

TEXTE

64/2020

Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010-2014 (DESTINO Bericht 2)

Abschlussbericht

TEXTE 64/2020

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 51 2000
FB000254/2

Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010-2014 (DESTINO Bericht 2)

von

Martin Bach, Uwe Häußermann, Laura Klement, Lukas Knoll, Lutz Breuer
Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement, Universität
Gießen

Tatyana Weber, Stefan Fuchs
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Jürg Heldstab, Judith Reutimann, Bettina Schächli
INFRAS AG, Zürich

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement,
Karlsruher Institut für Technologie, INFRAS AG

Abschlussdatum:

April 2019

Redaktion:

Fachgebiet II 4.3 Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme
Markus Geupel

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2020

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). In einer nationalen N-Bilanzierung (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 der transportierten bzw. umgesetzten Stoffmenge und deren mittlerem N-Gehalt berechnet. Insgesamt werden für Deutschland rund 150 N-Flüsse beschrieben, die Unsicherheit der Ergebnisse wird in vier Stufen von „sehr gering“ bis „hoch“ eingestuft. In Deutschland werden jährlich 6275 kt N_r a⁻¹ in Umlauf gebracht (Mittelwert 2010 bis 2014), davon 43 % über die Ammoniak-Synthese. Die inländische Förderung und der Import von N-haltigen fossilen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle, Rohöl) tragen 2335 kt N a⁻¹ dazu bei. Mit der Stickstoff-Fixierung als einzigem natürlichen Prozess werden 308 kt N 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 2711 kt N a⁻¹ wieder in N_2 überführt. In Gewässern, Böden und Kläranlagen werden 1107 kt N a⁻¹ denitrifiziert. Über die Atmosphäre und den Gewässerabfluss exportiert Deutschland netto 745 kt N 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 kt N a⁻¹ berechnet wird. Der NNB zufolge werden in Deutschland jährlich 1627 kt N_r 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 6275 kt N_r is introduced into the nitrogen cycle every year (mean value from 2010 to 2014), of which 43% is by ammonia synthesis. Domestic extraction of nitrogenous fossil fuels (lignite, coal, crude oil) and imports contribute ca. 2335 kt N a⁻¹. Natural nitrogen fixation converts 308 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 2711 kt N a⁻¹ being transformed to N_2 . In waters, soils, and wastewater treatment plants, denitrification leads to the release of 1107 kt N a⁻¹ as molecular nitrogen. Via the atmosphere and hydrosphere, Germany exports net 745 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

1627 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

Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung	15
Summary	19
1 Einleitung	22
2 Flüsse reaktiven Stickstoffs in Deutschland - Übersicht	24
2.1 Stickstoff-Pools, Sub-Pools und N-Flüsse	24
2.2 Ermittlung der N-Flüsse.....	28
2.3 Unsicherheitsbereich	29
3 Atmosphäre (AT)	30
3.1 Landnutzung Deutschland.....	31
3.2 N ₂ O- und NO _x -Emissionen in die Atmosphäre	35
3.2.1 N ₂ O- und NO _x -Emissionen	35
3.2.2 NO _x -Bildung durch Blitze	36
3.3 NH ₃ -Emissionen in die Atmosphäre	36
3.4 Atmosphärische NH _y - und NO _x -Deposition	37
3.5 Import und Export von NH _y und NO _x	38
3.6 Zusammenfassung der N-Flüsse Atmosphäre (AT)	39
3.7 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Atmosphäre.....	41
3.8 Unsicherheitsbetrachtung N-Flüsse Atmosphäre (AT).....	42
4 Energiewirtschaft und Verkehr (EF)	44
4.1 Energiewirtschaft (EF.EC)	45
4.1.1 Herkunft und Verwendung fossiler Energieträger (XX-EF.EC-fuel, EF.EC-XX-fuel)	45
4.1.2 Bildung von thermischem NO _x	48
4.1.3 Herstellung von Kraftstoffen aus Biomasse (MP.FP-EF.EC-fuel)	49
4.1.4 Ammoniak-Verbrauch für die Rauchgas-Entstickung (MP.NC-EF.EC-prod)	50
4.1.5 Oxidation/Reduktion von Stickstoff bei Verbrennung und Entstickung (EF.EC-SINK-N2)	51
4.2 Übrige Sub-Pools (Industrielle Energieerzeugung EF.IC, Transport und Verkehr EF.TR, Sonstige Energieerzeugung EF.OE)	52
4.3 Zusammenfassung der N-Flüsse Energiewirtschaft und Verkehr (EF)	52
4.4 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Energiewirtschaft und Verkehr	54
4.5 Unsicherheitsbetrachtung der N-Flüsse Energiewirtschaft und Verkehr (EF)	56

5	Industrielle Produktion (MP)	57
5.1	Nahrungs- und Futtermittelindustrie (MP.FP)	59
5.1.1	Nahrungsmittel Humanernährung (MP.FP-HS.HB-food)	59
5.1.2	Futtermittel für Heimtiere (MP.FP-HS.HB-feed)	60
5.1.3	Landwirtschaftliche Pflanzen als industrielle Rohstoffe (MP.FP-MP.OP-crop).....	60
5.1.4	Verwertung tierischer Nebenprodukte.....	61
5.1.5	Import und Export der Ernährungswirtschaft (RW-MP.FP-prod, MP.FP-RW-prod)	62
5.2	Stickstoff-Chemie (MP.NC).....	63
5.2.1	Ammoniak-Synthese (SOURCE-MP.NC-NH3).....	63
5.2.2	Produktion, Import und Export chemischer Erzeugnisse (MP.NC-MP.OP-prod, RW-MP.NC-prod, MP.NC-RW-prod)	63
5.2.3	Stickstoff-Mineraldünger (MP.NC-AG.SM-minFert; MP.NC-HS.MV-minFert)	64
5.3	Sonstige industrielle Produktion (MP.OP)	67
5.4	Zusammenfassung der N-Flüsse industrielle Produktion (MP).....	67
5.5	Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Industrielle Produktion	70
5.6	Unsicherheitsbetrachtung der N-Flüsse industrielle Produktion (MP).....	71
6	Ernährung und Konsum (HS)	75
6.1	Menschliche Ernährung (HS.HB)	76
6.2	Konsumgüter (HS.MW)	76
6.3	Zusammenfassung der N-Flüsse Ernährung und Konsum (HS).....	77
6.4	Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Ernährung und Konsum	78
6.5	Unsicherheitsbetrachtung der N-Flüsse im Pool Ernährung und Konsum (HS).....	79
7	Landwirtschaft (AG)	80
7.1	Tierproduktion (AG.AH)	83
7.1.1	Landwirtschaftliche Tierproduktion (XX.XX-AG.AH, AG.AH-XX.XX)	83
7.1.2	Aquakultur und Binnenfischerei (AG.AH-fish)	83
7.2	Bodenproduktion (AG.SM).....	84
7.2.1	Bodenproduktion (XX.XX-AG.SM, AG.SM-XX.XX).....	84
7.2.2	NO ₃ -Zufuhr mit Beregnungswasser (HY.GW-AG.SM-irrig).....	85
7.2.3	Denitrifikation in landwirtschaftlich genutzten Mineral- und organischen Böden (AG.SM-AT-N2)..	85
7.2.4	Eintrag in Gewässer (AG.SM-HY.GW-leach, AG.SM-HY.GW-runoff).....	85
7.3	Biogasproduktion (AG.BP).....	86
7.4	Zusammenfassung der N-Flüsse Landwirtschaft (AG)	87
7.5	Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Landwirtschaft.....	89
7.5.1	Bilanzierung der N-Flüsse in der Landwirtschaft	89

7.5.2	N-Bodenvorrat und Vorratsänderung.....	90
7.5.3	Vergleich mit der N-Bilanzierung des BMEL.....	91
7.5.4	Anmerkungen zum National Nitrogen Budget Annex 3.....	91
7.6	Unsicherheitsbetrachtung N-Flüsse Landwirtschaft (AG).....	92
8	Wald und semi-natürliche Flächen (FS).....	96
8.1	Wald (FS.FO).....	97
8.1.1	Waldfläche	97
8.1.2	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden (AT-FS.FO-Nfix).....	98
8.1.3	Denitrifikation in Waldflächen (AT.FS.FO.N2).....	98
8.1.4	Nitratauswaschung aus Waldböden (FS.FO-HY.SW-leach).....	98
8.1.5	Holzentnahme und Holzverwendung (FS.FO-MP.OP-wood, FS.FO-EF.OE-wood, FS.FO-RW-wood, RW-FS.FO-wood).....	99
8.1.6	Bilanzierung und Vorratsänderungen Wald (Holzbestand und Waldböden).....	100
8.1.6.1	N-Bodenvorrat und Vorratsänderung.....	100
8.1.6.2	Holzbestand und Bestandsänderung.....	101
8.1.6.3	Bilanzierung für Sub-Pool Wald.....	102
8.2	Semi-natürliche Flächen (FS.OL).....	102
8.2.1	Biologische Stickstofffixierung in semi-natürlichen Flächen (AT-FS.OL-Nfix).....	103
8.2.2	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen (AT-FS.OL-N2).....	103
8.2.3	Nitratauswaschung aus semi-natürlichen Flächen (FS.OL-HY.SW-leach).....	103
8.3	Feuchtgebiete (FS.WL).....	103
8.3.1	Biologische Stickstofffixierung in Feuchtgebieten (AT-FS.WL-Nfix).....	104
8.3.2	N-Eintrag mit dem Zufluss von Oberflächenabfluss (AG.SM-FS.WL-runoff).....	104
8.3.3	Denitrifikation in Feuchtgebieten (AT-FS.WL-N2).....	104
8.3.4	Nitratauswaschung aus Feuchtgebieten (FS.WL-HY.SW-leach).....	104
8.4	Zusammenfassung der N-Flüsse Wald und semi-natürliche Flächen (FS).....	104
8.5	Unsicherheitsbetrachtung N-Flüsse Wald und semi-natürliche Flächen (FS).....	106
9	Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung (WS).....	109
9.1	Abfallwirtschaft (WS.SW).....	110
9.1.1	Aufkommen an Abfällen (XX.XX-WS.SW-waste).....	111
9.1.2	Verbleib der Abfälle (WS.SW-XX.XX-waste).....	113
9.1.3	Import und Export von Abfällen (RW-WS.SW-waste, WS.SW-RW-waste).....	116
9.2	Abwasserentsorgung (WS.WW).....	117
9.2.1	Abwasser aus Haushalten, Industrie (Direkt- und Indirekteinleiter) und von den versiegelten Flächen (EF.EC-WS.WW-sewage, MP.XX-WS.WW-sewage, HS.XX-sewage).....	117

9.2.2	Klärschlammanfall und Verwertung (WS.WW-HS.MW-sludge, WS.WW-AG.SM-sludge, WS.WW-WS.SW-sludge)	118
9.2.3	N-Eintrag in die Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft	119
9.2.4	Denitrifikation in kommunalen und nichtöffentlichen Kläranlagen (WS.WW-AT-N2)	120
9.3	Zusammenfassung der N-Flüsse Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung (WS)	120
9.4	Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung ...	122
9.5	Unsicherheitsbetrachtung der N-Flüsse Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung (WS)	124
10	Gewässer (HY)	127
10.1	Grundwasser (HY.GW)	128
10.1.1	Nitratauswaschung (AG.XX-HY.GW-leach, FS.XX-HY.GW-leach)	128
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)	130
10.2	Oberflächengewässer (HY.SW) und Küstengewässer (HY.CW).....	131
10.2.1	Eintrag in Oberflächengewässer aus Landwirtschaftsflächen (AG.SM-HY.SW-runoff).....	131
10.2.2	Denitrifikation (Retention) in Oberflächengewässern und Küstengewässern (HY.SW-AT-N2, HY.CW-AT-N2)	131
10.2.3	Grenzüberschreitende Zuflüsse und Abflüsse (RW-HY.SW-discharge, HY.SW-RW-discharge)	131
10.2.4	Meeresfischerei (HY.CW-MP.FP-fish).....	132
10.3	Zusammenfassung der N-Flüsse Gewässer (HY)	133
10.4	Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Gewässer	134
10.5	Unsicherheitsbetrachtung der N-Flüsse Gewässer (HY)	134
11	Grenzüberschreitende N-Flüsse (RW)	137
12	Darstellung der N-Flüsse mit STAN	140
13	Übersicht und Bilanzierung der N-Flüsse Deutschland	149
14	Fazit und Schlussfolgerungen	154
15	Danksagung	157
16	Quellenverzeichnis	158

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 12-1:	Stickstoff-Pools, Sub-Pools und N-Flüsse der nationalen N-Bilanzierung Deutschland.	140
Abbildung 12-2:	Pool „Atmosphäre“ (AT, Atmosphere) mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen.	141
Abbildung 12-3:	Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ (EF, Energy and Fuels) mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen.....	142
Abbildung 12-4:	Pool „Industrielle Produktion“ (MP, Materials and Products) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende N-Flüsse.	143
Abbildung 12-5:	Pool „Ernährung und Konsum“ (HS, Humans and Settlements) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende N-Flüsse.....	144
Abbildung 12-6:	Pool „Landwirtschaft“ (AG, Agriculture) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende N-Flüsse.....	145
Abbildung 12-7:	Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“ (FS, Forest and Semi-natural Vegetation) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende, quantitativ relevante N-Flüsse.	146
Abbildung 12-8:	Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“ (WS, Waste) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende N-Flüsse.....	147
Abbildung 12-9:	Pool „Gewässer“ (HY, Hydrosphere) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende N-Flüsse.....	148
Abbildung 13-1:	Anteile nach Stickstoff-Spezies und nach Emittentengruppen an der Gesamtemission reaktiven Stickstoffs aus anthropogenen Quellen in Luft (NO _x , NH ₃ , N ₂ O) und Oberflächengewässer (NO ₃), Mittel 2010 - 2014.	153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Gliederung und Bezeichnungen der Pools der Bilanzierung der Stickstoffflüsse in Deutschland sowie in der Vorlage der ECE (2013).	25
Tabelle 2-2:	Gliederung und Bezeichnungen der Sub-Pools der Bilanzierung der Stickstoffflüsse in Deutschland, Einteilung und Bezeichnungen nach ECE.	26
Tabelle 2-3:	Kurzbezeichnungen der Matrices bzw. Transportprozesse in der Nomenklatur der N-Fluss-Codes.	27
Tabelle 2-4:	Unsicherheitsbereiche der Berechnung der N-Flüsse	29
Tabelle 3-1:	Eingehende (Pool(in)) und ausgehende (Pool(ex)) N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“	30
Tabelle 3-2:	CORINE Land Cover Nutzungsklassen, gruppiert nach IPCC-Landnutzungs-kategorien und Zuordnung der PINETI-3 Rezeptortypen.	33
Tabelle 3-3:	Flächenangaben der Nutzungsarten nach verschiedenen Informationsquellen.	34
Tabelle 3-4:	N ₂ O- und NO _x -Emissionen in Deutschland nach Quellbereichen (Sektoren), Mittel 2010 – 2014	35
Tabelle 3-5:	NH ₃ -Emissionen in Deutschland, Mittel 2010 - 2014.	36
Tabelle 3-6:	Spezifische Depositionsraten reaktiven Stickstoffs pro Hektar berechnet anhand der realen Landnutzungsverteilung, Mittel 2010 – 2014.	37
Tabelle 3-7:	N-Flüsse mit der atmosphärischen N-Deposition, Mittel 2010 – 2014.	38
Tabelle 3-8:	Import und Export von reduzierten (NH _y) und oxidierten (NO _x) atmosphä-rischen N-Verbindungen nach EMEP Source-Receptor-Tables, Mittel 2010 – 2014.	38
Tabelle 3-9:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“, Mittel 2010 – 2014.	39
Tabelle 3-10:	Bilanzierung der reaktiven N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“ (ohne N-Flüsse mit Denitrifikation), Mittel 2010 – 2014.	41
Tabelle 3-11:	Unsicherheiten der Berechnung der N-Flüsse für Pool „Atmosphäre“	42
Tabelle 4-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Energiewirt-schaft und Verkehr“	44
Tabelle 4-2:	Energiebilanz der Bundesrepublik (Auszug für fossile N-haltige Energieträger) - zusammengefasste und z.T. vereinfachte Ergebnisse und Zuordnung zu N-Flüssen, Mittel 2010 - 2014.	46
Tabelle 4-3:	N-Flüsse mit der Einfuhr von Rohöl und Mineralölprodukten sowie den aus Rohöl hergestellten Mineralölprodukten (Umwandlungsbilanz), Mittel 2010 – 2014.	47
Tabelle 4-4:	Anteil des thermischen NO _x am insgesamt bei der Verbrennung gebildeten NO _x	48
Tabelle 4-5:	Anbauflächen, Erträge und N-Fluss mit nachwachsenden Rohstoffen zur Herstellung von Kraftstoffen, Mittel 2012 - 2014.	49

Tabelle 4-6:	Abschätzung der N _r -Mengen, die mit der Verbrennung von fossilen Energieträgern und Holz (in Großfeuerungsanlagen) und der Rauchgas-Entstickung zu N ₂ oxidiert bzw. reduziert werden, Mittel 2010 – 2014.	51
Tabelle 4-7:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“, Mittel 2010 – 2014.	52
Tabelle 4-8:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse (ohne landwirtschaftliche Produkte ^a) im Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“, Mittel 2010 - 2014.	54
Tabelle 4-9:	Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“.	56
Tabelle 5-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Industrielle Produktion“	57
Tabelle 5-2:	Stickstoff-Fluss mit dem Verbrauch von Nahrungsmitteln, Mittel 2010 - 2014; nur zusammengefasste Produktgruppe dargestellt.	59
Tabelle 5-3:	Stickstoff-Fluss mit Futtermitteln für Hunde und Katzen, Mittel 2012 - 2014.	60
Tabelle 5-4:	Stickstoff-Fluss mit dem Anbau von landwirtschaftlichen Pflanzen als industrielle Rohstoffe (ohne Rohstoffe für Kraftstoffe), Mittel 2012 – 2014.	61
Tabelle 5-5:	Verwendung tierischer Nebenerzeugnisse - Proteine (Mittel 2011 - 2014) und Zuordnung zu N-Flüssen	61
Tabelle 5-6:	Import und Export der Ernährungswirtschaft (ohne Futtermittel) und Netto-Import Futtermittel, Mittel 2012 – 2014.	62
Tabelle 5-7:	Produktion, Import und Export von Erzeugnissen der Stickstoff-Chemie, Mittel 2010 – 2014.	65
Tabelle 5-8:	Produktion, Import und Export von N-haltigen Erzeugnissen der Konsumgüterindustrie, Mittel 2010 – 2014.	67
Tabelle 5-9:	Eingehende und ausgehende N-Mengen der N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Industrielle Produktion“, Mittel 2010 – 2014.	68
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 2010 - 2014.	70
Tabelle 5-11:	Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Industrielle Produktion“	72
Tabelle 6-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Ernährung und Konsum“.	75
Tabelle 6-2:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Ernährung und Konsum“, Mittel 2010 – 2014.	77
Tabelle 6-3:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse (ohne landwirtschaftliche Produkte) im Pool „Ernährung und Konsum“, Mittel 2010 - 2014.	78
Tabelle 6-4:	Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Ernährung und Konsum“	79
Tabelle 7-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Landwirtschaft“	81

Tabelle 7-2:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse im Sub-Pool „Tierproduktion“ (Landwirtschaft ohne Binnenfischerei und Aquakultur), Mittel 2010 - 2014.....	83
Tabelle 7-3:	N-Flüsse der Stickstoffbilanzierung für Sub-Pool „Bodenproduktion“, Mittel 2010 - 2014.	84
Tabelle 7-4:	N-Flüsse der Stickstoffbilanzierung für Sub-Pool „Biogasproduktion“, Mittel 2010 - 2014.	86
Tabelle 7-5:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Landwirtschaft“, Mittel 2010 – 2014.	87
Tabelle 7-6:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Pool „Landwirtschaft“, Mittel 2010 – 2014.	89
Tabelle 7-7:	Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Landwirtschaft“.....	93
Tabelle 8-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“.....	96
Tabelle 8-2:	Waldfläche (in 1000 ha) nach Waldspezifikation, 3. Bundeswaldinventur 2012.....	97
Tabelle 8-3:	Literaturergebnisse zur Nitratauswaschung unter Waldflächen.....	98
Tabelle 8-4:	Berechnung der jährlichen N-Flüsse mit der Entnahme und Verwendung sowie dem Import und Export von Holz, Mittel 2010 - 2014.	100
Tabelle 8-5:	Mittelwert, Standardfehler und Median der jährlichen Stickstoff-Vorratsänderung im Auflagehumus und im Boden der Wälder in Deutschland, Veränderung gem. Ergebnis der zweiten Bodenzustandserhebung Wald (BZE II, 2006 - 2008) im Vergleich zur BZE I (1987 - 1993).	101
Tabelle 8-6:	Holzvorrat (2012) und Änderung des Vorrats 2012 gegenüber 2002 im Wald nach Bundeswaldinventur 2012.	101
Tabelle 8-7:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse sowie Vorratsänderungen im Sub-Pool „Wald“, Mittel 2010 - 2014.....	102
Tabelle 8-8:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“, Mittel 2010 – 2014.....	105
Tabelle 8-9:	Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“.	107
Tabelle 9-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“.....	109
Tabelle 9-2:	Aufkommen an Abfällen (Auszug) und Zuordnung der Herkunft zu vier Sub-Pools, Mittel 2010/2012/2014.	112
Tabelle 9-3:	Verbleib der Abfälle, Zuordnung zu drei N-Flüssen, Mittel 2010 - 2014.....	114
Tabelle 9-4:	N-Flüsse mit dem Import und Export von zustimmungspflichtigen Abfallstoffen, Mittel 2010 – 2014.	116
Tabelle 9-5:	N-Anfall im Abwasser (Schmutzwasser) aus Haushalten, von versiegelten Flächen und von industriellen Einleitern.....	118
Tabelle 9-6:	Klärschlamm Entsorgung insgesamt aus öffentlicher und nichtöffentlicher Abwasserbehandlung, Jahr 2013 und Zuordnung zu N-Flüssen.....	119

Tabelle 9-7:	Stickstoff-Einträge in Oberflächengewässer mit dem Ablauf aus kommunalen Kläranlagen sowie aus dem Kanalisationssystem (Siedlungswasserwirtschaft) nach MoRE-Modellierung, Mittel 2010 – 2014.	120
Tabelle 9-8:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“, Mittel 2010 – 2014.....	121
Tabelle 9-9:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Sub-Pool „Abfallwirtschaft“, Mittel 2010 – 2014.....	123
Tabelle 9-10:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Sub-Pool „Abwasserentsorgung“, Mittel 2010 – 2014.	124
Tabelle 9-11:	Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Abfall- und Abwasserentsorgung“.....	125
Tabelle 10-1:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Gewässer“.....	127
Tabelle 10-2:	N-Flüsse mit der Nitratauswaschung in den Sub-Pool „Grundwasser“.....	129
Tabelle 10-3:	Ausgehende N-Flüsse aus dem Sub-Pool „Grundwasser“.....	130
Tabelle 10-4:	Stickstoff-Einträge in Oberflächengewässer aus der Landwirtschaft über lateralen Stofftransport nach MoRE-Modellierung, Mittel 2010 – 2014.	131
Tabelle 10-5:	N-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss und Abfluss oberirdischer Gewässern, Mittel 2010 – 2014.....	132
Tabelle 10-6:	Eingehende und ausgehende N-Flüsse der Sub-Pools im Pool „Gewässer“, Mittel 2010 – 2014.	133
Tabelle 10-7:	Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Pool „Gewässer“, Mittel 2010 – 2014.....	134
Tabelle 10-8:	Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Gewässer“.....	135
Tabelle 11-1:	Importe und Exporte (eingehende und ausgehende N-Flüsse) im Pool „Grenz-überschreitende N-Flüsse“, Mittel 2010 – 2014.....	137
Tabelle 11-2:	Saldierung der Importe und Exporte von reaktivem Stickstoff nach Pools bzw. Sub-pools, Mittel 2010 – 2014.....	138
Tabelle 13-1:	Erzeugung und Entsorgung von reaktivem Stickstoff in Deutschland, Mittel 2010 – 2014.	149
Tabelle 13-2:	Gegenüberstellung der Summen der eingehenden und ausgehenden der N-Flüsse in den Pools bzw. Sub-Pools, Mittel 2010 – 2014.....	151
Tabelle 13-3:	Mengen und Anteile der wichtigsten N-Verbindungen und Emittentengruppen an der Gesamtemission reaktiven Stickstoffs aus anthropogenen Quellen in Luft und Oberflächengewässer, Mittel 2010 – 2014.	152

Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
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
NO₂	Stickstoffdioxid (als Atmosphäregas); Nitrit (im Gewässer gelöst)
NO₃	Nitrat
NO_x	Oxidierete gasförmige Stickstoffverbindungen (NO, N ₂ O)

N_r	Reaktive Stickstoffverbindungen allgemein
N(org)	Stickstoffhaltige organische Verbindungen (Proteine, N-haltige Chemikalien)
N(ges)	N-Gesamtmenge (Summe aller N-Spezies)
PINETI	Pollutant Input and Ecosystem Impact (Modellierung der atmosphärischen Deposition)
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 (UN Wirtschaftskommission für Europa)
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. 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 jeweils den Mittelwert der Jahre 2010 bis 2014 wieder. Die Unsicherheit der N-Flüsse wird in vier Stufen von „sehr gering“ bis „hoch“ eingestuft.

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 2016a), die NH_3 -Emissionen werden dem CLTRAP-Report entnommen (UBA 2017b) und die NH_y - und NO_x -Deposition gehen auf PINETI-3 (Schaap et al. 2018) zurück. In der Summe wurden in Deutschland 1053 kt N a^{-1} emittiert und 532 kt N a^{-1} aus der Atmosphäre deponiert, im Saldo der grenzüberschreitenden N-Flüsse haben 311 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 2017). Die Zufuhr von 2662 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 in hohem Maße - bis auf das dabei gebildete NO_x - zu N_2 umgewandelt wird. Dieser Annahme konnte jedoch im Rahmen des Projekts nicht weiter nachgegangen werden, so dass die Bilanzierung für diesen Pool als sehr 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 2684 kt N a⁻¹. Die Produktionsmengen sind verschiedenen Tabellen des Statistischen Jahrbuchs Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMEL 2016) zu entnehmen. Im Zentrum des Sub-Pools „Stickstoff-Chemie“ steht die Synthese von 2695 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 1274 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 2017a). 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 1356 kt N a⁻¹, während der N-Fluss mit den daraus hergestellten Konsumgütern zum Absatz an Endverbraucher nach Produktionserhebung nur mit 166 kt N a⁻¹ berechnet wird.

Der Pool „Ernährung und Konsum“ beinhaltet die N-Flüsse von zusammen 985 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 Ernährungs- 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. Zufluss und Abfluss im Pool „Landwirtschaft“ werden mit 3320 kt N a⁻¹ gleichgesetzt, indem die N-Austräge in das Gewässersystem als Differenz zwischen den Einträgen insgesamt und den übrigen kalkulierten Austrägen berechnet werden. 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 6500 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 allerdings in der N-Bilanzierung 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-Institut (2016a) zurück. Im Vergleich zu den übrigen Pools ist der N-Zufluss in diesen Bereich mit rund 310 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 345 kt N a⁻¹ als Input und 732 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 1167 kt N a⁻¹ entfallen 857 kt N a⁻¹ auf die Nitratauswaschung, von fast 90 % 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 in der ungesättigten Zone (unterhalb der Wurzelzone), im Grundwasser und in Oberflächengewässern von zusammen 648 kt N a⁻¹ berechnet. Mit der N-Fracht im Gewässerabfluss verlassen 500 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 ist nahezu ausgeglichen (ohne Berücksichtigung des N-Fluss mit Energieträgern). Dieser Saldo setzt sich allerdings aus zwei gegensätzlichen Komponenten zusammen. Mit dem atmosphärischen Transport von gasförmigen N_r-Verbindungen sowie mit dem N-Abfluss in den Gewässern „exportiert“ Deutschland mit 744 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). Diesem Netto-Export im Bereich der N_r-Flüsse in der Biosphäre steht ein Netto-Import von 745 kt N a⁻¹ mit Erzeugnissen der Nahrungs- und Futtermittelindustrie sowie der chemischen Industrie gegenüber (Energieträger ausgeklammert). Die Landwirtschaft weist zwar einen Futtermittelimport von 405 kt N a⁻¹ auf, was rund 20 % 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 269 kt N a⁻¹ auftritt.

Mit Hilfe der nationalen Bilanzierung der N-Flüsse soll 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 6275 kt „frischem“ N_r hat die Ammoniak-Synthese (Haber-Bosch-Verfahren) mit rund 43 % 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. 192 kt N a⁻¹ thermisches NO_x gebildet. Auf die Stickstoff-Fixierung in Böden als einzigem natürlichen Prozess gehen mit 308 kt N_r a⁻¹ nur rund 5 % 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 Rauchgasentstickungsanlagen 1893 kt N_r a⁻¹ mit der Verbrennung von Energieträgern und weitere 818 kt N_r a⁻¹ mit der Verarbeitung von Rohöl in N₂ überführt werden. Trotzdem besteht hier weiteres Minderungspotential. Die Denitrifikation in Gewässern, Böden und Kläranlagen von zusammen 1107 kt N a⁻¹ trägt als natürlicher Vorgang mit rund 24 % zum Verschwinden von N_r bei. Mit chemischen Produkten und mit Erzeugnissen der Nahrungs- und Futtermittelindustrie werden zusammen 744 kt N a⁻¹ (netto) importiert, während über die Gewässer und die Atmosphäre (netto) zusammen 745 kt N a⁻¹ an Nachbarstaaten bzw. in die Küstenmeere abgegeben werden, so dass der Import-Export-Saldo insgesamt ausgeglichen ist.

Zwischen der Erzeugung (einschließlich Förderung und Netto-Import) von jährlich 6275 kt reaktivem Stickstoff und dem Abbau von 4648 kt N tritt eine Differenz von 1627 kt N auf. Diese Differenz von rund 26 % (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 nationalen N-Flussbilanzierung 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 1600 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). 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 are given as the annual mean over the period 2010 to 2014. The uncertainty of the N-flows is rated in four levels from “very low” to “high”.

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 2016a), for NH_3 emissions from the CLRTAP Report (UBA 2017b), and figures for NH_y and NO_x depositions are based on national deposition modelling (Schaap et al. 2018). In total, 1053 kt N a⁻¹ were emitted in Germany and 532 kt N a⁻¹ deposited from the atmosphere. Net trans-boundary N-flows of 311 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 2017). The inflow of 2662 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 2684 kt N a⁻¹. The production quantities are provided in various tables of the Annual Statistics on Food, Agriculture and Forests (BMEL 2016). The main contributor in the “Nitrogen Chemistry” sub-pool is the synthesis of 2695 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 (1274 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 2017a). 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 1356 kt N a⁻¹, whereas the N-flow with the resultant consumer goods for sale to consumers according to the Production Survey is only 166 kt N a⁻¹.

The “Humans and Settlements” pool contains N-flows totalling 985 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-outflows 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. The outflows from the “Agriculture” pool are set equal to the inflows of 3320 kt N a⁻¹, with the N-outflows into the hydrosphere taken to be the difference between the total inflows and the other calculated outflows. Including the N-flows between the sub-pools “Animal husbandry”, “Soil management”, and “Biogas production”, the nitrogen turnover within agriculture is about 6500 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 (2016a). The N-inflow of 310 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 345 kt N a⁻¹ as input and 732 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 1167 kt N a⁻¹, nitrate leaching accounts for 857 kt N a⁻¹, with nearly 90 % 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 648 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, 500 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 imports and exports are almost balanced (not including the N-flow with fuels). With the atmospheric transport of gaseous N_r and the N-outflow in its waters, Germany “exports” 744 kt N a⁻¹ of reactive nitrogen (NO_3^- , NH_3 , 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). Against this export of N_r flows in the biosphere, there is a net import of 745 kt N a⁻¹ with products from food and feed processing and the chemical industry (excluding fuels). Agriculture imports in feed account for 405 kt N a⁻¹, corresponding to some 20 % 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 269 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 (N_2). Of the annual total of 6275 kt “fresh” N_r , some 43 % 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 192 kt N a⁻¹ of thermal NO_x . Nitrogen fixation in soils totalling 308 kt N_r a⁻¹, accounts for only about 5 % 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 1893 kt N_r a⁻¹ from the combustion of fuels and a further 818 kt N_r a⁻¹ from the refining of crude oil. However, there remains potential here for further reductions. Denitrification in waters, soils, and wastewater treatment plants totalling 1107 kt N a⁻¹ accounts as a natural process for some 24 % of the conversion of N_r into molecular N_2 . With chemical products and food and feed, 744 kt N a⁻¹ (net) are imported, while 745 kt N a⁻¹ (net) are exported to neighbouring states or coastal seas via hydro-sphere and atmosphere, so that the import-export budget in total is balanced.

Between the production (including extraction and net imports) of 6275 kt of reactive nitrogen annually and the reduction of 4648 kt N, there is a difference of 1627 kt N, 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 1600 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 Grundwasservorkommen und Küstenökosystemen mit Nitrat. Bei den meisten dieser Umweltprobleme sind in Deutschland nach wie vor keine oder nur geringe positive Entwicklungen erkennbar (UBA 2017a).

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-Bilanzen (National Nitrogen Budget, NNB) erarbeitet. Erste Ansätze für Deutschland wurden vom UBA (2009a, 2009b, 2015) vorgestellt.

Mit einer nationalen Bilanzierung der 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 sind dabei von zentraler Bedeutung:

- ▶ *Reaktiver Stickstoff* (N_r) bezeichnet Stickstoff in allen Bindungsformen (N-Spezies), die für Organismen potenziell leicht verfügbar sind: Ammoniak/Ammonium (NH_3/NH_4), Stickstoffoxide (NO , NO_2 , zusammengefasst als NO_x), Distickstoffoxid (N_2O), Nitrat (NO_3) sowie Stickstoff (N_{org}) in vielfältigen organischen Verbindungen in Boden, Pflanzen, Tieren, Nahrungs- und Futtermitteln, industriellen Produkten usw.
- ▶ *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 Bilanzeinheiten, 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 gesamten Bilanzraums (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 (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 (Tab. 2-1), die Sub-Pools durch eine nachgestellte zweibuchstabile ID (Tab. 2-2). Die Berechnungen für Deutschland verwenden die gleichen ID's wie die englischen Vorgaben des NNB Annex 0 (ECE 2013). Von einer weiteren Untergliederung in Sub-Sub-Pools, wie von ECE (2013) vorgeschlagen, wird in der hier vorliegenden NNB aus Gründen der Übersichtlichkeit Abstand genommen.

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 Bedeutung der Endungen „-matrix“ ist in Tab. 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. Tab. 2-1).

Tabelle 2-1: Gliederung und Bezeichnungen der Pools der Bilanzierung 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 die Bilanzierung des Pools erläutert wird.

Pool-ID	Bezeichnung N-Flussschema 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 der vorliegenden Studie lagen die NNB Anhänge für „Energy and Fuels“ (Annex 1) sowie „Waste“ (Annex 5) nur im Entwurf bzw. noch nicht vor.

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

In jedem Kapitel wird einleitend eine Übersicht zu den N-Flüssen des betreffenden Pools gegeben. Diese Tabellen (Tab. 3-1, 4-1 usw.) sind einheitlich aufgebaut: Für jeden Pool bzw. Sub-Pool werden zunächst alle N-Flüsse benannt, 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 Tab. 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 der Bilanzierung der Stickstoffflüsse in Deutschland, Einteilung und Bezeichnungen nach ECE (2013, 2016; z.T. verändert).

Pool-ID	Sub-Pool-ID	Bezeichnung im N-Flussschema 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 Futtermittel-industrie	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.OW) ^b	- entfällt -	Humans and Settlements – Organic World	---
	HS.HB ^c	Menschliche Ernährung und Heimtiere	Humans and Settlements – Human Body	6.1
	HS.MW	Konsumgüter, Wohnen, urbane Gebiete	Humans and Settlements – Material World	6.2
	(HS.PE) ^b	- entfällt -	Humans and Settlements – Non-agricultural animals (pets)	---
AG	AG.AH	Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement)	Agriculture – Animal Husbandry ^d	7.1
	AG.SM	Bodenproduktion	Agriculture – Soil Management	7.2
	AG.BG	Biogaserzeugung	(in NNB Annex 6 kein Sub-Pool def.)	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^e	--	Grenzüberschreitende N-Flüsse (N-Importe und Exporte)	„Rest of the World“, Trans-boundary nitrogen flows	11

^a Abweichende Bezeichnung in ECE (2013) Annex 2: MP.Cl, Industrial Processes - Chemical Industry.^b Integriert in HS.HB^c Definition hier weicht ab von ECE (2013, 2016).^d ECE (2013) definiert weiteren Sub-pool „Manure Management and Storage“, hier in „Animal Husbandry“ integriert.^e „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
-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 nach folgendem Ansatz berechnet:

N-Fluss (kt N a⁻¹) =

Transportierte/umgesetzte Stoffmenge (t Matrix a⁻¹) * mittlerer N-Gehalt in Matrix (kg N t⁻¹) * 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 2010 bis 2014, für welche die N-Flüsse gemittelt 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 2016a, 2017b)
- ▶ Gasförmige Emissionen aus der Landwirtschaft: Thünen Report 46 (Rösemann et al. 2017)
- ▶ Atmosphärische Deposition (NH_y, NO_x): Modell LOTOS-EUROS (UBA-Projekt PINETI-3; Schaap et al. 2018)
- ▶ N-Bilanzierung für die Landwirtschaft: Stickstoffbilanzierung für Deutschland (BMEL 2018)
- ▶ N-Einträge in Oberflächengewässer und Grundwasser: Modell MoRE (Fuchs et al. 2017a).

Die Ermittlung der N-Flüsse bzw. die Aufbereitung und Zuordnung von statistischen Angaben orientiert ist 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 die nationale Bilanz als Ganzes geschlossen sein, das heißt

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

In der Praxis zeigt sich, dass diese Annahme nicht immer 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 Berechnungsgrundlagen für den betreffenden Pool noch Verbesserungsbedarf aufweisen.

Anmerkung: Mit der Ermittlung der Stickstoffflüsse in Deutschland wurde teilweise methodisches Neuland betreten. Als Datengrundlagen zu Materialflüssen und N-Gehalten wurden zahlreiche Statistiken, Tabellenwerke und Berichte ausgewertet, teilweise wurden Annahmen in die Berechnungen ein-

geführt. Trotz größter 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 bereitstehen, die in der vorliegenden Untersuchung aber übersehen worden sind. Die Autorinnen und Autoren sind daher dankbar für Hinweise und Anregungen, die zur Verbesserung der N-Flussbilanzierung Deutschland beitragen.

2.3 Unsicherheitsbereich

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 musste für die vorliegende Untersuchung auf Schätzungen zurückgegriffen werden.

Im NNB Annex 0, Table 5 (ECE 2013) wird für die Charakterisierung von Unsicherheitsbereichen eine vierstufige Unterteilung vorgeschlagen (Tab. 2-4). Dabei wird für jedes Level auch ein quantitativer Unsicherheitsfaktor angegeben; es wird jedoch nicht ausgeführt, wie dieser Faktor statistisch zu interpretieren ist, das heißt ob es sich dabei um eine Minimum-Maximum-Spannbreite, ein Konfidenzintervall, einen relativen Standardfehler oder ein anderes Fehlermaß für den (unbekannten) wahren Wert des betreffenden N-Flusses handelt.

Tabelle 2-4: Unsicherheitsbereiche der Berechnung der N-Flüsse (n. NNB Annex 0, Table 5; veränd.).

Level	Unsicherheitsbereich ^a ca.	Bezeichnung	Beschreibung; Quellen
1	0,9 ... 1,1	Sehr gering	Aktuelle Officialstatistik; Messwerte; Angaben Fachliteratur (referenziert); Werte aus unterschiedlichen Quellen variieren nur wenig
2	0,67 ... 1,5	Gering	Nicht offizielle Statistiken; Industrierichte; Expertenschätzung; Werte aus unterschiedlichen Quellen variieren stärker
3	0,5 ... 2,0	Mittel	Internet (online) Angaben; nicht referenzierte Literaturwerte, Werte aus unterschiedlichen Quellen variieren erheblich
4	< 0,5 ... > 2	Hoch	Auf Annahmen basierte, überschlägige Schätzung; Werte z.T. nur Platzhalterfunktion

^a Semi-quantitative Schätzung der Spannbreite, innerhalb derer der tatsächliche Wert wahrscheinlich liegt (kein Konfidenzintervall o.ä. im statistischen Sinne).

Für die mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse wird in den betreffenden Kapiteln eine Einstufung des Unsicherheits-Levels gemäß Tab. 2-4 vorgenommen. In den meisten Fällen geht dies auf die subjektive Einschätzung der Autoren zurück, nur für wenige Größen können Angaben zur Unsicherheit aus der Literatur entnommen werden.

Anmerkung: Aus Gründen der einheitlichen Zahlendarstellung werden die Werte der N-Flüsse in der vorliegenden Untersuchung grundsätzlich mit einer Dezimalstelle angegeben, unabhängig von der Größenordnung und der Unsicherheit des betreffenden Wertes. Tatsächlich sind Ergebnisse mit „mittlerer“ oder „hoher Unsicherheit“ jedoch bestenfalls auf zwei signifikante Stellen genau.

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. Tab. 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
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_2O -Emission aus der Biogaserzeugung	NO_x , N_2O	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_2O -Emission aus Waldflächen (LULCC)	NO_x , N_2O	3.2.1
FS.FO	AT	FS.FO-AT-N2	Denitrifikation in Waldböden	N_2	8.1.3

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
FS.OL	AT	FS.OL-AT-N2	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen	N2	8.2.2
FS.WL	AT	FS.WL-AT-gasEm	NO _x -, N ₂ O-Emission aus Feuchtgebieten (LULCC)	NO _x , N ₂ O	3.2.1
FS.WL	AT	FS.WL-AT-N2	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N2	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.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	N2	9.2.4
HY.GW	AT	HY.GW-AT-N2	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N2	10.1.2
HY.SW	AT	HY.SW-AT-N2	Denitrifikation in Oberflächengewässern	N2	10.2.2
RW	AT	RW-AT-gasN	Grenzüberschreitender Import von gasförmigen N-Verbindungen	NHy, 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	NHy, NO _x	3.4
AT	AG.SM	AT-AG.SM-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NHy, 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	NHy, NO _x	3.4
AT	FS.FO	AT-FS.FO-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden	N(org)	8.1.2
AT	FS.OL	AT-FS.OL-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf semi-natürliche Flächen	NHy, 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	NHy, 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	NHy, NO _x	3.4
AT	HY.CW	AT-HY.CW-atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Küstengewässer	NHy, NO _x	3.4
AT	RW	AT-RW-gasN	Grenzüberschreitender Export von gasförmigen N-Verbindungen	NHy, 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 Ermittlung der Daten, dem Zeitpunkt (Referenzjahr), dem Maßstab und der räumlichen Auflösung unterscheiden (vgl. Arnold 2015).

Für die vorliegende Untersuchung relevante Quellen sind das Basis-DLM, das LBM-DE2012, die Karte CLC2012 (Einzelheiten u.a. NIR, UBA 2016a) sowie die Flächenstatistik (DESTATIS, versch. J.).

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-DE2012**) werden die im Basis-DLM vorhandenen Landbedeckungs- und Landnutzungsinformationen in ein Klassensystem überführt, das die direkte 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 (Einzelheiten s. www.bkg.bund.de/DE/Ueber-das-BKG/Geoinformation/Fernerkundung/Landbedeckungsmodell/landbedeckungsmodell.html). Die Mindestkartiereinheit und Mindestkartierbreite des LBM-DE betragen 1 ha bzw. 15 m.

Im **CLC2012** (10 ha) werden die Objekte des LBM-DE2012 zu Kartiereinheiten mit einer Mindestgröße von 10 ha zusammengefasst, d.h. Flächen einer Kartiereinheit werden erst ab einer Objektgröße von ca. 10 ha im Datensatz erfasst (mit einer Mindestkartierbreite eines Objektes von 15 m).

Die **Flächenerhebung** nach Art der tatsächlichen Nutzung des Statistischen Bundesamtes wertet jährlich zum 31.12. das Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS®) aus (bis 2015: Automatisiertes Liegenschaftsbuch, ALK), 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 Waldfläche wird unter anderem im Rahmen des Projekts GSE Forest Monitoring mittels Fernerkundungsdaten gesondert ausgewertet (Oehmichen et al. 2011).

Alle vorstehend aufgeführten Informationsquellen zur Flächennutzung bzw. Landbedeckung verwenden unterschiedliche Datengrundlagen sowie Klassifikationssysteme (Begriffsbestimmungen) der Nutzungsarten. Für Auswertungen wie bspw. der Berichterstattung zum Treibhausgas-Emissionsinventar (NIR; UBA 2016a; entspricht den IPCC-Kategorien in Tab. 3-2) oder für die Berechnung der atmosphärischen Deposition in Deutschland (PINETI-3, Schaap et al. 2018) müssen zudem unterschiedliche Flächennutzungs- bzw. Landbedeckungsklassen zusammengefasst werden, woraus weitere Divergenzen zwischen den Flächenangaben der verschiedenen Informationsquellen entstehen.

Tabelle 3-2: CORINE Land Cover Nutzungsklassen, gruppiert nach IPCC-Landnutzungskategorien (NIR, UBA 2016a; Tab. 321) und Zuordnung der PINETI-3 Rezeptortypen.

IPCC-Kategorien CORINE Land Cover Landnutzungsklassen	CLC- Code	Fläche ^b ha	Fläche ^b %	Rezeptor- typ ^a
IPCC-Kategorie Siedlungen		3.376.347	9,32 %	
Städtische Prägung	111, 112	2.485.819	6,86 %	urb
Industrie, Gewerbe, Infrastruktur	121-124	565.287	1,56 %	urb
Abbauflächen, Deponien, Abraumhalden	131-133	90.312	0,25 %	urb
Städtische Grünanlagen, Sport/Freizeitanlagen	141, 142	234.929	0,65 %	grs
IPCC-Kategorie Ackerland		13.926.559	38,43 %	
Ackerland (nicht bewässert)	211	13.586.776	37,49 %	ara
Weinbauflächen	221	123.680	0,34 %	crp
Obst/Beerenobstbestände	222	151.420	0,42 %	crp
Komplexe Parzellenstruktur	242	64.683	0,18 %	ara
IPCC-Kategorie Grünland		6.855.430	18,92 %	
Wiesen und Weiden	231	6.453.952	17,81 %	grs
Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Vegetation von signifikanter Größe	243	88.638	0,24 %	ara/crp ^d
Natürliches Grünland	321	152.012	0,42 %	grs
Heiden und Moorheiden	322	97.070	0,27 %	sem
Sümpfe	411	37.877	0,10 %	dec/wat ^d
Salzwiesen	421	25.881	0,07 %	wat/oth ^d
IPCC-Kategorie Wald		11.077.730	30,57 %	
Laubwälder	311	3.476.917	9,59 %	dec
Nadelwälder	312	5.922.839	16,34 %	cnf
Mischwälder	313	1.453.477	4,01 %	mix
Wald/Strauch Übergangsstadien	324	224.497	0,62 %	sem
IPCC-Kategorie Sonstiges Land		110.765	0,31 %	
Strände, Dünen, Sandflächen	331	16.231	0,04 %	oth
Felsflächen ohne Vegetation	332	11.059	0,03 %	oth
Flächen mit spärlicher Vegetation	333	8.680	0,02 %	oth
Gletscher/Dauerschneegebiet	335	34	0,00 %	wat
Torfmoore	412	74.761	0,21 %	grs/wat ^d
IPCC-Kategorie Feuchtgebiete		584.438	2,46 %	
In der Gezeitenzone liegende Flächen ^c	423	(307.628)	0,85 %	wat
Gewässerläufe	511	75.518	0,21 %	wat
Wasserflächen	512	346.459	0,96 %	wat
Lagunen	521	116.658	0,32 %	wat
Mündungsgebiete	522	45.803	0,13 %	wat
Meer und Ozean ^c	523	(2.007.973)	n.b.	
Summe		36.238.897^e	100 %	

^a Vegetationsklassen (Rezeptortyp) der LOTOS-EUROS-Modellierung der atmosphärischen N-Depositionen (Schaap et al. 2018), Erläuterung s. Tab. 3-6.

^b Flächenangaben gemäß Auswertung CLC2012 (10 ha Mindestobjektgröße).

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

^d Deposition gemittelt aus beiden Rezeptortypen.

^e Summe incl. CLC-Klasse 423, ohne Klasse 523.

Für die Berechnung der flächenbezogenen N-Flüsse in Deutschland werden im Folgenden die Einteilung der Landnutzungen und die Flächenangaben nach CLC2012 (10 ha) (s. Tab. 3-2) herangezogen. Der CLC-Landnutzungs-klassifikation wurde gegenüber anderen Flächennutzungsangaben der Vorzug gegeben, da (i) diese Flächenangaben auch für das Treibhausgas-Emissionsinventar verwendet werden, (ii) die Klassifikation der Flächennutzung auf Satellitenszenen basiert, d.h. auf die tatsächliche Bedeckung/ Nutzung der Erdoberfläche zurückgeht, (iii) die Rezeptortypen der N-Depositionsmodellierung (PINETI-3, Schaap et al. 2018) 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 Tab. 3-2 und 3-3 verdeutlichen zum einen, dass die Definitionen bzw. Abgrenzung von Nutzungsarten zwischen den Klassifikationssystemen nur eingeschränkt vergleichbar sind, und zum anderen, dass die Flächenangaben auch für Nutzungsarten wie „Wald“ oder „Landwirtschaftsfläche“, die nach landläufigem Verständnis eindeutig definiert sind, je nach Datenquelle nicht unerheblich differieren können.

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

CORINE Land Cover (10 ha) (2012)		DESTATIS Flächenerhebung (31.12.2012)		Landwirtschaftszählung (2010)	Bundeswaldinventur (2012)
Landbedeckungs- klasse ^a	Fläche (km ²)	Nutzungsarten	Fläche (km ²)	Fläche (km ²)	Fläche (km ²)
Siedlungs-, Verkehrs-, Deponieflächen	33.763	Gebäude- und Freifläche, Betriebsfläche, Verkehrs- fläche, Fl. anderer Nut- zung (ohne Unland)	50.479		
Landwirtschaftsfläche	203.805	Landwirtschaftsfläche (ohne Moor, Heide)	183.532	167.040 ^b	
Torfmoor	748	Moor	844		
Heiden u. Moorheiden	971	Heide	607		
Wald	110.777	Waldfläche	108.909		114.190 ^c
Gewässer (ohne Torf- moore), ohne Flächen in der Gezeitenzone ^d	5.844	Wasserfläche	8.420		
Natürliches Grünland, Salzwiesen, Sumpf, Ge- hölz, Sonstiges Land	3.404	Unland	4.379		
Summen	359.312		357.169		

^a Vegetationsklassen (Rezeptortyp) der LOTOS-EUROS-Modellierung der atmosphär. N-Deposition (Schaap et al. 2018).

^b Landwirtschaftliche genutzte Fläche nach Landwirtschaftszählung 2010.

^c Waldfläche nach 3. Bundeswaldinventur (Thünen-Institut, 2016c); s.a. Kap 8.1.1.

^d Zur besseren Vergleichbarkeit mit der Flächensumme der Flächenerhebung hier nicht mit aufgeführt.

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 (National Inventory Report, NIR; UBA 2016a) im Common Reporting Format (CRF; download: unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php; Status 14. Oct. 2016). Für Erläuterungen zur Methodik sowie den Datenquellen wird auf den NIR (UBA 2016a) verwiesen. Für die Darstellung der N-Flüsse (Tab. 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-Table 1 bis Table 5 aufgeführten Emissionen in der Bilanzierung der N-Flüsse 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 2010 - 2014 (Quelle: NIR, UBA 2016a, CRF-Tables 1 bis 5; UNFCCC 2016).

Flusscode	Quellbereich (Sektor) der N ₂ O- und NO _x -Emissionen	CRF-Kategorie	N ₂ O kt N a ⁻¹	NO _x ^a kt N a ⁻¹
EF.EC-AT-gasEm	Energiewirtschaft	1.A.1	5,9	94,3
EF.IC-AT-gasEm	Industrielle Energieerzeugung	1.A.2	1,7	29,4
EF.TR-AT-gasEm	Transport und Verkehr	1.A.3	3,0	159,6
EF.OE-AT-gasEm	Sonstige Energieerzeugung	1.A.4, 1.A.5, 1.B	1,1	44,0
MP.NC-AT-gasEm	Chemische Industrie (N-haltige Produkte)	2.B	2,0	8,7
MP.OP-AT-gasEm	Sonstige industrielle Produktion	2.A, 2.C-2.H	0,9	7,7
HS.MW-AT-gasEm	Siedlungsbereich (LULCC) ^b	4.E, 4.H ^c	0,4	n.b.
AG.AH-AT-gasEm	Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdünger- management)	3.A,3.B	8,3	n.b.
AG.SM-AT-gasEm	Bodenproduktion ^d	3.D, 4.B, 4.C, 4.H ^e	56,6	35,3
AG.BG-AT-gasEm	Biogaserzeugung	3.J	0,6	0,7
FS.FO-AT-gasEm	Waldflächen (LULCC)	4.A	0,3	n.b.
FS.OL-AT-gasEm	Feuchtgebiete (LULCC)	4.D	0,0	n.b.
WS.SW-AT-gasEM	Müllverbrennungsanlagen u. Mülldeponien	5.B, 5.C	0,6	0,1
WS.WW-AT-gasEM	Kläranlagen	5.D, 5.E	1,1	n.b.
Summen NO_x- und N₂O-Emissionen^f			82,6	379,9

^a NO_x berechnet als NO₂.

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

^c Position „Settlements“.

^d Einschließlich LULCC von cropland and grassland.

^e Position „Grassland“.

^f 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 (www.industry.siemens.com/services/global/de/portfolio/plant-data-services/blids/seiten/default.aspx), 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 Friedrich et al. (2018) bzw. EEA (2016; Part B: Sectoral guidance chapters - 11.C Other natural sources) ergibt das rund 117 t NO_x-N a⁻¹ in Deutschland (Thomas Gauger, Institute of Navigation, INS, Universität Stuttgart, schriftl. Mittlg. 9.5.2018).

3.3 NH₃-Emissionen in die Atmosphäre

Die Daten zu Ammoniak-Emissionen werden den CLRTAP-Reports entnommen (National emissions reported to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, LRTAP Convention, download www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/national-emissions-reported-to-the-convention-on-long-range-transboundary-air-pollution-lrtap-convention-11; alternativ: cdr.eionet.europa.eu/de/un/clrtap/inventories/envwjmrhg/)(Tab. 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 Rösemann et al. (2017) 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 2010 - 2014 (Quellen: UNFCCC 2017; für Pool Landwirtschaft s.a. Rösemann et al. 2017, Tab. 2.4). Zuordnung der CRF-Kategorien zu Quellbereichen s. Tab. 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	2,2
EF.IC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der Industriellen Energieerzeugung	NH ₃	0,8
EF.TR-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus Transport und Verkehr	NH ₃	11,5
EF.OE-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der sonstigen Energieerzeugung	NH ₃	1,9
MP.NC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus Chemische Industrie (N-haltige Produkte)	NH ₃	7,5
MP.OP- AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus sonstiger industrieller Produktion	NH ₃	4,3
AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus dem Stall und der Lagerung von tierischen Ausscheidungen	NH ₃	219,4
AG.SM-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus der Ausbringung von organischen und mineralischen Düngemitteln (einschl. Weidegang)	NH ₃	336,1
AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der Lagerung von Gärresten	NH ₃	2,5
WS.SW- AT-gasEm	Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NH ₃	2,9
WS.WW- AT-gasEm	Kläranlagen	NH ₃	0,0
Summe NH₃-Emissionen			589,0

3.4 Atmosphärische NH_y- und NO_x-Deposition

Die Daten zur atmosphärischen Deposition von Stickstoff in reduzierter (NH_y) und oxidiert Form (NO_x) in Deutschland werden aus den Ergebnissen des UBA-Projekts PINETI-3 (Pollutant INput and EcosysTem Impact; Schaap et al. 2018) ermittelt. Ausgehend von Emissionsdaten, chemischen Transportmodellen, interpolierten Messdaten zur Nassdeposition sowie hochaufgelösten Landnutzungsdaten wird mit dem Modell LOTOS-EUROS die jährliche Gesamtdeposition von NH_y- (NH₃, NH₄) und NO_x-Verbindungen (HNO₃, NO₃, NO₂, NO, N₂O₅) für verschiedene Rezeptoroberflächen modelliert (Schaap et al. 2018). Die Ergebnisse stehen als Rasterkarten (Auflösung von 1 x 1 km²) der jährlichen Gesamtdeposition (nass, feucht und trocken) von NO₃-N und NH₄-N in den Jahren 2000 bis 2015 für zehn Rezeptortypen zur Verfügung. Den Rezeptortypen wurden die entsprechenden Landnutzungsklassen der Karte CLC2012 zugeordnet (s. Tab. 3-2).

Für die Ermittlung der N-Depositionen in Deutschland wurden in ArcGIS die PINETI-3 Rasterkarten (1 x 1 km²) zur jährlichen N-Deposition der einzelnen Rezeptortypen überlagert mit der Landnutzungskarte CLC_2012 (10 ha Mindestobjektgröße). Für jeden Rezeptortyp wurde der Flächenanteil in jeder Rasterzelle ermittelt und daraus der flächengewichtete Mittelwert der NH_y-, NO_x- und N(ges)-Deposition für die Vegetationsklassen in Deutschland im Mittel 2010 – 2014 berechnet (Tab. 3-6).

Tabelle 3-6: Spezifische Depositionsraten reaktiven Stickstoffs pro Hektar berechnet anhand der realen Landnutzungsverteilung (Rezeptortypen im Modell PINETI-3), Mittel 2010 – 2014 (Schaap et al. 2018; eig. Auswertung).

Rezeptortyp ^a (Landnutzungskategorie bzw. Vegetationsklasse)	Kurz- bezeichnung	Depositionsrates ^b		
		NH _y kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	NO _x kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	N _r gesamt kg N ha ⁻¹ a ⁻¹
Ackerland	ara	9,3	4,4	13,7
Grünland	grs	8,7	4,4	13,1
Dauerkulturen	crp	7,0	5,7	12,8
Semi-natürliche Vegetation	sem	8,4	4,8	13,3
Nadelwald	cnf	11,5	5,9	17,5
Laubwald	dec	9,6	5,0	14,7
Mischwald	mix	10,6	5,8	16,4
Gewässer	wat	7,7	3,6	11,3
Siedlungsfläche	urb	12,1	5,9	18,0
Sonstige Nutzungen	oth	6,6	4,9	11,5

^a Vegetationsklassen (Rezeptortyp) der LOTOS-EUROS-Modellierung der atmosphärischen N-Depositionen (Schaap et al. 2018).

^b Die Depositionsraten entsprechend weitgehend den Werten der Tabelle 10 für „reale Landnutzungsverteilung“ in Schaap et al. (2018; geringfügige Differenzen aufgrund unterschiedlicher Bezugsjahre der Mittelung).

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

Tabelle 3-7: N-Flüsse mit der atmosphärischen N-Deposition, Mittel 2010 – 2014.

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	20.469.149	NH _y	9,0	185,2
			NO _x	4,4	90,9
			N(ges)	13,5	276,1
AT-HS.MW- atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Siedlungsflächen	3.376.347	NH _y	11,8	40,0
			NO _x	5,8	19,5
			N(ges)	17,6	59,5
AT-FS.FO- atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Waldflächen	11.077.730	NH _y	10,7	118,9
			NO _x	5,6	62,2
			N(ges)	16,4	181,1
AT-FS.OL- atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf seminaturliche Flächen	656.472	NH _y	8,0	5,3
			NO _x	4,1	2,7
			N(ges)	12,1	8,0
AT-FS.WL- atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Feuchtgebiete	74.761	NH _y	8,2	0,6
			NO _x	4,0	0,3
			N(ges)	12,2	0,9
AT-HY.SW- atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Oberflächengewässer	421.977	NH _y	7,7	3,3
			NO _x	3,6	1,5
			N(ges)	11,3	4,8
AT-HY.CW- atmDep	Atmosphär. N-Deposition auf Küstengewässer	162.461	NH _y	7,7	1,3
			NO _x	3,6	0,6
			N(ges)	11,3	1,8
Summen Deutschland		36.238.897	NH_y	9,8	354,4
			NO_x	4,9	177,7
			N(ges)	14,7	532,2

3.5 Import und Export von NH_y und NO_x

Im Rahmen des European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP 2017) werden mit vom MSC-W (Meteorological Synthesizing Centre – West) jährlich die grenzüberschreitenden Flüsse von NH_y und NO_x in Europa berechnet. Die Ergebnisse stehen als EMEP Source-Receptor-Tables zur Verfügung (www.emep.int/mscw/mscw_srdata.html#SRtables) und wurden für Deutschland ausgewertet (Tab. 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 2010 – 2014.

NH _y kt N a ⁻¹	Import		NH _y kt N a ⁻¹	Export	
	NO _x kt N a ⁻¹	Summe kt N a ⁻¹		NO _x kt N a ⁻¹	Summe kt N a ⁻¹
103,7	114,7	218,4	248,8	280,5	529,3

Differenz: Netto-Export 310,9 kt N a⁻¹

Den Ergebnissen der Source-Receptor-Tables liegen für die einzelnen Jahre zum Teil unterschiedliche Modellversion zu Grunde liegt (vgl. EMEP 2017, p. 135). Mit dem EMEP-Ansatz werden rund 345 kt

$\text{NH}_y\text{-N a}^{-1}$ und 184 kt $\text{NO}_x\text{-N a}^{-1}$ Deposition für Deutschland berechnet (Mittel 2010 – 2014). Diese Mengen stimmen gut überein mit den Ergebnissen von PINETI-3 (Schaap et al. 2018), wonach jährlich rund 347 kt $\text{NH}_y\text{-N}$ und 178 kt $\text{NO}_x\text{-N}$ -Deposition auftreten.

3.6 Zusammenfassung der N-Flüsse Atmosphäre (AT)

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

Tabelle 3-9: Eingehende und ausgehende N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“, Mittel 2010 – 2014.

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_2O -Emission aus der Energiewirtschaft	NO_x N_2O	94,3 5,9
EF.EC	AT	EF.EC-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus der Energiewirtschaft	NH_3	2,2
EF.EC	AT	EF.EC-AT-N2	Oxidation/Reduktion von N_r zu N_2 während der Verbrennung und Entstickung	N_2	1417,6
EF.IC	AT	EF.IC-AT-gasEm	NO_x - und N_2O -Emission aus der industriellen Energieerzeugung	NO_x N_2O	29,4 1,7
EF.IC	AT	EF.IC-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus der industriellen Energieerzeugung	NH_3	0,8
EF.TR	AT	EF.OE-AT-gasEm	NO_x - und N_2O -Emission aus Transport und Verkehr	NO_x N_2O	159,6 3,0
EF.TR	AT	EF.OE-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus Transport und Verkehr	NH_3	11,5
EF.OE	AT	EF.OE-AT-gasEm	NO_x - und N_2O -Emission aus der sonstigen Energieerzeugung	NO_x N_2O	44,0 1,1
EF.OE	AT	EF.OE-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus der sonstigen Energieerzeugung	NH_3	1,9
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NO_x - und N_2O -Emission aus der chemischen Industrie	NO_x N_2O	8,7 2,0
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus der chemischen Industrie	NH_3	7,5
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NO_x - und N_2O -Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NO_x N_2O	7,7 0,9
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NH_3	4,3
HS.MW	AT	HS.MW-AT-gasEm	NO_x - und N_2O -Emission aus dem Siedlungsbereich (LULCC) ^b	NO_x N_2O	n.b. 0,4
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_2O -Emission aus Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement)	NO_x , N_2O	n.b. 8,3
AG.AH	AT	AG.AH-AT-gasEm	NH_3 -Emission aus dem Stall und der Lagerung von tier. Ausscheidungen	NH_3	219,4
AG.SM	AT	AG.SM-AT-gasEm	NO_x - und N_2O -Emission aus der Bodenproduktion	NO_x N_2O	35,3 56,6
AG.SM	AT	AG.SM-AT-gasEm	NH_3 -Emissionen aus Ausbringung von organischen und mineralischen Düngemitteln	NH_3	336,1

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
AG.SM	AT	AG.SM-AT-N2	Denitrifikation aus bewirtschafteten landwirtschaftlich genutzten Mineral-Böden sowie organischen Böden	N2	233,9
AG.BG	AT	AG.BG-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Biogas-erzeugung	NO _x N ₂ O	0,7 0,6
AG.BG	AT	AG.BG-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus Biogas-erzeugung	NH ₃	2,5
FS.FO	AT	FS.FO-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Waldflächen (LULCC)	NO _x N ₂ O	n.b. 0,3
FS.FO	AT	FS.FO-AT-N2	Denitrifikation in Waldböden	N2	12,2
FS.OL	AT	FS.OL-AT-N2	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen	N2	0,7
FS.WL	AT	FS.WL-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Feuchtgebieten (LULCC)	NO _x N ₂ O	n.b. 0,0
FS.WL	AT	FS.WL-AT-N2	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N2	1,5
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NO _x N ₂ O	0,1 0,6
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. 1,1
WS.WW	AT	WS.WW-AT-N2	Denitrifikation in Kläranlagen	N2	211,0
HY.GW	AT	HY.GW-AT-N2	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N2	572,0
HY.SW	AT	HY.SW-AT-N2	Denitrifikation (Retention) in Oberflächen-gewässern	N2	75,9
RW	AT	RW-AT-gasN	Grenzüberschreitender Import von gasförmigen N-Verbindungen	NHy NO _x	103,7 114,7

N-Depositionen und N-Fixierung aus der Atmosphäre

AT	HS.MW	AT-HS.MW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Siedlungsflächen	NHy NO _x	40,0 19,5
AT	AG.SM	AT-AG.SM-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NHy NO _x	185,2 90,9
AT	AG.SM	AT-AG.SM-Nfix	Biologische N-Fixierung in landwirtschaftlich genutzten Flächen	N(org)	194,6
AT	FS.FO	AT-FS.FO-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Waldflächen	NHy NO _x	118,9 62,2
AT	FS.FO	AT-FS.FO-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden	N(org)	110,5
AT	FS.OL	AT-FS.OL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf seminatürliche Flächen	NHy NO _x	5,3 2,7
AT	FS.OL	AT-FS.OL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in semi-natürlichen Flächen	N(org)	15,8
AT	FS.WL	AT-FS.WL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Feuchtgebiete	NHy NO _x	0,6 0,3
AT	FS.WL	AT-FS.WL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Feuchtgebieten	N(org)	0,7

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
AT	HY.SW	AT-HY.SW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Oberflächengewässer	NH _y NO _x	3,3 1,5
AT	HY.CW	AT-HY.CW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Küstengewässer	NH _y NO _x	1,3 0,6
AT	RW	AT-RW-gasN	Grenzüberschreitender Export von gasförmigen N-Verbindungen	NH _y NO _x	248,8 280,5

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 (Tab. 3-10).

Tabelle 3-10: Bilanzierung der reaktiven N-Flüsse im Pool „Atmosphäre“ (ohne N-Flüsse mit Denitrifikation), Mittel 2010 – 2014.

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	380	83	590	1053
Import	115	n.b.	104	218
Summe Zufluss	495	83	694	1271
Deposition auf Fläche DE	- 178	0	- 354	- 532
Export	- 281	n.b.	- 249	- 530
Summe Abfluss	- 458	0	- 603	- 1062

Offensichtlich ist die Bilanz nicht geschlossen, zwischen der Summe der Zuflüsse und der Abflüsse tritt eine Differenz von 210 kt N a⁻¹ auf. Eine mögliche Erklärung für diese Differenz könnte in abweichenden Modellannahmen bei der Modellierung von atmosphärischen NO_x- und NH_y-Umsätzen mit dem Modellansätzen LOTOS-EUROS (PINETI-3, Schaap et al. 2018) und EMEP (EMEP 2017) zu suchen sein. Wenn man N₂O, das weder deponiert noch im- oder exportiert wird und von beiden Modellen nicht verrechnet wird, aus der Bilanz ausklammert, reduziert sich die Differenz zwischen Summe Zufluss und Summe Abfluss auf 126 kt N a⁻¹, entsprechend rund 10 %. Ein Unsicherheitsbereich von 10 % beim Vergleich von zwei großräumigen Modellen liegt in der gängigen Größenordnung für Unterschiede in Modellvergleichsstudien. Weiterhin liegt der Wert von 10 % auch im Bereich von Datenqualitätszielen für die Luftqualitätsbeurteilung mit Hilfe von Modellierungen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass effektiv etwa 60 % der nationalen NH₃- und ca. 45 % 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.

Die EMEP-Emissionsfaktoren für die Freisetzung von NH₃ aus der Mineraldüngung wurden in den Jahren 2003 bis 2013, in Anpassung an den jeweiligen Stand der wissenschaftlichen Kenntnis, viermal geändert (vgl. Osterburg 2015). Die Differenz zwischen der niedrigsten Emission von rund 58 kt NH₃-N a⁻¹, berechnet mit den EMEP-Emissionsfaktoren aus 2009, und der höchsten Emission von rund 115 kt NH₃-N a⁻¹ (jeweils Mittel 2009 - 2012), berechnet mit den EMEP-Faktoren von 2013, beträgt ca. 57 kt NH₃-N a⁻¹. Diese Differenz verdeutlicht, wie stark die Ergebnisse zur Emission von den gewählten Modellannahmen abhängen. Möglicherweise werden die NH₃-Emissionsfaktoren in Zukunft erneut verändert, was (bei rückwirkender Anwendung auf die Zeitreihe) erneut andere Ergebnissen bezüglich des NH₃-Fluss zur Folge hätte.

Ähnliche Feststellungen gelten für die NH_y- und NO_x-Depositionen. Flächendeckende Modellergebnisse dazu wurden erstmals von Gauger et al. (2008) für Jahre die 1995 bis 2004 vorgestellt. Im MAPESI-Projekt (Bultjes et al. 2011) wurden Depositionswerte für 2005 bis 2007 erarbeitet, ohne Vergleichswerte zum vorhergehenden Ansatz. Im Folgeprojekt PINETI-2 liegen die Ergebnisse etwa 27% niedriger im Vergleich zu MAPESI (bezogen auf die gesamten versauernden Einträge aus der Atmosphäre), was die Autoren mit der Verbesserung der Methodik zur Bestimmung der nassen Deposition und der Konsolidierung neuer Prozessbeschreibungen im LOTOS-EUROS Modell erklären (Schaap et al. 2017). Die aktuellste Anwendung (PINETI-3, Schaap et al. 2018) modelliert die Depositionen für die Zeitreihe 2000 bis 2015, was einen Vergleich mit den Ergebnissen von Gauger et al. (2008) erlaubt. Als Mittel der Jahre 2000 bis 2004 berechnet PINETI-3 9,3 kg NH_y-N/ha und 6,2 kg NO_x-N/ha Deposition auf der Landwirtschaftsfläche, während nach Gauger et al. (2008) die Depositionen in diesem Zeitraum 15,2 kg NH_y-N ha LF⁻¹ a⁻¹ und 8,9 kg NO_x-N ha LF⁻¹ a⁻¹ betragen.

3.8 Unsicherheitsbetrachtung N-Flüsse Atmosphäre (AT)

In Tab. 3-11 sind die Unsicherheiten in der Berechnung der N-Flüsse für den Pool Atmosphäre aufgeführt.

Tabelle 3-11: Unsicherheiten der Berechnung der N-Flüsse für Pool „Atmosphäre“.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit (Mengengerüst und Koeffizienten)	Level ^a
XX.XX-AT-gasEm	N ₂ O- und NO _x -Emissionen insgesamt (Tab. 3-4)	N ₂ O NO _x	Die Unsicherheiten der Aktivitätsdaten und der Emissionsfaktoren sind im NIR für jede Kategorie beschrieben (UBA, 2016a). Die <u>Gesamtunsicherheit</u> für die N ₂ O- und NO _x -Emissionen <u>insgesamt</u> wird maßgeblich durch die Emissionen aus Landwirtschaftlichen Böden (3.D) sowie aus der kommunalen Abwasserbehandlung (5 D.1) bestimmt; die Unsicherheiten der NO _x -Emissionen wird mit 27% (als 95%-Unsicherheit) angegeben.	2
AG.XX-AT-gasEM AG.SM-AT-gasEm	N ₂ O-Emissionen Landwirtschaft	N ₂ O	Für den <u>landwirtschaftlichen Teil</u> des NIR schätzen Rösemann et al. (2017; Tab. 14.1) die Gesamt-Unsicherheit (als Kombination aus der Unsicherheit der Aktivitätsdaten und der Unsicherheit der Emissionsfaktoren) für die <u>N₂O-Emission</u> aus der Tierhaltung auf über 100 % (definiert als „Bereich des halben 95%-Konfidenzintervalls“) und für N ₂ O-Emission aus Böden auf über 300 %.	4

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit (Mengengerüst und Koeffizienten)	Level ^a
AG.XX-AT-gasEM AG.SM-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen Landwirtschaft	NH ₃	Für den <u>landwirtschaftlichen Teil</u> des NIR schätzen Rösemann et al. (2017; Tab. 14.2) die Gesamt-Unsicherheit (als Kombination aus der Unsicherheit der Aktivitätsdaten und der Unsicherheit der Emissionsfaktoren) für die <u>NH₃-Emission</u> aus der Tierhaltung auf rd. 37 % (definiert als „Bereich des halben 95%-Konfidenzintervalls“) und für NH ₃ -Emission aus der Mineraldüngung auf 50 %.	3
AT-XX.XX-atmDep	Atmosphärische NH _y - und NO _x -Deposition	NH _y , NO _x	Zu den Unsicherheiten der Modellierung der <u>NH_y- und NO_x-Deposition</u> s. Projektbericht zu PINETI-3 (Schaap et al. 2018).	3

^a) Größenordnung der Unsicherheit, Einstufung gem. Tab. 2-4.

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; Tab. 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	4.1.3
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	SINK ^a (AT)	EF.EC-SINK-N2	N _r -Schwund bei der Rohöl-Verarbeitung	N ₂	4.1.1
EF.EC	AT	EF.EC-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Verbrennungsprozessen in der Energiewirtschaft	NH _y , 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
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

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
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 _y , 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 _y , 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 _y , 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 Tab. 4-2 ist die Energiebilanz (AGEB 2017) 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 Zuordnung zu N-Flüssen, Mittel 2010 - 2014 (Quelle: AGEb 2017; 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⁻¹ c	14,0	3,0	10,0	1,26^d					
SOURCE-EF.EC-fuel	Gewinnung im Inland	9.509	180.771	2.577	0	133,1	542,3	22,2	0,0	694,4
RW-EC.EC-fuel	Import Energieträger und Mineralöl- produkte	55.836	81	90.977	34.916	781,7	0,2	909,8	43,3	1735,0
EF.EC-RW-fuel	Export Energieträger u. Mineralöl- produkte, incl. Hochseebunkerungen	1.026	1.844	158	22.073	14,4	5,5	1,7	41,1	62,7
Primärenergieverbrauch im Inland insgesamt^e		63.840	178.332	93.028	13.291	897,4	536,8	930,3	2,2	2366,7
(EF.EC intern)	Energiewirtschaft (unmittelbar) ^f	52.203	173.767	0	7.546	734,5 ^f	523,1 ^f	930,3 ^f	70,0 ^f	2117,9 ^f
EF.EC-EF.IC-fuel	Bergbau, Metallverarbeitung, Indust- rie, sonstige Wirtschaft, usw.	10.893	3.601	0	2.329	152,5	10,8		4,5	167,8
EF.EC-EF.TR-fuel	Verkehr insgesamt	0	0	0	56.052				31,7	31,7
EF.EC-EF.OE-fuel	Haushalt, Gewerbe, Handel	744	964	0	19.488	10,4	2,9		3,9	17,2
Energetischer Verbrauch insgesamt^g		63.840	178.332	0	85.415	897,4	536,8	0	29,9	2334,6^g
EF.EC-MP.NC-prod	Mineralölprodukte als Vorprodukte der chemischen Industrie	0	0	0	20.298				32,1	32,1
Nichtenergetischer Verbrauch insgesamt		0	0	93.028^h	20.298^h	0	0	(930,3)^h	32,1^h	32,1

^a Kohle, Briketts, Koks und andere Steinkohlenprodukte.

^b Kohle, Briketts und andere Braunkohlenprodukte.

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

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

^e Präzise müsste es heißen: Primärenergie**träger**verbrauch: Angaben einschließlich Bestandsänderungen (nicht gesondert aufgeführt).

^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. 4.6.

^g Abweichend zu AGEb (2017) Werte berechnet als Differenz zw. Primärenergieverbrauch im Inland und nichtenergetischem Verbrauch (einschließl. statistische Differenzen).

^h Zur N-Bilanz zwischen Umwandlungseinsatz Rohöl und Umwandlungsausstoß mit Mineralölprodukten s. Tab. 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 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 sich leider auch die damit verbundenen Stickstoffflüsse überträgt (Tab. 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). In Bezug auf die N-Flüsse tritt bei der Verarbeitung von Rohöl (Erdöl) zu Mineralölprodukten in der Energiebilanz Deutschlands jedoch eine erhebliche Lücke in Erscheinung. Deutschland hat 2010 – 2014 jährlich rund 93 Mio t Rohöl eingeführt (außerdem rund 13,3 Mio t Mineralölprodukte). Bei Annahme eines N-Gehalts von 1 % im Rohöl (nach GEMIS, Fritsche et al. 1994; ECE 2018) entspricht das rd. 932 kt N a⁻¹. Das Rohöl wird nahezu vollständig zu Mineralölprodukten verarbeitet (Destillation, Konversion). Die N-Gehalte der meisten Konversionsprodukte sind jedoch deutlich geringer als 1 % N (nach GEMIS, Fritsche et al. 1994; ECE 2018), summiert über alle Mineralölprodukte beträgt der N-Fluss nach der Verarbeitung des Rohöls nur noch 114 kt N a⁻¹ (Tab. 4-3).

Tabelle 4-3: N-Flüsse mit der Einfuhr von Rohöl und Mineralölprodukten sowie den aus Rohöl hergestellten Mineralölprodukten (Umwandlungsbilanz), Mittel 2010 – 2014 (Quelle: AGEB 2017; 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	10,0	93.028	930,3		
Mineralölprodukte:					
Ottokraftstoffe	1,0	-2.986 ^b	-3,0	21.947	21,9
Rohbenzin (Naphta)	1,0	6.160	6,2	10.216	10,2
Flugturbinenkraftstoff	1,0	3.648	3,6	4.902	4,9
Dieselkraftstoff	0,2	4.660	0,9	27.299	5,5
Heizöl leicht	0,2	3.905	0,8	15.499	3,1
Heizöl schwer	4,5	-2.124 ^b	-9,6	8.519	38,3
Petrolkoks	15,5	235	3,6	1.774	27,5
Flüssiggas	0	642	0,0	2.646	0
Raffineriegas	0	46	0,0	4.092	0
Andere Mineralölprodukte	0,3	-895 ^b	-0,3	8.819	2,6
Summen	(1,26) ^c	106.319	932,5	105.713	114,0

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

^b Negativer Wert: Exportüberschuss.

^c Mittlerer N-Gehalt der Mineralölprodukte.

Ob diese beträchtliche Differenz von 818 kt N a⁻¹ einen statistischen Artefakt darstellt, beispielsweise infolge unzutreffender Standardwerte zum N-Gehalt in den betrachteten Produkten, oder ob tatsächlich eine Oxidation/Reduktion von N_r zu N₂ in dieser Größenordnung in Erdölraffinerien auftritt, konnte im Rahmen der vorliegenden Studie nicht abschließend geklärt werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Begriff „N_r-Schwund“ für diesen N-Fluss verwendet. Auf Anfrage gab der Mineralölwirtschaftsverband (2018) dazu folgende Erläuterung: „Rohöl enthält Stickstoff gebunden in organischen und anorganischen Verbindungen. Im ersten Aufbereitungsschritt (Entsalzer) wird das Rohöl mit Wasser durchströmt und anorganische N-Verbindungen werden extrahiert. In einigen auf die Rohöldestillation folgenden Verarbeitungs- und Veredlungsschritten entsteht Ammoniak ausgehend von organischen N-Verbindungen (wie z.B. im Hydrofiner: Entschwefelung durch katalytische Hydrierungsreaktionen). Gasförmig anfallendes NH₃ wird z.B. in Claus-Anlagen durch partielle Oxidation und anschließende Komproportionierung zu N₂ umgewandelt und emittiert. Die im Prozesswasser (Sauerwasser) der Rohölaufbereitung und weiterer Prozesse gelösten Stickstoffverbindungen werden in der Kläranlage denitrifiziert“.

Stickstoff-Einleitungen von Raffinerien als industrielle Direkteinleiter sind nur geringfügig, im Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (PRTR; UBA 2016b) werden unter der Rubrik „Mineralöl- und Gasraffinerien“ in der Summe von drei Raffinerien (bzw. Betreibern) 163 t N(ges) a⁻¹ aufgeführt (Mittel 2010 - 2014). Auch als Ammoniak-Emittenten werden im PRTR nur zwei Raffinerien mit zusammen 61 t NH₃-N a⁻¹ ausgewiesen. Für die weiteren Betrachtungen wird daher davon ausgegangen, dass der (statistische) N-Schwund in Höhe von 818 kt N a⁻¹ vollständig als N₂ freigesetzt wird.

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 die Bilanzierung der N-Flüsse 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 Tab. 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	123,7		30,0
- davon Erzeugung durch	- Steinkohle (Trockenfeuerung)	40,8 ^c	20 %	8,2
	- Braunkohle	64,3 ^c	5 %	3,2
	- Gas	18,6 ^c	100 %	18,6
Transport und Verkehr	Diesel/Benzin	159,6	100 % ^d	159,6
Sonstige Energieerzeugung	(verschiedene)	44,0	5 % ^e	2,2
Übrige Quellen	(verschiedene)	52,6	0 %	0,0
Summe NO_x-Emission		379,9	(50 %)^f	191,8

^a S. Tab. 3-4.

- ^b Anteil des thermischen NO_x an der gesamten NO_x-Emissions 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 (Platzhalter).
- ^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 192 kt N a⁻¹) und nicht-thermisches NO_x (rund 188 kt N a⁻¹).

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

In Deutschland wurden 2010 - 2014 im Mittel rd. 2,76 Mio t Biodiesel und rd. 620.000 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, schriftl. Mittlg. v. 29.3.2018). In Tab. 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 2018), Mittel 2012 - 2014.

Kulturart	Anbaufläche ha	Ertrag dt ha ⁻¹	N-Gehalt %	N-Fluss kt N a ⁻¹
Raps für Biodiesel / Pflanzenöl	733.000	40,4	3,35	99,3
Pflanzen für Bioethanol, davon				
- Zuckerrüben	37.267	708,7	0,18	4,8
- Weizen	58.067	80,4	1,80	8,4
- Roggen	39.833	58,6	1,56	3,6
- Körnermais	21.900	100,8	1,72	3,8
- sonst. Futtergetreide (vor allem Gerste)	30.100	70,5	1,80	3,8
Summe Bioethanol	187.167			24,4
Summe Nachwachsende Rohstoffe für Kraftstoffe	920.167			123,7

Für die Bilanzierung der N-Flüsse 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 (H_2O) und Stickstoff (N_2) 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. Mittlg. 4.4.18):

- 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).

Darüber hinaus gibt es noch vereinzelte mit leichtem Heizöl oder gasförmigen Brennstoffen betriebene Kesselanlagen und Gasmotoren, die über SCR oder SNCR verfügen. Deren Mengenströme fallen aber für den Zeitraum 2010 bis 2014 mutmaßlich noch nicht ins Gewicht. Mit Umsetzung der neuen europäischen Anforderungen für Großfeuerungsanlagen und mittelgroße Feuerungsanlagen könnte sich das mittelfristig ändern, da die neuen NO_x -Anforderungen in weiteren Anlagen künftig den Einsatz von SCR oder SNCR erfordern könnten.

Steinkohlekraftwerke 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 (Prof. A. Kather, TU Hamburg-Harburg; schriftl. Mittlg. 29.03.2018).

Zentral erhobene statistische Angaben zum NH_3 -Verbrauch für die Rauchgas-Entstickung (präzise: Minderung Stickstoffoxid-Konzentration im Rauchgas) in Kraftwerken in Deutschland sind nach Stand der Kenntnis nicht verfügbar. Für die Entstickung von Steinkohlekraftwerken wurde folgende Expertenschätzung vorgenommen (R. Beckers, Umweltbundesamt, schriftl. Mittlg. v. 3.4.2018): „Laut Ergebnis eines UBA-Forschungsvorhabens (Rentz et al., 2002) wird bspw. für einen Steinkohleblock mit Schmelzkammerfeuerung (hohe Rohgasemission an NO) ein Bedarf von ca. $2 \text{ t NH}_3 \text{ h}^{-1}$ ermittelt (Rentz et al., 2002, Kap. 5.3.7); ergibt bei angenommenen 4000 h a^{-1} einen Jahresverbrauch von 8000 t NH_3

(FWL 1892 MW; el. Leistung 702 MW). Die etwa gleich große Anlage mit Trockenstaubfeuerung verbraucht 600 kg NH₃ h⁻¹ (Rentz et al., 2002, Kap. 5.3.5), bei angenommenen 4000 h a⁻¹ entsprechend rund 2400 t NH₃ (1820 MW FWL, 750 MW el.). In Deutschland waren 1995 136 Steinkohlekraftwerksblöcke mit einer elektrischen Leistung von 35.000 MW in Betrieb, die mit SCR arbeiten. Unterstellt man im Mittel etwa 3000 t NH₃ a⁻¹ für einen 700 MW_{el}-Block bei 4000 h a⁻¹, dann bedeutet das hochgerechnet auf 35.000 MW_{el} eine Menge von 50 * 3000 t = 150 kt NH₃ in 1995. Im Betrachtungszeitraum der N-Bilanzierung 2010 bis 2014 gibt es weniger Steinkohlekraftwerksblöcke, gleichzeitig müssen die noch vorhandenen Anlagen aber schärfere Grenzwerte als die damals üblichen 200 mg/m³ (bezogen auf 6 Vol.% O₂ im Tagesmittel) einhalten. Als überschlägiger Schätzwert werden daher 100 kt NH₃ [entsprechend rd. 85 kt N] pro Jahr Ammoniak-Verbrauch für die Rauchgas-Entstickung angesetzt.“

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 N₂O 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 Tab. 4-6 ist die N_r-Menge hergeleitet, die im Sub-Pool „Energiewirtschaft“ im Zuge der Verbrennung von Energieträgern rechnerisch wieder in N₂ überführt wird.

Insgesamt wurden mit der Inlandsförderung und dem Netto-Import von fossilen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle, Rohöl) zur energetischen Nutzung 2335 kt N_r a⁻¹ in Umlauf gebracht (Tab. 4-2). Das Rohöl wird vollständig zu Mineralölprodukten verarbeitet, wobei eine Differenz von 818 kt N a⁻¹ zwischen der N-Menge im Rohöl und der N-Menge in den daraus erzeugten Mineralölprodukten auftritt (Tab. 4-3), ohne dass derzeit zur Umwandlung bzw. zum Verbleib des N(org) aus dem Rohöl endgültige Aussagen gemacht werden können (s. Kap. 4.1.1). Somit verbleiben 1517 kt N a⁻¹ in fossilen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle, Mineralölprodukte), die verbrannt werden, zuzüglich einer geringen Menge an Holz als Brennstoff. Bei der Verbrennung werden (geschätzt) 188 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 1417,6 kt N_r a⁻¹, die bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern in N₂ 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 zu N₂ oxidiert bzw. reduziert werden, Mittel 2010 – 2014.

Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Verbrennung fossiler Energieträger (Braunkohle, Steinkohle, Mineralölprodukte)	N(org)	1517,0
Verbrennung Holz, Großfeuerungsanlagen (Tab. 4-7)	N(org)	3,6
Rauchgas-Entstickung (Kap. 4.1.4)	NH3	85,0
Summe Verbrennung und Entstickung		1605,6
Abzüglich dabei neu gebildetes nicht-thermisches NO _x (Kap. 4.1.2)	NOx	- 188,0
Oxidation/Reduktion von N_r zu N₂ mit Verbrennung und Entstickung		1417,6

Zur Vereinfachung der Struktur des NNB 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 (Tab. 5-5), Holz (in Privathaushalten, Tab. 6-3), Klärschlamm (Tab. 9-6) und Abfall (Tab. 9-3) wird vereinfachend angenommen, dass der gesamte N(org) im Brennstoff in N₂ überführt wird.

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

Der Sub-Pool „Industrielle Energieerzeugung“ umfasst die Erzeugung von (Prozess-)Wärme und elektrischer Energie von Industrieunternehmen für die Güterproduktion aufgeführt, 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 Schiffsverkehr und der grenzüberschreitende Flugverkehr dabei der territorialen N-Bilanzierung 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).

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 (Tab. 4-2); weitere Erläuterungen zu den drei Sub-Pools sind daher nicht erforderlich.

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

In Tab. 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“^a, Mittel 2010 – 2014.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Sub-Pool Energiewirtschaft (EF.EC)					
SOURCE ^a	EF.EC	SOURCE-EF.EC-fuel	Förderung fossiler Energieträger im Inland	N(org)	694,4
SOURCE	EF.EC	SOURCE-EF.EC-gasEM	Bildung von thermischem NO _x	NO _x	30,0
MP.FP	EF.EC	MP.FP-EF.EC-fuel	Landwirtschaftliche Produkte zur Erzeugung von Kraftstoffen	N(org)	123,7
MP.NC	EF.EC	MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Entstickung von Rauchgasen	NH ₃	85,0
FS.FO	EF.EC	FS.FO-EF.EC-wood	Holz zur energetischen Nutzung - Großfeuerungsanlagen	N(org)	3,6

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
RW	EF.EC	RW-EF.EC-fuel	Import von fossilen Energieträgern und Mineralölprodukten	N(org)	1735,0
EF.EC	AT	EF.EC-AT-N2	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Verbrennung und Entstickung	N2	1417,6 ^a
EF.EC	SINK	EF.EC-SINK-N2	N _r -Schwund bei der Rohöl-Verarbeitung	N2	818,0
EF.EC	AT	EF.EC-AT-gasEm	NH ₃ -, NO _x - und N ₂ O-Emissionen aus Verbrennungsprozessen in der Energiewirtschaft	NH3 NOx N2O	2,2 94,3 5,9
EF.EC	EF.IC	EF.EC-EF.IC-fuel	Fossile Energieträger zur Energieerzeugung in der Industrie	N(org)	167,8
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)	17,2
EF.EC	MP.FP	EF.EC-MP.FP-prod	Reststoffe der Erzeugung von Kraftstoffen aus landwirtschaftlichen Produkten	N(org)	123,7
EF.EC	MP.NC	EF.EC-MP.NC-prod	Rohöl- und Mineralölprodukte als Rohstoffe für die chemische Industrie	N(org)	32,1
EF.EC	WS.SW	EF.EC-WS.SW-waste	Abfälle aus der Erzeugung von Energieträgern und Raffinerieprodukten	N(org)	1,6
EF.EC	WS.WW	EF.EC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Energiewirtschaft	N(org)	8,1
EF.EC	RW	EF.EC-RW-fuel	Export von fossilen Energieträgern und Raffinerieprodukten	N(org)	62,7
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)	167,8
EF.IC	AT	EF.IC-AT-gasEm	NH ₃ -, NO _x - und N ₂ O-Emissionen aus Verbrennungsprozessen in der industriellen Energieerzeugung	NH3 NOx N2O	0,8 29,4 1,7
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	NOx	159,6
EF.TR	AT	EF.TR-AT-gasEm	NH ₃ -, NO _x - und N ₂ O-Emissionen aus Verbrennungsprozessen in Verkehr und Transport	NH3 NOx N2O	11,5 159,6 3,0
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)	17,2
SOURCE	EF.OE	SOURCE-EF.OE-gasEM	Bildung von thermischem NO _x	NOx	2,2

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
FS.FO	EF.OE	FS.FO-EF.OE-wood	Holz zur energetischen Nutzung - Privathauhalte	N(org)	14,6
EF.OE	AT	EF.OE-AT-gasEm	NH ₃ -, NO _x - und N ₂ O-Emissionen aus Verbrennungsprozessen in der Energiewirtschaft	NH ₃ NO _x N ₂ O	1,9 44,0 1,1

^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. Tab. 4-2), so dass zur Vereinfachung der Darstellung die Gesamtmenge der N_r-Oxidation/Reduktion zu N₂ während der Verbrennung und Entstickung dem Sub-Pool EF.EC zugerechnet wird.

4.4 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Energiewirtschaft und Verkehr

In Tab. 4-8 sind die eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Bereich „Energiewirtschaft und Verkehr“ gegenübergestellt. Mit einem Saldo von (nur) rund 30 kt N a⁻¹, entsprechend rund 1 % des N-Zufluss, erscheint die Bilanz weitgehend geschlossen. Dies ist jedoch maßgeblich darauf zurückzuführen, dass die beiden wesentlichen ausgehenden N-Flüsse als Differenzgrößen berechnet worden sind, nämlich die Oxidation/Reduktion von N_r zu N₂ im Zuge der Verbrennung (Kap. 4.1.5) sowie der N_r-„Schwund“ mit der Rohölverarbeitung (Kap. 4.1.1). 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 (ohne landwirtschaftliche Produkte^a) im Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“, Mittel 2010 - 2014.

Zufluss (N _r -Quellen)	kt N a ⁻¹	Abfluss (N _r -Verbleib)	kt N a ⁻¹
Energieträger - Gewinnung im Inland	694,4	N ₂ O und NO _x -Emissionen in die Atmosphäre	- 339,0
Netto-Import von Energieträgern und Mineralölprodukten	1672,3	NH ₃ -Emissionen in die Atmosphäre	- 16,4
Bildung von thermischem NO _x	191,8	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Verbrennung und Entstickung	- 1417,6
NH ₃ zur Entstickung von Rauchgasen	85,0	N _r -Schwund mit der Rohölverarbeitung	- 818,0
Holz zur energetischen Nutzung	18,2	Rohöl- und Mineralölprodukte als Rohstoffe für die chemische Industrie	- 32,1
		Abfall, Abwasser	- 9,7
Summe Zuflüsse	2661,7	Summe Abflüsse	- 2632,1
Differenz: 29,6			

^a Die Mengen des N-Zufluss und N-Abfluss mit landwirtschaftlicher Biomasse zur Herstellung von Kraftstoffen sind identisch (s. Kap. 4.1.3) und werden daher hier nicht aufgeführt.

^b Einschließlich Hochseebunkerungen.

Ebenso ist die Diskrepanz in der Umwandlungsbilanz von Rohöl zu Mineralölprodukten (s. Tab. 4-3) in Höhe von 818 kt N a^{-1} fachlich nicht belegt. Bei dieser Differenz spielt Verbrennung keine Rolle; über die Vorgänge, die bei der Aufbereitung von Rohöl zum „Verschwinden“ von N_r -Verbindungen in der genannten Größenordnung führen, ist quantitativ noch weniger bekannt.

Die Unsicherheit der N-Flüsse, die mit N-haltigen Energieträgern in den Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ hineingehen, ist in erster Linie auf die Unsicherheit in der Datenbasis zu N-Gehalten in Energieträgern (Steinkohle, Braunkohle, Rohöl, Mineralölprodukte) zurückzuführen und wird als eher gering eingestuft. Sehr große Unsicherheit besteht jedoch im Hinblick auf die Transformation bzw. den Verbleib dieses N_r : werden tatsächlich 2235 kt N a^{-1} mit der Verbrennung sowie während der Raffinierung von Rohöl zu Mineralölprodukten in molekularen N_2 überführt? Dieser Frage sollte in weiteren Untersuchungen nachgegangen werden.

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 NNB-Schema (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. Dieses Problem betrifft in analoger Weise das „Verschwinden“ von N_r infolge der Oxidation/Reduktion zu N_2 mit Verbrennungsvorgängen; dieser Prozess ist im NNB-Schema der N-Flüsse bislang ebenfalls nicht vorgesehen und wird hier mit „SINK“ als Pool(in) gekennzeichnet. 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 N-Flussschema 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).

Für zukünftige N-Flussberechnungen wird angeregt, auf eine Unterteilung des Pools Energiewirtschaft in Sub-Pools zu verzichten. Diese weitergehende Untergliederung wird von IPCC (2006) und UNFCCC (EEA 2013d) für die nationalen Treibhausgas-Emissionsinventare vorgegeben und ist für diese Aufgabe auch sinnvoll. Im Hinblick auf die N-Flüsse treten als einzige interne Flüsse zwischen Sub-Pools jedoch nur die Belieferung der drei Sub-Pools „Industrielle Energieerzeugung“, „Verkehr und Transport“ sowie „Sonstige Energieerzeugung“ mit Energieträgern aus dem Sub-Pool „Energiewirtschaft“ auf. In Anbetracht dieser geringen Anzahl von N-Flüssen in den drei der „Energiewirtschaft“ nachgelagerten Sub-Pools sowie dem Umstand, dass die Energieträger und deren Verteilung auf die Sub-Pools aus einer einzigen Statistik geschlossen ermittelt werden, erscheint eine tiefere Untergliederung nicht sinnvoll.

4.5 Unsicherheitsbetrachtung der N-Flüsse Energiewirtschaft und Verkehr (EF)

In Tab. 4-9 sind die Unsicherheiten in der Berechnung der N-Flüsse für den Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ aufgeführt; Erläuterungen s. a. Kap. 4.4.

Tabelle 4-9: Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
Alle Sub-Pools (EF.EC, EF.IC, EF.TR, EF.OE))					
SOURCE ^b -EF.EC-fuel RW-EF.EC-fuel	Import und Inlandsförderung von Energieträgern	N(org)	Sehr gering	gering	2
SOURCE ^b -EF.EC-gasEm	Bildung von thermischem NO _x	NO _x	Prozesskenntnisse unzureichend; Mengenabschätzung als Platzhalter		4
MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Rauchgasentstickung	NH ₃	Hoch (Expertschätzung, keine statist. Angaben verfügbar)	(entfällt)	4
MP.FP-EF.EC-prod EF.EC-MP.FP-prod	Landwirtschaftliche Produkte zur Erzeugung von Kraftstoffen	N(org)	Sehr gering	Sehr gering	1
EF.EC-SINK-N2	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Verbrennung	N ₂	Mittel; Wert wird als Differenz berechnet, zugrunde liegende Annahme nicht mit Literatur belegt		3
EF.EC-SINK-N2	N _r -Schwund bei der Rohöl-Verarbeitung	N ₂	Hoch; mögliche Prozesse unklar, Wert wird als Differenz aus zwei Größen berechnet, deren N-Gehalte unsicher sind		4
EF.XX-AT-gasEM	NO _x -, N ₂ O-Emissionen	NO _x , N ₂ O	s. Tab. 3-11 (NO _x : gering; N ₂ O: hoch)		2 / 4
EF.XX-AT-gasEM	NH ₃ -Emissionen	NH ₃	s. Tab. 3-11		3
EF.EC-SINK ^b -fuel	Verbrennung von Energieträgern	N ₂ (?)	Sehr gering	Hoch, keine Informationen zu den chem. Prozessen	4
EF.EC-SINK ^b -fuel	Verarbeitung Rohöl zu Mineralölprodukten	N ₂ (?)	Sehr gering	Hoch; keine qualifizierten Informationen verfügbar	4

^a Größenordnung der Unsicherheit, Einstufung gem. Tab. 2-4.

^b Zu Pool(ex) „SOURCE“ bzw. Pool(in) „SINK“ s. Kap. 4.4.

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; Tab. 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
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)	5.1.6

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
Sub-Pool Stickstoff-Chemie (MP.NC)					
SOURCE ^a	MP.NC	SOURCE-MP.NC-NH3	Ammoniak-Synthese (Haber-Bosch-Verfahren)	NH3	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	NH3, NO3 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	NH3	3.2.1
MP.NC	EF.EC	MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Entstickung von Rauchgasen	NH3	4.1.4
MP.NC	MP.OP	MP.NC-MP.OP-prod	Chem. Grundstoffe u. Erzeugnisse zur Herstellung v. Konsumgütern (außer Mineraldünger)	NH3, NO3 N(org)	5.2.2
MP.NC	HS.MW	MP.NC-HS.MW-minFert	N-Mineraldünger zur Verwendung in Haus- und Kleingärten	NH3, NO3 N(org)	5.2.3
MP.NC	AG.SM	MP.NC-AG.SM-minFert	N-Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	NH3, NO3 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	NH3, NO3 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
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	NH3	3.2.1
MP.OP	HS.MW	MP.OP-HS.MW-prod	Produktion 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. 5.6.

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 Statistisches Jahrbuch Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMEL 2016, Tab. 207) zugrunde gelegt, das eine komprimierte Übersicht bietet. In Tab. 5-2 sind nur die nach Warengruppen zusammengefassten Ergebnisse dargestellt, die Berechnung der N-Mengen erfolgte in der Ausgangstabelle (BMEL 2016, Tab. 207) für rund 40 Erzeugnisse. Angaben zu Produktionsmengen in der Nahrungsmittelerzeugung sind zwar auch in der Produktionserhebung des Statistischen Bundesamts (DESTATIS 2018) aufgeführt; in dieser Statistik ist aber erstens die zum Absatz bestimmte Produktion nicht immer eindeutig ersichtlich und zweitens sind etliche Positionen aus Geheimhaltungsgründen gesperrt.

Tabelle 5-2: Stickstoff-Fluss mit dem Verbrauch von Nahrungsmitteln (BMEL 2016, Tab. 207), Mittel 2010 - 2014; nur zusammengefasste Produktgruppe dargestellt.

Warengruppe	Menge 1000 t	N-Gehalt ^a %	N-Fluss t N a ⁻¹
Getreideerzeugnisse (Mehlwert)	6.963	2,2 ^b	151,1
Reis, Hülsenfrüchte Kartoffeln	5.507	0,4 ^b	23,4
Zucker, Glukose, Isoglukose, Honig, Kakao	3.993	0,2 ^b	8,7
Gemüse, Obst (Marktanbau)	16.934	0,2 ^b	32,7
Fleisch und Fleischerzeugnisse (Schlachtgewicht)	7.249	2,7 ^c	195,1
Fische und Fischerzeugnisse (Fanggewicht)	1.196	2,8 ^b	33,5
Milch und Milcherzeugnisse	9.770	1,4 ^{b,d}	133,3
Öle und Fette	1.682	0,0 ^d	0,5
Eier und Eierzeugnisse	1.103	1,9 ^d	21,0
Zusammen	54.397		599,4

^a N-Gehalt jeweils im Mittel der Erzeugnisse.

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

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

^d N-Gehalte nach Souci, Fachmann, Kraut - Datenbank online (www.sfk.online, abgerufen 6.4.2018).

Angaben zur Verwendung landwirtschaftlicher Erzeugnisse sind ebenfalls im Statistischen Jahrbuch Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMEL 2016) in den Statistiken zur "Versorgung mit ..." bzw.

"Verwendung von ..." (Tab. 221 bis Tab. 311) 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. 600 kt N a⁻¹ mit dem Verbrauch von Nahrungsmittel entspricht einer Eiweißversorgung von rund 125 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 empfohlenen Eiweißzufuhr von 0,8 bis 1 Gramm pro Kilogramm Körpergewicht und Tag, entsprechend rund täglich 60 bis 80 Gramm pro Erwachsenen (Deutsche Gesellschaft für Ernährung).

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 (Tab. 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 2012 - 2014.

Haustierart	Anzahl Tiere ^a 1000 St.	Futteraufnahme kg Tier ⁻¹ a ⁻¹	N-Gehalt %	N-Fluss kt N a ⁻¹
Hunde	6.800	163,3	2,88	32,2
Katzen	11.800	73,0	4,16	35,8
Summen	18.600			68,0

^a Quelle: Industrieverband Heimtierbedarf (2018); aufgrund Bruch in Zeitreihe nur Angaben 2012 - 2014 verwendet.

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

Im Statistischen Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2015 (BMEL 2015, Tab. 330) sind ebenfalls Angaben zur Produktion von Hunde- und Katzenfutter zu finden. Berechnet mit den N-Gehalten nach Tab. 5-3 ergibt sich danach ein N-Fluss mit Heimtierfutter von 44,9 kt N a⁻¹. Die Diskrepanz zum N-Fluss der Tab. 5-3 ist mutmaßlich zumindest teilweise damit zu erklären, dass Hunde und Katzen nicht ausschließlich mit Fertigfutter gefüttert werden, sondern auch selbst zubereitete Futtermischungen erhalten. Nach Angaben der Studie „Pet Food Trends in Germany“ (Department of Agriculture and Agri-Food Canada 2018) beläuft sich die Verkaufsmenge von Hunde- und Katzenfutter in Deutschland auf 960.000 t (Mittel Jahre 2010 - 2014). Mit den Annahmen zum N-Gehalt nach Tab. 5-3 entspricht das 34,6 kt N. Dieser Wert beträgt nur die Hälfte des N-Fluss in Tab. 5-3 und wird für die Bilanzierung nicht verwendet.

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 im Statistischen Jahrbuch (BMEL 2016, Tab. 91) ausgewiesen. Zur Berechnung des N-Fluss (Tab. 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 2012 – 2014 (BMEL 2016, Tab. 91).

Erzeugnis/Verwendung	Anbaufläche 1000 ha	Ertrag dt ha ⁻¹	N-Gehalt %	N-Fluss kt N a ⁻¹
Industriestärke (als Körnermais gerechnet)	112,6	100,0	1,4	15,1
Industriezucker (Zuckerrüben)	14,1	674,0	0,18	1,8
Technisches Rapsöl	130,2	37,9	3,35	16,1
Technisches Sonnenblumenöl	7,4	32,3 ^a	2,9	0,6
Technisches Leinöl	3,6	24,3 ^a	3,5	0,3
Pflanzenfasern (als Faserlein gerechnet)	0,7	100,0 ^a	1,0	0,1
Arznei- und Farbstoffe	10,8	10,0 ^a	1,0 ^a	0,1
Summen	279,4			34,2

^a geschätzt.

5.1.4 Verwertung tierischer Nebenprodukte

Jährlich werden rund 2,9 Mio t tierische Nebenprodukte verarbeitet: Fleisch und Knochen, die nicht als Nahrungsmittel für den Menschen verwendet werden. Tierische Nebenprodukte werden 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.), Tab. 5-5 zeigt die N-Mengen und deren Verwertungswege.

Tabelle 5-5: Verwendung tierischer Nebenerzeugnisse - Proteine^a (Mittel 2011 - 2014^b) und Zuordnung zu N-Flüssen (Quelle: Niemann; versch. J.)

Flusscode	Verwendung	Produkte (t) Kategorie ^c			N-Fluss (kt N a ⁻¹) Kategorie ^{c,d}			
		K1	K2	K3/LM	K1	K2	K3/LM	Zus.
MP.FP-AG.SM-orgFert ^e	Technische Verwendung (Dünger)		30.889	140.493		2,7	10,1	12,8 ^e
MP.FP-WS.SW-fuel	Thermische Verwertung	213.773	87	660	18,8	0,0	0,0	18,8
(in MP.FP intern verarbeitet)	Futtermittel			294.084			21,2	21,2

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

^b Jahr 2010 aufgrund von Änderungen in der Datenstruktur nicht in die Mittelung einbezogen.

^c Zur Bedeutung der Kategorien s. Text.

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

^e In der N-Bilanzierung für die Landwirtschaft (s. Kap. 7.2.1) werden 13,6 kt N a⁻¹ ausgewiesen.

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 der Aspekt der Abfallverwertung mutmaßlich 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)

Tab. 5-6 gibt die Einfuhr und Ausfuhr der Ernährungswirtschaft nach Warengruppen gemäß Angaben im Statistischen Jahrbuch Ernährung, Landwirtschaft und Forsten wieder (BMEL 2016, Tab. 395, Tab. 245). Analog zu Tab. 5-2 sind hier nur die nach Warengruppen zusammengefassten Ergebnisse dargestellt, die Berechnung der N-Mengen erfolgte in der Ausgangstabelle (BMEL 2016, Tab. 395 und Tab. 245) 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 2016, Tab. 122). Dies erfolgt aus zwei Gründen: (i) in Bezug auf die Importmengen an Futtermitteln sind nach Ansicht der Autoren 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 2016, Tab. 121) und aus Einfuhren (Tab. 122).

Tabelle 5-6: Import und Export der Ernährungswirtschaft (ohne Futtermittel) und Netto-Import Futtermittel, Mittel 2012 – 2014 (BMEL 2016).

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)	11.328	15.100	2,0	227,6	342,1
Kartoffeln und Kartoffelerzeugnisse	1.202	2.487	0,6	6,7	10,3
Zucker und Kakao	2.754	895	0,6	16,0	15,5
Obst und Obsterzeugnisse	8.358	4.050	0,1	9,7	4,0
Gemüse, Gewürze, Sämereien etc.	6.057	1.372	0,3	20,5	5,0
Bier (1000 hl)	7.115	15.618	0,1	7,1	15,6
Ölfrüchte, Öle und Fette	10.590	2.645	0,0	0,1	0,1
Molkereierzeugnisse (ohne Butter)	3.844	5.916	1,7	66,7	86,6
Eier, Honig	630	186	1,7	10,4	3,2
Schlachtvieh, Fleisch und Fleischerzeugnisse	2.978	4.252	3,1	93,1	130,6
Fische und Fischerzeugnisse	953	562	2,5	23,8	13,2
Lebende Tiere (ohne Schlachttiere)	^b	^b		3,0	9,1
Futtermittel (Netto-Import)				405,2 ^c	(entf.)
Summen Import und Export				890,0	635,2

^a N-Gehalte: s. Fußnote zur Tab. 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 N_2 in NH_3 als primärer reaktiver N-Verbindung stellt den mit Abstand größten initialen anthropogenen N-Eintrag in den N-Zyklus dar. Daneben wird (in vergleichsweise sehr geringer Menge) N_2 auch noch über die Synthese von Calciumcyanamid (Kalkstickstoff) in eine reaktive Form gebracht.

- ▶ Ammoniak-Synthese, Mittel 2010 - 2014 (nach VCI, 2017): 2673,6 kt N a⁻¹
- ▶ Calciumcyanamid-Synthese, Mittel 2010 – 2014, rd. 21,0 kt N a⁻¹.

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 2017a, Tab. 42131-0003), 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 (Tab. 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 Tab. 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 (2017) entnommen.

Hinweis: Die Primär-Produktion von Ammoniak ist in Tab. 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 2015a, Tab. 51000-0005).

Gemäß Tab. 5-7 berechnet sich eine Gesamtmenge von 3072 kt N a⁻¹ in den „zum Absatz bestimmten“ Produkten der Chemie-Industrie. Diese Menge übersteigt rechnerisch die Bereitstellung von 2695 kt primärem NH₃-N a⁻¹ mit der Ammoniak-Synthese um rd. 14 %. Diese Differenz kann mutmaßlich sowohl auf mögliche Doppelzählungen als auch auf die Unsicherheiten in den Annahmen zum N-Gehalt der Produktgruppen zurückgeführt werden.

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 3192 kt N a⁻¹, die in die chemische Industrie hineinfließt. Diese Menge setzt sich zusammen aus 2695 kt N a⁻¹ NH₃-Synthese, dem Import-Export-Saldo von 466 kt N a⁻¹ mit chemischen Erzeugnissen (s. Tab. 5-7) sowie 32 kt N a⁻¹ in den petrochemischen Erzeugnissen als Ausgangsstoffen der organischen Chemie. Produkte, die die chemische Industrie eindeutig als Endprodukte verlassen, sind Düngemittel (1664 kt N a⁻¹) und NH₃ zur Rauchgas-Entstickung (85 kt N a⁻¹) sowie weiterhin die gasförmigen Emissionen (18 kt N a⁻¹) und Abwasser (69 kt N a⁻¹); diese N-Flüsse betragen zusammen 1836 kt N a⁻¹. Die Differenz von 1356 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 1664 kt N a⁻¹ mit Mineraldüngern an die Landwirtschaft sowie für Haus- und Kleingärten usw. ausgewiesen. Die Einsatzmenge außerhalb der Landwirtschaft, das heißt in Haus- und Kleingärten, auf Sportplätzen, für kommunale Grünflächen usw., beträgt nach Expertenschätzung ca. 45 kt N a⁻¹ (IVA, Industrieverband Agrar, schriftl. Mittlg. 19.3.2018).

Die inländische Düngemittel-Produktion von 1274 kt N a⁻¹ (nach IVA 2017) sowie der Import-Export-Saldo von 448 kt N a⁻¹ summieren sich zu 1722 kt N a⁻¹. Damit tritt gegenüber der Absatzmenge eine Differenz von 58 kt N a⁻¹ auf. Dieser Unterschied kann möglicherweise zurückgeführt werden auf Lagerbestandsveränderungen, auf Unterschiede in den Bezugszeiträumen (Absatz: Mittel Kalenderjahre 2010 – 2014; Produktion und Außenhandel: Düngejahre 2009/10 – 2013/14) sowie auf statistische Differenzen.

Tabelle 5-7: Produktion^a, Import und Export von Erzeugnissen der Stickstoff-Chemie, Mittel 2010 – 2014 (Quelle: DESTATIS 2015a, 2017a; IVA 2017).

Waren-Gruppe	Bezeichnung	Verbindung ^c	Menge (1000 t)			N-Gehalt ^b (%)	N-Fluss (kt N a ⁻¹)		
			Produktion ^a	Import	Export		Produktion	Import	Export
WA2808	Salpetersäure, Nitriersäuren	HNO ₃	520,6	107,1	204,7	22,2%	115,7	23,8	45,5
WA2814	Ammoniak, wasserfrei oder in wässriger Lösung	NH ₃	895,8	575,5	413,6	82,4%	710,1	473,9	340,6
WA282510	Hydrazin und Hydroxylamin, andere Metalloxide	N ₂ H ₄ , NH ₂ OH	31,4	5,5	29,0	65,0%	20,4	3,6	18,8
WA2834	Nitrite, Nitrate	NO ₂ , NO ₃	k.A.	50,5	73,4	26,0%	k.A.	13,1	19,1
WA2837	Cyanide, Cyanidoxide und komplexe Cyanide	HCN	k.A.	16,2	38,4	48,3%	k.A.	7,8	18,6
WA2850	Hydride, Nitride, Azide, Silicide und Boride	Li ₃ N	2,0	1,7	0,9	40,2%	0,8	0,7	0,4
WA2904	Sulfoderivate, Nitroderivate d. Kohlenwasserstoffe	H ₂ N ₂ O ₂	71,5	45,5	94,2	45,2%	32,3	20,6	42,5
WA2921	Verbindungen mit Aminofunktion	Anilin u.a.	278,1	547,0	338,4	^d	61,6	164,1	101,5
WA2922	Amine mit Sauerstofffunktionen	C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₂	140,6	208,8	286,6	19,2%	27,0	40,0	55,0
WA2923	Quartäre organische Ammoniumsalze, Lecithine	C ₅ H ₁₄ ClNO	36,9	80,1	95,3	10,0%	3,7	8,0	9,5
WA2924	Verbindungen mit Carbonsäureamidfunktion	CH ₃ NO ₂	769,1	65,8	89,2	23,0%	176,5	15,1	20,5
WA2925	Verbindungen mit Carbonsäureimidfunktion		15,4	15,9	15,6	10,0%	1,5	1,6	1,6
WA2926	Verbindungen mit Nitrilfunktion	C ₃ H ₃ N	k.A.	107,4	101,2	26,4%	k.A.	28,4	26,7
WA2928	Organische Derivate des Hydrazins, Hydroxylamins	N ₂ H ₄ , NH ₂ OH	4,8	8,4	5,2	65,0%	3,1	5,4	3,4
WA2929	Verbindungen mit anderen Stickstofffunktionen	HNCO	485,8	117,3	301,4	32,6%	158,2	38,2	98,1
WA2930	Organische Thioverbindungen	C ₅ H ₁₁ NO ₂ S	148,8	65,3	130,4	9,4%	13,9	6,1	12,3
WA2933	Heterocyclische Verbindungen mit Stickstoff	Melamin	193,1	353,5	304,8	47,0%	90,7	166,1	143,3
WA2934	Nucleinsäure u. ihre Salze, andere heterocycl. Verb.		27,7	18,0	43,6	16,8%	4,6	3,0	7,3
WA2935	Sulfonamide	H ₂ NSO ₂ NH ₂	0,7	5,7	1,8	29,2%	0,2	1,7	0,5
WA3402	Grenzflächenaktive Zubereitungen, Waschmittel		2828,5	1191,9	1681,5	2,1%	59,4	25,0	35,3
WA3501	Casein, Caseinate, Caseinderivate, Caseinleime		11,6	31,2	30,3	15,0%	1,7	4,7	4,5

Waren-Gruppe	Bezeichnung	Verbindung ^c	Menge (1000 t)			N-Gehalt ^b (%)	N-Fluss (kt N a ⁻¹)		
			Produktion ^a	Import	Export		Produktion	Import	Export
WA3502	Albumine, Albuminate und andere Albuminderivate	Eiprotein	18,3	16,1	28,8	16,0%	2,9	2,6	4,6
WA3503	Gelatine, Leime tierischen Ursprungs		21,8	31,9	26,0	15,0%	3,3	4,8	3,9
WA3504	Peptone und andere Eiweißstoffe, Hautpulver	Proteine	10,8	31,3	31,6	16,0%	1,7	5,0	5,1
WA3507	Enzyme, zubereitete Enzyme		7,4	343,3	25,6	15,0%	1,1	51,5	3,8
WA3908	Polyamide in Primärformen		1016,3	453,7	711,9	12,0%	122,0	54,4	85,4
WA3909	Aminoharze, Phenolharze, Polyurethane		1852,7	649,5	1090,9	10,0%	185,3	64,9	109,1
Summen Produktion, Import und Export chemischer Erzeugnisse - ohne Düngemittel							1797,7	1234,0	1216,9
(WA3102)	Stickstoffhaltige Düngemittel ^e	rein N	1274,2	1028,2	580,2	100,0%	1274,2	1028,2	580,2
Summen Produktion, Import und Export insges.							3071,9	2262,2	1797,1

^a Gewicht der zum Absatz bestimmten Produktion.

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

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

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

^e Angaben für stickstoffhaltige Düngemittel nach IVA (2017); Mittel Düngejahre 2009/10 – 2013/14.

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 2017a, Tab. 42131-0003) und sind in Tab. 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 2010 – 2014 (Quelle: DESTATIS 2015a, 2017a; IVA 2017).

Produktionserhebung		Menge (1000 t)			N-Gehalt ^b (%)	N-Fluss (kt N a ⁻¹)		
Warengruppen	Bezeichnung	Produktion ^a	Import	Export		Produktion	Import	Export
WA24	Tabak	249	276	272	4,0%	9,9	11,0	10,9
WA41 - WA43, WA50	Textilien (Leder, Seide, Pelze)	100	474	342	15,0%	14,9	71,1	51,3
WA44xx	Fertigwaren (Holzverarbeitung)	17.318	3.497	9.790	0,14%	24,2	7,0	19,6
WA47 - WA49	Zellstoff/Papier	32.559	22.379	22.432	0,2%	65,1	44,8	44,9
WA51	Wolle, feine und grobe Tierhaare	4	93	67	15,0%	0,6	0,2	0,1
WA52, WA53	Baumwoll-Gewebe	54	312	170	0,2%	0,1	0,6	0,3
WA54, WA55	Synthetische Fasern und Gewebe	335	941	890	12,0%	40,2	112,9	106,8
WA56 - WA67	Bekleidung, Stoffe, Teppiche, Schuhe	985	3.793	2.368	0,2%	2,0	56,8	70,6
WA94xx	Möbel, Beleuchtungskörper usw.	3.063	3.473	2.200	0,2%	6,1	6,9	4,4
Summen Produktion, Import und Export						163,2	311,4	308,9

^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 163,2 kt N a⁻¹ zuzüglich des Import-Export-Saldos von 2,5 kt N a⁻¹.

5.4 Zusammenfassung der N-Flüsse industrielle Produktion (MP)

In Tab. 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 2010 – 2014.

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)	123,7
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-animProd	Tierische Marktprodukte	N(org)	413,5
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-fish	Erzeugung Aquakultur und Binnenfischerei	N(org)	0,7
AG.SM	MP.FP	AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte	N(org)	1134,0
HY.CW	MP.FP	HY.CW-MP.FP-fish	Anlandungen Küsten- und Hochseefischerei	N(org)	6,3
RW	MP.FP	RW-MP.FP-prod	Import von Nahrungs- und Futtermitteln	N(org)	890,0
MP.FP	EF.EC	MP.FP-EF.EC-fuel	Landwirtschaftliche Produkte zur Erzeugung von Kraftstoffen	N(org)	123,7
MP.FP	MP.OP	MP.FP-MP.OP-crop	Landwirtschaftliche Erzeugnisse zur Verwendung als industrielle Rohstoffe	N(org)	34,2
MP.FP	HS.HB	MP.FP-HS.HB-food	Nahrungsmittel für die Humanernährung	N(org)	599,4
MP.FP	HS.HB	MP.FP-HS.HB-feed	Futtermittel für Heimtiere (Hunde und Katzen)	N(org)	68,0
MP.FP	AG.AH	MP.FP-AG.AH-feed	Futtermittel für landwirtschaftliche Nutztiere (aus inländ. Erzeugung u. Importen)	N(org)	1102,2
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-org-Fert	Tiermehle – Verwendung als organische Düngemittel	N(org)	12,8
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-seed	Herstellung v. landwirtschaftlichem Saat- u. Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	22,2
MP.FP	AG.BP	MP.FP-AG.BP-cosub	Biogas-Cosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	31,4
MP.FP	WS.SW	MP.FP-WS.SW-fuel	Tiermehle - Thermische Verwertung	N(org)	18,8
MP.FP	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Nahrungs- und Futtermittelindustrie	N(org)	36,3
MP.FP	RW	MP.FP-RW-prod	Export von Nahrungs- und Futtermitteln	N(org)	635,2
Sub-Pool Stickstoff-Chemie (MP.NC)					
SOURCE ^a (AT)	MP.NC	AT-MP.NC-NH3	Ammoniak-Synthese (Haber-Bosch-Verfahren) ^b	NH3	2694,6
EF.EC	MP.NC	EF.EC-MP.NC-fuel	Rohöl- und Raffinerieprodukte als Rohstoffe für die chemische Industrie	N(org)	32,1
RW	MP.NC	RW-MP.NC-prod	Import von Produkten der Stickstoff-Chemie	NH3, NO3 N(org)	2262,2
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der chemischen Industrie	NO _x , N ₂ O	8,7 2,0
MP.NC	AT	MP.NC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der chemischen Industrie	NH3	7,5
MP.NC	EF.EC	MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Entstickung von Rauchgasen	NH3	85,0

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
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)	1356,0
MP.NC	HS.MW	MP.NC-HS.MW-minFert	N-Mineraldünger zur Verwendung in Haus- und Kleingärten	NH ₃ , NO ₃ N(org)	45,0
MP.NC	AG.SM	MP.NC-AG.SM-minFert	N-Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	NH ₃ , NO ₃ N(org)	1619,0
MP.NC	WS.WW	MP.NC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Stickstoff-Chemie	N(org)	68,6
MP.NC	RW	MP.NC-RW-prod	Export von Produkten der Stickstoff-Chemie	NH ₃ , NO ₃ N(org)	1797,1
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)	34,2
MP.NC	MP.OP	MP.NC-MP.OP-prod	Chemische Grundstoffe und Erzeugnisse zur Herstellung von Konsumgütern	N(org)	1356,0
FS.FO	MP.OP	FS.FO-MP.OP-wood	Holz zur stofflichen Nutzung	N(org)	27,2
WS.SW	MP.OP	WS.SW-MP.OP-waste	Recycling von Abfallstoffen (stoffliche Verwertung)	N(org)	349,2
RW	MP.OP	RW-MP.OP-prod	Import von N-haltigen Konsumgütern	N(org)	311,4
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NO _x , N ₂ O	7,7 0,9
MP.OP	AT	MP.OP-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NH ₃	4,3
MP.OP	HS.HB	MP.OP-HS.HB-prod	Verbrauch von (N-haltigen) Konsumgütern	N(org)	165,8
MP.OP	WS.SW	MP.OP-WS.SW-waste	Abfälle aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	48,4
MP.OP	WS.WW	MP.OP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	21,5
MP.OP	RW	MP.OP-RW-prod	Export von N-haltigen Konsumgütern	N(org)	308,9

^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 (Tab. 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 2010 - 2014.

Sub-Pool	Zufluss kt N a ⁻¹	Abfluss kt N a ⁻¹	Differenz kt N a ⁻¹
Nahrungs- und Futtermittelindustrie	2568,2	-2684,2	- 116,0
Stickstoff-Chemie	4989,3	-4989,3	0
Sonstige industrielle Produktion	2077,9	-557,5	1520,4
Summe Pool „Industrielle Produktion“, ohne interne N-Flüsse zwischen Sub-Pools	8244,9	-6840,5	1404,4

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 MP.OP besteht eine Diskrepanz von insgesamt rund 1500 kt N a⁻¹. Ein wesentlicher Teil davon ist auf die Differenz von rund 1200 kt N a⁻¹ zurückzuführen, die zwischen der N-Menge in den chemischen Grundstoffen und Erzeugnissen zur Herstellung von Konsumgütern von 1356 kt N a⁻¹ (MP.NC-MP.OP-prod) und der N-Menge von (nur) 166 kt N a⁻¹ in den Konsumgütern zum Absatz an Verbraucher (MP.OP-HS.MW-prod) klappt. Diese Unsicherheit ist auf zwei Ursachen zurückzuführen: zum einen ist die Produktionserhebung (DESTATIS 2017) aufgrund der Doppelzählungen und der vielen unveröffentlichten Werte offensichtlich nur sehr eingeschränkt geeignet, die Warenströme zur Weiterverarbeitung und zum Endverbrauch sachgerecht 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 Rückfluss in die industrielle Produktion von rund 350 kt N a⁻¹ mit dem Recycling von Abfallstoffen zu der o.g. Diskrepanz bei, wobei auch dieser N-Fluss sehr unsicher ist.

In der vorstehenden Erläuterung bzw. in Tab. 5-10 wird die gesamte Differenz zwischen Zufluss und Abfluss dem Sub-Pool MP.OP 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 MP.OP übergeben werden. In der Gesamtbeurteilung 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 NH_3 -Synthese wird in Tab. 5-1 und Tab. 5-9 als Pool(ex) „SOURCE“ aufgeführt. Diese Benennung wird eingeführt, da im NNB (ECE 2013) der Fall einer Pool-internen Erzeugung von N_r - hier über die Erzeugung von NH_3 aus N_2 - im N-Flussschema nicht vorgesehen ist (s.a. Kap. 4.4). Im STAN-Diagramm der N-Flüsse (Kap. 12) bildet die Atmosphäre den Pool(ex) für diesen Fluss.

5.6 Unsicherheitsbetrachtung der N-Flüsse industrielle Produktion (MP)

In Tab. 5-11 sind Unsicherheiten in der Berechnung der N-Flüsse für den Pool „Industrielle Produktion“ aufgeführt.

Tabelle 5-11: Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Industrielle Produktion“.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
Sub-Pool Nahrungs- und Futtermittelindustrie (MP.FP)					
EF.EC-MP.FP-prod	Reststoffe aus der Erzeugung von Kraftstoffen aus landwirtschaftlichen Produkten	N(org)	S. Tab. 4-8		1
AG.AH-MP.FP-anim-Prod	Tierische Marktprodukte	N(org)	S. Tab. 7-7		1
AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte	N(org)	S. Tab. 7-7		1
RW-MP.FP-prod	Import von Nahrungs- und Futtermitteln	N(org)	Gering; Waren(gruppen) z.T. nur aggregiert	Sehr gering	2
MP.FP-EF.EC-fuel	Landwirtschaftliche Produkte zur Erzeugung von Kraftstoffen	N(org)	Gering; Anbauflächen: Statistik, Erträge: Mittelwert DE	Sehr gering	2
MP.FP-MP.OP-crop	Landwirtschaftliche Erzeugnisse zur Verwendung als industrielle Rohstoffe	N(org)	Gering; Statistik Fachverband	Gering	2
MP.FP-HS.HB-food	Nahrungsmittel für die Humanernährung	N(org)	Gering; Waren(gruppen) z.T. nur aggregiert	Gering	2
MP.FP-HS.HB-feed	Futtermittel für Heimtiere (Hunde und Katzen)	N(org)	Mittel; Tierzahl und Futterbedarf geschätzt	Mittel	3
MP.FP-AG.AH-feed	Futtermittel für landwirtschaftliche Nutztiere (inländische Erzeugung)	N(org)	S. Tab. 7-7		1
MP.FP-AG.SM-org-Fert	Tiermehle – Verwendung als organische Düngemittel	N(org)	Gering; Statistik Fachverband	Gering	2
MP.FP-AG.SM-seed	Herstellung von landwirtschaftlichem Saat- und Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	S. Tab. 7-7		1
MP.FP-AG.BP-cosub	Biogas-Cosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	S. Tab. 7-7		2

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
MP.FP-WS.SW-fuel	Tiermehle - Thermische Verwertung	N(org)	Gering; Statistik Fachverband	Gering	2
MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Nahrungs- und Futtermittelindustrie	N(org)	S. Tab. 9-8		4
MP.FP-RW-prod	Export von Nahrungs- und Futtermitteln	N(org)	Gering; Waren(gruppen) z.T. nur aggregiert	Sehr gering	2
Sub-Pool Stickstoff-Chemie (MP.NC)					
SOURCE-MP.NC-NH3	Ammoniak-Synthese (Haber-Bosch-Verfahren) ^b	NH3	Sehr gering	Entfällt (statist. Angabe in t N)	1
EF.EC-MP.NC-fuel	Rohöl- und Raffinerieprodukte als Rohstoffe für die chemische Industrie	N(org)	Mittel (s. Kap 4.4.1)	Mittel	
RW-MP.NC-prod	Import von Produkten der Stickstoff-Chemie	NH3, NO3 N(org)	Mittel; Produktgruppen z.T. stark aggregiert	Mittel; mittlere N-Gehalte für Produktgruppen geschätzt	3
MP.NC-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der chemischen Industrie	NO _x , N ₂ O	S. Tab. 3-11		2 / 4
MP.NC-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der chemischen Industrie	NH3	S. Tab. 3-11		3
MP.NC-EF.EC-prod	NH ₃ zur Entstickung von Rauchgasen	NH3	Mittel; Expertenschätzung	Sehr gering	3
MP.NC-MP.OP-prod	Produktion von chemischen Grundstoffen und Erzeugnissen (außer Mineraldüngern)	NH3, NO3 N(org)	Hoch; kann nur als Differenzmenge geschätzt werden (s. Kap. 5.2.3)		4
MP.NC-HS.MW-min-Fert	N-Mineraldünger zur Verwendung in Haus- und Kleingärten	NH3, NO3 N(org)	Mittel; Expertenschätzung	Entfällt (statist. Angabe bereits in t N)	3
MP.NC-AG.SM-min-Fert	N-Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	NH3, NO3 N(org)	Sehr gering (s. DESTATIS Qualitätsbericht)	Entfällt (statist. Angabe bereits in t N)	1
MP.NC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Stickstoff-Chemie	N(org)	S. Tab. 9-8		4
MP.NC-RW-prod	Export von Produkten der Stickstoff-Chemie	NH3, NO3 N(org)	Mittel; Produktgruppen z.T. stark aggregiert	Mittel; mittlere N-Gehalte für Produktgruppen geschätzt	3

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
Sub-Pool Sonstige Industrielle Produktion (MP.OP)					
MP.FP-MP.OP-crop	Landwirtschaftliche Erzeugnisse zur Verwendung als industrielle Rohstoffe	N(org)	Gering; Statistik Fachverband	Gering	2
MP.NC-MP.OP-prod	Chemische Grundstoffe und Erzeugnisse zur Herstellung von Konsumgütern	N(org)	Hoch; kann nur als Differenzmenge geschätzt werden (s. Kap. 5.2.3)		4
FS.FO-MP.OP-wood	Holz zur stofflichen Nutzung	N(org)	s. Tab. 8-9		2
WS.SW-MP.OP-waste	Recycling von Abfallstoffen (stoffliche Verwertung)	N(org)	Mittel bis hoch (s. Tab. 9-11)	Hoch (s. Tab. 9-11)	4
RW-MP.OP-prod	Import von N-haltigen Produkten (Konsumgüter)	N(org)	Hoch; Mengen der Warengruppen z.T. nicht zu ermitteln	Hoch; mittlere N-Gehalte für Warengruppen geschätzt	4
MP.OP-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NO _x , N ₂ O	S. Tab. 3-11		2 / 4
MP.OP-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus der sonstigen industriellen Produktion	NH ₃	S. Tab. 3-11		3
MP.OP-HS.HB-prod	Produktion von (N-haltigen) Konsumgütern	N(org)	Hoch; Mengen der Warengruppen z.T. nicht zu ermitteln	Hoch; mittlere N-Gehalte für Warengruppen geschätzt	4
MP.OP-WS.SW-waste	Abfälle aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	Mittel bis hoch (s. Tab. 9-11)	Hoch (s. Tab. 9-11)	4
MP.OP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	S. Tab. 9-8		4
MP.OP-RW-prod	Export von N-haltigen Produkten (Konsumgüter)	N(org)	Hoch; Mengen der Warengruppen z.T. nicht zu ermitteln	Hoch; mittlere N-Gehalte für Warengruppen geschätzt	4

^a Größenordnung der Unsicherheit, Einstufung gem. Tab. 2-4.

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; Tab. 6-1 gibt eine Übersicht der relevanten Stickstoffflüsse.

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

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.

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 (Exkremete)	N(org)	9.2.1
Sub-Pool Konsumgüter (HS.MW)					
AT	HS.MW	AT-HS.MW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Siedlungsflächen	NHy, 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	WS.SW	HS.MW-WS.SW-waste	Konsumgüter-Abfall aus dem Siedlungsbereich	N(org)	9.1.1
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 sind vernachlässigbar bzw. werden im National Inventory Report (NIR, UBA 2016a) nicht berichtet.

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 NH_3 -Ausscheidung 17 g N pro Erwachsenen und Jahr.

$$\text{NH}_3\text{-Abgabe: } 0,017 \text{ kg NH}_3\text{-N Erw.}^{-1} \text{ a}^{-1} * 80,9 \text{ Mio Einwohner} = 1,4 \text{ kt N a}^{-1}.$$

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 Tab. 5-8).

Die Produktion bzw. der Absatz von Konsumgütern werden in der Produktionserhebung (DESTATIS 2017a, 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 Abbaufeldern, Deponien etc.) aufgeführt. Diese N-Flüsse stellen zwar keinen Güterkonsum dar, in der Strukturierung des NNB (ECE 2013) ist aber kein anderer Sub-Pool für den Inflow bzw. Outflow dieser N-Flüsse vorhanden.

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

In Tab. 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 2010 – 2014^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)	599,4
MP.FP	HS.HB	MP.FP-HS.HB-feed	Futtermittel für Heimtiere (Hunde und Katzen)	N(org)	68,0
HY.GW	HS.HB	HY.GW-HS.HB-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO ₃	15,4
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)	127,9
HS.HB	WS.WW	HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser aus Haushalten (Exkrememente)	N(org)	350,0
Sub-Pool Konsumgüter (HS.MW)					
AT	HS.MW	AT-HS.MW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Siedlungsflächen	NHy NO _x	40,0 19,5
MP.NC	HS.MW	MP.NC-HS.MW-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in Haus- und Kleingärten	NO ₃ , NH ₃ N(org)	45,0
MP.OP	HS.MW	MP.OP-HS.MW-prod	Verbrauch von Konsumgütern	N(org)	165,8
WS.WW	HS.MW	WS.WW-HS.MW-sludge	Klärschlamm zur Verwertung für landbauliche Maßnahmen	N(org)	31,2
HS.MW	WS.SW	HS.MW-WS.SW-waste	Abfall von Konsumgütern	N(org)	45,9
HS.MW	WS.WW	HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser aus dem Siedlungsbereich (befestigte Flächen)	N(org)	30,0
HS.MW	HY.GW	HS.MW-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Siedlungs- und Verkehrsflächen	NO ₃	36,0

^a Anmerkung: NO_x- und N₂O-Emissionen aus dem Siedlungsbereich sind vernachlässigbar bzw. werden im National Inventory Report (NIR, UBA 2016a) nicht berichtet.

6.4 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Ernährung und Konsum

In Tab. 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 395 kt N a⁻¹ in Erscheinung, die bezogen auf die eingehende N-Menge rund 40 % 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. 5.6 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) 46 kt N a⁻¹ im Abfall an Konsumgütern, die aus der Abfallstatistik ermittelt wurde, im Gegensatz zum N-Zufluss von 166 kt N a⁻¹ mit dem Verbrauch von Konsumgütern. 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 166 kt N a⁻¹ angesetzt, dann würde die Abfallgesamtmenge (Nahrungsmittel und Konsumgüter) auf 294 kt N a⁻¹ steigen und die Differenz des Pools „Ernährung und Konsum“ vermindert sich auf 274 kt N a⁻¹.

Tabelle 6-3: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse^a (ohne landwirtschaftliche Produkte) im Pool „Ernährung und Konsum“, Mittel 2010 - 2014.

Zufluss (N _r -Quellen)		Abfluss (N _r -Verwendung) ^a	
	kt N a ⁻¹		t N a ⁻¹
Atmosphärische Depositionen	59,5	Abfall	- 173,8
Nahrungsmittel und Tierfutter	667,4	Abwasser (aus Haushalten und von befestigten Flächen)	- 379,9
Verbrauch Konsumgüter	165,8	Nitratauswaschung (Siedlungsbereich)	- 36,0
Verwendung Mineraldünger, Holz und Klärschlamm im Siedlungsbereich zus.	76,2		
NO ₃ -Entnahme mit Grundwasserförderung zur Trinkwasserversorgung	15,4		
Summe Zuflüsse	984,3	Summe Abflüsse	- 589,7
Differenz: 394,6			

^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.

6.5 Unsicherheitsbetrachtung der N-Flüsse im Pool Ernährung und Konsum (HS)

In Tab. 6-4 sind die Unsicherheiten in der Berechnung der N-Flüsse für den Pool „Ernährung und Konsum“ aufgeführt.

Tabelle 6-4: Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Ernährung und Konsum“.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
Sub-Pool Menschliche Ernährung und Heimtiere (HS.HB)					
MP.FP-HS.HB-food	Nahrungsmittel für die Humanernährung	N(org)	S. Tab. 5-11		2
MP.FP-HS.HB-feed	Futtermittel für Heimtiere (Hunde und Katzen)	N(org)	S. Tab. 5-11		3
HY.GW-HS.HB-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO ₃	Gering	Mittel, NO ₃ -Konzentration geschätzt	3
HS.HB-WS.SW-waste	Abfälle aus Haushalten (menschliche Ernährung)	N(org)	Hoch, s. Tab. 5-11		4
HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser aus Haushalten (Exkrementen)	N(org)	S. Tab. 9-8		3
Sub-Pool Konsumgüter (HS.MW)					
AT-HS.MW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Siedlungsflächen	NHy, NOx	S. Tab. 3-11		3
MP.NC-HS.MW-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in Haus- und Kleingärten	NO ₃ , NH ₃ , N(org)	S. Tab. 5-11		3
MP.OP-HS.HB-prod	Verbrauch von Konsumgütern	N(org)	S. Tab. 5-11		4
WS.WW-HS.MW-sludge	Klärschlamm zur Verwertung für landbauliche Maßnahmen	N(org)	S. Tab. 9-8		2
FS.FO-HS.MW-wood	Holz zur energetischen Nutzung - Privathaushalte	N(org)	S. Tab. 8-9		2
HS.MW-WS.SW-waste	Konsumgüter-Abfall aus dem Siedlungsbereich	N(org)	Hoch, s. Tab. 5-11		4
HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser aus dem Siedlungsbereich (befestigte Flächen)	N(org)	S. Tab. 9-8		4
HS.MW-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Siedlungs- und Verkehrsflächen	N(org)	s. Tab. 10-8		4

^a Größenordnung der Unsicherheit, Einstufung gem. Tab. 2-4.

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 (Futtermitteln, Wirtschaftsdünger, Biogassubstrate usw.) miteinander verknüpft. Dieser Struktur folgend wird für die Ermittlung der N-Flüsse in Deutschland der Pool „Landwirtschaft“ (Agriculture) - abweichend von NNB Annex 3 bzw. Annex 5 (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 Annex 5 dem 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-Flussschema für Deutschland als Sub-Pool der Landwirtschaft aufgeführt. Tab. 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) und Mielenz und Dieser (2018) vom Julius-Kühn-Institut (JKI, Braunschweig) in Abstimmung mit dem Institut für Ressourcenmanagement und Landschaftsökologie, Univ. Gießen, berechnet und vom BMEL jährlich veröffentlicht werden. Für das vorliegende N-Flussschema für Deutschland 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 (www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/statistischer-monatsbericht-des-bmel-kapitel-a-landwirtschaft/, download der Tabellen MBT-0111130-0000.xls bis MBT0111290-0000.xls). Für die Erfassung der N-Flüsse werden im Folgenden teilweise Angaben herangezogen, die in den Dateien „Daten“ bzw. „Berechnung“ aufgeführt sind. Die Angaben 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 Autoren 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	NHy 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-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	7.3
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

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
RW	AG.SM	RW-AG.SM-ma-nure	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-N ₂	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 (Tab. 7-2). Die Angaben der Tab. 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 2010 - 2014.

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)	1102,2
AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung – Bodenproduktion	N(org)	1009,4
AG.AH-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Tierproduktion (einschl. Wirtschaftsdüngermanagement)	NO _x N ₂ O	n.b. 8,3
AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus dem Stall und der Lagerung von tierischen Ausscheidungen	NH ₃	219,4
AG.AH-MP.FP-animProd	Tierische Marktprodukte	N(org)	413,5
AG.AH-AG.SM-manure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Wirtschaftsdünger, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	737,9
AG.AH-AG.BP-manure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Gärsubstrat, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	181,0

7.1.2 Aquakultur und Binnenfischerei (AG.AH-fish)

In der Systematik der NNB (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 2016; Tab. 281), Mittel 2010 - 2014:

Aquakultur und Binnenfischerei: 24900 t Fanggewicht * 2,8 % N (ECE 2013, Annex 6, Table 12)
= 0,7 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 (Tab. 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) eingehen und davon ausgehen (s. Tab. 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 Tab. 7-1 bzw. in den Kapiteln 7.2.2 bis 7.2.4 aufgeführt.

Tabelle 7-3: N-Flüsse der Stickstoffbilanzierung für Sub-Pool „Bodenproduktion“, Mittel 2010 - 2014.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
AT-AG.SM-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NH _y NO _x	185,2 90,9
AT-AG.SM-Nfix	Biologische N-Fixierung in landwirtschaftlich genutzten Flächen	N(org)	194,6
MP.FP-AG.SM-orgFert	Düngung mit organischen Düngemitteln - Tiermehle	N(org)	12,8
MP.FP-AG.SM-seed	Zufuhr mit Saat- und Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	22,2
MP.NC-AG.SM-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	N(ges)	1619,0 ^a
AG.AH-AG.SM-manure	Wirtschaftsdünger aus innerbetrieblicher Erzeugung in der Bodenproduktion, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	737,9
AG.BP-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	382,5
HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Zufuhr mit Beregnungswasser	NO ₃	1,6
WS.SW-AG.SM-compost	Düngung mit organischen Düngemitteln – Kompost (aus Siedlungsabfällen)	N(org)	23,4
WS.WW-AG.SM-sludge	Düngung mit organischen Düngemitteln - Klärschlamm	N(org)	24,9 ^b
RW-AG.SM-manure	Import von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung	N(ges)	14,3
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	35,3 56,6
AG.SM-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus der Ausbringung von mineralischen und organischen Düngemitteln sowie aus Bewirtschaftung organischer Böden	NH ₃	336,1
AG.SM-AT-N ₂	Denitrifikation aus der Bewirtschaftung von landwirtschaftl. genutzten Mineralböden und organischen Böden	N ₂	233,9

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte	N(org)	1134,0
AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung	N(org)	1009,4
AG.SM-AG.BP-crop	Pflanzliche Biomasse aus innerbetrieblicher Erzeugung als Biogas-Substrat	N(org)	246,2
AG.SM-HY.GW-leach	NO ₃ -Auswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen (Wurzelzone)	NO ₃	757,1
AG.SM-HY.SW-runoff	N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächen-gewässer über Runoff, Erosion und Drainagen	NO ₃ N(org)	113,7 8,2

^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 2017b).

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

Im Jahr 2009 wurden in der Landwirtschaft 293 Mio m³ Wasser für die Feldbewässerung eingesetzt (DESTATIS 2011, Tab. 1202), aktuellere Zahlen sind nicht verfügbar. Rund 75 % des Bewässerungswassers wurden 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. 1,6 kt N a⁻¹ (in 2009) 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 2015, 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 nachfolgend verwendet wird. Als Flächenbezug wird hier die Landwirtschaftsfläche nach Landwirtschaftszählung (2010) herangezogen (vgl. Tab. 3-3), da diese Flächenangabe mutmaßlich mit der tatsächlich genutzten Fläche (mit Denitrifikation im Boden) am besten übereinstimmt.

$$\text{Denitrifikation } 14 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} * 16.704 \text{ kha Landwirtschaftsfläche} = 233,9 \text{ kt N a}^{-1}.$$

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 Differenz zwischen den Einträgen insgesamt und den übrigen kalkulierten Austrägen aus dem Pool „Landwirtschaft“ berechnet (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 3320,1 kt N a⁻¹. Abfahren sind die N-Flüsse in alle Pools mit Ausnahme der Hydrosphäre: pflanzliche und tierische Marktprodukte sowie gasförmige N_r-Emissionen (NH₃, NO_x), die beide vergleichsweise genau be-

rechnet werden können, und weiterhin die Denitrifikation in der Wurzelzone von Landwirtschaftböden (deren Wert eher eine Platzhaltergröße darstellt). Die genannten N-Flüsse summieren sich auf 2440,8 kt N a⁻¹ (s. Zwischensumme Tabelle 7-6, rechte Spalte), die Differenz beträgt 879,0 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. dazu Kap. 7.5.2), wird diese Differenz von 879,0 kt N a⁻¹ als N-Fluss in die Hydrosphäre interpretiert, das heißt auf die N-Austräge mit Wasserflüssen aus der Landwirtschaft verteilt. Dies umfasst die beiden N-Flüsse der NO₃-Auswaschung mit dem Sickerwasser aus der Wurzelzone der Böden (als Systemgrenze des Pools „Landwirtschaft“ in diesem Bereich) sowie den 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 121,9 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 verbleiben dann als Restmenge 757,1 kt N a⁻¹.

7.3 Biogasproduktion (AG.BP)

In Deutschland wird seit Beginn der 2000er Jahre ein wachsender Teil der pflanzlichen Erzeugung – im Wesentlichen Silomais und andere Pflanzen zur Grünernte – sowie ein Teil der Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung in Biogasanlagen fermentiert; die Gärreste werden wieder auf Landwirtschaftsflächen ausgebracht. Die Energieerzeugung in Biogasanlagen stellt damit, neben der Bodenproduktion und der Tierproduktion, einen neuen, dritten Produktionszweig innerhalb 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 (Tab. 7-4); die Ergebnisse werden aus der Stickstoffbilanzierung Deutschland des BMEL (s. Einleitung zu Kap. 7) übernommen.

Tabelle 7-4: N-Flüsse der Stickstoffbilanzierung für Sub-Pool „Biogasproduktion“, Mittel 2010 - 2014.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
MP.FP-AG.BP-cosub	Biogas-Cosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	31,4
AG.HM-AG.BP- manure	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugtem Wirtschaftsdünger, nach Abzug Stall- und Lagerungsverluste	N(org)	181,0
AG.SM-AG.BP- crop	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugter pflanzlicher Biomasse	N(ges)	246,2
AG.BP-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Biogaserzeugung	NO _x	0,7
		N ₂ O	0,6
AG.BP-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus Biogaserzeugung	NH ₃	2,5 ^a
AG.BP-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	382,5

7.4 Zusammenfassung der N-Flüsse Landwirtschaft (AG)

In Tab. 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 2010 – 2014.

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)	1102,2
AG.SM	AG.AH	AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung – Bodenproduktion	N(org)	1009,4
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. 8,3
AG.AH	AT	AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus dem Stall und der Lagerung von tier. Ausscheidungen	NH ₃	219,4
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-animProd	Tierische Marktprodukte	N(org)	413,5
AG.AH	MP.FP	AG.AH-MP.FP-fish	Erzeugung Aquakultur und Binnenfischerei	N(org)	0,7
AG.AH	AG.SM	AG.AH-AG.SM-ma-nure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Wirtschaftsdünger, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	737,9
AG.AH	AG.BP	AG.AH-AG.BP-ma-nure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Gärsubstrat, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	181,0
Sub-Pool Pflanzenproduktion (AG.SM)					
AT	AG.SM	AT-AG.SM-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NHy NO _x	185,2 90,9
AT	AG.SM	AT-AG.SM-Nfix	Biologische N-Fixierung in landwirtschaftlich genutzten Flächen	N(org)	194,6
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-org-Fert	Düngung mit organischen Düngemitteln - Tiermehle	N(org)	12,8
MP.FP	AG.SM	MP.FP-AG.SM-seed	Zufuhr mit Saat- und Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	22,2
MP.NC	AG.SM	MP.NC-AG.SM-minFert	Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	N(ges)	1619,0
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)	737,9
AG.BP	AG.SM	AG.BP-AG.SM-di-gest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	382,5
HY.GW	AG.SM	HY.GW-AG.SM-ir-rig	NO ₃ -Zufuhr mit Beregnungswasser	NO ₃	1,6
WS.SW	AG.SM	WS.SW-AG.SM-compost	Düngung mit organischen Düngemitteln – Kompost (aus Siedlungsabfällen)	N(org)	23,4

Pool (ex)	Pool (in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
WS.WW	AG.SM	WS.WW-AG.SM-sludge	Klärschlamm zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(org)	24,9
RW	AG.SM	RW-AG.SM-manure	Import von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung	N(ges)	14,3
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	35,3 56,6
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	336,1
AG.SM	AT	AG.SM-AT-N ₂	Denitrifikation aus der Bewirtschaftung von landwirtschaftlich genutzten Mineralböden sowie organischen Böden	N ₂	233,9
AG.SM	MP.FP	AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte	N(org)	1134,0
AG.SM	AG.AH	AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung	N(org)	1009,4
AG.SM	AG.BP	AG.SM-AG.BP-crop	Pflanzliche Biomasse aus innerbetrieblicher Erzeugung als Biogas-Substrat	N(org)	246,2
AG.SM	HY.GW	AG.SM-HY.GW-leach	NO ₃ -Auswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen (Wurzelzone)	NO ₃	757,1
AG.SM	HY.SW	AG.SM-HY.SW-runoff	N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen	NO ₃ N(org)	113,7 8,2

Sub-Pool Biogasproduktion (AG.BP)

MP.FP	AG.BP	MP.FP-AG.BP-cosub	Biogas-Kosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	31,4
AG.AH	AG.BP	AG.AHM-AG.BP-manure	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugtem Wirtschaftsdünger, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	181,0
AG.SM	AG.BP	AG.SM-AG.BP-crop	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugter pflanzlicher Biomasse	N(org)	246,2
AG.BP	AT	AG.BP-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus der Biogaserzeugung	NO _x N ₂ O	0,7 0,6
AG.BP	AT	AG.BP-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus Biogaserzeugung	NH ₃	2,5
AG.BP	AG.SM	AG.BP-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	382,5

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 Tab. 7-6 sind die eingehenden und ausgehenden N-Flüsse gegenübergestellt.

Tabelle 7-6: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Pool „Landwirtschaft“, Mittel 2010 – 2014; *kursiv: als Differenz berechneter N-Fluss.*

Zufluss (N _r -Quellen)	kt N a ⁻¹	Abfluss (N _r -Verwendung)	kt N a ⁻¹
Mineraldünger	1619,0	Pflanzliche Marktprodukte	-1134,0
Düngung mit organischen Düngemitteln ^a	60,3	Tierische Marktprodukte	-413,5
Futtermittel – industrielle Erzeugung	1102,2	NH ₃ -Emissionen insgesamt	-558,0
Zufuhr mit Saat- und Pflanzgut	22,2	NO _x - und N ₂ O-Emission insgesamt	-101,4
Import von Wirtschaftsdüngern	14,3	Denitrifikation in Böden (Wurzelzone)	-233,9
Biogas-Cosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	31,4	Zwischensumme^c	- 2440,8^c
Atmosphärische N-Deposition (NO _x , NH _y)	276,1	Lateraler NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer (Runoff, Erosion und Drainage)	-121,9 ^d
Biologische N-Fixierung	194,6	<i>Nitratauswaschung ins Grundwasser (unterhalb der Wurzelzone)^e</i>	<i>-757,1^e</i>
Summe Zuflüsse	3320,1^b	Summe Abflüsse	-3320,1
Differenz: 0,0^f			

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

^b Einschließlich 1,6 kt N a⁻¹ mit der Feldberegnung.

^c Summe Zuflüsse abzüglich Summe Abflüsse ohne Berücksichtigung der N-Flüsse in die Hydrosphäre (879,0 kt N-Überhang).

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

^e Auswaschung (unterhalb Wurzelzone): 879,0 kt N-Überhang abzügl. lateraler NO₃-Eintrag in Oberflächengewässer (s. Kap. 7.2.4).

^f Bilanzierung erfolgt mit der Prämisse, dass die Summe Abflüsse der Summe Zuflüsse entsprechen muss (s. Kap. 7.2.4).

Die Bilanzierung für den Pool „Landwirtschaft“ (als Ganzes) wird mit der Prämisse durchgeführt, dass die Summe der Abflüsse der Summe der Zuflüsse entsprechen muss. Diese Prämisse beruht auf zwei Annahmen: (i) im Pool „Landwirtschaft“ können alle N-Flüsse – mit Ausnahme der Verlagerung mit dem Sickerwasser sowie der Denitrifikation – relativ genau erfasst werden; (ii) der N-Bodenvorrat ist konstant, 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 nachstehendes 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 ein bestimmter (unsicherer) Wert eingeführt wird

(s. Kap. 7.2.3), dann wird mit dem N-Fluss der Nitratwaschung ins Grundwasser, berechnet als Differenzgröße (s. Kap. 7.2.4), die Bilanz insgesamt ausgeglichen. Als N-Fluss mit der Nitratverlagerung im Boden (ab Bodenoberfläche) ergibt sich zunächst ein Brutto-Wert von 991 kt N a^{-1} . Dieser Wert ist um die 234 kt N a^{-1} Denitrifikation innerhalb der Wurzelzone zu vermindern, so dass als Auswaschung in das Grundwasser aus der Landwirtschaft unterhalb der Wurzelzone 757 kt N a^{-1} verbleiben.

7.5.2 N-Bodenvorrat und Vorratsänderung

Den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (Jacobs et al. 2018) zufolge beträgt der N_{total} -Vorrat (0 - 100 cm Tiefe) in Landwirtschaftsböden in Deutschland rund $11,9 \text{ t N ha}^{-1}$ (Standardabweichung ca. $\pm 3 \text{ t N ha}^{-1}$, 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).

Die Bodenzustandserhebung der landwirtschaftlich genutzten Böden ist - im Gegensatz zur Bodenzustandserhebung Wald (s. Kap. 8.1.6.1) - zum ersten Mal durchgeführt worden. Bis die zweite Inventurperiode 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 der NNB aufgeführt, da das Ergebnis nur auf Modellabschätzungen zurückgeht und derzeit noch große Unsicherheiten aufweist.

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-Bilanzen ist es, dass die N-Emissionen (NH_3 , NO_x , NO_3 , N_2) dort nicht ausgewiesen werden, sondern diese Bilanzen dienen dazu, aus der Saldierung der (zuverlässig erfassbaren) N-Flüsse in den Produkten den sogenannten „N-Überschuss“ zu berechnen, der dann als Indikatorgröße das Verlustpotenzial an reaktivem Stickstoff in Hydrosphäre und Atmosphäre beschreibt. Der Gesamtbilanz-Überschuss nach BMEL beträgt $1615,6 \text{ kt N a}^{-1}$ (entsprechend rund 97 kg N/ha LF) im Mittel 2010 – 2014. Der Wert stimmt mit der hier durchgeführten Berechnung der N-Flüsse sehr gut überein: summiert man die sogenannten N-Verluste, das heißt die N_r - und N_2 -Emissionen in die Hydrosphäre und die Atmosphäre, so ergibt sich ein Wert von $1772,4 \text{ kt N a}^{-1}$ in der NNB. Der Unterschied ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass in der BMEL-Bilanz bei der atmosphärischen N-Deposition 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 der hier durchgeführten NNB analog berechnet, indem die NH_3 -Deposition auf der LF ($185,2 \text{ kt N a}^{-1}$) bei der Summation der N-Emissionen in Hydrosphäre und Atmosphäre nicht berücksichtigt wird, dann ergibt sich ein Überschuss von $1547,5 \text{ kt N a}^{-1}$, was mit dem genannten BMEL-Überschuss von $1615,6 \text{ kt N a}^{-1}$ gut übereinstimmt. Die Verteilung des N-Überschuss auf die verschiedenen N-Spezies und deren Einträge in Atmosphäre und Gewässer ist in Tabelle 13-3 wiedergeben.

7.5.4 Anmerkungen zum National Nitrogen Budget Annex 3

Die Berechnung von N-Bilanzen für die Landwirtschaft wird in Deutschland seit vielen Jahren von zahlreichen Einrichtungen für unterschiedliche Fragestellung sowie mit verschiedenen Regionalgliederungen durchgeführt. Für diese Aufgabe ist eine (mehr oder weniger) standardisierte Methodik entwickelt worden (u.a. Bach et al. 2011, BW Stickstoff 2017), die mittlerweile als etabliert gelten kann und kontinuierlich weiterentwickelt wird. Für N-Bilanzierungen auf nationaler Ebene wird dabei angestrebt, das Mengengerüst und die Koeffizienten so weit wie möglich mit der Berichterstattung zum Nationalen Emissionsinventar für den Bereich Landwirtschaft (Rösemann et al. 2017) zu harmonisieren.

Die Vorgaben des NNB Annex 3 (ECE 2016) zur Ermittlung der N-Flüsse für den Pool „Landwirtschaft“ sind sehr umfangreich und (nach Eindruck der Autoren) eher für Personen konzipiert, die bislang über wenig Erfahrungen mit dieser Thematik verfügen. Die Bearbeiter der vorliegenden Studie haben sich daher - nicht zuletzt aus pragmatischen Gründen - nicht näher mit den Ansätzen des Annex 3 auseinandergesetzt, sondern haben im Wesentlichen die Ergebnisse zu den N-Flüssen im Bereich Landwirtschaft aus der N-Bilanzierung des BMEL für Deutschland übernommen. Unter anderem wurde die Untergliederung in Sub-Pools abweichend vom Annex 3 vorgenommen. Es wurde nicht im Einzelnen überprüft, ob die Methodik der nationalen N-Bilanzierung Deutschland mit den Berechnungsansätzen des NNB Annex 3 (ECE 2016) übereinstimmt. Ausschlaggebend für dieses Vorgehen waren folgende Überlegungen:

- ▶ Die Erstellung nationaler N-Flussbilanzen ist bislang nicht verbreitet. Im Vordergrund der hier vorgestellten Untersuchung steht daher die Bereitstellung eines Inventars der N-Flüsse für die umweltpolitische Diskussion in Deutschland, nicht aber die Erfüllung einer (zukünftig möglicherweise gegebenen) Berichtspflicht aufgrund internationaler Verpflichtungen.
- ▶ Um die Wirkung von Maßnahmen und Trends zu erkennen, sollte die Bilanzierung der N-Flüsse für Deutschland regelmäßig aktualisiert werden. Für diese Aufgabe sollte dann soweit wie

möglich auf vorhandene Ergebnisse anderer Inventare bzw. N-Bilanzierungen für Deutschland zurückgegriffen werden, um den Arbeitsaufwand zu begrenzen.

- ▶ Sofern die Berechnung der N-Flüsse in der Landwirtschaft nach Vorgaben des Annex 3 zu Ergebnissen führen würde, die von der etablierten N-Bilanzierung für die Landwirtschaft in Deutschland abweichen, tritt dann ggf. das Problem auf, dass divergierende Werte für identische N-Flüsse veröffentlicht werden. Dies würde unter Umständen erhöhten Erklärungsbedarf zur Folge haben bzw. könnte die Akzeptanz der Werte in Frage stellen.

7.6 Unsicherheitsbetrachtung N-Flüsse Landwirtschaft (AG)

In Tab. 7-7 sind die Unsicherheiten in der Berechnung der N-Flüsse für den Pool „Landwirtschaft“ aufgeführt.

Tabelle 7-7: Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Landwirtschaft“.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
Sub-Pool Tierproduktion (AG.AH)					
MP.FP-AG.AH-feed	Futtermittel aus industrieller Herstellung (inländische Erzeugung und Importe)	N(org)	Sehr gering (s. DESTATIS Qualitätsbericht)	Sehr gering	1
AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung – Bodenproduktion	N(org)	Anbaufläche: sehr gering Erntemengen: gering (s. DESTATIS Qualitätsberichte)	Gering	2
AG.AH-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Tierproduktion	NO _x N ₂ O	s. Tab. 3-11		2 / 4
AG.AH-AT-gasEm	NH ₃ -Emission aus dem Stall und der Lagerung tier. Ausscheidungen	NH ₃	s. Tab. 3-11		3
AG.AH-MP.FP-animProd	Tierische Marktprodukte	N(org)	Sehr gering (s. DESTATIS Qualitätsbericht)	Sehr gering	
AG.AH-MP.FP-fish	Erzeugung Aquakultur und Binnenfischerei	N(org)	Sehr gering (s. DESTATIS Qualitätsbericht)	Sehr gering	1
AG.AH-AG.SM-manure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Wirtschaftsdünger, nach Abzug Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	Gering	Gering	2
AG.AH-AG.BP-manure	Tier. Ausscheidungen zur Verwendung als Gärsubstrat, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	Gering	gering	2
Sub-Pool Pflanzenproduktion (AG.SM)					
AT-AG.SM-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Landwirtschaftsflächen	NH _y NO _x	s. Tab. 3-11		3
AT-AG.SM-Nfix	Biologische N-Fixierung in landwirtschaftlich genutzten Flächen	N(org)	Anbauflächen der Kulturen mit N-Fixierung: gering (s. DESTATIS Qualitätsbericht)	Hoch, große Spannweite der Literaturergebnisse zur N-Fixierung in Leguminosenbeständen	4

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
MP.FP-AG.SM-org-Fert	Düngung mit organischen Düngemitteln - Tiermehle	N(org)	Sehr gering (vollständige Erfassung lt. Niemann (versch. J.))	Gering	2
MP.FP-AG.SM-seed	Zufuhr mit Saat- und Pflanzgut (nicht innerbetrieblich erzeugt)	N(org)	Sehr gering (s. DESTATIS Qualitätsbericht)	Sehr gering	1
MP.NC-AG.SM-min-Fert	Mineraldünger zur Verwendung in der Landwirtschaft	N(ges)	Sehr gering (s. DESTATIS Qualitätsbericht)	Sehr gering	1
AG.AH-AG.SM-manure	Wirtschaftsdünger aus innerbetriebl. Erzeugung in der Bodenproduktion, nach Abzug der Stall- und Lagerungsverluste	N(ges)	Gering: Wirtschaftsdüngeranfall Mittel: NH ₃ -Stall- und Lagerungsverluste (s. Kap. 3.10)	Gering: N-Gehalte in Wirtschaftsdüngern Mittel: NH ₃ -Verlustkoeffizienten (s. Kap. 3.10)	2 / 3
AG.BP-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	Gering	Gering	2
WS.SW-AG.SM-compost	Düngung mit organischen Düngemitteln – Kompost (aus Siedlungsabfällen)	N(org)	Gering	Gering	2
WS.WW-AG.SM-sludge	Düngung mit organischen Düngemitteln – Klärschlamm	N(org)	S. Tab. 9-8		2
RW-AG.SM-manure	Import von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung	N(ges)	Gering (Mengenangabe nach Nährstoffberichten Niedersachsen und NRW)	Gering	2
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	s. Tab. 3-11		2 / 4
AG.SM-AT-gasEm	NH ₃ -Emissionen aus der Ausbringung von mineral. und organ. Düngemitteln sowie aus Bewirtschaftung organischer Böden	NH ₃	s. Tab. 3-11		3
AG.SM-AT-N ₂	Denitrifikation aus der Bewirtschaftung von Mineralböden sowie organischen Böden	N ₂	Sehr gering (Angabe der LF insgesamt)	Hoch; mittlerer Wert von 14 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ nach Well et al. (2016) grobe Schätzung	4

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
AG.SM-MP.FP-crop	Pflanzliche Marktprodukte	N(org)	Sehr gering (s. DESTATIS Qualitätsbericht)	Sehr gering	1
AG.SM-AG.AH-crop	Futtermittel aus innerbetrieblicher Erzeugung	N(org)	Anbaufläche: sehr gering Erntemengen: gering	Gering	2
AG.SM-AG.BP-crop	Pflanzliche Biomasse aus innerbetriebl. Erzeugung als Biogas-Substrat	N(org)	Gering; Mengen und Zusammensetzung Substrate ermittelt nach Häußermann et al. (2018)	gering	2
AG.SM-HY.GW-leach	NO ₃ -Auswaschung aus Landwirtschaftsflächen	NO ₃	Grundwasserneubildungsraten aus Landwirtschaftsflächen: mittel	MoRE-Modellberechnung, NO ₃ -Konz. im Grundwasser: hoch	4
AG.SM-HY.SW-runoff	N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen	NO ₃ N(org)	Abflussvolumen Runoff, Erosion und Drainagen: hoch	Hoch	4
Sub-Pool Biogasproduktion (AG.BP)					
MP.FP-AG.BP-cosub	Biogas-Kosubstrate (außerlandwirtschaftliche Biomasse)	N(org)	Gering; Mengen und Zusammensetzung Substrate ermittelt nach Häußermann et al. (2018)	Gering	2
AG.AHM-AG.BP-manure	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugtem Wirtschaftsdünger, n. Abzug Stall- u. Lagerungsverluste	N(ges)	Gering; Mengen und Zusammensetzung Substrate ermittelt nach Häußermann et al. (2018)	Gering	2
AG.SM-AG.BP-crop	Biogas-Substrat aus innerbetrieblich erzeugter pflanzlicher Biomasse	N(org)	Gering; Mengen und Zusammensetzung Substrate ermittelt nach Häußermann et al. (2018)	Gering	2
AG.BP-AG.SM-digest	Gärreste als Wirtschaftsdünger	N(ges)	Gering; Unsicherheit der Abfuhr aus Biogasanlagen entspricht Unsicherheiten in der Berechnung der Zufuhren	Gering	2

^a Größenordnung der Unsicherheit, Einstufung gem. Tab. 2-4.

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; Tab. 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 wird 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	NHy, NOx	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)	8.1.6.1
FS.FO	AT	FS.FO-AT-N2	Denitrifikation in Waldböden	N2	8.1.3
FS.FO	AT	FS.FO-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Waldböden	NOx, N2O	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	NO3	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)	8.1.6.2
Sub-Pool semi-natürliche Flächen (FS.OL)					
AT	FS.OL	AT-FS.OL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf semi-natürliche Flächen	NHy, NOx	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	N2	8.2.2

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
FS.OL	HY.GW	FS.OL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO3	8.2.3
Sub-Pool Feuchtgebiete (FS.WL)					
AT	FS.WL	AT-FS.WL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Feuchtgebiete	NHy, NOx	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	NO3	8.3.2
FS.WL	AT	FS.WL-AT-N2	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N2	8.3.3
FS.WL	AT	FS.WL-AT-gasEm	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Feuchtgebieten (LULCC)	NOx, N2O	3.2.1

^a Die Mobilisierung bzw. Festlegung von N(org) infolge von Vorratsabbau bzw. -Aufbau im Bodenhumus 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, Wildäsungsplätze, 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 2016c) differenziert erfasst (Tab. 8-2). Eine Zeitreihe bzw. Flächenangaben gemittelt für die Jahre 2010 – 2014 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 Waldspezifikation, 3. Bundeswaldinventur 2012 (Thünen-Institut 2016c, Tab. 1.01).

Waldspezifikation			
Wald (insgesamt)	11.419 ^a	Nichtholzboden ^b	365
		Holzboden ^c	11.055
		Bestockter Holzboden ^d	11.012
		Blöße	42

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

^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, quoted from ECE 2016). Boring et al. (1988) geben deutlich höhere Werte bis >100 kg N ha⁻¹ a⁻¹ an. Für die Berechnung der N-Flüsse in Deutschland wird als mittlerer Wert 10 kg N ha⁻¹ a⁻¹ angesetzt.

$$\text{N-Fixierung: } 10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ Fixierung} * 11055 \text{ kha Holzbodenfläche} = 110,5 \text{ kt N a}^{-1}.$$

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. Als Flächenbezug dient die Holzbodenfläche, da diese Denitrifikationsrate für bestockte Waldflächen angenommen wird.

$$\text{Denitrifikation: } 1,1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ Denitrifikation} * 11055 \text{ kha Holzbodenfläche} = 12,2 \text{ kt N a}^{-1}.$$

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 Tab. 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. (1999)	Dänemark 111 Waldstandorte	Mehrjährige Nitratinventur (1986-1993)	30 % der Standorte 2 - 6 kg N-Verlust 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.

$$\begin{aligned} \text{NO}_3\text{-Auswaschung aus Waldböden: } & 5,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} * 11055 \text{ kha Holzbodenfläche} \\ & = 60,8 \text{ kt N a}^{-1}. \end{aligned}$$

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.

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 2010 - 2014: Holzentnahme jährlich rd. 54 Mio. m³ (Erntefestmeter unter Rinde).
- ▶ Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie (Thünen-Institut 2016a), Mittel 2010 – 2014: jährlicher Einschlag 73,9 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).

Für die Ermittlung der N-Flüsse mit Holz (s. Tab. 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.

Tabelle 8-4: Berechnung der jährlichen N-Flüsse mit der Entnahme und Verwendung sowie dem Import und Export von Holz (Thünen-Institut 2016a), Mittel 2010 - 2014.

Nutzung / Verwendung N-Fluss (Bezeichnung)		Holzart	Holz Mio m ³	Holz Mio t	Holz ^b t N	N-Fluss kt N a ⁻¹
Entnahme insgesamt ^a		Nadelholz	52,16	21,39	25.668	
		Laubholz	21,71	12,59	17.626	
		Zusammen	73,87	33,98	43.294	43,3
Stoffliche Rohholzverwendung, insgesamt ^c		Nadelholz	45,92	18,83	22.596	
		Laubholz	5,67	3,29	4.606	
		Zusammen	51,59	22,12	27.202	27,2
Energetische Holzverwendung	Privathaushalte ^d	Nadelholz	8,91	3,65	4.380	
		Laubholz	12,57	7,29	10.206	
		Zusammen	21,48	10,94	14.586	14,6
FS.FO-EC.OE-wood	Großfeuerungs- Anlagen	Nadelholz	2,63	1,08	1.294	
		Laubholz	2,84	1,65	2.306	
		Zusammen	5,47	2,73	3.600	3,6
Außenhandel Rohholz	Import	Nadelholz	7,39	3,03	3.636	
		Laubholz	0,80	0,46	650	
		Zusammen	8,19	3,49	4.285	4,3
RW-FS.FO-wood	Export	Nadelholz	2,44	1,00	1.200	
		Laubholz	1,19	0,69	966	
		Zusammen	3,63	1,69	2.167	2,2
Lagerbestands- veränderung	Wald (einschl. Industrie) ^e	Nadelholz	-0,34	-0,14	-167	
		Laubholz	0,24	0,14	195	
		Zusammen	-0,10	0,00	28	0,0

^a Entnahme: Einschlag abzüglich nicht verwertbares Derbholz.

^b 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.

^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 Briketts werden auch der energetischen Nutzung zugerechnet.

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

8.1.6 Bilanzierung und Vorratsänderungen Wald (Holzbestand und Waldböden)

8.1.6.1 N-Bodenvorrat und Vorratsänderung

Der Status der Waldböden in Deutschland wurde im Verlauf der ersten und 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). Die N-Vorräte im Auflagehumus und im Mineralboden bis 60 cm Bodentiefe betragen nach der BZE II durchschnittlich 6,01 ± 0,08 t N ha⁻¹, in der Schicht 60 – 90 cm sind weitere 1,03 ± 0,03 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 78000 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 (Tab. 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	1244
0 - 5 cm	6,1*	1,3	6,5	1325
5 - 10 cm	1,1	1,1	1,9	1327
10 - 30 cm	-6,3	3,4	-3,8	1312
30 - 60 cm	-22,3*	7,0	-14,8	1268
(60 - 90 cm)	(-26,7)	(8,7)	(-12,3)	(1097)
Summe Auflagehumus bis 60 cm	-26,5^b	11,9	-8,9	1168

^a Stichprobenumfang, Anzahl gepaarter Proben.

* Änderung signifikant ($p < 5\%$).

^b 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 Holzbodenfläche, da in der Bodenzustandserhebung nur Böden unter bestockten Waldflächen beprobt werden.

Jährliche Änderung N-Bodenvorrat (Auflagehumus bis 60 cm Tiefe): $-26,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1} * 11055 \text{ kha Holzbodenfläche} = -292,9 \text{ kt N a}^{-1}$ (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 Tab. 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 Bayerischen Alpen berichtet, für das ein Humusverlust im Mittel von 14% in rund drei Jahrzehnten bilanziert wurde, was die Autoren vorrangig auf den Klimawandel zurückführen.

8.1.6.2 Holzbestand und Bestandsänderung

Mit der dritten Bundeswaldinventur (2012) stehen Angaben zum Holzvorrat (Thünen-Institut 2016c; bwi.info/, Tab. 3.04) sowie zur Vorratsänderung gegenüber der zweiten Waldinventur (Thünen-Institut 2016c; bwi.info/, Tab. 4.03) zur Verfügung, aus denen die Veränderung der N-Menge im Holzvorrat (stehender Bestand) berechnet werden kann (Tab. 8-6).

Tabelle 8-6: Holzvorrat (2012) und Änderung des Vorrats 2012 gegenüber 2002 im Wald nach Bundeswaldinventur 2012 (Thünen-Institut 2016c).

	Holzvorrat (2012)			Vorratsänderung 2012 zu 2002		
	Mio m^3	Mio t^a	kt N^b	Mio m^3	Mio t^a	kt N^b
Laubwald	1420,6	823,9	1153,5	175,7	101,9	142,7
Nadelwald	2242,4	919,4	1103,3	51,7	21,2	25,4
Wald insgesamt	3663,0	1743,3	2256,8	227,4	123,1	168,1

^a Dichte Laubholz $0,58 \text{ t m}^{-3}$, Nadelholz $0,41 \text{ t m}^{-3}$ nach NNB Annex 4, Table 15 ECE (2016).

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

Die mittlere Vorratsänderung pro Jahr entspricht der gesamten Vorratsänderung verteilt auf den Zeitraum von 10 Jahren zwischen den Erfassungsjahren 2012 und 2002 der beiden Inventuren.

Jährliche N-Menge in der Zunahme des Holzvorrats in Wäldern = 16,8 kt N a⁻¹ (entspricht einer Festlegung von N_r („SINK“)).

8.1.6.3 Bilanzierung für Sub-Pool Wald

In Tab. 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 NNB-Schema (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 451 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 Nitrat auswaschung können derzeit nicht mit der notwendigen Genauigkeit quantifiziert werden, um eine auch nur ansatzweise geschlossene Bilanz 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 2010 - 2014.

Zufluss (N _r -Quellen)	kt N a ⁻¹	Abfluss (N _r -Verwendung)	t N a ⁻¹
Atmosphärische N-Deposition	181,1	Denitrifikation	-12,2
Stickstofffixierung	110,6	N ₂ O- und NO _x -Emissionen	-0,3
Änderung (Abbau) N-Bodenvorrat	292,9	Nitrat auswaschung	-60,8
Netto-Import Rohholz	2,1	Holzentnahme (alle Nutzungen)	-45,4
		Zunahme Holzvorrat	-16,8
Summe Zuflüsse	586,7	Summe Abflüsse	-135,5
Differenz: 451,2			

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 CLC2010 zugeordnet (in Klammern: CLC-Code; s. Tab. 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).

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.

N-Fixierung: 3 kg N ha⁻¹ a⁻¹ Fixierung * 656,5 kha semi-natürliche Flächen = 2,0 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.

Denitrifikation: 1 kg N ha⁻¹ a⁻¹ Denitrifikation * 656,5 kha semi-nat. Flächen = 0,7 kt N a⁻¹.

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.

NO₃-Auswaschung aus semi-nat. Vegetation: 5 kg N ha⁻¹ a⁻¹ * 656,5 kha Fläche = 3,3 kt N a⁻¹.

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:

1. Hydrologie: Landoberfläche, die über einen längeren Zeitraum des Jahres vollständig wassergesättigt bzw. mit Wasser bedeckt ist.
2. Bodenkunde: Gebiet mit hydromorphologisch geprägten Bodentypen (bspw. Gley).
3. 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 (UBA 2016a) 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-Bilanzschema (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. In der NNB entspricht den Feuchtgebieten daher nur die CLC-Landnutzungsklasse „Torfmoore“ (s. Tab. 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.

$$\text{N-Fixierung: } 10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ Fixierung} * 74,8 \text{ kha Feuchtgebiete} = 0,7 \text{ kt N a}^{-1}.$$

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 Literaturlauswertung 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.

$$\text{Denitrifikation: } 20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ Denitrifikation} * 74,8 \text{ kha Feuchtgebiete} = 1,5 \text{ kt N a}^{-1}.$$

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 Tab. 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 2010 – 2014.

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 ^b	Atmosphärische N-Deposition auf Waldflächen	NHy NOx	118,9 62,2
AT	FS.FO	AT-FS.FO-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden	N(org)	110,5
RW	FS.FO	RW-FS.FO-wood	Import von Rohholz	N(org)	4,3
SOURCE	FS.FO	SOURCE-FS.FO ^a	Änderung (Abbau) N-Bodenvorrat	N(org)	292,9
FS.FO	AT	FS.FO-AT-N2	Denitrifikation in Waldböden	N2	12,2
FS.FO	AT	FS.FO-AT-gasEM	N ₂ O- und NO _x -Emissionen aus Waldflächen (LULCC)	N2O NOx	0,3 n.b.
FS.FO	EF.EC	FS.FO-EF.EC-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung - Großfeuerungsanlagen	N(org)	3,6
FS.FO	EF.OE	FS.FO-EF.OE-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung - Privathaushalte	N(org)	14,6
FS.FO	MP.OP	FS.FO-MP.OP-wood	Holzentnahme zur stofflichen Nutzung	N(org)	27,2
FS.FO	HY.GW	FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldböden	NO3	60,8
FS.FO	RW	FS.FO-RW-wood	Export von Rohholz	N(org)	2,2
FS.FO	SINK	FS.FO-SINK	Zunahme Holzbestand (Zuwachs)	N (org)	16,8
Sub-Pool semi-natürliche Flächen (FS.OL)					
AT	FS.OL	AT-FS.OL-atmDep ^b	Atmosphärische N-Deposition auf semi-natürliche Flächen	NHy NOx	5,3 2,7
AT	FS.OL	AT-FS.OL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in semi-natürlichen Flächen	N(org)	2,0
FS.OL	AT	FS.OL-AT-N2	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen	N2	0,7
FS.OL	HY.SW	FS.OL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO3	3,3
Sub-Pool Feuchtgebiete (FS.WL)					
AT	FS.WL	AT-FS.WL-atmDep ^b	Atmosphärische N-Deposition auf Feuchtgebiete	NHy NOx	0,6 0,3
AT	FS.WL	AT-FS.WL-Nfix	Biolog. Stickstofffixierung in Feuchtgebieten	N(org)	0,7
AG.SM	FS.WL	AG.SM-FS.WL-runoff	N-Eintrag mit dem Zufluss von Oberflächenabfluss (Runoff) aus Ackerflächen	NO3	n.b.
FS.WL	AT	FS.WL-AT-atmDep	N ₂ O- und NO _x -Emissionen aus Feuchtgebieten (LULCC)	N2O NOx	0,0 n.b.
FS.WL	AT	FS.WL-AT-N2	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N2	1,5

^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.

^b Die Werte zur atmosphärischen N-Deposition gehen auf das UBA-Projekt PINETI-3 (Schaap et al. 2018) zurück.

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.

8.5 Unsicherheitsbetrachtung N-Flüsse Wald und semi-natürliche Flächen (FS)

In Tab. 8-9 sind die Unsicherheiten in der Berechnung der N-Flüsse für den Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“ aufgeführt.

Tabelle 8-9: Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
Sub-Pool Wald (FS.FO)					
AT-FS.FO-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Waldflächen	NH _y , NO _x	s. Tab. 3-11		3
AT-FS.FO-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Waldböden	N(org)	Sehr gering; Flächenangaben zu „Wald“ differieren geringfügig zw. Quellen (s. Kap. 8.1.1)	Hoch; Spannweite N-Fixierung nach Cleveland et al. (1999): 6,5 – 26,6 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	4
FS.FO-AT-N2	Denitrifikation in Waldböden	N2	dito	Hoch; mittlerer Wert 1,1 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ Denitrifikation nach Andreae et al. (2016), ohne Angaben zur Streubreite	4
FS.FO-EF.OE-wood	Holzentnahme zur energetischen Nutzung (Großfeuerungen u. Privathaushalte)	N(org)	k.A.	N-Gehalt Stamm: 1,2 bzw. 1,4 ±0,5 kg t ⁻¹ (Nadel-/Laubholz) nach ECE (2016) Annex 4, Table 16 Spannbreite Dichte Nadel-/Laubholz: k.A.	2
FS.FO-MP.OP-wood	Holzentnahme zur stofflichen Nutzung	N(org)	k.A.	dito	2
FS.FO-RW-wood	Import/Export von Rohholz	N(org)	k.A.	dito	2
FS.FO-HY.SW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldböden	NO ₃	Sehr gering; Flächenangaben zu „Wald“ differieren geringfügig zw. Quellen (s. Kap. 8.1.1)	NO ₃ -Auswaschungsraten nach verschiedenen Untersuchungen (s. Tab. 8-3); Mittel 5,5 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ , Spanne 0 - 80 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ (Kiese et al. 2011)	3
Vorratsänderung	Änderung N-Bodenvorrat	N(org)	dito	Standardfehler Änderung N-Gehalt: ±11,9 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ (s. Tab. 8-5); Änderung nur in zwei Tiefenstufen signifikant	3
Vorratsänderung	Änderung N im Holzvorrat	N(org)	Standardfehler (68%): ± 5,5% für „alle Baumarten“ (nach bwi.info; Tab 4.03)	wie FS.FO-EF.OE-wood	2

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
Sub-Pool semi-natürliche Flächen (FS.OL)					
AT-FS.OL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf semi-nat. Flächen	NHy, NOx	s. Tab. 3-11		3
AT-FS.OL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in semi-nat. Flächen	N(org)	Flächenangaben zu „semi-natürliche Flächen“ differieren zw. Quellen (s. Kap. 8.2)	Referenzwerte für die N-Fixierung in semi-natürlichen Flächen 2,3 bis 3,1 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ (Cleveland et al. 1999)	4
FS.OL-AT-N2	Denitrifikation in semi-natürlichen Flächen	N2	wie AT-FS.OL-atmDep	Platzhalter; Literaturübersicht zur Denitrifikation aus Flächen mit semi-natürlicher Vegetation ist für Deutschland nicht verfügbar	4
FS.OL-HY.SW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO3	wie AT-FS.OL-atmDep	Platzhalter; Literaturwerte zur Nitratauswaschung aus Flächen mit semi-natürlicher Vegetation ist für Deutschland nicht verfügbar	4
Sub-Pool Feuchtgebiete (FS.WL)					
AT-FS.WL-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Waldflächen	NHy, NOx	s. Tab. 3-11		3
AT-FS.WL-Nfix	Biologische Stickstofffixierung in Feuchtgebieten	N(org)	Flächenangaben zu „Feuchtgebiete“ differieren zw. Quellen (s. Kap. 8.3)	Referenzwerte für die N-Fixierung in Feuchtgebieten (Typ „peat bog“) 0 bis 22 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	4
FS.WL-AT-N2	Denitrifikation in Feuchtgebieten	N2	wie AT-FS.WL-atmDep	Literaturlauswertung von Gutknecht et al. (2006): sehr große Spanne der Denitrifikationsraten in Feuchtgebieten	4

^a Größenordnung der Unsicherheit, Einstufung gem. Tab. 2-4.

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; Tab. 9-1 gibt eine Übersicht der relevanten Stickstoffflüsse. Gemäß den Vorgaben des NNB (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-N ₂	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Verbrennung von Abfall	N ₂	9.1.1
WS.SW	AT	WS.SW-AT-N ₂	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-N ₂	Oxidation/Reduktion von N _r zu N ₂ während der Thermische Verwertung (Verbrennung) von Tiermehl	N ₂	5.1.3
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

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
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 2018, 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 in-

ternen 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 2017c, 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 2017c) wird das Abfallaufkommen nach acht Wirtschaftszweigen unterschieden, von denen vier (mutmaßlich) N-haltige Abfälle produzieren. Diesen vier Wirtschaftszweigen werden N-Flüsse in fünf Sub-Pools des NNB wie folgt zugeordnet (Tab. 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 2010/2012/2014 (Quelle: DESTATIS 2012b, 2014b, 2017c).

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	519	22	67	3	0,3 %	1,6	0,1	0,2	0,0
Säuren, Laugen oder Salze	954	28	58	1	0,3 %	2,9	0,1	0,2	0,0
Chemische Abfälle	2.075	69	295	24	0,3 %	6,2	0,2	0,9	0,1
Medizinische und biologische Abfälle	64	0	232	0	0,3 %	0,2	0,0	0,7	0,0
Papier- und Pappeabfälle	726	6	1.696	5.562	0,1 %	0,7	0,0	1,7	5,6
Gummiabfälle	350	6	117	0	0,4 %	1,4	0,0	0,5	0,0
Kunststoffabfälle	778	2	510	91	0,4 %	3,1	0,0	2,0	0,4
Holzabfälle	3.210	54	550	677	0,1 %	3,2	0,1	0,5	0,7
Textilabfälle	119	0	57	98	0,4 %	0,5	0,0	0,2	0,4
Ausrangierte Geräte (elektrisch, elektronisch)	130	51	209	523	0,4 %	0,5	0,2	0,8	2,1
Tierische und gemischte Nahrungsmittelabfälle	640	5	1.031	0	1,0 %	6,4	0,1	10,3	0,0
Pflanzliche Abfälle	877	41	868	9.076	0,5 %	4,4	0,2	4,3	45,4
Tierische Ausscheidungen(Gülle, Jauche, Stallmist)	1.339	49	3.898	15.749	4,0 %	5,4	0,2	15,6	63,0
Hausmüll und ähnliche Abfälle	2.489	71	1.375	2.584	0,4 %	10,0	0,3	5,5	10,3
Gemischte und undifferenzierte Materialien	496	54	593	0	0,4 %	2,0	0,2	2,4	0,0
Summe	14.765	460	11.556	34.389		48,4	1,6	45,9	127,9

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

^b N-Gehalte nach NNB Annex 0, Tab. 4 (ECE 2013); BGK (2006; zit. nach UBA 2012), z.T. geschätzt.

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

Der Verbleib von Abfall wird in der Abfallbilanz (DESTATIS 2017c) 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 (Tab. 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 NNB-Schema der N-Flüsse 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 2010 - 2014 (Quelle: DESTATIS 2017c).

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 ^e -waste	Verbrennung ^d WS.SW-AT-N2	Stoffliche Verwertung WS.SW-MP.OP-waste
Haushaltstypische Siedlungsabfälle, davon:	0	5.326	5.898	1.785	0,4 %	0,0	44,9	7,1
- Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle ^f								
- Sperrmüll	2	357	663	1.329	0,4 %	0,0	4,1	5,3
- Abfälle aus der Biotonne	0	0	30	3.949	1,0 %	0,0	0,3	39,5
- Biologisch abbaubare Garten- und Parkabfälle ^g	10	1	218	4.997	0,5 %	0,1	1,1	25,0
- Andere getrennt gesammelte Fraktionen, darunter	0	5	49	7.897	0,1 %	0,0	0,1	7,9
· Papier, Pappe, Kartonagen								
· Gemischte Verpackungen / Wertstoffe	4	243	764	4.427	0,4 %	0,0	4,0	17,7
· Elektroaltgeräte	0	0	1	598	0,4 %	0,0	0,0	2,4
· Sonstiges (Verbunde, Metalle, Textilien usw.)	12	23	528	1.420	0,4 %	0,0	2,2	5,7
Sonstige Siedlungsabfälle, darunter:	9	832	1.236	1.701	0,4 %	0,0	8,3	6,8
- Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt gesammelt								
- Straßenkehricht, Garten- und Parkabfälle	123	54	43	597	0,2 %	0,2	0,2	1,2
- Biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle	0	3	49	654	1,0 %	0,0	0,5	6,5
- Marktabfälle	0	8	2	55	1,0 %	0,0	0,1	0,5
- Andere getrennt gesammelte Fraktionen	5	10	20	132	0,4 %	0,0	0,1	0,5
Übrige Abfälle (insbesondere aus Produktion und Gewerbe)	10.766	2.857	10.354	31.033	0,4 %	43,1	52,8	124,1
Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen (Sekundärabfälle) ^h	4.531	1.909	13.806	24.709	0,4 %	18,1	62,9	98,8
Summen	15.462	11.627	33.663	85.282		61,6	181,6	349,2

- ^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 0, Tab. 4 (ECE 2013); BGK (2006; zit. nach UBA 2012); z.T. geschätzt.
- ^d Verbrennung: Summe aus thermischer Beseitigung und energetischer Verwertung.
- ^e Zu Pool(in) “SOURCE” s. Kap. 9.4.
- ^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 (DESTATIS 2012a, 2013, 2014a, 2015b, 2016). 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 2018a, 2018b); Tab. 9-4 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 9-4: N-Flüsse mit dem Import und Export von zustimmungspflichtigen Abfallstoffen, Mittel 2010 – 2014 (UBA 2018a, 2018b).

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	53	24	0,3 %	0,2	0,1
Säuren, Laugen oder Salze	01.21, 01.22, 01.24	224	16	0,3 %	0,7	0,0
Chemische Abfälle	01.41, 02.11-14, 02.21, 02.22, 02.31- 33, 03.12-14	318	46	0,3 %	1,0	0,1
Medizinische und biologische Abfälle	05.11, 05.12, 05.21, 05.22	2	0	1,0 %	0,0	0,0
Papier- und Pappeabfälle	07.21-23	11	103	0,1 %	0,0	0,1
Gummiabfälle	07.31, 07.32	0	0	0,4 %	0,0	0,0
Kunststoffabfälle	07.41, 07.42	20	0	0,4 %	0,1	0,0
Holzabfälle	07.51-53	897	139	0,1 %	0,9	0,1
Textilabfälle	07.61-63	0	0	0,4 %	0,0	0,0
Ausrangierte Geräte (große elektron. und elektrische Haushaltsgeräte)	08.21, 08.23	52	25	0,4 %	0,2	0,1
Tierische und gemischte Nahrungsmittelabfälle	09.11, 09.12, 09.13	4	3	1,3 %	0,1	0,0
Pflanzliche Abfälle	09.21, 09.22	1	3	1,0 %	0,0	0,0
Tierische Ausscheidungen	09.31	0	0	4,9 %	0,0	0,0
Hausmüll und ähnliche Abfälle	10.11, 10.12	324	153	0,4 %	1,3	0,6
Gemischte und undiff. Materialien	10.21, 10.22	121	15	0,4 %	0,5	0,1
Sortierrückstände	10.32	1071	376	0,4 %	4,3	1,5
Summe Import und Export		3097	904		9,1	2,8

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. 2017a). In MoRE werden N-Einträge über die folgenden Pfade modelliert (s.a. Einführung Kap. 10):

Punktquellen:	- kommunale Kläranlagen - Industrielle Direkteinleiter.
Diffuse Quellen	- Kanalisationssysteme - Oberflächenabfluss - Erosion - Dränagen - Grundwasser - Atmosphärische Depositionen auf Gewässeroberfläche.

Zusätzlich zur Modellierung der Einträge in das Gewässersystem wird eine Abschätzung der Gewässerfracht auf Basis der Gesamteinträge mit einer stoffabhängigen Retention vorgenommen.

9.2.1 Abwasser aus Haushalten, Industrie (Direkt- und Indirekteinleiter) und von den versiegelten Flächen (EF.EC-WS.WW-sewage, MP.XX-WS.WW-sewage, HS.XX-sewage)

Eine geschlossene Erhebung oder Berechnung zur N-Fracht insgesamt mit dem Schmutzwasser in das Abwassersystem aus verschiedenen Quellen ist nicht vorhanden. Zur Darstellung der N-Zuflüsse in den Bereich Abwasserentsorgung und zur Aufteilung auf die einzelnen Sub-Pools müssen daher mehrere Angaben und Annahmen zusammengeführt werden. Ausgangspunkt sind die Eingangsdaten im Modell MoRE zu diesem Bereich, Tab. 9-4 zeigt die Ergebnisse.

Der N-Anfall im Abwasser (Schmutzwasser) aus Haushalten wird berechnet aus der Einwohnerzahl von rund 80 Mio. Einwohnern in Deutschland (Mittel 2011 - 2014) und einer einwohnerspezifischen Abgabe von $12 \text{ g N E}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Damit ergeben sich 350 kt N a^{-1} N-Fracht im Abwasser aus den Haushalten.

Die N-Fracht im Abfluss von versiegelten Flächen (EEA 2014) von 30 kt N a^{-1} wird aus der atmosphärischen Depositionsrates für NH_x und NO_x (s. Kap. 3.4) sowie einem Zuschlag für das sogenannte Oberflächenpotenzial von Straßen durch Laubfall und tierische Exkrememente von $4 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (nach Behrendt et al. 1999) ermittelt. Der größere Teil dieses Abflusses (52 % nach MoRE-Schätzung) erreicht die Oberflächengewässer über Mischwasser oder über Regenwasserbehandlungsanlagen, die keine N-Elimination aufweisen. Der kleinere Teil (geschätzt 48 %) wird in kommunale Kläranlagen eingeleitet, in denen N-Elimination stattfindet.

Die N-Fracht der industriellen Indirekteinleiter in kommunalen Kläranlagen wird berechnet als Differenz zwischen der Fracht im Zulauf kommunaler Kläranlagen insgesamt, d.h. einschließlich der industriellen Indirekteinleiter, abzüglich der Fracht aus Haushalten und dem Frachtanteil der versiegelten Flächen von 42 %, der in kommunalen Kläranlagen behandelt wird. Gemäß Kap. 9.2.3 wird die gesamte N-Fracht im Zulauf von kommunalen Kläranlagen auf 454 kt N a^{-1} geschätzt. Abzüglich des Schmutzwasseranfalls aus Haushalten (350 kt N a^{-1}) und von versiegelten Flächen ($30,0 \text{ kt N a}^{-1} \cdot 42 \% = 12,6 \text{ kt N a}^{-1}$) in Kläranlagen beläuft sich die N-Fracht der industriellen Indirekteinleiter damit auf $91,5 \text{ kt N a}^{-1}$.

Zur Abschätzung der N-Fracht im Kläranlagen-Zulauf von industriellen Direkteinleiter wird das Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (PRTR) herangezogen (UBA 2016b). Nach PRTR-Datenbank werden von den (meldepflichtigen) Direkteinleitern $8,6 \text{ kt N a}^{-1}$ aus Kläranlagen in Oberflächengewässer eingeleitet. Mit Annahme einer Stickstoff-Elimination in industriellen Kläranlagen von rund 80 % (analog zu kommunalen Kläranlagen, s. Kap. 9.2.4) ergibt sich daraus rückgerechnet eine N-

Fracht im Zulauf von 43 kt N a⁻¹. Als N-Fracht im Abwasser aus der Industrie ergibt sich dann als Summe der Direkt- und der Indirekteinleiter 134,5 kt N a⁻¹.

In den NNB Annexes (ECE 2013) ist vorgesehen, die N-Flüsse mit dem Abwasser aus der Industrie für die verschiedenen Sub-Pools der Pools „Energiewirtschaft und Verkehr“ und „Industrielle Produktion“ zu differenzieren. Dafür ist in Deutschland keine adäquate Datengrundlage vorhanden. Angaben zur Herkunft von Schmutzwasser nach Sektoren sind nur für die im PRTR-Register erfassten Direkteinleiter verfügbar, das heißt für eine N-Fracht von 8,6 kt N a⁻¹. Der Auswertung des PRTR-Registers zufolge entfallen davon auf die chemische Industrie 51 %, auf die Ernährungsindustrie 27 %, auf den Energiesektor 6 % sowie auf die sonstige Industrie zusammen 16 % der Fracht. Hilfsweise wird nachfolgend die N-Fracht im Abwasser der industriellen Direkt- und Indirekteinleitern insgesamt in diesem Verhältnis auf die vier Sektoren bzw. N-Flüsse verteilt. In wieweit diese Annahmen gerechtfertigt ist, kann nicht beurteilt werden, die Werte für die vier Sub-Pools in Tab. 9-5 haben daher nur Platzhalterfunktion.

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 von Haushalten	N(ges)	350,0
HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser von versiegelten Flächen	N(ges)	30,0
	Abwasser von industriellen Direkt- und Indirekteinleitern insgesamt, davon aus	N(ges)	134,5
EF.EC-WS.WW-sewage	- Energiewirtschaft (6 %)	N(ges)	8,1
MP.FP-WS.WW-sewage	- Ernährungsindustrie (27 %)	N(ges)	36,3
MP.NC-WS.WW-sewage	- Stickstoff-Chemie (51 %)	N(ges)	68,6
MP.OP-WS.WW-sewage	- Sonstige industrielle Produktion (16 %)	N(ges)	21,5
Summe N-Anfall im Abwasser (Schmutzwasser)			514,4

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 2017b). Die aktuellsten Angaben beziehen sich auf das Berichtsjahr 2013. Aufgrund von methodischen Änderungen sind die Angaben für 2013 nur eingeschränkt mit den Vorjahren vergleichbar, daher werden für die Ermittlung der N-Flüsse in Tab. 9-5 nur die Angaben für 2013 herangezogen. Die Angabe zum N-Gehalt des in der Landwirtschaft verwerteten Klärschlammes (45,1 g N_{ges} kg⁻¹ TS, zit. nach DESTATIS 2017b) geht auf die Klärschlammberichte der Länder zurück. Der Export von Klärschlamm ist mit 0,4 % sehr gering und wird nicht gesondert aufgeführt.

Tabelle 9-6: Klärschlamm Entsorgung insgesamt aus öffentlicher und nichtöffentlicher Abwasserbehandlung, Jahr 2013 (DESTATIS 2017b; Tab. 1.1) und Zuordnung zu N-Flüssen.

Flusscode	Bezeichnung	Klärschlamm 1000 t TS	N-Spe- zies	N-Fluss kt N a ⁻¹
WS.WW-AG.SM-sludge	Stoffliche Verwertung in der Landwirtschaft	551,6	N(ges)	24,9
WS.WW-HS.MW-sludge	Stoffliche Verwertung bei landschaftsbaulichen Maßnahmen ^b	280,4	N(ges)	12,6
WS.WW-HS.MW-sludge	Sonstige stoffliche Verwertung ^c	412,7	N(ges)	18,6
WS.WW-WS.SW-sludge	Thermische Entsorgung	1.605,4	N(ges)	72,4
WS.WW-WS.SW-sludge	Deponie ^d	207,1	N(ges)	9,3
WS.WW-WS.SW-sludge	Sonstige direkte Entsorgung ^e	13,1	N(ges)	0,6
WS.WW-WS.SW-sludge	Entsorgung als gefährlicher Abfall ^d	154,3	N(ges)	7,0
WS.WW-WS.SW-sludge	Andere Beseitigung / keine Angabe ^d	154,3	N(ges)	7,0
Direkte Klärschlamm Entsorgung insges.		3.379,6		152,4

^a N-Gehalt: 45,1 kg N_{ges}/t TS (nach DESTATIS 2017b; 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

In Tab. 9-7 sind die MoRE-Ergebnisse zum N-Eintrag in die Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft zusammengefasst. Die Modellierungsmethoden sind in Fuchs et al. (2010) und Fuchs et al. (2017a) ausführlich beschrieben.

Tabelle 9-7: Stickstoff-Einträge in Oberflächengewässer mit dem Ablauf aus kommunalen Kläranlagen sowie aus dem Kanalisationssystem (Siedlungswasserwirtschaft) nach MoRE-Modellierung, Mittel 2010 – 2014 (Fuchs et al. 2016, 2017a).

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)	82,2
N-Einträge über Kanalisationssysteme zusammen, davon		23,5
- Mischwasserüberläufe	N(ges)	10,4
- Eintrag über Regenwasserkanäle	N(ges)	8,3
- Gebiete, die nur an die Kanalisation angeschlossen sind	N(ges)	2,4
- Gebiete, die nicht an die Kanalisation angeschlossen sind	N(ges)	2,4
N-Eintrag von nichtöffentlichen Kläranlagen (industrielle Direkteinleiter)	N(ges)	8,6
Summe N-Einträge aus Siedlungswasserwirtschaft		114,3

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. Für eine überschlägige Schätzung geht man von der Fracht von 90,8 kt N a im Ablauf der kommunalen und nichtöffentlichen Kläranlagen aus (s. Kap. 9.2.3, Tab. 9-7; Fuchs et al. 2016). Mit der Annahme einer mittleren Gesamt-Elimination für Stickstoff (über Denitrifikation sowie Rückhalt im Klärschlamm) der Anlagen von ca. 80 % (nach DWA 2017) ergibt sich eine Fracht von 454 kt N a⁻¹ im Zulauf der Kläranlagen. Im Klärschlamm (Primärschlamm und Überschussschlamm) verbleiben davon 152,4 kt N a⁻¹ (s. Tab. 9-6). Mit diesen Werten ergibt sich aus der Stickstoff-Massenbilanz für das Gesamtsystem kommunaler und nichtöffentlicher Abwasserbehandlungsanlagen demnach ein geschätzter N-Fluss mit Denitrifikation von 454 abzüglich (90,8 + 152,4) = 211 kt N a⁻¹. Mit diesen Werten berechnet sich ein Anteil von 34 % des Stickstoffs (152,4 kt N a⁻¹ von 454 kt N a⁻¹), der im Klärschlamm verbleibt. Das ist etwas höher als die Faustzahl von etwa 25 %, die DWA (2011) angibt.

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

In Tab. 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 2010 – 2014.

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)	1,6
MP.FP	WS.SW	MP.FP-WS.SW-fuel	Tiermehl zur thermischen Verwertung	N(org)	18,8
MP.OP	WS.SW	MP.OP-WS.SW-waste	Abfälle aus der sonstigen industriellen Produktion	N(org)	48,4
HS.HB	WS.SW	HS.HB-WS.SW-waste	Abfälle aus Haushalten (menschliche Ernährung)	N(org)	127,9
HS.MW	WS.SW	HS.MW-WS.SW-waste	Abfall von Konsumgütern	N(org)	45,9
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(org)	23,9
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur thermischen Verwertung	N(org)	72,4
RW	WS.SW	RW-WS.SW-waste	Import von Abfallstoffen	N(org)	9,1
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NO _x , N ₂ O	0,1 0,6
WS.SW	AT	WS.SW-AT-gasEM	NH ₃ -Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien	NH ₃	2,9
WS.SW	AT	WS.SW-AT-N ₂	Verbrennung von Abfall	N ₂	181,6
WS.SW	AT	WS.SW-AT-N ₂	Thermische Verwertung (Verbrennung) von Klärschlamm	N ₂	72,4
WS.SW	AT	WS.SW-AT-N ₂	Tiermehl zur thermischen Verwertung	N ₂	18,8
WS.SW	MP.OP	WS.SW-MP.OP-waste	Recycling von Abfallstoffen (stoffliche Verwertung)	N(org)	349,2
WS.SW	AG.SM	WS.SW-AG.SM-compost	Kompost (aus kommunalem Grünabfällen) zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(org)	23,4
WS.SW	SINK ^a	WS.SW-SINK-waste	Ablagerung (Deponierung) von Abfall	N(org)	61,6
WS.SW	SINK ^a	WS.SW-SINK-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(org)	23,9
WS.SW	RW	WS.SW-RW-waste	Export von Abfallstoffen	N(org)	2,8
Sub-Pool Abwasserentsorgung (WS.WW)					
HS.HB	WS.WW	HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser aus Haushalten	N(ges)	350,0
HS.MW	WS.WW	HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser aus dem Siedlungsbereich (befestigte Flächen)	N(ges)	30,0
EF.EC	WS.WW	EF.EC-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Energiewirtschaft	N(ges)	8,1
MP.FP	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Nahrungs- und Futtermittelindustrie	N(ges)	36,3

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
MP.NC	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der Stickstoff-Chemie	N(ges)	68,6
MP.OP	WS.WW	MP.FP-WS.WW-sewage	Abwasser aus der sonstigen industriellen Produktion	N(ges)	21,5
WS.WW	AT	WS.WW-AT-gasEM	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Kläranlagen	NO _x , N ₂ O	n.b. 1,1
WS.WW	AT	WS.WW-AT-N ₂	Denitrifikation in kommunalen und nicht-öffentlichen Kläranlagen	N ₂	211,0
WS.WW	HS.MW	WS.WW-HS.MW-sludge	Klärschlamm zur Verwertung bei landbau-lichen Maßnahmen	N(org)	31,2
WS.WW	AG.SM	WS.WW-AG.SM-sludge	Klärschlamm zur Verwertung in der Land-wirtschaft	N(org)	24,9
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur Deponierung, Entsorgung als gefährlicher Abfall, sonstige Entsorgung oder andere Beseitigung	N(org)	23,9
WS.WW	WS.SW	WS.WW-WS.SW-sludge	Thermische Verwertung von Klärschlamm	N ₂ , NO _x	72,4
WS.WW	HY.SW	WS.WW-HY.SW-discharge	N-Eintrag in Oberflächengewässer aus Kläranlagen und dem Kanalisationssystem ^b (Siedlungswasserwirtschaft)	N(ges)	114,3

^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 sind 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 bilanziert (Tab. 9-9 und 9-10).

Die Statistik über die Abfallentsorgung (DESTATIS 2018) 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 weitere Behandlung der Abfallströme liegen dem Statistischen Bundesamt keine Informationen vor, daher ist es nicht möglich, die Mengen für einzelne Abfallarten nachzuvollziehen oder Aussagen über die stoffliche Verwertung zu treffen (Statist. Bundesamt, schriftl. Mittlg. 3.7.2018). 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. Beispielhaft sei hier auf die Diskrepanz bei den Konsumgütern hingewiesen (s. Kap. 6.4): nach Absatzstatistik gehen 166 kt N a⁻¹ mit Konsumgütern an die Haushalte (Fluss MP.OP-HS.MW-prod), gemäß Abfallstatistik fällt aber nur eine Konsumgüter-Abfallmenge von 46 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 Tab. 9-8 für den Sub-Pool „Abfallwirtschaft“ daher vorrangig die Funktion, die zu berücksichtigenden N-Flüsse aufzulisten und das N-Flussschema des NNB (ECE 2013) zu bedienen.

Tabelle 9-9: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Sub-Pool „Abfallwirtschaft“, Mittel 2010 – 2014; *kursiv: als Differenz berechneter N-Fluss.*

Zufluss	kt N a ⁻¹	Abfluss ^a	
			t N a ⁻¹
Abfall-Aufkommen (einschließlich Klärschlamm und Tiermehl)	338,9	Stoffliche Verwertung (i.e. Recycling von Abfall und landbauliche Verwertung von Klärschlamm)	- 372,6
Netto-Import	6,3	Deponierung von Abfall und Klärschlamm	- 85,5
		<i>Reduktion von N(org) zu N₂ (im Zuge der Verbrennung von Abfall, Tiermehl und Klärschlamm)</i>	<i>- 272,8</i>
Summe Zuflüsse	345,2	Summe Abflüsse	- 731,6^b
Differenz: - 386,4			

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

^b Einschließlich 0,7 kt N a⁻¹ NO_x- und N₂O-Emission aus Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien.

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 geringerem Maße über das Deponiegas. Die NH₃-Gehalte im Deponiegas liegen typischerweise im Bereich 10 bis 50 mg m⁻³. Es gibt auch Hinweise, dass das NH₃ im ungefassten Deponiegas beim Austritt in aeroben Oberflächenschichten der Deponie biologisch zu N₂O oxidiert werden kann. Nähere Erkenntnisse liegen hierzu jedoch nicht vor (UBA, schriftl. Mittlg. 04.07.2018). 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. Auf der Seite der N-Abflüsse kann der N-Eintrag mit dem Ablauf von öffentlichen und nichtöffentlichen Kläranlagen in die Oberflächengewässer 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). Auf der Zufluss-Seite kann dagegen die N-Menge mit der Einleitung von Schmutzwasser aus Haushalten sowie von industriellen Indirekt- und Direkteinleitern 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 2017). Mit Annahme einer anderen Gesamt-Eliminationsrate ändern sich die N-

Fracht im Schmutzwasser und die Denitrifikation (als Differenzgröße) entsprechend. Weiterhin betrifft das aber 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 Tab. 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“, Mittel 2010 – 2014; *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)	514,4	Einleitung in Oberflächengewässer aus Kläranlagen und Kanalisationsystem	- 114,3
		Klärschlamm (alle stofflichen Verwertungswege, ohne Verbrennung)	- 80,0
		Klärschlamm zur thermischen Entsorgung (Verbrennung)	- 72,4
		<i>Denitrifikation in Kläranlagen</i>	- 211,0
		NO _x - und N ₂ O-Emission aus Kläranlagen	- 1,1
Summe Zuflüsse	514,4	Summe Abflüsse	- 478,8
Differenz: 35,6			

Zur Plausibilisierung der N-Massenbilanz für die öffentliche und nichtöffentliche Abwasserbehandlung in Kap. 9.2.1 können die Auswertungen des bundesweiten Leistungsvergleiches kommunaler Kläranlagen für das Bezugsjahr 2016 herangezogen werden (DWA 2017):

Jahresabwassermenge	8.728 Mio. m ³ a ⁻¹
Mittlere EW-Belastung	106,7 Mio. E a ⁻¹
Mittlere Zulaufkonzentration	50,3 mg l ⁻¹ N _{ges.}

Für die in den DWA-Leistungsvergleich einbezogenen Kläranlagen berechnet sich daraus eine mittlere einwohnerspezifische N_{ges}-Zulaufkraft von 11,3 g E⁻¹ d⁻¹, was mit hier dem in angesetzten Wert von 12 g E⁻¹ d⁻¹ (s. Kap. 9.2.1) gut übereinstimmt. 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 Tab. 9-7 angesetzte N-Fluss von 1,1 kt N a⁻¹ für die N₂O-Emission aus Kläranlagen (nach Nationalen Inventarbericht, NIR, UBA 2016a) liegt, bezogen auf die Gesamteintragsmenge von 484 kt N a⁻¹ (ohne Abfluss von versiegelten Flächen) mit 0,27 % N₂O-N/N_{Zulauf-KA} etwas höher als der Median der Messwerte aus Österreich.

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

9.5 Unsicherheitsbetrachtung der N-Flüsse Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung (WS)

In Tab. 9-11 sind die Unsicherheiten in der Berechnung der N-Flüsse für den Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“ aufgeführt.

Tabelle 9-11: Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Abfall- und Abwasserentsorgung“.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
Sub-Pool Abfallwirtschaft (WS.SW)					
EF.EC-WS.SW-waste MP.FP-WS.SW-waste MP.NC-WS.SW-waste MP.OP-WS.SW-waste HS.HB-WS.SW-waste HS.MW-WS.SW-waste RW-WS.SW-waste WS.SW-MP.OP-waste WS.SW-RW--waste	Abfallstoffe aus den verschiedenen Sub-Pools Recycling von Abfallstoffen (stoffliche Verwertung) Import und Export von Abfallstoffen	N(ges)	Mittel bis hoch; Materialflüsse in der Abfallentsorgung nicht eindeutig abzugrenzen zwischen Herkunft, Wiederverwendung und Endverbleib	Hoch; Annahmen zu N-Gehalten in den Abfallstoffen z.T. spekulativ	4
WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlamm zur thermischen Entsorgung (Verbrennung)	N(ges)	S. Sub-Pool Abwasserentsorgung		2
WS.SW-AT-gasEM	NO _x -, N ₂ O-Emission Müllverbrennungsanlagen u. Mülldeponien	NO _x N ₂ O	s. Tab. 3-11		2 / 4
WS.SW-AG.SM-comp	Kompost zur Verwertung in der Landwirtschaft	N(org)	Gering	Gering	2
WS.SW-AG.BG-waste	Organischer Abfall zur Fermentierung in Biogasanlagen	N(org)	Gering	Gering	2
Sub-Pool Abwasserentsorgung (WS.WW)					
HS.HB-WS.WW-sewage	Abwasser von Haushalten	N(ges)	Gering	Mittel	3
HS.MW-WS.WW-sewage	Abwasser von versiegelten Flächen	N(ges)	Mittel	Hoch	4
MP.XX-WS.WW-sewage	Abwasser von industriellen Direkt- und Indirekteinleitern	N(ges)	Mittel	Hoch	4
WS.WW-AT-gasEM	NO _x - und N ₂ O-Emission aus Kläranlagen	NO _x , N ₂ O	s. Tab. 3-11		2 / 4

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
WS.WW-AT-N2	Denitrifikation in kommunalen und nichtöffentlichen Kläranlagen	N2	Hoch; als Differenzgröße ermittelt		4
WS.WW-HS.MW-sludge WS.WW-AG.SM-sludge WS.WW-WS.SW-sludge	Klärschlammanfall - Alle Formen der Verwendung bzw. Verwertung	N(org)	Sehr gering (s. Statist. Bundesamt 2014: Erhebung der öffentlichen Abwasserentsorgung – Qualitätsbericht)	Gering	2
WS.WW-HY.SW-discharge	N(ges)-Eintrag in Oberflächengewässer aus Kläranlagen und dem Kanalisationssystem	N(ges)	Gering	Gering	2

^a Größenordnung der Unsicherheit, Einstufung gem. Tab. 2-4.

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; Tab. 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 ermittelt. Für diese Aufgabe wird das Modell MoRE (Modelling Regionalized Emissions; Fuchs et al. 2017a, 2017b) verwendet, das als Eintragsmodell den Stoffeintrag (u.a. Nährstoffe, Schwermetalle) in Oberflächengewässer über verschiedene Eintragspfade schätzt; die ersten Ansätze gehen auf Behrendt et al. (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). Die methodisch komplexen Modellierungsansätze benötigen eine Vielzahl von allgemeinen und stoffspezifischen Eingangsdaten, mit denen dann der Stoffeintrag in das Gewässersystem nach Eintragspfaden und Analysegebieten differenziert auf Jahresbasis ermittelt wird. Zur Modellierung werden generell bundeseinheitlich verfügbare Eingangsdaten verwendet. Für die hier durchgeführte Untersuchung wurden die Ergebnisse für die betrachteten Einzeljahre 2010 - 2014 ausgegeben und gemittelt. Die räumliche Auflösung in MoRE ist hierarchisch aufgebaut. Basis und kleinste räumliche Betrachtungseinheit sind die 2759 Analysegebiete (mittlere Größe 130 km²), die nach hydrologischen und administrativen Kriterien abgegrenzt wurden (Fuchs et al. 2010). Die aggregierten Ergebnisse für die 2759 Analysegebiete entsprechen der Summe für Deutschland.

In die nachfolgend dargestellten Ergebnisse sind gemessene Daten zum Wasserabfluss in Oberflächengewässern, im Boden und im Grundwasser sowie zur Konzentration von N-Verbindungen in Gewässern somit nur indirekt eingegangen: zum einen dienen diese Messwerte der Kalibrierung und Validierung im Rahmen der MoRE-Modellentwicklung; zum anderen werden die modellierten jährlichen N-Frachten in den Fließgewässern mithilfe der gemessenen Abflussvolumina jahresspezifisch skaliert.

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
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

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Kapitel
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 Grundwasser	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-run-off	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-	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit grundwasserbürtigem Abfluss	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 partikulärer Form, das heißt gebunden an Sedimente, in Gewässern bzw. die Festlegung auf dem Gewässergrund 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 der nationalen N-Flussbilanzierung) 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 wird im Modell MoRE nur für die Landwirtschaft betrachtet. Als Eingangsgröße für die Modellierung der Nitrat-Fracht im Grundwasser wird dort (vereinfachend) der N-Überschuss auf der Landwirtschaftsfläche, vermindert um die gasförmigen N_r-Emissionen (NH₃, NO_x, N₂O), in Höhe von 1113,2 kt N a⁻¹ (s. Tab. 7-6) als (potenzielle) Nitrat-Auswaschung angesetzt. Die Vermin-

derung der N-Fracht auf dem Weg des Sickerwassers vom Oberboden bis zum Übertritt in ein Oberflächengewässer - infolge Denitrifikation in der Wurzelzone, in der ungesättigten Zone und im Grundwasserleiter - wird in MoRE nicht nach Kompartimenten differenziert modelliert (s. Kap. 10.1.2; Einzelheiten s. Fuchs et al. 2017a).

Für die nationale N-Flussbilanzierung wird dieser N-Überhang von 1113,2 kt N a⁻¹ verteilt auf 121,9 kt N a⁻¹ mit dem lateralen NO₃-Eintrag in Oberflächengewässer, 233,9 kt N a⁻¹ Denitrifikation in der Wurzelzone der Landwirtschaftsböden sowie (als Differenzgröße) 757,1 kt N, die als Nitratauswaschung aus Landwirtschaftsflächen *unterhalb* der Wurzelzone betrachtet werden und als Zufluss in den Pool „Hydrosphäre“ eingehen. Bezogen auf eine mittlere Sickerwasserrate von 220 mm a⁻¹ aus Landwirtschaftsflächen in Deutschland würde diese Auswaschungsmenge rechnerisch einer mittleren Nitrat-Konzentration im Sickerwasser (unterhalb der Wurzelzone) von rund 90 mg NO₃ l⁻¹ entsprechen.

Für die Nitratauswaschung aus Siedlungs- und Verkehrsflächen (urbane nicht versiegelte Flächen) wird die atmosphärische NO_x- und NH_y-Depositionsrate von zusammen 18 kg N ha⁻¹ a⁻¹ (Tab. 3-6) sowie ein Zuschlag von 4 kg N ha⁻¹ a⁻¹ angesetzt, der das sogenannte Oberflächenpotenzial von Straßen durch Laubfall und tierische Exkremate berücksichtigt (nach Behrendt et al. 1999). Bezogen auf die urbane nicht versiegelte Fläche von 16.372 km² (EEA 2014, 2016) beträgt die Nitratauswaschung damit 36,0 kt N a⁻¹. Auf nicht versiegelten Siedlungsflächen versickern rund 148 mm a⁻¹, womit sich eine mittlere Nitrat-Konzentration im Sickerwasser aus urbanen nicht versiegelten Flächen von rund 66 mg NO₃ l⁻¹ berechnet.

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

Für die Nitratauswaschung aus Siedlungs- und Verkehrsflächen sowie aus Wald und semi-natürlichen Flächen wird keine Verminderung für Denitrifikation in der Wurzelzone vorgenommen. Für diese Nutzungen wird, im Unterschied zur Kalkulation für die Landwirtschaft, die Auswaschungsmenge unterhalb der Wurzelzone als unabhängige Größe geschätzt bzw. aus Messwerten gemittelt.

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 mit dem Sickerwasser aus Siedlungs- und Verkehrsflächen	NO3	36,0
AG.SM	HY.GW	AG.SM-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen (unterhalb der Wurzelzone)	NO3	757,1
FS.FO	HY.GW	FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldflächen	NO3	60,8
FS.OL	HY.GW	FS.OL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO3	3,3
Summe Nitratauswaschung in das Grundwasser					857,2

Es ist anzumerken, dass im Modell MoRE die Flächenangaben der verschiedenen Landnutzungsklassen (insbesondere der Landwirtschaftsfläche) sowie deren Zusammenfassung zu Landnutzungskategorien abweichen von den Angaben der Tab. 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 unter-

schiedlichen 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)

Der Stickstoffeintrag in Oberflächengewässer mit dem Übertritt von Grundwasser (HY.GW-HY.SW-discharge) wird im Modell MoRE aus der N-Konzentration im Grundwasser und dem Grundwasserabfluss berechnet. Beide Größen werden differenziert ermittelt für die 2759 Analysegebiete (Einzelheiten s. Fuchs et al. 2010, 2016, 2017a). Für die Modellierung der N-Konzentration im Grundwasser werden in MoRE die N-Einträge aus Landwirtschaftsflächen, Waldflächen und semi-natürlichen Flächen in Ansatz gebracht; für die hier durchgeführte Abschätzung wurde zusätzlich ein N-Eintrag von 3,9 kt N a⁻¹ von urbanen nicht versiegelten Flächen angesetzt (Annahme: N-Konzentration 1 mg N l⁻¹ im Grundwasser unter urbanen nicht versiegelten Flächen). Die Stickstoff-Retention - im Wesentlichen durch Denitrifikation - in der ungesättigten Zone (unterhalb der Wurzelzone) und im Grundwasser wird in MoRE für die Landwirtschaftsflächen mit einer empirisch ermittelten Gleichung geschätzt, in welche die Sickerwasserrate und die hydrogeologischen Standortverhältnisse (5-stufig klassiert) eingehen; Einzelheiten s. Fuchs et al (2010). Im Ergebnis wird in MoRE nach diesem Ansatz ein NO₃-Eintrag in Oberflächengewässer mit dem Übertritt von Grundwasser von 268,2 kt N a⁻¹ modelliert.

Für die Kalkulation der Nitratentnahme mit der Förderung von Trinkwasser wird eine jährliche Trinkwasserentnahme aus dem Grundwasser von 2.725 Mio m³ a⁻¹ angesetzt (DESTATIS, 2015c). Für den Nitratgehalt im Grundwasser wird für die Schätzung dieses N-Flusses (HY.GW-AG.SM-abstr) vereinfachend ein mittlerer Wert von 25 mg NO₃ l⁻¹ entsprechend 5,6 mg N l⁻¹ zugrunde gelegt. Die Nitratentnahme mit der Förderung von Grundwasser für die Feldberegnung in der Landwirtschaft (HY.GW-AG.SM-irrig) wird in Kap. 7.2.2 erläutert. In Tab. 10-3 sind die N-Abflüsse aus dem Grundwasser zusammengestellt.

Ausgehend von der Nitratauswaschung in das Grundwasser von 857,2 kt N a⁻¹ (als Zufluss in den Subpool HY.GW, Tab. 10-2), dem N-Abfluss mit der Entnahme von Trinkwasser und Beregnungswasser (zus. 17,0 kt N a⁻¹, Tab. 10-3) und dem NO₃-Übertritt aus dem Grundwasser in Oberflächengewässer von 268,2 kt N a⁻¹ kann schließlich die Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser als Differenzgröße zu 572 kt N a⁻¹ berechnet werden. Dieser Ansatz impliziert die Annahme, dass die Stickstoffmenge in den Grundwasservorkommen zeitlich konstant ist, das heißt, dass NO₃-Zufluss mit dem Sickerwasser, Abbau durch Denitrifikation und NO₃-Abfluss in Oberflächengewässer sich im Fließgleichgewicht befinden und somit keine NO₃-Vorratsänderung im Aquifer stattfindet.

Tabelle 10-3: Ausgehende N-Flüsse aus dem Sub-Pool „Grundwasser“.

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
HY.GW	AT	HY.GW-AT-N2	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N2	572,0
HY.GW	HS.HB	HY.GW-AG.SM-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO3	15,4
HY.GW	AG.SM	HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit Beregnungswasser für die Landwirtschaft	NO3	1,6
HY.GW	HY.SW	HY.GW-HY.SW-discharge	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit dem Übertritt von Grundwasser	NO3	268,2

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, Tab. 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 2010 – 2014.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
AG.SM-HY.SW-runoff	Oberflächenabfluss (Runoff)	NO3	29,7
	Erosion	NO3	9,9
		N(org)	8,2
	Dränageausfluss	NO3	74,1
Summe Einträge Runoff, Erosion und Drainage			121,9

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 aus den gesamten Einträgen in Flussgebiete im Bundesgebiet nach MoRE-Schätzung von 576,5 kt N a⁻¹ (s. Tab. 10-6) abzügl. der N-Fracht im Abfluss aus Deutschland (in Unterlieger und die Küstenmeere) von 500,6 kt N a⁻¹ (s. Tab. 10-5) zu 75,9 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 Grenzüberschreitende Zuflüsse 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 (Tab. 10-5). Dabei wurden die Abflussdaten der Länder (die bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG, zusammengeführt werden) als auch Abflussdaten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung verwendet (liegen ebenfalls bei der BfG vor). 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 1 kt N km⁻² a⁻¹ geschätzt (abgeleitet anhand der beobachteten Gewässerfrachten für die ausgewählten Gütemessstationen der Flussgebietseinheiten Donau, Elbe, Rhein sowie Weser). In der Tabelle 10-5 sind die Ergebnisse für die Flussgebietseinheiten zusammengefasst.

Tabelle 10-5: N-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss und Abfluss oberirdischer Gewässern, Mittel 2010 – 2014.

Flussgebiets-einheit	Quelle od. Messstelle Oberlieger / Mündung osd Messstelle Unter-lieger	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)		99,5	
Eider	DE / Nordsee			4,9
Elbe	Schmilka (CZ) / Nordsee (Seemannshöft)	54,8		115,0
Ems	DE / Nordsee			14,5
Maas	DE / NL		4,1	
Oder	Polen / Ostsee			5,0 ^c
Rhein	Öhringer (CH) / Kleve-Bimmen (NL)	12,5	209,7	
Schlei/Trave	DE / Ostsee			6,3
Warnow/Peene	DE / Ostsee			14,3
Weser	DE/ Nordsee (Bremen)			27,2
Summe		67,3	313,4	187,2

^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 (67,3 kt N a⁻¹) und im Abfluss aus dem Bundesgebiet in die Küstenmeere bzw. zu den Unterliegern (zusammen 500,6 kt N a⁻¹), das heißt der Zuwachs der N(ges)-Fracht in Oberflächengewässer im Verlauf ihrer Passage durch Deutschland beträgt 433,3 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 187,2 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 2018; Tab. 281), Mittel 2010 - 2014, wird die Menge der Anlandungen der deutschen Fischerei im Inland und Ausland ausgewiesen:

Küsten- und Hochseefischerei: 226.560 t Fanggewicht * 2,8 % N (ECE 2013, Annex 6, Table 12) = 6,3 kt N a⁻¹.

10.3 Zusammenfassung der N-Flüsse Gewässer (HY)

In Tab. 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 2010 – 2014.

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	36,0
AG.SM	HY.GW	AG.SM-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen	NO ₃	757,1
FS.FO	HY.GW	FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldflächen	NO ₃	60,8
FS.WL	HY.GW	FS.WL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO ₃	3,3
HY.GW	AT	HY.GW-AT-N2	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N ₂	572,0
HY.GW	HS.HB	HY.GW-AG.SM-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO ₃	15,4
HY.GW	AG.SM	HY.GW-AG.SM-irrig	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit Beregnungswasser für die Landwirtschaft	NO ₃	1,6
HY.GW	HY.SW	HY.GW-HY.SW-	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit dem Übertritt von Grundwasser	NO ₃	268,2
Sub-Pool Oberflächengewässer (HY.SW)					
AT	HY.SW	AT-HY.SW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Oberflächengewässer	NHy NO _x	3,3 1,5
AG.SM	HY.SW	AG.SM-HY.SW-runoff	N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen	NO ₃ N(org)	113,7 8,2
WS.WW	HY.SW	WS.WW-HY.SW-sewage	N(ges)-Eintrag in Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft	N(ges)	114,3
HY.GW	HY.SW	HY.GW-HY.SW-	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit grundwasserbürtigem Abfluss	NO ₃	268,2
RW	HY.SW	RW-HY.SW-discharge	N(ges)-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss (von Oberliegern)	N(ges)	67,3
HY.SW	AT	HY.SW-AT-N2	Denitrifikation (Retention) in Oberflächengewässern	N ₂	75,9
HY.SW	RW	HY.SW-RW-discharge	N(ges)-Fracht im grenzüberschreitenden Abfluss (Abgabe an Unterlieger)	N(ges)	313,4
HY.SW	HY.CW	HY.SW-HY.CW-discharge	N(ges)-Fracht im Abfluss in die Küstenmeere	N(ges)	187,2

Pool(ex)	Pool(in)	Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	N-Fluss kt N a ⁻¹
Sub-Pool Küstengewässer (HY.CW)					
AT	HY.CW	AT-HY.CW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Küstengewässer	NHy NOx	1,3 0,6
HY.SW	HY.CW	HY.SW-HY.CW-discharge	N(ges)-Fracht im Zufluss in die Küstenmeere	N(ges)	187,2
HY.CW	MP.FP	HY.CW-MP.FP-fish	Meeresfischerei (Anlandungen)	N(org)	6,3

10.4 Bilanzierung und Anmerkungen für den Umsatzraum Gewässer

In Tab. 10-7 sind Zuflüsse und Abflüsse für den Umsatzraum „Gewässer“ dargestellt. Die Differenz von rund 182,8 kt N a⁻¹ ist nahezu identisch mit der N-Fracht von 187 kt N a⁻¹, die in die Nordsee und Ostsee eingeleitet wird. Aufgrund der Zurechnung der Küstenmeere zum nationalen Territorium wird im NNB-Schema dieser N-Fluss nicht als Export behandelt, so dass rechnerisch ein Überschuss für den Umsatzraum Gewässer entsteht. Für zukünftige N-Flussbilanzierungen ist zu empfehlen, als Systemgrenze die Übergangspunkte limnisch/marin festzulegen, analog zu den Grenzübertrittspunkten der Flüsse zu Unterliegern.

Die Denitrifikation ist als Differenzgröße 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 Tab. 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 molekularem N₂ überführt wird – sein müsste, damit keine Anreicherung von N_r (vorrangig in Form von NO₃) in der Hydrosphäre stattfindet.

Tabelle 10-7: Bilanzierung der eingehenden und ausgehenden N-Flüsse im Pool „Gewässer“, Mittel 2010 – 2014; *kursiv: geschätzte bzw. als Differenz berechnete N-Flüsse.*

Zufluss (N _r -Quellen)		Abfluss (N _r -Verwendung)	
	kt N a ⁻¹		t N a ⁻¹
Atmosphärische Deposition	6,7	NO ₃ -Entnahme mit Wasserförderung	17,0
NO ₃ -Eintrag aus Landwirtschaftsflächen ^a	121,9	<i>Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser</i>	<i>572,0</i>
Eintrag aus Kläranlagen und dem Kanalisationssystem	114,3	<i>Denitrifikation (Retention) in Oberflächengewässern</i>	<i>75,9</i>
<i>Nitratauswaschung (unterhalb Wurzelzone)</i>	<i>857,2</i>	Meeresfischerei	6,3
Fracht im Zufluss von Oberliegern	67,3	Fracht im Abfluss zu Unterliegern	313,4
Summe Zuflüsse	1167,4	Summe Abflüsse	- 984,6
Differenz: 182,8			

^a über Runoff, Erosion und Drainageabfluss.

10.5 Unsicherheitsbetrachtung der N-Flüsse Gewässer (HY)

In Tab. 10-8 sind die Unsicherheiten in der Berechnung der N-Flüsse für den Pool „Gewässer“ aufgeführt.

Tabelle 10-8: Unsicherheiten der Berechnung der mengenmäßig bedeutenden N-Flüsse für Pool „Gewässer“.

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
Sub-Pool Grundwasser (HY.GW)					
HS.MW-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit Sickerwasser aus Siedlungs- und Verkehrsflächen	NO ₃	Hoch; NO ₃ -Fracht im Sickerwasser: Wert geschätzt		4
AG.SM-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen	NO ₃	Grundwasserneubildungsraten aus Landwirtschaftsflächen: mittel	NO ₃ -Konzentration im Sickerwasser: MoRE Modellberechnung: hoch	4
FS.FO-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Waldflächen	NO ₃	s. Tab. 8-9		4
FS.WL-HY.GW-leach	Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus semi-natürlichen Flächen	NO ₃	Hoch; NO ₃ -Fracht im Sickerwasser: Wert geschätzt		4
HY.GW-AT-N2	Denitrifikation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser	N ₂	Hoch; als Differenzgröße aus hoch unsicheren Werten berechnet		4
HY.GW-AG.SM-abstr	NO ₃ -Entnahme aus dem Grundwasser mit der Förderung von Trinkwasser	NO ₃	Gering	Mittel; NO ₃ -Konzentration im geförderten Wasser geschätzt	3
HY.GW-HY.SW-leach	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit dem Übertritt von Grundwasser	NO ₃	Menge Grundwasserübertritt: Mittel	NO ₃ -Konzentration im austretenden Grundwasser: MoRE Modellberechnung: hoch	4
Sub-Pool Oberflächengewässer (HY.SW)					
AT-HY.SW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Oberflächengewässer	NH _y NO _x	S. Tab. 3-11		3
AG.SM-HY.SW-runoff	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer aus Landwirtschaftsflächen	NO ₃ N(ges)	NO ₃ -Frachten für Eintragspfade Runoff, Erosion und Drainagen: MoRE Modellberechnung: hoch		4
WS.WW-HY.SW-sewage	N(ges)-Eintrag in Oberflächengewässer aus der Siedlungswasserwirtschaft	N(ges)	Einleitungsmengen: mittel (Auswertung Kläranlagen-Kataster)	N-Konzentrationen in Einleitung: mittel (Auswertung Kläranlagen-Eigenüberwachung)	3
HY.GW-HY.SW-	NO ₃ -Eintrag in Oberflächengewässer mit grundwasserbürtigem Abfluss	NO ₃	Grundwasser-Abflussraten: mittel	NO ₃ -Konzentration im Grundwasser-Übertritt: MoRE Modellberechnung: hoch	4

Flusscode	Beschreibung	N-Spezies	Unsicherheit Mengengerüst	Unsicherheit Koeffizienten	Level ^a
RW-HY.SW-discharge	N(ges)-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss (von Oberliegern)	N(ges)	Abflussmessungen: gering	N-Konzentration im Abfluss: gering (für die größeren Flüsse)	2
HY.SW-AT-N2	Denitrifikation in Oberflächengewässern	N2	Hoch; als Differenzgröße aus unsicheren Werten berechnet		4
HY.SW-RW-discharge	N(ges)-Fracht im grenzüberschreitenden Abfluss (Abgabe an Unterlieger)	N(ges)	Abflussmessungen: gering	N-Konzentration im Abfluss: gering (für die größeren Flüsse)	2
Sub-Pool Küstengewässer (HY.CW)					
AT-HY.CW-atmDep	Atmosphärische N-Deposition auf Küstengewässer	NHy NOx	S. Tab. 3-11		3
HY.SW-HY.CW-discharge	N(ges)-Fracht im Zufluss in die Küstemeere	N(ges)	Abflussmessungen: gering; Für Kleingewässer ohne Abflussmessung: Modellergebnis	N-Konzentration im Abfluss: gering (für die größeren Flüsse)	2
HY.CW-MP.FP-fish	Meeresfischerei (Anlandungen)	N(org)	Sehr gering	Sehr gering	1

^a Größenordnung der Unsicherheit, Einstufung gem. Tab. 2-4.

11 Grenzüberschreitende N-Flüsse (RW)

Die „grenzüberschreitenden N-Flüsse“ umfassen die N_r -Importe nach Deutschland und N_r -Exporte aus Deutschland, d.h. 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 Tab. 11-1 und 11-2 sind die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 11-1: Importe und Exporte (eingehende und ausgehende N-Flüsse) im Pool „Grenzüberschreitende N-Flüsse“, Mittel 2010 – 2014.

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	NHy NOx	103,7 114,7
RW	EF.EC	RW-EF.EC-fuel	Import von Energieträgern	4.1.1	N(org)	1735,0
RW	MP.FP	RW-MP.FP-food	Einfuhr der Ernährungswirtschaft ^a	5.1.6	N(org)	890,0
RW	MP.NC	RW-MP.NC-prod	Import N-haltige chemische Produkte	5.2.4	NH ₃ ,NO ₃ , N(org)	2262,2
RW	MP.OP	RW-MP.OP-prod	Import Konsumgüterindustrie	5.3	N(org)	311,4
RW	AG.SM	RW-AG.SM-ma-nure	Import von Wirtschaftsdünger ^a	7.2.1	N(org)	14,3
RW	FS.FO	RW-FS.FO-wood	Import von Rohholz	8.1.5	N(org)	4,3
RW	WS.SW	RW-WS.SW-waste	Import von Abfallstoffen	9.1.3	N(org)	9,1
RW	HY.SW	RW-HY.SW-discharge	N-Fracht im grenzüberschreitenden Zufluss	10.2.3	NO ₃ , N(org)	67,3
Summe Importe						5512,0
AT	RW	AT-RW-gasN	Atmosphärischer Transport von gasförmigen N-Verbindungen	3.5	NHy NOx	248,8 280,5
EF.EC	RW	EF.EC-RW-fuel	Export v. Energieträgern und Mineralölprodukten	4.1.1	N(org)	62,7
MP.FP	RW	MP.FP-RW-food	Ausfuhr der Ernährungswirtschaft ^a	5.1.6	N(org)	635,2
MP.NC	RW	MP.NC-RW-prod	Export N-haltige chemische Produkte	5.2.4	NH ₃ ,NO ₃ , N(org)	1797,1
MP.OP	RW	MP.OP-RW-prod	Export Konsumgüterindustrie	5.3	N(org)	308,9
FS.FO	RW	FS.FO-RW-wood	Export von Rohholz	8.1.5	N(org)	2,2
WS.SW	RW	WS.SW-RW-waste	Export von Abfallstoffen	9.1.3	N(org)	2,8
HY.SW	RW	HY.SW-RW-load	N-Fracht im grenzüberschreitenden Abfluss	10.2.3	NO ₃ , N(org)	313,4
Summe Exporte						3651,6

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

In Tab. 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 2010 – 2014.

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	218	- 529	- 311
EF.EC	Energiewirtschaft ^c	N(org)	(1735)	(63)	(1672)
MP.FP	Nahrungs- und Futtermittelindustrie - darunter: Futtermittel	N(org)	904 ^d (405) ^e	- 635 ^e	269 405 ^e
MP.NC	Chemische Industrie - darunter: Düngemittel	N(org)	2262 1028	- 1797 -580	465 448
MP.OP, WS.SW	Konsumgüterindustrie ^f , Abfallwirtschaft	N(org)	325	- 314	11
HY.SW	Oberflächengewässer	NO ₃ , N(org)	67	- 313	- 246
Summen^c und Saldo (ohne Energiewirtschaft)			3776^c	- 3588^c	188^c

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

^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.

Im Import-Export-Saldo aller Pools zusammen erzielt Deutschland einen vergleichsweise geringen Import-Überschuss von 188 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. Mit dem Außenhandel von Wirtschaftsgütern der Nahrungs- und Futtermittelindustrie sowie der chemischen Industrie (Energieträger ausgeklammert) entsteht ein Netto-Import von 745 kt N a⁻¹. Auf der anderen Seite „exportiert“ Deutschland über den atmosphärischen Transport von gasförmigen N_r-Verbindungen sowie mit dem N-Abfluss in den Flüssen an Unterlieger mit (netto) -557 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 Tab. 11-2, die Systemgrenze der NNB bereits an der Küste bzw. an den Flussmündungen, das heißt betrachtet den Abfluss von 187 kt N a⁻¹ in die Nord- und Ostsee als Export, dann beträgt der Netto-Export aus dem Bundesgebiet über Atmosphäre und Hydrosphäre insgesamt -744 kt N a⁻¹. Der Import-Export-Saldo ist dann gleich Null.

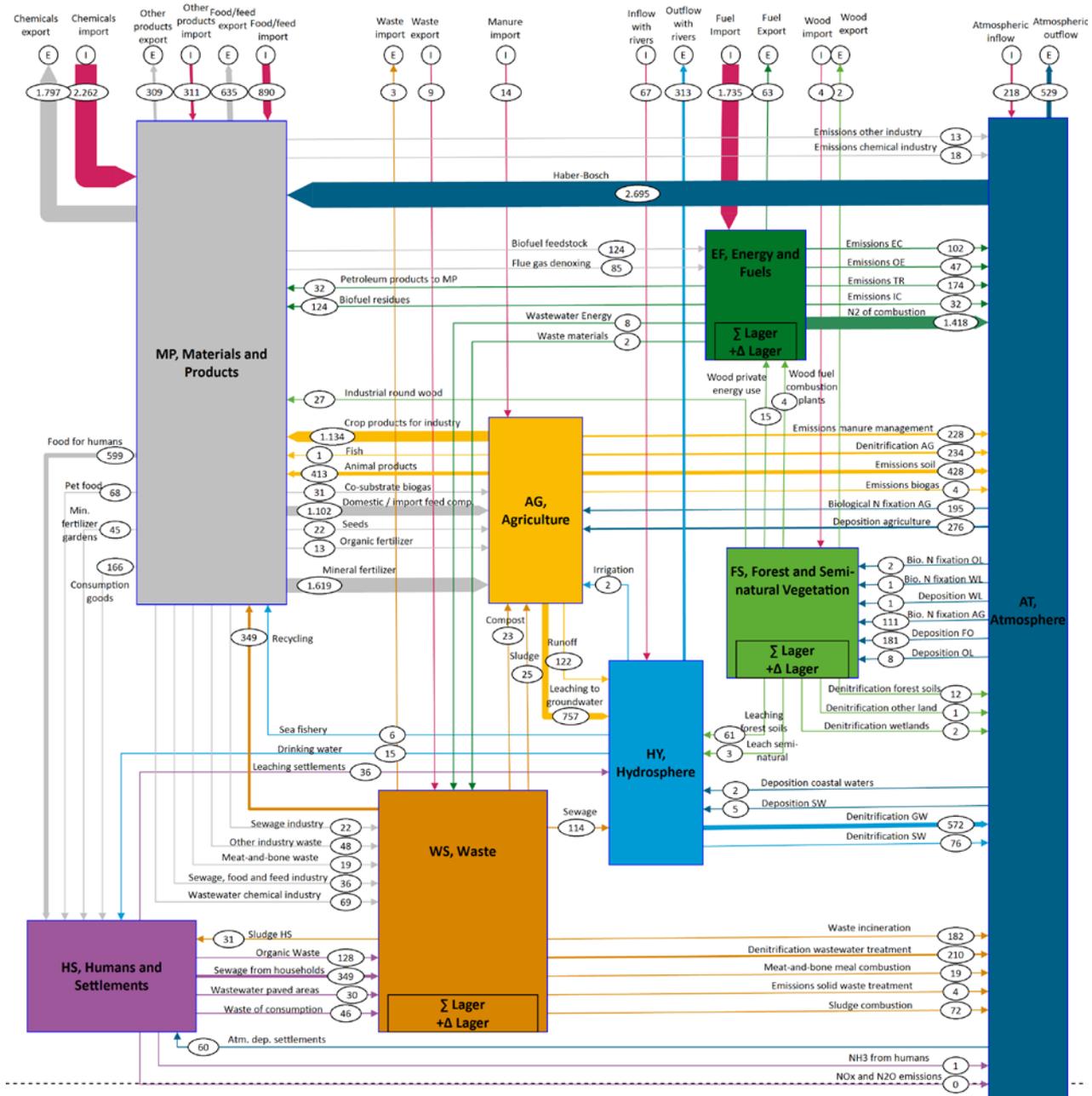
Der Pool „Landwirtschaft“ ist in Tab. 11-2 nicht aufgeführt, da gemäß der Systematik des NNB (ECE 2013) alle grenzüberschreitenden N-Flüsse in und aus der Landwirtschaft über die Sub-Pools „Nahrungs- und Futtermittelindustrie“ bzw. „Chemische Industrie“ erfasst werden. Die N_r-Flüsse mit dem Außenhandel Deutschlands haben allerdings zu einem wesentlichen Teil ihren Endverbleib in der Landwirtschaft: In der Ernährungsindustrie entfallen 45 % der N_r-Netto-Importmenge auf Futtermittel, im Außenhandel mit Erzeugnissen der Chemie-Industrie entfallen 45 % der N_r-Importmenge und 32 % 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 405 kt N a⁻¹ aufweist, was rund 20 % 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 269 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. 2.6.801 (Substance Flow Analysis, TU Wien, www.stan2web.net) dargestellt. Abbildung 12-1 zeigt das Gesamtsystem der Nationalen N-Bilanz 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, Sub-Pools und N-Flüsse (in kt N a⁻¹, Mittel 2010 – 2014) der nationalen N-Bilanzierung Deutschland.

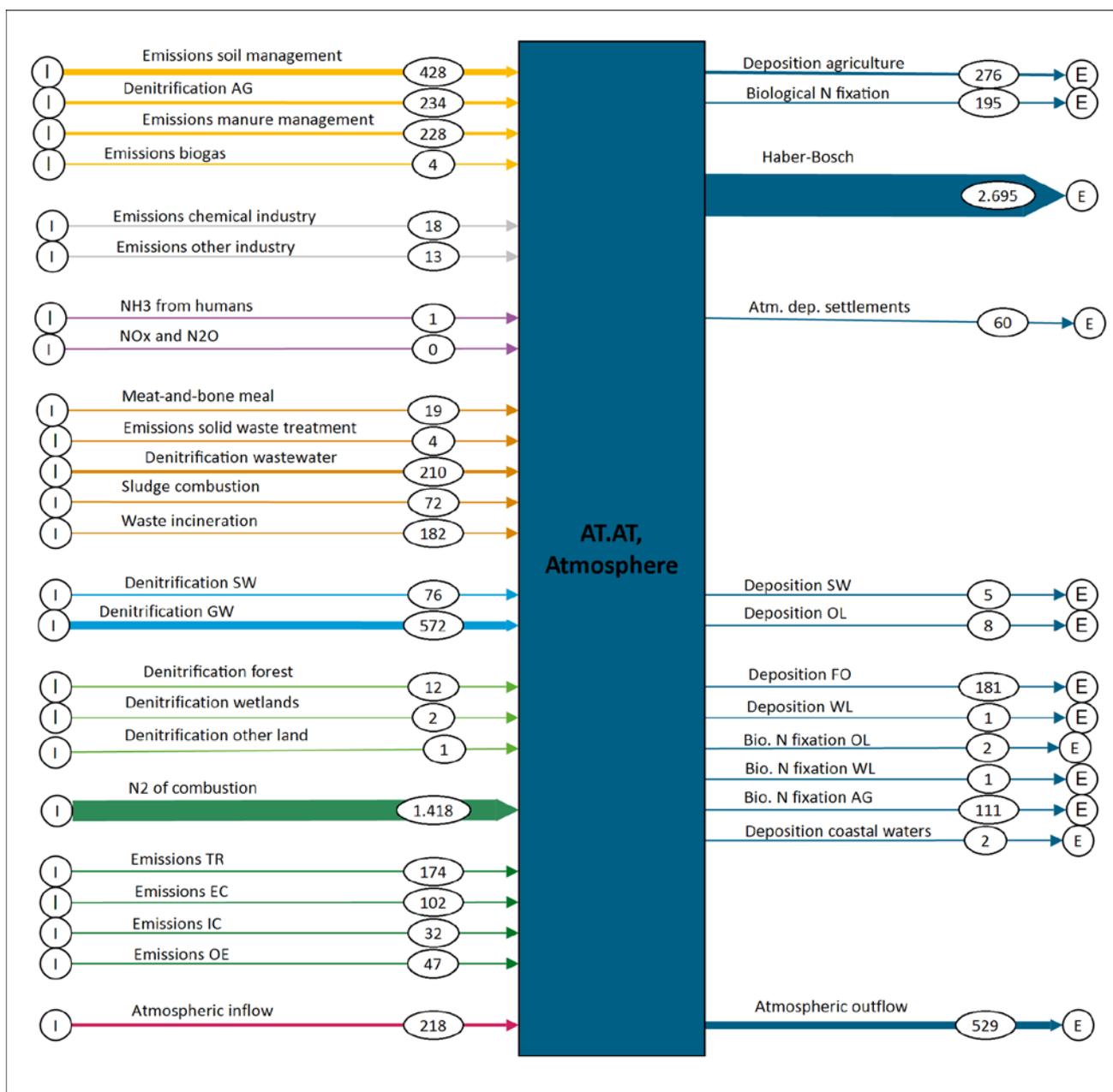


Nationale N-Bilanz mit den acht Pools „Atmosphäre“ (AT, Atmosphäre), „Energiewirtschaft und Verkehr“ (EF, Energy and Fuels), „Industrielle Produktion“ (MP, Materials and Products), „Ernährung und Konsum“ (HS, Humans and Settlements), „Landwirtschaft“ (AG, Agriculture), „Wald und semi-natürliche Flächen“ (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 grenzüberschreitende N-Flüsse („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 694 kt N_r a⁻¹ mit der Inlandsförderung von Braunkohle und Steinkohle und der „Schwund“ von 818 kt N a⁻¹ mit der Verarbeitung von Rohöl zu Mineralöl (s. Kap. 4.1.1).

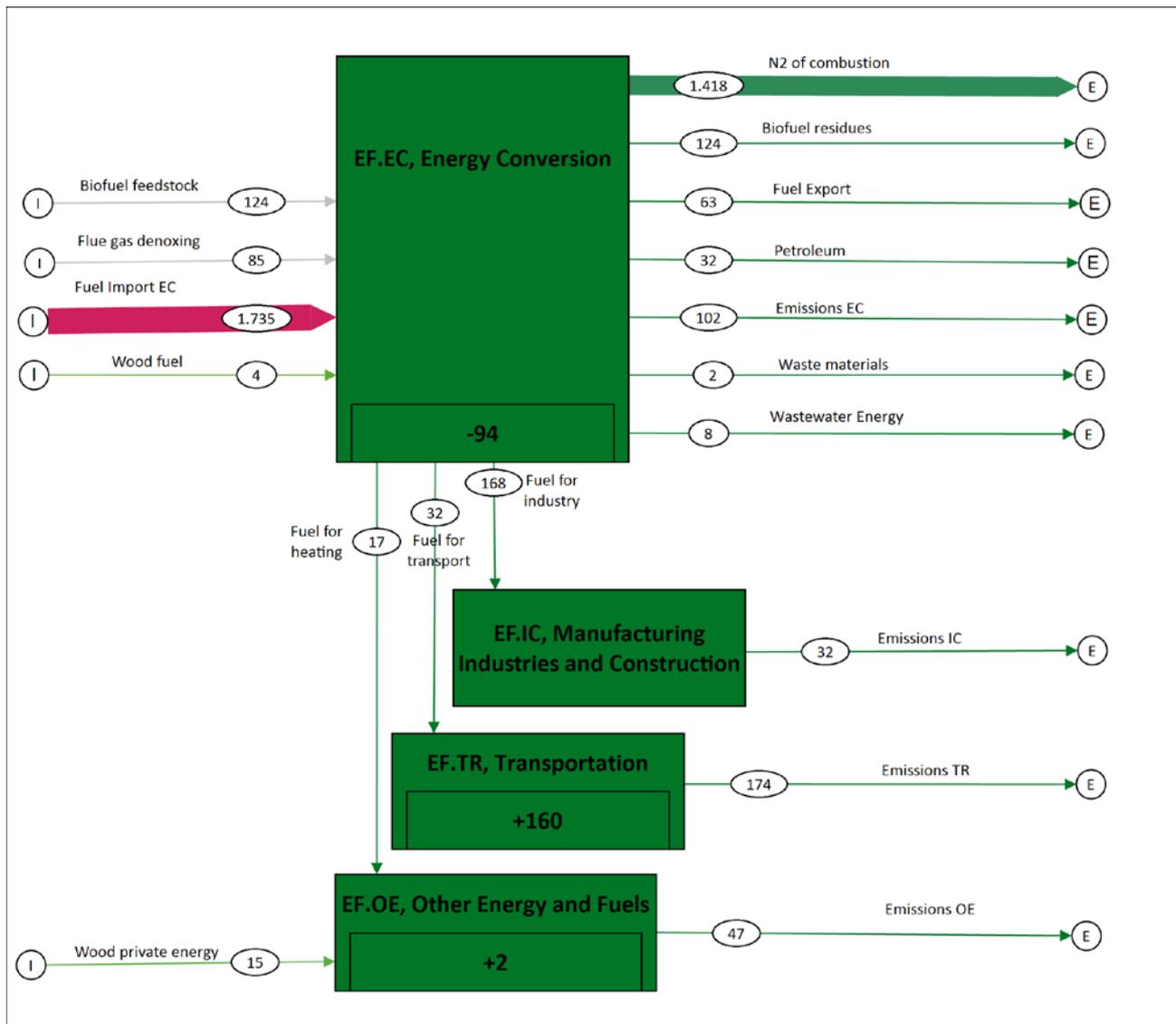
Die Abbildungen 12-2 bis 12-9 zeigen die acht in den Kapiteln 3 bis 10 beschriebenen Pools und deren Sub-Pools mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen separat.

Abbildung 12-2: Pool „Atmosphäre“ (AT, Atmosphäre) mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2010 – 2014).



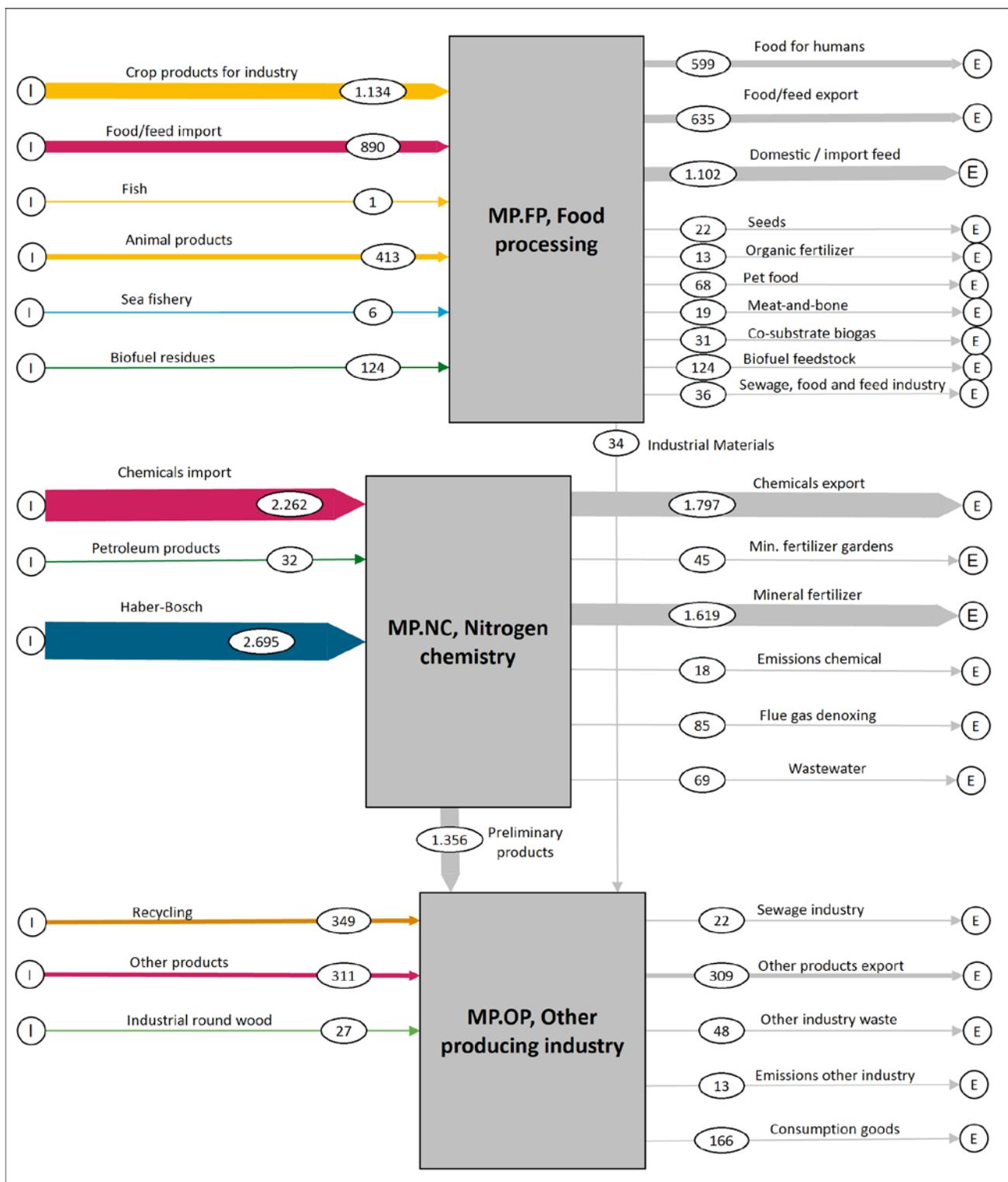
Pool „Atmosphäre“ (AT, Atmosphäre) mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen gemäß Kap. 3. Werte in kt N a⁻¹ pro Fluss, auf ganze Zahlen gerundet; die Breite der Pfeile ist proportional zur Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools, siehe Abb. 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 2 bis 11.

Abbildung 12-3: Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ (EF, Energy and Fuels) mit den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2010 – 2014).



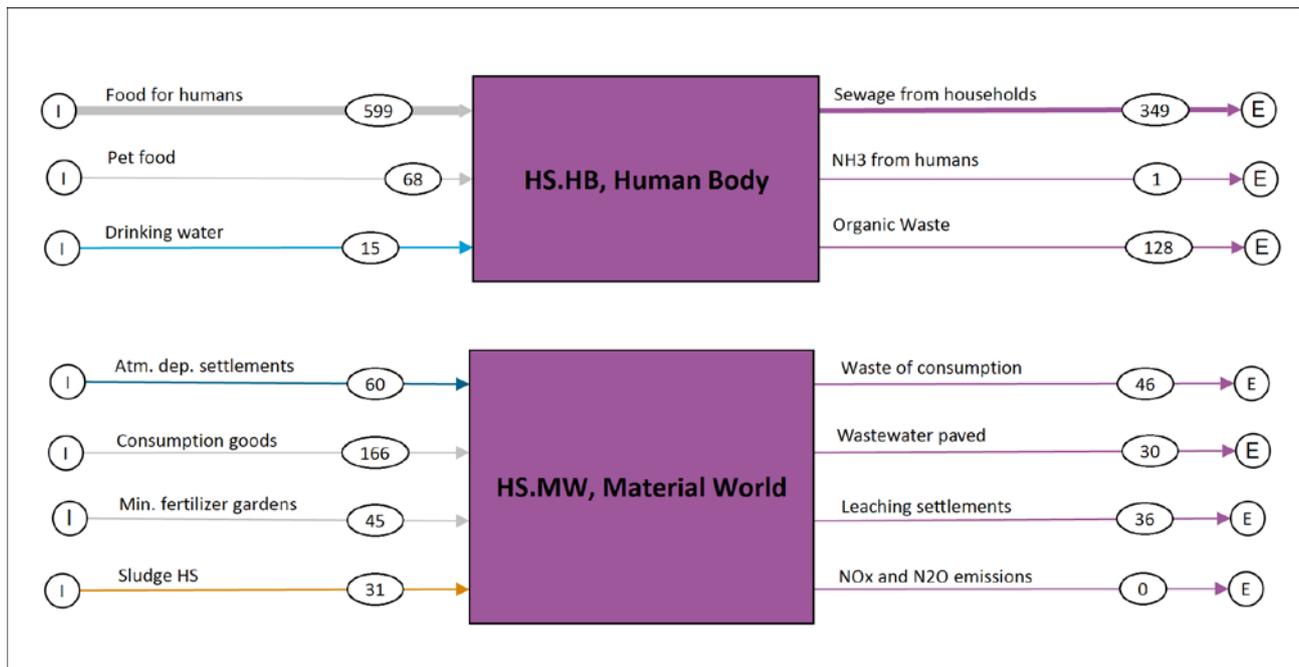
Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ (EF, Energy and Fuels) mit den Sub-Pools „Energiewirtschaft“ (Energy Conversion, „Industrielle Energieerzeugung“ (Manufacturing Industries and Construction), „Transport und Verkehr“ (EF.TR, Transportation) und „Sonstige Energieerzeugung“ (EF.OE, Other Energy and Fuels) 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 Abb. 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 2 bis 11. Im N-Flussschema für den Pool Pool „Energiewirtschaft und Verkehr“ sind „Erzeugung“ von 694 kt N_r a⁻¹ mit der Inlandsförderung von Braunkohle und Steinkohle und der „Schwund“ von 818 kt N a⁻¹ mit der Verarbeitung von Rohöl zu Mineralöl (s. Kap. 4.1.1) nicht dargestellt.

Abbildung 12-4: Pool „Industrielle Produktion“ (MP, Materials and Products) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2010 – 2014).



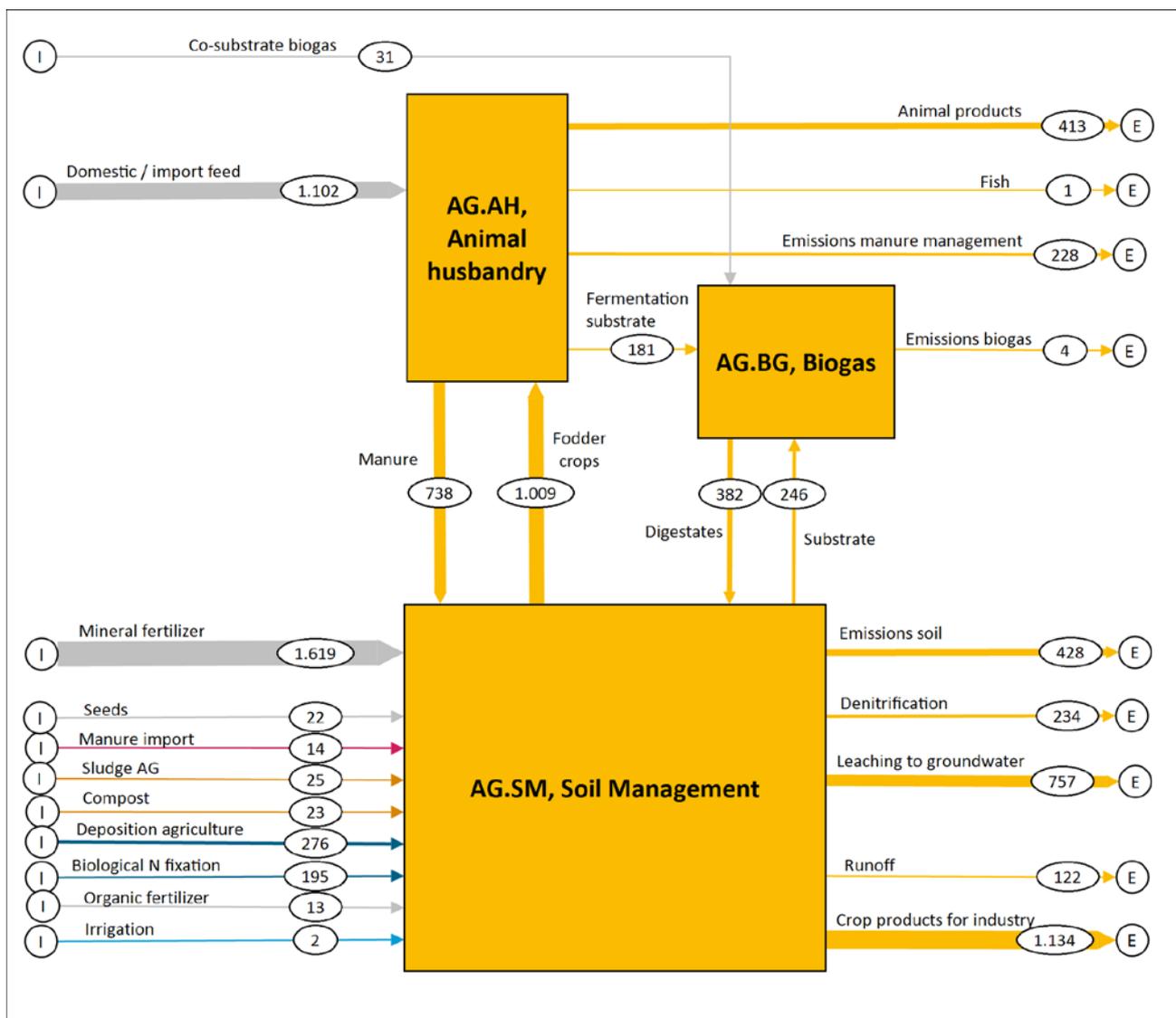
Pool „Industrielle Produktion“ (MP, Materials and Products) mit den Sub-Pools „Nahrungs- und Futtermittelindustrie“ (MP.FP, Food processing), „Stickstoff-Chemie“ (MP.NC, Nitrogen chemistry) und „Sonstige industrielle Produktion“ (MP.OP, Other producing industry) sowie den eingehenden und ausgehenden 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 Abb. 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 2 bis 11.

Abbildung 12-5: Pool „Ernährung und Konsum“ (HS, Humans and Settlements) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende N-Flüssen (in kt N a⁻¹, Mittel 2010 – 2014).



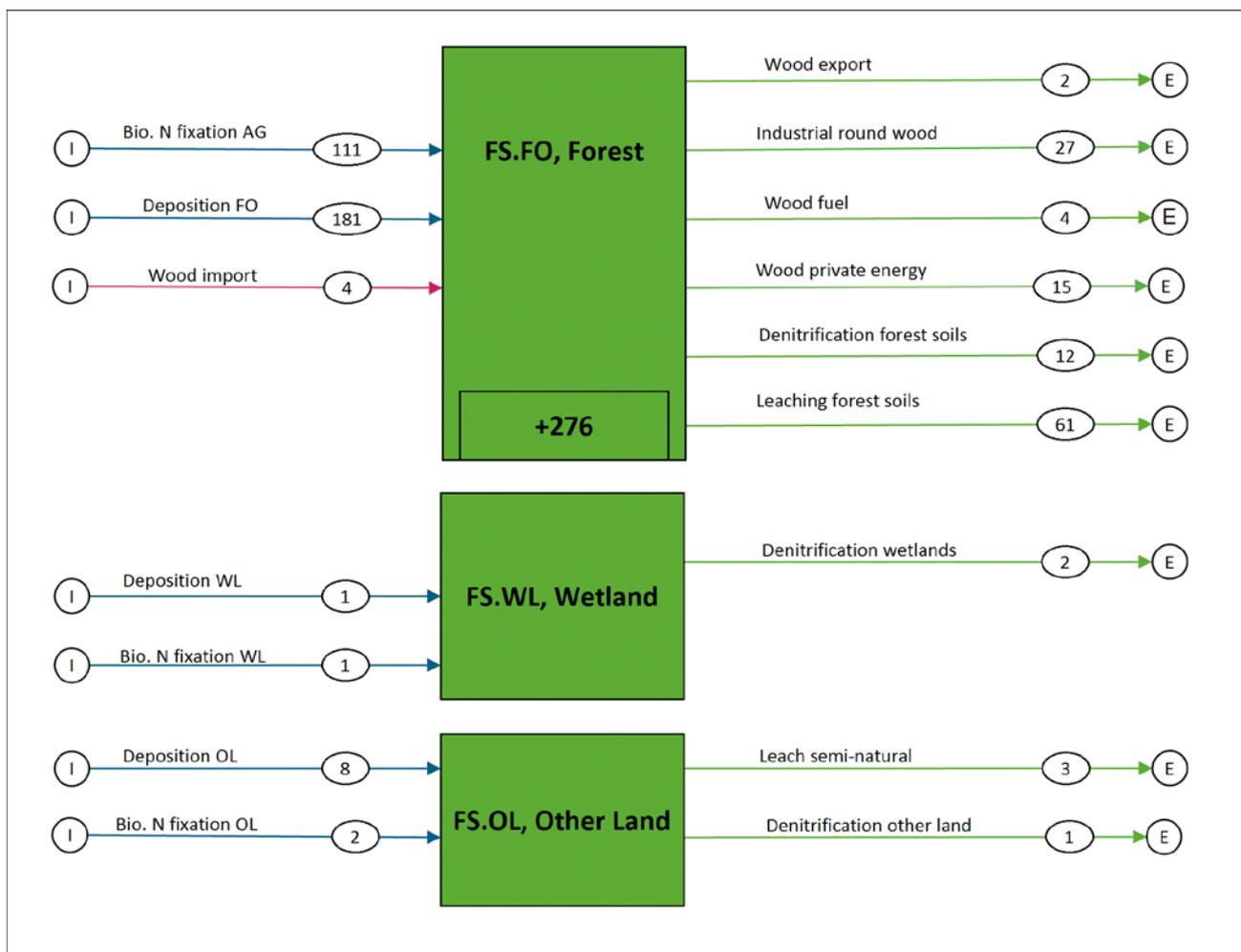
Pool „Ernährung und Konsum“ (HS, Humans and Settlements) mit den Sub-Pools „Menschliche Ernährung“ (HS.HB, Human Body) und „Konsumgüter“ (HS.MW, Material World) sowie den eingehenden und ausgehenden N-Flüssen gemäß Kap. 6. Werte in kt N a⁻¹ pro Fluss, auf ganze Zahlen gerundet; die Breite der Pfeile ist proportional zur Flussgröße. Die Farbe der Flüsse entspricht jeweils der Farbe des Ausgangspools, siehe Abb. 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 2 bis 11.

Abbildung 12-6: Pool „Landwirtschaft“ (AG, Agriculture) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende N-Flüsse (in kt N a⁻¹, Mittel 2010 – 2014).



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 Abb. 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 2 bis 11.

Abbildung 12-7: Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“ (FS, Forest and Semi-natural Vegetation) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende, quantitativ relevante N-Flüsse (in kt N a⁻¹, Mittel 2010 – 2014).



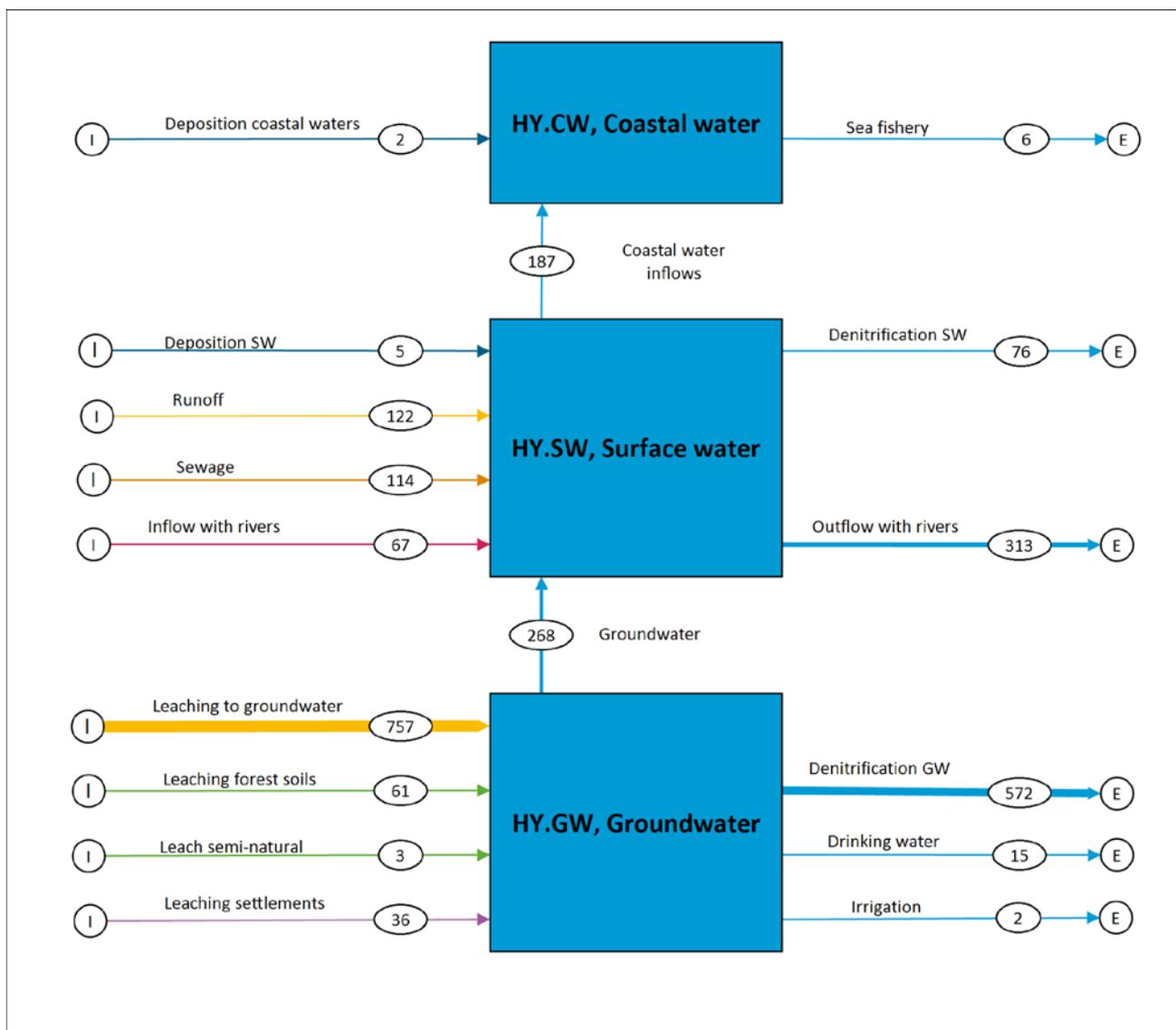
Pool „Wald und semi-natürliche Flächen“ (FS, Forest and Semi-natural Vegetation) mit den Sub-Pools „Wald“ (FS, Forest), „Feuchtgebiete“ (FS.WL, Wetland) und „Semi-natürliche Flächen“ (FS.OL, Other Land) sowie den eingehenden und ausgehenden, quantitativ relevanten N-Flüssen gemäß Kap. 8. Werte in kt 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 Abb. 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 2 bis 11.

Abbildung 12-8: Pool „Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung“ (WS, Waste) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende N-Flüsse (in kt N a⁻¹, Mittel 2010 – 2014).



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 Abb. 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 2 bis 11.

Abbildung 12-9: Pool „Gewässer“ (HY, Hydrosphere) und dessen Sub-Pools sowie eingehende und ausgehende N-Flüsse (in kt N a⁻¹, Mittel 2010 – 2014).



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 Abb. 12-1. Datenquellen: siehe vorliegender Bericht, Kap. 2 bis 11. Für den Abfluss von 187 kt N a⁻¹ in die Küstenmeere (Nordsee und Ostsee) wird der Sub-Pool „Küstengewässer“ als interne Senke behandelt.

13 Übersicht und Bilanzierung der N-Flüsse Deutschland

Mit Hilfe einer Bilanzierung der nationalen N-Flüsse sollen unter anderem die Fragen 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 Tab. 13-1 sind die Erzeugung und der Verbleib von N_r in Deutschland zusammengestellt.

Tabelle 13-1: Erzeugung (Neubildung bzw. Förderung aus Lagerstätten) und Entsorgung (Reduktion zu N_2 , grenzüberschreitender Transport, Deponierung) von reaktivem Stickstoff in Deutschland, Mittel 2010 – 2014.

Prozess	N-Spezies	N-Fluss ^a kt N a ⁻¹
NH ₃ -Synthese (Haber-Bosch-Verfahren) ^b	NH ₃	2695
Inlandsförderung und (Netto-)Import von fossilen Energieträgern - darunter: Rohöl	N(org)	2335 930
N-Fixierung in Böden (Landwirtschaft, Wald, semi-natürliche Flächen)	N(org)	308
Bildung von thermischem NO _x ^c	NO _x	192
Netto-Import Ernährung und Industrie ^d	alle N _r	745
Summe Quellen		6275
Verbrennung fossiler und regenerativer Energieträger und Entstickung (Oxidation/Reduktion des N _r in Brennstoffen zu N ₂) ^e	N ₂	- 1893 ^e
N _r -Schwund in der Rohölverarbeitung ^f	N ₂	- 818 ^f
Denitrifikation insgesamt, davon in	N ₂	- 1107
- Böden (Landwirtschaft, Wald, semi-natürliche Flächen)		- 248
- Gewässern (Grundwasser ^g , Oberflächengewässer ^h)		- 648
- Abfallwirtschaft (Kläranlagen)		- 211
Deponierung von Abfällen	N(org)	- 86
Netto-Export über die Atmosphäre	NH ₃ , N ₂ O, NO _x	- 311
Netto-Export mit dem Gewässerabfluss ⁱ	NO ₃ , N(org)	- 433
Summe Senken		- 4648
Differenz zwischen Quellen- und Senken-Flüssen		1627^j

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

^b Einschließlich Synthese von Calciumcyanamid.

^c Geschätzt ca. 50 % des gesamten NO_x, s. Kap. 4.1.2 (Tab. 4-4).

^d Ohne Energiewirtschaft, s. Tab. 11-2.

^e Verbrennung von fossilen Energieträgern und Rauchgas-Entstickung (Kap. 4.1.5) sowie Verbrennung von regenerativen Energieträgern Abfall (Tab. 9-3), Klärschlamm (Tab. 9-3), Tiermehl (Tab. 5-5) und Holz (Privathaushalte, Tab. 8-4)

^f Erläuterung zum Begriff „Schwund“ s. Kap. 4.1.1.

^g Umfasst Denitrifikation von 572 kt N a⁻¹ in der ungesättigten Zone (unterhalb der Wurzelzone) und im Grundwasser.

^h Retention in Oberflächengewässer von 75,9 kt N a⁻¹ wird vollständig der Denitrifikation zugeschrieben.

ⁱ Abweichend von Kap. 10.3 bzw. Tab. 11-2 wird hier Gewässerabfluss in die Küstenmeere bereits als Export behandelt.

^j Zum Unterschied zur „Gesamtemission reaktiven Stickstoffs aus anthropogenen Quellen“ von 1547 kt N a⁻¹ in Tab. 13-3 s. Text.

An der Gesamtmenge von jährlich 6275 kt neu geschaffenen bzw. in Umlauf gebrachtem N_r hat die Ammoniak-Synthese mit rund 43 % 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 bei hohen Temperaturen wird thermisches NO_x gebildet (N_2 aus der Luft wird zu NO_x oxidiert), was eine Quelle von $192 \text{ kt } N_r \text{ a}^{-1}$ darstellt. Mit $308 \text{ kt } N_r \text{ a}^{-1}$ liefert die Stickstoff-Fixierung in Böden als einziger natürlicher Prozess nur rund 5 % 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 $1893 \text{ kt } N_r \text{ a}^{-1}$ und mit der Verarbeitung von Rohöl weitere $818 \text{ kt } N_r \text{ a}^{-1}$ in N_2 überführt. Die Denitrifikation in Gewässern, Böden und Kläranlagen von zusammen $1107 \text{ kt } N \text{ a}^{-1}$ trägt als natürlicher Prozess mit rund 24 % zur Umwandlung von N_r in molekularen N_2 bei. Mit chemischen Produkten und mit Erzeugnissen der Nahrungs- und Futtermittelindustrie werden zusammen $744 \text{ kt } N \text{ a}^{-1}$ (netto) importiert, während über die Gewässer und die Atmosphäre (netto) $557 \text{ kt } N \text{ a}^{-1}$ an Nachbarstaaten abgegeben werden, so dass der Import-Export-Saldo $188 \text{ kt } N \text{ a}^{-1}$ beträgt.

Zwischen der Erzeugung (einschließlich Förderung und Netto-Import) von jährlich 6275 kt reaktivem Stickstoff und dem Abbau von 4648 kt N tritt eine Differenz von 1627 kt N auf. Für diese beträchtliche Differenz von 26 % (bezogen auf die N_r -Erzeugung) kommen im Wesentlichen zwei Erklärungsansätze in Betracht.

- ▶ Die Differenz entspricht dem Überschuss der Nationalen N-Bilanz 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 gebunden als auch wieder denitrifiziert wird.

Zu der Differenz können schließlich 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-Flussschema als Ganzes (als Aggregat der Pools) annähernd übereinstimmen. Tab. 13-2 zeigt allerdings, dass dieses Postulat für die meisten Pools bzw. Sub-Pools nicht zutrifft. In den beiden Fällen, in denen keine Differenz ausgewiesen wird (Sub-Pool „Stickstoff-Chemie“ und Pool „Landwirtschaft“), wurden die Zuflüsse und die Abflüsse mit der Vorgabe berechnet, dass die Summen übereinstimmen müssen.

Tabelle 13-2: Gegenüberstellung der Summen der eingehenden und ausgehenden der N-Flüsse in den Pools bzw. Sub-Pools, Mittel 2010 – 2014.

Pool bzw. Sub-Pool (Umsatzraum)	Zufluss kt N a ⁻¹	Abfluss kt N a ⁻¹	Differenz ^b kt N a ⁻¹
Pool Atmosphäre	1271	- 1062	209
Pool Energiewirtschaft	2662	- 2632	30
Sub-Pool Nahrungs- und Futtermittelindustrie	2568	- 2684	- 116
Sub-Pool Stickstoff-Chemie	4989	- 4989	0
Sub-Pool Sonstige Industrielle Produktion	2078	- 558	1520
Sub-Pool Menschliche Ernährung und Heimtiere	683	- 479	204
Sub-Pool Konsum (einsch. Siedlungsflächen)	302	- 112	190
Pool Landwirtschaft	3320	- 3320	0
Pool Wald und semi-natürliche Flächen	308 ^a	- 126 ^a	181
Sub-Pool Abfallwirtschaft	345	- 732	- 386
Sub-Pool Abwasserentsorgung	514	- 479	36
Pool Gewässer	1167	- 985	183
Import-Export	3776	- 3588	188
Summen Zufluss, Abfluss und Differenz	23983	- 21746	2237

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

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

Der Aufbau oder Abbau von Lagerbeständen in der Landwirtschaft, der Ernährungswirtschaft, der Energiewirtschaft und der Güterproduktion ist bei Betrachtung einer Fünfjahresperiode 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 berichtet (Kap. 8.1.6), der in der N-Bilanzierung als Zufuhrgröße (Mobilisierung von N_r) zu berücksichtigen wäre; die Differenz würde dadurch aber noch zunehmen. Die Festlegung von 17 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 ersten, 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 die Bilanzierung der N-Flüsse eingeführt. Die größte Unsicherheit im Hinblick auf N-Vorratsänderungen betrifft das System Wurzelzone-Ungesättigte Zone-Grundwasser als Umsatzraum von Nitrat: weder ist die NO₃-Menge in diesen Kompartimenten in Deutschland insgesamt bekannt, noch kann deren Änderung (infolge Wasseraustausch und/oder Denitrifikation) plausibel abgeschätzt werden.

In Anbetracht dieser Unsicherheiten in der Bilanzierung der nationalen N-Flüsse sind die Ergebnisse mit einer gewissen Vorsicht 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 1600 kt N a⁻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 der hier durchgeführten Bilanzierung der N-Flüsse nicht beantwortet

werden. Es dürfte jedoch unstrittig sein, dass dringend wirksame Maßnahmen ergriffen werden müssen, mit denen die Emission reaktiven Stickstoffs 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 Oberflächengewässer nach N-Spezies und Emittentengruppen zusammengefasst und in Abbildung 13-1 dargestellt. Die Summe von 1547 kt N a^{-1} unterscheidet sich von der Angabe 1627 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 es gehen die Unsicherheiten in beiden Größen in die Differenz mit ein, während in Tabelle 13-3 nur die anthropogenen Emissionen dargestellt sind. Weiterhin wird in Tabelle 13-1 der Netto-Export in Oberflächengewässern saldiert, während in Tabelle 13-3 der NO_3 -Eintrag in das Grundwasser als Emission betrachtet wird.

Die Werte der Tabelle 13-3 zeigen, dass die Landwirtschaft mit rund zwei Dritteln der gesamten N_r -Freisetzung in Deutschland unverändert die mit Abstand bedeutendste N_r -Emissionsquelle darstellt, sowohl in die Atmosphäre als auch in die Hydrosphäre. Aufgrund der stärkeren Verminderung der N_r -Emissionen in den übrigen Sektoren in der letzten Dekade ist der Anteil der Landwirtschaft gegenüber früheren Berechnungen (Zeitraum 2008 - 2010, s. Tabelle 2 in UBA 2015) sogar noch gestiegen. Dies unterstreicht die hohe Dringlichkeit, gerade in diesem Bereich mit Minderungsmaßnahmen anzusetzen.

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 Oberflächengewässer, Mittel 2010 – 2014.

Emittentengruppe	Pool/ Sub-Pool	Luft			Oberflächen- gewässer ^c	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	36,0	558,0	65,4	Runoff 113,7 GW ^d 268,2	1041,3	67 %
Verkehr	EF.TR	159,6	11,5	3,0	0,0	174,1	11 %
Industrie / Energiewirtschaft ^e	EF abzgl. EF.TR; MP	184,2	16,6	11,7	29,9	242,4	16 %
Haushalt / Kläranlagen / urbane Flächen ^f	HS WS	0,1	2,9	2,1	84,4	89,5	6 %
Summe		379,9	589,0	82,2	496,2	1547,3	
Anteil		25 %	38 %	5 %	32 %		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. a. Text).

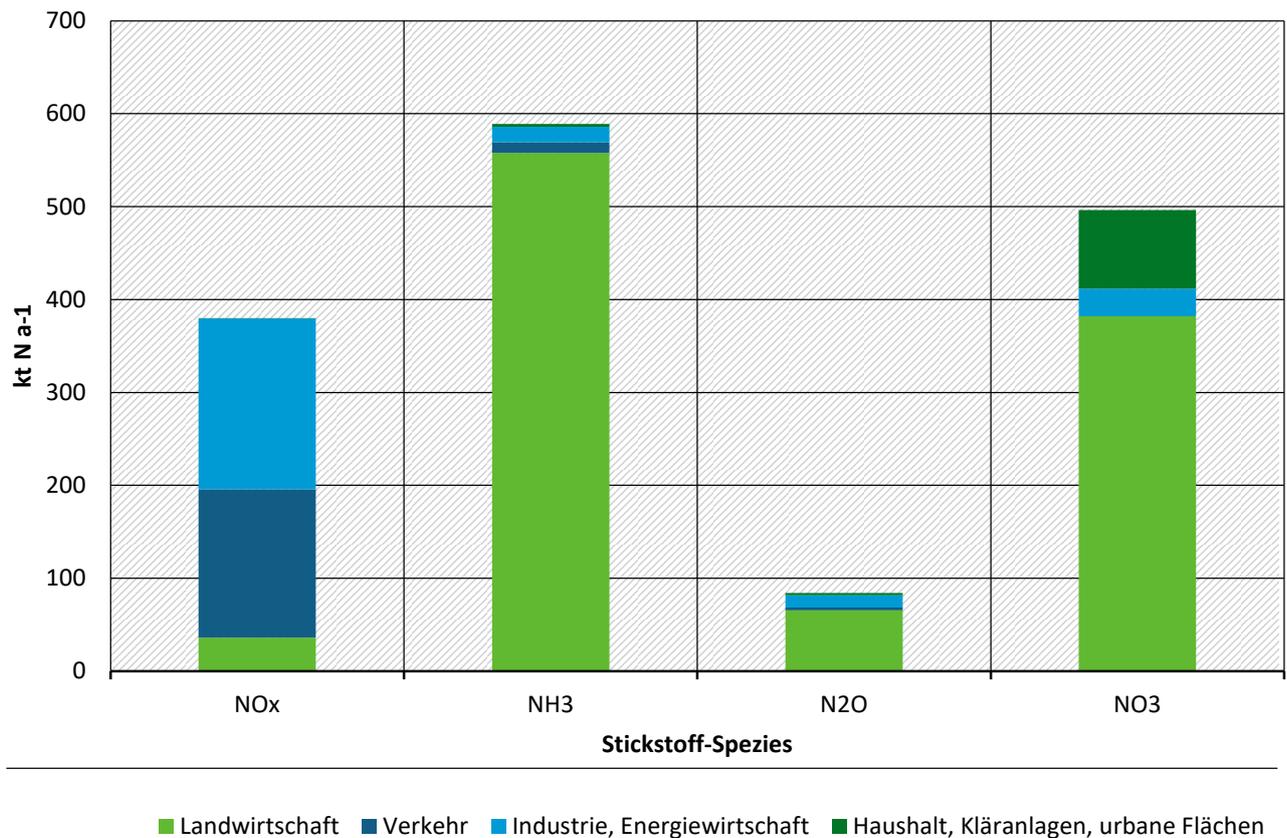
^c Eintrag in Oberflächengewässer aus Industrie/Energiewirtschaft und Haushalt/Kläranlagen/urbane Flächen ermittelt wie folgt: $114,3 \text{ kt N a}^{-1}$ Eintrag aus Kläranlagen/Siedlungswasserwirtschaft insgesamt aufgeteilt im Verhältnis der Einträge ($514,4 \text{ kt N a}^{-1}$) in Kläranlagen: $350 + 30 \text{ kt N a}^{-1}$ aus HS (73,9 %) und $134,6 \text{ kt N a}^{-1}$ aus EF + MP (26,1 %). Eintrag aus Landwirtschaft: nur NO_3 , ohne N(org).

^d Grundwasser; vereinfachend wird hier die gesamte NO_3 -Fracht mit dem Grundwasser dem Eintrag aus der Landwirtschaft zugerechnet.

^e Einschließlich gasförmiger Emissionen aus Müllverbrennung und Kläranlagen.

^f Gasförmige Emissionen aus Feuerungsanlagen in Haushalten sind im Pool EF enthalten.

Abbildung 13-1: Anteile nach Stickstoff-Spezies und nach Emittentengruppen an der Gesamtemission reaktiven Stickstoffs aus anthropogenen Quellen in Luft (NO_x , NH_3 , N_2O) und Oberflächengewässer (NO_3), Mittel 2010 - 2014.



Neben der Ermittlung der N-Flüsse in Deutschland war es Aufgabe des DESTINO-Projekts, einen integrierten Stickstoffindikator für Deutschland zu entwickeln, der die aktuelle Belastungssituation sektor- und medienübergreifend charakterisiert (s. DESTINO-Bericht 1, UBA 2020). Anhand eines nationalen Stickstoff-Zielwerts, der die Belastungsgrenze aufzeigt, beziffert der integrierte Stickstoffindikator weiterhin die notwendige Reduktion der N_r -Emission. Die N_r -Emissionsmengen für den Stickstoffindikator wurden zum Teil nach anderen methodischen Ansätzen ermittelt und umfassen andere Zeitfenster als die hier zugrunde gelegte Periode 2010 - 2014. Die N-Mengen in Tabelle 13-3 sind daher nicht eins-zu-eins vergleichbar mit den Angaben der Tabelle 10 im Bericht 1 (UBA 2020). Beide Ansätze, integrierter Stickstoffindikator und Bilanzierung der N-Flüsse, fokussieren die N_r -Problematik aus zwei unterschiedlichen Perspektiven und verdeutlichen, dass dieses Thema, neben dem Klimawandel, eines der drängendsten Umweltprobleme darstellt.

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? So lauten die zentralen Fragen der nationalen Bilanzierung der reaktiven Stickstoffflüsse für alle Sektoren. Als wesentliches, gut belegtes Ergebnis der N-Bilanzierung ist festzuhalten, dass in Deutschland über die Ammoniak-Synthese derzeit ca. 8- bis 10-mal mehr N_r anthropogen in den Stickstoff-Kreislauf eingebracht wird als mit dem (einzigem) 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. Zur Verdeutlichung der Größenordnung kann ein weiterer Vergleich dienen: allein mit der Ammoniak-Synthese (2690 kt N a^{-1}) wird in Deutschland jedes Jahr mehr reaktiver Stickstoff erzeugt als im Holzbestand der Wälder insgesamt gespeichert ist (rd. 2260 kt N).

Aus der Gegenüberstellung der Quellen und Senken von reaktivem Stickstoff in Deutschland (Tabelle 13-1) ergibt sich eine jährliche Netto-Freisetzung von reaktivem Stickstoff in Deutschland in einer Größenordnung von etwa 1600 kt N a^{-1} ; eine exakte Angabe ist allerdings nicht möglich. Ursache ist dafür 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 Fragen sind weiterführende Untersuchungen erforderlich, wenn eine nationale N-Bilanz schlüssigere Ergebnisse liefern soll. Die lückenlose Erfassung aller N-Flüsse erweist sich als sehr aufwändig und ist für eine Reihe von N-Flüssen nur mit großen Unsicherheiten möglich. Im Hinblick auf die Kernfrage, die Netto-Emissionsmenge reaktiven Stickstoffs abzuschätzen, erscheint es zielführender, eine N-Bilanzierung zukünftig auf die entscheidenden Komponenten des N_r -Umsatzes zu fokussieren:

(i) die Erzeugung von reaktivem Stickstoff durch technische Verfahren sowie durch die Stickstoffbindung in Böden; (ii) den Abbau von reaktiven N-Verbindungen zu N_2 über die Denitrifikation in natürlichen und technischen Systemen sowie mit der Verbrennung von Energieträgern; (iii) die „Entlastung“ der nationalen N-Bilanz durch den (Netto-)Export von N_r ; und (iv) soweit relevant, die Veränderung der kurzfristig verfügbaren N_r -Menge infolge 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 und Grundwasser), in Oberflächengewässern sowie in der Abfall- und Abwasserentsorgung nur relativ wenige Untersuchungen vorliegen. 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, 2017c). Die Bedeutung der Denitrifikation wird noch zusätzlich unterstrichen, wenn der Abbau der N-Bodenvorräte in landwirtschaftlich genutzten Böden von geschätzt 500 kt N a^{-1} mitberücksichtigt würde. Aufgrund der großen Unsicherheit wird dieser Wert jedoch nicht als N-Fluss in die Bilanzierung einbezogen.

Die vom ECE (2013) vorgeschlagene Struktur der Pools bzw. Sub-Pool eines National Nitrogen Budget, die aus der Einteilung der UNFCCC zur Treibhausgas-Berichterstattung übernommen wurde, erscheint mit den hier vorliegenden Erfahrungen für eine Erfassung der nationalen N-Flüsse nur eingeschränkt brauchbar. Die Zuordnung der N-Flüsse zu Pools erfolgt nach ECE (2013) vorrangig nach den Wirtschaftssektoren, in denen Aktivitäten stattfinden und damit den Eingang bzw. Ausgang von Materialflüssen auslösen. Die Autorinnen und Autoren halten es jedoch für sinnvoller, die Bilanzierung anhand der Materialflüsse und/oder der prägenden N-Umsatzprozesse zu gliedern. Einige Beispiele sollen dies

verdeutlichen: (i) Alle Stoffflüsse, mit denen N in Energieträgern (fossile Brennstoffe, Treibstoffe, Holz, Klärschlamm, Abfall, Tiermehl) verbrannt wird, sollten in einem (Prozess-bezogenen) Pool „Energieträger“ zusammengefasst werden (anstatt die Verbrennung von Stoffen getrennt in den Sub-Pools von Energiewirtschaft, Konsum, Abfallwirtschaft usw. zu behandeln). (ii) Die Stoffflüsse zwischen den Pools bzw. Sub-Pools „Landwirtschaft“, „Nahrungs- und Futtermittelindustrie“ und „menschliche Ernährung und Heimtiere“ sind sehr eng miteinander verzahnt; wesentlich enger als mit den übrigen Sub-Pools in den beiden Pools „Industrielle Produktion“ bzw. „Ernährung und Konsum“. Diese N-Flüsse können in einem einzigen Pool „Landwirtschaft und Ernährung“ zusammengefasst werden. (iii) In ähnlicher Weise sollten die Materialflüsse im Bereich der Konsumgüterproduktion von der initialen Ammoniak-Synthese bis zum Endabsatz an die Verbraucher in einem Pool „Güterproduktion und -verbrauch“ gemeinsam behandelt werden.

Noch einen Schritt weiter vereinfacht könnte die Erfassung der N-Flüsse in nur zwei Bereiche unterteilt werden: auf der einen Seite die Biosphäre (mit Atmosphäre, Hydrosphäre, Agrosphäre, Humanernährung), in der die N-Flüsse überwiegend mit Biomasse bzw. deren anorganischen N-Abbauprodukten stattfinden. Von diesem Bereich gehen nahezu alle umweltrelevanten N-Emissionen aus, welche die Schutzgüter terrestrische Ökosysteme (NH_3 -Konzentration Luft, N-Deposition Boden), Grundwasser (NO_3 -Konzentration), Oberflächengewässer (N_{ges} -Fracht), Klima (N_2O -Emission) und menschliche Gesundheit (N_2O -Konzentration) beeinträchtigen. Den zweiten Bereich bildet die Technosphäre, deren N-Flüsse im Wesentlichen mit technischen Gütern erfolgen. Eine einigermaßen zutreffende Abbildung der internen Umsetzungen bzw. der N-Flüsse mit der Güterproduktion ist derzeit nicht möglich und erscheint auch nicht zwingend erforderlich. Für die eingangs erwähnte Fragestellung erscheint es ausreichend, die Übertritte von reaktivem Stickstoff von der Technosphäre in die Biosphäre zu erfassen, die im Wesentlichen mit der N-Mineraldüngung, mit Einleitungen aus der Abwasserentsorgung, der stofflichen Verwertung von Klärschlamm sowie der atmosphärischen Deposition erfolgen.

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 (NO_3 , NH_3/NH_4 , N_2O , NO , NO_2) 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 Ansatz zur integrierten Erfassung und Bewertung der Emission reaktiver N-Verbindungen auf der nationalen Ebene wurde mit dem DESTINO-Gesamtindikator Stickstoff für Deutschland entwickelt (s. DESTINO Bericht 1; UBA 2020).

Im Zusammenhang mit der genannten Fragestellung kann ein N-Flussschema 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, das nationale N-Flussschema 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.

Eine nationale N-Bilanzierung wurde nach Kenntnisstand der Autoren bislang nur für wenige Staaten durchgeführt: Deutschland (UBA 2009a, 2009b, 2015), die Schweiz (Heldstab et al. 2010), Dänemark (Hutchings et al. 2014), Großbritannien (Worrall et al. 2016), die Niederlande (Kroeze et al. 2003), die

EU als Ganzes (Leip et al. 2011), die USA (Doering et al. 2011) und China (Gu et al. 2016). Auf eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung mit früheren Bilanzierungen der N-Flüsse in Deutschland (UBA 2009a, 2009b, 2015) bzw. den übrigen aufgeführten Ländern wird verzichtet, da diese Veröffentlichungen methodisch und in der Detailtiefe sowohl untereinander als auch mit der vorliegenden Untersuchung nur eingeschränkt vergleichbar sind. Im internationalen Rahmen kann eine nationale N-Bilanz auf längere Sicht möglicherweise ein Instrument darstellen, um den Beitrag einzelner Länder zur globalen Stickstoffproblematik zu bewerten und gegebenenfalls die Wirkung von Minderungsmaßnahmen zu überprüfen. Dies setzt jedoch 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 absehbarer Zeit belastbare Schätzwerte zum Umfang der Denitrifikation bereitstehen werden. Unter diesen Umständen werden nationale N-Bilanzierungen mutmaßlich auf absehbare Zeit keine geschlossene Massenbilanz darstellen können, sondern – so wie ursprünglich auch die N-Bilanzierung für die Landwirtschaft entwickelt und in die Diskussion eingeführt worden ist – der Saldo zwischen den valide schätzbaren Zuflüssen und Abflüssen quantifiziert den Stickstoff-Überschuss, der zum einen Teil wieder denitrifiziert wird, zum anderen Teil aber die Menge an reaktivem Stickstoff in der Umwelt vermehrt.

15 Danksagung

Die Autorinnen und Autoren möchten zahlreichen Personen und Institutionen ihren herzlichen Dank aussprechen, die mit der Bereitstellung von Daten, mit Informationen und Hinweisen zu dieser Veröffentlichung beigetragen haben. Namentlich ist zu danken (in alphabetischer Reihenfolge der Einrichtungen):

Dr. Talhammer, AlzChem Group AG

Uwe Maaßen, Deutscher Braunkohlen-Industrie-Verein e.V. (DEBRIV)

Jonatan Prosenjak, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)

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

Sebastian Seiwert, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA)

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

Dr. Nelli Elizarov, Dietrich Klein, Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e.V. (BDBE)

Peter Radewahn, Deutscher Verband Tiernahrung (DVT)

Dr. Arno Becker, Dietmar Kemnitz, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)

Dr. Alexander Vogel, Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter der Länder (FDZ), Standort Kiel/Hamburg

Dr. Christoph Steinbach, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA)

Dr. Sven Hartmann, Industrieverband Agrar (IVA)

Thomas Gauger, Institute of Navigation (INS), Universität Stuttgart

Dr. Andreas Prüß, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)

MWV-Team, Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV)

Harald Niemann, Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte (STN)

Dr. Hartmut Höh, Mandy Schmidt, Christiane Stute, Britta Thorenz, Statisches Bundesamt

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

Dr. Axel Don, Dr. Reinhard Well, Thünen-Institut

Rolf Beckers, Wolfgang Butz, Markus Geupel, Markus Gleis, Patric Heidecke, Kristina Juhrich, Volker Mohaupt, Harald Niemann, Sue-Martina Starke, Umweltbundesamt (UBA)

Angelika Becker, Verband der Chemischen Industrie (VCI)

Sarah Röhlen, Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e. V. (VHE)

Dr. Andreas Wecker, VGB Power Tech e.V.

Michael Beeck, Yara Deutschland.

Weiterhin danken wir den BSc- bzw. MSc-Studierenden Dennis Bredlau, Romina Gehler, Lucas Mettler und Sonja Steegmüller (Universität Gießen) für ihre Beiträge.

16 Quellenverzeichnis

- AGEB (2015): Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), Berlin, 20 S.
- AGEB (2017): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2016. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), Berlin, 24 S.
- Agriculture and Agri-Food Canada (2018): Sector Trend Analysis. Pet Food Trends in Germany. (www.agr.gc.ca/resources/prod/Internet-Internet/MISB-DGSIM/ATS-SEA/PDF/6906-eng.pdf, aufgerufen 03.02.2018).
- Andreae H, Eickenscheidt N, Evers J, Grüneberg E et al. (2016): Stickstoffstatus und dessen zeitliche Veränderungen in Waldböden. In: Wellbrock N, Bolte A, Flessa H (Eds): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Thünen-Report 43, 135-180
- Arnold S (2015): Bereitstellung harmonisierter Landnutzungs- und Landbedeckungsstatistiken. Statistisches Bundesamt, Wirtschaft und Statistik 2015/2, 67-79.
- Awb (2018): Abfallwirtschaftsbetrieb Böblingen. Die Kreismülldeponie Sindelfingen von 1959 – 2016. (www.lrab.de/site/LRA-BB-Desktop/get/params_E-1188838226/13467764/Brosch%C3%BCre%20f%C3%BCr%20web%20-%203459.pdf, aufgerufen 28.06.2018).
- Bach M, Godlinski F, Greef JM (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 (2016): Berechnung von Stickstoff-Flächenbilanzen für die Landwirtschaft in Deutschland mit Regional-gliederung Kreise und kreisfreie Städte. Jahre 2003 bis 2014. Wettenberg, 2016.
- 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.
- 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)
- BMEL (2015): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2015. Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.
- BMEL (2016): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2016. Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.
- BMEL (2018): Flächenbilanz, Stallbilanz und Nährstoffbilanz insgesamt der Landwirtschaft in Deutschland 1992-2016. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (online: www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/statistischer-monatsbericht-des-bmel-kapitel-a-landwirtschaft).
- BMUB (2017): Stickstoffeintrag in die Biosphäre. Erster Stickstoff-Bericht der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Bau, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 31 S.
- Boring LR, Swank WT, Waide JB, Henderson GS (1988): Sources, fates, and impacts of nitrogen inputs to terrestrial ecosystems: review and synthesis. *Biogeochemistry* 6(2), 119–159.
- 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, 277-283.
- Builtjes PJH, Hendriks E, Koenen M, Schaap M, Banzhaf S, Kerschbaumer A, Gauger T, Nagel HD, Scheuschner T, Schlutow A (2011): Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland (in German). MAPESI-Project: Modeling of Air Pollutants and Ecosystem Impact. Umweltbundesamt (UBA), Dessau, UBA-Texte 38/2011.
- BMU (2002): BMU-/LAGA Hinweise und Erläuterungen zu Anhang 51 Abwasserverordnung: Oberirdische Ablagerung von Abfällen (www.umwelt-online.de/regelwerk/wasser/abw_vo/an51e.htm, aufgerufen 28.06.2018).
- BfG (2013): Frachtberechnungsmodul Prioritäre Stoffe. Unter Mitarbeit von Holger Haase. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Bundesgütegemeinschaft Kompost (2017): Auswertung der gütegesicherten Kompostanalysen 2017. (www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Zahlen/Kompost_D_2017.pdf, aufgerufen 5.4.2018)
- 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? *J Plant Nutrition Soil Science* 170, 189–196.

- Cleveland CC, Townsend AR, Schimel DS, Fisher H, Howarth RW, Hedin LO, Perakis SS et al. (1999): Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N₂) fixation in natural ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 623-645.
- Copernicus (2015): GIO Land Monitoring 2011–2013 in the framework of regulation (EU) No 911/2010. Pan-EU Component. Grant Agreement 3541/B2012/R0-GIO/EEA.55080. Final Report Germany (unpublished).
- DESTATIS (versch. J.): Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung Deutschland. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2008): Klassifikation der Wirtschaftszweige. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 828 S.
- DESTATIS (2011): Bodenbearbeitung, Bewässerung, Landschaftselemente. Erhebung über landwirtschaftliche Produktionsmethoden (ELPM). Fachserie 3, Heft 5. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2012a): Abfallentsorgung 2010. Fachserie 19 Reihe 1. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2012b): Abfallaufkommen nach Wirtschaftszeigen gemäß EU-Abfallstatistikverordnung 2010. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2013): Abfallentsorgung 2011. Fachserie 19 Reihe 1. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2014a): Abfallentsorgung 2012. Fachserie 19 Reihe 1. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2014b): Abfallaufkommen nach Wirtschaftszeigen gemäß EU-Abfallstatistikverordnung 2012. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- DESTATIS (2015a): Außenhandel. Zusammenfassende Übersichten für den Außenhandel (Endgültige Ergebnisse). Jahr 2014. Fachserie 7, Reihe 1, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2015b): Abfallentsorgung 2013. Fachserie 19 Reihe 1. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2015c): Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung. Öffentliche Abwasserbehandlung und -entsorgung 2013. Fachserie 19 Reihe 2.1.1. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2016): Abfallentsorgung 2014. Fachserie 19 Reihe 1. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2017a): Produzierendes Gewerbe 2016. Fachserie 4, Reihe 3.1. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2017b): Abwasserbehandlung – Klärschlamm. Ergebnisbericht 2013/2014. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2017c): Abfallbilanz. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2018): Abfallentsorgung 2016. Fachserie 19, Reihe 1. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden,
- Dise NB, Rothwell JJ, Gauci V, van der Salm C, de Vries W (2009): Predicting dissolved inorganic nitrogen leaching in European forests using two independent databases. *Science of the Total Environment*, 1789-1808.
- Doering OC III et al. (2011): Reactive Nitrogen in the United States: An Analysis of Inputs, Flows, Consequences, and Management Options: A Report of the EPA Science Advisory Board. EPA-SAB-11-013, 140 p.
- Don A (2019). Anmerkungen zur Interpretation der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft. Thünen-Institut, Braunschweig (email v. 07.01.2019).
- DWA (2011): Die Stickstoffbilanz im kommunalen Abwasser, Leitfaden Nr. 2-14: Betrieb von Abwasseranlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Landesverband Bayern, München.
- DWA (2017): 29. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen, DWA-Arbeitsgruppe BIZ-1.1. Kläranlagen-Nachbarschaften. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef.
- EEA (2013) EMEP/EEA Air Pollutant Inventory Guidebook 2013. Technical guidance to prepare national emission inventories. European Environment Agency (EEA). Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- ECE (2013): Guidance document on national nitrogen budgets. Economic Commission for Europe (ECE), Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, ECE_EB.AIR_119, 12 p. (www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2013/air/eb/ECE_EB.AIR_119_ENG.pdf, aufgerufen 08.11.2017)
- 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. (www.clrtap-tfrn.org/sites/clrtap-tfrn.org/files/documents/EPNB_new/EPNB_annex_20160921_public.pdf, aufgerufen 08.11.2017).
- 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 (2014): Versiegelungsgrade in der Auflösung 100 m x 100 m und 20 m x 20 m für die Jahre 2006 und 2009, 2014. European Environment Agency (EEA).

- EMEP (2016): Datensatz: Nasse und trockene atmosphärische Deposition von oxidiertem und reduziertem Stickstoff für den Zeitraum 2012-2014. EMEP Meteorological Synthesizing Centre - West (EMEP/MSC-West). (webdab.emep.int/Unified_Model_Results/, aufgerufen 15.01.2016)
- EMEP (2017): Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components. Status Report 1/2017. Joint MSC-W & CCC & CEIP Report (emep.int/publ/reports/2017/EMEP_Status_Report_1_2017.pdf, aufgerufen 10.03.2018)
- Eurostat (o.J.): In der PRODCOM-Liste 2017 enthaltene Codes der Kombinierten Nomenklatur 2017 mit Angabe der entsprechenden PRODCOM-Codes (circabc.europa.eu/webdav/CircaBC/ESTAT/prodcom/Library/the_list/2017%20List/CN_PRC_DE_2017.pdf, aufgerufen 8.6.2018).
- FDZ (2013): Statistik der öffentlichen Abwasserbehandlung. Merkmalsträger „Abwasserbehandlungsanlage“. Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder (FDZ), Bezugsjahr 2010. (dok.fdz-metadata.de/3/32/322/322130/erheb/200700/Merkmale_Abwasserbehandlungsanlage_2007.pdf, aufgerufen 03.09.2014).
- Fichtner W, Karl U, Hartel, R, Balussou D (2011): Fortschreibung der Emissionsfaktoren für Feuerungs- und Gasturbinenanlagen nach 13./17. BImSchV und TA Luft. Bericht zum Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes (FKZ 3708 42 301). Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) und Europäisches Institut für Energieforschung (EIFER).
- FNR (2018): Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR,), Gülzow, 17 S. (www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22004416.pdf, aufgerufen 12.2.2018).
- Friedrich R et al. (2007): NatAir - Improving and applying methods for the calculation of natural and biogenic emissions and assessment of impacts to the air quality. Final Activity Report, Sixth Framework Programme, FP6-2003-SSP-3, Contract 513699 (natair.ier.uni-stuttgart.de/NatAir_Final_Activity_Report.pdf, aufgerufen 09.05.2018).
- Fritsche UR, Leuchtner J, Matthes FC, Rausch L, Simon KH (1994): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Vers. 2.1. Aktualisierter und erweiterter Endbericht. Öko-Institut (Institut f. angewandte Ökologie e.V.), Freiburg, veröff. Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (HMUEB), Wiesbaden, 230 S.
- Fritsche UR, Rausch L (2007): Umwelteffekte der Strom- und Wärmebereitstellung sowie Kraftstoffnutzung: Zeitreihen 1990 bis 2004. Öko-Institut (Institut für angewandte Ökologie e.V.), Freiburg, 48 S.
- 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 (unveröffentlicht).
- 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.
- Galloway JN, Aber JD, Erisman JW, Seitzinger SP, Howarth RW, Cowling EB, Cosby JB (2003): The Nitrogen Cascade. *BioScience* 53(4), 341–356.
- Gauger T, Haenel H D, Rösemann C, Dämmgen U, Bleeker A et al. (2008): National Implementation of the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Effects) - Part 1: Deposition Loads: Methods, modelling and mapping results. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, UBA-Texte 38/08.
- Gauger T (2018): Thomas Gauger, Institute of Navigation, INS, Universität Stuttgart, schriftl. Mittlg. 9.5.2018.
- GU B, Ju X, Chang J, Ge Y, Vitousek PM (2015): Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China. *PNAS* 112, 8792-8797.
- Gutknecht JLM, Goodman RM, Balsler TC (2006): Linking soil process and microbial ecology in freshwater wetland ecosystems. *Plant Soil* 289, 17-34.
- Heldstab J, Reutimann J, Biedermann R, Leu D (2010): Stickstoffflüsse in der Schweiz. Stoffflussanalyse für das Jahr 2005. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Häußermann U, Klement L, Bach M (2018): Aktualisierung der Methodik zur Berechnung von Stickstoff-Bilanzen für die Landwirtschaft in Deutschland. Institut für Ressourcenmanagement, Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau. UBA-Texte 131/2019

- Hutchings NJ, Nielsen OK, Dalgaard T, Mikkelsen MH, Børgesen CD et al. (2014): A nitrogen budget for Denmark; developments between 1990 and 2010, and prospects for the future. *Environmental Research Letters* 9, 115012 (8 p).
- Industrieverband Heimtierbedarf (2018): Der deutsche Heimtiermarkt. Struktur und Umsatzdaten. (www.ivh-online.de/typo3temp/secure_downloads/680/0/abcb239cb0db06f3b7ee6da01e52babd2b0bbb85/Der_Deutsche_Heimtiermarkt_2014.pdf, aufgerufen 27.01.2018).
- IVA (2017): Wichtige Zahlen Düngemittel 2016-2017. Industrieverband Agrar (IVA), Frankfurt a.M., 55 S.
- IPCC (2003): Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Ed. by Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Irving W, Krug T et al., Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Overview. Ed. by Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Irving W, Krug T et al., 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, Thünen-Institut, Braunschweig, 318 S.
- 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. *Eur J Forest Res* 134(5), 869-888.
- Keller R, Wendland F (2013): Berechnung der potenziellen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser auf Kreisebene für die Bundesrepublik Deutschland - Teilleistung im Rahmen des BMBF Forschungs- und Entwicklungsvorhabens "Wasserflüsse in Deutschland" (FKZ 033L056). Forschungszentrum Jülich.
- 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*, 3204-3214.
- Kroeze C, Aerts R, van Breemen N, van Dam D, Hofschreuder P et al. (2003): Uncertainties in the fate of nitrogen I: An overview of sources of uncertainty illustrated with a Dutch case study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66, 43-69.
- Leip A, Achermann B, Billen G, Bleeker A et al. (2011): Integrating nitrogen fluxes at the European scale. In: Sutton M, Howard C, Erismann JW, Billen et al. (eds.): *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, 345-376.
- MacDonald JA, Dise NB, 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.
- 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-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Braunschweig, 39 S.
- Mineralölwirtschaftsverband (2018): Schriftl. Mittlg. v. 03.05.2018. Deutscher Mineralölwirtschaftsverband e.V., Berlin.
- Niemann H (2009): Servicegesellschaft tierische Nebenprodukte mbH, Bonn (mündl. Mitteilung, 3.12.2009).
- Niemann H (versch. J.): Statistik der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte [Jahr]. Tierische Nebenprodukte Nachrichten, Bonn.
- NLFB (2005): EG-WRRL – Bericht 2005, Grundwasser, Methodenbeschreibung. Niedersächs. Landesamt f. Ökologie und Bezirksregierung Hannover (cdl.niedersachsen.de/blob/images/C38304492L20.pdf, aufgerufen 28.6.2018).
- OECD (2017): OECD Health Statistics 2017. Definitions, Sources, Methods. Tobacco consumption in grams per capita (age 15+). (stats.oecd.org/fileview2.aspx?IDFile=8e59b835-8196-426e-9297-15bc1dab652c, aufgerufen 17.12.2017).
- Oehmichen K, Dunger K, Steuk J, Stümer W, Riedel T (2011): Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für die Quell-/Senkenkategorie Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (5) Wälder (5.A.) [Kap.19.5.1]. In: Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2011: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2009. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Climate change 11/2011, 637-649.
- Osterburg B (2015): Ammoniak in der (Gas)Emissionsberichterstattung. Vortrag 1. Bund-Länder-Fachgespräch Stickstoffbilanz (FGNB) 5./6.5.2015, Stuttgart. Thünen-Institut, Braunschweig.
- Parravicini V, Valkova T, Haslinger J, Saracevic E et al. (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*, 13. Juni 2016.
- Rentz O, Gütling K, Karl U (2002): Erarbeitung der Grundlagen für das BVT-Merkblatt Großfeuerungsanlagen im Rahmen des Informationsaustauschs nach Art. 16 (2) IVU-Richtlinie. Inst. f. Umweltforschung, Univ. Karlsruhe (TH), i.A. des Umweltbundesamtes, Forschungsbericht 20046317.

- Rösemann C, Haenel HD, Dämmgen U, Freibauer A, Döring U, Wulf S, Eurich-Menden B, Döhler H, Schreiner C, Osterburg B (2017): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2015 Report on methods and data (RMD) Submission 2017. Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2015. Report zu Methoden und Daten (RMD), Berichterstattung 2017. Thünen Report 46.
- Ruhrberg M (2018): Einsatz von Ammoniak zur Rauchgasreinigung in Kraftwerken. Dr. Martin Ruhrberg, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), schriftl. Mittlg. (12.4.2018)
- Salm van der CW, de Vries GJ, Reinds, Diese NB (2007): N leaching across European forests/ Derivation and validation of empirical relationships using data from intensive monitoring plots. *Forest Ecology Management* 238, 81-91.
- 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.
- Schaap M, Kruit RW, Hendriks C, Kranenburg R, Segers A, Buitjes P, Banzhaf S (2017): Modelling and assessment of acidifying and eutrophying atmospheric deposition to terrestrial ecosystems (PINETI-2) - Part I: Atmospheric deposition to German natural and semi-natural ecosystems during 2009, 2010 and 2011. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, UBA-Texte 62/2017, 97 S.
- Schaap M, Banzhaf S, Hendriks C, Kranenburg R, Kuenen J, Nagel HD, Schlutow A, Segers A et al. (2018): PINETI-III: Modellierung und Kartierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität in Deutschland. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau (vorläufige Fassung für den Kartendienst des Umweltbundesamtes zu den Hintergrundbelastungsdaten Stickstoff, Juli 2018).
- SRU (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), Sondergutachten, 560 S.
- Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM et al. (2015): Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, Issue 6223, 1259855.
- StickstoffBW (2017): Klärung der Anforderungen an die Stickstoffbilanzierung - Grundlagen und Methodik der Critical Levels, Critical Loads und Critical Surplus zur flächendeckenden Bewertung des Stickstoffhaushalts (CS-Bericht 2017). Bund-Länder-Fachgespräch Stickstoffbilanz (FGNB), Fachdokumentendienst Umweltbeobachtung, ID U26-S7-N17, Karlsruhe, 32 S.
- Sutton MA, Dragosits U, Tang YS, Fowler D (2000): Ammonia emissions from non-agricultural sources in the UK. *Atmospheric Environment* 3, 855-869.
- Sutton MA, Howard CA, Erisman JW, Billen G, Bleeker A, Grennfelt P, van Grinsven H, Grizzetti B (2011): *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*. Cambridge University Press, 611 p.
- Thünen-Institut (2015): Projekt Einschlagsrückrechnung. (www.thuenen.de/index.php?id=2404&L=0; aufgerufen 17.09.2017).
- Thünen-Institut (2016a): Holzeinschlag und Rohholzverwendung. Datentabelle. (www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/produktion-und-verwendung/holzeinschlag-und-rohholzverwendung/, aufgerufen 09.11.2017)
- Thünen-Institut (2016b): Revisionen an Daten und Methodik zu Jochem et al. 2015. (www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/waldwirtschaft/holzeinschlag-und-rohholzverwendung/, aufgerufen 09.11.2017).
- Thünen-Institut (2016c): Dritte Bundeswaldinventur (2012). (bwi.info.de, aufgerufen 22.11.2017).
- Tiemeyer B, Borraz EA, 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.
- UBA (2009a): Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, 8 S.
- UBA (2009b): Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoff-Emissionsminderungsstrategie. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, 112 S.
- UBA (2012): Optimierung der Verwertung organischer Abfälle, Materialband „Wirkungsanalyse Boden“. UBA Texte 32/2012, 99 S.
- UBA (2015): Reaktiver Stickstoff in Deutschland - Ursachen, Wirkungen, Maßnahmen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, 53 S.
- UBA (2016a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016. Nationaler Inventarbericht zu Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, *Climate Change* 23/2016, 1040 S.
- UBA (2016b): Deutsches Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (PRTR). PRTR-Gesamtdatenbestand (Stand 24.09.2015), SQLite-Datenbank. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. (www.thru.de/thrude/downloads/, aufgerufen 3.3.2018).

- UBA (2017a): Indikatorenbericht, Daten zur Umwelt 2017. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. (www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-zur-umwelt-2017; aufgerufen 7.7.2017).
- UBA (2017b): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2015. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. (www.umweltbundesamt.de/dokument/nationale-trendtabellen-fuer-die-deutsche-2, aufgerufen 17.2.2018).
- UBA (2017c): Quantifizierung der landwirtschaftlich verursachten Kosten zur Sicherung der Trinkwasserversorgung. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, UBA-texte 43/2017, 250 S.
- UBA (2018a): Grenzüberschreitende Verbringung von zustimmungspflichtigen Abfällen. Zeitreihe Import nach Abfallarten. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/zeitreihe_import_notifizierungspflichtiger_abfaelle_nach_abfallarten.pdf, aufgerufen 9.7.2018).
- UBA (2018b): Grenzüberschreitende Verbringung von zustimmungspflichtigen Abfällen. Zeitreihe Export nach Abfallarten. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/zeitreihe_export_notifizierungspflichtiger_abfaelle_nach_abfallarten.pdf, aufgerufen 9.7.2018).
- UBA (2020): Integrierter Stickstoffindikator, nationales Stickstoffziel und IST-Zustand (DESTINO Bericht 1). Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, Abschlussbericht zum FuE Vorhaben FKZ 3716 51 200 0 (in print).
- UNFCCC (2017): National Inventory Submissions 2016, Annex I: Party GHG Inventory Submissions. Common reporting format (CRF) Tables, Germany (dated 7 Nov 2016). United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php, aufgerufen 15.11.2017).
- VCI (2017): Chemiewirtschaft in Zahlen 2017. Verband der chemischen Industrie (VCI), Frankfurt a.M., 175 S.
- Venohr M (2006): Modellierung der Einflüsse von Temperatur, Abfluss und Hydromorphologie auf Stickstoffretention in Flusssystemen. PhD-Thesis, Humboldt-Universität, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II, Berlin.
- Verordnung (EG) Nr. 1893/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Dezember 2006 zur Aufstellung der statistischen Systematik der Wirtschaftszweige NACE Revision 2 und zur Änderung der Verordnung (EWG) Nr. 3037/90 des Rates sowie einiger Verordnungen der EG über bestimmte Bereiche der Statistik.
- 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.
- Worrall F, Burt TP, Howden NLK, Whelan MJ (2016): The UK's total nitrogen budget from 1990 to 2020: a transition from source to sink? *Biogeochemistry* 129, 325–344