HY.GW-AG.SM-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO ₃	18,3
HY.GW	AG.SM	HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit Beregnungswasser für die Landwirtschaft	NO ₃	2,5
HY.GW	HY.SW	HY.GW-HY.SW-	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit dem Übertritt von Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss	NO ₃	253,0

Sub-Pool Oberflächengewässer (HY.SW)

AT	HY.SW	AT-HY.SW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Oberflächengewässer	NH _y NO _x	5,8 2,6
AG.SM	HY.SW	AG.SM-HY.SW-runoff	N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen	NO ₃ N(org)	79,3 6,2
WS.WW	HY.SW	WS.WW-HY.SW-sewage	N(ges)-Eintrag in Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft	N(ges)	104,5
HY.GW	HY.SW	HY.GW-HY.SW-	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit dem Übertritt von Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss	NO ₃	253,0
RW	HY.SW	RW-HY.SW-discharge	N(ges)-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss (von Oberliegern)	N(ges)	34,8
HY.SW	AT	HY.SW-AT-N2	Denitrifikation (Retention) in Oberflächengewässern	N ₂	85,7
HY.SW	RW	HY.SW-RW-discharge	N(ges)-Fracht im grenzüberschreitenden Abfluss (Abgabe an Unterlieger)	N(ges)	255,4
HY.SW	HY.CW	HY.SW-HY.CW-discharge	N(ges)-Fracht im Abfluss in die Küstenmeere	N(ges)	126,1

Sub-Pool Küstengewässer (HY.CW)

AT	HY.CW	AT-HY.CW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Küstengewässer	NH _y NO _x	3,2 1,4
HY.SW	HY.CW	HY.SW-HY.CW-discharge	N(ges)-Fracht im Zufluss in die Küstenmeere	N(ges)	126,1
HY.CW	MP.FP	HY.CW-MP.FP-fish	Meeresfischerei (Anlandungen)	N(org)	7,6

10.4 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Gewässer

In Tabelle 10-7 sind Zuflüsse und Abflüsse für den Umsatzraum „Gewässer“ dargestellt, die Differenz beträgt nur rund 12 kt N a⁻¹. Die Denitrifikation im Grundwasserbereich ist dabei als Residualgröße mit der Prämisse berechnet worden, dass die Stickstoffmenge in den Grundwasservorkommen über die Zeit konstant ist (s. Kap. 10.1.2). Daraus ergibt sich dann zwangsläufig eine (nahezu) ausgeglichene Bilanz für den Umsatzraum Hydrosphäre (unter Ausgrenzung der Küstenmeere). In Anbetracht der völlig unzureichenden Kenntnisse über die tatsächliche Höhe der Denitrifikation in der Wurzelzone (von Landwirtschaftsflächen), in der ungesättigten Zone, in

den Aquiferen und schließlich in den Oberflächengewässern sind die Angaben in Tabelle 10-7 weniger als Schätzwerte für die reale Situation zu interpretieren sondern zeigen vielmehr auf, wie groß die Denitrifikation – als einziger natürlicher Prozess, mit dem N_r in molekularen N_2 überführt wird – sein müsste, damit keine Anreicherung von N_r (vorrangig in Form von NO_3) in der Hydrosphäre stattfindet.

Tabelle 10-7: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Pool „Gewässer“, Mittel 2015 – 2020; kursiv: geschätzte bzw. als Differenz berechnete N-Flüsse.

Zufluss (N_r -Quellen)	kt N a ⁻¹	Abfluss (N_r -Verwendung)	t N a ⁻¹
Atmosphärische Deposition	13,0	NO_3 -Entnahme mit Wasserförderung	- 20,8
NO_3 -Eintrag aus Landwirtschaftsflächen über Runoff, Erosion und Drainageabfluss	85,5	<i>Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser</i>	- 635,9
Eintrag aus Kläranlagen und dem Kanalisationssystem	104,5	<i>Denitrifikation (Retention) in Oberflächengewässern</i>	- 85,7
<i>Nitratauswaschung (unterhalb Wurzelzone)</i>	909,7	Meeresfischerei	- 7,6
Fracht im Zufluss von Oberliegern	34,8	Fracht im Abfluss zu Unterliegern und in die Nordsee und Ostsee	- 381,5
Summe Zuflüsse	1.147,5	Summe Abflüsse	- 1.131,5
Differenz: 16,0			

11 Grenzüberschreitende N-Flüsse (RW)

Die „grenzüberschreitenden N-Flüsse“ umfassen die N_r -Importe nach Deutschland und N_r -Exporte aus Deutschland, d.h. die N-Flüsse mit Ursprung oder Verbleib außerhalb des Bundesgebietes. Die Ermittlung der Importe und Exporte sowie deren Unsicherheiten erfolgt im Zusammenhang mit den einzelnen Pools, in den Tabelle 11-1 und Tabelle 11-2 sind die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 11-1: Importe und Exporte (eingehende und ausgehende N-Flüsse) im Pool „Grenzüberschreitende N-Flüsse“, Mittel 2015 – 2020.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung ^a	Kapitel	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
RW	AT	RW-AT-gasN	Atmosphärischer Transport von gasförmigen N-Verbindungen	3.5	NH _y , NO _x	97,6 103,3
RW	EF.EC	RW-EF.EC-fuel	Import von Energieträgern	4.1.1	N(org)	800,6
RW	MP.FP	RW-MP.FP-food	Einfuhr der Ernährungswirtschaft ^a	5.1.6	N(org)	905,9
RW	MP.NC	RW-MP.NC-prod	Import N-haltige chemische Produkte	5.2.4	NH ₃ ,NO ₃ , N(org)	2247,3
RW	MP.OP	RW-MP.OP-prod	Import Konsumgüterindustrie	5.3	N(org)	258,4
RW	AG.SM	RW-AG.SM-ma-nure	Import von Wirtschaftsdünger ^a	7.2.1	N(org)	11,7
RW	FS.FO	RW-FS.FO-wood	Import von Rohholz	8.1.5	N(org)	4,4
RW	WS.SW	RW-WS.SW-waste	Import von Abfallstoffen	9.1.3	N(org)	10,9
RW	HY.SW	RW-HY.SW-discharge	N-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss	10.2.3	NO ₃ , N(org)	34,8
Summe Importe						4.474,9
AT	RW	AT-RW-gasN	Atmosphärischer Transport von gasförmigen N-Verbindungen	3.5	NH _y , NO _x	253,7 243,2
EF.EC	RW	EF.EC-RW-fuel	Export v. Energieträgern und Mineralölprodukten	4.1.1	N(org)	58,0
MP.FP	RW	MP.FP-RW-food	Ausfuhr der Ernährungswirtschaft ^a	5.1.6	N(org)	688,2
MP.NC	RW	MP.NC-RW-prod	Export N-haltige chemische Produkte	5.2.4	NH ₃ ,NO ₃ , N(org)	1756,8
MP.OP	RW	MP.OP-RW-prod	Export Konsumgüterindustrie	5.3	N(org)	185,1
FS.FO	RW	FS.FO-RW-wood	Export von Rohholz	8.1.5	N(org)	3,7
WS.SW	RW	WS.SW-RW-waste	Export von Abfallstoffen	9.1.3	N(org)	5,7
HY.SW	RW	HY.SW-RW-load	N-Fracht im grenzüberschreitenden Abfluss	10.2.3	NO ₃ , N(org)	255,4
Summe Exporte						3.449,7

^a Anmerkung: Mit Ausnahme des Imports von Wirtschaftsdüngern werden die Importe und Exporte der Landwirtschaft im Pool „Industrielle Produktion“, Sub-Pool „Ernährungswirtschaft“ erfasst.

In Tabelle 11-2 sind die grenzüberschreitenden N-Flüsse für die wichtigsten Pools bzw. Sub-Pools zusammengefasst.

Tabelle 11-2: Saldierung der Importe und Exporte von reaktivem Stickstoff nach Pools bzw. Sub-pools, Mittel 2015 – 2020.

Pool bzw. Sub-Pool ^a		N-Spezies	Import ^b kt N a ⁻¹	Export ^b kt N a ⁻¹	Saldo ^b kt N a ⁻¹
AT	Atmosphäre	NH _y , NO _x	201	- 497	- 296
EF.EC	Energiewirtschaft ^c	N(org)	(801) ^c	(58) ^c	(743) ^c
MP.FP	Nahrungs- und Futtermittelindustrie ^d - darunter: Futtermittel	N(org)	918 ^d (382) ^e	- 688	229 382 ^e
MP.NC	Chemische Industrie - darunter: Düngemittel	N(org)	2.247 971	- 1.757 -663	491 309
MP.OP, WS.SW	Konsumgüterindustrie ^f , Abfallwirtschaft	N(org)	274 ^f	- 195 ^f	79
HY.SW	Oberflächengewässer ^g	NO ₃ , N(org)	35	- 255	- 221 ^g
Summen^c und Saldo (ohne Energiewirtschaft)			3.674^c	- 3.392^c	283^c

^a Nicht aufgeführte Pools bzw. Subpools: keine oder nur geringfügige Importe und Exporte; Einfuhr in und Ausfuhr aus der Landwirtschaft laufen über den Pool „Industrielle Produktion“, Sub-Pool „Ernährungswirtschaft“.

^b Zur besseren Übersicht sind die N-Flüsse in dieser Tabelle auf ganze Zahlen gerundet; negativer Wert: Export bzw. Export-Überschuss; Differenzen zu Null sind rundungsbedingt.

^c Import und Export der Energiewirtschaft in der Summation nicht berücksichtigt, da bei der Verbrennung von Energieträgern (außer verhältnismäßig geringen Mengen von NO_x und N₂O) nach Stand der Kenntnis kein N_r in die Umwelt gelangt.

^d Einschließlich Import von Wirtschaftsdüngern.

^e Export nicht aufgeführt, statistische Angabe erfolgt bereits als Netto-Import (aus der BMEL Statistik übernommen).

^f Einschließlich Import bzw. Export von Rohholz.

^g Der N-Eintrag mit Oberflächengewässern in die Nordsee und Ostsee wird nicht als Export betrachtet.

Im Import-Export-Saldo aller Pools zusammen erzielt Deutschland einen vergleichsweise geringen Import-Überschuss von 283 kt N a⁻¹ (ohne Berücksichtigung des N-Fluss mit Energieträgern, siehe Tabelle 11-2, Fußnote c). Dieser Saldo setzt sich allerdings aus zwei gegensätzlichen Komponenten zusammen. Auf der einen Seite „exportiert“ Deutschland über den atmosphärischen Transport von gasförmigen N_r-Verbindungen sowie mit dem N-Abfluss in den Flüssen an Unterlieger mit (netto) -517 kt N a⁻¹ eine beträchtliche Menge an reaktivem Stickstoff (NO₃, NH₃, NO_x) in die Hydrosphäre und die Atmosphäre seiner Nachbarländer. Zieht man, abweichend von ECE (2013) und Tabelle 11-2, die Systemgrenze der NNB bereits an der Küste bzw. an den Flussmündungen, das heißt betrachtet den Abfluss von 126 kt N a⁻¹ in die Nord- und Ostsee ebenfalls als Export, dann beträgt der Netto-Export aus dem Bundesgebiet über Atmosphäre und Hydrosphäre insgesamt -643 kt N a⁻¹. Auf der anderen Seite steht mit dem Außenhandel von Wirtschaftsgütern der Nahrungs- und Futtermittelindustrie sowie der chemischen Industrie (Energieträger ausgeklammert) ein Netto-Import von 799 kt N a⁻¹; es besteht somit ein leichter Import-Überschuss.

Der Pool „Landwirtschaft“ ist in Tabelle 11-2 nicht aufgeführt, da gemäß der Systematik des NNB (ECE 2013) alle grenzüberschreitenden N-Flüsse in und aus der Landwirtschaft über die Sub-Pools „Nahrungs- und Futtermittelindustrie“ bzw. „Chemische Industrie“ erfasst werden. Die

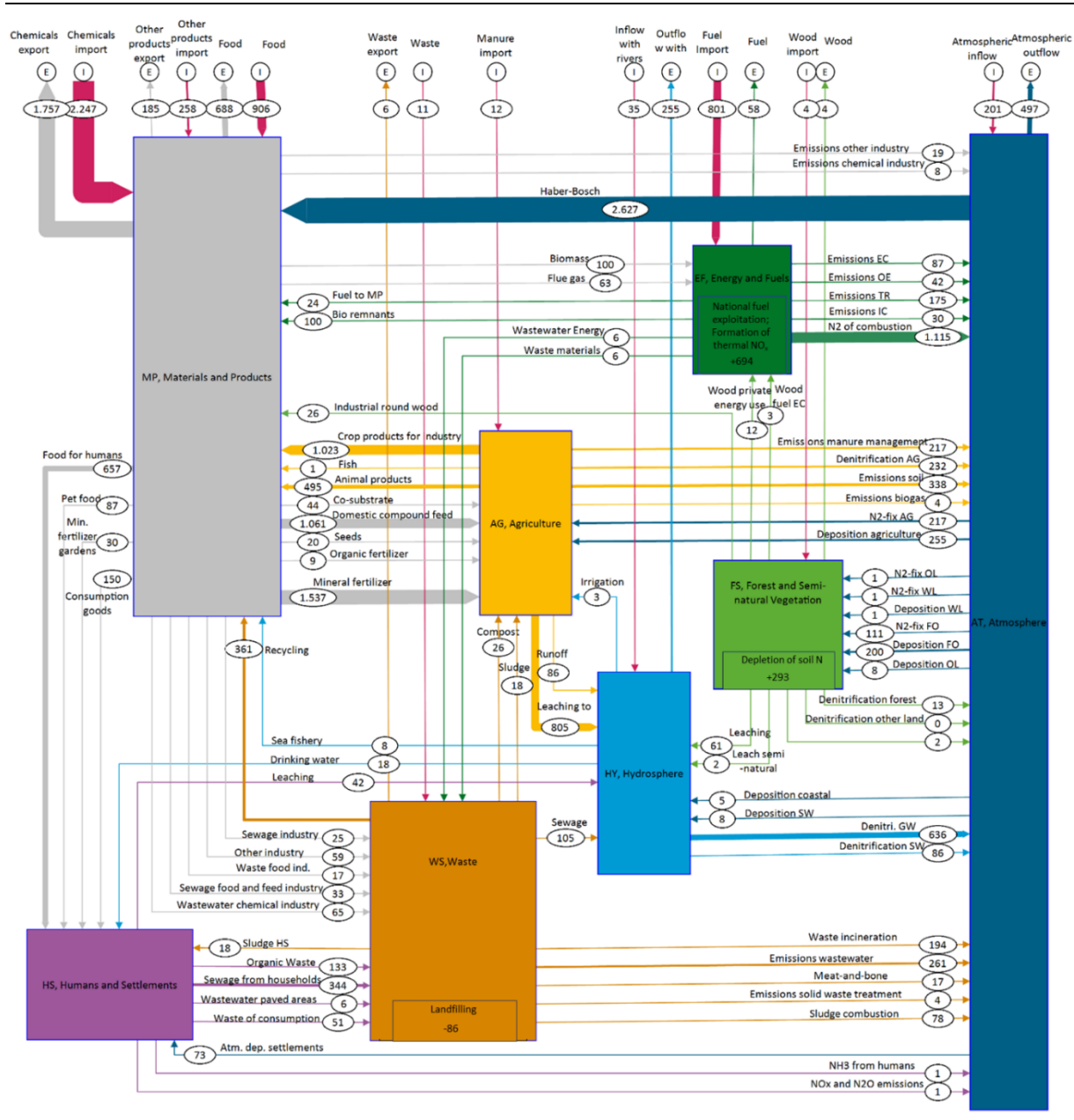
N_r-Flüsse mit dem Außenhandel Deutschlands haben allerdings zu einem wesentlichen Teil ihren Endverbleib in der Landwirtschaft: In der Ernährungsindustrie entfallen 42 % der N_r-Netto-Importmenge auf Futtermittel, im Außenhandel mit Erzeugnissen der Chemie-Industrie entfallen 43 % der N_r-Importmenge und 38 % der N_r-Exportmenge auf Mineraldünger.

In Bezug auf den Import-Export-Saldo der Nahrungs- und Futtermittelindustrie ist darauf hinzuweisen, dass die Landwirtschaft zwar einen Futtermittelimport von 382 kt N a⁻¹ aufweist, was rund 19 % der Gesamtmenge an Stickstoff (respektive Rohprotein) in den insgesamt eingesetzten Futtermitteln entspricht. Auf der anderen Seite ist Deutschland aber auch ein relevanter Exporteur von unverarbeiteten und verarbeiteten Agrarprodukten (Getreide, Fleisch, Milchprodukte), so dass mit Lebensmitteln und Futtermitteln im Saldo nur ein vergleichsweise geringer Import-Überschuss von 229 kt N a⁻¹ auftritt.

12 Darstellung der N-Flüsse mit STAN

Die im vorliegenden Bericht vorgestellten Pools, Sub-Pools und N-Flüsse wurden mit dem Stoffflussprogramm STAN vers. 2.7.101 (Material Flow Analysis, TU Wien, www.stan2web.net/; z.T. verändert) dargestellt. Abbildung 12-1 zeigt das Gesamtsystem des nationalen N-Inventars mit den acht Pools sowie den N-Flüssen, die zwischen den Pools fließen. Grenzüberschreitende N-Flüsse sind als Flüsse über die Systemgrenze hinaus dargestellt.

Abbildung 12-1: Stickstoff-Pools und N-Flüsse (in kt N a⁻¹, Mittel 2015 – 2020) des nationalen N-Inventars Deutschland.



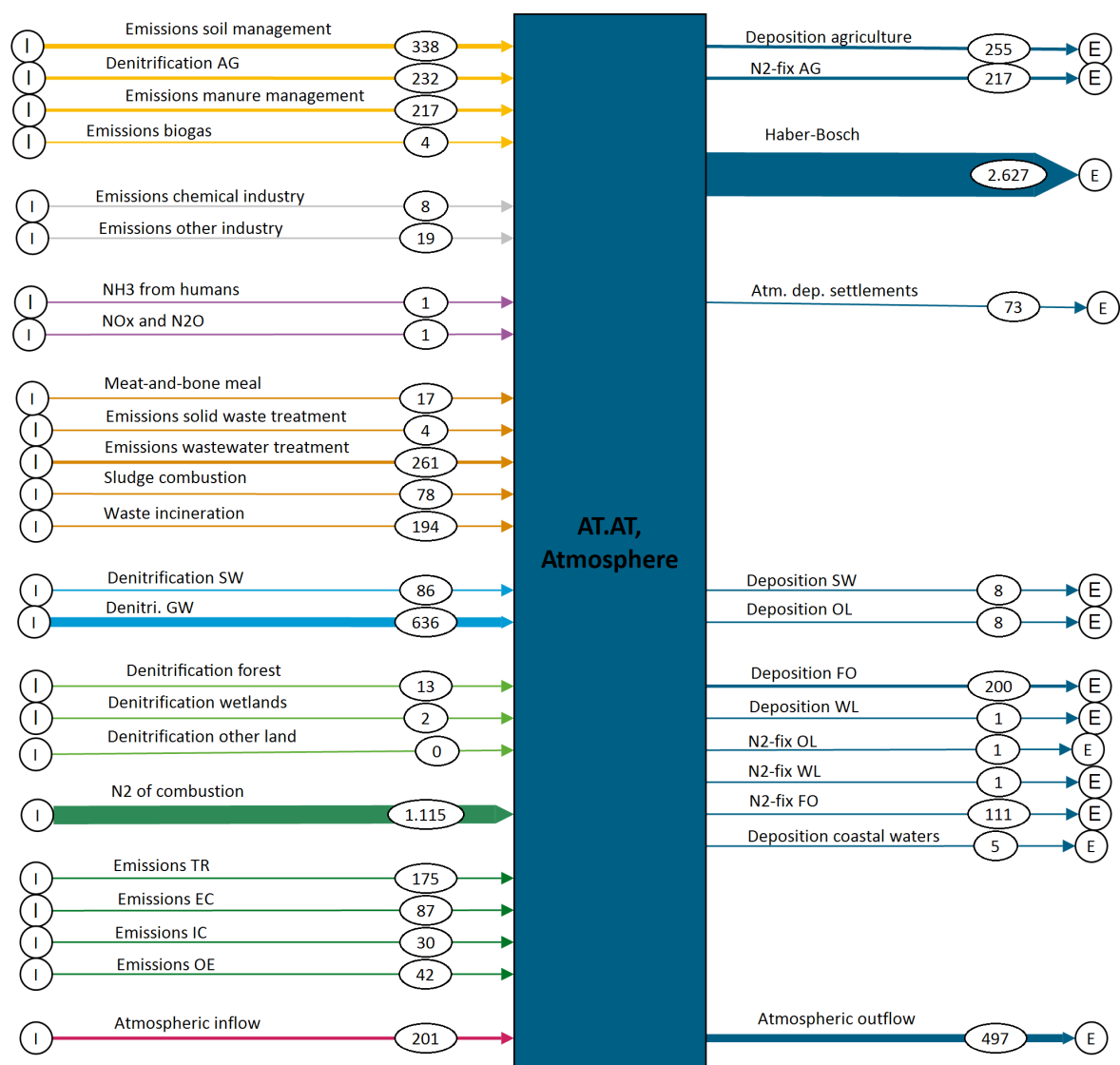
Nationales N-Inventar mit den acht Pools „Atmosphäre“ (AT, Atmosphere), „Energiewirtschaft und Verkehr“ (EF, Energy and Fuels), „Industrielle Produktion“ (MP, Materials and Products), „Ernährung und Konsum“ (HS, Humans and Settlements), „Landwirtschaft“ (AG, Agriculture), „Wald und semi-natürliche Flächen“ (FS, Forest and Semi-natural Vegetation), „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“ (WS, Waste) und „Gewässer“ (HY, Hydrosphere), den N-Flüssen (in kt N a⁻¹) zwischen den Pools und den grenzüberschreitenden N-Flüssen („I“: Import; „E“: Export). Die Breite der Flüsse ist proportional zur

Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht Kap. 2 bis 11. Im N-Flussschema sind einige Quellen und Senken nicht dargestellt, unter anderem die „Erzeugung“ von 503 kt Nr a⁻¹ mit der Inlandsförderung von Braunkohle. Werte innerhalb der Rahmen der Pools: Lageränderungen ("+" = Source, "-" = Sink).

Quelle: Eigene Darstellung; Grafik: STAN (TU Wien).

Die folgende Abbildung 12-2 bis Abbildung 12-9 zeigen die acht in den Kapiteln 3 bis 10 beschriebenen Pools und deren Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen separat.

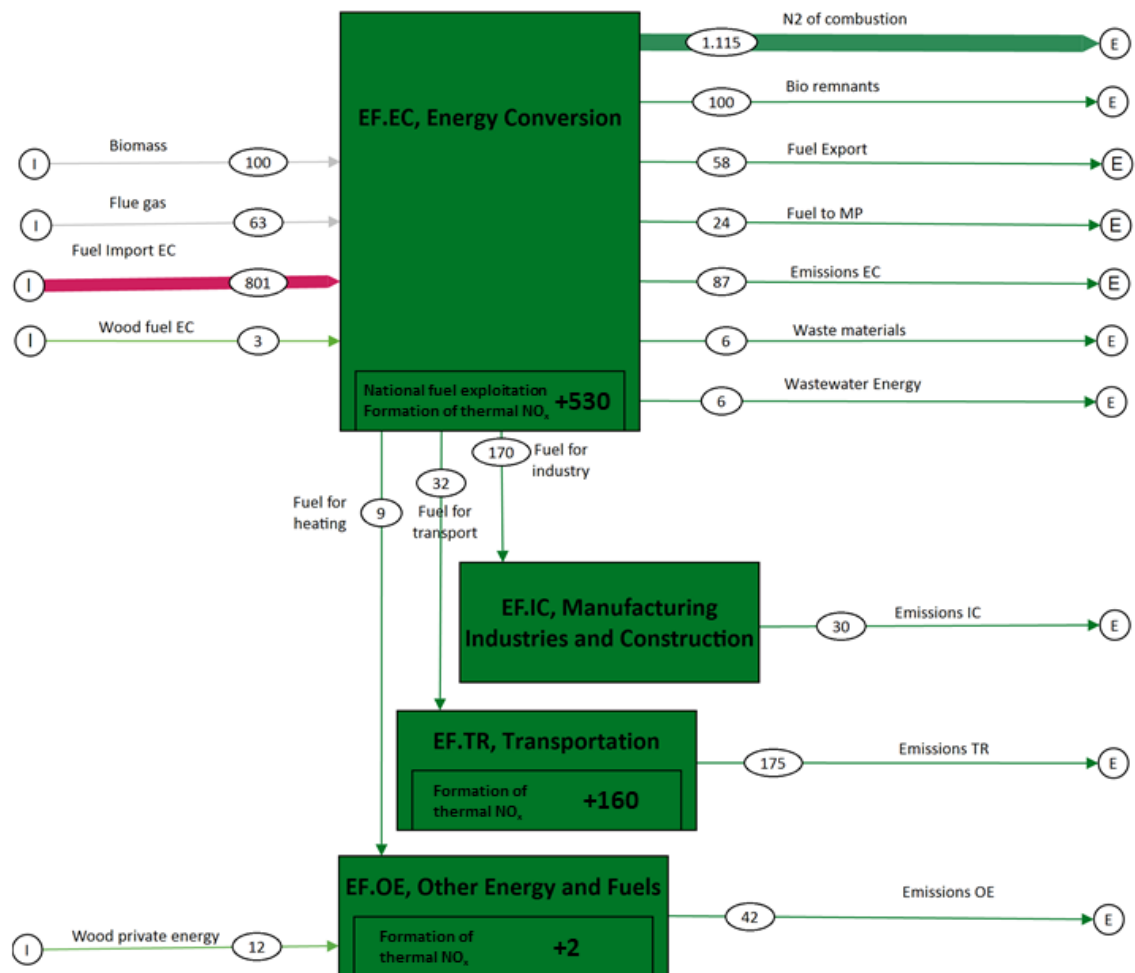
Abbildung 12-2: Pool „Atmosphäre“ (AT, Atmosphere) mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2015 – 2020).



Pool „Atmosphäre“ (AT, Atmosphere) mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen gemäß Kap. 3. Werte in kt N a⁻¹ pro Fluss, auf ganze Zahlen gerundet; die Breite der Pfeile ist proportional zur Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools, siehe Abbildung 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 3.

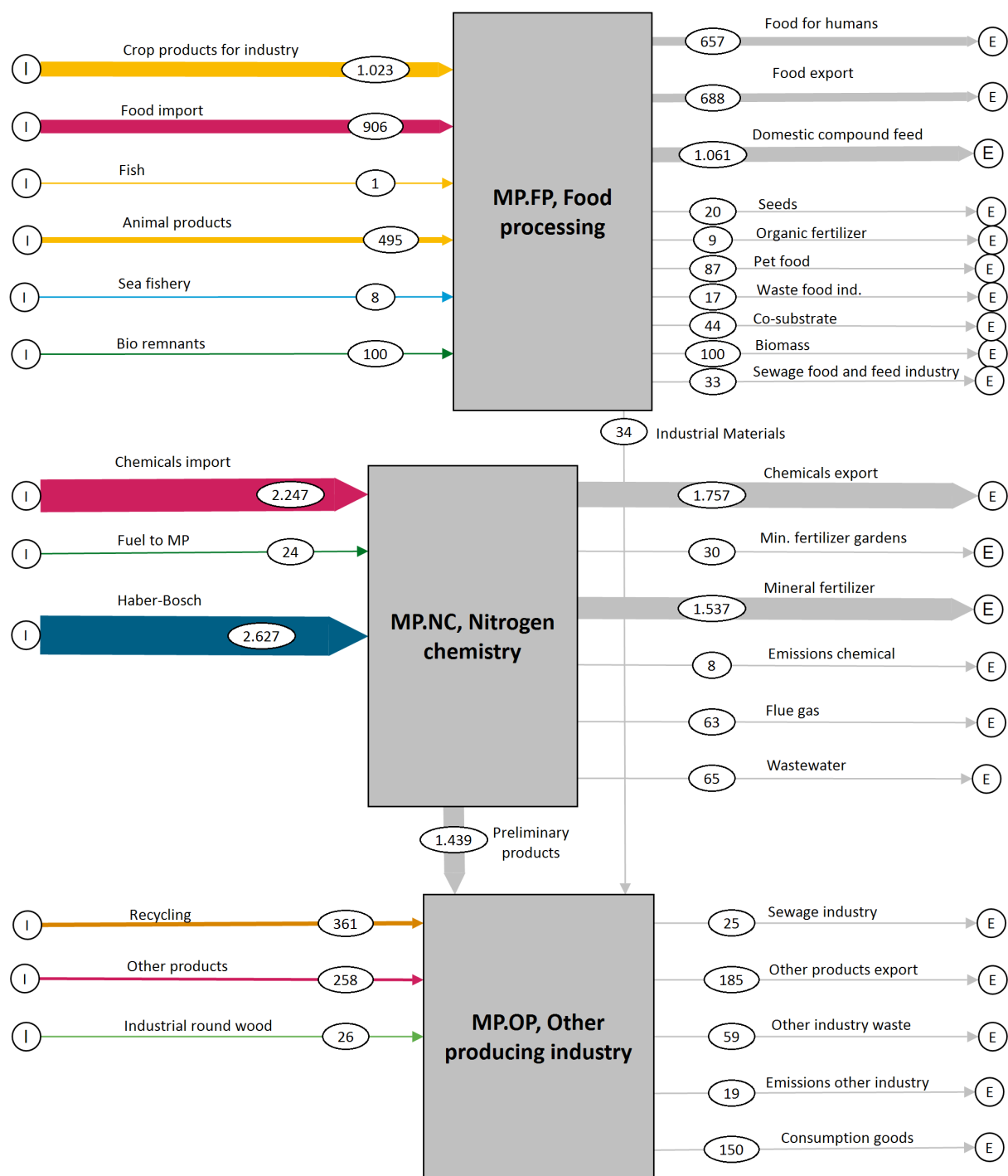
Quelle: Eigene Darstellung; Grafik: STAN (TU Wien).

Abbildung 12-3: Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ (EF, Energy and Fuels) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2015 – 2020).



Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ (EF, Energy and Fuels) mit den Sub-Pools „Energiewirtschaft“ (Energy Conversion), „Industrielle Energieerzeugung“ (Manufacturing Industries and Construction), „Transport und Verkehr“ (EF.TR, Transportation) und „Sonstige Energieerzeugung“ (EF.OE, Other Energy and Fuels) sowie den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen gemäß Kap. 4. Werte in kt N a⁻¹ pro Fluss, auf ganze Zahlen gerundet; die Breite der Pfeile ist proportional zur Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools, siehe Abbildung 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 4. Im N-Flussschema für den Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ sind „Erzeugung“ von 503 kt N a⁻¹ mit der Inlandsförderung von Braunkohle sowie die thermische Bildung von NO_x im Rauchgas in Höhe von 26 kt N a⁻¹ nicht dargestellt. Werte innerhalb der Rahmen der Sub-Pools: Lageränderungen ("+" = Source).
Quelle: Eigene Darstellung; Grafik: STAN (TU Wien).

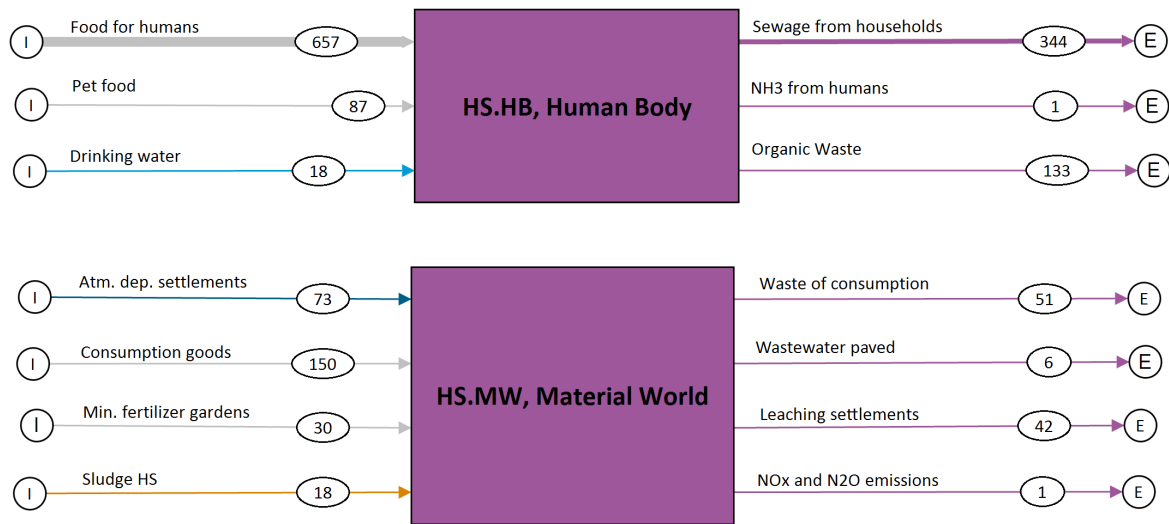
Abbildung 12-4: Pool „Industrielle Produktion“ (MP, Materials and Products) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2015 – 2020).



Pool „Industrielle Produktion“ (MP, Materials and Products) mit den Sub-Pools „Nahrungs- und Futtermittelindustrie“ (MP.FP, Food processing), „Stickstoff-Chemie“ (MP.NC, Nitrogen chemistry) und „Sonstige industrielle Produktion“ (MP.OP, Other producing industry) sowie den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen gemäß Kap. 5. Werte in kt N a⁻¹ pro Fluss, auf ganze Zahlen gerundet; die Breite der Pfeile ist proportional zur Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools, siehe Abbildung 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 5.

Quelle: Eigene Darstellung; Grafik: STAN (TU Wien).

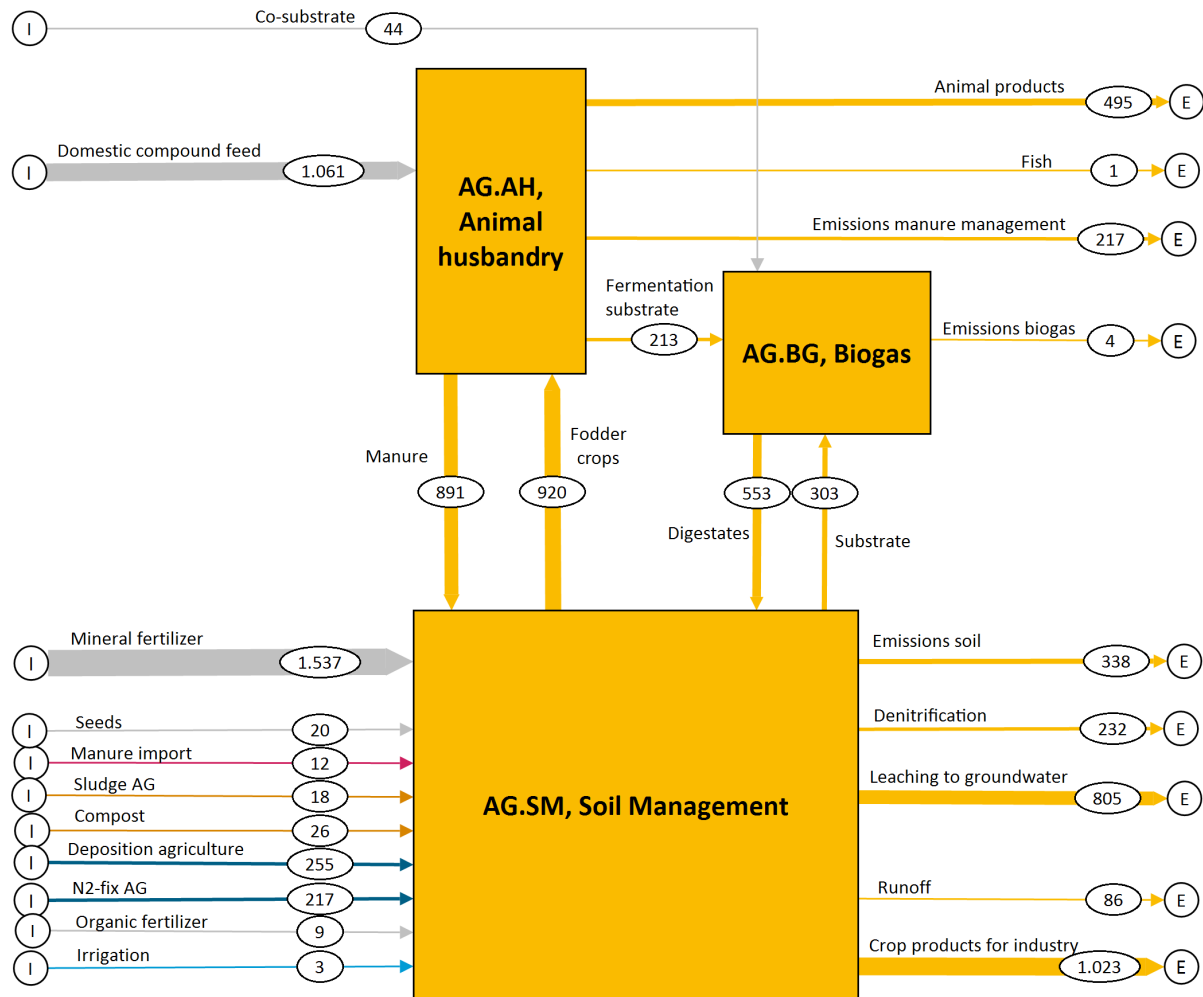
Abbildung 12-5: Pool „Ernährung und Konsum“ (HS, Humans and Settlements) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2015 – 2020).



Pool „Ernährung und Konsum“ (HS, Humans and Settlements) mit den Sub-Pools „Menschliche Ernährung“ (HS.HB, Human Body) und „Konsumgüter“ (HS.MW, Material World) sowie den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen gemäß Kap. 6. Werte in kt N a⁻¹ pro Fluss, auf ganze Zahlen gerundet; die Breite der Pfeile ist proportional zur Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools, siehe Abbildung 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 6.

Quelle: Eigene Darstellung; Grafik: STAN (TU Wien).

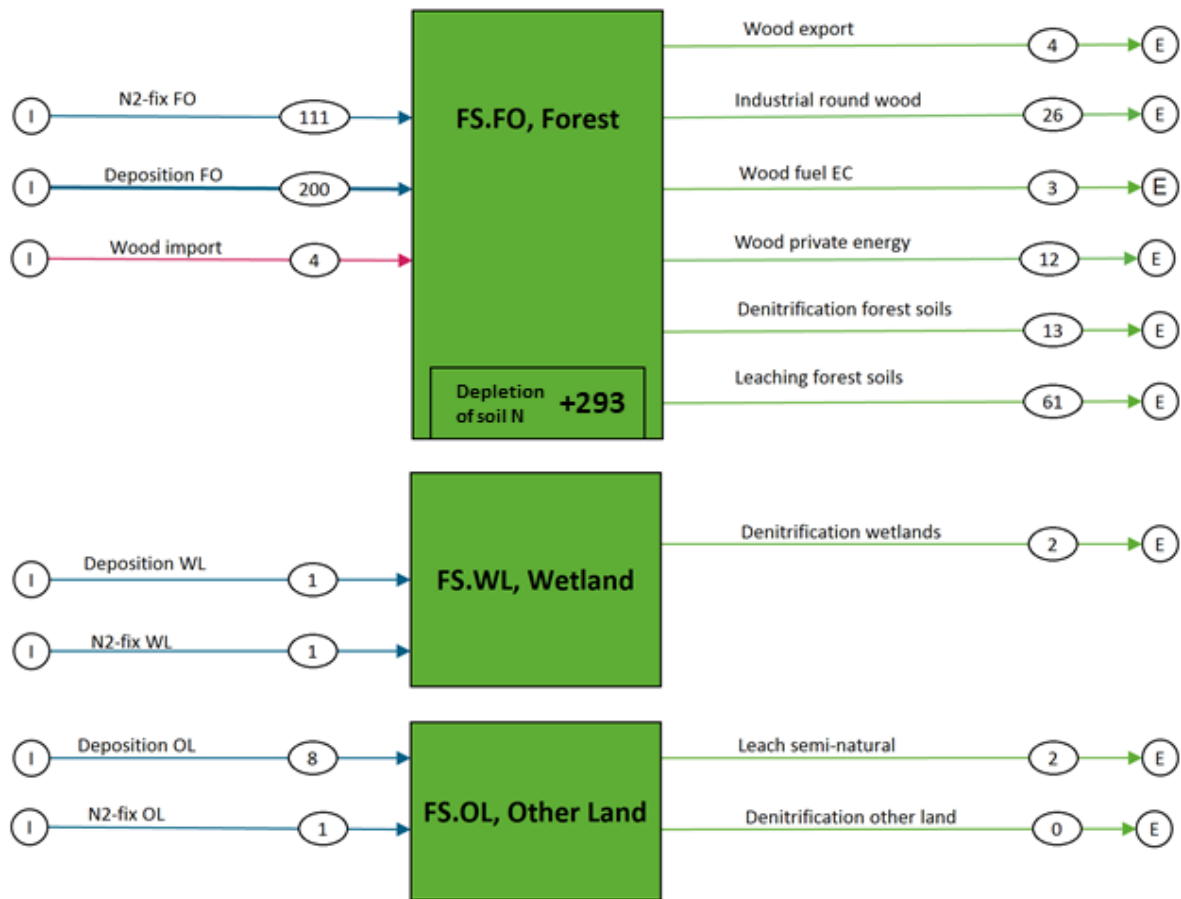
Abbildung 12-6: Pool „Landwirtschaft“ (AG, Agriculture) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2015 – 2020).



Pool „Landwirtschaft“ (AG, Agriculture) mit den Sub-Pools „Tierproduktion“ (AG.AH, Animal Husbandry), „Bodenproduktion“ (AG.SM, Soil Management) und „Biogasproduktion“ (AG.BG, Biogas) sowie den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen gemäß Kap. 7. Werte in kt N a⁻¹ pro Fluss, auf ganze Zahlen gerundet; die Breite der Pfeile ist proportional zur Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools, siehe Abbildung 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 7.

Quelle: Eigene Darstellung; Grafik: STAN (TU Wien).

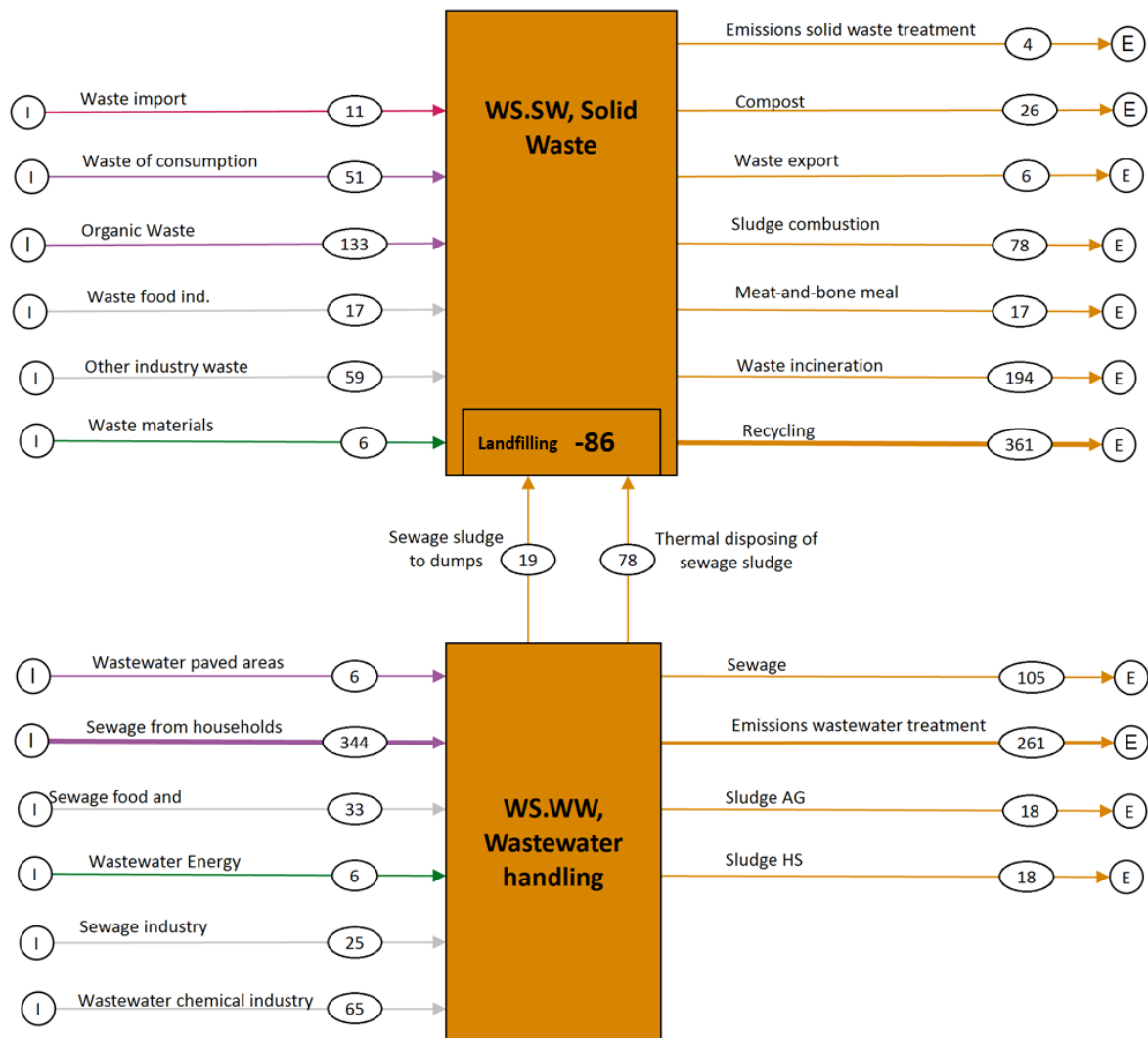
Abbildung 12-7: Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“ (FS, Forest and Semi-natural Vegetation) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2015 – 2020).



Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“ (FS, Forest and Semi-natural Vegetation) mit den Sub-Pools „Wald“ (FS, Forest), „Feuchtgebiete“ (FS.WL, Wetland) und „Semi-natürliche Flächen“ (FS.OL, Other Land) sowie den eingehenden und ausgehenden, quantitativ relevanten N-Flüssen gemäß Kap. 8. Werte in kt N a⁻¹ pro Fluss, auf ganze Zahlen gerundet; die Breite der Pfeile ist proportional zur Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools, siehe Abbildung 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 8. Wert innerhalb des Sub-Pools FS.FO: Lageränderung ("+" = Source).

Quelle: Eigene Darstellung; Grafik: STAN (TU Wien).

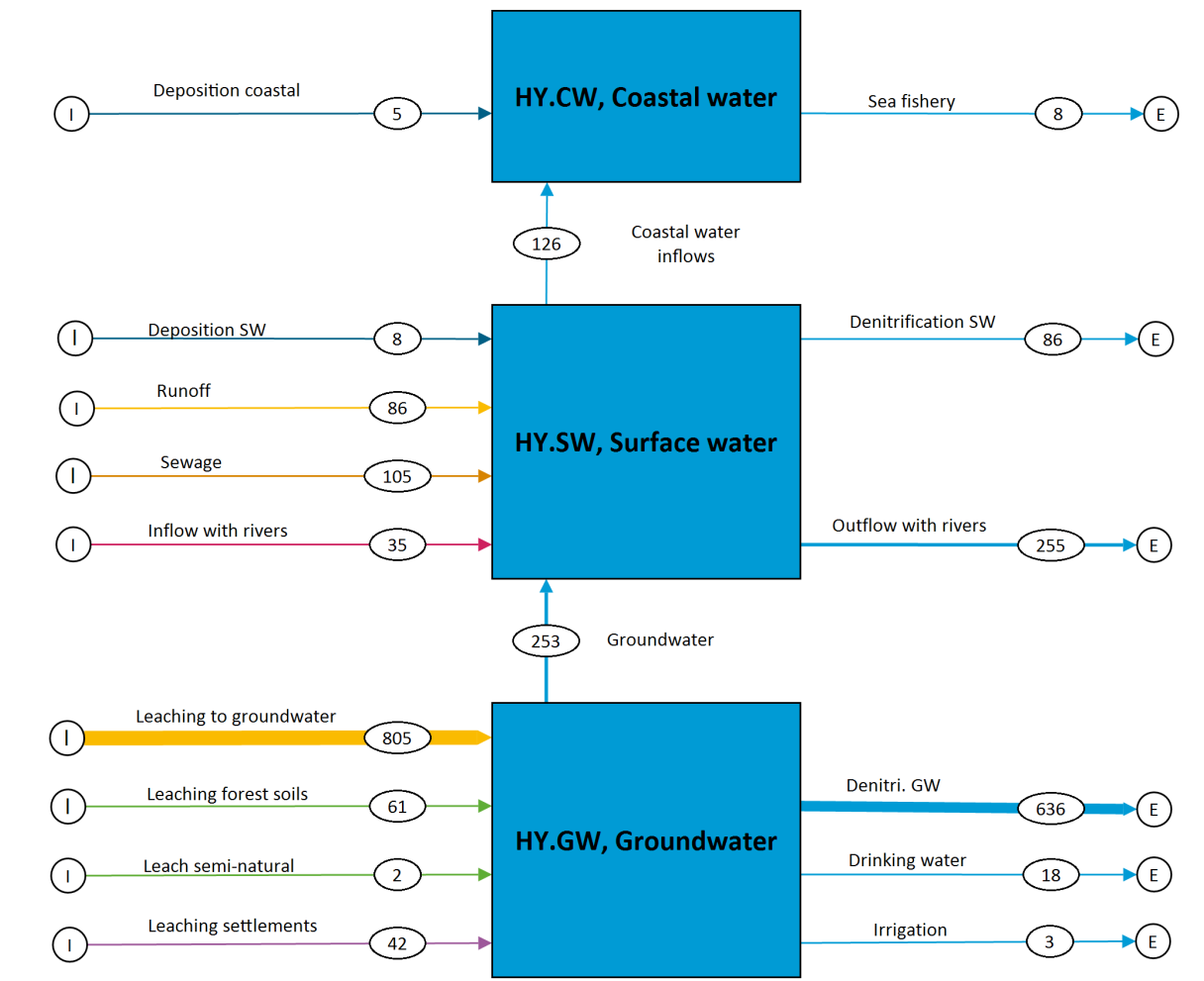
Abbildung 12-8: Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“ (WS, Waste) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2015 – 2020).



Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“ (WS, Waste) mit den Sub-Pools „Abfallwirtschaft“ (WS.SW, Solid Waste) und „Abwasserentsorgung“ (WS.WW, Wastewater handling) sowie den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen gemäß Kap. 9. Werte in kt N a⁻¹ pro Fluss, auf ganze Zahlen gerundet; die Breite der Pfeile ist proportional zur Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools, siehe Abbildung 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 9. Wert innerhalb des Sub-Pools WS.SW: Lageränderung ("-" = Sink).

Quelle: Eigene Darstellung; Grafik: STAN (TU Wien).

Abbildung 12-9: Pool „Gewässer“ (HY, Hydrosphere) und dessen Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2015 – 2020).



Pool „Gewässer“ (HY, Hydrosphere) mit den Sub-Pools „Oberflächengewässer“ (HY.SW, Surface water), „Küstengewässer“ (HY.CW, Coastal water) und „Grundwasser“ (HY.GW, Groundwater) sowie den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen gemäß Kap. 10. Werte in kt N a⁻¹ pro Fluss, auf ganze Zahlen gerundet; die Breite der Pfeile ist proportional zur Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools, siehe Abbildung 12-1. Datenquellen: siehe vorliegenden Bericht, Kap. 10. Für den Abfluss von 126 kt N a⁻¹ in die Küstenmeere (Nordsee und Ostsee) wird der Sub-Pool „Küstengewässer“ als interne Senke behandelt.

Quelle: Eigene Darstellung; Grafik: STAN (TU Wien).

13 Übersicht und Bilanzierung der N-Flüsse Deutschland

Mit Hilfe eines nationalen N-Inventars kann unter anderem die Frage beantwortet werden, welche Menge an reaktivem Stickstoff neu jährlich geschaffen bzw. in Umlauf gebracht wird und wie viel von diesem N_r wieder zu molekularem Stickstoff (N_2) umgewandelt (reduziert bzw. oxidiert) wird. In Tabelle 13-1 sind die Erzeugung und der Verbleib von N_r in Deutschland zusammengestellt.

Tabelle 13-1: Erzeugung (Neubildung, Netto-Importe und Förderung aus Lagerstätten) und Entsorgung (Reduktion zu N_2 , grenzüberschreitender Transport, Deponierung) von reaktivem Stickstoff in Deutschland, Mittel 2015 – 2020.

Prozess	N-Spezies	N-Fluss ^a kt N a ⁻¹
NH ₃ -Synthese (Haber-Bosch-Verfahren) ^b	NH ₃	2.627
Inlandsförderung und (Netto-)Import von fossilen Energieträgern ^c	N(org)	1.246
N-Fixierung in Böden (Landwirtschaft, Wald, semi-natürliche Flächen)	N(org)	329
Bildung von thermischem NO _x ^d	NO _x	190
Netto-Import Ernährung und Industrie ^e	alle N _r	799
Summe Quellen		5.192
Verbrennung fossiler und regenerativer Energieträger und Entstickung (Oxidation/Reduktion des N _r in Brennstoffen zu N ₂) ^f	N ₂	- 1.415 ^f
Denitrifikation insgesamt, davon in	N ₂	- 1.228
- Böden (Landwirtschaft, Wald, semi-natürliche Flächen)	N ₂	- 247
- Gewässern (Grundwasser ^g , Oberflächengewässer ^h)	N ₂	- 722
- Abfallwirtschaft (Kläranlagen)	N ₂	- 260
Deponierung von Abfällen	N(org)	- 67
Netto-Export über die Atmosphäre	NH ₃ , N ₂ O, NO _x	- 296
Netto-Export mit dem Abfluss in Oberflächengewässern ⁱ	NO ₃ , N(org)	- 347
Summe Senken		- 3.353
Differenz zwischen Quellen- und Senken-Flüssen		1.839^j

^a Zur besseren Übersicht sind die N-Flüsse auf ganze Zahlen gerundet.

^b Einschließlich Synthese von Calciumcyanamid.

^c Einschl. einer geringen Menge für nichtenergetischen Verbrauch, s. Tabelle 4-2.

^d Rd. 52 % des gesamten NO_x, s. Kap. 4.1.2 (Tabelle 4-4).

^e Incl. Import von Rohholz, Import von Abfallstoffen und Import von Wirtschaftsdüngern; ohne Energiewirtschaft, s. Tabelle 11-2.

^f Verbrennung von fossilen Energieträgern und Rauchgas-Entstickung (1114,8 kt N; Tabelle 4-6) sowie Verbrennung von regenerativen Energieträgern Abfall (193,9 kt N; Tabelle 9-3), Klärschlamm (78,0 kt N; Tabelle 9-6), Tiermehl (17,1 kt N; Tabelle 5-5) und Holz (Privathaushalte 11,7 kt N; Tabelle 8-4).

^g Umfasst Denitrifikation von 635,9 kt N a⁻¹ in der ungesättigten Zone und im Grundwasser.

^h Retention in Oberflächengewässern von 85,7 kt N a⁻¹ wird vollständig der Denitrifikation zugeschrieben.

ⁱ Abweichend von Kap. 10.3 (Tabelle 10-5) bzw. Tabelle 11-2 wird hier der Gewässerabfluss in die Küstenmeere ebenfalls als Export (Entsorgung) behandelt.

^j Zum Unterschied zur „Gesamtemission reaktiven Stickstoffs aus anthropogenen Quellen“ von 1.362 kt N a⁻¹ in Tabelle 13-3 s. Text.

An der Gesamtmenge von jährlich 5.192 kt neu geschaffenem bzw. in Umlauf gebrachtem N_r hat die Ammoniak-Synthese mit rund 51 % den größten Anteil. Der Beitrag der inländischen Förderung bzw. des (Netto-)Imports von N-haltigen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle, Rohöl) beträgt rd. 24 %. Bei der Verbrennung dieser Energieträger bei hohen Temperaturen wird thermisches NO_x gebildet (N_2 aus der Luft wird zu NO_x oxidiert), was eine Quelle von 190 kt $N_r a^{-1}$ darstellt. Mit 329 kt $N_r a^{-1}$ liefert die Stickstoff-Fixierung in Böden als einziger natürlicher Prozess nur rund 6 % der gesamten N_r -Menge.

Bedeutendste Senke ist die Energieerzeugung: mit der Verbrennung von fossilen Energieträgern (Steinkohle, Braunkohle, Erdölprodukte) und der Rauchgas-Entstickung sowie der Verbrennung von Abfall, Klärschlamm, Tiermehl und Holz werden zusammen 1.415 kt $N_r a^{-1}$ in N_2 überführt. Die Denitrifikation in Gewässern, Böden und Kläranlagen von zusammen 1.293 kt $N a^{-1}$ trägt als natürlicher Prozess mit rund 37 % zur Umwandlung von N_r in molekularen N_2 bei. Mit chemischen Produkten und mit Erzeugnissen der Nahrungs- und Futtermittelindustrie (incl. Rohholz, Abfallstoffe und Wirtschaftsdünger) werden zusammen 799 kt $N a^{-1}$ (netto) importiert, während über die Gewässer und die Atmosphäre (netto) 643 kt $N a^{-1}$ an Nachbarstaaten abgegeben werden, so dass der Import-Export-Saldo (ohne Berücksichtigung der Energiewirtschaft) -283 kt $N a^{-1}$ beträgt, inklusive dem Export in die Nordsee und die Ostsee, die als räumliche Systemgrenze der Inventarisierung definiert wurden.

Zwischen der Erzeugung (einschließlich Förderung und Netto-Import) von jährlich 5.192 kt reaktivem Stickstoff und dem Abbau von 3.353 kt N tritt eine Differenz von 1.839 kt N auf. Für diese beträchtliche Differenz von 35 % (bezogen auf die N_r -Erzeugung) kommen im Wesentlichen zwei Erklärungsansätze in Betracht.

- Die Differenz entspricht dem Überschuss des nationalen N-Inventars Deutschlands, das heißt die reaktive N-Menge in der Umwelt wird jährlich um diesen Betrag vermehrt („die N-Kaskade befeuert“).
- Die Differenz ist auf die Unsicherheiten in der Ermittlung der N-Flüsse zurückzuführen. Das betrifft zum einen die unzureichenden statistischen Datengrundlagen zu den Warenströmen und deren N-Gehalten im Bereich der Güterwirtschaft, zum anderen die unzureichende Kenntnis über die Einflussfaktoren und Umsatzraten der biochemischen Prozesse, mit den Stickstoff sowohl in reaktiven N-Spezies gebunden als auch wieder denitrifiziert wird.

Zu der Differenz können schließlich in gewissem Umfang auch Vorratsänderungen in einzelnen Pools beitragen, die im NNB-Berechnungsschema nicht als Quelle oder Senke von N-Flüssen berücksichtigt werden.

Theoretisch müsste die Summe der eingehenden und die Summe der ausgehenden N-Flüsse sowohl für jeden einzelnen Pool als auch für das nationale N-Inventar als Ganzes (als Aggregat der Pools) annähernd übereinstimmen. Tabelle 13-2 zeigt allerdings, dass dies nur für die Pools Energiewirtschaft, Gewässer und Atmosphäre zutrifft. Der Pool Landwirtschaft ist ausgeglichen, allerdings werden dort einzelne N-Flüsse als Differenzgrößen berechnet, so dass Zufuhr und Abfuhr keine voneinander unabhängigen Größen sind.

Bei Betrachtung einer Fünfjahresperiode ist der Aufbau oder Abbau von Lagerbeständen in der Landwirtschaft, der Ernährungswirtschaft, der Energiewirtschaft und der Güterproduktion vernachlässigbar, wie die dazu ausgewerteten Statistiken belegen. Für den Pool „Wald“ wird ein Abbau des N-Vorrats in den Waldböden von 293 kt $N a^{-1}$ angesetzt (Kap. 8.1.6), der im N-Inventar als Zufuhrgröße (Mobilisierung von N_r) zu berücksichtigen wäre; die Differenz würde dadurch aber noch zunehmen.

Tabelle 13-2: Gegenüberstellung der Summen der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse auf der Ebene der Pools, Mittel 2015 – 2020.

Pool bzw. Sub-Pool (Umsatzraum)	Zufluss kt N a ⁻¹	Abfluss kt N a ⁻¹	Differenz ^a kt N a ⁻¹
Pool Atmosphäre	1.128	- 1.046	82
Pool Energiewirtschaft	1.672	- 1.643	29
Pool Industrielle Produktion	8.077	- 6.612	1.465
Pool Ernährung und Konsum	1.032	- 577	455
Pool Landwirtschaft	3.200	- 3.200	0
Pool Wald und semi-natürliche Flächen ^c	327 ^{b, c}	- 123 ^c	204 ^c
Pool Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung	754 ^d	- 1.087 ^d	- 332 ^d
Pool Gewässer	1.148	- 1.132	16
Import-Export	4.475	- 3.450	1.025
Summen Zufluss, Abfluss und Differenz	21.812	- 18.967	2.846

^a Summen Zufluss, Abfluss und Differenz können rundungsbedingt abweichen.

^b Der Abbau des N-Bodenvorrats von rd. 293 kt N a⁻¹ in Waldböden wird hier nicht mit einbezogen.

^c Zufluss und Abfluss stimmen nicht mit Tabelle 8-7 überein, da dort nur der Sub-Pool Wald summiert wird.

^d Zufluss, Abfluss und Differenz stimmen nicht mit den summierten Größen der Tabelle 9-9 und Tabelle 9-10 überein, da in diesen beiden Tabellen auf der Ebene der Sub-Pools bilanziert wird.

Die Festlegung (Zuwachs) von 26 kt N a⁻¹ im Holzvorrat der Wälder kompensiert diesen Vorratsabbau im Boden bei weitem nicht. In den landwirtschaftlich genutzten Mineral- und Moorböden könnte einer vorläufigen Abschätzung zufolge (Kap. 7.5.2) der Abbau des N-Bodenvorrats in einer Größenordnung von ca. 500 kt N a⁻¹ liegen. Aufgrund der Unsicherheit der Schätzung wird dieser Wert aber nicht in das N-Inventar eingeführt. Die größte Unsicherheit im Hinblick auf N-Vorratsänderungen betrifft die Kompartimente Wurzelzone-Ungesättigte Zone-Grundwasser als Umsatzraum von Nitrat: weder ist die NO₃-Menge in diesen Bereichen in Deutschland insgesamt bekannt, noch kann deren Änderung (infolge Wasseraustausch und/oder Denitrifikation) plausibel abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse des nationalen N-Inventars sind daher in Anbetracht dieser Unsicherheiten zu interpretieren. Für besser abgesicherte Werte bzw. für zukünftige Aktualisierungen muss die statistische Datenbasis für eine Reihe von N-Flüssen verbessert werden, wobei die fachliche Unterstützung durch die entsprechenden Einrichtungen unabdingbar ist. Unbeschadet dieser Einschränkungen ist aber festzuhalten, dass die jährliche Netto-Freisetzung von reaktivem Stickstoff in Deutschland in einer Größenordnung von etwa 1.800 kt N a⁻¹ (s. Tabelle 13-1) anzusetzen ist. In welchen Umweltmedien und in Form welcher N-Spezies dieser jährliche N_r-Zuwachs verbleibt, das heißt angereichert wird, kann auf Basis des hier durchgeführten N-Inventars nicht beantwortet werden. Es ist jedoch unstrittig, dass dringend wirksame Maßnahmen ergriffen werden müssen, mit denen die Emission von reaktivem Stickstoff in die Umwelt erheblich vermindert wird.

In Tabelle 13-3 sind die Ergebnisse zu Mengen und Anteilen der anthropogen bedingten N_r-Emission in Luft und Gewässer (Oberflächengewässer und Grundwasser) nach N-Spezies und Emissionengruppen zusammengefasst und in Abbildung 13-1 dargestellt. Die Summe von 1.963

kt N a⁻¹ unterscheidet sich von der Angabe 1.839 kt N a⁻¹ in Tabelle 13-1, da für Tabelle 13-3 andere Systemgrenzen zugrunde gelegt werden: In Tabelle 13-1 wird die Differenz zwischen Quellen und Senken ausgewiesen, das heißt die Unsicherheiten in beiden Größen gehen in die Differenz mit ein, während in Tabelle 13-3 sowie in Abbildung 13-1 nur die anthropogenen Emissionen in die Umweltmedien Luft und Gewässer dargestellt sind. Weiterhin wird in Tabelle 13-1 der Netto-Export mit Oberflächengewässern saldiert, während in Tabelle 13-3 (und Abbildung 13-1) der NO₃-Eintrag in die Gewässer als Emission betrachtet wird. Die mengenmäßig bedeutendsten N_r-Emissionen erfolgen in Form von NH₃ mit 497 kt N a⁻¹ und NO₃ mit 1.037 kt N a⁻¹, wovon 95 % (NH₃) bzw. 86 % (NO₃) aus der Landwirtschaft stammen. Auch die N₂O-Freisetzung von 66 kt N a⁻¹ ist zu rund drei Vierteln auf landwirtschaftliche Aktivitäten zurückzuführen. Nur bei der NO_x-Emission von 363 kt N a⁻¹ dominieren die Emittentengruppen Verkehr sowie Industrie/Energiewirtschaft mit 45 % bzw. 35 % Anteil.

Tabelle 13-3: Mengen^a und Anteile der wichtigsten N-Verbindungen und Emittentengruppen an der Gesamtemission reaktiven Stickstoffs aus anthropogenen Quellen^b in Luft und Gewässer^c, Mittel 2015 – 2020.

Emittentengruppe	Pool/ Sub-Pool	Luft			Gewässer ^{c, d} NO ₃ kt N a ⁻¹	Summe kt N a ⁻¹	Anteil
		NO _x kt N a ⁻¹	NH ₃ kt N a ⁻¹	N ₂ O kt N a ⁻¹			
Landwirtschaft	AG	35,8	471,9	50,6	890,4	1.448,8	73,8 %
Verkehr	EF.TR	161,8	9,6	3,6	0,0	175,0	8,9 %
Industrie / Energiewirtschaft	EF abzgl. EF.OE & EF.TR; MP ^e	126,0	9,2	8,8	28,1	172,0	8,8 %
Haushalt / Abfallwirtschaft / urbane Flächen	HS, WS, EF.OE	39,9	5,9	3,3	118,2	167,4	8,5 %
Summe		363,5	496,6	66,4	1.036,7	1.963,2	
Anteil		18,5 %	25,3 %	3,4 %	52,8 %		100 %

^a *Kursiv*: Angaben gehen auf andere Veröffentlichungen zurück; die übrige Werte wurden im Rahmen dieser Studie ermittelt.

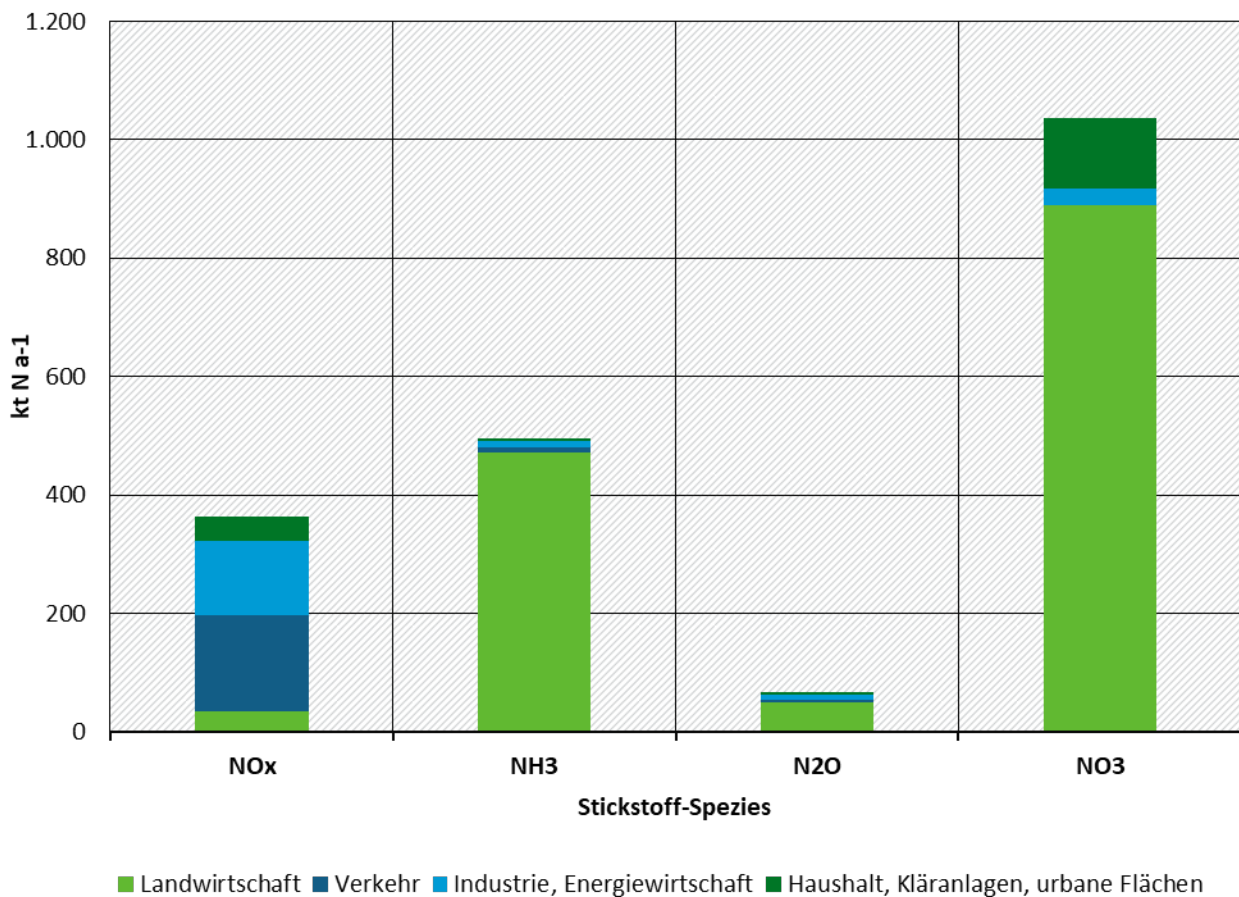
^b Emissionen aus dem Pool Wald und semi-natürliche Flächen werden hier nicht berücksichtigt (s. Text).

^c Oberflächengewässer und Grundwasser

^d Der Anteil des Stickstoffs aus Kläranlagen in Oberflächengewässer (WS.WW-HY.SW), wurde entsprechend des gut quantifizierbaren Anteils im Zulaufs der Kläranlagen auf die Emittentengruppen Industrie, Energiewirtschaft, Haushalte und urbane Flächen aufgeteilt.

^e ohne NH₃ für Rauchgasentstickung.

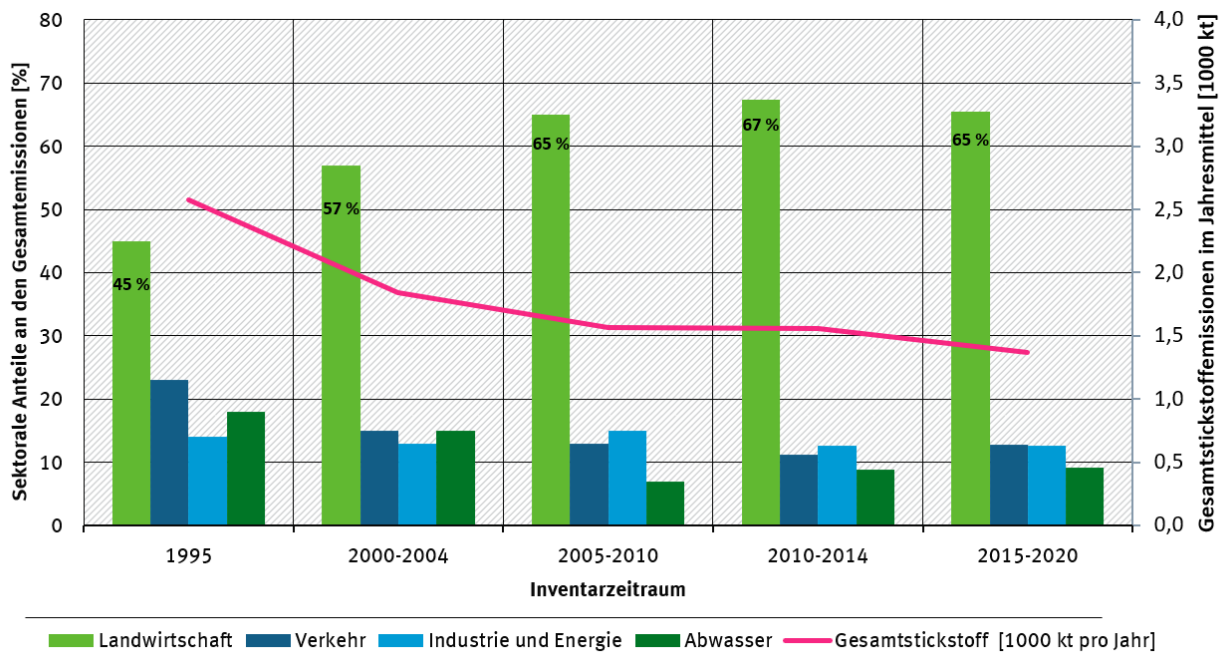
Abbildung 13-1: Emission von reaktivem Stickstoff aus anthropogenen Quellen nach Stickstoff-Spezies und Emittentengruppen in die Luft (NO_x , NH_3 , N_2O) und in Gewässer^a (NO_3), Mittel 2015 - 2020.



^a Oberflächengewässer und Grundwasser
Quelle: Eigene Darstellung

Ergebnisse zur Gesamtmenge der anthropogenen N_r -Emissionen in die Luft und die Oberflächengewässer in Deutschland und der Verteilung auf die vier Haupt-Emittentengruppen liegen mittlerweile für fünf Inventurperioden vor (Abbildung 13-2). Allerdings können für diese Zeitreihe - im Gegensatz zur Tabelle 13-3 bzw. Abbildung 13-1 - auf Grund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit früherer Inventarisierungen für Nitrat nur die Emissionen in *Oberflächengewässer* berücksichtigt werden. Die anthropogenen Emissionen in Luft und Oberflächengewässer (d.h. ohne Berücksichtigung des NO_3 -Eintrags in das Grundwasser) sind seit der ersten Erfassung in 1995 von damals 2.572 kt N a⁻¹ um 47 % auf 1.370 kt N a⁻¹ im Mittel der Periode 2015 - 2020 zurückgegangen (mit Berücksichtigung des Grundwassers beträgt die Gesamtemission 1.963 kt N a⁻¹, s. Tabelle 13-3). Abbildung 13-2 verdeutlicht, dass die Landwirtschaft mit rund zwei Dritteln der gesamten N_r -Freisetzung (ohne Berücksichtigung des Grundwassers) in Deutschland die mit Abstand bedeutendste N_r -Emissionsquelle darstellt, sowohl in die Atmosphäre als auch in die Oberflächengewässer. Gegenüber der Vorperiode (Zeitraum 2010 - 2014, s. Tabelle 13-3 in Bach et al. 2020b) ist der Anteil der Landwirtschaft geringfügig zurückgegangen, während der Anteil des Verkehrssektors etwas zugenommen hat, mit Berücksichtigung der NO_3 -Emissionen in das Grundwasser beträgt der Anteil der Landwirtschaft 74 % (in Abbildung 13-2 nicht dargestellt). Unverändert besteht somit eine hohe Dringlichkeit, Minderungsmaßnahmen vorrangig im Bereich der Landwirtschaft anzusetzen.

Abbildung 13-2: Gesamtmenge und sektorale Anteile der Emissionen von reaktiven Stickstoffverbindungen aus anthropogenen Quellen in Luft und Oberflächengewässer^a in Deutschland in fünf Inventurperioden^b.



^a Auf Grund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit früherer Inventarisierungen können für diese Zeitreihe in Bezug auf Nitrat nur die Emissionen in Oberflächengewässer berücksichtigt werden. Für die Periode 2015-2020 unterscheiden sich daher die hier dargestellten sektoralen Anteile und die Gesamtemission von den Angaben in Tabelle 13-3 und Abbildung 13-1, in denen die NO₃-Emission in das Grundwasser mit einbezogen ist.

^b Zur besseren Vergleichbarkeit der Studien wurden die Ergebnisse zum Eintrag aus der Landwirtschaft in Oberflächengewässer des Budgetierungszeitraumes 1995 mit Hilfe von Umweltbundesamt (2019) angepasst.

Quellen: Alfred Töpfer Akademie für Naturschutz (1997), Umweltbundesamt (2009a, 2009b), Umweltbundesamt (2015), Umweltbundesamt (2021b), Bach et al. (2020), eig. Berechnung.

14 Fazit und Schlussfolgerungen

Wie viel reaktiver Stickstoff wird jährlich aus welchen Quellen neu in Umlauf gebracht? Wo verbleibt dieser N_r ? Wie belastbar sind die Ergebnisse zu den N-Flüssen? Dies sind die zentralen Fragen eines nationalen N-Inventars der reaktiven Stickstoffflüsse. Als wesentliches, gut belegtes Ergebnis des nationalen N-Inventars ist festzuhalten, dass in Deutschland (Mittel 2015 - 2020) über die Ammoniak-Synthese etwa 8- bis 10-mal mehr N_r anthropogen in den Stickstoff-Kreislauf eingebracht wird als mit dem (einzigen) natürlichen Prozess, der Stickstoffbindung in Böden. Diese Relation unterstreicht die Aussage von Galloway et al. (2003), dass der Mensch in keinen anderen globalen geochemischen Stoffkreislauf so stark eingreift wie in den Stickstoff-Kreislauf. Eine weitere Kerngröße verdeutlicht die Größenordnung des anthropogenen Einflusses: Allein mit der Ammoniak-Synthese ($2.627 \text{ kt N a}^{-1}$) wird in Deutschland (Mittel 2015 - 2020) jedes Jahr mehr reaktiver Stickstoff erzeugt als im Holzbestand der Wälder insgesamt gespeichert ist (rd. 2.260 kt N).

Aus der Gegenüberstellung der Quellen und Senken von reaktivem Stickstoff in Deutschland (Tabelle 13-1) ergibt sich für das vorliegende N-Inventar (Periode 2015 - 2020) eine jährliche Netto-Freisetzung von reaktivem Stickstoff in Deutschland in einer Größenordnung von etwa $1.800 \text{ kt N a}^{-1}$; dieser ist etwas höher gegenüber der N-Menge von rund $1.630 \text{ kt N a}^{-1}$ in der vorherigen N-Inventarisierung (2010 - 2014; Bach et al. 2020; UBA 2021b). Eine exakte Ermittlung der N_r -Emission ist allerdings nicht möglich. Ursachen dafür sind auf der Zufuhrseite die wenig belastbare statistische Datenbasis zu Materialflüssen und deren N-Gehalten für mehrere maßgebliche N-Flüsse; auf der Abfuhrseite ist vor allem der Kenntnisstand zur Denitrifikation in Böden, Gewässern und der Abfallwirtschaft unzureichend. Zu diesen N-Flüssen sind weiterführende Untersuchungen erforderlich, wenn ein nationales N-Inventar besser abgesicherte Ergebnisse liefern soll. Die Ergebnisse früherer N-Inventare für Deutschland (UBA 2009a, 2009b, 2015) sind mit dem aktuellen N-Inventar methodisch und in der Detailtiefe nur eingeschränkt vergleichbar und werden daher hier nicht aufgeführt.

Die lückenlose Erfassung aller (mengenmäßig relevanten) N-Flüsse ist auch im aktuellen N-Inventar erneut für eine Reihe von N-Flüssen nur mit großen Unsicherheiten möglich. Im Hinblick auf die Kernaufgabe - die Abschätzung der Netto-Emissionsmenge reaktiven Stickstoffs - erscheint es zielführender, ein N-Inventar zukünftig auf die entscheidenden Komponenten des N_r -Umsatzes zu fokussieren:

- (i) Erzeugung von reaktivem Stickstoff durch technische Verfahren sowie durch die Stickstoffbindung in Böden;
- (ii) Abbau von reaktiven N-Verbindungen zu N_2 über die Denitrifikation in natürlichen und technischen Systemen sowie mit der Verbrennung von Energieträgern;
- (iii) „Entlastung“ der nationalen N-Bilanz durch den (Netto-)Export von N_r ;
- (iv) Veränderung der verfügbaren N_r -Menge aufgrund von N-Bestandsänderungen (Böden, Grundwasser).

In diesem Zusammenhang ist auf die essentielle Bedeutung der Denitrifikation in Gewässern, Böden und Kläranlagen hinzuweisen: die Reduktion von NO_3 zu N_2 ist der einzige (!) Prozess innerhalb der Biosphäre, mit dem reaktiver Stickstoff wieder in die molekulare Form überführt, das heißt „entsorgt“ wird. Es ist erstaunlich, dass zur Intensität und den Einflussfaktoren der Denitrifikation im Untergrund (Boden, ungesättigte Zone und Aquifer), in Oberflächengewässern sowie in der Abfall- und Abwasserentsorgung nur relativ wenige Untersuchungen vorliegen, die eine Abschätzung der denitrifizierten N-Menge im nationalen Massstab erlauben. Fachleute der

Wasserwirtschaft in Deutschland weisen regelmäßig darauf hin, dass der Kenntnisstand völlig unzureichend ist, wie groß das Denitrifikationspotenzial in der ungesättigten Zone und im Grundwasser sich regional in Deutschland darstellt (Bergmann et al. 2013), und ob auch auf längere Sicht mit einem Nitratabbau im Untergrund in der bisherigen Größenordnung gerechnet werden kann (vgl. UBA 2017b). Die Bedeutung der Denitrifikation wird noch zusätzlich unterstrichen, wenn der Abbau der N-Bodenvorräte in landwirtschaftlich genutzten Böden von geschätzt möglicherweise 500 kt N a⁻¹ mitberücksichtigt würde. Aufgrund der großen Unsicherheit wird dieser Wert jedoch bislang nicht als N-Fluss in das N-Inventar einbezogen.

Im vorliegenden nationalen N-Inventar wurden Methodik und Strukturierung, die auf ECE (2013) zurückgeht, im Vergleich zum vorherigen N-Inventar (Bach et al. 2020) nahezu unverändert übernommen, um die Ergebnisse der beiden Perioden so weit wie möglich miteinander vergleichbar zu halten.

Informationen über die Mengen, die Quellen und den Verbleib von (potenziell) umweltbelastenden N-Verbindungen bilden die unabdingbare Voraussetzung für die Konzeption von umweltpolitischen Maßnahmen und Programmen. Die Umwelteffekte durch die Emission bzw. Immission reaktiver N-Verbindungen sind allerdings für die einzelnen N-Spezies (NO₃, NH₃/NH₄, N₂O, NO, NO₂) in verschiedenen Schutzgütern (menschliche Gesundheit, Klima, Grundwasser, Oberflächengewässer, N-sensible Vegetation) unterschiedlich. Eine Bewertung der Umweltwirkung von N-Flüssen ausschließlich auf Basis Kilotonnen N pro Jahr wird dieser Problematik nicht gerecht. Für eine sachgerechte Interpretation sind die N-Flüsse nach N-Verbindungen und Schutzgütern zu differenzieren sowie zu Zielwerten (Obergrenzen) der tolerierbaren Belastung der Schutzgüter in Beziehung zu setzen. Ein erster Ansatz zur integrierten Erfassung und Bewertung der Emission reaktiver N-Verbindungen auf der nationalen Ebene wurde mit dem DESTINO-Gesamtindikator Stickstoff für Deutschland vorgestellt (DESTINO Bericht 1; Heldstab et al. 2020; UBA 2021b). Mit dem UBA-Projekt "regioNat" wird derzeit ein Ansatz entwickelt, regional differenzierte Obergrenzen für die Emission von reaktivem Stickstoff für sechs Schutzgüter festzulegen (Bach et al. 2025).

Im Zusammenhang mit der eingangs genannten Fragestellung kann ein nationales N-Inventar auch dazu dienen, die Prozesse und Umsatzraten darzustellen, mit denen Stickstoff von einer Verbindung in eine andere umgesetzt wird. Mit dieser Kenntnis können dann geeignete, nach Schutzgütern, Umweltmedien und N-Emissionen/Immissionen differenzierte Ansatzstellen für Emissionsminderungen erarbeitet werden. Für die Zukunft könnte es darüber hinaus eine interessante Aufgabe darstellen, die nationalen N-Flüsse zu „dynamisieren“, das heißt die Reaktion des Systems auf Steuerungseingriffe an einzelnen Punkten abzubilden. Mit einem derartigen Instrument könnte dann die erforderliche Maßnahmenstärke zur Erreichung von vorgegebenen Umweltzielen abgeschätzt und trade-offs könnten prognostiziert werden.

Im internationalen Rahmen können N-Inventare ein aussagekräftiges Instrument darstellen, um den Beitrag einzelner Länder zur globalen Stickstoffproblematik zu erfassen und gegebenenfalls die Wirkung von Minderungsmaßnahmen zu überprüfen. Im Hinblick auf die in der Farm-to-Fork Strategie und im globalen Biodiversitätsabkommen anvisierte Zielstellung Stickstoff-Verluste („N waste“) zu halbieren (EU KOM 2021; CBD 2023) böte die Inventarisierung z. B. ein geeignetes Mittel, um die Zielerreichung zu überprüfen. Dies setzt jedoch auch voraus, dass die Qualität der statistischen Daten für die Ermittlung der N-Zuflüsse in den betreffenden Ländern einigermaßen vergleichbar ist. Auf der Seite der Abflüsse ist nicht zu erwarten, dass in der näheren Zukunft belastbare Schätzwerte zum Umfang der Denitrifikation bereitstehen werden. Unter diesen Umständen werden nationale N-Inventare mutmaßlich auf absehbare Zeit keine geschlossene Massenbilanz darstellen können, sondern der Saldo zwischen den valide schätzbaren

Zuflüssen und Abflüssen quantifiziert diejenigen (nationalen) Stickstoff-Verluste („N waste“), die denitrifiziert als Luftstickstoff oder als reaktiver Stickstoff in die Umwelt freigesetzt werden.

15 Danksagung

Die Autorinnen und Autoren danken zahlreichen Personen und Institutionen sehr herzlich, die mit der Bereitstellung von Daten, mit Informationen und Hinweisen zu dieser Veröffentlichung beigetragen haben. Namentlich zu erwähnen sind (in alphabetischer Reihenfolge der Einrichtungen):

Simone Böhmerle, Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL) in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)

Dr. Martin Ruhrberg, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW)

Dr. Theresa Krato, Johannes Monath, Industrieverband Agrar (IVA)

Dr. Henning Meesenburg, (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)

Laura Schröder, Statistisches Bundesamt

Prof. Dr. Alfons Kather, Technischen Universität Hamburg-Harburg

Dr. Christoper Poeplau, Dr. Thomas Riedel, Dr. Reinhard Well, Thünen-Institut

Andreas Eisold, Markus Geupel, Falk Hilliges, Kristina Juhrich, Alexander Moravek, Andrea Roskosch, Umweltbundesamt (UBA).

16 Quellenverzeichnis

- AGEB. (2015). *Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland* (20 S.). Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB).
- AGEB. (2017). *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2016* (24 S.). Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB).
- AGEB. (2022). *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2021* (29 S.). Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB).
- Alfred Toepfer Akademie für Naturschutz. (1997). *Stickstoffminderungsprogramm*. NNA-Berichte, 10.Jg., H. 4, 51 S.
- AlzChem. (2021). *Geschäftsbericht 2020*. https://www.alzchem.com/fileadmin/Investor_Relations/Hauptversammlung/2021/AlzChem_Group_AG_Geschaeftsbericht_2020s.pdf (aufgerufen 26.04.2024).
- Andreae, H., Eickenscheidt, N., Evers, J., Grüneberg, E., et al. (2016). Stickstoffstatus und dessen zeitliche Veränderungen in Waldböden. In N. Wellbrock, A. Bolte, & H. Flessa (Eds.), *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008* (S. 135–180). Thünen-Report, 43.
- Arnold, S. (2015). Bereitstellung harmonisierter Landnutzungs- und Landbedeckungsstatistiken. *Statistisches Bundesamt, Wirtschaft und Statistik*, 2015(2), 67-79.
- Bach, M., Godlinski, F., & Greef, J. M. (2011). *Handbuch Berechnung der Stickstoffbilanz für die Landwirtschaft in Deutschland Jahre 1990 – 2008*. Berichte aus dem Julius Kühn-Institut, 159, 28 S.
- Bach, M., Häußermann, U., Klement, L., Knoll, L., Breuer, L., Weber, T., Fuchs, S., Heldstab, J., Reutimann, J., & Schäppi, B. (2020). *Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010-2014 (DESTINO Bericht 2)*. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, UBA-Texte 64/2020, 166 S.
- Bach, M., Griesse, E., Kappauf, T., Morling, K., Hannappel, S., Borrmann, S. (2025). *Entwicklung einer nationalen und regional aufgelösten Obergrenze für reaktiven Stickstoff (regioNat)*. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, UBA-Texte (in Vorbereitung).
- BDBE. (2018). Verbleib von Rückständen der Bioethanolherzeugung. Bundesverband der deutschen Ethanolwirtschaft e.V., Berlin. Schreiben v. 29.03.2018 (Az. 4.210)
- Beisecker, R., Blankenburg, H., Bittersohl, J., Evers, J., et al. (2012). *Diffuse Stoffausträge aus Wald und naturnahen Nutzungen. LAWA-Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Abschlussbericht*. Kassel/Göttingen.
- Behrendt, A., & Opitz, D. (1999). Retention of nutrients in river systems: Dependence on specific runoff and hydraulic load. *Hydrobiologia*, 410, S. 111-122.
- Bergmann, A., Dietrich, P., van Straaten, L., Frabko, U., van Berk, W., & Kiefer, J. (2013). *Konsequenzen nachlassenden Nitratabbauvermögens in Grundwasserleitern*. Deutscher Verein Gas- u. Wasserfach (DVGW), Bonn (Abschlussbericht), 181 S.
- BGK. (2006). *Organische Düngung. Grundlagen der guten fachlichen Praxis*. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK).
- BKG. (2020). *Dokumentation Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland - LBM-DE2018*. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 63 S. https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/lbm-de2018.pdf (aufgerufen 26.06.2023).
- BKG. (2022). *Dokumentation CORINE Land Cover 5 ha - CLC5 (2018)*. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 7 S. https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/clc5_2018.pdf (aufgerufen 26.06.2023).

BMEL. (2016). *Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre. Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052. 3. Bundeswaldinventur.* https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Wald-Rohholzpotential-40Jahre.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (aufgerufen am 26.04.2024).

BMEL. (2021). *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2020.* Hrsg. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.

BMEL. (2022a). *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2021.* Hrsg. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.

BMEL. (2022b). *Flächenbilanz, Stallbilanz und Nährstoffbilanz insgesamt der Landwirtschaft in Deutschland 1992-2020.* Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/statistischer-monatsbericht-des-bmel-kapitel-a-landwirtschaft (aufgerufen 06.01.2024)

BMUB. (2017). *Stickstoffeintrag in die Biosphäre. Erster Stickstoff-Bericht der Bundesregierung.* Bundesministerium für Umwelt, Bau, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 31 S.

Borken, W., & Matzner, E. (2004). Nitrate leaching in forest soils: An analysis of long-term monitoring sites in Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167(3), 277-283. <https://doi.org/10.1002/jpln.200421354>

BfG. (2013). *Frachtberechnungsmodul Prioritäre Stoffe.* Unter Mitarbeit von Holger Haase. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.

Callesen, I., Borken, W., Kalbitz, K., & Matzner, E. (2007). Long-term development of nitrogen fluxes in a coniferous ecosystem: Does soil freezing trigger nitrate leaching? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(2), 189-196. <https://doi.org/10.1002/jpln.200622034>.

CBD. (2023). *Global Biodiversity Framework – Target 7.* <https://www.cbd.int/gbf/targets/7/>.

Cleveland, C. C., Townsend, A. R., Schimel, D. S., Fisher, H., Howarth, R. W., Hedin, L. O., Perakis, S. S., et al. (1999). Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N₂) fixation in natural ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(3), 623-645. <https://doi.org/10.1029/1999GB900014>

DESTATIS. (versch. J.). *Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung Deutschland.* Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

DESTATIS. (2008). *Klassifikation der Wirtschaftszweige.* Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 828 S.

DESTATIS. (2022a). *Abfallentsorgung 2020. Statistischer Bericht. Ergänzung zu GENESIS.* Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/statistischer-bericht-abfallentsorgung-2190100207005.html> (aufgerufen 25.04.2024).

DESTATIS. (2022b). *Abfallbilanz 2020 (Abfallaufkommen/-verbleib), Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen).* Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/statistischer-bericht-abfallentsorgung-2190100207005.html> (aufgerufen 13.12.2024).

DESTATIS. (2022c). *Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung, Bergbau und verarbeitendes Gewerbe.* Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Fachserie 19, R. 2.1.1 und 2.2.

DESTATIS. (2023). *Aus- und Einfuhr (Außenhandel) Deutschland, Jahre, Warenverzeichnis (8-Steller) Genesis online Tabelle 51000-0013.* Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=table&code=51000-0013&bypass=true&levelindex=1&levelid=1691651478112#abreadcrumb> (aufgerufen 26.04.2024).

DESTATIS. (2023b). *Produktion im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Güterverzeichnis (9-Steller). Genesis-Online Tabelle 42131-0004*. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=table&code=42131-0004&bypass=true&levelindex=0&levelid=1691651899341#breadcrumb> (aufgerufen 26.04.2024).

DESTATIS. (2024). Aktualisierung der Klärschlammdaten durch das Statistische Bundesamt, Statistiken der Wasserwirtschaft und der klimawirksamen Stoffe (E-Mail von L. Schröder vom 14.03.2024).

Dise, N. B., Rothwell, J. J., Gauci, V., van der Salm, C., & de Vries, W. (2009). Predicting dissolved inorganic nitrogen leaching in European forests using two dynamic models. *Environmental Pollution*, 157(1), 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.003>.

Don, A. (2019). *Anmerkungen zur Interpretation der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft*. Thünen-Institut, Braunschweig (E-Mail v. 07.01.2019).

DWA. (2019). 31. *Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen, DWA-Arbeitsgruppe BIZ-1.1. Kläranlagen-Nachbarschaften*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. https://de.dwa.de/files/media/content/06_SERVICE/ZahlenFaktenUmfragen/Leistungsnachweis/leistungsvergleich_2020_final.pdf (aufgerufen 11.09.2025).

ECE. (2013). *Guidance document on national nitrogen budgets*. Economic Commission for Europe (ECE), Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. <https://www.ccacoalition.org/resources/guidance-document-national-nitrogen-budgets> (aufgerufen 11.09.2025).

ECE. (2016). *Detailed Annexes to ECE/EB.AIR/119 – Guidance document on national nitrogen budgets*. Editor: Wilfried Winiwater and Expert Panel on Nitrogen Budgets. Economic Commission for Europe (ECE), Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. https://www.clrtap-tfrn.org/sites/default/files/2024-12/EPNB_annex_20210302_public.pdf (aufgerufen 11.09.2025).

ECE. (2018). *Annex 1 – Energy and fuels*. Provided as part of Detailed Annexes to ECE/EB.AIR/119 – Guidance document on national nitrogen budgets. Draft version of 20 July 2018, publication in preparation.

EEA. (2013). *EMEP/EEA Air Pollutant Inventory Guidebook 2013. Technical guidance to prepare national emission inventories*. European Environmental Agency (EEA), Copenhagen.

EEA. (2022). *National emissions reported to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP Convention) 1990-2020*. Environment Agency (EEA). Publication Office of the European Union, Luxembourg. <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/5be6cebc-ed2b-4496-be59-93736fc4ad78?activeAccordion=> (aufgerufen 29.04.2024).

EMEP. (2021). *Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components. Status Report 1/2021*. Norwegian Meteorological Institute, Joint MSC-W & CCC & CEIP Report. https://emep.int/publ/reports/2022/EMEP_Status_Report_1_2022.pdf (aufgerufen 26.06.2023).

En2x. (2023). Antwort von en2x – Wirtschaftsverband Fuels & Energie e.V. auf Anfrage des UBA nach N-Gehalten im Rohöl. Persönliche Kommunikation vom 28.08.2023.

EU KOM. (2021). *EU Farm to Fork Strategie – gesündere und nachhaltigere Lebensmittel*. <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/from-farm-to-fork/> (aufgerufen 25.03.2024).

Eurostat. (o.J.). *In der PRODCOM-Liste 2017 enthaltene Codes der Kombinierten Nomenklatur 2017 mit Angabe der entsprechenden PRODCOM-Codes*. https://circabc.europa.eu/webdav/CircaBC/ESTAT/prodcom/Library/the_list/2017%20List/CN_PRC_DE_2017.pdf, (aufgerufen 08.06.2018).

Fleck, S., Eickenscheidt, N., Ahrends, B., Evers, J., Grüneberg, E., et al. (2019). *Nitrogen Status and Dynamics in German Forest Soils*. In N. Wellbrock & A. Bolte (Eds.), *Status and Dynamics of Forests in Germany. Results of the National Forest Monitoring* (pp. 123–166). Springer, Ecological Studies Vol. 237. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_5.

FNR. (2022). *Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow. <https://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22004416.pdf> (aufgerufen 27.06.2023).

Fritsche, U. R., Leuchtner, J., Matthes, F. C., Rausch, L., Simon, K. H. (1994). *Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Vers. 2.1. Aktualisierter und erweiterter Endbericht*. Öko-Institut (Institut f. angewandte Ökologie e.V.), Freiburg, veröffentlicht Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (HMUEB), Wiesbaden.

Fritsche, U. R., & Rausch, L. (2007). *Umwelteffekte der Strom- und Wärmebereitstellung sowie Kraftstoffnutzung: Zeitreihen 1990 bis 2004*. Öko-Institut (Institut für angewandte Ökologie e.V.), Freiburg.

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 Polyzyklische 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 Wassergütewirtschaft, Karlsruhe.

Fuchs, S., Weber, T., Wander, R., Toshovski, S., Kittlaus, S., Reid, L., Bach, M., Klement, L., Hillenbrand, T., Tettenborn, F. (2017a). *Effizienz von Maßnahmen zur Reduktion von Stoffeinträgen*. Umweltbundesamt, UBA-Texte 05/2017, 385 S.

Fuchs, S., Kaiser, M., Kiemle, L., Kittlaus, S., Rothvoß, S., Toshovski, S., et al. (2017b). *Modeling of Regionalized Emissions (MoRE) into Water Bodies. An Open-Source River Basin Management System*. Water, 9(4), 239. <https://doi.org/10.3390/w9040239>.

Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B., & Cosby, B. J. (2003). The nitrogen cascade. *BioScience*, 53(4), 341–356. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:tnc\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:tnc]2.0.co;2)

Galloway, J. N., Townsend, A. N., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., & Freney, J. R. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320(5878), 889–892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>.

Gutknecht, J. L. M., Goodman, R. M., & Balser, T. C. (2006). Linking soil processes and microbial ecology in freshwater wetland ecosystems. *Plant and Soil*, 289, 17–34. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9105-4>.

Häußermann, U., Bach, M., Klement, L., & Breuer, L. (2019). Stickstoff-Flächenbilanzen für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise – Jahre 1995 bis 2017. Methodik, Ergebnisse und Minderungsmaßnahmen. *Umweltbundesamt (UBA), UBA-Texte 131/2019*.

Heldstab, J., Reutimann, J., Biedermann, R., & Leu, D. (2010). Stickstoffflüsse in der Schweiz. Stoffflussanalyse für das Jahr 2005. *Bundesamt für Umwelt*.

Heldstab, J., Schäppi, B., Reutimann, J., Bach, M., Häußermann, U., Knoll, L., Klement, L., Breuer, L., Fuchs, S., & Weber, T. (2020). Integrierter Stickstoffindikator, nationales Stickstoffziel und IST-Zustand (DESTINO Teilbericht 1). *Umweltbundesamt (UBA), UBA-Texte 96/2020*.

Industrieverband Heimtierbedarf. (2022). Der deutsche Heimtiermarkt. Struktur und Umsatz. <https://www.ivh-online.de/der-verband/daten-fakten/der-deutsche-heimtiermarkt.html> (aufgerufen 13.12.2024).

Industrieverband Agrar (IVA). (2020). Wichtige Zahlen Düngemittel. Produktion, Markt, Landwirtschaft. 2019–2020. *Industrieverband Agrar (IVA)*.

Industrieverband Agrar (IVA). (2024). *Schriftliche Mitteilung von unveröffentlichten Zahlen für das Jahr 2020* (E-Mail von J. Monath (IVA) vom 15.03.2024).

IPCC. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry* (Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Irving, W., Krug, T., et al., Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

IPCC. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Overview* (Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Irving, W., Krug, T., et al., Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

- Jacobs, A., Flessa, H., Don, A., Heidkamp, A., Prietz, R., Dechow, R., et al. (2018). Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. *Thünen Report*, 64, 318.
- Jochem, D., Weimar, H., Bösch, M., Mantau, U., & Dieter, M. (2015). Estimation of wood removals and fellings in Germany: A calculation approach based on the amount of used roundwood. *European Journal of Forest Research*, 134(5), 869–888. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0896-9>.
- Kiese, R., Heinzeller, C., Werner, C., Wochele, S., Grote, R., & Butterbach-Bahl, K. (2011). Quantification of nitrate leaching from German forest ecosystems by use of a process-oriented biogeochemical model. *Environmental Pollution*, 159(11), 3204–3214. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.004>.
- Knoll, L., Breuer, L., & Bach, M. (2020). Nationwide estimation of groundwater redox conditions and nitrate concentrations through machine learning. *Environmental Research Letters*, 15(6), 64004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8905>.
- Knoll, L., Bach, M., Häußermann, U., Breuer, L., Morling, K., Fuchs, S., Weber, T. (2024). *Stickstoffreduktion in der ungesättigten Zone und im Grundwasser - Grundlage für die Modellierung des Stickstoff-Eintrags in Oberflächengewässer*. Forschungsbericht, Universität Gießen, 92 S. <https://doi.org/10.22029/jlupub-19106>.
- Kranenburg, R., Schaap, M., Coenen, P., Thürkow, M., & Banzhaf, S. (2024). PINETI-4: Modelling and assessment of acidifying and eutrophying atmospheric deposition to terrestrial ecosystems. *Umweltbundesamt (UBA), UBA-Texte 130/2024*.
- Leip, A., Achermann, B., Billen, G., & Bleeker, A. (2011). Integrating nitrogen fluxes at the European scale. In M. Sutton, C. Howard, J. W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven, & B. Grizzetti (Eds.), *The European Nitrogen Assessment* (pp. 345–376). Cambridge University Press.
- MacDonald, J. A., Dise, N. B., Matzner, E., Armbruster, M., Gundersen, P., & Forsius, M. (2002). Nitrogen input together with ecosystem nitrogen enrichment predict nitrate leaching from European forests. *Global Change Biology*, 8, 1028–1033. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00532.x>.
- Mielenz, H., & Dieser, M. (2018). Stickstoff-Bilanzen für die Landwirtschaft in Deutschland. Zeitreihe 1990 bis 2016 – Zusammenfassung und Anmerkungen zum Bilanzjahr 2016. *Bericht des Julius Kühn-Instituts*, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, 39.
- Morling, K., Fuchs, S., Krumm, J., & Haag, I. (2024). Zusammenführung der bundesweiten Modellierung von Wasserhaushalt (LARSIM-ME) und Stoffeinträgen (MoRE). *Umweltbundesamt (UBA), UBA-Texte 37/2024*.
- Müller, K., Häußermann, U., Bach, M., & Greef, J. M. (2024). Berechnung der Stickstoff-Bilanz für die Landwirtschaft in Deutschland - Jahre 1990 bis 2019. *Julius Kühn-Institut (JKI), Berichte aus dem Julius-Kühn-Institut, Bd. 225*, 137.
- Niemann, H. (versch. J.). Statistik der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte. *Tierische Nebenprodukte Nachrichten*.
- NLfB. (2005). EG-WRRL – Bericht 2005, Grundwasser, Methodenbeschreibung. *Niedersächsisches Landesamt für Ökologie und Bezirksregierung Hannover*. <https://www.wasserblick.net/servlet/is/17872/Methodenbeschreibung.pdf?command=downloadContent&filename=Methodenbeschreibung.pdf> (aufgerufen 11.09.2025).
- Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA). (2023). Schriftliche Mitteilung von H. Meesenburg auf Anfrage zu Erhöhung von N-Austrägen nach Borkenkäferkalamitäten vom 05.11.2023.
- Parravicini, V., Valkova, T., Haslinger, J., & Saracevic, E. (2015). Reduktionspotenzial bei den Lachgasemissionen aus Kläranlagen durch Optimierung des Betriebes (ReLaKO). *Umweltbundesamt, Wien*.
- Prietz, J., Zimmermann, L., Schubert, A., & Christophel, D. (2016). Organic matter losses in German Alp forest soils since the 1970s most likely caused by warming. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/ngeo2732>.
- Riedel, T., & Hennig, P. (2019). Wald- und Holzbodenfläche unverändert. Kohlenstoffinventur 2017. *AFZ-Der Wald*, 14, 2019. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn061186.pdf.

- Riedel, T., Stürmer, W., Hennig, P., Dunger, K., & Bolte, A. (2019). Kohlenstoffinventur 2017: Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsенke. *AFZ-DerWald*, 14, 2019. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn061187.pdf.
- Ruhrberg, M. (2018). Einsatz von Ammoniak zur Rauchgasreinigung in Kraftwerken. *Dr. Martin Ruhrberg, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW)*.
- Salm van der, C. W., de Vries, G. J., & Reinds, Diese, N. B. (2007). N leaching across European forests: Derivation and validation of empirical relationships using data from intensive monitoring plots. *Forest Ecology and Management*, 238, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.092>.
- Salomon, M., Schmid, E., Volkens, A., Hey, C., Holm-Müller, K., & Foth, K. (2016). Towards an integrated nitrogen strategy for Germany. *Environmental Science & Policy*, 55, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.10.003>
- Siemens. (2024). *Siemens BlitzAtlas*. <https://press.siemens.com/de/de/feature/wo-blitzt-es-am-haeufigsten>
- Souci, S.W., Fachmann, W., & Kraut, H. (2018). *Die Zusammensetzung der Lebensmittel – Nährwert-Tabellen*. Online-Datenbank. <https://www.sfk.online> (aufgerufen 13.12.2024).
- SRU. (2015). *Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem*. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), Sondergutachten.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>.
- StoffBilV. (2017). *Verordnung über den Umgang mit Nährstoffen im Betrieb und betriebliche Stoffstrombilanzen (Stoffstrombilanzverordnung - StoffBilV) vom 14. Dezember 2017 (BGBl. I S. 3942; 2018 I S. 360)*.
- Sutton, M. A., Dragosits, U., Tang, Y. S., & Fowler, D. (2000). Ammonia emissions from non-agricultural sources in the UK. *Atmospheric Environment*, 34(6), 855–869. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00362-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00362-3).
- Sutton, M. A., Howard, C. A., Erisman, J. W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven, H., & Grizzetti, B. (2011). *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects, and Policy Perspectives*. Cambridge University Press.
- Thünen-Institut. (2015). Projekt Einschlagsrückrechnung. <https://www.enen.de/index.php?id=2404&L=0>.
- Thünen-Institut (2016a): Holzeinschlag und Rohholzverwendung. Datentabelle. https://www.thuenen.de/media/institute/wf/HM_div.Statistik>Dateien/Dateien - Bilanzen - Tabellen/Wald/Einschlagrueckrechnung/de_tab_Einschlagrueckrechnung_Einschlag_und_Verwendung.pdf (aufgerufen 13.12.2024).
- Thünen-Institut. (2016b). *Dritte Bundeswaldinventur (2012)*. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn060229.pdf (aufgerufen 11.09.2025).
- Thünen-Institut. (2023). Holzeinschlag und Rohholzverwendung der Bundesrepublik Deutschland in der Zeitreihe der Jahre 1995 bis 2022 in Mio. m³. https://www.thuenen.de/media/institute/wf/HM_div.Statistik>Dateien/Dateien - Bilanzen - Tabellen/Wald/Einschlagrueckrechnung/de_tab_Einschlagrueckrechnung_Einschlag_und_Verwendung.pdf (aufgerufen 12.03.2024).
- Tiemeyer, B., Borraz, E. A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., et al. (2016). High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global Change Biology*, 22, 4134–4149. <https://doi.org/10.1111/gcb.13303>.
- UBA. (2009a). *Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen*. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- UBA. (2009b). *Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoff-Emissionsminderungsstrategie*. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, 112 S.

UBA. (2015). *Reaktiver Stickstoff in Deutschland - Ursachen, Wirkungen, Maßnahmen*. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, 53 S.

UBA. (2017b). *Quantifizierung der landwirtschaftlich verursachten Kosten zur Sicherung der Trinkwasserversorgung*. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, UBA-texte 43/2017, 250 S.

UBA. (2021a). *Daten zur Umwelt. Indikatorenbericht 2020*. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-zur-umwelt> (aufgerufen 20.12.2024).

UBA. (2021b). *Stickstoff - Element mit Wirkung. Ein integrierter Zielwert setzt einen neuen Rahmen*. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, Hintergrundpapier, 30 S.

UBA. (2022). Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2020. *Umweltbundesamt (UBA)*, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_01_12_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v1.0.xlsx (aufgerufen 25.04.2024).

UBA. (2022b). Grenzüberschreitende Abfallstatistik. Zeitreihen Import/Export nach Abfallarten. *Umweltbundesamt (UBA)*, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/grenzueberschreitende-abfallverbringung/grenzueberschreitende-abfallstatistik> (aufgerufen 25.04.2024).

UBA. (2023). Deutsches Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (PRTR). PRTR-Gesamtdatenbestand (Stand 08.12.2023), SQLite-Datenbank. *Umweltbundesamt (UBA)*, Dessau-Roßlau. <https://www.thru.de/thrude/downloads/> (aufgerufen 11.01.2024).

UNFCCC. (2022). National Inventory Report Germany. 2022 Common Reporting Format (CRF) Table (Submission date: 08.04.2022). <https://unfccc.int/documents/461716> (aufgerufen 29.04.2024).

VCI. (2021). *Chemiewirtschaft in Zahlen 2021*. Verband der chemischen Industrie (VCI), Frankfurt a.M.

Vos, C., Rösemann, C., Haenel, H. D., Dämmgen, U., Döring, U., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Freibauer, A., Döhler, H., Schreiner, C., Osterburg, B., Fuß, R. (2022). Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2020. *Report on methods and data (RMD) Submission 2022*. Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2020. *Thünen-Institut*, Braunschweig, *Thünen Report* 91.

Well, R., Rösemann, C., Haenel, D., Flessa, H. (2016). Größenordnung der N₂-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden. *Stellungnahme für das BMEL. Thünen-Institut*, Braunschweig, 8 S.

Zinnbauer, M., Eysholdt, M., Henseler, M., Herrmann, F., Kreins, P., Kunkel, R., Nguyen, H., Tetzlaff, B., Venohr, M., Wolters, T., Wendland, F. (2023). Quantifizierung aktueller und zukünftiger Nährstoffeinträge und Handlungsbedarfe für ein deutschlandweites Nährstoffmanagement – AGRUM-DE. *Thünen-Institut*, Braunschweig, *Thünen Rep* 108, 454 S. DOI:10.3220/REP1684153697000

A Anhang

Tabelle A-1: Gegenüberstellung der N-Flüsse (alle Pools) des ersten (Mittel 2010 - 2014) und zweiten (Mittel 2015 – 2020) nationalen N-Inventars Deutschland (in kt N a⁻¹) und Bemerkungen zu Veränderungen.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
Pool Atmosphäre (AT)					
AT - Emissionen in die Atmosphäre					
EF.EC-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus Verbrennungsprozessen in der Energiewirtschaft	NO _x	94,3	81,1	
		N ₂ O	5,9	5,0	
		NH ₃	2,2	1,1	
EF.EC-AT-N2	Oxidation/Reduktion zu N ₂ während Verbrennung	N ₂	1.417,6	1.114,8	a
EF.IC-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der industriellen Energieerzeugung	NO _x	29,4	27,5	
		N ₂ O	1,7	1,8	
		NH ₃	0,8	0,4	
EF.TR-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus Verbrennungsprozessen in Verkehr und Transport	NO _x	159,6	161,8	
		N ₂ O	3,0	3,6	
		NH ₃	11,5	9,6	
EF.OE-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der sonstigen Energieerzeugung	NO _x	44,0	39,6	
		N ₂ O	1,1	1,0	
		NH ₃	1,9	1,6	
MP.NC-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der chemischen Industrie	NO _x	8,7	1,3	
		N ₂ O	2,0	1,4	
		NH ₃	7,5	5,0	
MP.OP-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der sonstigen industriellen Produktion	NO _x	7,7	16,1	
		N ₂ O	0,9	0,6	
		NH ₃	4,3	2,7	
HS.MW-AT-gasEm	NO _x und N ₂ O-Emissionen aus dem Siedlungsbereich (LULCC)b	N ₂ O	0,4	0,6	
HS.HB-AT-gasEm	NH ₃ -Ausscheidung durch den Menschen	NH ₃	1,4	1,4	
AG.AH-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement, Stall und Lagerung von tier. Ausscheidungen)	NO _x	n.b.	n.b.	
		N ₂ O	8,3	6,4	
		NH ₃	219,4	210,7	
AG.SM-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der Bodenproduktion (Ausbringung von mineralischen und organischen Düngemitteln sowie aus Bewirtschaftung von organischen Böden)	NO _x	35,3	35,4	b
		N ₂ O	56,6	43,7	
		NH ₃	336,1	258,6	

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
AG.SM-AT-den	Denitrifikation aus bewirtschafteten landwirtschaftlich genutzten Mineral-Böden sowie organischen Böden	N ₂	233,9	232,3	c
AG.BG-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der Biogaserzeugung	NO _x	0,7	0,5	
		N ₂ O	0,6	0,6	
		NH ₃	2,5	2,7	
FS.FO-AT-gasEm	NO _x und N ₂ O-Emissionen aus Waldflächen (LULCC)	NO _x	n.b.	0,1	
		N ₂ O	0,3	0,4	
FS.FO-AT-gasEm	Denitrifikation in Waldböden	N ₂	12,2	12,2	c
FS.OL-AT-gasEm	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen	N ₂	0,7	0,4	
FS.WL-AT-gasEm	NO _x und N ₂ O-Emissionen aus Feuchtgebieten (LULCC)	NO _x	n.b.	n.b.	
		N ₂ O	0,0	0,1	
FS.WL-AT-gasEm	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N ₂	n.b.	1,6	
WS.SW-AT-gasEM	Gasförmige Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NO _x	0,1	0,2	
		N ₂ O	0,6	0,7	
		NH ₃	2,9	2,9	
WS.WW-AT-gasEM	NO _x und N ₂ O-Emissionen aus Kläranlagen	NO _x	n.b.	n.b.	
		N ₂ O	1,1	1,0	
WS.WW-AT-gasEm	Denitrifikation in Kläranlagen	N ₂	211,0	259,6	
HY.SW-AT-gasEm	Retention in Oberflächengewässern	N ₂	75,9	85,7	
HY.GW-AT-gasEm	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N ₂	572,0	635,9	d, e
RW-AT-gasNN	Grenzüberschreitender Import von gasförmigen N-Verbindungen	NH _y	103,7	97,6	
		NO _x	114,7	103,3	

AT - Depositionen aus der Atmosphäre

AT-HS.MW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Siedlungsflächen	NH _y	40,0	49,0	
		NO _x	19,5	23,5	
AT-AG.SM-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NH _y	185,2	162,0	
		NO _x	90,9	92,6	
AT-AG.SM-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in landwirtschaftlich genutzten Flächen	N(org)	194,6	216,5	
AT-FS.FO-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Waldflächen	NH _y	118,9	132,2	
		NO _x	62,2	68,1	
AT-FS.FO-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden	N(org)	110,5	110,8	c

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
AT-FS.OL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf seminatürliche Flächen	NH _y	5,3	5,0	
		NO _x	2,7	3,0	
AT-FS.OL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in semi-natürlichen Flächen	N(org)	2,0	1,2	c
AT-FS.WL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition in Feuchtgebiete	NH _y	0,6	0,7	
		NO _x	0,3	0,4	
AT-FS.WL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Feuchtgebieten	N(org)	0,7	0,8	
AT-HY.SW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Oberflächengewässer	NH _y	3,3	5,8	
		NO _x	1,5	2,6	
AT-HY.CW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Küstengewässer	NH _y	1,3	3,2	
		NO _x	0,6	1,4	
AT-RW-gasN	Grenzüberschreitender Export von gasförmigen N-Verbindungen	NH _y	248,8	253,7	
		NO _x	280,5	243,2	
Pool Energiewirtschaft und Verkehr (EF)					
Sub-Pool Energieerzeugung (EF.EC)					
EF.EC-fuel	Förderung Energieträger (Inland)	N(org)	694,4	503,2	f
EF.EC-gasEM	Bildung von thermischem NO _x	NO _x	30,0	26,3	c
MP.FP-EF.EC-crop	Biomasse zur Erzeugung von Kraftstoffen	N(org)	123,7	100,2	
MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Rauchgas-Entstickung	NH ₃	85,0	62,7	
FS.FO-EF.EC-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung - Großfeuerungsanlagen	N(org)	3,6	3,4	
RW-EF.EC-fuel	Import von Energieträgern	N(org)	1735,0	800,6	g
EF.EC-AT-N2	Oxidation/Reduktion zu N ₂ während Verbrennung	N ₂	1417,6	1146,2	a
EF.EC-SINK-N2	Nr-Schwund bei der Rohöl-Verarbeitung	N ₂	818,0	(entf.)	h
EF.EC-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus Verbrennungsprozessen in der Energiewirtschaft	NH ₃	2,2	1,1	
		NO _x	94,3	81,1	
		N ₂ O	5,9	5,0	
EF.EC-EF.IC-fuel	Energieträger zur Verwendung in der Industrie	N(org)	167,8	170,3	
EF.EC-EF.TR-fuel	Energieträger zur Verwendung in Verkehr und Transport	N(org)	31,7	31,7	
EF.EC-EF.OE-fuel	Fossile Energieträger zur Verwendung in Haushalt, Gewerbe, Handel	N(org)	17,2	9,4	
EF.EC-MP.FP	Rückstände aus der Erzeugung von Kraftstoffen aus Biomasse	N(org)	123,7	100,2	

Flusscode	Beschreibung	N-Spe- zies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemer- kung
EF.EC-MP.NC-fuel	Mineralölprod. als Rohstoffe der chem. Industrie	N(org)	32,1	23,7	
EF.EC-WS.SW-waste	Abfallstoffe aus der Erzeugung von Energieträgern und Raffinerieprodukten	N(org)	1,6	6,0	
EF.EC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Energiewirtschaft	N(ges)	8,1	6,0	e
EF.EC-RW-fuel	Export v. Energieträgern und Mineralölprodukten	N(org)	62,7	58,0	
Sub-Pool Industrielle Energieerzeugung (EF.IC)					
EF.EC-EF.IC-fuel	Energieträger zur Verwendung in der Industrie	N(org)	167,8	170,3	
EF.IC-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus Verbrennungsprozessen in der industriellen Energieerzeugung	NH ₃	0,8	0,4	
		NO _x	29,4	27,5	
		N ₂ O	1,7	1,8	
Sub-Pool Transport und Verkehr (EF.TR)					
EF.EC-EF.TR-fuel	Energieträger zur Verwendung in Verkehr und Transport	N(org)	31,7	31,7	
EF.EC-gasEM	Bildung von thermischem NOx	NO _x	159,6	161,8	c
EF.TR-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus Verbrennungsprozessen in Verkehr und Transport	NH ₃	11,5	9,6	
		NO _x	159,6	161,8	
		N ₂ O	3,0	3,6	
Sub-Pool Sonstige Energieerzeugung (EF.OE)					
EF.EC-EF.OE-fuel	Fossile Energieträger zur Verwendung in Haushalt, Gewerbe, Handel	N(org)	17,2	9,4	
EF.EC-gasEM	Bildung von thermischem NOx	NO _x	2,2	2,0	c
FS.FO-EF.OE-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung - Privathaushalte	N(org)	14,6	11,7	
EF.OE-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der sonstigen Energieerzeugung	NH ₃	1,9	1,6	
		NO _x	44,0	39,6	
		N ₂ O	1,1	1,0	
Pool Industrielle Produktion (MP)					
Sub-Pool Nahrungs- und Futtermittelindustrie (MP.FP)					
EF.EC-MP.FP	Rückstände aus der Erzeugung von Kraftstoffen aus Biomasse	N(org)	123,7	100,2	
AG.AH-MP.FP-animProd	Tierische Marktprodukte (zur außerlandwirtschaftlichen Verwendung)	N(org)	413,5	495,2	
AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte, außerlandwirtschaftliche Verarbeitung zur stofflichen Nutzung	N(org)	1.134,0	1.022,9	

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
AG.AH-MP.FP-fish	Erzeugung Aquakultur und Binnenfischerei	N(org)	0,7	0,8	
HY.CW-MP.FP-fish	Meeresfischerei (Anlandungen)	N(org)	6,3	7,6	
RW-MP.FP-food	Einfuhr der Ernährungswirtschaft	N(org)	890,0	905,9	
MP.FP-EF.EC-crop	Biomasse zur Erzeugung von Kraftstoffen	N(org)	123,7	100,2	
MP.FP-MP.OP-crop	Landwirtsch. Erzeugnisse als industrielle Rohstoffe	N(org)	34,2	33,9	
MP.FP-HS.HB-food	Nahrungsmittel für die Humanernährung	N(org)	599,4	656,6	
MP.FP-HS.HB-feed	Futtermittel für Heimtiere (Hunde und Katzen)	N(org)	68,0	86,9	
MP.FP-AG.AH-feed	Futtermittel aus industrieller Herstellung (inländische Erzeugung und Importe)	N(org)	1.102,2	1.060,8	
MP.FP-AG.SM-orgFert	Tiermehl zur technischen Verwendung (Dünger)	N(org)	12,8	9,1	
MP.FP-AG.SM-seed	Zufuhr mit Saat- und Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	22,2	20,0	
MP.FP-AG.BG-cosub	Biogas-Co-Substrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	31,4	44,1	
MP.FP-WS.SW-fuel	Tiermehl zur thermischen Verwertung (Verbrennung)	N(org)	18,8	17,1	
MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Nahrungs- und Futtermittelindustrie	N(ges)	36,3	32,8	e
MP.FP-RW-food	Ausfuhr der Ernährungswirtschaft	N(org)	635,2	688,2	

Sub-Pool Chemische Industrie (MP.NC)

AT-MP.NC-NH3	Ammoniak-Synthese (Haber-Bosch-Verfahren), incl. Kalkstickstoff-Synthese	NH ₃	2.694,6	2.627,3	
EF.EC-MP.NC-fuel	Mineralölprod. als Rohstoffe der chem. Industrie	N(org)	32,1	23,7	
RW-MP.NC-prod	Import N-haltige chemische Produkte	N(ges)	2.262,2	2.247,3	
MP.NC-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der chemischen Industrie	NO _x	8,7	1,3	
		N ₂ O	2,0	1,4	
		NH ₃	7,5	5,0	
MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Rauchgas-Entstickung	NH ₃	85,0	62,7	
MP.NC-MP.OP-prod	Chemische Grundstoffe und Erzeugnisse zur Herstellung von Konsumgütern	N(org)	1.356,0	1.439,1	

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
MP.NC-HS.MW-minFert	Mineraldünger zur Verwendung im Privatbereich	N(ges)	45,0	30,0	
MP.NC-AG.SM-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	N(ges)	1619,0	1537,2	
MP.NC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Stickstoff-Chemie	N(ges)	68,6	64,8	
MP.NC-RW-prod	Export von Produkten der Stickstoff-Chemie	N(ges)	1.797,1	1.756,8	

Sub-Pool Sonstige Industrie (MP.OP)

MP.FP-MP.OP-crop	Landwirtsch. Erzeugnisse als industrielle Rohstoffe	N(org)	34,2	34,0	
MP.NC-MP.OP-prod	Chemische Grundstoffe und Erzeugnisse zur Herstellung von Konsumgütern	N(org)	1.356,0	1.439,1	
FS.FO-MP.OP-wood	Holzentnahme zur stofflichen Nutzung	N(org)	27,2	26,4	
WS.SW-MP.OP-waste	Recycling von Abfallstoffen (stoffliche Verwertung)	N(org)	349,2	361,2	
RW-MP.OP-prod	Import Konsumgüterindustrie	N(org)	(311,4)	258,4	i
MP.OP-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der sonstigen industriellen Produktion	NO _x	7,7	16,1	
		N ₂ O	0,9	0,6	
		NH ₃	4,3	2,7	
MP.OP-HS.MW-prod	Verbrauch von Konsumgütern	N(org)	165,8	149,6	
MP.OP-WS.SW-waste	Abfälle aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	48,4	58,6	
MP.OP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der sonstigen industriellen Produktion	N(ges)	21,5	24,6	
MP.OP-RW-prod	Export Konsumgüterindustrie	N(org)	(308,9)	185,1	i

Pool Konsum und Ernährung (HS)

Sub-Pool Menschliche Ernährung (einschl. Heimtiere) (HS.HB)

MP.FP-HS.HB-food	Nahrungsmittel für die Humanernährung	N(org)	599,4	656,6	
MP.FP-HS.HB-feed	Futtermittel für Heimtiere (Hunde und Katzen)	N(org)	68,0	86,9	
HY.GW-HS.HB-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO ₃	15,4	18,3	
HS.HB-AT-gasEm	NH ₃ -Ausscheidung durch den Menschen	NH ₃	1,4	1,4	
HS.HB-WS.SW-waste	Abfälle aus Haushalten (menschliche Ernährung)	N(org)	127,9	133,3	

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser aus Haushalten (Exkremente)	N(ges)	349,9	343,7	e
Sub-Pool Konsumgüter (HS.MW)					
AT-HS.MW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Siedlungsflächen	NH _y	40,0	49,0	
		NO _x	19,5	23,5	
MP.NC-HS.MW-minFert	Mineraldünger zur Verwendung im Privatbereich	N(ges)	45,0	30,0	
MP.OP-HS.MW-prod	Verbrauch von Konsumgütern	N(org)	165,8	149,6	
WS.WW-HS.MW-sludge	Klärschlamm zur Verwertung bei landbaulichen Maßnahmen und sonstige Verwertung	N(ges)	31,2	18,2	
HS.MW-AT-gasEm	NO _x und N ₂ O-Emissionen aus dem Siedlungsbereich (LULCC)b	N ₂ O	0,4	0,6	
HS.MW-WS.SW-waste	Abfall von Konsumgütern	N(org)	45,9	50,8	
HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser aus dem Siedlungsbereich (befestigte Flächen)	N(ges)	30,0	5,7	e
HS.MW-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Siedlungs- und Verkehrsflächen	NO ₃	36,0	41,8	
Pool Landwirtschaft (AG)					
Sub-Pool Tierproduktion (AG.AH)					
MP.FP-AG.AH-feed	Futtermittel aus industrieller Herstellung (inländische Erzeugung und Importe)	N(org)	1.102,2	1.060,8	
AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung – Bodenproduktion	N(org)	1.009,4	920,4	
AG.AH-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement, Stall und Lagerung von tier. Ausscheidungen)	NO _x	n.b.	n.b.	
		N ₂ O	8,3	6,4	
		NH ₃	219,4	210,7	
AG.AH-MP.FP-animProd	Tierische Marktprodukte (zur außerlandwirtschaftlichen Verwendung)	N(org)	413,5	495,2	
AG.AH-MP.FP-fish	Erzeugung Aquakultur und Binnenfischerei	N(org)	0,7	0,8	
AG.AH-AG.SM-manure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Wirtschaftsdünger, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	737,9	891,3	
AG.AH-AG.BG-manure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Gärsubstrat, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	181,0	212,8	

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
Sub-Pool Bodenproduktion (AG.SM)					
AT-AG.SM-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NH _y	185,2	162,0	
		NO _x	90,9	92,6	
AT-AG.SM-Nfix	Biologische N-Fixierung in landwirtschaftlich genutzten Flächen	N(org)	194,6	216,5	
MP.FP-AG.SM-orgFert	Tiermehl zur technischen Verwendung (Dünger)	N(org)	12,8	9,1	
MP.FP-AG.SM-seed	Zufuhr mit Saat- und Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	22,2	20,0	
MP.NC-AG.SM-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	N(ges)	1.619,0	1.537,2	
AG.AH-AG.SM-manure	Wirtschaftsdünger aus innerbetriebl. Erzeugung in der Bodenproduktion, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	737,9	891,3	
AG.BG-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	382,5	552,7	
HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Zufuhr mit Beregnungswasser	NO ₃	1,6	2,5	
WS.SW-AG.SM-orgFert	Düngung mit organischen Düngemitteln – Kompost (aus Siedlungsabfällen)	N(org)	23,4	26,0	
WS.WW-AG.SM-sludge	Klärschlamm zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(ges)	24,9	17,6	
RW-AG.SM-manure	Import von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung	N(ges)	14,3	11,7	
AG.SM-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der Ausbringung von mineral. und organ. Düngemitteln sowie Bewirtschaftung organischer Böden	NO _x	35,3	35,4	b
		N ₂ O	56,6	43,7	
		NH ₃	336,1	258,6	
AG.SM-AT-den	Denitrifikation aus der Bewirtschaftung von landwirtschaftlich genutzten Mineral-Böden sowie organischen Böden	N ₂	233,9	232,3	c
AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte, außerlandwirtschaftliche Verarbeitung zur stofflichen Nutzung	N(org)	1.134,0	1.022,9	
AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung	N(org)	1.009,4	920,4	
AG.SM-AG.BG-crop	Pflanzliche Biomasse aus innerbetrieblicher Erzeugung als Biogas-Substrat	N(org)	246,2	303,1	
AG.SM-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen	NO ₃	757,1	804,9	e, j
AG.SM-HY.SW-runoff	N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen	NO ₃	113,7	79,3	e
		N(org)	8,2	6,2	e

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
Sub-Pool Biogasproduktion (AG.BP)					
MP.FP-AG.BG-cosub	Biogas-Co-Substrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	31,4	44,1	
AG.AH-AG.BG-manure	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugtem Wirtschaftsdünger, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	181,0	212,8	
AG.SM-AG.BG-crop	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugter pflanzlicher Biomasse	N(ges)	246,2	303,1	
AG.BG-AT-gasEm	Gasförmige Emissionen aus der Biogaserzeugung	NO _x	0,7	0,5	
		N ₂ O	0,6	0,6	
		NH ₃	2,5	2,7	
AG.BG-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	382,5	552,7	
Pool Wald und semi-natürliche Flächen (FS)					
Sub-Pool Wald (FS.FO)					
AT-FS.FO-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Waldflächen	NH _y	118,9	132,2	
		NO _x	62,2	68,1	
AT-FS.FO-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden	N(org)	110,5	110,8	^c
RW-FS.FO-wood	Import von Rohholz	N(org)	4,3	4,4	
SOURCE-FS.FO	Änderung (Abbau) N-Bodenvorrat	N(org)	292,9	292,8	^c
FS.FO-AT-gasEm	Denitrifikation in Waldböden	N ₂	12,2	12,2	^c
FS.FO-AT-gasEm	N ₂ O und NO _x -Emissionen aus Waldflächen (LULCC)	NO _x	n.b.	0,1	
		N ₂ O	0,3	0,4	
FS.FO-EF.EC-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung - Großfeuerungsanlagen	N(org)	3,6	3,4	
FS.FO-EF.OE-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung - Privathaushalte	N(org)	14,6	11,7	
FS.FO-MP.OP-wood	Holzentnahme zur stofflichen Nutzung	N(org)	27,2	26,4	
FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldböden	NO ₃	60,8	61,0	^c
FS.FO-RW-wood	Export von Rohholz	N(org)	2,2	3,7	
FS.FO-SINK	Zunahme Holzbestand	N(org)	16,8	26,5	
Sub-Pool semi-natürliche Flächen (FS.OL)					
AT-FS.OL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf semi-natürliche Flächen	NH _y	5,3	5,0	
		NO _x	2,7	3,0	

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
AT-FS.OL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in semi-natürlichen Flächen	N(org)	2,0	1,2	^c
FS.OL-AT-gasEm	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen	N ₂	0,7	0,4	
FS.OL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO ₃	3,3	2,0	
Sub-Pool Feuchtgebiete (FS.WL)					
AT-FS.WL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Feuchtgebiete	NH _y	0,6	0,7	
		NO _x	0,3	0,4	
AT-FS.WL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Feuchtgebieten	N(org)	0,7	0,8	^c
AG.SM-FS.WL-NO3	N-Eintrag mit dem Zufluss von Oberflächenabfluss (Run-off) aus angrenzenden Ackerflächen	NO ₃	n.b.	n.b.	
FS.WL-AT-gasEm	N ₂ O und NO _x -Emissionen aus Feuchtgebieten (LULCC)	NO _x	n.b.	n.b.	
		N ₂ O	0,0	0,1	
FS.WL-AT-gasEm	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N ₂	n.b.	1,6	
Pool Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung (WS)					
Sub-Pool Abfallwirtschaft (WS.SW)					
EF.EC-WS.SW-waste	Abfallstoffe aus der Erzeugung von Energieträgern und Raffinerieprodukten	N(org)	1,6	6,0	
MP.FP-WS.SW-fuel	Tiermehl zur thermischen Verwertung (Verbrennung)	N(org)	18,8	17,1	
MP.OP-WS.SW-waste	Abfälle aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	48,4	58,6	
HS.HB-WS.SW-waste	Abfälle aus Haushalten (menschliche Ernährung)	N(org)	127,9	133,3	
HS.MW-WS.SW-waste	Abfall von Konsumgütern	N(org)	45,9	50,8	
WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(ges)	23,9	19,2	
WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur thermischen Entsorgung (Verbrennung)	N(ges)	72,4	78,0	
RW-WS.SW-waste	Import von Abfallstoffen	N(org)	9,1	10,9	
WS.SW-AT-gasEM	Gasförmige Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NO _x	0,1	0,2	
		N ₂ O	0,6	0,7	
		NH ₃	2,9	2,9	
WS.SW-AT-N2	Verbrennung von Abfall	N ₂	181,6	193,9	

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
WS.SW-AT-sludge	Thermische Entsorgung (Verbrennung) von Klärschlamm	N ₂	72,4	78,0	
WS.SW-AT-N2	Tiermehl zur thermischen Verwertung	N ₂	18,8	17,1	
WS.SW-MP.OP-waste	Recycling von Abfallstoffen (stoffliche Verwertung)	N(org)	349,2	361,2	
WS.SW-AG.SM-orgFert	Kompost (aus kommunalem Grünabfällen) zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(org)	23,4	26,0	
WS.SW-SINK	Ablagerung (Deponierung) von Abfall	N(org)	61,6	66,9	
WS.SW-SINK	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(org)	23,9	20,4	
WS.SW-RW-waste	Export von Abfallstoffen	N(org)	2,8	5,7	
Sub-Pool Abwasserentsorgung (WS.WW)					
HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser aus Haushalten (Exkrementen)	N(ges)	349,9	343,7	e
HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser aus dem Siedlungsbereich (befestigte Flächen)	N(ges)	30,0	5,7	e
EF.EC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Energiewirtschaft	N(ges)	8,1	6,0	e
MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Nahrungs- und Futtermittelindustrie	N(ges)	36,3	32,8	e
MP.NC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Stickstoff-Chemie	N(ges)	68,6	64,8	e
MP.OP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der sonstigen industriellen Produktion	N(ges)	21,5	24,6	e
WS.WW-AT-gasEM	NO _x und N ₂ O-Emission aus Kläranlagen	NO _x N ₂ O	n.b. 1,1	n.b. 1,0	
WS.WW-AT-gasEm	Denitrifikation in kommunalen und nichtöffentlichen Kläranlagen	N ₂	211,0	259,6	
WS.WW-HS.MW-sludge	Klärschlamm zur Verwertung bei landbaulichen Maßnahmen und sonstige Verwertung	N(ges)	31,2	18,2	
WS.WW-AG.SM-sludge	Klärschlamm zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(ges)	24,9	17,6	
WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(ges)	23,9	19,2	
WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur thermischen Entsorgung (Verbrennung)	N(ges)	72,4	78,0	

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
WS.WW-HY.SW-sewage	N-Eintrag in Oberflächengewässer aus Kläranlagen und Kanalisationsystem (Siedlungswasserwirtschaft)	N(ges)	114,3	104,5	e
Pool Gewässer (HY)					
Sub-Pool Grundwasser (HY.GW)					
HS.MW-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Siedlungs- und Verkehrsflächen	NO ₃	36,0	41,8	
AG.SM-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen	NO ₃	757,1	804,9	e, j
FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldböden	NO ₃	60,8	61,0	c
FS.OL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus seminatürlichen Flächen	NO ₃	3,3	2,0	c
HY.GW-AT-gasEm	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N ₂	572,0	635,9	e, j
HY.GW-HS.HB-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO ₃	15,4	18,3	
HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Zufuhr mit Beregnungswasser	NO ₃	1,6	2,5	
HY.GW-HY.SW-	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit grundwasserbürtigem Abfluss	NO ₃	268,2	253,0	e
Sub-Pool Oberflächengewässer (HY.SW)					
AT-HY.SW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Oberflächengewässer	NH _y	3,3	5,8	
		NO _x	1,5	2,6	
AG.SM-HY.SW-runoff	N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen	NO ₃	113,7	79,3	e
		N(org)	8,2	6,2	e
WS.WW-HY.SW-sewage	N-Eintrag in Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft	N(ges)	114,3	104,5	e
HY.GW-HY.SW-	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit grundwasserbürtigem Abfluss	NO ₃	268,2	253,0	e
RW-HY.SW-discharge	N(gesamt)-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss (von Oberliegern)	N(ges)	67,3	34,8	
HY.SW-AT-gasEm	Retention in Oberflächengewässern	N ₂	75,9	85,7	
HY.SW-RW-load	N(gesamt)-Fracht im grenzüberschreitenden Abfluss (Abgabe an Unterlieger)	N(ges)	313,4	255,4	
HY.SW-HY.CW-load	N(gesamt)-Fracht im Zufluss in die Küstenmeere	N(ges)	187,2	126,1	

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss 2010 - 2014	N-Fluss 2015 - 2020	Bemerkung
Sub-Pool Küstengewässer (HY.CW)					
AT-HY.CW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Küstengewässer	NH _y	1,3	3,2	
AT-HY.CW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Küstengewässer	NO _x	0,6	1,4	
HY.SW-HY.CW-load	N(gesamt)-Fracht im Zufluss in die Küstenmeere	N(ges)	187,2	126,1	
HY.CW-MP.FP-fish	Meeresfischerei (Anlandungen)	N(org)	6,3	7,6	
Grenzüberschreitende N-Flüsse					
Import					
RW-AT-gasNN	Grenzüberschreitender Import von gasförmigen N-Verbindungen	NH _y	103,7	97,6	
		NO _x	114,7	103,3	
RW-EF.EC-fuel	Import von Energieträgern	N(org)	1.735,0	800,6	g
RW-MP.FP-food	Einfuhr der Ernährungswirtschaft	N(org)	890,0	905,9	
RW-MP.NC-prod	Import N-haltige chemische Produkte	N(ges)	2.262,2	2.247,3	
RW-MP.OP-prod	Import Konsumgüterindustrie	N(org)	(311,4)	258,4	i
RW-AG.SM-manure	Import von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung	N(ges)	14,3	11,7	
RW-FS.FO-wood	Import von Rohholz	N(org)	4,3	4,4	
RW-WS.SW-waste	Import von Abfallstoffen	N(org)	9,1	10,9	
RW-HY.SW-discharge	N(gesamt)-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss (von Oberliegern)	N(ges)	67,3	34,8	
Export					
AT-RW-gasN	Grenzüberschreitender Export von gasförmigen N-Verbindungen	NH _y	248,8	253,7	
		NO _x	280,5	243,2	
EF.EC-RW-fuel	Export v. Energieträgern und Mineralölprodukten	N(org)	62,7	58,0	
MP.FP-RW-food	Ausfuhr der Ernährungswirtschaft	N(org)	635,2	688,2	
MP.NC-RW-prod	Export von Produkten der Stickstoff-Chemie	N(ges)	1.797,1	1.756,8	
MP.OP-RW-prod	Export Konsumgüterindustrie	N(org)	(308,9)	185,1	i
FS.FO-RW-wood	Export von Rohholz	N(org)	2,2	3,7	
WS.SW-RW-waste	Export von Abfallstoffen	N(org)	2,8	5,7	
HY.SW-RW-load	N(gesamt)-Fracht im grenzüberschreitenden Abfluss (Abgabe an Unterlieger)	N(ges)	313,4	255,4	

^a Rückgang des Einsatzes von fossilen Brennstoffen in der Stromerzeugung.

^b Rückgang des Einsatzes mineralischer N-Dünger sowie der NH_3 -Freisetzung aus der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (Verpflichtung zur Einarbeitung innerhalb von vier Stunden nach Ausbringung gemäß Düngeverordnung 2017).

^c Ansatz bzw. Wert aus dem 1. Inventar unverändert übernommen (teilweise geringfügige Änderung aufgrund geänderten Flächenbezug).

^d Denitrifikation wird jetzt teilweise intern im Modell MoRE berechnet (s. a. Kap. 10.1).

^e Mittel 2016 - 2018 (Modell MoRE).

^f Rückgang der Braunkohleförderung (zum Einsatz in der Stromerzeugung).

^g Rückgang betrifft vor allem den N-Fluss mit N-Import mit Rohöl aufgrund geänderter Annahme zum N-Gehalt im Rohöl (s. Anmerkung ^h).

^h Annahme zum N-Gehalt im Rohöl wurde von 1,0 % (Inventar 2010 - 2014) auf 0,1 % (Inventar 2015 - 2020) geändert, dadurch tritt zwischen dem N-Fluss mit Rohöl-Import und N-Menge in den daraus hergestellten Produkten nur noch eine geringfügige Differenz auf, die im vorliegenden Inventar nicht als eigener N-Fluss aufgeführt wird (s. a. Kap. 2.3).

ⁱ In der Berechnung der N-Flüsse mit dem Import und Export von N-haltigen Erzeugnissen der Konsumgüterindustrie (Tabelle 5-8) im ersten nationalen N-Inventar ist nachträglich ein Fehler entdeckt worden, die korrigierten Werte betragen Import 273,8 kt N a⁻¹, Export 247,1 kt N a⁻¹. Dadurch verändert sich auch der Importüberschuss des Subpools "Sonstige Industrielle Produktion" (MP.OP) im ersten Inventar von 2,5 auf 26,7 kt N a⁻¹. Infolge dessen verändern sich weiterhin auch nachträglich alle weiteren Positionen des ersten nationalen Inventars, in welche die beiden N-Flüsse eingehen. Diese Änderungen sind allerdings nur geringfügig im Vergleich zur Größenordnung der betreffenden Summen bzw. Salden insgesamt und werden daher hier nicht weiter dargestellt.

^j Denitrifikation wird jetzt teilweise intern im Modell MoRE berechnet (s. a. Kap. 10.1).