

Bundesamt für Landwirtschaft

Aktualisierung Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2018 Bericht

Schlussbericht
Zürich, 28. Februar 2022

Judith Reutimann, Anna Ehrler, Bettina Schächli

Impressum

Aktualisierung Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2018

Bericht

Schlussbericht

Zürich, 28. Februar 2022

Schlussbericht_N-Stoffflussanalyse-Update2021.docx

Auftraggeber

Bundesamt für Landwirtschaft

Bundesamt für Umwelt

Projektleitung

Christine Zundel, BLW

Simon Peter, BLW

Autorinnen und Autoren

Judith Reutimann, Anna Ehrler, Bettina Schächli

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

Mitarbeit

Georges Chassot, BAFU

Damian Dominguez, BAFU

Reto Meier, BAFU

Dank

Frank Liebisch, Ernst Spiess, Volker Prasuhn, Daniel Bretscher (Agroscope)

Konrad Schleiss (UMWEKO)

René Burri (CENTRAVO)

Claudio Beretta (ZHAW)

Sabine Augustin, Joëlle Blanc, Michael Bock, Andreas Schellenberger, Laura Tschümperlin, Michael Hügi (BAFU)

Mathias Kuhn (BLW)

Beat Müller (eawag)

Inhalt

Impressum	2
Inhalt	3
Zusammenfassung	6
Problematik von Stickstoff in der Umwelt	6
Ausgangslage	6
Stoffflusssystem und Methodik	7
Resultate, Trends und Diskussion	8
Themen im Fokus	12
Bedeutung der Resultate und Ausblick	14
1. Ausgangslage und Ziel	16
1.1. Problematik	16
1.2. Frühere Studien	17
1.3. Umweltziele Landwirtschaft	17
1.4. Aktuelle Entwicklungen und Auftrag	18
1.5. EU/Deutschland	19
2. Stickstoff in der Umwelt	20
2.1. Stickstoffverbindungen	20
2.2. Stickstoffreservoirs	21
2.3. Umwandlungsprozesse	23
3. Systemanalyse Stickstoff	29
3.1. Land- und Forstwirtschaft	29
3.2. Produkteherstellung und Produktnutzung	30
3.3. Umwelt	31
3.4. Abfallwirtschaft	33
3.5. Themen im Fokus	34
4. Methodik der Stoffflussanalyse	37
4.1. Stoffflussmodell	38
4.2. Datenbeschaffung und Datenquellen	40
4.3. Datenqualität	43
4.4. Bilanzierung des Stoffflusssystems	43
4.5. Umsetzung Stoffflussmodell in STAN	44
5. Resultate für das Jahr 2018	46

5.1.	Gesamtsystem	46
5.2.	Land- und Forstwirtschaft	47
5.3.	Produkteherstellung/Produktenutzung	52
5.4.	Umwelt	56
5.5.	Abfallwirtschaft	61
5.6.	Import- und Export-Flüsse	64
5.7.	Lagerveränderungen (Quellen, Senken)	66
6.	Resultate Themen im Fokus	67
6.1.	Vergärung	67
6.2.	Food Waste	73
6.3.	Schlachtnebenprodukte	77
7.	Trends der Stoffflüsse in der Schweiz	81
8.	Diskussion	84
8.1.	Bedeutung der Resultate	84
8.2.	Landwirtschaft	86
8.3.	Luftschadstoffe	90
8.4.	Hydrosphäre	96
8.5.	Güterflüsse	99
8.6.	Themen im Fokus	100
8.7.	Datenlücken, Unsicherheiten und nicht berücksichtigte Stickstoffflüsse	103
8.8.	Ausblick	105
Annex		107
A1	Stickstoffflüsse	107
A1.1.	Land- und Forstwirtschaft	107
A1.2.	Stickstoffflüsse Produkteherstellung	114
A1.3.	Stickstoffflüsse Umwelt	119
A1.4.	Stickstoffflüsse Abfallwirtschaft	124
A1.5.	Stickstoffflüsse aus dem Ausland (Import)	130
A1.6.	Lagerveränderungen / Stickstoffakkumulationen in Prozessen	133
A2.	Gesamtsysteme 2018 und 2005	134
A3.	OSPAR-Bilanz	136
A4.	Herleitung Güterimport und -export in/aus der Schweiz	137
A5.	Stickstoffimport in die Schweiz über Fließgewässer (I1)	142

Glossar	144
Literatur	145

Zusammenfassung

Problematik von Stickstoff in der Umwelt

Stickstoff (N) ist mit seinen vielfältigen Erscheinungsformen und aufgrund seiner Funktion als Nährstoff ein Schlüsselement für die gesamte organische Natur. Er ist der wesentliche Baustein für die Produktion von lebensnotwendigen Eiweissen und somit für die Ernährung unserer wachsenden Weltbevölkerung. Menschliche Aktivitäten wie Verkehr, Industrie, Haushalte und Landwirtschaft haben in den letzten Jahrzehnten grosse Mengen reaktiver Stickstoffverbindungen in Luft, Boden und Wasser eingetragen und damit erhebliche Umweltschäden verursacht.

Reaktive Stickstoffverbindungen führen zu einer Kaskade von Effekten in Ökosystemen, z.B. zur Eutrophierung von Gewässern und Überdüngung und Versauerung von Böden. Sie bedrohen die Artenvielfalt und belasten die menschliche Gesundheit. Die wichtigsten Verbindungen sind Stickoxide (NO_x), Ammoniak (NH_3), Lachgas (N_2O) und Nitrat (NO_3^-). Sie werden durch verschiedene Prozesse in der Atmosphäre, der Hydrosphäre und der Pedosphäre ineinander umgewandelt.

Kenntnisse der Stickstoffflüsse und deren zeitlichen Verläufe sind relevant für den Schutz der menschlichen Gesundheit sowie für die Ernährungssicherheit, die Bodenfruchtbarkeit und die Biodiversität. Die umfassende Darstellung im N-Stoffflusssystem zeigt die Komplexität der Problematik und die Vielfältigkeit der Wechselwirkungen auf. Quantität und Qualität der Stickstoffflüsse zu kennen, ist Voraussetzung für Strategieentwicklung und Massnahmenplanung in der Land- und Forstwirtschaftspolitik, in Sozial- und Präventivmedizin sowie im Umwelt- und Klimaschutz. Lösungsansätze und Massnahmen sind daher immer im Kontext des Gesamtsystems zu betrachten. Dabei gilt es zu beachten, dass sich Stickstoff in den Umweltmedien in verschiedene Formen umwandeln kann. Einseitige Vermeidungsstrategien können zu Stickstoffverlusten in einem anderen Bereich führen (Zielkonflikte). Mit Blick auf den Klimawandel gilt es zudem, Wechselwirkungen mit dem Kohlenstoffkreislauf zu beachten.

Ausgangslage

Der Stickstoffhaushalt der Schweiz wurde erstmals 1993 beschrieben (GSK 1993) und darauf aufbauend 1994 eine Strategie zur Reduktion der Stickstoffemissionen in der Schweiz (BAFU 1996) entwickelt. Im Jahr 2010 wurden die Stickstoffflüsse in der Schweiz neu ermittelt und mit der Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2005 basierend auf den neusten verfügbaren Sekundärdaten sowie Experteninterviews aktualisiert (BAFU 2010). Die vorliegende Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2018 baut auf dieser umfassenden Stoffflussanalyse für den Stickstoff auf, wobei Modell und Methodik weitgehend übernommen und die Daten für das Bezugsjahr 2018 aktualisiert wurden.

Die vorliegende Stoffflussanalyse Stickstoff dient als Basis für die Beantwortung des Prüfungsauftrags «Möglichst weitgehende Schliessung der Nährstoffkreisläufe über die gesamte Wertschöpfungskette inklusive Konsum» des Postulats 20.3931 vom August 2020¹ zur zukünftigen Ausrichtung der Agrarpolitik. Adressaten des Berichts sind politische Entscheidungsträger, Landwirtschafts- und Umweltfachleute in öffentlichen Verwaltungen und Privatwirtschaft sowie Hochschulinstitute, die sich mit stickstoffrelevanten Themen befassen.

Themen im Fokus

Mit der Ausrichtung des Postulats 20.3931 sind die Themen **Food Waste**, **Vergärung** und Umgang mit **Schlachtnebenprodukten (SNP)** in den Fokus geraten. Stickstoffflüsse, die mit diesen Themen im Zusammenhang stehen, wurden daher separat erfasst, quantifiziert und dargestellt. Basierend darauf kann abgeschätzt werden, welches Potenzial aufgrund von Massnahmen im Bereich der Fokusthemen besteht, um den Einsatz von Stickstoff zu optimieren und unerwünschte Stickstoffverluste in die Umwelt zu reduzieren.

Stoffflusssystem und Methodik

Modell und Methodik der vorliegenden Stoffflussanalyse Stickstoff wurden weitgehend von der Stoffflussanalyse für das Jahr 2005 (BAFU 2010) übernommen und die Daten für das Bezugsjahr 2018 aktualisiert. Die räumliche **Systemgrenze** entspricht der Schweizer Landesgrenze.

Das Gesamtsystem der stickstoffrelevanten Prozesse der Schweiz enthält die vier Subsysteme:

- Land- und Forstwirtschaft (L),
- Produkteherstellung/Produktenutzung (P),
- Umwelt (U),
- Abfallwirtschaft (A).

Ausserdem werden Importe und Exporte ins Ausland erfasst. Die Subsysteme enthalten mehrere «Prozesse», zum Beispiel Tierhaltung, Verkehr, Atmosphäre etc. Prozesse sind Ursprung und Ziel der betrachteten Stickstoffflüsse im System (Flussdiagramme der Subsysteme siehe Abbildung 5 bis Abbildung 9).

Die **Stickstoffflüsse** sind als Pfeile dargestellt und entsprechen den Inputs und Outputs aus Prozessen und Subsystemen. Jeder Fluss ist mit einem Buchstaben und einer Zahl eindeutig charakterisiert. Die Flüsse sind in der Einheit 1000 Tonnen N (kt N) angegeben. Ein einzelner Fluss kann mehrere Stickstoffverbindungen umfassen z.B. Emissionen von Ammoniak, Lachgas

¹ <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefft?AffairId=20203931>

und Stickoxiden. Einige Flüsse werden in Teilflüsse aus reaktiven Stickstoffverbindungen (N_r) und nicht reaktivem Luftstickstoff (N_{nr}) zerlegt.

Die **Quantifizierung** der Stickstoffflüsse basiert weitgehend auf bestehenden Daten und Modellen. Die Daten stammen aus Forschungsprojekten und Publikationen von BAFU, Agroscope, BFS, ZHAW etc. Soweit möglich wurden die Mittelwerte über die drei Jahre 2017 bis 2019 verwendet, um zufällige jährliche Schwankungen auszugleichen.

Die **Qualität** der Frachtangaben ist sehr unterschiedlich. Bei der Mehrheit der Flüsse wurde die Unsicherheit abgeschätzt bzw. die Schätzung aus BAFU (2010) übernommen.

Die Stoffflussanalyse wurde mit einer **Bilanzierung** unter Einbezug der Unsicherheiten überprüft. Die Stoffflussbilanz eines Systems/Subsystems/Prozesses geht auf, wenn innerhalb der Fehlerintervalle die Summe aller Inputs² plus Quellen der Summe aller Outputs plus Senken entspricht.

Die Umsetzung und die **grafische Aufbereitung** der Stoffflussanalyse erfolgten in der Stoffflussmodellierungs-Software STAN (Version 2.6.801)³. Die Software erlaubt eine einfache Aktualisierung von Flusswerten und eignet sich für einen Vergleich mit Stoffflussanalysen früherer Jahre im selben Modell.

Resultate, Trends und Diskussion

Gesamtsystem

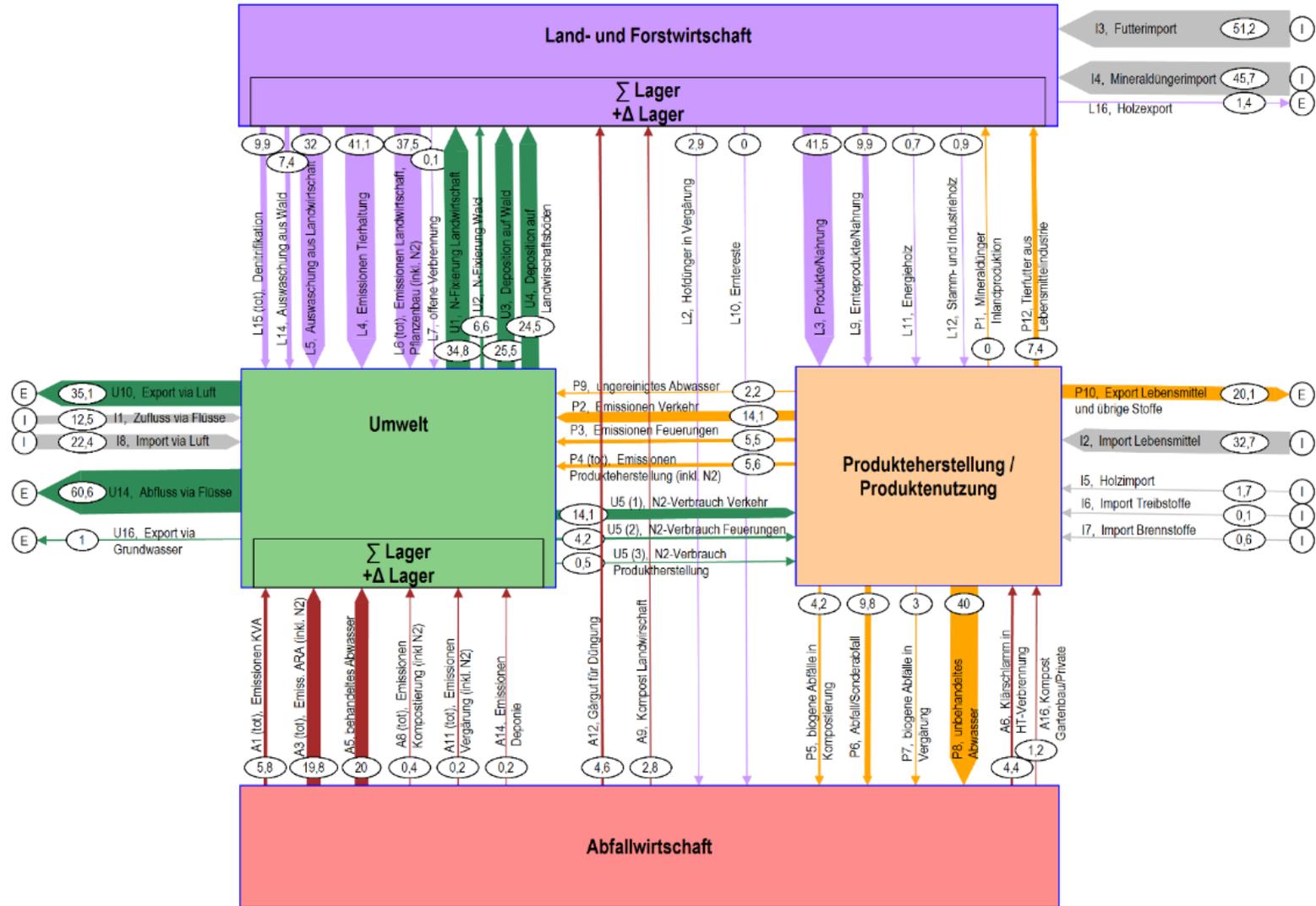
Das Gesamtsystem für das Jahr 2018 zeigt, dass die grössten Stickstofffrachten zwischen den Subsystemen Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Ausland ausgetauscht werden (Abbildung 1). Besonders komplex ist die Situation im Subsystem Land- und Forstwirtschaft, in dem nicht nur zahlreiche Flüsse vorkommen, sondern auch bedeutsame Umwandlungen zwischen den Stickstoffverbindungen stattfinden⁴.

² Quellen oder Senken in einem Prozess sind Lagerveränderungen. Für die Bilanzierung werden sie wie Flüsse behandelt, d.h. sie werden zu den Inputs (Quellen) oder Outputs (Senken) gerechnet.

³ Website STAN: <https://www.stan2web.net/>

⁴ Die Abbildungen der einzelnen Subsysteme im Bericht (Abbildung 6 bis Abbildung 9) zeigen die Flüsse, die innerhalb, in oder aus dem Subsystem fließen.

Abbildung 1: Gesamtsystem Schweiz 2018, Stickstoffflüsse zwischen den Subsystemen



Grafik INFRAS.

Trends der Stoffflüsse

Ein Vergleich der grössten und wichtigsten Stickstoffflüsse von 2005 und 2018 zeigt, dass sich die meisten Flüsse wenig verändert haben. Die grössten absoluten Veränderungen gab es in der Landwirtschaft (Zunahme Futtermittelimport I3) und bei der Verfrachtung via Luft⁵ (Abnahme der Flüsse U10 und I8). Bei vielen Flüssen ist ein leicht abnehmender Trend ersichtlich. Die grössten Flüsse sind relativ betrachtet dieselben geblieben.

Landwirtschaft

Die grössten Stickstoffflüsse entstehen in bzw. aufgrund der Landwirtschaft. Dazu gehören die landwirtschaftsinternen Stickstofffrachten: Futter aus dem Pflanzenbau in die Tierhaltung (Fluss L8, 127 kt N) und Hofdünger/Weidegang aus der Tierhaltung in die Landwirtschaftsböden (L1, 86 kt N) (siehe Abbildung 6). Weiter sind die schädliche Stickstoffflüsse in die Umwelt hoch: Emissionen aus der Tierhaltung (L4, 41 kt N) und dem Pflanzenbau (L6 (Nr), 8.5 kt N) in die Atmosphäre und die Nitrat-Auswaschung aus Landwirtschaftsböden in die Hydrosphäre (L5, 32 kt N). Insgesamt ist die Landwirtschaft für 54% der Stickstoffeinträge in die Umwelt verantwortlich und somit grösste Verursacherin für den Ausstoss reaktiver Stickstoffverbindungen.

Ein Vergleich der grössten Stickstoffflüsse 2005 und 2018 zeigt, dass die grössten Flüsse dieselben geblieben sind. So ist z.B. der Fluss **Hofdünger/Weidegang** aus der Tierhaltung in die Landwirtschaftsböden (L1) aufgrund des nahezu konstanten Nutztierbestandes praktisch unverändert hoch.

Die Stickstofffracht in **Futtermitteln für die Tierhaltung** hat um insgesamt 8% zugenommen, wobei es eine Verlagerung der Futtermittelproduktion ins Ausland gab (Zunahme importierte Futtermittel I3 um 42%; Rückgang inländische Produktion L4 um 4%).

Der **Mineraldüngereinsatz** (I4) ist gegenüber 2005 um 10% gesunken. Die Ursache ist unbekannt – gemäss Experten ist dies nicht auf effizienteres Düngermanagement zurückzuführen.

Die Stickstofffracht in **tierischen Produkten** (L3) hat um 10% zugenommen, obwohl sich der Tierbestand und die Fleisch- und Milchproduktion insgesamt nicht wesentlich verändert haben. Dies kann damit erklärt werden, dass es eine Verschiebung von Schweinefleisch zu Geflügel und Rind gegeben hat – also hin zu Fleischsorten, die sich durch einen höheren Stickstoffgehalt auszeichnen.

Die **Stickstoffeffizienz der Landwirtschaft** hat von 2005 bis 2018 um zwei Prozentpunkte auf 35% zugenommen (OSPAR 2021), entsprechend sind die Stickstoffverluste in die Umwelt im

⁵ Die Veränderung der Importe und Exporte über die Atmosphäre ist nur zu einem kleinen Teil auf eine Reduktion der Emissionen zurückzuführen. Sie ist vor allem durch Modelländerungen bedingt.

Verhältnis zum Stickstoffinput auf 65% gesunken. Die **Nitrat-Auswaschung** in Grund- und Oberflächengewässer (L5) und die **Emissionen in die Atmosphäre** (L4 und L6 (N_r)) haben geringfügig abgenommen. Dabei haben technische Minderungsmaßnahmen im Umgang mit Hofdüngern eine Rolle gespielt.

Luftschadstoffe

Stickstoffhaltige Luftschadstoffe (d.h. oxidierte Stickstoffverbindungen (NO_x) und reduzierte Stickstoffverbindungen (NH_y)) entstehen durch natürliche und technische Prozesse im Inland, werden teilweise aus dem Ausland importiert, auf Böden deponiert, und über die Atmosphäre ins Ausland exportiert. Die Schweiz ist ein Netto-Exporteur von N-haltigen Luftschadstoffen.

Emissionen und Depositionen, Importe und Exporte von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen sind von 2005 bis 2018 zurückgegangen. Dies ist zum einen auf eine Abnahme der Luftbelastung mit reaktiven N-Verbindungen zurückzuführen, zum anderen haben Modell-Anpassungen dazu geführt, dass für das Jahr 2018 geringere Werte berechnet wurden. **NO_x-Emissionen** haben um 31% abgenommen (BAFU 2021b). Grund für die geringeren Luftschadstoffemissionen bei Motorfahrzeugen sind die Katalysatorpflicht für Personenwagen und die nachfolgenden europäischen Emissionsstandards (Euro 5, Euro 6 etc.). Bei Feuerungen (Heizungen) ist die Reduktion auf höhere Standards für Gebäudeisolierung, Low-NO_x-Brenner und die Effizienz von Heizsystemen zurückzuführen. **NH₃-Emissionen** sind von 2005 bis 2018 um rund 8% zurückgegangen (BAFU 2021b). Sie werden zu über 90 % von der Landwirtschaft verursacht. Weitere Quellen sind der Strassenverkehr, Gebäudeheizungen und die Abfallwirtschaft. Die Reduktion ist einerseits auf den leichten Rückgang des Tierbestandes bei Schweinen (Agristat 2021a) und eine Verbesserung des Hofdüngermanagements zurückzuführen. Andererseits gab es geringere Emissionen beim Strassenverkehr und verbesserte Katalysatoren bei Verbrennungsmotoren (BAFU 2021b).

Trotz der Verbesserungen sind die NO_x- und die NH₃-Emissionen immer noch zu hoch. Die schweizerischen Immissionsgrenzwerte für NO₂ werden zwar mehrheitlich eingehalten, aber die stickstoffhaltigen Depositionen sind immer noch deutlich und grossräumig über den Critical Loads für Stickstoffeinträge in empfindliche Ökosysteme (Meteotest 2016).

Hydrosphäre

Die **Stickstofffrachten in Schweizer Fliessgewässer** zeigten bis Mitte der 90er Jahren eine Zunahme, ab Mitte der 90er Jahre wurde eine Verringerung festgestellt.

Stickstoffeinträge aus häuslichen und industriellen Abwässern liegen in ähnlicher Gröszenordnung wie 2005. Bei der Stickstoffelimination in Kläranlagen konnten weitere Fortschritte

erzielt werden: 50% der Stickstofffrachten werden heute als Emissionen in die Luft eliminiert, rund 93% davon in Form von nicht-reaktivem Luftstickstoff (Swiss Academics 2020).

Die **diffusen Stickstoffeinträge in Gewässer** (Flüsse L5, L14 und U12) aus Landwirtschaftsböden, Waldböden und übrigen Böden in Gewässer sind rückläufig. Dies ist auf eine Reduktion bei der Deposition und – vor allem bei landwirtschaftsbedingten N-Einträgen – auf reduzierte NH₃-Emissionen in die Luft zurückzuführen (BAFU 2016b).

Trotz dieses Rückgangs zeigen die Modellrechnungen, dass die Schweiz das internationale Ziel verfehlt hat, die Stickstoffeinträge in den Rhein und in die Nordsee seit 1985 zu halbieren (BAFU 2016b).

Güterflüsse

Der **Import von Futtermittel** hat stark zugenommen und der **Import von Mineraldünger** leicht abgenommen. Der **Import und Export von Lebensmitteln und übrigen Produkten** hat stark zugenommen und dadurch auch die Stickstofffracht in den importierten und exportierten Gütern (Import +29% und Export +55%). Die Zunahme liegt einerseits am Bevölkerungswachstum und andererseits am zunehmenden Veredelungsverkehr. Die Gesamtbilanz von Inputs und Summe der Outputs zeigt einen deutlichen Importüberschuss, der allerdings durch die Senken in der Umwelt (Sedimentation und Senke in der Atmosphäre) ausgeglichen wird.

Themen im Fokus

Vergärung

Organische Abfälle können in landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen oder gewerblich/industriellen Anlagen zu Biogas aufbereitet werden. Stickstoff gelangt über verschiedene Substrate in die Vergärungsanlagen, darunter Hofdünger und Erntereste aus der Landwirtschaft sowie biogene Abfälle/Grüngut aus der Produkteherstellung/Produktenutzung. Insgesamt fließen 5.9 kt Stickstoff in die Vergärung, wobei 2.9 kt N aus der Landwirtschaft und 3 kt N aus der Produkteherstellung stammen. In landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen wird etwas mehr Stickstoff umgesetzt (3.7 kt N) als in gewerblich/industriellen Anlagen (2.2 kt N).

Aus der Vergärung wird Stickstoff mit den Gärresten bzw. Vergärungsprodukten (z.B. Gärgülle) abgeführt, die neben dem Biogas in den Anlagen entstehen. Die Vergärungsprodukte werden grösstenteils direkt in der Landwirtschaft (4.6 kt N) als Dünger verwendet, ein kleiner Teil wird in Kompostieranlagen zu Kompost verarbeitet (0.7 kt N), der im Pflanzenbau (0.4 kt N) oder im Gartenbau eingesetzt wird (0.3 kt N).

Die Verwertung von biogenen Abfällen und Hofdünger in Vergärungsanlagen hat in den letzten zwanzig Jahren stark zugenommen. Die Vergärung produziert Biogas und trägt damit zur Produktion von erneuerbaren Energieträgern bei. Stickstoff aus biogenen Abfällen und Hofdünger kann nach der Vergärung als Dünger in der Landwirtschaft verwendet und somit rezykliert werden. Dadurch kann Mineraldünger ersetzt werden, der in der Regel energieintensiv hergestellt wird.

Das maximale Potenzial der Vergärung ist noch nicht ausgeschöpft. Gemäss WSL (2017) entspricht das zusätzlich nutzbare Potential von biogenen Abfällen in Vergärungs- und Kompostieranlagen in der Schweiz etwa einem Drittel der bisher verwerteten Menge.

Food Waste

Food Waste fällt auf jeder Wertschöpfungsstufe der Nahrungsmittelherstellung und bei den Konsumenten an. Die Entsorgung des Food Waste geschieht entweder in der Landwirtschaft (als Futtermittel, am Feldrand kompostiert oder in die Felder untergepflügt) oder in der Abfallwirtschaft (Kompost, Vergärung, Kehrriech, Abwasser).

Da pflanzliche und tierische Nahrungsmittel Stickstoff enthalten, treten im Zusammenhang mit Food Waste immer Stickstoffflüsse auf. Diese sind jedoch oft klein. Der grösste Stickstofffluss befindet sich im Food Waste, der in der Lebensmittelverarbeitung verursacht wird (5.5 kt N); weiter sind die Haushalte mit 4.5 kt N ein wichtiger Verursacher.

Insgesamt fallen in der Schweiz mit dem Food Waste etwa 14 kt Stickstoff an. 40% davon werden als Futtermittel oder Dünger in der Landwirtschaft wiederverwendet (ca. 6 kt N), etwa 60% des Stickstoffs landet jedoch in der Abfallwirtschaft (ca. 8 kt N), davon der grösste Teil (3.5 kt N) in der Kehrriechverbrennungsanlage (KVA).

Um diese Verluste zu reduzieren, muss Food Waste reduziert werden. Der Bundesrat ist aktuell dabei, einen Aktionsplan zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen auszuarbeiten (BAFU 2021c).

Schlachtnebenprodukte

Schlachtnebenprodukte (SNP) entstehen als Nebenprodukt bei der Verarbeitung von Fleisch aus dem In- und Ausland. Je nach Risikokategorie werden Schlachtnebenprodukte unterschiedlich verarbeitet: zu Heimtierfutter (dieser Fluss enthält ca. 1 kt N)⁶ oder zu Tiermehl, oder als Brennstoff in Schweizer Zementwerken (3 kt N) oder in Form von Tierfett für die Biodieselproduktion (Tierfett enthält keinen Stickstoff⁷) eingesetzt. Schlachtnebenprodukte gelangen auch

⁶ Dies beinhaltet auch Heimtierfutter, das aus importierten SNP hergestellt wurde.

⁷ Siehe Angaben in: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2534.pdf>

in die Abfallwirtschaft: Sie werden in Vergärungsanlagen verarbeitet (enthält < 0.8 kt N) oder gelangen ins Abwasser (< 0.4 kt N) oder in die Kompostierung (< 0.1 kt N).

Der grösste Stickstofffluss (ca. 9 kt N⁸) ist in Schlachtnebenprodukten und daraus hergestelltem Heimtierfutter enthalten, die als Exportwaren (Innereinen, Knochen etc.) ins umliegende Ausland (hauptsächlich Deutschland/Frankreich) exportiert werden (Centravo 2021).

In der Schweiz wird aktuell darüber diskutiert, ob das Fütterungsverbot von tierischen Proteinen aus SNP an Nutztiere analog zur EU gelockert werden sollte. Gemäss Experten würde dies jedoch kaum zu einer Produktion von Fleisch-/Knochenmehl aus SNP im Inland führen (Centravo 2021, Minder 2021), da die Wirtschaftlichkeit in der Schweiz als zu gering eingeschätzt wird (kleine anfallende Mengen an SNP und strenge Vorschriften, gleichzeitig starke Konkurrenz durch lukrativen Heimtierfuttermarkt). Eine Lockerung des Fütterungsverbots analog zur EU, könnte jedoch dazu führen, dass vermehrt Fleisch- und Knochenmehle aus SNP als Tierfutter importiert werden. Dadurch könnte ein Teil der inländischen Futtermittelproduktion und des Imports von Futtermitteln aus pflanzlichen Proteinen (z.B. Soja) substituiert werden. Zudem könnten bei einer genügend grossen Nachfrage vermehrt SNP zur Weiterverarbeitung ins Ausland exportiert werden. Das Potenzial wird jedoch als klein eingeschätzt.

Bedeutung der Resultate und Ausblick

Die Stoffflussanalyse ist ein wichtiges Hilfsmittel, um einen Überblick über die Stickstoffflüsse in der Schweiz zu gewinnen. Damit bietet die Analyse ein Instrument, um Risiken aufzuzeigen, und Reduktionsstrategien zu entwickeln.

Der Trend der vergangenen Jahre zeigt, dass die stickstoffhaltigen Luftschadstoffe aus Verkehr, Industrie und Haushaltungen wirkungsvoll reduziert werden konnten, während es mit den bisherigen Massnahmen nicht gelungen ist, die Stickstoffproblematik in der Landwirtschaft zu entschärfen. Zukünftige Massnahmen in der Landwirtschaft müssten daher weiter gehen als bestehende. Dabei ist neben technischen Verbesserungen und organisatorischen Massnahmen, die eine beschränkte Steigerung der Stickstoffeffizienz bewirken können, auch eine Verminderung der Intensität der Landwirtschaft notwendig. Dies könnte die Schweizer Landwirtschaft jedoch stark verändern und hätte eine Anpassung der Produktion zur Folge. Bei gleichbleibendem Konsum wäre ein zusätzlicher Nahrungsmittelimport unumgänglich. Dabei besteht das Ri-

⁸ Bei den SNP findet ein Veredelungsverkehr statt. Es werden SNP importiert, verarbeitet und wieder exportiert. Es ist anzunehmen, dass der Exportfluss an SNP deshalb so hoch ist.

siko einer Verlagerung der Umweltbelastung ins Ausland, es kann jedoch auch sein, dass Standortvorteile (in der Schweiz und im Ausland) zu geringeren globalen N-Stickstoffeinträgen in die Umwelt führen.

Nachdem das Parlament die Weiterentwicklung der Agrarpolitik (AP22+) im Frühjahr 2021 sistiert hat, wird die Diskussion zur zukünftigen Ausrichtung der Agrarpolitik mit dem Bericht des Bundesrates zum Postulat 20.3931 ab dem Frühjahr 2023 wieder aufgenommen. Mit der Parlamentarischen Initiative 19.475 «Das Risiko beim Einsatz von Pestiziden reduzieren», hat das Parlament gesetzliche Änderungen beschlossen, die u.a. Massnahmen enthalten, die auf eine Reduktion der Nährstoffverluste in der Landwirtschaft abzielen (BLW 2021):

- Die Stickstoff- und Phosphorverluste der Landwirtschaft werden angemessen reduziert.
- Kraftfutter- und Düngelieferungen sind dem Bund zu melden, damit dieser die Nährstoffüberschüsse national und regional bilanzieren kann.

In den anderen Sektoren sind folgende Massnahmen in der Umsetzung vorgesehen:

- Die Abgasvorschriften für Motorfahrzeuge werden nochmals verschärft: Seit 1. September 2021 gilt die Emissionsnorm Euro 6d für neue Personenwagen mit einer weiteren Verschärfung der Grenzwerte für Stickoxide.
- Aufgrund des Emissionshandelssystems werden bei industriellen Anlagen Emissionsreduktionen realisiert. Diese verringern nicht nur Treibhausgase, sondern können gleichzeitig auch stickstoffhaltige Luftschadstoffe reduzieren.
- Auch durch zahlreiche Fördermassnahmen zur Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien und zur Verbesserung der Energieeffizienz werden Emissionsreduktionen realisiert (z. B. Heizanlagen, Gebäudeisolation).

1. Ausgangslage und Ziel

1.1. Problematik

Stickstoff ist mit seinen vielfältigen Erscheinungsformen und aufgrund seiner Funktion als Nährstoff ein Schlüsselement für die gesamte organische Natur. Er ist der wesentliche Baustein für die Produktion von lebensnotwendigen Eiweissen und somit für die Ernährung unserer wachsenden Weltbevölkerung. Menschliche Aktivitäten wie Verkehr, Industrie, Haushalte und Landwirtschaft haben in den letzten Jahrzehnten grosse Mengen reaktiver Stickstoffverbindungen in Luft, Boden und Wasser emittiert und damit erhebliche Umweltschäden verursacht. Emissionen von Stickstoffverbindungen wie Ammonium/Ammoniak ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$) und Stickoxid⁹ (NO_x) in die Umwelt beeinträchtigen Menschen, Tiere und Pflanzen und ihre Lebensgemeinschaften. Lachgas (N_2O) und Stickstofftrifluorid (NF_3) sind starke Treibhausgase und tragen zur Klimaerwärmung bei. Nitrat (NO_3^-) – ein wichtiger Pflanzennährstoff – ist humantoxikologisch von Bedeutung (krebserregend in hohen Dosen) und trägt zur Überdüngung von Oberflächengewässern und flacher Meere (z.B. Nordsee) bei.

Daher sind Kenntnisse der Stickstoffflüsse und deren zeitlichen Verläufe relevant für den Schutz der menschlichen Gesundheit sowie für die Ernährungssicherheit, die Bodenfruchtbarkeit und die Biodiversität. Die umfassende Darstellung im N-Stoffflusssystem zeigt die Komplexität der Problematik und die Vielfältigkeit der Wechselwirkungen auf. Quantität und Qualität der Stickstoffflüsse zu kennen, ist Voraussetzung für Strategieentwicklung und Massnahmenplanung in der Landwirtschafts- und Forstwirtschaftspolitik, in Sozial- und Präventivmedizin sowie im Umwelt- und Klimaschutz.

Dass die bisher ergriffenen Massnahmen zur Minderung der Stickstoffemissionen aus der Landwirtschaft nicht immer den erwarteten Erfolg bringen, hat unter anderem mit der Wandelbarkeit der Stickstoff-Formen zu tun. Zudem können einseitige Vermeidungsstrategien zu Stickstoffverlusten in einem anderen Bereich führen (Zielkonflikte): Eine Reduktion der Ammoniakemissionen in die Atmosphäre bei der Düngerausbringung (z.B. durch emissionsarme Ausbringungstechniken) führt bei unveränderter Düngermenge zu einem höheren Stickstoffeintrag in die Böden und dadurch zu einem erhöhten Risiko von Stickstoffauswaschung in die Gewässer.

Mögliche Lösungsansätze und Massnahmen sind daher immer im Kontext des Gesamtsystems zu betrachten. Gelingt eine Optimierung der Nährstoffflüsse, verbessern sich der Zustand der Biodiversität, die Gewässerqualität im In- und Ausland, die Luftqualität und die Bodenqualität.

⁹ Stickoxide (NO_x) umfassen NO und NO_2

1.2. Frühere Studien

1993 wurde der Stickstoffhaushalt der Schweiz durch die Eidgenössische Gewässerschutzkommission umfassend analysiert und die Resultate vom damaligen Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (heute Bundesamt für Umwelt BAFU) publiziert (GSK 1993). In der Folge entwickelte eine von den beiden Eidgenössischen Departementen für Inneres und Volkswirtschaft eingesetzte „Projektgruppe Stickstoffhaushalt Schweiz“ eine Strategie zur Reduktion der Stickstoffemissionen in der Schweiz (BAFU 1996). Diese enthielt eine Stickstoffbilanz der Schweiz für das Jahr 1994, ökologische Ziele und ein Massnahmenpaket zur Reduktion der Stickstoffemissionen und deren ökonomische und ökologische Bewertung.

Im Jahr 2010 wurden die Stickstoffflüsse in der Schweiz neu ermittelt und mit der Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2005 basierend auf den neusten verfügbaren Sekundärdaten sowie Experteninterviews aktualisiert (BAFU 2010). Als Folgeprojekt wurde eine Prognose für das Jahr 2020 vorgenommen (BAFU 2013). Zudem wurden die Stickstoffflüsse in der Land- und Ernährungswirtschaft und deren Reduktionspotenziale vertieft untersucht (BLW 2013).

1.3. Umweltziele Landwirtschaft

2008 haben das BAFU und das BLW gemeinsame Umweltziele in der Landwirtschaft erarbeitet (BAFU/BLW 2008). Die Umweltziele beruhen auf bestehenden rechtlichen Grundlagen wie Gesetzen, Verordnungen, internationalen Abkommen und Bundesratsbeschlüssen und wurden gemäss wissenschaftlichen Erkenntnissen konkretisiert. Sie sind nicht terminiert. Bezüglich Stickstoffverbindungen wurden für die Landwirtschaft folgende Umweltziele festgelegt:

- Maximal 25 mg Nitrat pro Liter in Gewässern, die der Trinkwassernutzung dienen oder dafür vorgesehen sind und deren Zuflussbereich hauptsächlich von der Landwirtschaft genutzt wird.
- Die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft betragen maximal 25'000 Tonnen Stickstoff pro Jahr.
- Reduktion der landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer um 50 % gegenüber 1985.

Mit den bisherigen Massnahmen konnten die stickstoffbezogenen Umweltziele noch nicht erreicht werden (BAFU/BLW 2016). Die kritischen Eintragswerte für stickstoffsensitive Ökosysteme werden grossflächig überschritten (Meteotest 2019), die landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer sind weiterhin zu hoch (BAFU/BLW 2016) und um die Grenzwerte

für die Ozonkonzentration einhalten zu können, ist eine weitergehende Reduktion der Vorläufersubstanzen wie der Stickoxide notwendig. Zur Erreichung der langfristigen Klimaziele (Bundesrat 2021) müssen zudem die Lachgasemissionen weiter reduziert werden.

1.4. Aktuelle Entwicklungen und Auftrag

Postulat zur zukünftigen Ausrichtung der Agrarpolitik

Die Beratung der Botschaft zur Weiterentwicklung der Agrarpolitik ab 2022 (AP 22+) aus dem Jahr 2020 wurde im Frühling 2021 sistiert. Mit dem Postulat zur zukünftigen Ausrichtung der Agrarpolitik¹⁰ wurde das BLW unter anderem damit beauftragt, eine möglichst weitgehende Schliessung der Kreisläufe aller Nährstoffe über die gesamte Wertschöpfungskette inklusive Konsum vertieft zu prüfen. Der Postulatsbericht bildet die Grundlage für den Entscheid, ob die Beratung der AP22+ wieder aufgenommen wird.

Um die potenzielle Wirkung verschiedener Stickstoffminderungsmassnahmen abschätzen zu können, sind Datengrundlagen zu den heutigen Stickstoffflüssen notwendig. Verschiedene aktuell diskutierte Massnahmen können mit dem bestehenden Stoffflussmodell (BAFU 2010, BAFU 2013) nicht genügend detailliert untersucht werden, da diese Stickstoffflüsse nicht einzeln ausgewiesen sind. Beispielsweise sind die Stickstoffflüsse der biogenen Abfälle aus dem Konsum (Food Waste), der Vergärungsanlagen und der Schlachtnebenprodukte nicht ausreichend differenziert abgebildet. Zudem liegen für verschiedenen Stickstoffflüsse aktuellere Datengrundlagen vor, wie beispielsweise die Stickstoffbilanz der Schweizer Landwirtschaft, die Emissionen von stickstoffhaltigen Verbindungen in die Atmosphäre sowie die Stickstofffrachten aus Abwasserreinigungsanlagen und die Auswaschung in die Gewässer.

Auftrag zur Stoffflussanalyse Stickstoff

Das BLW hat INFRAS mit der Aktualisierung und Verfeinerung der Stoffflussanalyse beauftragt. Der vorliegende Bericht dokumentiert die Methodik und Systemgrenzen der Stoffflussanalyse, die verwendeten Datengrundlagen und zeigt die Resultate für das Jahr 2018.

Die Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2018 dient als Basis für die Beantwortung des Prüfauftrags «Möglichst weitgehende Schliessung der Nährstoffkreisläufe über die gesamte Wertschöpfungskette inklusive Konsum» des Postulats 20.3931 vom August 2020¹¹ zur zukünftigen Ausrichtung der Agrarpolitik. Adressaten des Berichts sind politische Entscheidungsträger, Landwirtschafts- und Umweltfachleute in öffentlichen Verwaltungen und Privatwirtschaft sowie Hochschulinstitute, die sich mit stickstoffrelevanten Themen befassen.

¹⁰ <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20203931>

¹¹ <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20203931>

Der Bericht fokussiert auf die Stickstoffflüsse im Bezugsjahr 2018 und beschreibt den aktuellen Stickstoffkreislauf in der Schweiz. Weiter zeigt er die wichtigsten Entwicklungen auf, die seit der letzten Untersuchung stattgefunden haben. Der Bericht kann als Grundlage dienen, um Risiken aufzuzeigen und Strategien zu entwickeln und um die Wirkung von Massnahmen grob abzuschätzen.

Themen im Fokus

Der Bundesrat hat den Auftrag des Postulat 20.3931 zukünftigen Ausrichtung der Agrarpolitik, eine möglichst weitgehende Schliessung der Kreisläufe aller Nährstoffe über die gesamte Wertschöpfungskette zu prüfen. Damit sind die Themen **Food Waste, Vergärung** und **Umgang mit Schlachtnebenprodukten** in den Fokus geraten. Im Rahmen der Stoffflussanalyse Stickstoff bietet sich an, die Stickstoffflüsse zu erfassen, die im Zusammenhang mit diesen Fokusthemen stehen. Basierend auf diesen quantifizierten Stickstoffflüssen kann abgeschätzt werden, welches mengenmässige Potenzial durch Massnahmen im Bereich der Fokusthemen grundsätzlich besteht, um den Einsatz von Stickstoff zu optimieren und unerwünschte Stickstoffverluste in die Umwelt zu reduzieren.

1.5. EU/Deutschland

Nitrat-Richtlinie der EU

Im Dezember 1990 hat der Rat der EG die Richtlinie 91/676/EWG (Nitrat-Richtlinie)¹² zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigungen durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen verabschiedet. Hintergrund sind die hohen Belastungen des Grundwassers, verursacht durch intensive Bodennutzungen und diffuse Stoffeinträge aus landwirtschaftlicher Nutzung. Viele Grundwasservorkommen und damit auch Trinkwasserfassungen liegen in landwirtschaftlichem Gebiet, woraus zum einen ein wirtschaftlicher Nutzungskonflikt, zum andern ein Interessenskonflikt mit den Anforderungen des Gewässerschutzes resultiert.

Die Richtlinie schreibt für Mitgliedstaaten eine gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft vor, welche mittels Programmen und Grenzwerten umgesetzt werden soll. Konkret werden die Mitgliedstaaten verpflichtet, den Einsatz von Dünger in nitratvulnerablen Zonen derart einzuschränken, dass der Stickstoffeintrag pro Hektar maximal 170 kg beträgt (d.h. nach Abzug der unvermeidbaren Verluste). Gemäss der Richtlinie gelten Gewässer als gefährdet, wenn Grundwasser mehr als 50 mg Nitrat/l enthält (EG 1991).

¹² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex%3A31991L0676>

Stoffflussanalyse Stickstoff in Deutschland

Deutschland setzte sich in den letzten Jahren intensiv mit der Problematik der übermässigen Stickstoffeinträge in die Umwelt auseinander. Vor kurzem wurde die Stoffflussanalyse der reaktiven Stickstoffverbindungen aktualisiert (UBA 2020a). Zudem wurde ein nationales, über alle Schutzziele integriertes Reduktionsziel für die Stickstoffeinträge in die Umwelt hergeleitet (UBA 2020b) und Massnahmenvorschläge für ein Aktionsprogramm zur Stickstoffminderung entwickelt (UBA 2021).¹³

2. Stickstoff in der Umwelt

2.1. Stickstoffverbindungen

Stickstoff macht vier Fünftel unserer Atemluft aus und liegt dort als zweiatomiges Molekül N_2 in elementarem Zustand vor. Luftstickstoff ist schwerlöslich und reaktionsträge. Unter hoher Energiezufuhr oder über biologische Prozesse kann elementarer Stickstoff in reaktive Formen überführt werden und so eine grosse Zahl verschiedener chemischer Bindungen eingehen. In der Natur existieren sieben Oxidationsstufen von Stickstoff, die in einem komplexen Kreislauf ineinander umgewandelt und zwischen verschiedenen Umweltkompartimenten ausgetauscht werden (Abbildung 2). Neben dem unreaktiven (N_{nr}) Luftstickstoff N_2 finden sich reaktive (N_r) Stickstoffverbindungen, welche ökologisch relevant sind (Tabelle 1).

Tabelle 1: Stickstoffverbindungen

Stickstoffverbindung	Chemische Eigenschaft	Hauptquelle/Entstehung	Auswirkungen
N_2 Luftstickstoff	Gasförmig, nicht reaktiv	<ul style="list-style-type: none"> 78 % der Atemluft 	<ul style="list-style-type: none"> Keine
Organisch gebundener Stickstoff $R-NH_2$	Mässig reaktiv, durch Mikroben umgesetzt	<ul style="list-style-type: none"> Biologische Prozesse 	<ul style="list-style-type: none"> Freisetzung von N beim biologischen Abbau von Biomasse in den Gewässern (Sauerstoffzehrung) oder Boden
NO_x (NO , NO_2) Stickoxide (Stickstoffmonoxid, -dioxid), Peroxycetylnitrat PAN	Gasförmig, reaktiv	<ul style="list-style-type: none"> Verbrennungsprozesse, insbesondere im Verkehr und der Industrie NO_2, PAN sind Sekundärschadstoffe, die durch atmosphärische Reaktionen aus NO entstehen 	<ul style="list-style-type: none"> Bildung von bodennahem Ozon und weiteren Photooxidantien durch chemische Reaktionen mit VOC Bildung von Aerosolen Erkrankung der Atemwege Eutrophierung von Ökosystemen Versauerung von Ökosystemen
NH_3 / NH_4^+ Ammoniak/Ammonium(ion)	NH_3 gasförmig, reaktiv	<ul style="list-style-type: none"> Nutztierhaltung in der Landwirtschaft (Umgang mit Hofdüngern) 	<ul style="list-style-type: none"> Eutrophierung von Ökosystemen Versauerung von Ökosystemen Bildung von sekundären Aerosolen

¹³ Für weitere Informationen zu früheren Studien zum Thema Stickstoff, siehe BAFU 2010, Kap. 1.4.

Stickstoffverbindung	Chemische Eigenschaft	Hauptquelle/Entstehung	Auswirkungen
	NH ₄ ⁺ wasserlöslich, reaktiv	<ul style="list-style-type: none"> Herstellung und Anwendung von Düngemitteln Abwassereinleitung in Oberflächengewässer 	<ul style="list-style-type: none"> Fischgift
N ₂ O Lachgas	Gasförmig, reaktiv	<ul style="list-style-type: none"> Mikrobielle Umwandlungsprozesse in Böden und Gewässern (Denitrifikation) Landwirtschaftliche Produktion Bodenverdichtung Industrieprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> Starkes Treibhausgas (298-mal stärker als CO₂) Beitrag zur Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht (Erhöhung der Hautkrebs- und Mutationsrate)
NO ₃ ⁻ Nitrat(ion)	Wasserlöslich, reaktiv	<ul style="list-style-type: none"> Oxidationsprodukt aus Stickoxiden, organischen N-Verbindungen und aus Ammonium / Ammoniak (Umgang mit Hof-, Recycling- und Mineraldüngern) Ackerbau, Bodenbearbeitung, Umbruch von Grasland, Gemüsebau Industrie- und Kommunalabwässer 	<ul style="list-style-type: none"> Belastung von Grund- und Oberflächengewässern Gesundheitsprobleme bei stark belastetem Trinkwasser (Bildung von Nitrosamin) Eutrophierung von Ökosystemen Belastung von Meeres- und Küstenökosystemen
NO ₂ ⁻ Nitrit(ion)	Wasserlöslich, kurzlebig, reaktiv	<ul style="list-style-type: none"> Zwischenprodukt bei der Nitrifikation von Ammonium zu Nitrat in Böden und Gewässern 	<ul style="list-style-type: none"> Fischgift

Die wichtigsten Stickstoffverbindungen in der Umwelt, ihre Eigenschaften, Quellen und Auswirkungen. Es gibt weitere Verbindungen, die aufgrund ihres geringeren Vorkommens in der Tabelle nicht aufgeführt sind (z. B. Salpetersäure).

Tabelle INFRAS. Quelle: BAFU 2010

2.2. Stickstoffreservoirs

Atmosphäre

Die Luft besteht zu 78 % aus Stickstoff in Form des stabilen, elementaren Stickstoffs (N₂). Daneben gibt es verschiedene reaktive Spurengase mit Stickstoffanteilen wie z. B. Stickoxide (NO_x), Ammoniak (NH₃) und das Lachgas (N₂O), das wegen seiner Wirkung als Treibhausgas bedeutsam ist.

Erdkruste, Sedimente, Böden

Obwohl der Stickstoffgehalt der Ausgangsgesteine sehr gering ist, findet sich dort der überwiegende Teil, rund 80 % des Gesamtorkommens unseres Planeten. In der organischen Substanz (Humus) der Böden kommt nur rund 0.05% der gesamten Stickstoffmenge vor. Dieser Anteil ist nur über Abbauprozesse bioverfügbar. Der organisch gebundene, schwerlösliche Bodenstickstoff macht mehr als 90 % des Stickstoffgehalts eines Bodens aus. Reaktiver Stickstoff kommt

vor allem über die Zersetzung abgestorbener Biomasse in den Boden. Die Pflanzen können diesen Stickstoff nutzen, indem sie ihn in Form von Nitrat oder Ammonium über die Wurzeln aufnehmen (GSK 1993). Nitrat ist im Boden sehr mobil und kann insbesondere im Herbst nach der Ernte und bei starken Niederschlägen mit dem Sickerwasser in das Grundwasser verlagert werden. Wie schnell, hängt von den Bodeneigenschaften ab. Teile des Stickstoffs entweichen auch in die Luft, werden mit dem Wind weitergetragen und vom Regen anderswo deponiert (UBA 2022).

Überschüssiger Stickstoff verändert die Bodenchemie und führt zu Versauerung. Wichtige ausgleichende Nährstoffe, wie Magnesium, Kalzium und Kalium gehen dadurch verloren. Bodenorganismen wie Regenwurm- und Pilzarten werden verdrängt. Auch Mykorrhiza-Pilze, die mit vielen Pflanzen in Symbiose leben, reagieren sehr empfindlich auf Stickstoffüberschüsse, was sich negativ aufs Pflanzenwachstum auswirkt. Hinzu kommt, dass Pflanzen bei Überdüngung das Wurzelwachstum reduzieren und mehr Energie in das Wachstum der oberirdischen Pflanzenteile stecken (UBA 2022).

Hydrosphäre

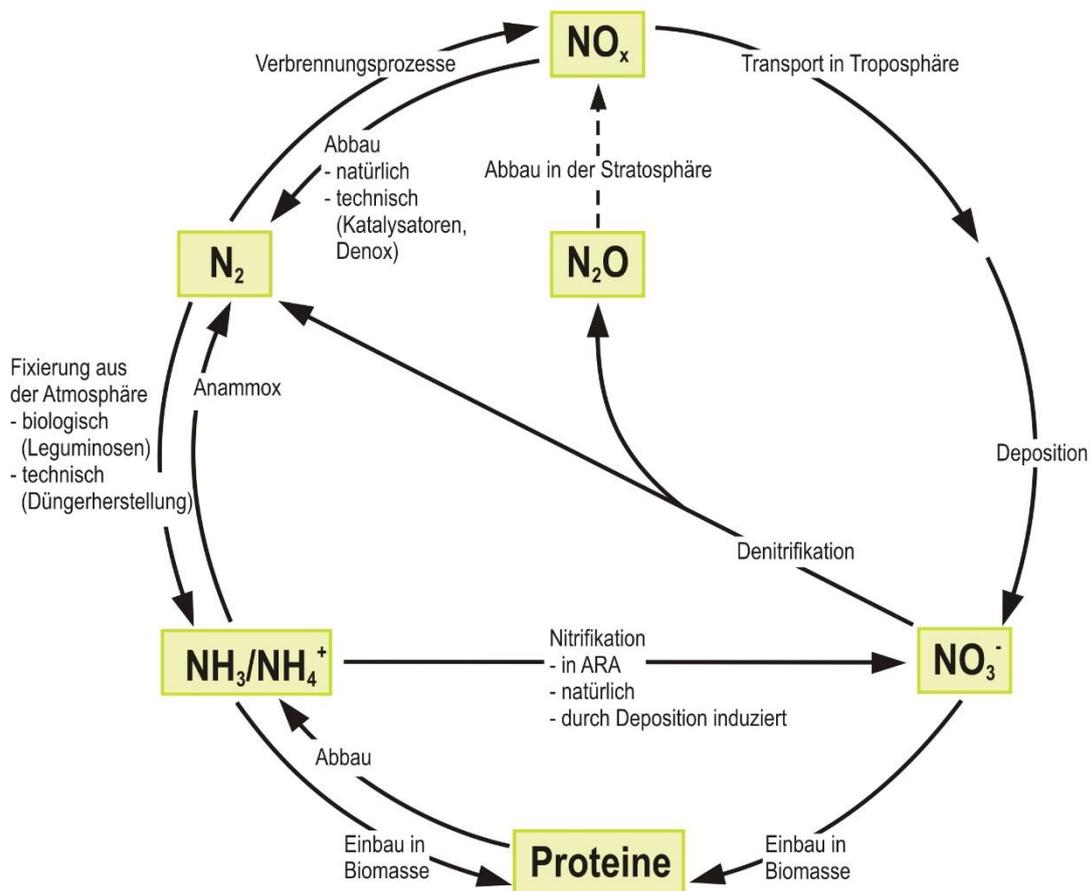
In Flüssen liegt der Stickstoff vorwiegend als Nitrat (NO_3^-) vor. Weitere mineralisierte Formen (Nitrit NO_2^- , Ammonium NH_4^+) finden sich in naturnahen Gewässern nur in Spuren. Der Rhein enthält beispielsweise 1.34 mg/l Nitrat-Stickstoff und 1.47 mg/l N tot bei Weil am Rhein (Rheinüberwachungsstation RÜS am Ausgang der Schweiz). Dies als Mittelwert der letzten 10 Jahre bei einem durchschnittlichen Abfluss von 1020 m³/s (NADUF 2021).

Biomasse

Stickstoff ist ein essenzielles Element für alle Lebensformen, z.B. als Rohstoff für die Biosynthese von Aminosäuren. In allen Lebewesen zirkulieren nur etwa fünf Millionstel des gesamten Stickstoffvorkommens der Erde und doch gilt: Ohne Stickstoff kein Leben. Seine chemische Eigenart ermöglicht die Kombination von nur etwa zwanzig Aminosäuren zu einer fast unendlichen Anzahl verschiedener Eiweisse. Aus dem an sich reaktionsträgen Stickstoff N_2 entstand somit die grosse Artenvielfalt aller Lebensformen und dieses chemische Element ist Baustein für den Hauptnährstoff aller Lebewesen (GSK 1993).

2.3. Umwandlungsprozesse

Abbildung 2: Umwandlungsprozesse



Vereinfachte schematische Darstellung der wesentlichen Umwandlungsprozesse im Stickstoffkreislauf. Im Kreislauf durchläuft Stickstoff verschiedene Umweltkompartimente und Oxidationszustände. N₂, N₂O, NO_x und NH₃ emittieren in die Luft. Die Anaerobe Ammonium Oxidation (Anammox) läuft wie die Denitrifikation unter anaeroben Bedingungen ab.

Quelle: BAFU 2010

Stickstoff-Fixierung aus der Atmosphäre (biologisch, technisch)

- Biologische N-Fixierung:** Spezialisierte Mikroorganismen (Bakterien und Blaualgen in Böden und Gewässern) können den reaktionsträgen Luftstickstoff N dank des Enzyms Nitrogenase zum Aufbau von Körpereiwiss benutzen und somit für Pflanzen und in der Folge für Tiere und Menschen verfügbar machen. Für die Landwirtschaft am wichtigsten sind die Bakterien der Gattung Rhizobium. Sie leben in Wurzelknöllchen von stickstofffixierenden Pflanzen (Leguminosen, z. B. Erbsen, Bohnen, Klee, Luzerne), in gegenseitig abhängigen Lebensgemeinschaften (Symbiosen).

- Technische N-Fixierung: Mit Hilfe des energieintensiven Haber-Bosch-Verfahrens wird Luftstickstoff zu Ammoniak synthetisiert, teilweise weiter umgewandelt und als Mineraldünger eingesetzt. Der Prozess verläuft nach der gleichen Bruttoformel wie die biologische N-Fixierung: $N_2 + 3 H_2 \rightarrow 2 NH_3$. Die Herstellung von Mineraldünger ist sehr energieintensiv, da der Fixierungsprozess viel Aktivierungsenergie benötigt.

Stickoxid-Bildung

- Verbrennungsprozesse / Anthropogene Stickoxid-Bildung: Bei Verbrennungsprozessen in Industrie und Gewerbe, beim Betrieb von Hausfeuerungen (Heizungen), bei der Abfallverbrennung und im Verkehr (Motoren) entstehen Stickoxide als unerwünschte Nebenprodukte. Die Menge ist abhängig von der Verbrennungstemperatur und von der technischen Ausstattung der Brennkammern respektive von Nachbrennsystemen und Katalysatoren. In fossilen Brenn- und Treibstoffen ist Stickstoff nur spurenweise vorhanden – fast der gesamte Stickstoff der NO_x -Emissionen stammt aus dem Luftstickstoff.
- Natürliche Stickoxid-Bildung: Durch elektrische Entladungen, vor allem Blitze, wird Luftstickstoff (N_2) zu Stickoxiden (NO und NO_2) oxidiert.

Nitrifikation

Nitrifikation ist der Prozess, bei dem Mikroorganismen (Nitrosomas, Nitrobacter) in Böden und Gewässern zur Energiegewinnung Ammonium (NH_4^+) in Nitrit (NO_2^-) und nachfolgend zu Nitrat (NO_3^-) umwandeln. Optimale Bedingungen für diesen Prozess sind relativ hohe pH-Werte, Temperaturen von 25-35 °C, sowie eine hohe Sauerstoff- und Ammoniumversorgung. Die Nitrifikation kann sowohl in natürlichen Systemen (Böden, Gewässer) als auch technischen Systemen ablaufen (z.B. in Abwasserreinigungsanlagen). Nitrat ist die wichtigste Form, in der Pflanzen Stickstoff aufnehmen.

Der umgekehrte Prozess, die Reduktion von Nitrat zu Ammonium (Nitratammonifikation) wird ebenfalls von Bakterien bewerkstelligt, ist aber quantitativ von untergeordneter Bedeutung (GSK 1993).

Denitrifikation

Die Denitrifikation ist der Prozess bei dem Nitrat (NO_3^-) und Nitrit (NO_2^-) von Bakterien in die gasförmigen N-Verbindungen Stickstoffmonoxid (NO), Lachgas (N_2O) und elementarer Stickstoff (N_2) umgewandelt werden. Die Denitrifikation läuft vorwiegend biochemisch, teilweise aber auch chemisch ab. Unter anaeroben Bedingungen nutzen einige Mikroorganismen NO_3^- zur Atmung (als Elektronenakzeptor), wobei NO_3^- reduziert wird:



Da dieser Prozess unter anaeroben Bedingungen abläuft, tritt die Denitrifikation vor allem in schweren, verdichteten und schlecht drainierten Böden sowie in stau- oder grundwasserbeeinflussten Böden auf (GRUD 2017). Zudem findet die Denitrifikation in Abwasserreinigungsanlagen und anaeroben Gewässern (Sedimenten) statt. Nährstoffreiche (eutrophe) Seen vermögen mittels Denitrifikation einen grossen Teil der zugeführten Stickstofffracht zu eliminieren. In Kläranlagen wird der Denitrifikationsprozess gezielt eingesetzt, um Nitrat aus dem Abwasser zu entfernen und als Luftstickstoff in die Atmosphäre zurückzuführen, wodurch die Gewässer entlastet werden.

Nitrat-Auswaschung und Abschwemmung

Da Nitrat sehr gut wasserlöslich ist und selten seine gesamte verfügbare Menge im Boden von den Pflanzen aufgenommen wird, wird das überschüssige Nitrat mit den versickernden Niederschlägen ins Grundwasser ausgewaschen. Dabei belastet es das Trinkwasser. Nitrat gelangt auch über Oberflächenabfluss und über das Grundwasser in Fliessgewässer und Seen und schliesslich ins Meer (GSK 1993, BAFU/BLW 2016). Die präferenzielle Auswaschung von dem im Boden gebildeten oder zugeführten Nitrat ins Grundwasser wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Sickerwassermenge
- Art und Dauer des Bewuchses (resp. nicht bewachsener Boden-Anteil)
- Bodenart und -durchlässigkeit (Wasser-Rückhaltevermögen), die abhängig ist von Humusgehalt, biologischer Aktivität (N-Fixierung und N-Mineralisierung), Bodenbearbeitung und Drainage
- Menge Stickstoff im Boden: Aktuelle und vergangene Anwendung von stickstoffhaltigen Düngern (Hofdünger, Recyclingdünger, Mineraldünger), sowie biologische Stickstofffixierung

Die höchsten Auswaschungsverluste treten in der vegetationslosen Zeit (Herbst, Winter) oder zu einem Zeitpunkt geringen Stickstoffbedarfs im Frühjahr und besonders bei leichtem (sandigen) Boden auf. Untersaaten, Gründünger- bzw. Zwischenfütteranbau können durch die Aufnahme von Stickstoff die Auswaschungsverluste entscheidend vermindern.

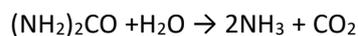
Chemische Fixierung an Bodenpartikel

Alle Stickstoffformen im Boden können kurz- oder langfristig an Ton, Humus und Ton-Humus-Komplexe angelagert werden (Adsorption). Als Humus wird die organische Substanz eines Bo-

dens bezeichnet. Tone sind Mineralienbestandteile verschiedener chemischer Zusammensetzung mit einem Korndurchmesser bis zu 2 μ ($1 \mu = 1/1000 \text{ mm}$). Negativ geladene Nitrationen werden – im Gegensatz zu Ammoniumionen (NH_4^+), Eiweissen und anderen Stickstoffverbindungen – nur zu einem sehr geringen Anteil adsorbiert und daher schnell ausgewaschen, wenn genügend Sickerwasser vorhanden ist (Nitrat-Auswaschung) (GSK 1993).

Ammoniak-Verflüchtigung

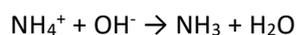
Die weitaus wichtigste Emissionsquelle für Ammoniak ist die Nutztierhaltung. Ammoniak entsteht, wenn das Enzym Urease im Kot mit dem Harnstoff im Urin der Nutztiere in Kontakt kommt. Die Bildung von Ammoniak aus Harnstoff erfolgt über folgende Reaktionsgleichung:



Die verschiedenen Verlustbereiche lassen sich folgendermassen aufteilen:

- Stallverluste von der Ausscheidung der Tiere.
- Lagerverluste aus Miststöcken oder Güllegruben.
- Verluste direkt beim Ausbringen des Düngers (Transport und Verteilen).

Ammoniak verflüchtigt sich zudem gemäss folgender Reaktionsgleichung aus Böden:



Die Verflüchtigung nimmt mit steigendem pH-Wert in der Bodenlösung zu, ebenso mit steigender Temperatur, Bodendurchlüftung und Windbewegung zur Oberfläche. Alle Ammoniakverluste sind bei höheren Temperaturen grösser. Im Freien beeinflussen zudem die Windverhältnisse das Ausmass der Verflüchtigung (GSK 1993).

Einbau in Biomasse

- Immobilisierung: Unter Immobilisierung wird die Überführung anorganischer Formen, v.a. Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-) in organische Verbindungen (v.a. Proteine) im Boden verstanden. Sie erfolgt durch den Einbau von Stickstoff in die Körpersubstanz von Mikroorganismen (GSK 1993).
- Aufnahme durch Pflanzen (Absorption und Assimilation): Pflanzen nehmen Stickstoff vor allem über die Wurzeln auf, in Form von Nitrat oder Ammonium. Über die Spaltöffnungen der Blätter können auch gasförmige Verbindungen aufgenommen werden (Stickoxide, Ammo-

niak), ebenfalls ist eine Blattdüngung mit bestimmten N-Verbindungen möglich. Der Grossteil des Stickstoffs wird für den Aufbau von Eiweissen verwendet. Der N-Gehalt der meisten Pflanzen beträgt 2–4 % in der Trockenmasse. Gewisse Pflanzen neigen bei einem Überangebot an Nitrat zu einer Akkumulation dieses Nährsalzes, was bei der Aufnahme mit der Nahrung Gesundheitsprobleme bei Mensch und Tier ergeben kann (GSK 1993).

Aufnahme durch Tiere/Menschen

Die Aufnahme organischer Stickstoffverbindungen erfolgt hauptsächlich in Form von Eiweissen über pflanzliche und tierische Nahrung. Für Trinkwasser gilt ein Toleranzwert von 40 mg/l (TBDV) und ein Grenzwert von 25 mg/l (GSchV). Der Toleranzwert wird praktisch überall in der Schweiz eingehalten¹⁴, der Grenzwert wurde in den letzten Jahren schweizweit jedoch an 12 bis 15% der Grundwasser-Messstellen des NAQUA-Messnetzes überschritten. Für Nitrit (Pökelleware) gelten ebenfalls strenge Grenzwerte, die die Aufnahme auf ein unvermeidliches Minimum reduzieren sollen (in der Kontaminantenverordnung VHK gibt es Höchstgehalte an Nitrat für verschiedene Lebensmittel). Nitrat ist in den Dosen, die üblicherweise vom Menschen aufgenommen werden, nicht giftig, in hohen Konzentrationen jedoch unerwünscht, denn es kann im Stoffwechsel zu Nitrit reduziert werden und trägt dann zur Bildung kanzerogener Nitrosamine (N-Nitroso-Verbindungen) bei, die im Dickdarm Krebs verursachen können (BLV 2021).

In der Umgebungsluft sind viele Stickstoffverbindungen für die Gesundheit des Menschen von Bedeutung, insbesondere Stickstoffdioxid, Peroxyacetylnitrat (PAN), Nitrat und Ammonium. Die zwei letzten sind Bestandteile von Feinstaubpartikeln. Stickstoffdioxid führt zu Entzündungen der Atemwege und verstärkt die Reizwirkung von Allergenen. Stickstoffverbindungen, im wesentlichen Ammoniak und Stickoxide sind zudem wichtige Vorläuferstoffe für die Bildung von sekundären Aerosolen, die Bestandteil von lungengängigem Feinstaub sind (EKL 2005). Eine chronisch erhöhte Feinstaubbelastung führt zu mehr Herz-/Kreislauf- und Atemwegserkrankungen in der Bevölkerung und verkürzt deren Lebenserwartung (EKL 2005). Indirekt sind Stickoxide auch als Vorläufersubstanzen für die Bildung des gesundheitsschädigenden Ozons toxikologisch relevant.

Aufnahme durch Boden- und Wasserorganismen

Abgestorbene organische Substanz wird beim Abbau in die Biomasse von Boden- und Wasserorganismen (Destruenten) aufgenommen. Die organische Substanz stammt aus Streustoffen

¹⁴ Ausnahmen gibt es bei Wasserfassungen unter ackerbaulicher Nutzung, d.h. im Mittelland bei ca. 12% der Messstellen. Aufgrund von Überschreitungen des Toleranzwertes mussten schon mehrere Trinkwasserfassungen geschlossen werden; diese tauchen dann in der Standardstatistik nicht mehr auf (Expertenangaben).

(Laub, abgestorbene Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen, Losung), abgestorbener Wurzelmasse, und in landwirtschaftlichen Gebieten zusätzlich aus Ernterückständen, Gründünger, Hofdüngern, Klärschlamm Kompost, Gärgut und anderen organischen Handelsdüngern.

Der grösste Teil des von Menschen ausgeschiedenen Stickstoffs wird in der Schweiz in Kläranlagen von Mikroorganismen zu Luftstickstoff denitrifiziert oder gelangt in die Oberflächengewässer.

Humifizierung und Mineralisierung

Bei der Humusbildung (Humifizierung) wird abgestorbene organische Substanz im Boden durch Witterung und Zersetzung durch Bodentiere und Mikroorganismen in schwer abbaubare Zwischenprodukte (Huminstoffe) umgewandelt. Diese machen zusammen mit noch schwach umgewandelten Streustoffen den Humus aus.

Beim Humusabbau (Mineralisierung) werden die verschiedenen organischen Stickstoffverbindungen des Humus über Zwischenstufen zu Ammonium abgebaut. Das so entstandene Ammonium (NH_4^+) kann von Pflanzen und Mikroorganismen zum Aufbau von Körpersubstanz (vor allem Eiweissen) aufgenommen werden. Es kann auch an Tonbestandteile angelagert oder zu Nitrat (NO_3^-) oxidiert werden. Bei hohem Boden-pH-Wert wird es zu Ammoniak (NH_3) umgewandelt, welches sich verflüchtigen kann.

Deposition aus der Atmosphäre

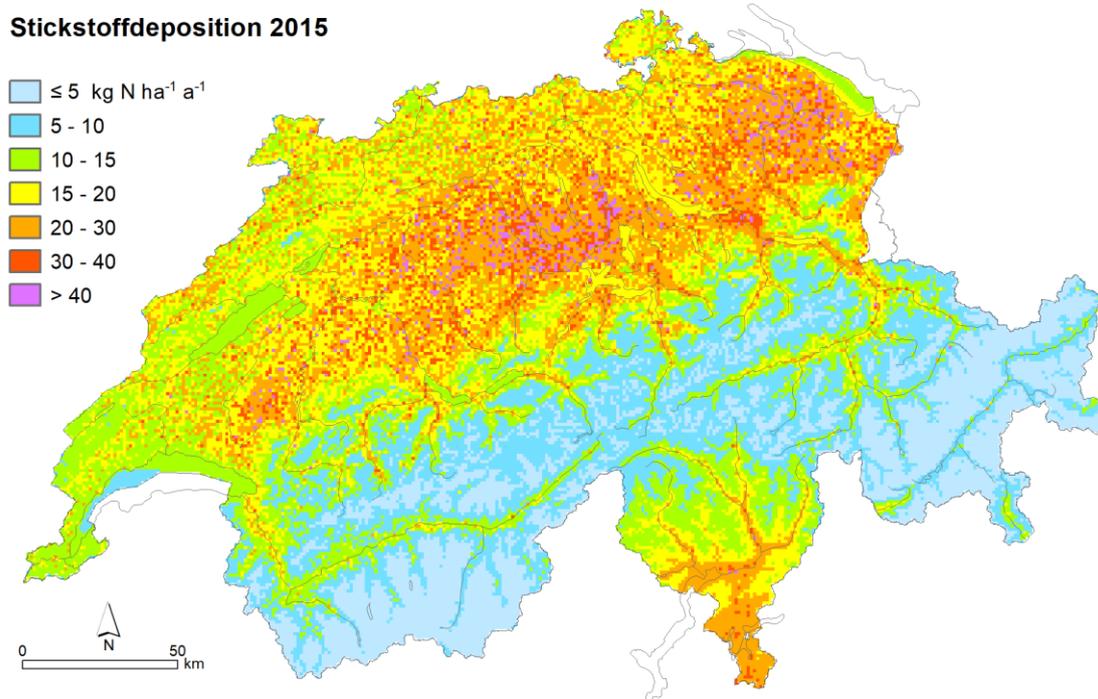
Stickoxide und Ammoniak unterliegen in der unteren Atmosphäre (Troposphäre) vielfältigen, gekoppelten (photo-)chemischen Reaktionen, wobei weitere Spurenstoffe beteiligt sind und neue, sekundäre Schadstoffe entstehen (z. B. Salpetersäure, Nitrat, Ozon). Der in die Luft emittierte reaktive Stickstoff (ausser Luftstickstoff N_2) kommt in irgendeiner Form früher oder später wieder auf die Erdoberfläche zurück. Die Deposition kann gasförmig, trocken (an Staubpartikeln angelagert) oder nass (Niederschläge) erfolgen.

Faktoren, welche die Depositionsgeschwindigkeit beeinflussen sind die Stickstoffkonzentration in der Luft (abhängig von Quellennähe, Witterung, Höhenlage u.a.), die Oberflächenbeschaffenheit der Depositionsfläche (Bewuchsart, Boden und Gesteinsart, Zeitpunkt in der Vegetationsperiode etc.), saisonale Unterschiede (z. B. Schneedecke) und die Witterung (Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Niederschlagsmengen usw.). Je nach chemischer Form, Aggregatzustand und Art des Zusammenwirkens obiger Faktoren kann die Depositionsgeschwindigkeit für stickstoffhaltige Luftschadstoffe bis um etwa das Zwanzigfache variieren.

In Abbildung 3 ist die räumliche Verteilung der Deposition von oxidierten und reduzierten Stickstoffverbindungen in der Schweiz für das Jahr 2015 wiedergegeben. Die höchsten Deposi-

tionen sind im schweizerischen Mittelland bis zu den Voralpen und auf der Alpensüdseite anzutreffen. Neben den Emissionen im Inland tragen auch die über die Atmosphäre importierten Stickstoffverbindungen (v.a. NO_x wird grossräumig verfrachtet und zu einem geringeren Teil auch NH₃) zur Deposition bei. Gleichzeitig wird ein Teil der inländischen Stickstoffemissionen in die Atmosphäre ins Ausland verfrachtet (siehe Abbildung 16).

Abbildung 3: Stickstoff-Depositionen: Jahressumme 2015



Gesamte Deposition von Stickstoff im Jahr 2015.

Grafik INFRAS. Quelle: Meteotest 2019

3. Systemanalyse Stickstoff

3.1. Land- und Forstwirtschaft

In der Landwirtschaft wird zusätzlich zum natürlichen Umsatz Stickstoff zugeführt, um die Produktivität der Kulturen zu steigern und damit die Nahrungsmittelversorgung der Bevölkerung sicher zu stellen. Diese Zufuhr von Stickstoff geschieht einerseits durch biologische Stickstofffixierung in Form von Leguminosen (Schmetterlingsblütler), zu denen wichtige Kulturpflanzen

wie Klee, Soja, Bohne und Erbsen gehören. Andererseits werden in der Landwirtschaft Hofdünger aus der Tierproduktion, Recyclingdünger sowie industriell hergestellte mineralische Stickstoffdünger eingesetzt.

Durch die Verwendung von Hofdünger wird ein Teil des Stickstoffs landwirtschaftsintern wiederverwertet. Allerdings besteht im Stall und bei der Lagerung und der Ausbringung von Hofdünger ein grosses Verlustpotenzial für Ammoniak und andere N-Verbindungen. Hohe Verluste können die kritischen Stickstoff-Eintragsraten der umliegenden Ökosysteme überschreiten, was zu Eutrophierung und Versauerung und dadurch zu irreversiblen Veränderungen in der Artenzusammensetzung führt.

Stickstoffverluste können zwar durch technische Massnahmen teilweise vermieden werden, das Risiko von N-Verlusten durch Auswaschung, Abschwemmung und Erosion lässt sich jedoch nicht auf null reduzieren.

Im Vergleich zu anderen Sektoren wird heute innerhalb der Landwirtschaft im Zusammenhang mit der Nahrungsmittelproduktion weitaus am meisten Stickstoff umgesetzt. Ein Teil des Stickstoffs geht aus landwirtschaftlichen Produktionssystemen verloren, insbesondere durch die Emission von Ammoniak (NH_3) und die Auswaschung von Nitrat (NO_3^-) ins Grundwasser sowie die Bildung von Lachgas (N_2O) und nicht umweltrelevantem N_2 .

Diese Stickstoffverluste nehmen mit der Intensivierung des Stickstoffkreislaufs zu. Dies führt dazu, dass unter heutigen Bedingungen in der Schweiz durchschnittlich nur 35 % (Mittelwert 2017-2019) des Stickstoffs aus Düngern, biologischer Fixierung und atmosphärischer Deposition in pflanzliche und tierische Produkte gelangen (N-Effizienz der Landwirtschaft, OSPAR 2021). Der Rest, also 65%, geht an die Umwelt verloren oder bleibt im Boden als Vorrat vorhanden. Anders als in der Landwirtschaft dürfen in der Schweizer Forstwirtschaft keine Düngemittel eingesetzt werden. Durch atmosphärische Deposition von Stickstoffverbindungen wurden die Stickstoffeinträge in Wäldern dennoch intensiviert. Die Auswirkungen der Stickstoffeinträge in die Umwelt sind in Kapitel 3.3 beschrieben.

3.2. Produkteherstellung und Produktenutzung

Durch die Verbrennung fossiler Energieträger, speziell die Verbrennung von Treibstoffen in Automotoren oder Heizöl in Feuerungsanlagen, entstehen Stickoxidemissionen (NO_x), welche direkt an die Atmosphäre abgegeben werden. Der Stickstoff stammt zum grössten Teil aus dem Luftstickstoff und nur zu einem geringen Teil aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff (Heizöl extra-leicht enthält ca. 0.01 % N). Auch in industriellen Produktionsprozessen und der Lebensmittelverarbeitung können stickstoffhaltige Luftschadstoffe oder Lachgas entstehen, letzteres zum Beispiel als Langezeit unbekanntes Abfallprodukt bei der Niacin-Herstellung der Firma Lonza.

Mit dem Abfall und Abwasser aus dem Konsum von Lebensmitteln gelangen Stickstoffverbindungen in die Abfallwirtschaft.

3.3. Umwelt

Eutrophierung terrestrischer Ökosysteme

Emissionen von Stickoxiden und Ammoniak aus anthropogenen Aktivitäten (Landwirtschaft, Verkehr etc.) werden in der Atmosphäre über unterschiedliche Distanzen verfrachtet, umgewandelt und schliesslich in naturnahe Ökosysteme eingetragen (BAFU 1996, EKL 2005). Stickoxide gelangen durch Trockendeposition oder in Form von Nitrat über Niederschläge auf die Erdoberfläche. Über die verschiedenen Depositionspfade wird den Ökosystemen zusätzlicher Stickstoff zugeführt.

Wasserlösliche Stickstoffverbindungen werden durch Auswaschung und Abschwemmung von angrenzenden Böden in Grund- und Oberflächengewässer eingetragen. Die Folgen sind eine Überdüngung (Eutrophierung) und Versauerung dieser Ökosysteme mit vielfältigen Langzeitauswirkungen auf Vegetation und Fauna (Biodiversität), Struktur und Funktion. Zu den empfindlichen Ökosystemen gehören Wälder, artenreiche Naturwiesen und Trockenrasen, Hochmoore, Flachmoore, Heidelandschaften und nährstoffarme Stillgewässer (EKL 2005).

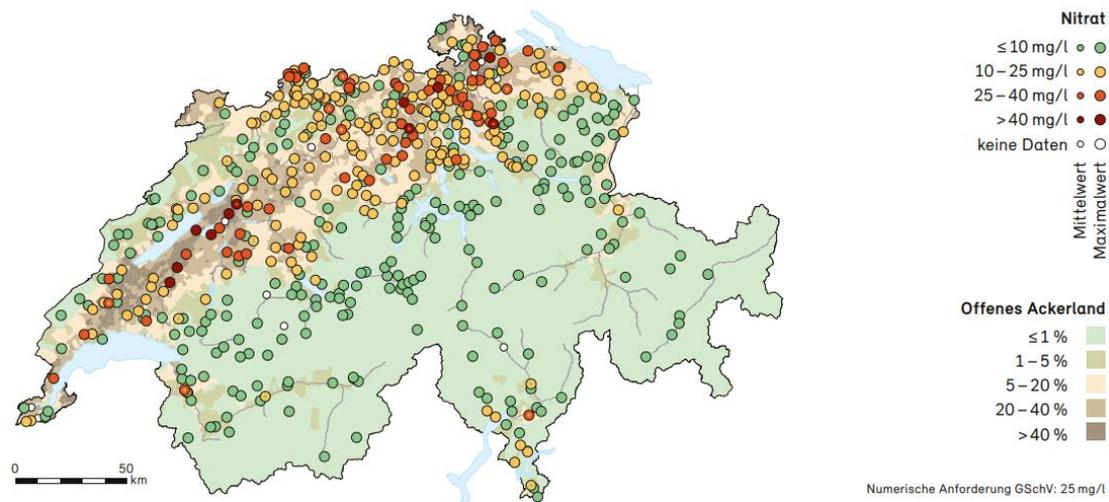
Versauerung terrestrischer Ökosysteme

Die atmosphärische Deposition von oxidierten und reduzierten Stickstoffverbindungen (NO_x und NH_y) verursacht in empfindlichen terrestrischen Ökosystemen nicht nur eine Überdüngung, sondern trägt, zusammen mit der Schwefeldeposition, auch zur Bodenversauerung bei. Die Säurekonzentration wird durch Protonen produzierende Prozesse bei der Umsetzung des eingetragenen Stickstoffs im Boden erhöht, d.h. bei der N-Aufnahme durch die Pflanzen und der Mineralisierung der organischen Substanz. Gleichzeitig verarmt der Boden an pflanzenverfügbaren Nährstoffen Kalzium, Kalium und Magnesium (IAP 2009).

Gewässer

Grundwasser entsteht dadurch, dass Niederschläge versickern oder Wasser im Uferbereich von Oberflächengewässern (Flüsse, Seen) in den Untergrund infiltriert. Bei der Bodenpassage im Bereich der ungesättigten Zone finden physikalische, chemische und mikrobiologische Prozesse statt. Unter Ackerbau und insbesondere Gemüsebau ist die Nitratauswaschung höher als unter Grasland. Entsprechend erreichen in Gebieten, die überwiegend von Acker- oder Gemüsebau geprägt sind, in den letzten Jahren mehr als 40% der Messstellen die Anforderung von 25 mg/l. (Abbildung 4, BAFU 2019).

Abbildung 4: Nitrat im Grundwasser (2014) sowie offenes Ackerland



Höchstwert und Mittelwert der Nitrat-Konzentration pro NAQUA-Messstelle. Anteil offenes Ackerland pro Gemeindefläche.

Grafik BAFU 2019. Quelle: BAFU 2019

In Fließgewässern und Seen konnte in den 70er und 80er Jahren eine deutliche Zunahme des Nitratgehaltes festgestellt werden. In den neunziger Jahren fand eine Abschwächung statt (Mengis und Wehrli 1998). Ein Teil dieses N-Eintrages in Gewässer geschieht durch atmosphärische Deposition. Die wichtigste Ursache ist der Abfluss von Stickstoff, welcher aus der landwirtschaftlichen Produktionsweise resultiert (EKL 2005). Oberflächengewässer sind gegenüber Stickstoffverbindungen unterschiedlich empfindlich. Für das Pflanzenwachstum in Flüssen und Seen ist meistens Phosphor der wachstumslimitierende Nährstoff. Einige aquatische Organismen reagieren jedoch empfindlich auf hohe Stickstoffkonzentrationen (UBA 2009). Das Umweltziel die landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer gegenüber 1985 um 50% zu reduzieren wurde gemäss Statusbericht 2016 zu den Umweltzielen der Landwirtschaft nicht erreicht (BAFU/BLW 2016).

Überschüssige Stickstoffkonzentrationen in Flüssen und in kleinerem Ausmass die atmosphärische Deposition beeinträchtigen marine Ökosysteme (BAFU 1996). Der Eintrag von Stickstoff in die Nordsee über die Zuflüsse ist zwar in den letzten Jahren zurückgegangen, die Nährstoffeinträge über die Flüsse müssen jedoch zum Schutz der Meeresökosysteme weiter reduziert werden (BMU 2018). Anders als für Süßgewässer, welche phosphorlimitiert sind, liegt für viele Übergangs- und Küstengewässer zumindest zeitweise eine Stickstofflimitierung vor. Aus diesem Grund ist die Begrenzung des Stickstoffeintrages hoch relevant (BLMP AG WRRL 2007).

Beitrag zur Klimaerwärmung

Lachgas, das als Zwischenprodukt bei der mikrobiellen Nitrifikation und bei der Denitrifikation auf landwirtschaftlichen Böden sowie in aquatischen und terrestrischen Ökosystemen entsteht, ist ein starkes Treibhausgas und trägt zudem zur Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht. Mit einem Treibhauspotential von 298 CO₂-Äquivalenten und einer Verweilzeit in der Atmosphäre von rund 114 Jahren trägt es weltweit ca. 6 % zu den globalen Treibhausgasemissionen bei (BAFU 2020).

Ein weiterer Klimaeffekt besteht darin, dass hohe Ammonium (NH₄⁺) Einträge in terrestrische Ökosysteme die Methanaufnahme der Waldböden erheblich reduzieren können und somit zu einem Konzentrationsanstieg dieses Treibhausgases in der Atmosphäre beitragen. Als Folge der kompetitiven Hemmung der Methanoxidation durch NH₄⁺ gibt es Hinweise auf verminderte Methan-Aufnahme von 33 % bis 40 % (Streudler et al. 1989, Butterbach-Bahl und Kiese 2005, UBA 2009).

Bodennahe Ozon

Stickoxide (NO_x) in der Atmosphäre führen bei Sonneneinstrahlung, durch Reaktion mit flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) zu erhöhten Ozonkonzentrationen. Bodennahe Ozon wirkt sich schädigend auf die menschliche Gesundheit aus und ist besonders an heissen, sonnigen Tagen eine zusätzliche Quelle der Luftverschmutzung. Ozon wirkt sich auch negativ auf die Umwelt aus, insbesondere auf das Pflanzenwachstum. Erhöhte troposphärische Ozonkonzentrationen tragen zudem wesentlich zum Treibhauseffekt bei: Vom aggregierten Radiative Forcing 2,72 W/m² stammen 0,47 W/m² vom troposphärischen Ozon (IPCC 2021).

3.4. Abfallwirtschaft

Bei der Behandlung von Abfällen und Abwasser sowie bei der Ablagerung von Abfällen in Deponien wird der gebundene Stickstoff umgewandelt. Die energetische Nutzung der Abfälle in Kehrichtverbrennungsanlagen stellt in der Schweiz ein wenig umweltbelastendes Verfahren dar: seit 2002 sind flächendeckend Entstickungsanlagen (Denox-Anlagen) in Betrieb, die zu einer vollständigen Denitrifizierung führen und verhindern, dass NO_x-Emissionen entstehen.

Zum Austrag von reaktiven Stickstoffverbindungen in die Umwelt kann es aber bei der Behandlung und Verwertung der biogenen Abfälle und des Klärschlammes kommen (Ammoniakemissionen). Weiter können geringe Mengen an gelösten Stickstoffverbindungen (NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻) über Deponiesickerwasser in Gewässer gelangen (AWEL 2013).

In Abwasserreinigungsanlagen werden organische Stickstoffverbindungen zu Ammonium und Nitrat abgebaut. Im biologischen Reinigungsprozess wird Stickstoff aus organischen Verbindungen von aeroben Bakterien und anderen Mikroorganismen zu Ammoniak mineralisiert und zu Nitrat nitrifiziert. Bei anoxischen Zuständen kann danach die mikrobielle Denitrifikation induziert werden, bei der Mikroorganismen anaerob Nitrat zu nicht umweltrelevantem Luftstickstoff (N_2) umwandeln. Dabei kann als Zwischenprodukt auch Lachgas (N_2O) entstehen.

3.5. Themen im Fokus

3.5.1. Vergärung

Organische Abfälle können in Vergärungsanlagen (Biogasanlagen) zu Biogas verwertet werden. Dadurch ergibt sich das Potenzial, Stickstoffverluste zu reduzieren – wobei zu berücksichtigen ist, in welchem Ausmass unerwünschte Flüsse an reaktiven Stickstoffemissionen entstehen. In Vergärungsanlagen wird unter Ausschluss von Sauerstoff organisches Material durch Mikroorganismen abgebaut, wobei Biogas (bestehend aus Methan und Kohlendioxid) entsteht. Es werden unterschiedliche organische Substrate verwendet: Hofdünger, Klärschlamm, biogene Abfälle, Speisereste, Erntereste, Grüngut usw. Neben dem produzierten Biogas entstehen bei der Vergärung auch Gärreste bzw. Vergärungsprodukte, welche als Dünger oder Kompost wieder in die Landwirtschaft zurückgeführt werden. Durch die Vergärung von organischen Abfällen wird somit der darin enthaltene Stickstoff weiterverwendet. Der Zubau von Vergärungsanlagen trägt durch die Herstellung von Biogas, das eine erneuerbare Energiequelle ist, zum Klimaschutz bei.

In der Schweiz wird grundsätzlich zwischen zwei Arten von Vergärungsanlagen unterschieden: den landwirtschaftlichen Anlagen und den gewerblich/industriellen Anlagen.

Landwirtschaftliche Vergärungsanlagen (auch Co-Vergärung genannt) befinden sich in der Regel in der Landwirtschaftszone ausserhalb der Bauzone, und dürfen nur erstellt werden, wenn das verarbeitete Material zu mehr als der Hälfte seiner Masse (Frischsubstanz) aus Landwirtschaftsbetrieben stammt, die innerhalb einer Fahrdistanz von etwa 15 km liegen (BAFU 2016). Bei landwirtschaftlichen Anlagen, die von der Kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV)¹⁵ profitieren, muss der Anteil an Co-Substraten nicht landwirtschaftlicher Herkunft weniger als 20% betragen (BAFU 2016c). Dementsprechend wird in landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen hauptsächlich Hofdünger und Gülle verarbeitet. Erntereste werden nur in geringen Mengen vergärt, ebenso organisches Material aus dem kommunalen Sammeldienst und dem Gartenbau. Der grösste Teil der Materialien nicht landwirtschaftlichen Ursprungs stammt

¹⁵ Um die Produktion von erneuerbaren Energien zu fördern, wurde am 1. Januar 2009 die Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) für landwirtschaftliche Vergärungsanlagen eingeführt.

aus der Industrie (Lebensmittel- und Fleischverarbeitung) (UMWEKO 2019). Da bei landwirtschaftlichen Anlagen meist flüssige Substrate wie Gülle vergärt werden¹⁶, entsteht dabei überwiegend Gärgülle, welche zur Düngung in die Landwirtschaft zurückgeführt werden muss.

Gewerblich-industrielle Vergärungsanlagen befinden sich meist in Gewerbe- und Industriezonen und verarbeiten vorwiegend biogene Abfälle aus der kommunalen Sammlung oder der Industrie sowie Grüngut aus dem Gartenbau. Aufgrund der Verwendung von vorwiegend festen Ausgangsmaterialien entstehen festes oder flüssiges Gärgut für die Düngung in der Landwirtschaft und Gärreste für die Kompostierung (UMWEKO 2019).

3.5.2. Food Waste

Durch den Lebensmittelkonsum in der Schweiz fallen jährlich rund 2.8 Millionen Tonnen vermeidbare Lebensmittelverluste im In- und Ausland an. Dadurch sind 25 Prozent der Umweltbelastung der Ernährung der Schweiz auf Food Waste (vermeidbare Lebensmittelverluste) zurückzuführen (ETH 2019). Durch die Reduktion des Food Waste können der Ressourcenverbrauch (z.B. Land und Wasser), die Treibhausgasemissionen und Nährstoffverluste verringert werden – wobei auch der Eintrag von Stickstoff in die Umwelt reduziert werden kann.

In vorliegender Studie wird nur der Food Waste berücksichtigt, der in der Schweiz anfällt (Entsorgungsperspektive). Der Food Waste der aufgrund des Konsums in der Schweiz im Ausland anfällt, wird aufgrund der Systemgrenzen ausgeklammert. Als Food Waste werden in Anlehnung an die Studie der ETH (2019) alle vermeidbaren Lebensmittelverluste bezeichnet. Diese umfassen Lebensmittel, die eigentlich für den menschlichen Verzehr bestimmt waren, aber anderweitig genutzt oder weggeworfen werden (entsorgte Lebensmittel, Lebensmittel im Tierfutter, nicht geerntete Lebensmittel etc.). Nicht zu Food Waste gehören Futtermittel, die nicht für den menschlichen Verzehr vorgesehen sind, sowie unvermeidbare Lebensmittelverluste, welche nicht essbare Teile von Lebensmitteln (z.B. Bananenschalen) und gemäss dem heutigen Stand der Technik nicht vermeidbare Verluste (z.B. Rückstände beim Putzen von Produktionsanlagen) beinhalten (ETH 2019).

Food Waste fällt auf jeder Wertschöpfungsstufe der Nahrungsmittel von der Produktion bis zum Konsumenten an. In der Landwirtschaft entsteht Food Waste vor allem durch aussortierte tierische oder pflanzliche Produkte oder nicht geerntetes Erntegut sowie durch deren unzureichende Lagerung. In der Lebensmittelverarbeitung entsteht Food Waste unter anderem durch aussortierte und ungenutzte Lebensmittel (z.B. Innereien), sowie durch die bei der Verarbeitung entstehenden Schäden an den Lebensmitteln (z.B. Bruchstellen an Eierschalen) oder

¹⁶ Die meisten landwirtschaftlichen Anlagen sind Flüssigvergärungsanlagen¹⁶, die flüssige Substrate gemischt mit zerkleinerten, festen biogenen Abfällen zur Produktion von Biogas nutzen (BAFU 2016c).

am verarbeiteten Produkt (z.B. Schäden an der Verpackung). Zudem kann Food Waste durch Überproduktion entstehen. Im Gross- und Detailhandel entsteht Food Waste vor allem durch Lagerungsverluste, Aussortierung aufgrund von Qualitätsstandards¹⁷ und Überangebot (abgelaufene Produkte). In der Gastronomie fällt Food Waste durch zu viel zubereitete Speisen und Präferenzverluste (vom Gast nicht konsumierte Speisen auf dem Teller) an. Im Haushalt entsteht Food Waste oft durch falsche oder zu lange Lagerung (abgelaufene Lebensmittel) und Präferenzverluste (Essensreste/keine oder geringe Resteverwertung) (BAFU 2021c, ETH 2019).

Die Entsorgung des Food Waste ist unterschiedlich, je nachdem, wo der Food Waste in der Wertschöpfungskette anfällt. Grundsätzlich wird Food Waste entweder in der Landwirtschaft als Futtermittel eingesetzt, am Feldrand kompostiert bzw. direkt in die Felder untergepflügt oder er endet in der Abfallwirtschaft (Kompost, Vergärung, Kehricht, Abwasser).

3.5.3. Schlachtnebenprodukte

Die Nutzung von tierischen Proteinen aus Schlachtnebenprodukten (SNP) zur Fütterung von Nutztieren ist in der Schweiz aktuell rechtlich nicht zulässig. Sie wird jedoch als mögliche Massnahme diskutiert, um Stickstoff aus tierischen Produkten in der Landwirtschaft weiter zu verwerten, wodurch potenziell der Einsatz anderer Futtermittel (insbesondere importierter Kraftfutter) reduziert werden könnte. Infolge der BSE-Krise in den 90er Jahren hat die Schweiz 2001 die Verfütterung von Fleisch- und Knochenmehl aus Schlachtnebenprodukten an alle Nutztiere verboten; die EU hat dieses Verbot ebenfalls eingeführt (BLV 2015). BSE ist eine Tierkrankheit, die 1986 erstmals in Grossbritannien diagnostiziert wurde. Sie wurde durch die Verfütterung von ungenügend erhitztem Fleischknochenmehl an Wiederkäuer ausgelöst und durch den Import von solchem Tiermehl und von lebenden Rindern aus Grossbritannien in die Schweiz und weitere Länder eingeschleppt.

Heute werden Schlachtnebenprodukte in der Schweiz je nach Produkt und Risiko zur Weiterverarbeitung ins umliegende Ausland exportiert, zu Brennstoff verarbeitet und als CO₂-neutraler Energieträger genutzt, zu Heimtierfutter verarbeitet oder in Vergärungsanlagen zur Produktion von Biogas eingesetzt. Die Nutzung und Entsorgung von Schlachtnebenprodukten hängen von ihrem Risiko ab, die Gesundheit von Menschen und Tieren zu gefährden. Die Schlachtnebenprodukte werden gemäss Verordnung über tierische Nebenprodukte (VTNP¹⁸) in die drei Kategorien K1, K2 und K2 eingeordnet. K1 und K2 gelten als gesundheitsschädigend

¹⁷ Die Aussortierung von Lebensmitteln aufgrund von Qualitätsstandards kann auf dem Landwirtschaftsbetrieb, bei der Lebensmittelverarbeitung oder auf der Stufe Handel stattfinden.

¹⁸ Siehe Verordnung über tierische Nebenprodukte (VTNP): <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2011/372/de>

und werden vorwiegend als Brennstoff in Zementöfen oder Substrat in Vergärungsanlagen eingesetzt. Schlachtabfälle der Kategorie K3, welche weder für Mensch noch Tier ein Gesundheitsrisiko darstellen, werden vorwiegend zu Heimtierfutter verarbeitet (BLV 2018).

In der Schweiz wird aktuell darüber diskutiert, ob und unter welchen Bedingungen tierische Proteine aus Schlachtnebenprodukten der Kategorie K3 wieder als Futtermittel für nicht wiederkäuende Nutztiere (Schweine, Geflügel, Fische) verwendet werden können. Dies würde eine Alternative zum Kraftfutter aus pflanzlichen Proteinen (z.B. Soja) darstellen. Die Lockerung der geltenden Verbote darf allerdings unter keinen Umständen eine neue BSE-Krise hervorrufen (BLV 2018).

Die EU hat das Verfütterungsverbot von Schlachtnebenprodukten unter strengen Auflagen gelockert. Die im August 2021 verabschiedete Verordnung¹⁹ der EU-Kommission erlaubt es, verarbeitetes tierisches Protein (Fleisch-/Knochenmehl) aus Schweinen und Nutzinsekten an Geflügel, sowie Tiermehl aus Geflügel und Nutzinsekten an Schweine zu verfüttern. Dabei darf nur genusstaugliches Material, das auch der Mensch konsumieren dürfte, zu Futtermitteln verarbeitet werden. Zudem enthält die Verordnung strenge Anforderungen an die Verarbeitung, den Transport und die Lagerung des Tiermehls. Regelmässige Probenahmen und Analysen werden vorausgesetzt, um Kreuzkontaminationen mit nicht zulässigen Schlachtnebenprodukten von Wiederkäuern und anderen Futtermitteln sowie die Rückführung innerhalb derselben Tierart zu verhindern. Neue von der EU genehmigte Analyseverfahren sollen dies überprüfen. Weiterhin verboten bleibt die Verfütterung von Schlachtnebenprodukten an Wiederkäuer (EU 2021 und Eversberg 2021).

4. Methodik der Stoffflussanalyse

Die Aktualisierung der Stoffflussanalyse Stickstoff erfolgte nach der gleichen Methodik wie die Stoffflussanalyse für das Jahr 2005 (BAFU 2010). Die Berechnung der einzelnen Flüsse basiert weitgehend auf bestehenden Daten und Modellen.

Eine Stoffflussanalyse erfasst die Herkunft, Entstehung, Umwandlung und Entsorgungswege von Stoffen. Sie wird in der Regel grafisch dargestellt. Grundelemente einer Stoffflussanalyse sind Prozesse (Kästchen) und (Stoff-)flüsse (Pfeile); mehrere Prozesse können in einem Subsystem (Kasten) zusammengefasst werden. Flüsse verbinden Prozesse und stellen damit Inputs und Outputs von Prozessen dar.

¹⁹Siehe Verordnung (EU) 2021/1372 unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32021R1372>

4.1. Stoffflussmodell

4.1.1. Systemgrenzen

In vorliegender Stoffflussanalyse entspricht die räumliche Systemgrenze der Landesgrenze der Schweiz. Zeitliche Systemgrenze ist das Jahr 2018. Das heisst, die Stickstoffflüsse wurden für das Jahr 2018 zusammengetragen, wobei jeweils die besten verfügbaren Daten oder Schätzungen verwendet wurden (wenn möglich Drei-Jahres-Mittelwerte 2017-2019, siehe Kapitel 4.3). Gelegentlich sind in den Datentabellen zu Vergleichszwecken auch die Werte von 2005 aus der Vorgängerstudie (BAFU 2010) aufgeführt. Ein umfassender Vergleich der Stoffflüsse 2018 mit 2005 erfolgt in Kapitel 7.

4.1.2. Subsysteme, Prozesse und Stoffflüsse

Das Gesamtsystem enthält die vier Subsysteme Land- und Forstwirtschaft, Produkteherstellung/Produktenutzung, Umwelt und Abfallwirtschaft. Sie umfassen die in der folgenden Tabelle aufgeführten Prozesse.

Tabelle 2: Subsysteme und Prozesse im Stoffflussmodell

Subsystem (Abkürzung)	Prozesse
Land- und Forstwirtschaft (L)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tierhaltung ▪ Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau (Acker, Weiden etc.) ▪ Wald (Bäume und Boden)
Produkteherstellung/Produktenutzung (P)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehr ▪ Feuerungen ▪ Produkteherstellung und übrige Nutzungen
Umwelt (U)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atmosphäre ▪ Hydrosphäre (Oberflächengewässer und Grundwasser) ▪ übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre
Abfallwirtschaft (A)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ KVA, SAVA (Kehricht- und Sonderabfallverbrennungsanlagen) ▪ ARA (Abwasserreinigungsanlagen) ▪ Kompostierung ▪ Vergärung ▪ Deponien

Tabelle INFRAS.

Die Prozesse sind Ursprung und Ziel der betrachteten Stickstoffflüsse. Flüsse ins Ausland bzw. aus dem Ausland in die Schweiz werden als Importe und Exporte beschrieben.

Im Kapitel 3 sind die Subsysteme und deren Prozesse im Detail beschrieben. Kapitel 5 beschreibt jedes Subsystem mit den resultierenden Flüssen. Zudem wurden im Rahmen der vorliegenden Studie verschiedene Stickstoffflüsse im Zusammenhang mit Food Waste, Vergärung und Schlachtnebenprodukten vertieft untersucht (Kapitel 6).

Unterschiedliche Formen von Stickstoff

Zwischen den Prozessen fließt der Stickstoff in Form verschiedener Stickstoffverbindungen (NO_x , NH_3 etc.). Um die Stickstoffflüsse miteinander vergleichen zu können, werden alle Frachten auf ihren Stickstoffanteil bezogen und in der Einheit 1000 Tonnen N (kt N) angegeben. Ein einzelner Fluss kann mehrere Stickstoffverbindungen umfassen z.B. Emissionen von Ammoniak, Lachgas und Stickoxiden aus der Tierhaltung. In den Tabellen in Annex A1 sind neben der gesamten Stickstoffmenge auch die einzelnen Komponenten ausgewiesen, weil ihre Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit unterschiedlich sind. Die Umrechnung der einzelnen Stickstoffkomponente in kt N erfolgt über die Umrechnungsfaktoren in Tabelle 3.

Tabelle 3: Umrechnungsfaktoren der Stickstoffverbindungen

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

Umrechnungsfaktoren der Stickstoffverbindungen.

* NO_x -Emissionen werden in NO_2 -Äquivalent ausgewiesen.

Tabelle INFRAS.

Es ist sinnvoll, zwischen nicht-reaktivem Stickstoff (Luftstickstoff N_2) und reaktiven, biologisch verfügbaren Stickstoffformen (NO_x , NO_3^- , $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$, organisch gebundener Stickstoff) zu unterscheiden. Daher wird für jeden Fluss angegeben, ob er aus ökologisch relevanten N-Verbindungen, also reaktiven N-Verbindungen besteht oder aus ökologisch nicht relevantem Luftstickstoff. Bei Flüssen, die sowohl ökologisch relevante Anteile als auch Luftstickstoff enthalten, ist zudem der Gesamtfluss, die Summe der beiden angegeben.

Bezeichnung der Flüsse

Jeder Fluss ist mit einem Buchstaben und einer Zahl eindeutig charakterisiert. Der Buchstabe am Anfang des jeweiligen Stoffflusses bezieht sich auf den Anfangsbuchstaben des Subsystems (L: Land- und Forstwirtschaft, P: Produkteherstellung/Produktenutzung, U: Umwelt, A: Abfallwirtschaft, I: Import; siehe Tabelle 2), aus dem der Stofffluss hervorgeht. Die auf den Buchstaben folgende Zahl dient der Unterscheidung der Flüsse aus demselben Subsystem. Die Nummerierung ist zufällig, es ist keine Reihenfolge der Flüsse festgelegt. Bei Flüssen, die sowohl aus reaktiven Stickstoffverbindungen als auch aus nicht-reaktivem Luftstickstoff bestehen, wird der Fluss zerlegt und die Bezeichnung dieser Teilflüsse erweitert um ein (N_r) für reaktive Stickstoff-

verbindungen und ein (N_{nr}) für den nicht-reaktiven Luftstickstoff. Unter (N_r) werden alle reaktiven N-Verbindungen zusammengefasst, d. h. NO_x , NH_3 , N_2O und organische N-Verbindungen (gemäss Tabelle 3) und unter (N_{nr}) wird die Stickstofffracht in Form von N_2 ausgewiesen.

Beispiele:

- L1 Hofdünger/Weidegang: N-Output aus Tierhaltung, N-Input in Landwirtschaftsböden. Weil L1 keinen Luftstickstoff enthält ist $L1 = L1 (N_r)$
- L6 Emissionen in die Atmosphäre: N-Output aus Landwirtschaftsböden/Pflanzenbau in die Atmosphäre. L6 enthält sowohl reaktive wie auch nicht-reaktive Anteile $L6 = L6 (N_r) + L6 (N_{nr})$. «L» weist daraufhin, dass die beiden Flüsse aus dem Subsystem Landwirtschaft hervorgehen.

Für Flüsse aus nur reaktiven N-Verbindungen gilt: Fluss = Fluss (N_r), z.B. $L1 = L1 (N_r)$. Der Einfachheit halber wird in solchen Fällen die Bezeichnung (N_r) weggelassen.

Ebenso gilt für Flüsse, die nur aus Luftstickstoff bestehen: Fluss = Fluss (N_{nr}), z.B. $U1 = U1 (N_{nr})$. Der Einfachheit halber wurde in solchen Fällen die Bezeichnung (N_{nr}) weggelassen. Zur Verdeutlichung, dass diese Flüsse aus Luftstickstoff bestehen, erscheinen sie in Tabellen und Abbildungen in **blauer Schrift**.

4.2. Datenbeschaffung und Datenquellen

Die Aktualisierung der Stoffflussanalyse basiert weitgehend auf bereits vorhandenen Datenquellen. Die Daten stammen aus Forschungsprojekten und Publikationen von BAFU, Agroscope, BFS, ZHAW etc. Besonders wichtig sind folgende Datenquellen; weitere siehe Literaturverzeichnis:

- **EMIS Datenbank, BAFU:** Submissionstabellen zum Treibhausgasinventar (BAFU 2021a) und zur Genfer Konvention (BAFU 2021b).
- **OSPAR-Bilanz, Agroscope:** Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft, mit der die Agroscope seit 1975 Inputs- und Outputs der Schweizer Landwirtschaft erfasst. Daten stammen aus der Publikation für die Jahre 1975 bis 2018 (OSPAR 2020) und einer Datentabelle für die Jahre 1990 bis 2019, zur Verfügung gestellt von E. Spiess, Agroscope (OSPAR 2021).
- **Stickstoffbilanz der Landwirtschaft, BFS:** Das Bundesamt für Statistik erstellt jährlich für den Umweltindikator Stickstoff eine Bilanz für Landwirtschaftsflächen, die für internationale Agrarumwelt-Indikatorensysteme (OECD, Eurostat) und für nationale Indikatorensysteme verwendet wird. Die verwendete statistische Methodik basiert auf dem Ansatz der "Bodenoberflächenbilanz" ("land budget") und orientiert sich an den Richtlinien der OECD und von Eurostat (BFS 2021).

- **MODIFFUS, Agroscope:** Das Stoffflussmodell MODIFFUS (Modell zur Abschätzung diffuser Stoffeinträge in die Gewässer) ist ein Emissionsmodell, mit dem Agroscope Stickstoff- und Phosphoreinträge aus diffusen Quellen (Abschwemmung, Erosion, Auswaschung etc.) in die Gewässer berechnet. Die zugrunde liegenden Wasser- und Stoffflüsse werden durch Feldversuche, Literaturrecherchen und Expertenwissen quantifiziert (Agroscope 2015). Der Berechnungszeitraum MODIFFUS bezieht sich auf den Zeitraum um 2010 (Agroscope 2015) – weil aktuell keine neueren Werte verfügbar sind, wurden diese dennoch für die vorliegende Stoffflussanalyse mit Bezugsjahr 2018 verwendet²⁰.
- **KVU-Schema und Swiss Academics Factsheets** Vol. 15, No. 8, 2020: die Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzämter der Schweiz (KVU) hat ein Schema zu Flüssen an reaktiven Stickstoffverbindungen in/aus Abwasserreinigungsanlagen erstellt (KVU 2020) und verweist auf eine Studie zu Stickstoffflüssen der Akademien der Wissenschaften (Swiss Academics 2020).
- **Agristat – Statistik der Schweizer Landwirtschaft, SBV:** Der Schweizer Bauerverband publiziert statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung (SES) (Agristat 2021). In Agristat sind auch die Mengen exportierter/importierter landwirtschaftlicher Produkte basierend auf Daten der Eidgenössischen Zollverwaltung (EZV) ausgewiesen. Die Mengen exportierter/importierter Waren und deren Stickstoffgehalte wurden für die Berechnung von Stickstoffflüssen verwendet.
- **Biogene Güterflüsse der Schweiz, ZHAW:** Gewisse Stickstoffflüsse konnten mittels der Frachten aus Güterströmen und deren Stickstoffanteile bestimmt werden. Grundlage bildet die Studie «Biogene Güterflüsse der Schweiz – Update 2014» der ZHAW (ZHAW 2018).

Um die wichtigen Flüsse in den Fokus zu stellen haben die Autorinnen vorliegender Studie eine Unterteilung in *relevante* und *nicht relevante* Stoffflüsse vorgenommen. Die relevanten Flüsse wurden prioritär aktualisiert.

Relevante Flüsse

Als relevant bezeichneten die Autorinnen N-Flüsse grösser als 8 kt N und einige kleinere, treibende Flüsse (Grösse der Stickstoffflüsse siehe Anhang). Treibende Flüsse sind Flüsse, die der Mensch durch seine Aktivitäten verursacht (driving forces²¹). Alle relevanten Flüsse wurden im

²⁰ Eine Neuberechnung mit MODIFFUS (Stand 2020) wird derzeit von Agroscope durchgeführt. Hierzu liegen aber noch keine Zahlen vor. Ergebnisse werden Mitte 2022 erwartet.

²¹ Die Bezeichnung «driving forces» stammt aus dem DPSIR-Modell, das eine kausale Kette von Einflussgrössen beschreibt. Driving forces üben Druck auf die Umwelt aus, Pressures sind die resultierenden Umweltbelastungen, State die Zustände von Umweltkompartimenten, Impacts sind die spezifischen Wirkungen durch die Umweltbelastung und Responses die gesellschaftliche Reaktion auf Umweltbelastungen. Das Modell wird von der Europäischen Umweltbehörde EEA, vom UN Environment Programme UNEP und vom BAFU verwendet.

Rahmen von Expertengesprächen mit Agroscope, BLW, BAFU, Meteotest und weiteren Datenlieferanten plausibilisiert.

Bei der Interpretation der Daten lag der Fokus auf denjenigen Flüssen, bei denen gegenüber der Stoffflussanalyse für das Jahr 2005 (BAFU 2010) grössere Veränderungen sichtbar wurden. Bei diesen erfolgte eine genauere Diskussion der Daten durch Einbezug von Experten, wobei teilweise wichtige Erkenntnisse und Schlussfolgerungen abgeleitet werden konnten.

Flüsse mit schlechter Datenlage wurden ebenfalls durch Befragung von Experten plausibilisiert. Einen Spezialfall bilden reine N₂-Flüsse, z.B. der N₂-Verbrauch durch Verkehr und Feuerungen oder N₂-Emissionen, die neben Lachgas aus der Denitrifikation entstehen. Da sie die Menge an reaktivem Stickstoff nicht erhöhen und daher aus ökologischer Sicht nicht von Interesse sind, werden sie nur rechnerisch bestimmt.

Nicht relevante Flüsse

Es gibt eine Vielzahl von Stickstoffflüssen kleiner ca. 8 kt N, die schwierig zu quantifizieren und tendenziell mit hoher Unsicherheit behaftet sind. Diese Stickstoffflüsse wurden nicht alle aktualisiert, sondern auf Werte der Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2005 (BAFU 2010) zurückgegriffen (siehe Flussbeschreibungen im Anhang) – sofern diese weiterhin realistisch schienen.

Theoretisch wäre es möglich, Datenlücken aufgrund von fehlenden Flüssen rechnerisch zu schliessen, indem in den betroffenen Prozessen die Inputs mit den Outputs (inkl. Lagerveränderungen) verglichen werden. Da jedoch für alle Flüsse zumindest ein Schätzwert ermittelt werden konnte, und weil die Bilanzen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten weitgehend aufgingen, war dieser Schritt nicht notwendig.

Vergleich mit Stickstoffflüssen für das Jahr 2005

Würde man aufgrund von aktuell publizierten Daten die Stoffflüsse für das Jahr 2005 aktualisieren, wären oft Abweichungen zu den in BAFU 2010 publizierten Daten sichtbar. Dies, weil sich die Datenlage verbessert hat und oft (rückwirkend) neue Zahlen in die Statistiken aufgenommen wurden. In einigen Fällen gab es verbesserte Modelle (z.B. MODIFFUS). Zudem wurde für das Jahr 2005 nicht systematisch ein Drei-Jahres-Durchschnitt verwendet.

Für den Vergleich der Stickstoffflüsse aus vorliegender Studie mit den Flüssen für das Jahr 2005 wurde – aus zeitlichen Gründen – in der Regel dennoch auf die in der Stoffflussanalyse 2005 (BAFU 2010) publizierten Daten zurückgegriffen. Nur in wenigen Fällen wurde für das Jahr 2005 neue Werte gerechnet, so z.B. für die Stoffflüsse aus der OSPAR-Bilanzierung (Tabelle 24).

4.3. Datenqualität

Um zufällige jährliche Schwankungen in den Daten der Flüsse auszugleichen – beispielsweise aufgrund von unterschiedlichen Witterungsbedingungen – wurden soweit möglich die Mittelwerte über drei Jahre verwendet, und zwar, falls verfügbar, die der Jahre 2017 bis 2019.

Die Qualität der Frachtangaben ist sehr unterschiedlich, weshalb immer eine Angabe zur Unsicherheit gemacht wurde. Für eine Reihe von Flüssen sind quantitative Unsicherheiten bekannt. Beispielsweise können für mehrere Flüsse aus der Landwirtschaft die Unsicherheiten aus dem schweizerische Treibhausgasinventar übernommen werden (BAFU 2021a). Bei einigen Emissionen in die Atmosphäre sind im Treibhausgas- und Luftschadstoffinventar (BAFU 2021 a, b) Unsicherheiten angegeben. Diese wurden ebenfalls übernommen. Wo Zahlen zur Unsicherheit angegeben sind, bezeichnen sie die Hälfte des 95 %-Vertrauensintervalls (bei normalverteilten Unsicherheiten entspricht das der doppelten Standardabweichung). Dies entspricht der internationalen Konvention im Reporting der Klimagasemissionen (UNFCCC) und der Luftschadstoffemissionen (UNECE). Bei vielen Flüssen fehlen konkrete Angaben zu den Unsicherheiten. Falls Frachten aus unterschiedlichen Quellen vorhanden waren, wurde die Differenz der Zahlen als Mass für die Unsicherheit benutzt. Anhand dieser Unsicherheiten wird bei sämtlichen Stoffflüssen das 95 %-Vertrauensintervall angegeben (siehe Annex A1).

4.4. Bilanzierung des Stoffflusssystem

Damit die Stoffflussbilanz stimmt, sollte die Summe aller Inputs in ein System/Subsystem/ Prozess der Summe aller Outputs aus demselben entsprechen. Da alle Flüsse mit einer Unsicherheit behaftet sind, wurde mit Hilfe einer Fehlerfortpflanzung ein Fehlerintervall für die Summe aller Inputs bzw. die Summe aller Outputs je Subsystem berechnet. Überlappt das Fehlerintervall der Inputs mit demjenigen der Outputs, kann angenommen werden, dass die Bilanz aufgeht²². In dem Fall liegt ein Fliessgleichgewicht vor, andernfalls gibt es Lagerveränderungen bzw. Stoffabbau/-aufbau oder es ist ein Fehler unterlaufen (z.B. nicht alle Flüsse wurden erfasst). Quellen oder Senken in einem Prozess sind Lagerveränderungen. Für die Bilanzierung werden diese wie Flüsse behandelt, d.h. sie werden zu den Inputs (Quellen) oder Outputs (Senken) gerechnet.

Das Fehlerintervall (ΔS) einer Summe von Stickstoffflüssen (S) wird mit Hilfe des Gauss'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes²³ berechnet.

²² Aufgrund der Fehlerfortpflanzung wird das statistisch signifikante Intervall betrachtet.

²³ Unter der Voraussetzung unabhängiger Messgrößen

$$\Delta S = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

wobei mit u_1, u_2 etc. die Unsicherheiten der Flüsse 1, 2 etc. und mit ΔS der Fehler der Summe S bezeichnet ist. Das in den Tabellen angegebene Fehlerintervall umfasst den Bereich von S_{min} bis S_{max} mit

$$S_{min} = S - \Delta S$$

$$S_{max} = S + \Delta S$$

Beispiel Subsystem Land- und Forstwirtschaft

Die Summe der Inputs beträgt 203 kt N. Werden die Unsicherheiten der einzelnen Flüsse berücksichtigt, errechnet sich ein Fehlerintervall von 189–218 kt N. Die Summe der Outputs inkl. Senke (Holzzuwachs im Wald) beträgt 190.2 kt N und das Fehlerintervall 172–209 kt N. Obwohl die Bilanz nicht exakt aufgeht (12.8 kt N mehr Input als Output), kann angenommen werden, dass sie innerhalb der Unsicherheiten stimmt, da sich die Fehlerintervalle überlappen. In den Detailtabellen zu den Stoffflüssen im Anhang A1 sind die Informationen vollständig angegeben mit dem mittleren Wert 2018, den Unsicherheiten und dem Fehlerintervall.

4.5. Umsetzung Stoffflussmodell in STAN

Die Umsetzung der Stoffflussanalyse und die grafische Aufbereitung erfolgten in der Stoffflussmodellierungs-Software STAN (Version 2.6.801)²⁴. STAN (kurz für subSTance flow ANalysis) ist eine von der TU Wien entwickelte Freeware, die es ermöglicht, Stoffstromanalysen gemäss der ÖNorm S 2096 (Stoffstromanalyse) durchzuführen. Die Software erlaubt eine einfache Aktualisierung von Flusswerten und eignet sich für einen Vergleich mit Stoffflussanalysen früherer Jahre im selben Modell (d.h. mit den gleichen Subsystemen und Prozessen).

STAN bietet die Option, unbekannte Flüsse rechnerisch zu ermitteln. Dies ist dann möglich, wenn die relevanten N-Flüsse inkl. Unsicherheiten quantifiziert sind und bekannte weitere Faktoren wie Beziehungen zwischen Flüssen angegeben werden (z.B. Verhältnis 2:3 zwischen zwei Flüssen). Zudem darf das System nicht überdefiniert sein. Eine Berechnung in STAN hätte zur Folge, dass bereits quantifizierte Flüsse innerhalb ihres Unsicherheitsbereiches auf andere Werte gesetzt würden, als mittels Datenrecherche ermittelt. Da dies in der vorliegenden Studie die Datenplausibilisierung und Kommunikation der Stoffflussanalyse erschweren würden, wurde auf diesen Schritt verzichtet. Stattdessen wurde eine Bilanzierung der Subsysteme mittels manueller Berechnung in Excel vorgenommen.

²⁴ Website STAN: <https://www.stan2web.net/>

Stoffflussdiagramme

Jedes Subsystem sowie das Gesamtsystem sind in einem Flussdiagramm grafisch aufbereitet (siehe Abbildung 5 bis Abbildung 9). Subsysteme und Prozesse sind als Kästchen, die Flüsse als Pfeile dargestellt. Die Farben der Pfeile zeigen an, aus welchem Subsystem die Flüsse entspringen (violett: Land- und Forstwirtschaft, orange: Produkteherstellung/Produktenutzung, grün: Umwelt, rot: Abfallwirtschaft, grau: Import aus dem Ausland). Die Flüsse sind in der Sankey-Darstellung abgebildet, bei der die Breite der Pfeile proportional zur Grösse der Flüsse ist.

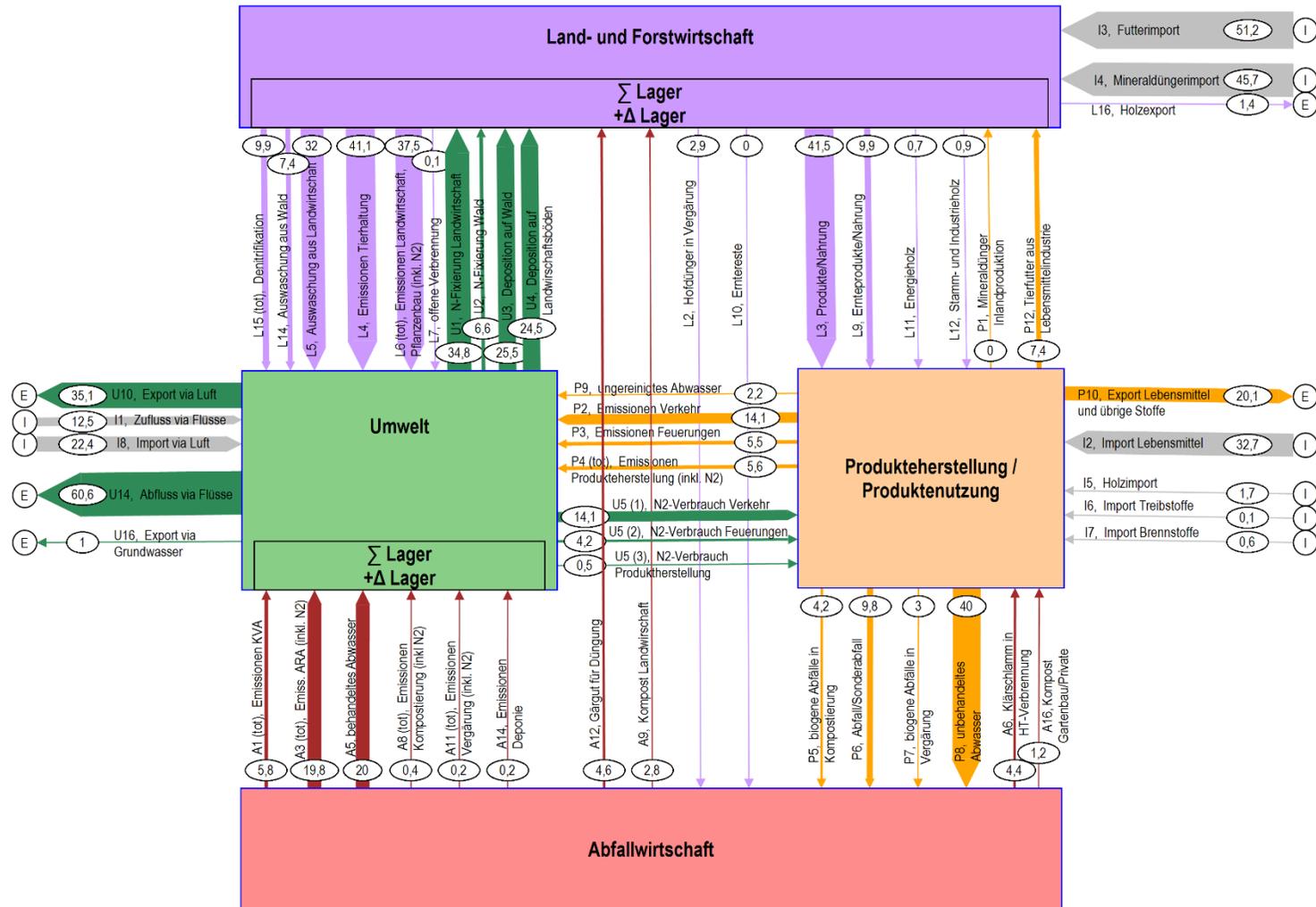
In der Abbildung des Gesamtsystems sind Flüsse über die Systemgrenze hinaus mit E (Export) bzw. I (Import) gekennzeichnet. Die Pfeile charakterisieren die Stickstoffflüsse, die zwischen den Subsystemen fließen, in 1000 Tonnen N pro Jahr (kt N/a). Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten. Lagerveränderungen (Quellen und Senken) werden als Werte innerhalb einer Box in dem Prozess dargestellt, in dem sie stattfinden, und zwar mit negativem Vorzeichen, falls es sich um eine Senke handelt.

Bei Abbildungen der einzelnen Subsysteme ist ersichtlich, in bzw. aus welchem Prozess des Subsystems die abgebildeten Flüsse fließen. STAN zeigt hier auch die Flüsse, die in oder aus dem Subsystem fließen als Export (E)- bzw. Import (I)-Flüsse an; diese sind nicht zu verwechseln mit Exporten oder Importen über die Systemgrenze Schweiz hinaus.

5. Resultate für das Jahr 2018

5.1. Gesamtsystem

Abbildung 5: Gesamtsystem Schweiz 2018, Stickstoffflüsse zwischen den Subsystemen

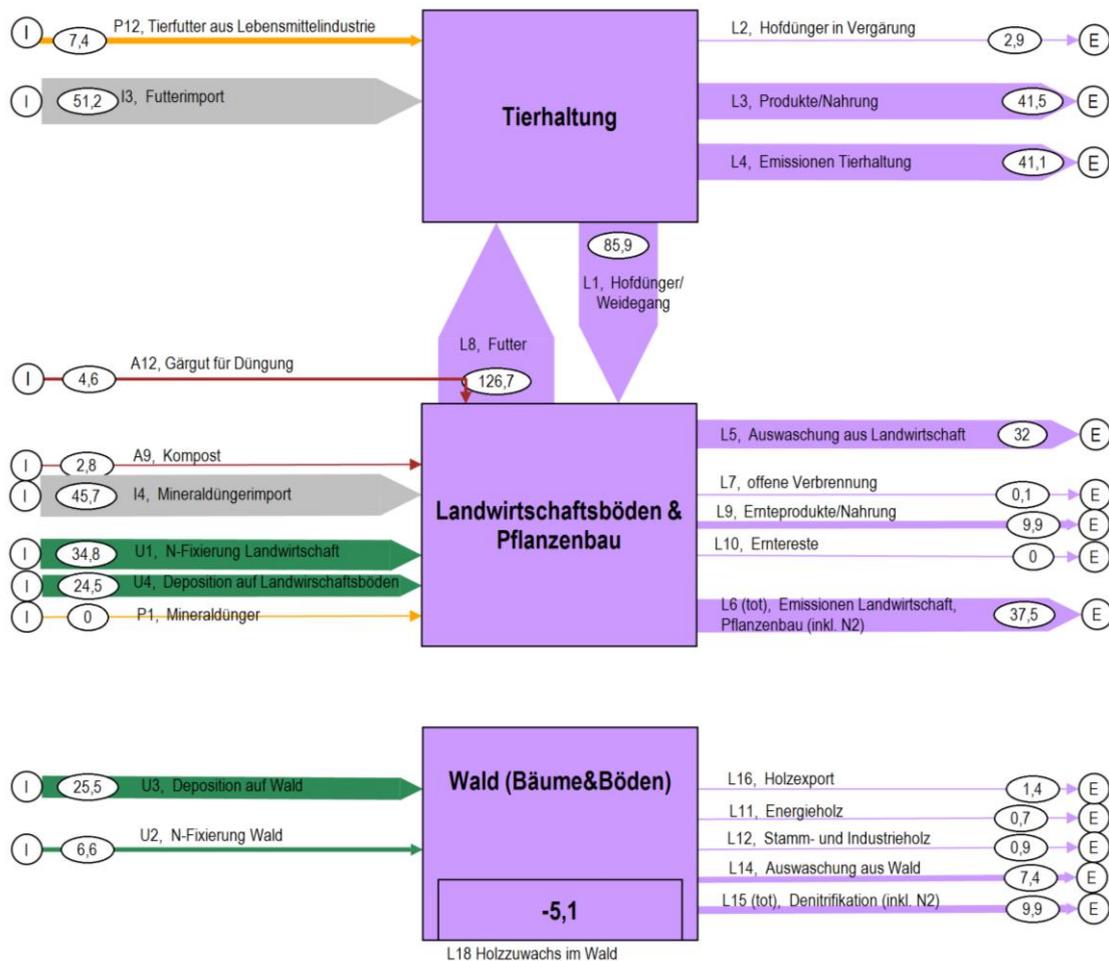


Die Pfeile charakterisieren die Stickstoffflüsse, die zwischen den Subsystemen fließen, in 1000 Tonnen N pro Jahr (kt N/a) und beziehen sich auf das Jahr 2018. Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten. Grafik INFRAS.

5.2. Land- und Forstwirtschaft

5.2.1. Flussdiagramm Land- und Forstwirtschaft

Abbildung 6: Subsystem Land- und Forstwirtschaft



Das Subsystem Land- und Forstwirtschaft besteht aus den Prozessen Tierhaltung, Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau und Wald. Die Größe der Stickstoffflüsse ist in kt N/Jahr angegeben und beziehen sich auf das Jahr 2018. Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten. Die Summe der Flüsse L4 und L6 ergeben die gesamten Stickstoffemissionen aus der Landwirtschaft in Form von NH₃, N₂O und NO_x und N₂ in die Atmosphäre²⁵. Die Lagerveränderung (L18) wird als negativer Wert dargestellt, da es sich um eine Senke handelt.

Grafik INFRAS.

²⁵ Um eine Vergleichbarkeit herzustellen erfolgte die Abgrenzung der Flüsse L4 und L6 gleich wie in der Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010) (Details siehe Anhang A1.1.); diese deckt sich u.U. nicht mit andern Datenquellen oder Studien.

5.2.2. Prozesse und Flüsse Land- und Forstwirtschaft

Tierhaltung

Zum Prozess „Tierhaltung“ gehören Stickstoffumwandlungsprozesse, die mit der Nutztierhaltung in Verbindung stehen: Umwandlung des Stickstoffs aus dem Tierfutter in der Verdauung und weitere Umwandlungen während der Lagerung von Hofdünger in Güllelagern und Miststößen. Ammoniakverluste bis und mit Ausbringung des Hofdüngers gehören ebenfalls zu diesem Prozess²⁶.

Ammoniakverluste, die auf Weiden durch den Weidegang der Nutztiere entstehen, gehören hingegen zum Prozess Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau, ebenso die Ammoniakemissionen, die bei der Lagerung der Mineraldünger entstehen, und die Emissionen (NH_3 , N_2O und NO_x), die auf Weiden durch Ausbringen von Mineraldünger und Kompost entstehen.

Input in die Tierhaltung ist die Zufuhr von Stickstoff im Tierfutter aus dem In- und Ausland. Outputs sind in erster Linie tierische Produkte/Nahrung (Fleisch, Milch, Eier etc.). Hinzu kommen direkte Emissionen in Form von Ammoniak (NH_3) sowie Emissionen von Lachgas (N_2O) und Stickoxiden (NO_x) als Produkte aus der Denitrifikation, die während der Hofdüngerlagerung stattfindet. Zudem wird Stickstoff in Form von Hofdünger abgeführt, der im Pflanzenbau als Dünger eingesetzt oder in Vergärungsanlagen vergärt wird.²⁷

Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau

Der Prozess "Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau" umfasst die Stickstoffumwandlungsprozesse, die auf Landwirtschaftsflächen, Wiesen und Weiden und im Pflanzenbau stattfinden. Ammoniakverluste in die Luft aufgrund des Ausbringens von Hofdünger sind im Prozess Tierhaltung integriert (entspricht der Zuordnung der Stoffflussanalyse für das Jahr 2005 (BAFU, 2010). Eine Auftrennung in zwei Teilprozesse „Landwirtschaftsböden“ und „Pflanzenbau“ ist für die vorliegende Stoffflussanalyse nicht sinnvoll. Eingepflügte Erntereste bilden daher einen internen Stofffluss, der nicht aufgeführt ist.

Stickstoff-Inputs in die Landwirtschaftsböden erfolgen über Hof- und Mineraldünger, Kompost (wenig) und Gärgut/Gärgülle sowie durch N-fixierende Pflanzen (Bindung von Luftstickstoff) und durch Deposition von Reaktionsprodukten von Stickoxiden und Ammoniak/Ammonium.²⁸

²⁶ Damit die Resultate dieser Studie mit der Stoffflussanalyse für das Jahr 2005 (BAFU 2010) vergleichbar sind, wurde die Zuordnung der Ammoniakemissionen gemäss der Zuordnung in der Stoffflussanalyse für das Jahr 2005 umgesetzt (Details zur Abgrenzung der Flüsse L4 und L6 siehe Anhang A1.1.). Die Zuordnung weicht dadurch von der Zuordnung im aktuellen Treibhausgasinventar (BAFU 2021a) ab. Die Emissionen, die bei der Ausbringung von Hofdünger entstehen, werden im aktuellen Treibhausgasinventar den landwirtschaftlichen Böden zugeordnet. Die Summe der Flüsse L4 und L6 ergeben die gesamten Stickstoffemissionen aus der Landwirtschaft in Form von NH_3 , N_2O und NO_x und N_2 in die Atmosphäre.

²⁷ Ein kleiner Teil des Hofdüngers wird ins Ausland exportiert (diese Stickstoffmenge ist im Fluss P10 enthalten).

²⁸ Die Ausbringung von Klärschlamm als Dünger ist seit dem 1. Oktober 2006 verboten.

Outputs sind Stickstoffanteile in Ernteprodukten (Futterpflanzen, Nahrungsmittel) und abgetragenen Ernteresten (zwecks Vergärung). Hinzu kommen Outputs von Nitrat aus Landwirtschaftsböden in die Umwelt durch Auswaschung, Abschwemmung, Erosion und Drainage sowie Denitrifikationsverluste und Emissionen von Ammoniak und Stickoxiden in die Atmosphäre. Letztere entstehen beim Ausbringen von Mineraldünger und Kompost, durch Ausscheidungen der Nutztiere beim Weidegang, bei der Lagerung von Mineraldünger und beim Abbau von Ernterückständen, sowie durch die offene Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen.

Wald (Bäume und Böden)

Der Prozess „Wald (Bäume und Böden)“ beschreibt Umwandlung, Kumulierung und Abnahme von Stickstoff im Waldboden und in den Waldpflanzen.

Input sind die N-Fixierung von Luftstickstoff durch Stickstofffixierende Waldpflanzen (z.B. Erlen) sowie die Deposition von Stickoxiden und Ammoniak/Ammonium aus der Atmosphäre. Diese werden von Mikroorganismen umgewandelt, teilweise von Waldpflanzen aufgenommen, teilweise als Nitrat (NO_3^-) ausgewaschen oder als Denitrifikationsprodukte (N_2O , N_2 , NO_x) emittiert. Weiter wird dem Wald Stickstoff durch die Holznutzung entzogen.

Durch die Zunahme der Waldfläche und die geringere Holznutzung wird der Wald zu einer Stickstoffsénke. Diese Lagerveränderung beträgt ungefähr 5 kt N (3-8 kt N).

Tabelle 4: Stickstoffflüsse Land- und Forstwirtschaft

Output von Land- und Forstwirtschaft nach/in Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Produkteherstellung/Produktenutzung	53	41	35-48	L3	Produkte/Nahrung (Milch, Eier, Fleisch etc.) aus der Tierhaltung
		10	8-12	L9	Ernteprodukte aus dem Pflanzenbau in die Lebensmittelindustrie
		0.7	0.6-0.7	L11	Energieholz für Feuerungen
		0.9	0.8-0.9	L12	Stamm- und Industrieholz für die Holz-/ Papierindustrie
Abfallwirtschaft	2.9	2.9	1.4-4.3	L2	Hofdünger in die Vergärung
		0.036	0-0.07	L10	Erntereste in die Vergärung
Umwelt	128	41	37-45	L4	Emissionen (NH ₃ , N ₂ O) aus der Tierhaltung
		32	26-38	L5	Auswaschung (NO ₃) aus Landwirtschaftsböden
		8.5	7.6-9.5	L6 (N _r)	Emissionen N ₂ O, NH ₃ aus Landwirtschaftsböden
		29	14-43	L6 (N _{nr})	Emissionen N ₂ aus Landwirtschaftsböden
		0.1	0-0.2	L7	Offene Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen inkl. illegale Müllverbrennung
		7.4	3.7-11	L14	Auswaschung (NO ₃) aus Waldböden
		3.9	2.3-5.4	L15 (N _r)	Denitrifikation aus Waldböden
6	3-9	L15 (N _{nr})	Denitrifikation aus Waldböden (N ₂)		
Ausland	1.4	1.4	1.0-1.8	L16	Holz-Export
Summe Outputs	185		167-204		
Senke	Fracht (ktN/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft	5	5	3-8	L18	Holzzuwachs im Wald
Summe Outputs + Senke	190		172-209		

Input in Land- und Forstwirtschaft von/aus Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Produkteherstellung/Produktenutzung	7.4	7.4	5.2-9.6	P12	Tierfutter aus Lebensmittelindustrie
Abfallwirtschaft	7.3	2.8	2.6-2.9	A9	Kompost für die Düngung im Pflanzenanbau
		4.6	3.2-5.9	A12	Gärgut für Düngung im Pflanzenbau
Umwelt	91	35	27-42	U1	N2-Fixierung durch Landwirtschaftspflanzen
		6.6	3.3-9.9	U2	N2-Fixierung durch Waldpflanzen
		25	18-33	U3	Deposition auf Wald
		25	17-32	U4	Deposition auf Landwirtschaftsböden ²⁹
Ausland	97	51	48-55	I3	Futter-Import in die Tierhaltung
		46	42-49	I4	Mineraldünger-Import in den Pflanzenbau
Summe Inputs	203	188-218			

Total Inputs – Outputs – Senke **13** Die Unsicherheitsintervalle der Summe von Outputs und der Summe von Inputs überlappen. Die Differenz ist deshalb nicht signifikant.

Interne Stoffflüsse	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft	213	86	77-95	L1	Hofdünger/Weidegang
		127	120-133	L8	Stickstoffverbindungen in Futterpflanzen für die Tierhaltung.

Überblick über die Stickstofffrachten, die zwischen dem Subsystem Land- und Forstwirtschaft und anderen Subsystemen ausgetauscht werden, sowie über die einzelnen Flüsse, die beteiligt sind (Teilfrachten, Stofffluss). Die Bilanz des Subsystems geht auf: Die Fehlerintervalle von Output- und Input-Flüssen überschneiden sich. Kleine rechnerische Differenzen in den Summen (+/- 1) sind auf die Rundung der einzelnen Flüsse zurückzuführen.

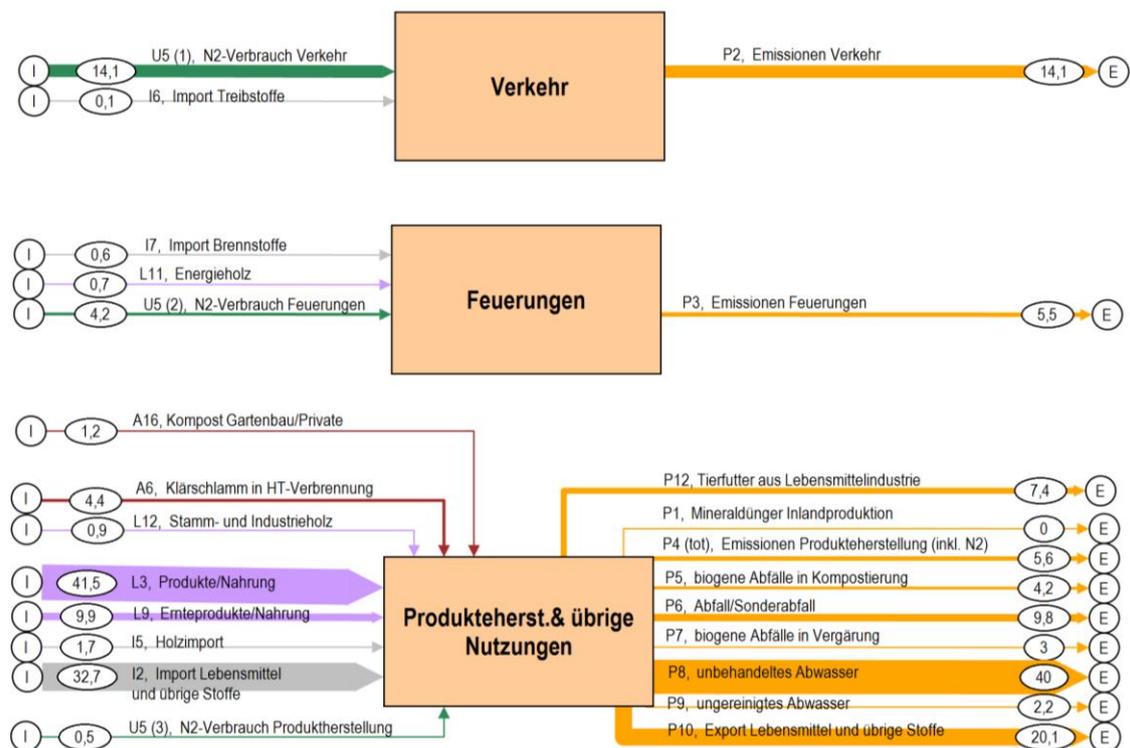
Tabelle INFRAS.

²⁹ Die hier ausgewiesene N-Deposition umfasst den gesamten Stickstoffeintrag auf Landwirtschaftsflächen. Er unterscheidet sich von der OSPAR-Bilanz, welche nur die N-Deposition umfasst die von ausserhalb der Landwirtschaft eingetragen wird. Die Differenz entspricht somit der Deposition von Stickstoff, der aus landwirtschaftlichen Quellen stammt.

5.3. Produkteherstellung/Produktenutzung

5.3.1. Flussdiagramm Produkteherstellung/Produktenutzung

Abbildung 7: Subsystem Produkteherstellung/Produktenutzung



Das Subsystem Produkteherstellung/Produktenutzung besteht aus den Prozessen Verkehr, Feuerungen und Produkteherstellung und übrige Nutzungen (orange). Die Grösse der Stickstoffflüsse ist in kt N/Jahr angegeben und beziehen sich auf das Jahr 2018. Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten.

Grafik INFRAS.

5.3.2. Prozesse und Flüsse Produkteherstellung/Produktenutzung

Die Unterteilung in die drei Prozesse Verkehr, Feuerungen sowie Produkteherstellung und übrige Nutzungen lehnt sich an die internationale Systematik der Treibhausgasinventare an. Weitere Kommentare siehe die folgenden Prozessbeschreibungen.

Verkehr

Der Prozess "Verkehr" umfasst die Stickstoffumwandlung in Fahrzeug- und Maschinenmotoren. Dazu gehören Strassenfahrzeuge, Schiffe, Diesel-Lokomotiven, Flugzeuge sowie Arbeitsgeräte Baumaschinen, Traktoren, Motorsägen, Rasenmäher etc.

Inputs sind neben einer geringen Menge Stickstoff im Treibstoff hauptsächlich der Luftstickstoff, der bei Verbrennungsprozessen in den Motoren verbraucht und zu reaktiven Stickstoffverbindungen umgewandelt wird.

Outputs sind diese motorischen Emissionen in Form von Stickoxiden, Lachgas und Ammoniak. Ein geringer Teil davon stammt aus den Stickstoffanteilen in Benzin und Diesel.

Feuerungen

Der Prozess "Feuerungen" umfasst die Stickstoffumwandlung in Feuerungsanlagen zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser in Haushalten, Dienstleistungen und Betrieben, aber auch Prozesswärme in Industrie und Gewerbe.

Input ist wie beim Verkehr zum grössten Teil der Luftstickstoff, der in Feuerungen verbraucht wird. Ein geringer Teil besteht aus den Stickstoffanteilen in den Brennstoffen, insbesondere in Holz.

Outputs sind Emissionen in Form von Stickoxiden, Lachgas und Ammoniak.

Produktherstellung und übrige Nutzungen

Der Prozess "Produktherstellung und übrige Nutzungen" umfasst Stickstoffumwandlungen in Industrieprozessen (mineralische, keramische, chemische Prozesse und Metallproduktion) und Nutzungen von Produkten in Haushalt und Wirtschaft. Dazu gehören sowohl die Verarbeitung und der Konsum von inländischen als auch von importierten Nahrungsmitteln. Für den Stickstoffkreislauf bedeutsam sind Produktion, Verarbeitung und Konsum von Lebensmitteln und die Verarbeitung von Holz. Auch die Fleischverarbeitung und die Produktion von Tiermehl gehört in diesen Prozess. Heute werden Schlachtabfälle in Zementwerken verbrannt, wodurch ein interner Stickstofffluss im Prozess "Produktherstellung und übrige Nutzungen" entsteht. Die Stickstoffflüsse im Zusammenhang mit Schlachtnebenprodukten sind im Kapitel 6.3 ausführlich beschrieben.

Inputs sind Stickstofffrachten in landwirtschaftlichen Produkten, importierten Lebensmittel und übrige Produkte und Holz aus dem In- und Ausland, sowie Klärschlamm und Kompost aus der Abfallwirtschaft. Zudem wird eine kleine Menge Luftstickstoff bei Verbrennungsprozessen verbraucht.

Outputs sind die Stickstofffrachten im Tierfutter für die Landwirtschaft und in den Lebensmitteln und übrigen Stoffen, die exportiert werden. Weiter gibt es Emissionen in Form von Luftstickstoff, Stickoxiden, Lachgas und Ammoniak in die Atmosphäre, zudem Stickstofffrachten im Abwasser und in diversen Abfallströmen.

Tabelle 5: Stickstoffflüsse Produkteherstellung/Produktenutzung

Output aus Produkteherstellung/Produktenutzung nach/in Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft	7.4	7.4	5.2-9.6	P12	Tierfutter aus Lebensmittelindustrie
Umwelt	27	14	11.3-16.9	P2	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus dem Verkehr
		5.5	4.4-6.6	P3	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus Feuerungen
		1.6	1.3-1.9	P4	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus übrigen Nutzungen
		4.0	1.2-6.8	P4 (N _{nr})	Emissionen (N ₂) aus übrigen Nutzungen
		2.2	1.1-3.3	P9	ungereinigtes Abwasser
Abfallwirtschaft	57	10	4.9-15	P6	Abfall/Sonderabfall aus Haushalten und Industrie in KVA/SAVA
		40	36-44	P8	Abwasser in Abwasserreinigung
		4.2	1.3-7.2	P5	Biogene Abfälle in Kompostierung
		3.0	0.9-5.1	P7	Biogene Abfälle in Vergärung
Ausland	20	20	14-26	P10	Export Lebensmittel und übrige Stoffe
Summe Outputs	112	102-122			
Input in Produkteherstellung/Produktenutzung von/aus Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft	53	41	35-48	L3	Produkte/Nahrung aus der Tierhaltung
		0.7	0.6-0.7	L11	Energieholz aus der Waldwirtschaft
		0.9	0.8-0.9	L12	Stamm- und Industrieholz aus der Waldwirtschaft
		10	7.9-12	L9	Ernteprodukte/Nahrung aus dem Pflanzenanbau
Abfallwirtschaft	5.6	4.4	1.3-7.5	A6	Klärschlamm in HT-Verbrennung
		1.2	0.6-1.9	A16	Kompost Gartenbau/Private
Umwelt	19	14	11-17	U5 ₁	N ₂ -Verbrennung durch Verkehr
		4.2	3.4-5.1	U5 ₂	N ₂ -Verbrennung durch Feuerungen
		0.5	0.4-0.6	U5 ₃	N ₂ -Verbrennung durch Produkteherstellung und übrige Nutzungen

Ausland	35	33	28-38	I2	Import Lebensmittel und übrige Stoffe
		1.7	1.2-2.2	I5	Holz-Import
		0.1	<1	I6	Import Treibstoffe
		0.6	<1	I7	Import Brennstoffe
Summe Inputs	112	103-122			

Total Inputs-Outputs	0.6	Die Unsicherheitsintervalle der Summe von Outputs und der Summe von Inputs überlappen. Die Differenz ist deshalb nicht signifikant.
-----------------------------	------------	---

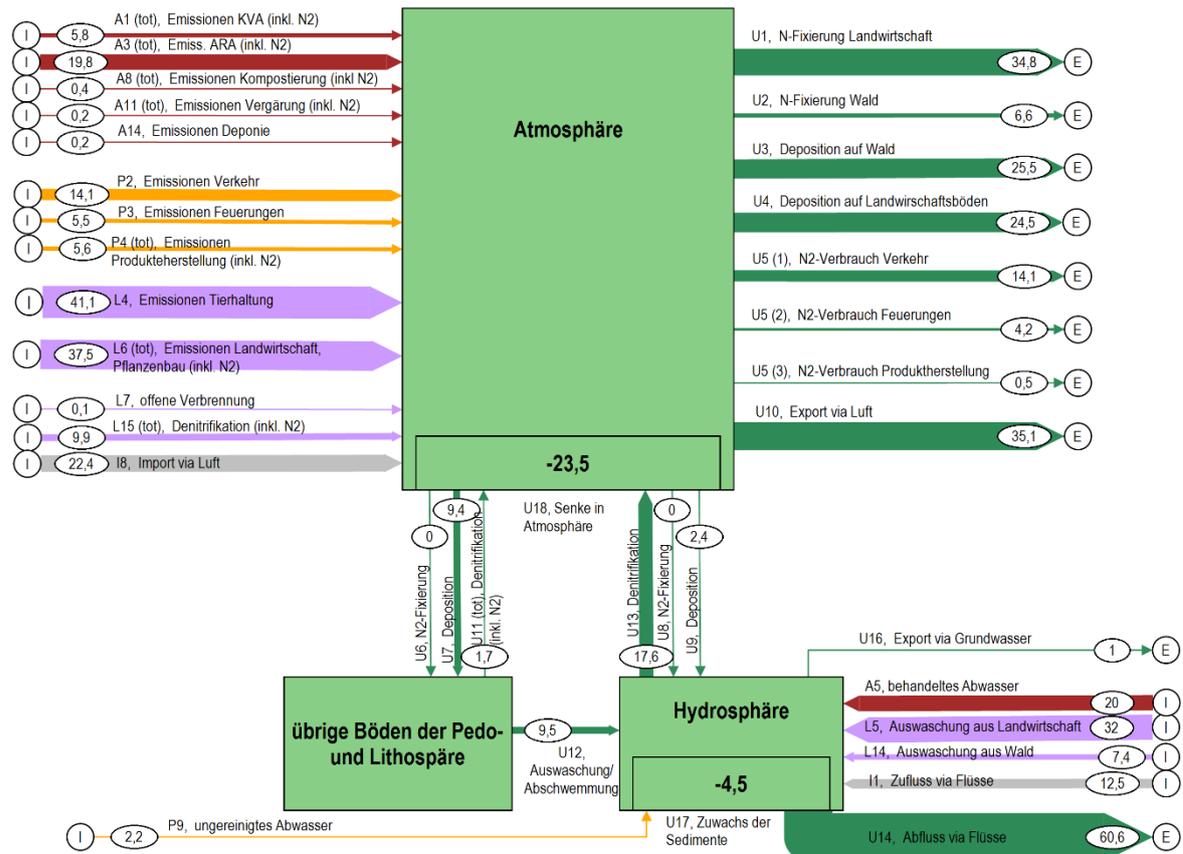
Überblick über die Stickstofffrachten, die zwischen dem Subsystem Produkteherstellung/Produktenutzung und anderen Subsystemen ausgetauscht werden, sowie über die einzelnen Flüsse, die beteiligt sind (Teilfrachten, Stofffluss). Die Bilanz des Subsystems geht auf: Die Fehlerintervalle von Output- und Input-Flüssen überschneiden sich. Kleine rechnerische Differenzen in den Summen (+/- 1) sind auf die Rundung der einzelnen Flüsse zurückzuführen.

Tabelle INFRAS.

5.4. Umwelt

5.4.1. Flussdiagramm Umwelt

Abbildung 8: Subsystem Umwelt



Das Subsystem Umwelt besteht aus den Prozessen Atmosphäre, übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre und Hydrosphäre. Die Größe der Stickstoffflüsse ist in kt N/Jahr angegeben und beziehen sich auf das Jahr 2018. Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten. Die Lagerveränderungen (U17 und U18) wird als negative Werte dargestellt, da es sich um Senken handelt.

Grafik INFRAS.

5.4.2. Prozesse und Flüsse Umwelt

Atmosphäre

Im Prozess "Atmosphäre" finden komplexe Stickstoffumwandlungsprozesse der Atmosphäre statt, typischerweise die Oxidation von NH_3 , NO und NO_2 .

Inputs in die Atmosphäre sind Emissionen in Form von NO_x , NH_3 , N_2O und N_2 aus der Landwirtschaft (Tierhaltung, Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau), der natürlichen Umwelt (Hydrosphäre und übrige Böden der Pedosphäre), aus Verkehr, Feuerungen und Produkteherstellung und übrige Nutzungen sowie aus der Abfallwirtschaft.

Outputs erfolgen durch trockene und nasse Deposition von Stickstoffverbindungen, durch die Aufnahme von Luftstickstoff durch N-fixierende Pflanzen, durch den Stickstoffverbrauch bei der Verbrennung fossiler Energieträger im Verkehr und in Feuerungen sowie in Prozessen und übrigen Nutzungen. Eine Verfrachtung von Stickoxiden und Ammoniak/Ammonium findet sowohl über die Landesgrenze ins Ausland wie auch in umgekehrter Richtung statt.

Die gesamten Stickstoff-Inputs in die Atmosphäre sind um 23.5 kt N höher als die Outputs. Dieser Bilanzüberschuss wird als Senke in der Atmosphäre erfasst, da der in die Atmosphäre eingetragene Luftstickstoff (N_2)³⁰ im schier unendlichen Pool an Luftstickstoff in der Atmosphäre verschwindet.

Hydrosphäre

Zum Prozess "Hydrosphäre" gehören Stickstoffumwandlungsprozesse in Oberflächengewässern und Sedimenten, im Grundwasser und in aquatischen Ökosystemen. Weiter gehört die Mineralisierung von Stickstoff durch den Abbau organischer Substanz, der Stickstoffeinbau in Biomasse und die Nitrifikation/Denitrifikation dazu.

Inputs erfolgen durch die Auswaschung von Nitrat aus Landwirtschaftsböden, Wald- und übrigen Böden, durch N-fixierende Mikroorganismen und durch den Zufluss von Abwasser sowie mit Fließgewässern aus dem Ausland.

Outputs erfolgen durch Emissionen der Denitrifikationsprodukte N_2O und N_2 in die Atmosphäre, durch Abfluss von N-Verbindungen über die grenzüberschreitenden Flüsse Rhein, Rhône, Inn, usw. ins Ausland und durch Export via Grundwasser (nach Infiltration).

Ausserdem enthält die Hydrosphäre eine Senke: Jährlich werden netto ca. 4.5 kt N sedimentiert.

Übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre

Der Prozess "übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre" beschreibt Stickstoffumwandlungsprozesse in Böden von Siedlungsflächen und unwirtlichen Gebieten (Landwirtschafts- und Waldböden gehören nicht zu diesem Prozess, siehe "Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau" resp. "Wald" im Subsystem Land- und Forstwirtschaft).

³⁰ Bei der Berechnung der N-Senke in der Atmosphäre werden alle N-Verbindungen betrachtet, da sich z.B. fixiertes N_2 aus der Atmosphäre im N-Kreislauf wandelt.

Inputs erfolgen durch N-fixierende Pflanzen und die atmosphärische N-Deposition. Outputs sind Emissionen der Denitrifikationsprodukte sowie die Auswaschung von Nitrat in Gewässer und ins Grundwasser.

Tabelle 6: Stickstoffflüsse Umwelt

Output von Umwelt nach/in Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft	91	35	27-42	U1	N ₂ -Fixierung durch Landwirtschaftspflanzen
		6.6	3.3-9.9	U2	N ₂ -Fixierung durch Waldpflanzen
		25	18-33	U3	Atmosphärische Deposition auf Wald
		25	17-32	U4	Atmosphärische Deposition auf Landwirtschaftsböden
Produkteherstellung/Produktenutzung	19	14	11-17	U5 ₁	N ₂ -Verbrauch durch Verkehr
		4.2	3.4-5.1	U5 ₂	N ₂ -Verbrauch durch Feuerungen
		0.5	0.4-0.6	U5 ₃	N ₂ -Verbrauch durch Prozesse
Ausland	97	35	32-39	U10	Verfrachtung von reakt. N-Verbindungen (NO _x , NH _y) via Luft ins Ausland
		61	55-67	U14	Abfluss von Stickstoff durch Flüsse
		1.0	0.5-1.5	U16	Export via Grundwasser
Summe Outputs:	207		191-221		
Senke	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Umwelt, Hydrosphäre	28	4.5	3.2-5.9	U16	Zuwachs der Sedimente in Gewässern
Umwelt, Atmosphäre		24	16-31	U18	Senke in Atmosphäre
Summe Outputs + Senken	235		218-252		

Input in Umwelt von/aus Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft	128	41	37-45	L4	Emissionen aus der Tierhaltung
		32	26-38	L5	Auswaschung (NO ₃) aus Landwirtschaftsböden in die Hydrosphäre
		9	8-9	L6 (N _r)	Emissionen (N ₂ O, NH ₃) aus Landwirtschaftsböden
		29	14-43	L6 (N _{nr})	Emissionen (N ₂) aus Landwirtschaftsböden
		0.1	0-0.15	L7	Offene Verbrennung von landw. Abfällen inkl. illegale Müllverbrennung
		7.4	3.7-11	L14	Nitrat- Auswaschung aus Waldböden
		3.9	2.3-5.4	L15 (N _r)	Denitrifikation (N ₂ O) aus Waldböden
		6	3-9	L15 (N _{nr})	Denitrifikation (N ₂) aus Waldböden
Produkteherstellung/Produktenutzung	27	14	11-17	P2	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus dem Verkehr
		5.5	4.4-6.6	P3	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus Feuerungen
		1.6	1.3-1.9	P4	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus Prozessen und übrigen Nutzungen
		4.0	1.2-6.8	P4 (N _{nr})	Emissionen (N ₂) aus und Prozessen und übrigen Nutzungen
		2	1.1-3.3	P9	Ungereinigtes Abwasser
Abfallwirtschaft	46	0.6	0.4-0.7	A1 (N _r)	Emissionen (N ₂ O, N ₂ O, NH ₃) aus KVA, SAVA
		5.2	0-10	A1 (N _{nr})	Emissionen (N ₂) aus KVA, SAVA
		1.3	0.7-2.0	A3 (N _r)	Emissionen (N ₂ O, NO _x) aus der Abwasserreinigung
		19	9-28	A3 (N _{nr})	Emissionen (N ₂) aus der Abwasserreinigung
		20	18-22	A5	Gereinigtes Abwasser aus der Abwasserreinigung
		0.3	0.1-0.5	A8 (N _r)	Emissionen (NO _x , NH _y) aus der Kompostierung
		0.2	0-0.3	A8 (N _{nr})	Emissionen (N ₂) aus der Kompostierung
		0.2	0.1-0.2	A11 (N _r)	Emissionen (NO _x , NH _y) aus der Vergärung

		0.00	0-0	A11 (N _{rr})	Emissionen (N ₂) aus der Vergärung
		0.2	0.1-0.3	A14	Emissionen (NH ₃) aus Deponien
Ausland	35	22	20-25	I8	N ₂ -Verfrachtung via Luft (vom Ausland)
		12	9-16	I1	Zufluss von Stickstoff durch Flüsse
Summe Inputs	237	215-258			

Total Inputs – Outputs – Senken	Die Unsicherheitsintervalle der Summe von Outputs (plus Senke) und der Summe von Inputs überlappen. Die Differenz ist deshalb nicht signifikant.
--	--

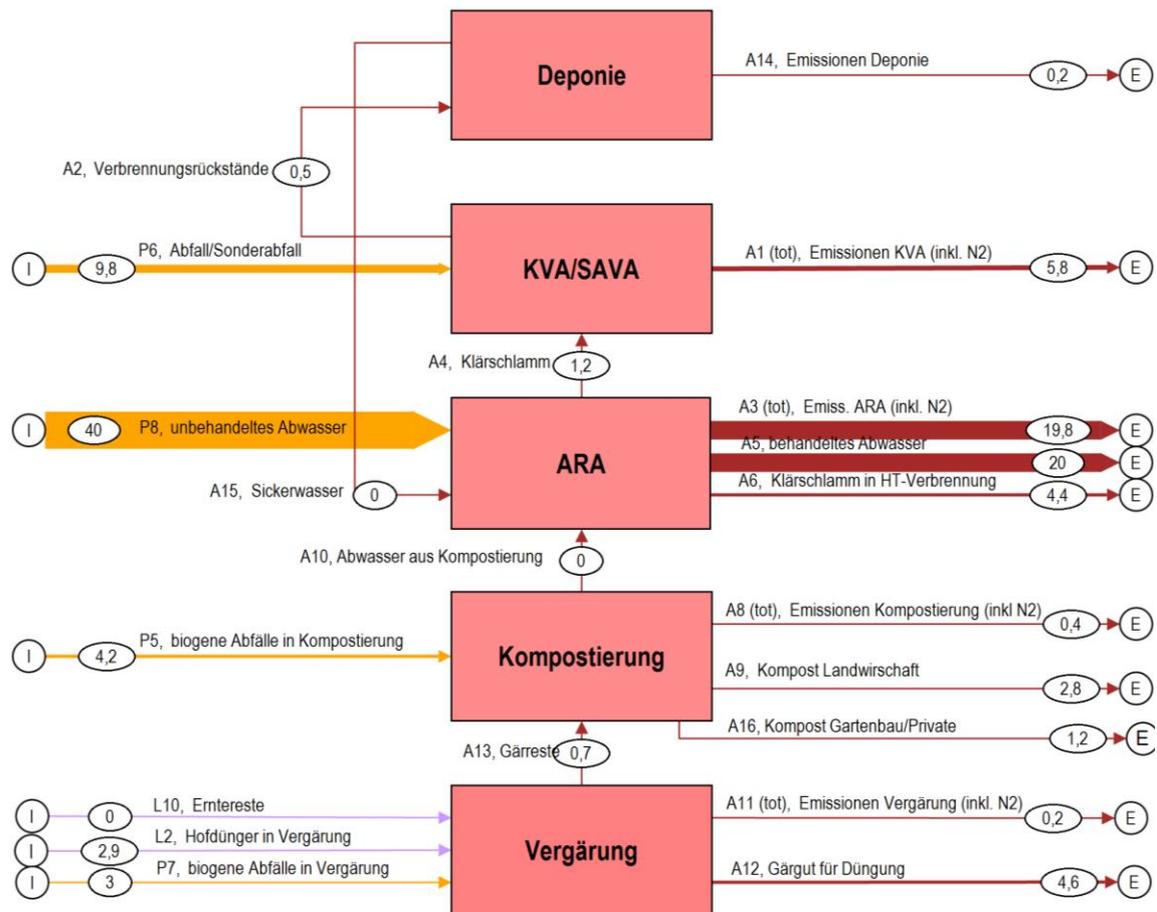
Überblick über die Stickstofffrachten, die zwischen dem Subsystem Umwelt und anderen Subsystemen ausgetauscht werden, sowie über die einzelnen Flüsse, die beteiligt sind (Teilfrachten, Stofffluss). Die Bilanz des Subsystems geht auf: Die Fehlerintervalle von Output- und Input-Flüssen überschneiden sich. Kleine rechnerische Differenzen in den Summen (+/- 1) sind auf die Rundung der einzelnen Flüsse zurückzuführen.

Tabelle INFRAS.

5.5. Abfallwirtschaft

5.5.1. Flussdiagramm Abfallwirtschaft

Abbildung 9: Subsystem Abfallwirtschaft



Das Subsystem Abfallwirtschaft besteht aus den Prozessen Deponie, KVA/SAVA, ARA, Kompostierung und Vergärung. Die Grösse der Stickstoffflüsse ist in kt N/Jahr angegeben und beziehen sich auf das Jahr 2018. Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten.

Grafik INFRAS.

5.5.2. Prozesse und Flüsse Abfallwirtschaft

Kehricht- und Sonderabfallverbrennungsanlagen

Der Prozess umfasst alle Anlagen zur Verbrennung von Siedlungsabfällen und Sonderabfällen im Sinne des 5. Kapitels der Technischen Verordnung über Abfälle (TVA) vom 10. Dezember 1990.

Inputs sind Abfälle und Klärschlamm (und Luftstickstoff), Outputs sind stickstoffhaltige Abwässer und gasförmige Emissionen, wobei hauptsächlich N_2 anfällt.

Abwasserreinigungsanlagen

Der Prozess umfasst alle Abwasseranlagen gemäss Art. 15 des Bundesgesetzes über den Gewässerschutz vom 24. Januar 1991.

Inputs sind Siedlungsabwasser, Abwasser aus Rauchgasreinigungsanlagen und Sickerwasser. Outputs sind geklärtes Abwasser (nitrathaltig), Klärschlamm und gasförmige Emissionen, wobei hauptsächlich N_2 anfällt.

Kompostierung

Der Prozess umfasst sämtliche Anlagen zur Kompostierung von biogenen Abfällen. Inputs sind biogene Abfälle, Outputs Kompost, Luftschadstoffemissionen (hauptsächlich Ammoniak) und stickstoffreiches Abwasser.

Vergärung

Der Prozess umfasst sämtliche Anlagen zur Vergärung von biogenen Abfällen. Bei der Vergärung wird das Material durch Mikroorganismen in Abwesenheit von Sauerstoff (anaerobe Bedingungen) in Biogas und Gärreste umgewandelt.

Inputs sind Hofdünger, Erntereste und biogene Abfälle. Der Output von Stickstoff erfolgt mit den Gärresten und dem Gärgut sowie mit Luftschadstoffemissionen, v.a. Ammoniak. Das Hauptprodukt Biogas enthält keinen Stickstoff.

Die Stickstoffflüsse der Vergärung werden im Kapitel 6.1 detailliert behandelt.

Deponien

Der Prozess umfasst alle Anlagen zur Deponierung von Abfällen im Sinne des 3. Kapitels der Technischen Verordnung über Abfälle (TVA) vom 10. Dezember 1990.

Inputs sind Abfälle gemäss TVA (Anhang 1, Ziffer 2). Outputs sind Sickerwasser und Luftschadstoffemissionen (NH_3 und NO_x).

Tabelle 7: Stickstoffflüsse Abfallwirtschaft

Output von Abfallwirtschaft nach/in Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft	7.3	2.8	2.6-2.9	A9	Kompost aus der Kompostierung
		4.6	3.2-5.9	A12	Gärgut für Düngung
Produkteherstellung/Produktenutzung	5.6	4.4	1.3-7.5	A6	Klärschlamm in HT-Verbrennung
		1.2	0.6-1.9	A16	Kompost Gartenbau/Private
Umwelt	46	0.6	0.4-0.7	A1 (N _r)	Emissionen (N ₂ O, N ₂ O, NH ₃) aus KVA, SAVA
		5.2	0-10.4	A1 (N _{nr})	Emissionen (N ₂) aus KVA, SAVA
		0.3	0.1-0.5	A8 (N _r)	Emissionen (NO _x , NH _y) aus der Kompostierung
		0.2	0-0.3	A8 (N _{nr})	Emissionen (N ₂) aus der Kompostierung
		0.2	0.1-0.2	A11 (N _r)	Emissionen (NO _x , NH _y) aus der Vergärung
		0.00	0-0	A11 (N _{nr})	Emissionen (N ₂) aus der Vergärung
		0.2	0.1-0.3	A14	Emissionen (NH ₃) aus Deponien
		1.3	0.7-2	A3 (N _r)	Emissionen (NO _x , N ₂ O, NH ₃) aus der Abwasserreinigung ³¹
	19	9-28	A3 (N _{nr})	Emissionen (N ₂) aus der Abwasserreinigung	
	20	18-22	A5	gereinigtes Abwasser aus der ARA	
Summe Outputs	59.4	48-71			

Input in Abfallwirtschaft von/aus Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft	3	2.9	1-4	L2	Hofdünger in die Vergärung
		0.04	0-0.1	L10	Erntereste in die Vergärung
Produkteherstellung/Produktenutzung	57	10	5-15	P6	Abfall / Sonderabfall
		40	36-44	P8	Abwasser
		4	1-7	P5	Biogene Abfälle in Kompostierung
		3	1-5	P7	Biogene Abfälle in Vergärung
Summe Inputs	59.9	52-67			

³¹ Eine Studie von EAWAG/HAFL (2021) zeigt, dass die N₂O-Emissionen aus Abwasserreinigungsanlagen bisher um rund 80% unterschätzt wurden. Die Autoren der Studie haben eine neue Methode entwickelt, welche die bisherige Unterschätzung korrigiert. In der vorliegenden Studie werden die nach der neuen Methode bestimmten Lachgasemissionen verwendet (EAWAG/HAFL 2021). Sie entsprechen der aktuellsten verfügbaren Datengrundlage zu den Lachgasemissionen aus den Abwasserreinigungsanlagen.

Total Inputs – Outputs **0.6** Die Unsicherheitsintervalle der Summe von Outputs und der Summe von Inputs überlappen. Die Differenz ist deshalb nicht signifikant.

Input in Abfallwirtschaft von/aus Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Abfallwirtschaft	1.9	1.2	0.6-1.8	A4	Klärschlamm aus der ARA in die KVA
		0.0	0-0	A10	Abwasser aus der Kompostierung in die ARA
		0.7	0.3-1	A13	Gärreste aus der Vergärung in die Kompostierung
		0.02	0.01-0.03	A15	Sickerwasser aus Deponien
		<<1	<1	A2	Verbrennungsrückstände aus KVA in Deponie

Überblick über die Stickstofffrachten, die zwischen dem Subsystem Abfallwirtschaft und anderen Subsystemen ausgetauscht werden, sowie über die einzelnen Flüsse, die beteiligt sind (Teilfrachten, Stofffluss). Die Bilanz des Subsystems geht auf: Die Fehlerintervalle von Output- und Input-Flüssen überschneiden sich. Kleine rechnerische Differenzen in den Summen (+/- 1) sind auf die Rundung der einzelnen Flüsse zurückzuführen.

Tabelle INFRAS.

5.6. Import- und Export-Flüsse

Flüsse an Stickstoff die ins Ausland bzw. aus dem Ausland in die Schweiz gelangen, werden als Import- und Exportflüsse erfasst. Dabei betrachtet das Stoffflusssystem die Stickstoffflüsse über alle Wirtschaftssektoren hinweg. Im Gesamtsystem (Abbildung 5) sind die Importe (I) und Exporte (E) übersichtlich abgebildet.

5.6.1. Prozesse und Flüsse Import/Export

Tabelle 8: Stickstoffflüsse Import- und Export-Flüsse

Export ins Ausland von Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft	1.4	1.4	1.0-1.8	L16	Holz-Export
Produkteherstellung/Produktenutzung	20	20	14-26	P10	Export Lebensmittel und übrige Stoffe
Umwelt	97	61	55-67	U14	Abfluss via Flüsse
		35	32-39	U10	Export via Luft (NO _x und NH _y) ³²
		1.0	0.5-1.5	U16	Export via Grundwasser
Summe Outputs	118				

³² NO_x: Als NO_x wird die Summe von NO und NO₂ bezeichnet.

NH_y: Die Summe der reduzierten Verbindungen (NH₃ + NH₄⁺) wird als NH_y bezeichnet.

Senken	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft, Wald	33	5.1	2.6-7.7	L18	Holzzuwachs im Wald
Umwelt, Hydrosphäre		4.5	3.2-5.9	U17	Zunahme der Sedimente in Ge- wässern
Umwelt, Atmosphäre		24	16-31	U18	Senke in Atmosphäre
Summe Senken	33				
Summe Outputs + Senken	151	139-163			

Import aus dem Ausland ins Subsystem	Fracht (kt N/a)	Fluss (kt N/a), Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Land- und Forstwirtschaft	97	46	42-49	I4	Mineraldünger (Import)
		51	48-55	I3	Futter-Import
Produkteherstellung/Pro- duktenutzung	35	33	28-38	I2	Import Lebensmittel und übrige Stoffe
		0.5	1.2-2.2	I5	Holz-Import
		0.1	<1	I6	Import Treibstoffe
		0.6	<1	I7	Import Brennstoffe
Umwelt	35	12	9-16	I1	Zufluss via Flüsse
		22	20-25	I8	Import via Luft (vom Ausland) von NOx-N und NHy-N
Summe Inputs	167	159-175			

Total in minus out minus Senken	16	Die Unsicherheitsintervalle der Summe von Outputs und der Summe von Inputs überlappen.			
--	-----------	--	--	--	--

Überblick über die Stickstofffrachten, die zwischen der Schweiz und dem Ausland ausgetauscht werden (Frachten), sowie über die einzelnen Flüsse, die dabei beteiligt sind (Teilfrachten, Stofffluss). Die Import-Export-Bilanz geht auf: Die Fehlerintervalle von Output- und Input-Flüssen überschneiden sich.

Tabelle INFRAS.

Tabelle 8 zeigt die Stickstoffflüsse, die durch Güterimporte in die Schweiz gelangen und diejenigen, die durch Exporte exportiert werden. Wie bei jedem Subsystem sollten die Input-Flüsse ins System hinein den Outputs über die Systemgrenze hinaus plus den Lagerveränderungen (Akku-mulationen/Quellen, Senken) entsprechen (siehe Kapitel 4). Die Inputs sind um rund 16 kt N höher als die Outputs plus Senken. Da aber die Unsicherheitsbereiche (d.h. die statistisch signi-fikanten Intervalle) überlappen, kann davon ausgegangen werden, dass die Import-Export-Bi-lanz aufgeht.

5.7. Lagerveränderungen (Quellen, Senken)

Anders als Stickstoffflüsse, die mit einem (biogenen) Güterfluss in Verbindung stehen oder als Emissionen messbar sind, sind Quellen und Senken schwieriger zu erfassen. Da die Input- und Output-Bilanzen nicht in jedem Subsystem genau aufgehen, ist denkbar, dass weitere, bisher nicht quantifizierte Lagerveränderungen vorhanden sind. Mittels Literaturrecherche und Expertengesprächen wurden daher folgende möglichen Lagerveränderungen abgeklärt:

- **Senke in der Umwelt:** Neben den bereits quantifizierten Senken durch Sedimentation in Gewässern (U17) und Holzzuwachs im Wald (L18) könnte eine Akkumulation von Stickstoff in Böden (unproduktiven Flächen, d.h. im Prozess übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre) und Biomasse stattfinden. Natürliche Ökosysteme, die Kohlenstoff-Senken sind, sind auch N-Senken, da in der organischen Substanz sowohl Kohlenstoff als auch Stickstoff vorhanden ist (z.B. der Wald mit der Senke L18). C und N stehen je nach Art des organischen Materials in einem konstanten Verhältnis. Zudem haben Experten auf ein insgesamt sinkendes C/N-Verhältnis in natürlichen Ökosystemen hingewiesen, wobei die Bandbreiten der C/N-Verhältnisse in der Literatur sehr gross sind. Die aktuelle Datenlage ermöglicht daher keine belastbare Quantifizierung einer solchen N-Senke. Untersuchungen für Grossbritannien (Janes-Basset et al. 2021) zeigen, dass die Speicherung von Kohlenstoff in Ökosystemen seit der vorindustriellen Zeit zugenommen hat. Es ist davon auszugehen, dass in der Schweiz eine ähnliche Entwicklung stattgefunden hat und neben Kohlenstoff somit auch vermehrt Stickstoff in Ökosystemen gespeichert wird.
- **Lagerveränderung durch Akkumulation von Gütern:** Die Lagerhaltung von Gütern an sich führt nicht zu einer Akkumulation Stickstoff, einzig eine zunehmende Lagerung könnte eine Stickstoffsенke darstellen. Der Aufbau eines Mineräldüngervorrats beispielsweise wäre ein möglicher Grund. Abklärungen mit Experten vom BWL und von Agricura haben jedoch ergeben, dass keine Akkumulation in den Lagern stattfindet.
- **Senke in der Verarbeitung von Rohöl:** Rohöl hat einen höheren Stickstoffanteil als die Endprodukte des Raffinerungsprozesses (Heizöl, Benzin etc.). Diese Diskrepanz wurde in Deutschland (UBA 2020a) so erklärt, dass Stickstoff während der Verarbeitung von Rohöl zu Mineralölprodukten in hoher Masse – bis auf das dabei gebildete NO_x – zu N_2 umgewandelt wird. Eine zuverlässige Datenquelle wurde dazu jedoch nicht gefunden. Die Schweiz importiert Energie in Form von Rohöl, das in der Raffinerie in Cressier (NE) zu Heizöl, Benzin, Diesel oder Flugpetrol weiterverarbeitet wird. Ein Grossteil der Erdölprodukte wird jedoch direkt in Form von Fertigprodukten importiert (SES 2020). Die Grössenordnung der in Form von Rohöl importierten Stickstoffmenge und die Aufteilung dieser Stickstofffracht auf die verschiedenen Endprodukte des Raffinerungsprozesses und die Stickstoffemissionen in die

Luft sollten bei einer zukünftigen Aktualisierung der Stickstoffflüsse genauer untersucht werden. Die Stickoxid-Emissionen aus Verbrennungsprozessen sind in der vorliegenden Studie jedoch bereits berücksichtigt (Fluss P3).

6. Resultate Themen im Fokus

6.1. Vergärung

6.1.1. Prozesse und Flüsse Biogasanlagen und Vergärung

Die Stickstoffflüsse der Vergärung sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Abbildung zeigt die gesamten Stickstoffflüsse und die Anteile davon, die aus von gewerblich/industriellen bzw. landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen stammen. In Tabelle 9 bis Tabelle 11 sind die einzelnen Stickstoffflüsse und deren Datengrundlagen beschrieben.

Stickstoffinputs in die Vergärung (Abfallwirtschaft) umfassen Hofdünger und Erntereste aus der Landwirtschaft sowie biogene Abfälle/Grüngut aus der Produkteherstellung/Produktenutzung. Insgesamt fliessen 5.9 kt Stickstoff in die Vergärung, wobei 2.9 kt N aus der Landwirtschaft und 3 kt N aus der Produkteherstellung stammen. Insgesamt fliesst etwas mehr Stickstoff in die landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen (3.7 kt N) als in die gewerblich/industriellen Anlagen (2.2 kt N).

Inputs aus der Landwirtschaft

Hofdünger aus der Tierhaltung stellt den Grossteil des Stickstoffinputs aus der Landwirtschaft in die Vergärung dar (2.9 kt N), ein geringer Teil Stickstoff stammt aus dem Pflanzenbau (Erntereste: 0.04 kt N) (siehe Tabelle 9). 94% des Stickstoffs aus der Tierhaltung wird in landwirtschaftlichen Anlagen (hauptsächlich Gülle), und 6% in gewerblich/industriellen Anlagen (hauptsächlich Mist) verarbeitet.³³ Erntereste werden nur in geringen Mengen vergärt, dies hauptsächlich in landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen (91% des Stickstoffs gelangt in landwirtschaftliche Anlagen und 9% in gewerblich/industrielle Anlagen).

Inputs aus der Produkteherstellung

³³ Gemäss Schleiss (2021) werden flüssige und feste Hofdünger in beiden Anlagentypen (landwirtschaftliche und gewerblich/industrielle) vergärt. In landwirtschaftlichen Anlagen wird allerdings überwiegend flüssiger Hofdünger (Gülle) und in gewerblich/industriellen Anlagen fester Hofdünger (Mist) verarbeitet.

Aus dem Prozess Produkteherstellung und übrige Nutzungen gelangt Stickstoff mit biogenen Abfällen in die Vergärung. Innerhalb des Prozesses gibt es verschiedene Quellen für die Stickstofffracht (siehe Tabelle 10). 44% der Stickstoffinputs in die Vergärung stammen aus der Industrie (hauptsächlich Lebensmittelabfälle), 26% aus der Fleischverarbeitung (Schlachtnebenprodukte inkl. Gastroabfälle) und 30% aus Siedlungsabfällen und Gartenbau (Lebensmittelabfälle/Grüngut) (siehe Tabelle 10). 68% des Stickstoffs aus biogenen Abfällen aus der Produkteherstellung gelangt in gewerblich/industrielle Anlage und 32% in landwirtschaftliche Anlagen.

Outputs aus der Vergärung

Outputs aus der Vergärung umfassen Gärreste, die entweder direkt in der Landwirtschaft als Dünger verwendet oder in Kompostieranlagen weiter zu Kompost verarbeitet werden (siehe Tabelle 9). Der Grossteil des Stickstoffoutputs aus der Vergärung gelangt als Dünger in Form von flüssigem und festem Gärgut sowie als Gärgülle zurück in die Landwirtschaft (4.6 kt N). Nur eine geringe Menge wird zu Kompost weiterverarbeitet (0.7 kt N). Der Stickstoff, der mit dem Dünger direkt zurück in die Landwirtschaft gelangt, stammt zu 58% aus landwirtschaftlichen Anlagen und zu 42% aus gewerblich/industriellen Anlagen. In die Kompostierung gelangt Stickstoff mit dem Gärgut zu 81% aus gewerblich/industriellen Anlagen und zu 19% aus landwirtschaftlichen Anlagen. Nach der Kompostierung wird der Stickstoff mit dem Kompost entweder im Pflanzenbau (Landwirtschaft; 0.4 kt N) oder im Gartenbau eingesetzt (Produkteherstellung und übrige Nutzungen; 0.3 kt N).

Datengrundlagen für die Berechnung der Stickstoffflüsse der Vergärung

Tabelle 9: Datengrundlagen für die Berechnung der Stickstoffflüsse aus der Landwirtschaft in die Vergärung – unterteilt nach gewerblich/industriellen (Gew./Ind.) und landwirtschaftlichen (LW) Anlagen.

Fluss	Input Anlage	t FS	N-Gehalt (% von FS)	N-Fluss (kt N)	Quellen/Annahmen
L2 Hofdünger in Vergärung	Gew./Ind. Anlagen	34'622	0.5% ³⁴	0.2	t FS: UMWEKO 2019 N-Gehalt: Agroscope 2017, Annahme N-Gehalt Laufstallmist/Kälbermist
L2 Hofdünger in Vergärung	LW-Anlagen	672'473	0.4% ³⁴	2.7	t FS: UMWEKO 2019, N-Gehalt: Agroscope 2017, Annahme N-Gehalt Gülle
L10 Erntereste	Gew./Ind. Anlagen	1'000	0.3%	0.003	t FS: ZHAW 2018

³⁴ Gemäss Schleiss (2021) werden flüssige und feste Hofdünger in beiden Anlagentypen (landwirtschaftliche und gewerblich/industrielle) vergärt. In landwirtschaftlichen Anlagen wird allerdings überwiegend flüssiger Hofdünger (Gülle) und in gewerblich/industriellen Anlagen fester Hofdünger (Mist) verarbeitet. Deshalb werden unterschiedliche N-Gehalte für die beiden Anlagentypen angenommen.

Fluss	Input Anlage	t FS	N-Gehalt (% von FS)	N-Fluss (kt N)	Quellen/Annahmen
					TS-Gehalt: ZHAW 2018 N-Gehalt: EBP und ZHAW 2010 (Erntereste in Vergärung)
L10 Erntereste	LW-Anlagen	10'000	0.3%	0.03	t FS: ZHAW 2018 TS-Gehalt: ZHAW 2018 N-Gehalt: EBP und ZHAW 2010 (Erntereste in Vergärung)

Tabelle INFRAS. Quelle: siehe Angaben in Tabelle.

Tabelle 10: Datengrundlagen für die Berechnung der Stickstoffflüsse aus der Produkteherstellung in die Vergärung (Input) – unterteilt nach gewerblich/industriellen (Gew./Ind.) und landwirtschaftlichen (LW) Anlagen.

Fluss	Input Anlage	t FS	N-Gehalt (% von FS)	N-Fluss (kt N)	Quellen/Annahmen
P7 Biogene Abfälle in Vergärung	Gew./Ind. Anlagen	171'588	0.4%	0.6	t FS: UMWEKO 2019 TS-Gehalt: ZHAW 2018 N-Gehalt EBP und ZHAW 2010 (Lebensmittelindustrie in Vergärung Gew./Ind-Anlagen)
Teilfluss: Abfälle Industrie ³⁵					
P7 Biogene Abfälle in Vergärung	LW-Anlagen	123'145	0.6%	0.7	t FS: UMWEKO 2019 TS-Gehalt: ZHAW 2018 N-Gehalt EBP und ZHAW 2010 (Lebensmittelindustrie in Vergärung LW-Anlagen)
Teilfluss: Abfälle Industrie					
P7 Biogene Abfälle in Vergärung	Gew./Ind. Anlagen	50'000	1.2%	0.6	t FS ZHAW 2018 TS-Gehalt: ZHAW 2018 N-Gehalt EBP und ZHAW 2010 (Tierische Nebenprodukte in Vergärung LW-Anlagen)
Teilfluss: Fleischverarbeitung					
P7 Biogene Abfälle in Vergärung	LW-Anlagen	22'500	0.8%	0.2	t FS ZHAW 2018 TS-Gehalt: ZHAW 2018 N-Gehalt EBP und ZHAW 2010 (Tierische Nebenprodukte in Vergärung LW-Anlagen)
Teilfluss: Fleischverarbeitung					
P7 Biogene Abfälle in Vergärung	Gew./Ind. Anlagen	377'299	0.2%	0.8	t FS: UMWEKO, 2019, TS-Gehalt: ZHAW 2018 N-Gehalt: EBP und ZHAW 2010 (Warenkonsum in Vergärung)
Teilfluss: Siedlungsabfall und Gartenbau					

³⁵In Schleiss (2019) werden die biogenen Abfälle aus der Industrie nicht nach Quelle unterteilt. Deshalb wurden die Anteile der biogenen Abfälle aus der Fleischverarbeitung gemäss ZHAW (2018) abgeschätzt. Die Gesamtmenge Abfälle Industrie und Fleischverarbeitung entspricht den Angaben in Schleiss (2019).

Fluss	Input Anlage	t FS	N-Gehalt (% von FS)	N-Fluss (kt N)	Quellen/Annahmen
P7 Biogene Abfälle in Vergärung	LW-Anlagen	48'548	0.2%	0.1	t FS: UMWEKO 2019, TS-Gehalt: ZHAW 2018 N-Gehalt: EBP und ZHAW 2010 (Warenkonsum in Vergärung)
Teilfluss: Siedlungsabfall und Gartenbau					

Tabelle INFRAS. Quelle: siehe Angaben in Tabelle

Tabelle 11: Datengrundlagen für die Berechnung der Stickstoffflüsse aus der Vergärung in die Landwirtschaft und Kompostierung (Output) – unterteilt nach gewerblich/industriellen (Gew./Ind.) und landwirtschaftlichen (LW) Anlagen.

Fluss	Output Anlage	t TS	N-Gehalt (% von TS)	N-Fluss (kt N)	Quellen/Annahmen
A12 Gärreste für Düngung	Gew./Ind. Anlagen	Gärgut fest: 29'083	1.4%	0.4	Volumen (m ³): UMWEKO 2019 Volumengewicht ³⁶ : BAFU 2007
		Gärgut flüssig: 41'789	4%	1.5	TS-Gehalt und N-Gehalt: UMWEKO 2019
					Summe: 1.9
A12 Gärreste für Düngung	LW-Anlagen	Gärgut fest: 7'442	1.4%	0.1	Volumen (m ³): UMWEKO, 2019 Volumengewicht: BAFU, 2007
		Gärgut flüssig: 3'988	8%	0.3	TS-Gehalt und N-Gehalt: UMWEKO, 2019
		Gärgülle: 32'693	6.8%	2.2	
			Summe: 2.6		
A13 Gärreste für Kompostierung	Gew./Ind. Anlagen	38'506	1.4%	0.5	Volumen (m ³): UMWEKO, 2019 Volumengewicht: BAFU, 2007 TS-Gehalt und N-Gehalt: UMWEKO, 2019
A13 Gärreste für Kompostierung	LW-Anlagen	8'948	1.4%	0.1	Volumen (m ³): UMWEKO, 2019 Volumengewicht: BAFU, 2007 TS-Gehalt und N-Gehalt: UMWEKO, 2019
A9 Kompost in Landwirtschaft Anteil aus Vergärung (A13)				2.8 0.4	OSPAR 2021, siehe detail- lierte Herleitung im An- hang A1.4.

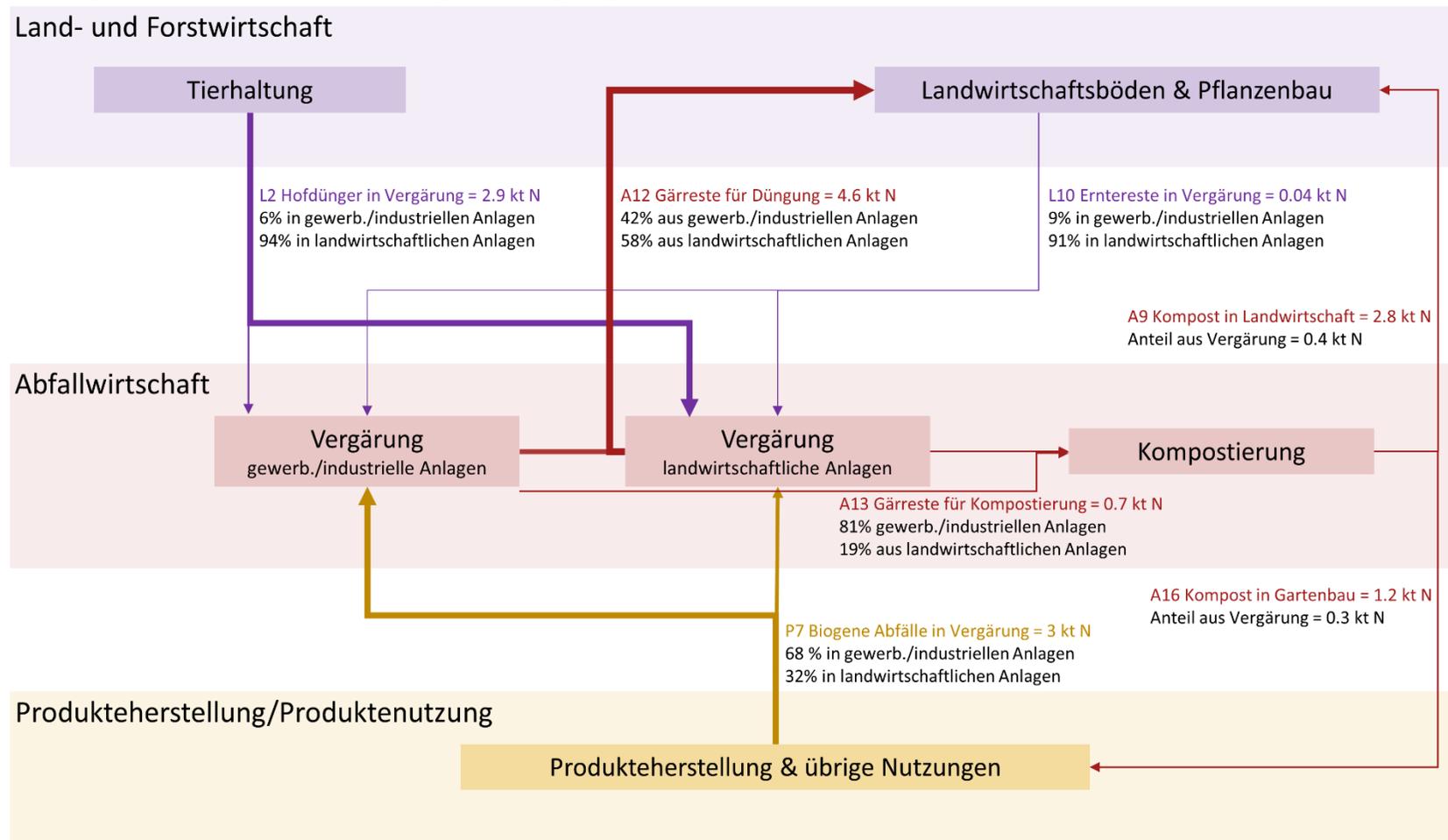
³⁶ Volumengewicht Gärgülle und flüssiges Gärgut: 1 t/m³ (Schleiss 2021)

Fluss	Output Anlage	t TS	N-Gehalt (% von TS)	N-Fluss (kt N)	Quellen/Annahmen
					<i>Anteil aus Vergärung gemäss UMWEKO, 2019</i>
A16 Kompost in Gartenbau				1.2	<i>UMWEKO 2019, siehe detaillierte Herleitung im</i>
<i>Anteil aus Vergärung (A13)</i>				0.3	<i>Anhang A1.4</i> <i>Anteil aus Vergärung gemäss UMWEKO, 2019</i>

Tabelle INFRAS. Quelle: siehe Angaben in Tabelle. Kleine rechnerische Differenzen zwischen dem Total der Flüsse und der Summe der Teilflüssen (+/- 0.1) sind auf die Rundung der einzelnen Teilflüsse zurückzuführen.

6.1.2. Flussdiagramm Vergärung

Abbildung 10: Stickstoffflüsse im Zusammenhang mit der Vergärung



Die Unsicherheit der Stickstoffflüsse der Vergärung beträgt etwa 20% (Schätzwert). Kleine rechnerische Differenzen zwischen dem Total der Flüsse in dieser Graphik und der Summe der einzelnen Teilflüssen in der Tabelle (+/- 0.1) sind auf die Rundung der einzelnen Teilflüsse zurückzuführen.

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf UMWEKO (2019), ZHAW (2018), Agroscope (2017), EBP und ZHAW (2010), BAFU (2007). Grafik INFRAS.

6.2. Food Waste

6.2.1. Prozesse und Flüsse Food Waste

Die Stickstoffflüsse, die im Zusammenhang mit Food Waste auftreten, sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Abbildung zeigt die gesamten Stickstoffflüsse und die Teilflüsse davon, die auf Food Waste zurückzuführen sind. In Tabelle 12 und Tabelle 13 sind die einzelnen Stickstoffflüsse und deren Datenquellen beschrieben.

Food Waste aus der Landwirtschaft

Food Waste aus der landwirtschaftlichen Produktion enthält etwas mehr als 1 kt Stickstoff. Der grösste Teil davon stammt aus Ernterückständen (0.8 kt N), die entweder direkt auf dem Feld untergepflügt oder am Feldrand kompostiert werden. Ein vernachlässigbar geringer Teil der Ernterückstände gelangt in die Abfallwirtschaft und wird dort vergärt (0.006 kt N). Etwa 0.3 kt Stickstoff gelangt mit Food Waste aus dem Pflanzenbau als Futtermittel in die Tierhaltung.

Food Waste aus der Produkteherstellung und Produktenutzung

Im Prozess Produkteherstellung und übrige Nutzungen entsteht Food Waste, der insgesamt etwas mehr als 12 kt N beinhaltet. Der grösste Teil dieser Stickstofffracht befindet sich im Food Waste, der in der Lebensmittelverarbeitung verursacht wird (5.5 kt N). Etwa 4.5 kt N ist im Food Waste der Haushalte enthalten und je 1.2 kt N im Food Waste der Gastronomie resp. in demjenigen aus dem Gross- und Detailhandel.

Ein Teil des Food Waste der im Prozess Produkteherstellung und übrige Nutzungen entsteht, wird als Futtermittel in der Tierhaltung (Landwirtschaft) eingesetzt und somit weiterverwendet. Er enthält eine Stickstofffracht von ca. 4.8 kt N.

Der restliche Food Waste fliesst in die Abfallwirtschaft, wobei der darin enthaltene Stickstoff in die Kehrrichtverbrennung (3.5 kt N), in die Vergärung (1.8 kt N), ins Abwasser (1.5 kt N) und in die Kompostierung (0.8 kt N) fliesst.

Datengrundlagen für die Berechnung der Stickstoffflüsse des Food Waste

Die Stickstoffflüsse des Food Waste aus der **Landwirtschaft** wurden anhand der Studie «Biomassennutzung in der Schweizer Landwirtschaft» (ZHAW 2017) abgeschätzt. In dieser Studie werden die gesamten Biomassenflüsse (z.B. Menge Tierfutter aus dem Pflanzenbau) sowie die Biomassenflüsse von Food Waste (z.B. Menge Food Waste im Tierfutter aus dem Pflanzenbau) angegeben. Anhand dieser Angaben wurde der Anteil Food Waste in jedem gesamten Biomassen-

senfluss berechnet. Die Stickstofffracht in den Food Waste Flüssen wurde anschliessend abgeschätzt, indem angenommen wurde, dass der Stickstoffgehalt des Food Waste vergleichbar ist mit dem Stickstoffgehalt des zugehörigen Gesamtflusses.

Zur Berechnung der Stickstofffracht im Food Waste aus der **Produkteherstellung/Produktenutzung** wurden Daten zur Studie «Lebensmittelverluste in der Schweiz» (ETH 2019) verwendet³⁷. Diese Daten umfassen die verschiedenen Food Waste Frachten, die in der Schweiz anfallen und beziehen sich auf die vermeidbaren Lebensmittelverluste (siehe auch Definition von Food Waste im Kapitel 3.5.1).

Die Stickstoffflüsse des Food Waste wurden mit zwei unterschiedlichen Methoden abgeschätzt. Erstens konnten die Stickstoffflüsse des Food Waste unter der Annahme berechnet werden, dass das Verhältnis der Stickstofffracht im Food Waste zur Stickstofffracht im Gesamtfluss gleich ist, wie das Verhältnis der Menge an Food Waste (z.B. Menge Food Waste in Vergärung) zur Menge des Gesamtflusses (z.B. Gesamtmenge biogene Abfälle in Vergärung). Für die Mengen an Food Waste wurden Daten der ETH (2019) und für die Menge der Gesamtflüsse Daten der ZHAW (2018) verwendet. Da diese zwei Studien unterschiedliche Referenzjahre haben, birgt die Berechnung des Stickstoffflusses mit dieser Methode eine gewisse Unsicherheit. Zudem entsteht eine weitere Unsicherheit dadurch, dass der Stickstoffgehalt des Food Waste vom Stickstoffgehalt des Gesamtflusses abweichen kann, da sich die Gesamtflüsse aus verschiedenen Substanzen mit unterschiedlichen Eigenschaften zusammensetzten (z.B. die Zusammensetzung des Abfalls ist heterogen).

Als Alternative wurden die Stickstoffflüsse des Food Waste anhand der Mengen der einzelnen Lebensmittel in der Food Waste Fracht (Daten zur Studie ETH (2019)) und dem Stickstoffgehalt der einzelnen Lebensmittel (aus Agroscope (2020)) berechnet. Diese Methode birgt ebenfalls eine gewisse Unsicherheit, da ein als Food Waste anfallendes Lebensmittel nicht zwingend den gleichen Stickstoffgehalt hat, wie das ursprüngliche Lebensmittel.

Die anhand dieser zwei Methoden berechneten Stickstoffflüsse des Food Waste wurden miteinander verglichen und plausibilisiert. Basierend darauf wurde eine Abschätzung der Stickstoffflüsse des Food Waste gemacht. Aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten beim Stickstoffgehalt der Food Waste Frachten wird eine Unsicherheit von 50% für die Stickstoffflüsse des Food Waste angenommen (angegebener Wert +/- 50%).

³⁷ Die Daten zur Studie der ETH (2019) hat das BAFU zur Verfügung gestellt.

Tabelle 12: Stickstoffflüsse des Food Waste aus der Landwirtschaft

Fluss	Input	N-Fluss Food Waste (kt N)	Quellen/Annahmen
L8 Tierfutter	Tierhaltung	0.3	ZHAW 2017, Annahme: N-Gehalt Food Waste ist gleich hoch wie N-Gehalt Gesamtfluss L8
L10 Erntereste in Vergärung	Vergärung	0.006	ZHAW 2017, Annahme: N-Gehalt Food Waste ist gleich hoch wie N-Gehalt Gesamtfluss L10
Erntereste als Dünger (interner Fluss)	Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau	0.8	ZHAW 2017, Annahme: N-Gehalt Ernterückstände gemäss EBP und ZHAW 2010

Tabelle INFRAS. Quelle: siehe Angaben in Tabelle.

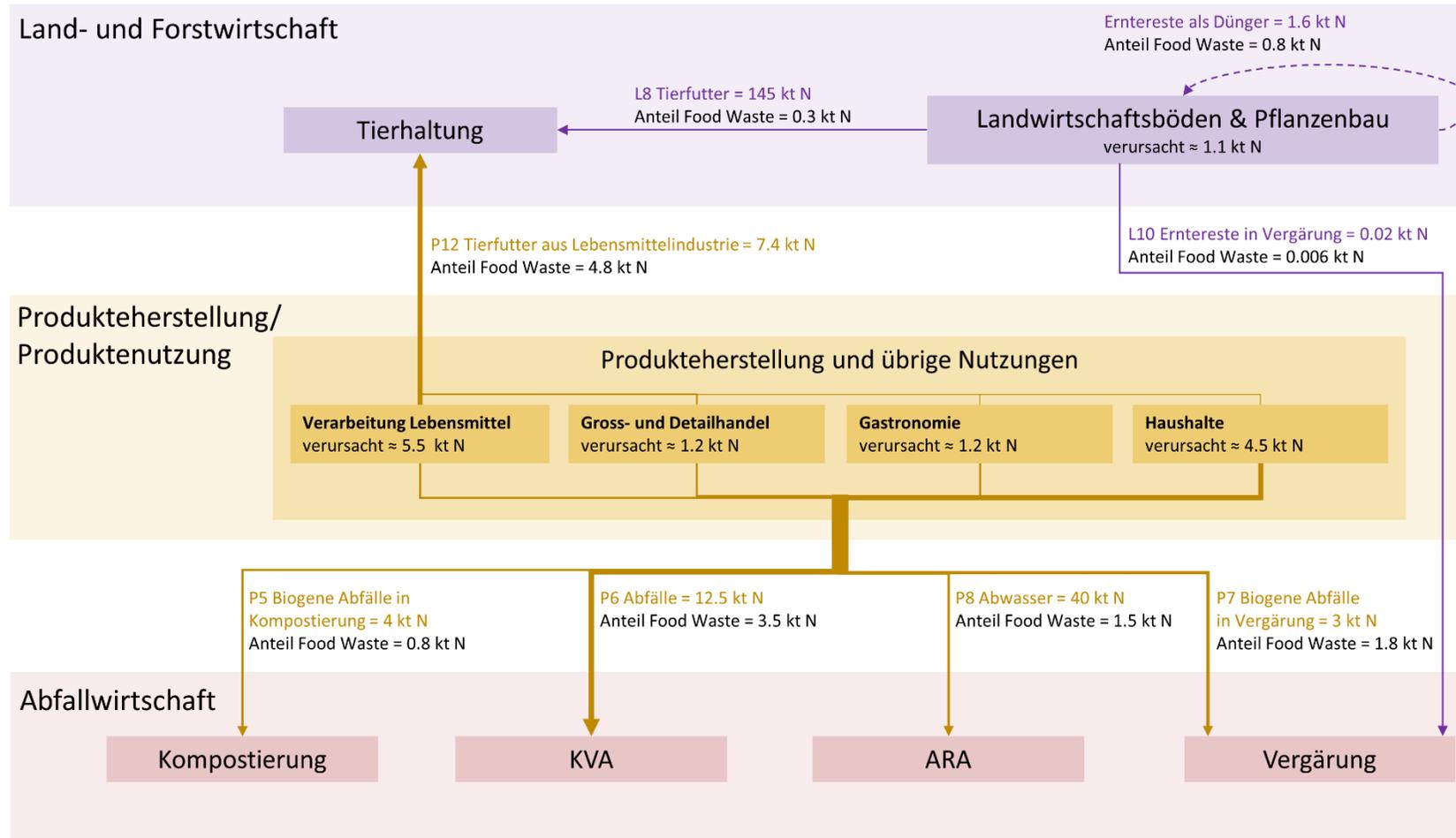
Tabelle 13: Stickstoffflüsse des Food Waste aus der Produkteherstellung und Produktenutzung

Fluss	Input	N-Fluss Food Waste (kt N)	Quellen/Annahmen
P5 Biogene Abfälle in Kompostierung	Kompostierung	0.8	Eigene Abschätzung basierend auf ETH 2019, ZHAW 2018, Agroscope 2020
P6 Abfall/Sonderabfall	Kehrrichtverbrennungsanlage	3.5	Eigene Abschätzung basierend auf ETH 2019, ZHAW 2018, Agroscope 2020
P7 Biogene Abfälle in Vergärung	Vergärung	1.8	Eigene Abschätzung basierend auf ETH 2019, ZHAW 2018, Agroscope 2020
P8 Abwasser	Abwasserreinigungsanlage	1.5	Eigene Abschätzung basierend auf ETH 2019, ZHAW 2018, Agroscope 2020
P12 Tierfutter aus Lebensmittelindustrie	Tierhaltung	4.8	Eigene Abschätzung basierend auf ETH 2019, ZHAW 2018, Agroscope 2020

Tabelle INFRAS. Quelle: siehe Angaben in Tabelle.

6.2.2. Flussdiagramm Food Waste

Abbildung 11: Stickstoffflüsse im Zusammenhang mit Food Waste



Die Dicke der eingezeichneten Flüsse widerspiegelt den Anteil Stickstoff des Food Waste. Die berechneten N-Flüsse des Food Waste haben aufgrund der Unsicherheit beim Stickstoffgehalt der verschiedenen Food Waste Frachten eine Gesamtunsicherheit von etwa 50% (Schätzwert).

Datenquelle: Eigene Berechnung basierend auf ETH (2019), ZHAW (2018), Agroscope (2020). Grafik INFRAS.

6.3. Schlachtnebenprodukte

6.3.1. Prozesse und Flüsse Schlachtnebenprodukte

Die Stickstoffflüsse der Schlachtnebenprodukte sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Abbildung zeigt die gesamten Stickstoffflüsse und die Teilflüsse davon, die aus Schlachtnebenprodukten stammen. In Tabelle 14 und Tabelle 15 sind die Datengrundlagen der einzelnen Stickstoffflüsse der Fleischverarbeitung aufgelistet.

Inputs in die Fleischverarbeitung

Inputs in die Fleischverarbeitung umfassen tierische Produkte aus der inländischen Tierhaltung (ca. 22 kt N) und importierte tierische Produkte (ca. 6 kt N).

Outputs aus der Fleischverarbeitung

Ein Grossteil des Stickstoffoutputs aus der Fleischverarbeitung gelangt mit Fleischwaren in den menschlichen Konsum in der Schweiz (ca. 11 kt N) oder wird exportiert (ca. 0.2 kt N).

Outputs aus der Fleischverarbeitung in Form von Schlachtnebenprodukten

Aus der Fleischverarbeitung gibt es einige Stickstoffflüsse mit Schlachtnebenprodukten, die innerhalb des Prozesses Produkteherstellung und übrige Nutzungen stattfinden. Einerseits werden Schlachtnebenprodukte der Risikokategorie K3 zu Heimtierfutter verarbeitet und gelangen in den Konsum in der Schweiz. Diese Stickstoffmenge beträgt etwa 1 kt N³⁸. Andererseits werden Schlachtnebenprodukte der Risikokategorie K1 zu Tiermehl verarbeitet und als Brennstoff in den Schweizer Zementwerken verwendet. Der Anteil Stickstoff aus Schlachtnebenprodukten, der als Tiermehl in Zementwerken verbrannt wird, beträgt knapp 3 kt N. Neben Tiermehl wird aus Schlachtnebenprodukten (K1) auch Tierfett gewonnen, welches für die Biodieselproduktion verwendet wird. Das Tierfett enthält allerdings keinen Stickstoff³⁹.

Schlachtnebenprodukte gelangen auch in die Abfallwirtschaft. Schlachtnebenprodukte der Kategorie K2 (z.B. Panseninhalt, Blut) werden in Vergärungsanlagen verarbeitet. Dieser Stickstofffluss beträgt weniger als 0.8 kt. Des Weiteren gelangt ein geringer Teil der Schlachtnebenprodukte ins Abwasser (< 0.4 kt N) und als Panseninhalt in die Kompostierung (< 0.1 kt N).

Der grösste Stickstofffluss der Schlachtnebenprodukte inkl. daraus verarbeitetes Heimtierfutter geht als Exportwaren (Innereien, Knochen etc.) ins Ausland. Dieser Stickstofffluss wird

³⁸ Dies beinhaltet auch Heimtierfutter, das aus importierten SNP hergestellt wurde.

³⁹ Siehe Angaben in: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2534.pdf>

auf ca. 9 kt N geschätzt⁴⁰. Darin enthalten sind auch Schlachtnebenprodukte, die im Ausland zu Heimtier- oder Nutztierfutter weiterverarbeitet werden. Die Schlachtnebenprodukte werden zur Weiterverarbeitung hauptsächlich ins umliegende Ausland (Deutschland/Frankreich) exportiert (Centravo 2021).

Tabelle 14: Datengrundlagen für die Berechnung der Stickstoffflüsse in die Fleischverarbeitung.

Fluss	Input	t TS	N-Gehalt (% von TS)	N-Fluss (kt N)	Quellen/Annahmen
L3 Produkte Nah- rung	Fleischverarbeitung	222'254	10%	22	t TS: ZHAW 2018 N-Gehalt: Agroscope 2020 ⁴¹ , Annahme N-Gehalt Rindvieh
<i>Abschätzung des An- teils in Fleischverar- beitung</i>					
I2 Import Lebensmit- tel und übrige Stoffe	Fleischverarbeitung	61'59	10%	6	t TS: ZHAW 2018 N-Gehalt: Agroscope 2020, An- nahme N-Gehalt Rindvieh
<i>Abschätzung des An- teils in Fleischverar- beitung</i>					

Tabelle 15: Datengrundlagen für die Berechnung der Stickstoffflüsse aus der Fleischverarbeitung.

Fluss	Input	t TS	N-Gehalt (% von TS)	N-Fluss (kt N)	Quellen/Annahmen
Konsum	Konsum				t TS: ZHAW 2018 N-Gehalt: Agroscope 2020, An- nahme N-Gehalt Rindvieh
<i>interner Fluss Pro- dukterstellung & übrige Nutzungen</i>	Fleisch	105'289	10%	10.5	
	Heimtierfutter	10'424	10%	1	
Industrielle Verbren- nung	Zementwerke	30'518	9%	2.7	t FS: GMZ 2019 und TMF 2018 (Menge ist vergleichbar mit den Angaben in ZHAW (2018) für das Jahr 2014) ⁴² , TS-Gehalt: ZHAW 2018, N-Gehalt: BAFU 2006, An- nahme Fleischmehl
<i>interner Fluss Pro- dukterstellung & übrige Nutzungen</i>					
P5 Biogene Abfälle in Kompostierung	Kompostierung	-	-	< 0.1	Gemäss Angaben von Centravo (2021) werden Pansen in gerin-

⁴⁰ Bei den SNP findet ein Veredelungsverkehr statt. Es werden SNP importiert, verarbeitet und wieder exportiert. Es ist anzunehmen, dass der Exportfluss an SNP deshalb so hoch ist.

⁴¹ N-Gehalt pro kg FS aus Agroscope 2020, Umrechnung N-Gehalt pro t TS gemäss TS-Gehalt aus ZHAW 2018

⁴² Gemäss Centravo (2021) wird ein geringer Anteil des Tiermehls (aus K1 SNP) exportiert und nicht im Inland verbrannt. Dieser Anteil wird hier nicht separat ausgewiesen, da angenommen wird, dass er vernachlässigbar klein ist.

Fluss	Input	t TS	N-Gehalt (% von TS)	N-Fluss (kt N)	Quellen/Annahmen
					<i>gen Mengen kompostiert. Gemäss ZHAW (2018) belief sich diese Menge im Jahr 2009 auf 650 t TS. Dies entspricht einer Stickstoffmenge von weniger als 0.1 kt.</i>
P7 Biogene Abfälle in Vergärung	Vergärung	13'650	5.6%	< 0.8	<i>t TS: ZHAW 2018 (beinhaltet SNP und Gastroabfälle in Vergärung)⁴³ N-Gehalt: EBP und ZHAW 2010 (Fleischverarbeitung in Vergärung)</i>
P8 Abwasser	Abwasser	6'570	5.6%	< 0.4	<i>t TS: ZHAW 2018 N-Gehalt: EBP und ZHAW 2010 (Annahme: Fleischverarbeitung in Vergärung)⁴⁴</i>
P10 Export Lebensmittel und übrige Stoffe	Ausland Fleisch			ca. 0.2	<i>Abschätzung Anteil Fleisch, Heimtiefutter und Schlachtnebenprodukte gemäss Import/Exportstatistik</i>
<i>Abschätzung des Anteils in Fleisch und SNP</i>	SNP & Heimtiefutter			ca. 9	<i>(siehe Tabelle 24 in Anhang A4)⁴⁵</i>

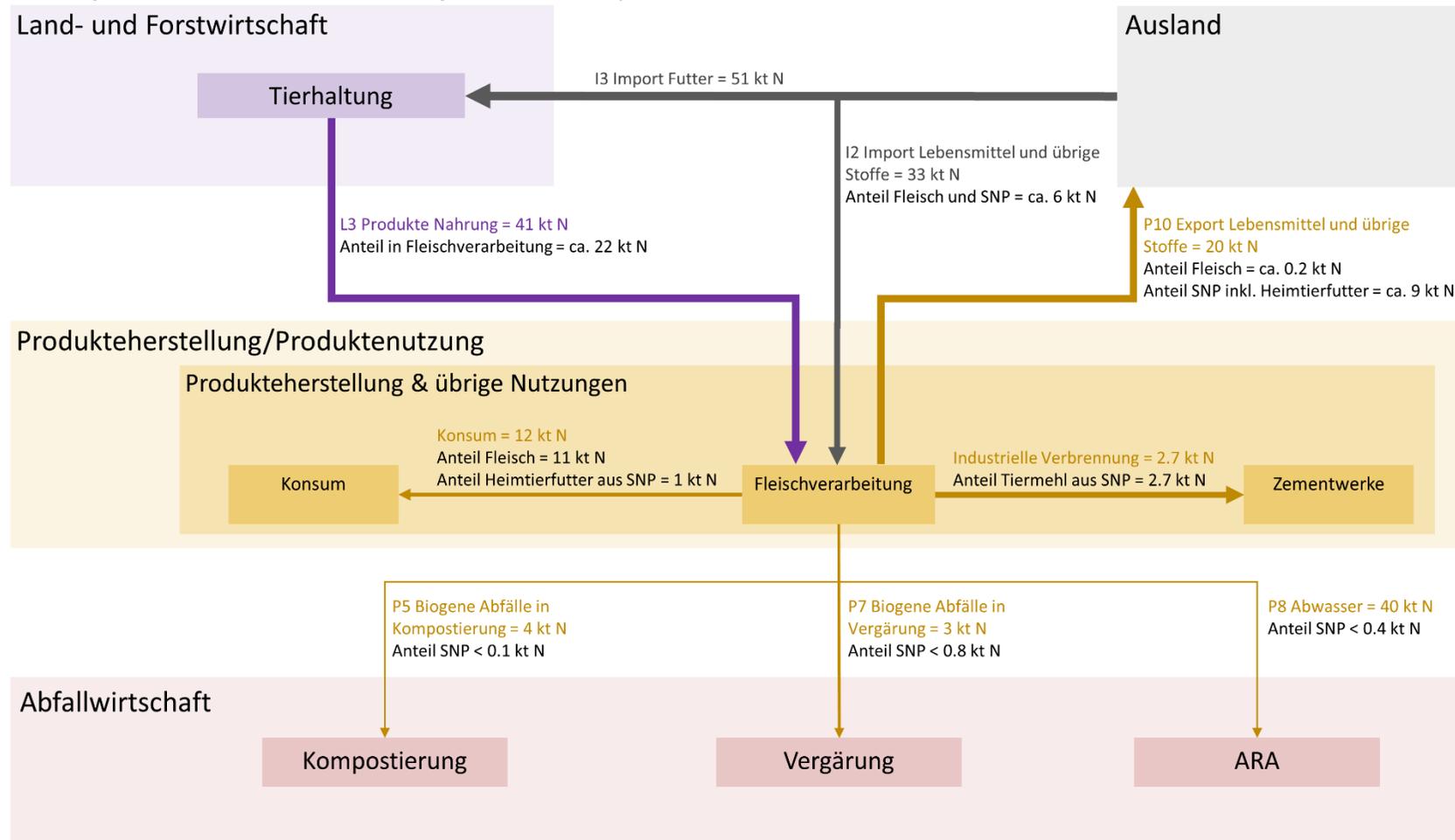
⁴³ Die Menge SNP in Vergärung aus ZHAW (2018) beinhaltet auch die inländischen Gastroabfälle. Der Stickstoffanteil von SNP in der Vergärung beträgt daher weniger als 0.8 kt N.

⁴⁴ Für SNP im Abwasser konnten keine genauen Angaben zum Stickstoffgehalt gefunden werden. In das Abwasser dürfen nur gereinigte und gefilterte SNP (z.B. gereinigtes und gefiltertes Blut) geleitet werden. Daher ist davon auszugehen, dass der Stickstoffgehalt tiefer ist, als der hier angenommene Wert für den N-Gehalt der vergärten SNP (siehe Fluss P7), und der Stickstofffluss weniger als 0.4 kt beträgt.

⁴⁵ Die Abschätzung beruht auf groben Annahmen und daher wird für diesen Fluss eine Unsicherheit von mindestens 50% angenommen.

6.3.2. Flussdiagramm Schlachtnebenprodukte

Abbildung 12: Stickstoffflüsse im Zusammenhang mit Schlachtnebenprodukten



Die Dicke der eingezeichneten Flüsse aus der Fleischverarbeitung widerspiegelt den Anteil Stickstoff aus SNP. Die Unsicherheit der Stickstoffflüsse der Schlachtnebenprodukte beträgt etwa 50% (Schätzwert).

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf ZHAW (2018) und EBP und ZHAW (2010). Grafik INFRAS.

7. Trends der Stoffflüsse in der Schweiz

Folgende Tabelle stellt die grössten und wichtigsten Stickstoffflüsse von 2005 und 2018 einander gegenüber und beschreibt die Veränderungen dieser Flüsse.

Tabelle 16: Vergleich der grössten Stickstoffflüsse 2005 vs. 2018

		2005 [kt N]	2018 [kt N]	Erklärung der Trends 2005-2018
Flüsse aus Land- und Forstwirtschaft				
L1	Hofdünger/Weidegang aus der Tierhaltung in Landwirtschaftsböden	86.3	85.9	Kein Trend, da sich der Nutzviehbestand nicht verändert hat.
L3	Produkte/Nahrung aus der Tierhaltung	35 (neu 38)	41.5	Zunahme der Stickstofffracht aufgrund der Verschiebung zu mehr Geflügel- und Rindfleischproduktion (höherer Stickstoffgehalt).
L4	Emissionen aus der Tierhaltung in die Atmosphäre	42 (neu 43)	41	Geringe Abnahme, da erste technische Minderungsmaßnahmen im Umgang mit Hofdüngern ergriffen wurden.
L5	Auswaschung/Abschwemmung aus Landwirtschaftsböden	34	32	Geringe Abnahme aufgrund Reduktion der Landwirtschaftsflächen, Rückgang der Deposition (U4) und Steigerung Stickstoffeffizienz aufgrund von abnehmenden N-Inputs (L1, L4) bei gleichbleibendem Output pflanzlicher Produkte (L9).
L6 (Nr)	Emissionen aus Landwirtschaftsböden in die Atmosphäre	11	8.5	Kein Trend, da sich der Düngereinsatz nicht wesentlich verändert hat.
L6 (tot)		28 39 (neu 37)	29 37.5	
L8	Futterpflanzen aus Landwirtschaftsböden in die Tierhaltung	132	127	Geringe Abnahme aufgrund reduzierter Futtergetreideproduktion in der Schweiz und der gleichzeitigen Zunahme der Futtermittelimporte aus dem Ausland (siehe Fluss I3)
L9	Ernteprodukte/Nahrung aus dem Pflanzenbau	10	9.9	Kein Trend.
L14	Auswaschung und Abschwemmung aus dem Wald in die Hydrosphäre	9	7.4	Abnahme aufgrund Rückgang der Deposition.

		2005 [kt N]	2018 [kt N]	Erklärung der Trends 2005-2018
Flüsse aus der Produkteherstellung/Produktenutzung				
P2	Emissionen aus dem Verkehr in die Atmosphäre	18.4	14.1	Abnahme der Emissionen dank strengerer Abgasnormen und verbesserter Verbrennungstechnologie bei Fahrzeugen.
P8	Abwasser in ARA	43.2	40.8	Kein Trend. Leichte Steigerung wegen Bevölkerungswachstum ist nicht sichtbar, da der Wert für 2005 etwas überschätzt wurde.
P10	Export Lebensmittel und übrige Stoffe	13	20.1	Zunahme der Exporte aufgrund Zunahme des Veredelungsverkehrs.
Flüsse aus der Abfallwirtschaft				
A3 (N _r)	Emissionen aus ARA	0.5	1.5	Zunahme, da sich die Stickstoffelimination in ARA verbessert hat. Zudem war der Wert für 2005 unterschätzt.
A3 (N _{nr})		12.0	18.5	
A3 (tot)		12.5	20	
A5	gereinigtes Abwasser aus der ARA in die Hydrosphäre	26	20	Rückgang, da sich die Stickstoffelimination in ARA verbessert hat. Zudem war der Wert für 2005 überschätzt.
Flüsse aus der Umwelt				
U1	N-Fixierung durch landwirtschaftliche Nutzpflanzen	32.2	34.8	Zunahme
U3	Deposition auf Wald	27.5	25.5	Leichte Abnahme aufgrund von geringeren Emissionen von stickstoffhaltigen Verbindungen in die Atmosphäre durch Verkehr, Industrie und Haushalte (P2-P5) und geringeren Importen von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen (I8)
U4	Deposition auf LWS-Böden	27.1	24.5	Leichte Abnahme aufgrund von geringeren Emissionen von stickstoffhaltigen Verbindungen in die Atmosphäre durch Verkehr, Industrie und Haushalte (P2-P5) und geringeren Importen von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen (I8)
U5 (tot)	N2-Verbrauch durch:	25.4	18.8	Abnahme dank Reduktionsmassnahmen Luftreinhaltung
	▪ Verkehr	18.2	14.1	
	▪ Feuerungen	6.7	4.2	
	▪ Prozesse	0.5	0.5	
U7	Deposition auf übrige Böden	11.3	9.4	Leichte Abnahme aufgrund von geringeren Emissionen von stickstoffhaltigen Verbindungen in die Atmosphäre durch Verkehr, Industrie und Haushalte (P2-P5) und geringeren Importen von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen (I8)

U10	Export via Luft (ins Ausland)	55.8	35.1	Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung des EMEP-Modells ändern die N-Exportflüsse gegenüber 2005 deutlich. Die Reduktion der Stickstoffexporte über die Atmosphäre ist somit nur zu einem kleinen Teil auf eine Reduktion der Emissionen zurückzuführen, sondern vor allem durch die Modelländerung bedingt.
U12	Auswaschung und Abschwemmung von übrigen Böden in Hydrosphäre	11.0	9.5	Rückgang aufgrund Reduktion der Deposition
U14	Abfluss via Flüsse	72.7	60.6	Abnahme wegen verringerter Stickstoffeinträge aus ARAs (siehe A4), verringerter Auswaschung (L14, U12).

Importflüsse				
I1	Zufluss via Flüsse	15	12.5	Der Fluss wurde unter der Annahme quantifiziert, dass sich die Stickstofffracht der Zuflüsse prozentual gleich verändert wie die Stickstofffracht der Abflüsse. Die Gründe für die abnehmende Stickstofffracht sind identisch zum Fluss U14.
I2	Import Lebensmittel und übrige Stoffe	24.5	32.7	Zunahme aufgrund des Bevölkerungswachstums und des vermehrten Veredelungsverkehrs.
I3	Futter	32 (neu 36)	51.2	Zunahme der Futtermittelimporte
I4	Mineraldünger	52.4 (neu 51)	45.7	Abnahme der Importe. Kein Hinweis auf Reduktion beim Düngereinsatz.
I8	Import via Luft (vom Ausland)	44.1	22.4	Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung des EMEP-Modells (Stand 2021) ändert sich der N-Import via Luft gegenüber 2005 deutlich. Die Reduktion der Stickstoffimporte über die Atmosphäre ist nur zu einem kleinen Teil auf eine Reduktion der Emissionen im Ausland zurückzuführen, sondern vor allem durch die Modelländerung bedingt.

Vergleich der grössten Stickstoffflüsse aus der Stoffflussanalyse 2005 (BAFU 2010) mit den aktuellen Stickstoffflüssen für das Jahr 2018 (vorliegende Studie). Für Flüsse, die anhand der OSPAR-Bilanz aktualisiert wurden, wird auch der aktualisierte Wert für 2005 (Mittelwert 2004-2006) angegeben. Diese Werte sind mit «neu» bezeichnet. Flüsse mit reinem Luftstickstoff (N₂) sind in blauer Schrift angegeben.

Tabelle INFRAS. Quelle: siehe Anhang A1.

8. Diskussion

8.1. Bedeutung der Resultate

Die Stoffflussanalyse ist ein wichtiges Hilfsmittel, um einen Überblick über die Stickstoffflüsse in der Schweiz zu gewinnen und um die Bedeutung eines interessierenden Flusses im Vergleich zu den übrigen Flüssen einschätzen zu können. Damit bietet die Analyse ein Instrument, um Risiken aufzuzeigen, Reduktionsstrategien zu entwickeln, die den Stickstoffumsatz insgesamt reduzieren und um die Wirkung von Massnahmen grob abzuschätzen.

Nicht alle Flüsse können gleichermaßen beeinflusst werden. Die reaktiven Stickstoffflüsse können in „treibende“ (driving forces⁴⁶) und „induzierte“ (state und impact indicators) Stoffflüsse unterteilt werden (GSK 1993). **Treibende Flüsse** sind Flüsse, die der Mensch direkt durch seine Aktivitäten verursacht. **Induzierte Flüsse** entstehen durch natürliche Prozesse als Folge der treibenden Flüsse. Um diese Stickstoffverluste zu reduzieren, können, respektive müssen, die vorgelagerten treibenden Stoffflüsse reduziert werden.

Die wichtigsten Treiber sind:

- Düngereinsatz (Mineraldünger I4 und Hofdünger L1)
- Futtermittel (inländisches Tierfutter L8 und Futtermittelimporte I3)
- Stickoxid-Emissionen aus Verbrennungsprozessen (P2, P3)
- Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft (L4)
- Stickstoffeintrag via Abwasser in die ARA (P8)

Diese treibenden Stoffflüsse sind, gemeinsam mit der Art und Weise, wie die Landwirtschaft betrieben wird (Art und Umfang der tierischen und pflanzlichen Produktion), verantwortlich für die Ankurbelung aller übrigen, sprich der induzierten Stoffflüsse:

- Emissionen aus Böden oder Abfallanlagen in die Atmosphäre (L6(N_r), L15(N_r), U11(N_r), A1(N_r), A3(N_r))
- Deposition aus der Atmosphäre auf die Böden (U3, U4, U7, U9)
- Auswaschung und Abschwemmung von Böden in die Hydrosphäre (L5, L14)
- Abfluss aus der Hydrosphäre ins Ausland (U14, U16)
- Verfrachtung über die Luft ins Ausland (U10)

⁴⁶Die Bezeichnung «driving forces» stammt aus dem DPSIR-Modell, das eine kausale Kette von Einflussgrössen beschreibt. Driving forces üben Druck auf die Umwelt aus, Pressures sind die resultierenden Umweltbelastungen, State die Zustände von Umweltkompartimenten, Impacts sind die spezifischen Wirkungen durch die Umweltbelastung und Responses die gesellschaftliche Reaktion auf Umweltbelastungen. Das Modell wird von der Europäischen Umweltbehörde EEA, vom UN Environment Programme UNEP und vom BAFU verwendet.

Im Zuge dieser induzierten Stoffflüsse entstehen die Probleme der hohen Stickstoffverluste in die Umwelt und darauffolgend ein Verlust an Biodiversität, Wasserqualität, Trinkwasserqualität, "dead zones" bei Meeresmündungen, Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit u.ä.m. Um diese Probleme zu lösen, bedarf es erstens einer Reduktion der treibenden Stoffflüsse und zweitens einer Reduktion der Verluste an schädlichen reaktiven Stickstoffverbindungen in die Umwelt durch effizienten Einsatz bzw. verringerte Auswaschung und Umwandlung in Luftschadstoffe:

- Verminderung der treibenden Stoffflüsse durch eine **verminderte Intensität bei der Produktion in der Landwirtschaft**: z.B. Reduktion von Handelsdünger- und Futtermittel-Importen, der Ammoniak-Emissionen und der direkten Stickstoffeinträgen in die Gewässer.
- Verminderung der Verluste reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt durch **technische und organisatorische Massnahmen**, wodurch eine **Effizienzsteigerung** angestrebt wird: z.B. eine Verbesserung der Stickstoffeffizienz durch verlustarme und zeitgerechte Düngerausbringung (z.B. Schleppschauchverteiler, kein Austrag in Vegetationsruhe), emissionsarme Stallbauten, abgedeckte Hofdüngerlager und eine ausgeglichene Fütterung. Weiter spielen die Weiterentwicklung der Katalysatortechnik für Fahrzeuge und der Einsatz von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben (Elektrofahrzeuge) eine Rolle.

Im Rahmen vorliegender Studie ist es nicht möglich, eine transparente Einschätzung vorzunehmen, welcher Anteil der Stickstoffverluste durch Technik (z.B. Einsatz emissionsarmer Düngerausbringetechniken) oder organisatorische Massnahmen (z.B. kein Austrag in Vegetationsruhe) eingedämmt werden können. Es zeichnet sich jedoch ab, dass solche Massnahmen limitiert sind – insbesondere beim Nitrat und Lachgas gibt es kaum technische Emissionsreduktionsmassnahmen. Effizienzsteigerungen können höchstens um wenige Prozentpunkte erwartet werden. Um den Stickstoffeintrag in die Umwelt zu reduzieren und um substanzielle Fortschritte bei den Umweltzielen Landwirtschaft zu erzielen, ist eine verringerte Intensität der Landwirtschaft notwendig, die entweder mit einem geringeren Stickstoffinput pro Produktionseinheit auskommt oder auf einer Reduktion der Tierzahlen und allenfalls der pflanzlichen Produktion beruht. Letzteres hätte eine Anpassung der Produktion zur Folge. Bei gleichbleibendem Konsum wäre ein zusätzlicher Nahrungsmittelimport unumgänglich. Dabei besteht das Risiko einer Verlagerung der Umweltbelastung ins Ausland, es kann jedoch auch sein, dass Standortvorteile (in der Schweiz und im Ausland) zu geringeren globalen N-Stickstoffeinträgen in die Umwelt führen.

8.2. Landwirtschaft

Die grössten Stickstoffflüsse entstehen in bzw. aufgrund der Landwirtschaft. Dazu gehören die landwirtschaftsinternen Stickstofffrachten, die mit dem Futter aus dem Pflanzenbau in die Tierhaltung gelangen (L8) und mit dem Hofdünger/Weidegang aus der Tierhaltung in die Landwirtschaftsböden (L1). Im Weiteren sind die Flüsse aus der Landwirtschaft in die Umwelt hoch: Emissionen aus der Tierhaltung (L4) und dem Pflanzenbau (L6 (N_r)) in die Atmosphäre und die Nitrat-Auswaschung aus Landwirtschaftsböden in die Hydrosphäre (L5). Insgesamt ist die Landwirtschaft für 54% der Stickstoffeinträge in die Umwelt verantwortlich (Tabelle 6) und somit grösste Verursacherin für den Ausstoss reaktiver Stickstoffverbindungen.

Ein Vergleich der grössten Stickstoffflüsse 2005 und 2018 zeigt, dass die grössten Flüsse relativ betrachtet dieselben geblieben sind (Tabelle 17).

Tabelle 17: Vergleich der relevanten Stickstoffflüsse sowie der gesamten Input- und Outputflüsse der Landwirtschaft 2005 vs. 2018

Fluss-Code und Name		Stoffflussanalyse N 2005	2005	2018	Zu-/Abnahme	
			(Mittelwert 2004-2006)	(Mittelwert 2017-2019)	kt N	%
		kt N	kt N	kt N		
Input		171		182		
I3	Importierte Futtermittel	32	36	51	42%	
I4	Mineraldünger	52	51	46	-10%	
U1	N-Fixierung	32	36	35	-3%	
U3	Deposition auf Wald	27		25	-7%	
U4	Deposition auf LWS-Böden	27	-	25	-9%	
Output		180	-	201		
L1	Hofdünger/Weidegang	86	-	86	0%	
L3	Tierische Produkte	35	38	41	10%	
L4	Emissionen Tierhaltung	42	43	41	-4%	
L5	Auswaschung/Abschwemmung	34	-	32	-6%	
L6 (tot)	Emissionen landwirtschaftliche Böden	39	37	38	1%	
L8	Futter	132	-	127	-4%	
L9	Pflanzliche Produkte	10	9	10	5%	

Vergleich der relevanten Stickstoffflüsse der Landwirtschaft aus der Stoffflussanalyse 2005 (BAFU 2010) mit den aktuellen Stickstoffflüssen für das Jahr 2018 (vorliegende Studie). Für Flüsse, die anhand der OSPAR-Bilanz oder des Treibhausgasinventars aktualisiert wurden, wird auch der aktualisierte Wert für 2005 (Mittelwert 2004-2006) angegeben und die relative Veränderung gegenüber dem aktualisierten Wert von 2005 ausgewiesen.

Tabelle INFRAS. Quelle: siehe Anhang A1

Die Stickstofffracht im **Futtermittel** aus dem inländischen Pflanzenbau (L8) hat gegenüber 2005 um 4% abgenommen. Die importierten Futtermittel (I3) haben hingegen um 42% zugenommen. Insgesamt hat die Stickstofffracht der Futtermittel um 8% zugenommen (L8 + I3). Die Verlagerung der Futtermittelproduktion ins Ausland wird von Experten bestätigt. Gemäss Agroscope 2020 ist der Futtermittelimport zwischen 1996 und 2010 stark und seit 2010 leicht gestiegen. Dieser Zuwachs wird insbesondere dadurch begründet, dass der Anbau von Futtergetreide in der Schweiz aus wirtschaftlichen Gründen stark reduziert wurde.

Der **Mineraldüngereinsatz** hat gegenüber 2005 um 10% abgenommen. Diese Reduktion könnte auf ein effizienteres Düngermanagement zurückzuführen sein, wobei diese Hypothese durch Expertengespräche nicht bestätigt werden konnte (die Suisse-Bilanz wurde in den letzten 15 Jahren nicht verschärft).

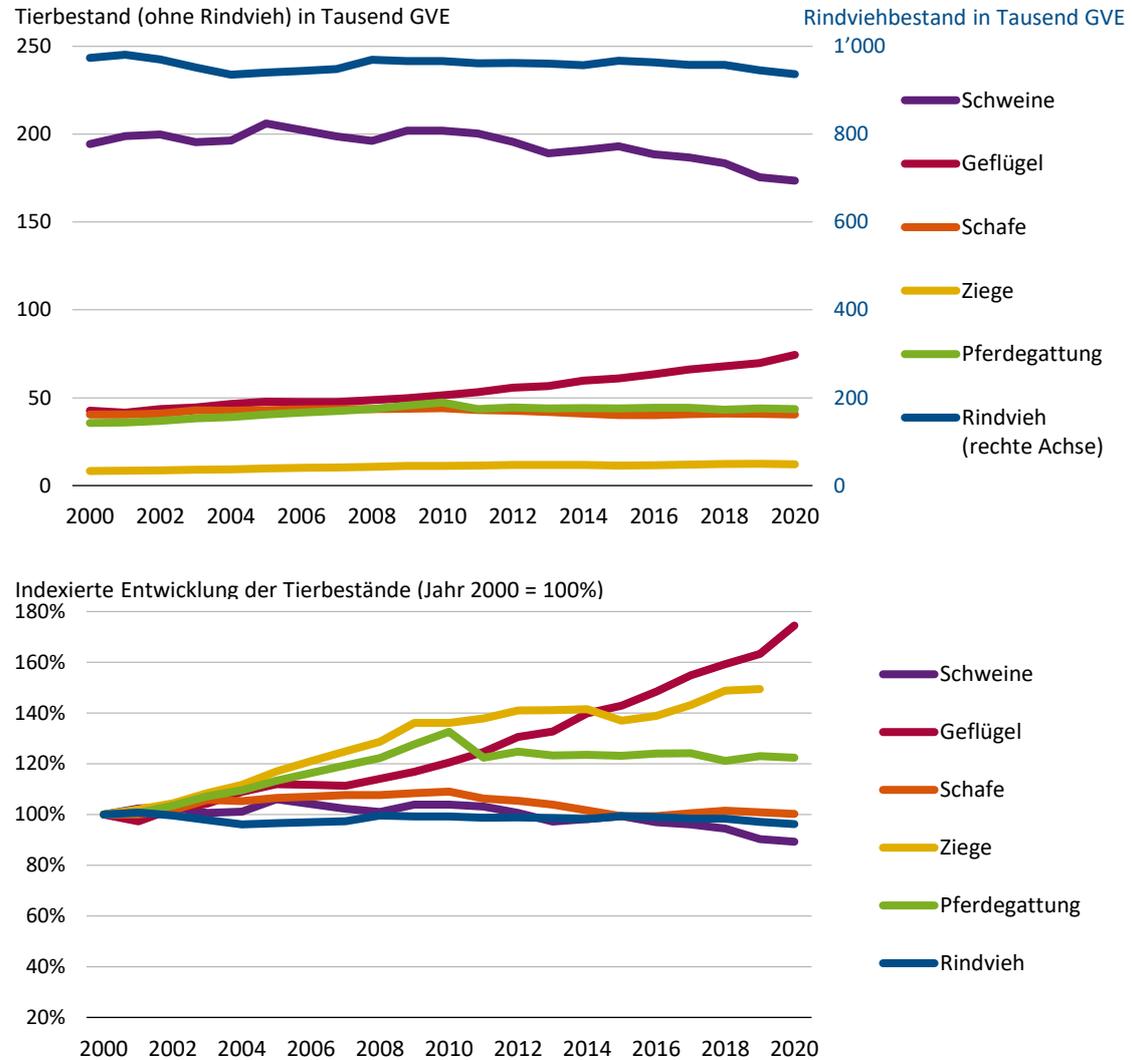
Der landwirtschaftsinterne Stickstofffluss **Hofdünger/Weidegang** ist gleich hoch geblieben. Dies ist auf den nahezu konstanten Nutztierbestand zurückzuführen (siehe Abbildung 13 und Tabelle 18).

Die Stickstofffracht in **tierischen Produkten** (L3) hat um 10% zugenommen von 2005 bis 2018. Der Tierbestand und die Fleisch- und Milchproduktion haben sich jedoch insgesamt im gleichen Zeitraum nicht wesentlich verändert (siehe Abbildung 13, Tabelle 18 und Abbildung 14). Diese Diskrepanz kann mit dem unterschiedlichen Stickstoffgehalt der produzierten Fleischsorten erklärt werden: Dieser ist bei Rind- und Geflügelfleisch im Vergleich zu Schweinefleisch höher. Da die Produktion dieser «stickstoffreichen» Fleischsorten Geflügel/Rind auf Kosten des «stickstoffärmeren» Schweinefleischs zugenommen hat, ist insgesamt eine Zunahme der Stickstofffracht in den tierischen Produkten zu verzeichnen. Zudem ist zu beachten, dass der Fluss an tierischen Produkten (L3) in der Stickstoffbilanz nicht direkt mit der Produktion von Fleisch vergleichbar ist: Der Fluss L3 umfasst die gesamten Schlachttiere (und zudem weitere tierische Produkte wie Milch und Eier), bei der Fleischproduktion hingegen wird nur die Fleischausbeute betrachtet. Je nach Tierart unterscheidet sich auch der Ausbeutefaktor bei der Fleischherstellung. Bei Schweinen ist er im Vergleich zu Rind und Geflügel höher (Agristat 2021b)⁴⁷. Durch die Verschiebung zur Produktion von mehr Geflügel- und Rindfleisch und weniger Schweinefleisch (siehe Abbildung 14), sinkt die Fleischausbeute pro Kilogramm Schlachttier insgesamt. Diese zwei Faktoren (höherer N-Gehalt und tiefere Fleischausbeute von Rindvieh und Geflügel im Vergleich zum Schwein) erklären, wieso der Fluss an Stickstoff in tierischen Produkten (L3) angestiegen ist, während die Fleischproduktion keine Zunahme zeigt.

Diese These wird auch dadurch bestätigt, dass der Export von Schlachttierkörpern seit 2005 zugenommen hat.

⁴⁷ In der Statistik des verwendbaren Schlachtviehs von Agristat macht Schweinefleisch 66% aller Fleischarten aus, während das Schwein nur 45% der Schlachtkörperproduktion ausmacht. Beim Rind und Geflügel ist es umgekehrt.

Abbildung 13: Entwicklung der Nutztierbestände in Grossvieheinheiten (GVE) seit 2000



Oben: Entwicklung Tierbestände in Tausend Grossvieheinheiten (GVE). Unten: Relative Entwicklung seit 2000 (2000 = 100%).

Grafik INFRAS. Quelle: Statistische Erhebungen und Schätzungen 2000-2020, Vieh- und Geflügelbestände in GVE (Agristat 2021b). Die Bestände für das Jahr 2006 wurden von 2005 und 2007 interpoliert, da keine Daten für das Jahr 2006 vorhanden sind.

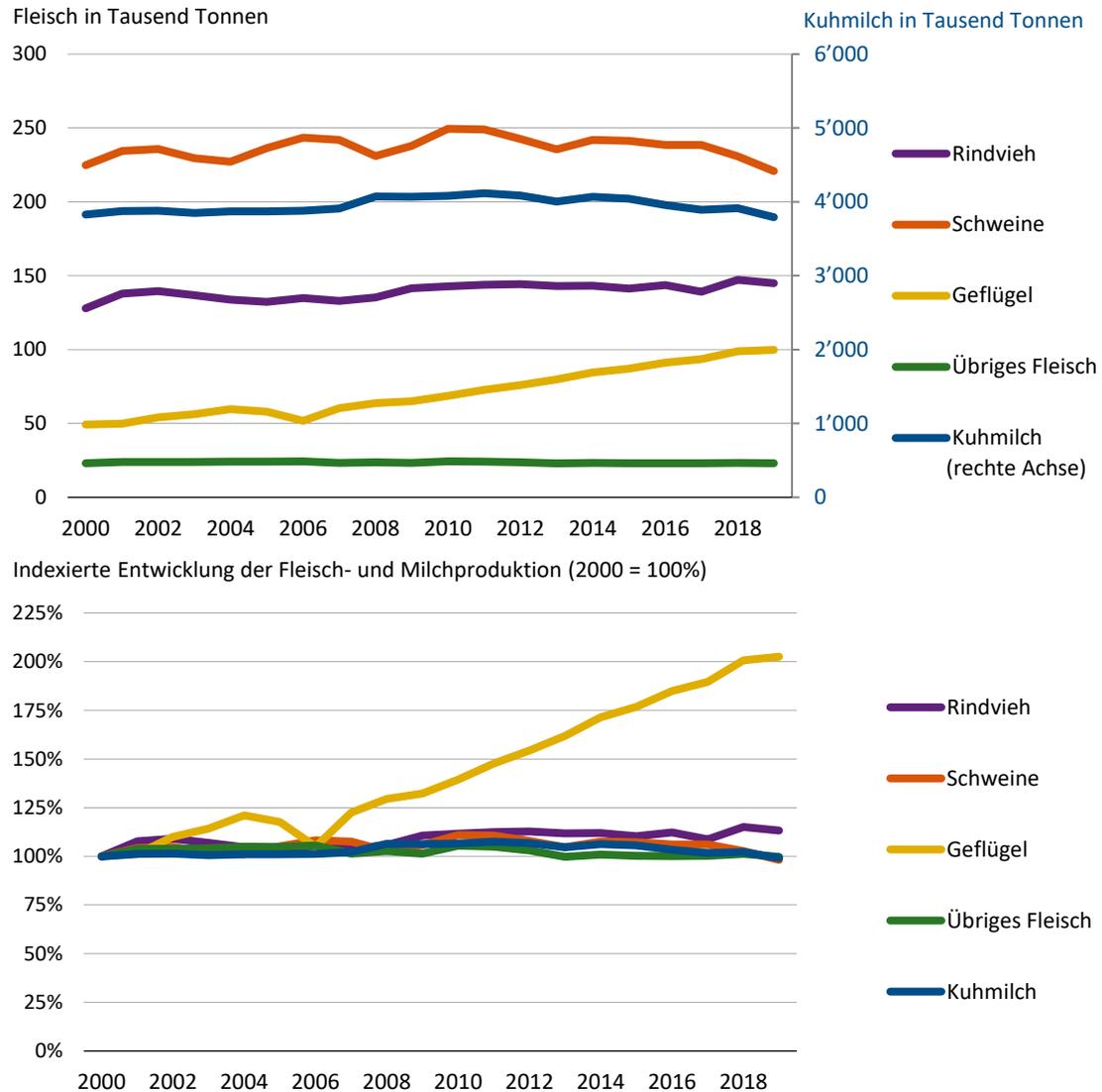
Tabelle 18: Veränderung Nutztierbestand in Grossvieheinheiten 2005 vs. 2018

	2005	2018	Veränderung 2018 ggü. 2005
Grossvieheinheiten	1'299'512	1'309'507	+1.6%

Nutztierbestand in der Schweiz in Grossvieheinheiten 2005 und 2018, sowie Veränderung 2018 gegenüber 2005

Tabelle INFRAS. Quelle: Statistische Erhebungen und Schätzungen 2000-2020, Vieh- und Geflügelbestände in GVE (Agristat 2021b)

Abbildung 14: Entwicklung der Fleisch- und Milchproduktion seit 2000



Oben: Entwicklung der Fleisch- und Milchproduktion in Tausend Tonnen. Unten: Relative Entwicklung seit 2000 (2000 = 100%).

Grafik INFRAS. Quelle: BFS 2021a (Produktion und finanzielle Aspekte)

Die Landwirtschaft sollte darum bemüht sein, eine höhere Stickstoffeffizienz zu erreichen. Gemäss der Stickstoffbilanzierung der Schweizer Landwirtschaft nach OSPAR (siehe Tabelle 23 in Anhang A3) hat die **Stickstoffeffizienz der Landwirtschaft** von 2005 bis 2018 um 2 Prozentpunkte auf 35% zugenommen, entsprechend sind die Stickstoffverluste im Verhältnis zum Stickstoffinput auf 65% gesunken.

Stickstoffüberschüsse, die in der Landwirtschaft entstehen, entweichen hauptsächlich durch Nitrat-Auswaschung in Grund- und Oberflächengewässer (L5) und durch Emissionen in die Atmosphäre (L4 und L6 (N_r)). Aufgrund der leicht erhöhten Stickstoffeffizienz ist es nachvollziehbar, dass diese Stickstoffverluste insgesamt ebenfalls geringfügig abgenommen haben.

Die **Auswaschung, Abschwemmung, Erosion und Drainage** von Nitrat in die Grund- und Oberflächengewässer (L5) hat seit 2005 um 6% abgenommen. Erklärt werden kann dies mit einer Reduktion der Landwirtschaftsflächen (Umzonung Landwirtschaftsfläche), mit dem Rückgang der Deposition und der leichten Steigerung der Stickstoffeffizienz aufgrund von geringeren N-Inputs (L1, L4) bei gleichbleibendem Output pflanzlicher Produkte (L9).

Die **Stickstoffemissionen aus der Tierhaltung und den Landwirtschaftsböden** in die Atmosphäre (L4 und L6 (N_r)) haben seit 2005 um 4% abgenommen resp. um 1% zugenommen (siehe Tabelle 17). Die geringe Abnahme der Emissionen aus der Tierhaltung (-4%) ist nachvollziehbar, da der Nutztierbestand gleichgeblieben ist (siehe Abbildung 13) und gleichzeitig technische Minderungsmaßnahmen im Umgang mit Hofdüngern ergriffen wurden.

Die Landwirtschaft ist Hauptverursacherin der wichtigsten Stickstoffflüsse in die Umwelt. Sie steht daher vor grossen Herausforderungen und trägt eine besondere Verantwortung, wenn es darum geht, den Eintrag von Stickstoff in die Umwelt zu reduzieren. Im Sinne einer integralen Betrachtung sind dabei nicht nur die Verhältnisse im Kompartiment Landwirtschaft zu berücksichtigen, sondern auch die durch Vermeidungsstrategien verursachten Veränderungen bei induzierten N-Flüssen wie z.B. bei der durch die N-Deposition induzierten Nitrat-Auswaschung und N₂O-Emission bei Waldökosystemen. Mit Blick auf den Klimawandel gilt es zudem, Wechselwirkungen mit dem Kohlenstoffkreislauf zu beachten. Um Zielkonflikte zu vermeiden, sind die Gesamtzusammenhänge zu betrachten, d.h. es sind die Potenziale in der Landnutzung zu suchen, welche die C-Senkenleistung erhöhen und gleichzeitig die N-Verluste und die Methanemissionen (CH₄) reduzieren.

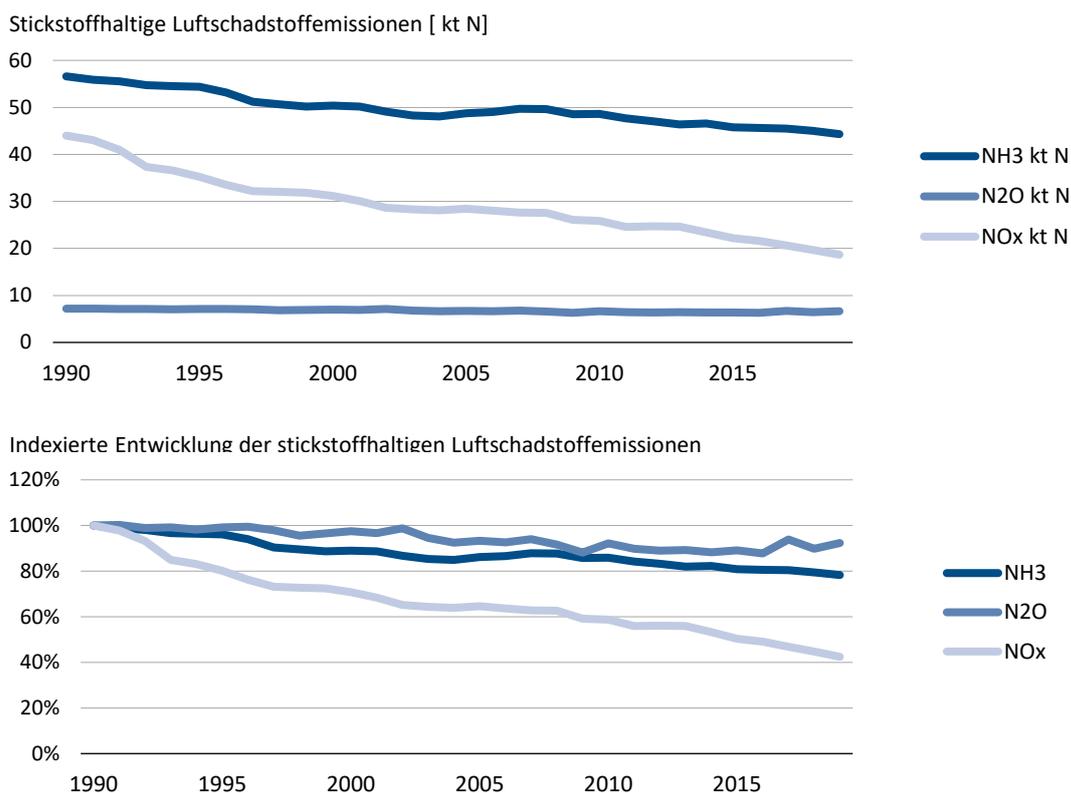
8.3. Luftschadstoffe

Entwicklung der Luftschadstoffemissionen

In der BAFU-Datenbank der Luftschadstoffe und der Treibhausgase (EMIS 2021) sind alle Emissionen von reaktiven Stickstoffverbindungen in die Atmosphäre als Zeitreihen verfügbar. Abbil-

Abbildung 15 zeigt die zeitliche Entwicklung der gesamtschweizerischen NH_3 -, NO_x - und N_2O -Emissionen für die Periode 1990-2018. Diese Emissionen umfassen die Beiträge aller Quellengruppen⁴⁸.

Abbildung 15: Entwicklung der stickstoffhaltigen Luftschadstoffemissionen seit 1990



In der Periode 1990 bis 2018 haben die Emissionen – vor allem von NO_x – abgenommen. Die NH_3 - und N_2O -Emissionen haben hingegen nur wenig abgenommen. Oben: Entwicklung in kt N. Unten: Relative Entwicklung seit 1990 (1990 = 100%).

Grafik INFRAS. Quelle: BAFU 2021a und BAFU 2021b (Luftschadstoff und Treibhausgasinventar Schweiz 2021)

Bei den einzelnen Verbindungen sind in der Periode 2005 bis 2018, die die Zeit zwischen der N-Bilanz gemäss BAFU 2010 und der vorliegenden Bilanz abdeckt, unterschiedliche Entwicklungen erkennbar (Tabelle 19). Für 2005 gibt es neben den Zahlen der früheren N-Bilanz (BAFU 2010) aktualisierte Werte aus dem Treibhausgas- und dem Luftschadstoffinventar (BAFU 2021a, BAFU 2021b). Bei den NO_x und den NH_3 -Emissionen gibt es leichte Differenzen. Die Änderungen 2005

⁴⁸ Die in Abbildung 15 dargestellte Entwicklung der Luftschadstoffe zeigt für Ammoniak zwischen 2005 und 2018 eine Abnahme um gesamthaft 3.7 kt NH_3 -N (davon 1.3 kt in der Landwirtschaft und die restlichen 2.4 kt in den anderen Sektoren, wobei der Verkehrssektor die grösste Reduktion verzeichnete). Die Reduktion des NH_3 -N Emissionen im Verkehrssektor ist beim Fluss P2 (siehe Kapitel 7) nicht ersichtlich, da die NH_3 -Emissionen für 2005 im Emissionsinventar Neuberechnet wurden und gemäss den aktuellen Emissionsinventaren höher liegen (BAFU 2021a,b) als bei der letzten N-Bilanz (BAFU 2010) angenommen wurde.

bis 2018 sind demnach davon abhängig, welche Basis für die Werte 2005 benutzt wird. In Tabelle 19 sind daher jeweils beide Werte angegeben (Veränderung gegenüber 2005 gemäss N-Bilanz (BAFU 2010) und Veränderung gegenüber 2005 gemäss den aktuellsten Emissionsinventaren (BAFU 2021 a, b)).

Tabelle 19: Stickstoffhaltige Luftschadstoffemissionen in die Atmosphäre 2005 und 2018

Schadstoff	2005	2005	2018	Änderung 2018 ggü. 2005	
	gemäss N-Fluss-analyse für 2005 (BAFU 2010)	gemäss aktuellen Emissionsinventaren (BAFU 2021a,b)	gemäss aktuellen Emissionsinventaren (BAFU 2021a,b)	gemäss N-Fluss-analyse für 2005 (BAFU 2010)	gemäss aktuellen Emissionsinventaren (BAFU 2021a,b)
kt NH ₃ -N	49.0	48.7	44.9	-8.3%	-7.8%
kt NO _x -N	26.0	28.4	19.7	-24.4%	-30.8%
kt N ₂ O-N	6.7	6.7	6.6	-1.4%	-1.4%
Total N	81.7	83.8	71.2	-12.9%	-15.1%

In der Periode 2005 (BAFU 2010) bis 2018 (vorliegende N-Bilanz) haben die Emissionen abgenommen (Zahlen NH₃, NO_x und N₂O). Der für 2018 angegebenen Werte beziehen sich auf den Mittelwert 2017-2019.

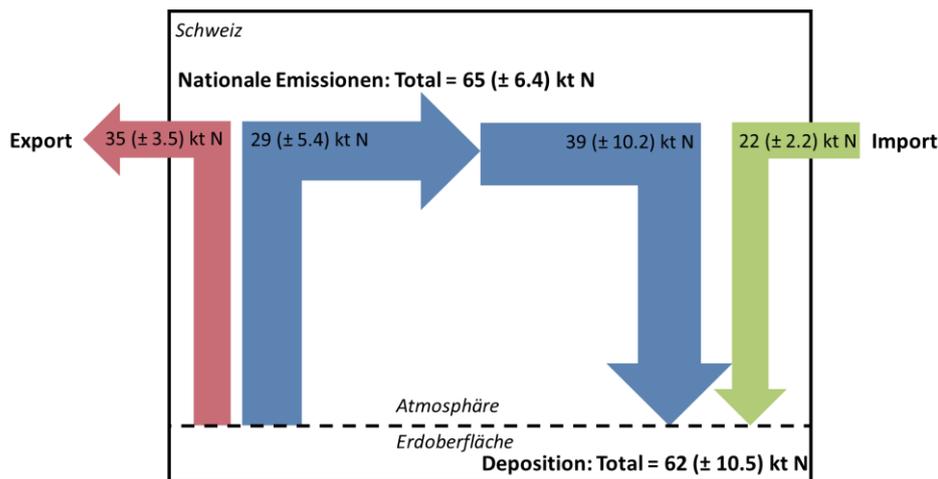
Tabelle INFRAS. Quelle: BAFU 2005, BAFU 2021a,b

- **NO_x**: Wegen erfolgreicher Massnahmen bei Feuerungen und im Verkehr konnten die NO_x-Emissionen gemäss EMIS 2021 um rund 31 % reduziert werden (gegenüber der letzten N-Bilanz, welche nach heutigem Stand auf veralteten Daten für das Jahr 2005 beruht, beträgt die Reduktion nur 24%).
- **NH₃**: Auch NH₃ wurde kontinuierlich reduziert, allerdings in weit geringerem Masse als NO_x. Die NH₃-Emissionen werden zu 90 % von der Landwirtschaft verursacht. Die Reduktion um rund 8% ist etwa zur Hälfte auf eine Verbesserung bei den Katalysatoren von Verbrennungsmotoren und zur Hälfte auf eine Verbesserung des Hofdüngermanagements zurückzuführen.
- **N₂O**: Die geringste Reduktion ist mit rund 1.4% bei den Lachgasemissionen zu verzeichnen. Fast 80 % der N₂O-Emissionen stammen aus der Landwirtschaft. Die Unsicherheit in der Quantifizierung der Flüsse ist jedoch bei den N₂O-Emissionen am grössten. Es ist deshalb aufgrund der verfügbaren Daten nicht möglich, den zeitlichen Verlauf der Emissionen zu interpretieren.

Bilanz der stickstoffhaltigen Luftschadstoffe

Stickstoffhaltige Luftschadstoffe (d.h. oxidierte Stickstoffverbindungen (NO_x)⁴⁹ und reduzierte Stickstoffverbindungen (NH_y)⁵⁰) werden aus dem Ausland importiert, auf Böden deponiert, bei natürlichen und technischen Prozessen emittiert und über die Atmosphäre ins Ausland exportiert (Abbildung 16). Die Summe der NH_y-Emissionen ist in der Schweiz wie im Jahr 2005 (BAFU 2010) grösser als die in Form von NH_y-N deponierte Stickstoffmenge. Die NO_x-Emissionen sind ungefähr gleich hoch wie die in Form von NO_x-N deponierte Stickstoffmenge (siehe Tabelle 20). Der Export von N-haltigen Luftschadstoffen ist grösser als der Import. Somit ist die Schweiz ein Netto-Exporteur von N-haltigen Luftschadstoffen (Abbildung 16).

Abbildung 16: Bilanzierung der stickstoffhaltigen Luftschadstoffe (Summe NO_x-N und NH_y-N) im Jahr 2018



Aufgrund von Unsicherheiten in den Luftschadstoffemissionen und den Depositionsmengen stimmen die N-Frachten nicht exakt überein. Kleine Rechnerische Differenzen in den Summen von ± 1 sind auf die Rundung der einzelnen Flüsse zurückzuführen.

Grafik INFRAS. Quelle: EMIS 2021, EMEP 2021, Meteotest 2021

Der Vergleich der Luftschadstoffbilanz von 2018 mit 2005 zeigt, dass der N-Export 2005 mit ca. 55 kt N knapp 1.6-mal so hoch war wie 2018 (ca. 35 kt N). Der Import war im Jahr 2005 mit rund 44 kt N rund doppelt so hoch, wie im Jahr 2018 (ca. 22 kt N). In Tabelle 20 ist die Bilanzierung summarisch dargestellt. Der Rückgang der Emissionen und Depositionen, des Imports und des Exports ist zum einen auf eine Abnahme der Luftbelastung mit oxidierten N-Verbindungen zurückzuführen. Die in Tabelle 20 ausgewiesenen Abnahmen des Imports und Exports von N-

⁴⁹ NO_x umfasst gemäss EMEP 2021: NO, NO₂, NO₃⁻, N₂O₅, HNO₃, etc.

⁵⁰ NH_y umfasst gemäss EMEP 2021: NH₃ und NH₄⁺.

Verbindungen sind jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da im Verlauf der betrachteten Zeitperiode Weiterentwicklungen und Anpassungen am europäischen EMEP-Modell vorgenommen wurden, welche zu veränderten Anteilen der Eigendeposition an der Gesamtdeposition und in der Folge auch zu Änderungen bei Export und Import geführt haben. Die Zahlen von 2005 und 2018 sind daher nicht direkt miteinander vergleichbar, da sie stark von der Modelländerung beeinflusst sind.

Tabelle 20: Bilanzierung der Luftschadstoffe im Jahr 2005 und im Jahr 2018

	Einheit	2005	2018	Änderung 2005-2018
Input				
Emission NO _x -N ⁵¹	kt	26.0	19.7	-24%
Emission NH _y -N ⁵²	kt	49.0	44.9	-8%
Import NO _x -N	kt	19.0	10.4	-45%
Import NH _y -N	kt	25.0	12.0	-52%
Summe	kt	119.0	87.0	-27%
Output				
Deposition NO _x -N	kt	23.0	20.0	-13%
Deposition NH _y -N	kt	46.0	41.7	-9%
Export NO _x -N	kt	24.0	14.0	-42%
Export NH _y -N	kt	31.0	21.1	-32%
Summe	kt	124.0	96.8	-22%
Differenz (In - Out)	kt	-5.0	-9.9	

Vergleich der N-Flüsse in die Atmosphäre hinein (Input) und aus der Atmosphäre hinaus (Output) der Jahre 2005 und 2018. Der Input setzt sich zusammen aus Emissionen, die in der Schweiz anfallen und dem Luftschadstoffimport aus dem Ausland. Der Output entspricht der atmosphärischen N-Deposition in der Schweiz und dem Luftschadstoffexport ins Ausland. Die Werte für 2005 berechnen sich aus den Mittelwerten der EMEP-Daten 2017-2019 (EMEP 2021) und Meteotest 2021.

Tabelle INFRAS. Quelle: EMEP 2021, Meteotest 2021

Wie Tabelle 20 und Abbildung 15 zeigen, konnten die NO_x-Emissionen seit 2005 weiter reduziert werden. Sie sind gegenüber der Stoffflussanalyse von 2005 um 24%⁵³ tiefer. Aufgrund von Modelländerungen entspricht diese Veränderung jedoch nicht der tatsächlichen Reduktion. Effektiv haben die NO_x-Emissionen gemäss des aktuellsten Schweizer Luftschadstoffinventars um 31% abgenommen (BAFU 2021b). Grund für diese Reduktion ist die Minderung der Luftschadstoffemissionen bei Motorfahrzeugen und bei den Feuerungen (Heizungen). Die Katalysatorvorschriften für Personenwagen in den 80er Jahren mit den nachfolgenden Verschärfungen der europäischen Emissionsstandards (Euro 5, Euro 6 etc.), die Einführung von höheren Standards für Gebäudeisolierung, Low-NO_x-Brenner und die Effizienz von Heizsystemen sind die wichtigsten Massnahmen, die zu diesem Erfolg geführt haben. Bei den Gebäudeheizungen ist es bemerkenswerter, als dass in derselben Periode das beheizte Gebäudevolumen nochmals stark

⁵¹ Die Zahlen von 2005 und 2018 sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da sie stark von der Modelländerung beeinflusst sind.

⁵² Die Zahlen von 2005 und 2018 sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da sie stark von der Modelländerung beeinflusst sind.

⁵³ Gemäss neuestem „Informative Inventory Report“ der Schweiz zu den Luftschadstoffemissionen (BAFU 2021b) wurden die gesamtschweizerischen NO_x-Emissionen für das Jahr 2005 damals mit 26 kt N etwas unterschätzt und betragen nach heutigen Berechnungen 28.6 kt N, so dass die NO_x-Emissionen zwischen 2005 und 2018 aus heutiger Sicht um 31% abgenommen haben (siehe Tabelle 19).

zugenommen hat (mehr Einwohner und grössere Wohnfläche pro Person).

Bei den NH_y -Emissionen beträgt der Rückgang von 2005 bis 2018 rund 8% (Tabelle 20). Die NH_3 -Emissionen werden zu über 90 % von der Landwirtschaft verursacht. Weitere Emissionsquellen sind der Strassenverkehr, Gebäudeheizungen und die Abfallwirtschaft. Die Reduktion ist etwa zur Hälfte auf verbesserte Katalysatoren bei Benzinmotoren und zur Hälfte auf die Landwirtschaft (leichte Reduktion des Tierbestandes bei Schweinen (Agristat 2021a) und eine Verbesserung des Hofdüngermanagements) zurückzuführen.

Trotz der Verbesserungen sind die NO_x - und die NH_y -Emissionen immer noch zu hoch. Die schweizerischen Immissionsgrenzwerte für NO_2 werden zwar mehrheitlich eingehalten, aber die stickstoffhaltigen Depositionen sind immer noch deutlich und grossräumig über den Critical Loads für Stickstoffeinträge in empfindliche Ökosysteme (Meteotest 2016).

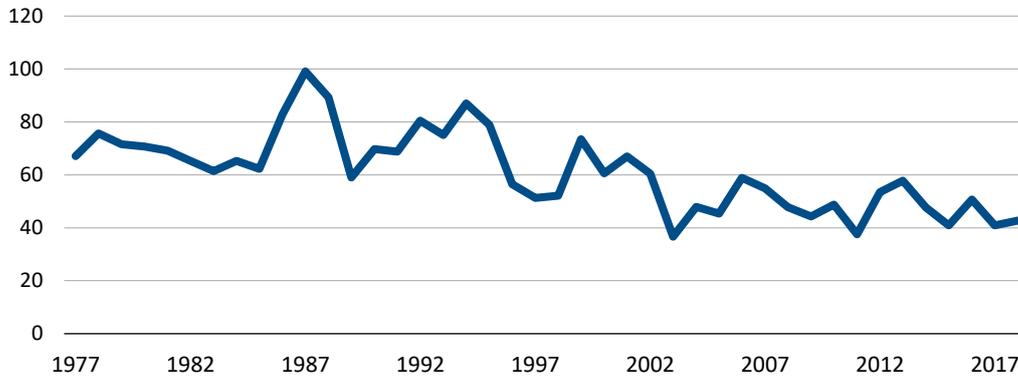
8.4. Hydrosphäre

Zur Entwicklung der Stoffflüsse in und aus der Hydrosphäre sind weniger Informationen vorhanden als etwa bei der Atmosphäre. Im Rahmen des langjährigen Projekts "Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fliessgewässer" (NADUF) werden Stickstofffrachten in Schweizer Fliessgewässern erhoben. Die Fliessgewässer zeigten bis Mitte der 90er Jahren eine Zunahme der Stickstofffrachten und -konzentrationen. Ab Mitte der 90er Jahre werden Verringerungen der N-Frachten festgestellt. Die N-Frachten stellen einen Summenparameter für die Entwicklung des Stickstoffs in Gewässern dar. Sie variieren in Abhängigkeit der Abflussmengen (NADUF 2021).

Relativ gut bekannt sind die **Stickstofffrachten**, die die Schweiz via Rhein verlassen. Die NADUF-Messwerte zeigen rückläufige Stickstofffrachten an den Stationen am Rhein bei Basel (siehe Abbildung 17), aber auch an der Rhône und am Ticino.

Abbildung 17: Entwicklung der Stickstofffracht des Rheins bei Basel

N-Fracht Rhein bei Basel [kt N]



Die Stickstofffracht des Rheins ist stark geprägt durch die Abflussmengen und zeigt daher grosse Schwankungen von Jahr zu Jahr. Der langfristige Trend ist rückläufig.

Grafik INFRAS. Quelle: NADUF 2021

Im Vergleich zur Periode 1995-2007 ist das Mittel der Fracht an Gesamtstickstoff der Periode 2009-2018 etwas kleiner: Die Fracht geht von 73 kt N auf 61 kt N pro Jahr zurück. Der Rhein und die Rhône weisen mit rund 18%, bzw. 12% eine ähnlich starke Reduktion der Stickstofffrachten auf. Bei den weiteren Grenzflüssen ist die Datenlage unsicherer. Beim Ticino werden keine kontinuierlichen Messungen durchgeführt. Die Daten basieren daher nur auf Messkampagnen über wenige Jahre und entsprechend sind die Gesamtfrachten stärker von jährlichen Abflussschwankungen beeinflusst. Beim Inn und den weiteren Grenzflüssen sind aus dem NADUF-Messnetz keine Daten verfügbar. Der Anteil der weiteren Grenzflüsse wurde daher in der vorliegenden Studie anhand von Messdaten aus der N-Bilanz des Jahres 2005 (BAFU 2010) abgeschätzt. Die Schätzung für 2018 beruht somit auf der Annahme, dass sich die Stickstofffracht des Inns und der weiteren Grenzflüsse prozentual gleich verändert hat, wie die Summe der Stickstoffflüsse von Rhein, Rhône und Ticino.

Tabelle 21: Frachten von Gesamtstickstoff in den grenzüberschreitenden Fliessgewässern

	Mittelwert (NADUF)	Mittelwert (NADUF)	Veränderung
	1995-2007	2009-2018	2018 ggü. 2005
Rhein (Weil)	57	47	-18%
Rhône (Chancy)	9.3	8.2	-12%
Ticino (Riazzino)	2.2	2.5	12%
Inn (Martina) und übrige Grenzflüsse	4.0	3.3	-17%
Total	73	61	-17%

In den meisten grenzüberschreitenden Fliessgewässern ist ein deutlicher Rückgang der Stickstofffrachten zu beobachten. Der Rhein macht den grössten Anteil an der Gesamtfracht aus. Die Stickstofffracht des Inns und der übrigen Grenzflüsse basiert auf einer Schätzung.

Tabelle INFRAS. Quelle: NADUF

Für die **Stickstoffeinträge aus häuslichen und industriellen Abwässern** in die Hydrosphäre liegen mit der Abschätzung von Swiss Academics (2020) neuere Zahlen vor. Diese bestätigen die Grössenordnung der bisherigen Stickstoffeinträge in Abwasserreinigungsanlagen (P8). Unter Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums war dieser Fluss 2005 eher etwas überschätzt (Expertenaussage). Bei der Stickstoffelimination in Kläranlagen konnten weitere Fortschritte erzielt werden: 50% der N-Frachten werden heute als Emissionen in die Luft eliminiert, rund 93% davon in Form von nicht-reaktivem Luftstickstoff (Swiss Academics 2020). Im Jahr 2005 betrug die Elimination gemäss Expertenaussage ca. 47% (die Annahme von 39% war zu tief).

Die Flüsse L5, L14 und U12 beschreiben **diffuse Stickstoffeinträge** (Auswaschung, Abschwemmung, Erosion und Drainage usw.) aus Landwirtschaftsböden, Waldböden und übrigen Böden in Gewässer. Ein Vergleich der Stickstofffrachten mit denjenigen von 2005 (BAFU 2010) zeigt, dass bei allen drei Flüssen eine Reduktion stattgefunden hat. Am geringsten ist diese bei der Landwirtschaft (-6%), beim Wald betrug sie -13% und bei übrigen Böden -14%. Dieser Rückgang kann durch die Reduktion bei der Deposition erklärt werden. Die Deposition spielt eine grosse Rolle bei diffusen Einträgen und sie hat im betrachteten Zeitraum abgenommen. In der Landwirtschaft ist die Deposition vergleichsweise weniger wichtig als im Wald und bei übrigen Böden, weil es in der Landwirtschaft durch den Einsatz von Dünger eine weitere sehr hohe Eintragsquelle gibt (Expertenaussage). Dafür wird die Reduktion der NH₃-Emissionen in die Luft als wichtiger Faktor für eine Verringerung der landwirtschaftsbedingten N-Einträge in die Gewässer genannt (BAFU 2016b).

Trotz dieses Rückgangs zeigen die Modellrechnungen, dass die Schweiz das internationale Ziel verfehlt hat, die Stickstoffeinträge in den Rhein und in die Nordsee seit 1985 zu halbieren und ist auch heute noch nicht auf Zielpfad (BAFU 2016b).

8.5. Güterflüsse

Tabelle 22: Vergleich der relevanten Import- und Exportgüterflüsse 2005 vs. 2018

Fluss		Stoffflussanalyse N 2005	OSPAR Mittelwert 2004-2006	Stoffflussanalyse N 2018	Veränderung 2018 ggü. 2005
Import					
I2	Import Lebensmittel und übrige Stoffe	25	-	33	29%
I3	Futter	32	36	51	42%
I4	Mineraldünger	52	51	46	-10%
Export					
P10	Export Lebensmittel und übrige Stoffe	13	-	20	55%

Vergleich Stickstofffracht der relevanten Güterflüsse der Stoffflussanalyse 2005 (BAFU 2010) mit den aktuellen Stickstoffflüssen für das Jahr 2018 (vorliegende Studie). Für Flüsse, die anhand der OSPAR-Bilanz aktualisiert wurden (I3 und I4), wird auch der aktualisierte Wert für 2005 (Mittelwert 2004-2006) angegeben und die relative Veränderung gegenüber dem aktualisierten Wert von 2005 ausgewiesen.

Tabelle INFRAS. Quelle: siehe Anhang A1

Der **Import von Futtermittel** hat stark zugenommen und der **Import von Mineraldünger** leicht abgenommen (Tabelle 22). Die Gründe dafür werden im Kapitel 8.2 zur Landwirtschaft behandelt.

Der **Import und Export von Lebensmitteln** hat stark zugenommen und dadurch auch die Stickstofffracht in den importierten und exportierten Gütern (Import +29% und Export +55%, siehe Tabelle 22). Die Zunahme liegt einerseits am Bevölkerungswachstum und andererseits am zunehmenden Veredelungsverkehr. Beim aktiven Veredelungsverkehr werden Rohstoffen, z.B. Kaffee und Kakao, in die Schweiz importiert und nach der Verarbeitung wieder exportiert. Beim passiven Veredelungsverkehr werden Rohstoffe aus der Schweiz ins Ausland exportiert, wo sie verarbeitet und nachher wieder in die Schweiz zurückgeführt werden (z.B. Weizen wird im Ausland zu Teiglingen verarbeitet, Kartoffeln zu Chips). Ein Veredelungsverkehr findet insbesondere dann statt, wenn im Rohstoffland geeignete Verarbeitungskapazitäten fehlen oder die Verarbeitung im Ausland kostengünstiger ist.

Neben dem Import von Futter- und Lebensmitteln (I2, I3) ist der Mineraldüngerimport (I4) ein wichtiger Importfluss. In Deutschland, wo Mineraldünger industriell hergestellt wird, entsteht ein grosser Input an reaktivem Stickstoff aus der Atmosphäre, weil mit dem Haber-Bosch-Verfahren Ammoniak aus Luftstickstoff synthetisiert wird (UBA 2020a). In der Schweiz ist dieser Eintrag aus der Atmosphäre aufgrund der fehlenden Inlandproduktion an Mineraldünger nicht vorhanden; stattdessen wird er durch den Mineraldüngerimport generiert.

8.6. Themen im Fokus

8.6.1. Vergärung

Die Verwertung von biogenen Abfällen und Hofdünger in Vergärungsanlagen hat in den letzten zwanzig Jahren stark zugenommen, wodurch die damit im Zusammenhang stehenden Stickstoffflüsse an Bedeutung gewonnen haben. Die Vergärung produziert Biogas und trägt damit zur Produktion von erneuerbaren Energieträgern bei. Gärreste können als Dünger oder Kompost in der Landwirtschaft verwendet werden, wobei Stickstoff aus biogenen Abfällen rezykliert wird. Dadurch kann Mineraldünger ersetzt werden, der mit einem energieintensiven Herstellungsverfahren produziert wird.

Heute fliessen insgesamt etwa 6 kt Stickstoff mit Hofdünger und biogenen Abfällen in die Vergärung, wobei dieser Stickstoff grösstenteils in Form von Recyclingdünger und Kompost aus Gärresten der Landwirtschaft und dem Gartenbau zurückgeführt wird.

Die Vergärung von biogenen Abfällen und die Wiederverwendung der Gärreste als Dünger hat noch nicht ihr maximales Potential ausgeschöpft. Gemäss WSL (2017) entspricht das zusätzlich nutzbare Potential von biogenen Abfällen in Vergärungs- und Kompostieranlagen in der Schweiz etwa einem Drittel der bisher verwerteten Menge.

8.6.2. Food Waste

Insgesamt fallen in der Schweiz mit dem Food Waste etwa 14 kt Stickstoff an. Dieser könnte durch Food-Waste-Vermeidungsmassnahmen grösstenteils reduziert werden. Heute werden in der Schweiz etwa 40% des Stickstoffs im Food Waste als Futtermittel oder Dünger in der Landwirtschaft wiederverwendet (ca. 6 kt N), etwa 60% des Stickstoffs landet jedoch in der Abfallwirtschaft (ca. 8 kt N).

Um die Stickstoffverluste im Zusammenhang mit Food Waste zu reduzieren, muss insbesondere die Menge Food Waste reduziert werden. Würden weniger Lebensmittel fortgeworfen und stattdessen konsumiert, könnten entsprechend weniger produziert werden – es gäbe eine Effizienzsteigerung in der Herstellung. Dies würde die Umwelt entlasten, weil weniger Nährstoffe mit der Ernte den landwirtschaftlichen Böden entzogen würden. Zudem entlastet sich durch Food Waste-Vermeidungsmassnahmen der Druck, die Ernteerträge zu maximieren, was wiederum mehr Raum für die Umsetzung von Massnahmen zur Verringerung von Stickstoffverlusten gibt (z.B. weniger intensive Produktionsmethoden). Im Optimalfall können also die Stickstoffverluste durch Food Waste-Vermeidungsmassnahmen weiter verringert werden, als nur aufgrund der Reduktion der Anbaumengen zu erwarten wäre. Der Bundesrat ist aktuell dabei, einen Aktionsplan zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen auszuarbeiten (BAFU 2021c).

Der trotz Umsetzung von Food Waste-Vermeidungsmassnahmen verbleibende Food Waste könnte durch ein besseres Abfallmanagement sinnvoller entsorgt und der darin enthaltene Stickstoff als Dünger oder Kompost wiederverwendet werden. Heute fliesst ein grosser Teil des Food Waste, insbesondere aus den Haushalten, in die Kehrichtverbrennung oder ins Abwasser. Würde dieser stattdessen vergärt oder kompostiert werden, könnte der Stickstoff daraus als Dünger oder Kompost in der Landwirtschaft und im Gartenbau wiederverwendet werden.

8.6.3. Schlachtnebenprodukte

Durch die Fleischverarbeitung in der Schweiz und den Import von Schlachtnebenprodukten (SNP) werden in der Schweiz etwa 14 kt Stickstoff in Umlauf gebracht. Der grösste Teil des Stickstoffs wird ins Ausland exportiert (etwa 9 kt N)⁵⁴, die restlichen 5 kt N werden in der Schweiz entsorgt (Vergärung/ARA/Kompostierung <1.5 kt N) oder anderweitig genutzt (Heimtierfutter ca. 1 kt N, Verbrennung in Zementwerken ca. 3 kt N).

In der Schweiz wird aktuell darüber diskutiert, ob das Fütterungsverbot von tierischen Proteinen aus SNP an Nutztiere analog zur EU gelockert werden sollte (siehe Kapitel 3.5.3). Im Folgenden werden die möglichen Auswirkungen einer solchen Lockerung des Verbots beschrieben.

Mögliche Auswirkungen auf die Futtermittelproduktion aus Schlachtnebenprodukten

Gemäss Aussagen der Centravo – dem grössten Fleischverarbeitungsunternehmen der Schweiz – und Recherchen von SRF würde eine Lockerung des Verfütterungsverbots in der Schweiz wohl kaum zu einer Produktion von Fleisch-/Knochenmehl aus SNP im Inland führen (Centravo 2021, Minder 2021). Die Centravo-Gruppe sieht unter den aktuellen Marktbedingungen und Vorschriften wenig Potential ein Werk zur Produktion von Fleisch-/Knochenmehl für die Nutztierfütterung zu betreiben. In der Schweiz fallen aufgrund der geringeren Bevölkerung deutlich weniger SNP an als im umliegenden Ausland. Gemäss den Sicherheitsvorgaben der EU-Verordnung müssten für die Herstellung der Fleisch-/Knochenmehle artenreine Produktionswege betrieben werden. Eine solche Produktion wäre aufwendig und würde sich bei den geringen Mengen an artenreinen SNP kaum lohnen. Die Produktion im Ausland ist aufgrund der grösseren Verarbeitungsmengen günstiger (Centravo 2021).

⁵⁴ In der Schweiz findet ein Veredelungsverkehr statt. Es werden SNP importiert, verarbeitet und wieder exportiert. Es ist anzunehmen, dass der Exportfluss an SNP deshalb so hoch ist.

Neben den oben genannten Gründen gibt es weitere Unsicherheiten bezüglich der Produktion von Fleisch-/Knochenmehl für die Nutztierfütterung. Einerseits ist die zukünftige Nachfrage nach Tiermehlen aus SNP für die Nutztierfütterung schwierig abzuschätzen, da die gesellschaftliche Akzeptanz für eine solche Fütterung der Tiere unbekannt ist. Andererseits würde die Produktion von Tiermehl für die Nutztierfütterung in Konkurrenz zur Produktion von Heimtierfutter stehen, denn gemäss dem Sicherheitsvorgaben der EU ist aktuell die Tiermehlproduktion nur aus SNP der Risikokategorie 1 möglich, welche auch für die Heimtierfutterproduktion verwendet werden. Die Produktion und Nachfrage an Heimtierfutter haben in den letzten Jahren stetig zugenommen, wodurch ein lukrativer Markt entstanden ist (Centravo 2021).

Gemäss BAFU (2008) wurden 2006 schätzungsweise 16'000 t TS aus SNP zu «Schweinesuppe» verarbeitet und als Futtermittel für Schweine in Mastbetrieben eingesetzt⁵⁵. Die Stickstofffracht, die mit der Schweinesuppe im Jahr 2006 aus der Fleischverarbeitung in die Tierhaltung gelangte, wird auf ca. 1 kt N geschätzt. Da die zukünftigen Anforderungen bei einer potenziellen Produktion von Fleisch-/Knochenmehl aus SNP grundlegend anders wären als bei der Verarbeitung zu Schweinesuppe im Jahr 2006, kann dieser Wert nicht für die Abschätzung des zukünftigen Potenzials verwendet werden. Er gibt allerdings einen Anhaltspunkt dafür, dass es sich um einen kleinen Stickstofffluss handeln würde.

Mögliche Auswirkungen auf den Export von Schlachtnebenprodukten

Bei einer Lockerung des Fütterungsverbots analog zur EU, könnte unter den richtigen Marktbedingungen der Export von SNP ins Ausland gesteigert werden. Bei einer genügend grossen Nachfrage nach SNP und der entsprechenden Vergütung, könnte durch eine aufwendigere Trennung der SNP und aufwendigere Logistik (getrennte Produktionswege je Tierart) der Export gesteigert werden. Dies würde die Entsorgung bzw. weitere Nutzung der SNP innerhalb der Schweiz reduzieren (Vergärung oder industrielle Verbrennung). Das Reduktionspotenzial wird allerdings als gering eingeschätzt (Centravo 2021). Unter den heutigen Bedingungen gelangen weniger als 4 kt Stickstoff in Form von SNP in die Vergärung und die industrielle Verbrennung (siehe Abbildung 12). Diese Stickstofffracht könnte durch einen erhöhten Export von SNP geringfügig reduziert werden.

Mögliche Auswirkungen auf Produktion und Import von Kraftfutter

Würde die Fütterung von Nutztieren (Schweinen und Geflügel) mit tierischen Proteinen aus SNP in der Schweiz analog zur EU erlaubt werden, könnten solche Fleisch-/Knochenmehle je

⁵⁵ Bis 2011 durften in der Schweiz bestimmte SNP, von der Fleischkontrolle als unbedenklich bezeichnet, in flüssiger Form an Schweine verfüttert werden.

nach gesellschaftlicher Akzeptanz und Marktlage vermehrt importiert werden. Dadurch könnten die inländische Produktion und der Import von Futtermitteln aus pflanzlichen Proteinen (z.B. Soja) reduziert werden. Gemäss Agroscope (2020) stieg der Futtermittelimport, insbesondere von Sojaextraktionsschrot, nach 1996 stark an. Diese Zunahme ist unter anderem auf das Verfütterungsverbot von Tiermehl infolge der BSE-Krise zurückzuführen. Bei einer Lockerung dieses Fütterungsverbots wäre dementsprechend eine Verschiebung von pflanzlichen zu tierischen Proteinen möglich. Die Gesamtmenge Stickstoff in Form von Futtermitteln würde sich dadurch allerdings nicht wesentlich verändern.

8.7. Datenlücken, Unsicherheiten und nicht berücksichtigte Stickstoffflüsse

Bei der Aktualisierung der Stoffflussanalyse wurden neben den Stickstoffflüssen auch deren Unsicherheiten ermittelt oder geschätzt. Fehlende Daten werden im Folgenden aufgeführt.

Generelle Aussagen

- Die Datenlage ist bei den „treibenden“ Flüssen (siehe Kap. 8.1) oft besser als bei den „induzierten“ Flüssen.
- Unsicherheiten sind allgemein wenig bekannt. Sie wurden daher nur punktuell aktualisiert und mehrheitlich aus der letzten Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2005 (BAFU 2010) übernommen.

Flüsse mit grossen Unsicherheiten

Die Stickstoffflüsse basieren auf statistischen Daten, Annahmen und komplexen Modellrechnungen. Diese sind naturgemäss mit zum Teil grossen Unsicherheiten verbunden, was bei der Verwendung der Daten und bei deren Interpretation zu berücksichtigen ist. Teilweise werden die verwendeten Datengrundlagen bei methodischen Änderungen auch rückwirkend aktualisiert, sodass auch publizierte Daten aus früheren Jahren nicht als definitiv betrachtet werden können. Dies ist beispielsweise bei den nationalen Luftschadstoff- und Treibhausgasinventaren und bei der OSPAR-Bilanz der Fall.

- Die Flüsse L5, L14 und U12 beschreiben diffuse Stickstoffeinträge (Auswaschung, Abschwemmung usw.) aus in Gewässer. Mit der Modellierung mit MODIFFUS 3.0 (Agroscope 2015) liegen hier neu modellierte Daten vor und damit eine Grundlage, die wesentlich besser ist als diejenige für die Stoffflussanalyse 2005, welche grösstenteils auf veralteten Werten und Abschätzungen basierte (siehe BAFU 2010).

- Für den Grundwasseraustausch (Fluss U16) mit dem Ausland lagen für die Stoffflussanalyse 2005 praktisch keine zuverlässigen Daten vor (siehe BAFU 2010). Da es sich um einen kleinen Fluss <8 kt N handelt, wurde er als nicht relevant eingestuft und daher nicht aktualisiert.
- Die Flüsse L6, L15 (Emissionen aus Landwirtschaftsböden und aus Wald), A1, A3, A8, A11 (Emissionen aus KVA/SAVA, ARA, Kompostierung und Vergärung) sowie U11 und U13 (Denitrifikation aus übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre und aus der Hydrosphäre) bestehen als Folge der Denitrifikation zum grössten Teil aus Luftstickstoff. Die Datenlage für die Quantifizierung des Luftstickstoffs, der bei der Denitrifikation entsteht, ist allerdings schwach. Die Anteile an Luftstickstoff und N₂O, die bei der Denitrifikation entstehen, variieren vermutlich stark in Abhängigkeit der Umweltbedingungen. Zudem sind Luftstickstoffemissionen schwierig zu messen (Vermischung mit Luft) und oft von geringem Interesse, da Luftstickstoff ökologisch nicht relevant ist.
- Einige kleine Flüsse sind mit grossen Unsicherheiten behaftet, weil darüber wenig bekannt ist. Dazu gehören die Flüsse L2 (Hofdünger von der Tierhaltung in die Vergärung), I6 und I7 (Import Treib- und Brennstoffe in die Schweiz) sowie P5 und P7 (Biogene Abfälle in Kompostierung und Vergärung). Die Unsicherheit kommt hauptsächlich durch die unsicheren Stickstoffgehalte zustande. Bei biogenen Abfällen beispielsweise variiert der Stickstoffgehalt je nach Zusammensetzung beträchtlich. Komplex ist die Datenlage auch bei den Schlachtnebenprodukten.
- Über das Ausmass der Akkumulation bzw. dem Abbau von ökologisch relevanten Stickstoffverbindungen in der natürlichen Umwelt ist ebenfalls wenig bekannt. Lagerveränderungen können zum Beispiel durch Holzzuwachs im Wald oder Sedimentation in Seen entstehen (siehe Kapitel 5.7). Diese Prozesse zu identifizieren und quantifizieren ist aufwändig. Weitere Lagerveränderungen in der Umwelt wurden daher nicht abschliessend beziffert.
- Die internen Stickstoffflüsse im Subsystem Umwelt U6 (Verbrauch von Luftstickstoff durch N-Fixierung auf übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre) und U8 (Verbrauch von Luftstickstoff durch N-Fixierung durch Wasserpflanzen) konnten nicht quantifiziert werden, da keine Daten zur Verfügung standen. Auch der im Subsystem Abfallwirtschaft interne Stickstofffluss A10 (Abwasser aus der Kompostierung in die ARA) wurde nicht erfasst. Diese internen Stoffflüsse sind vermutlich sehr klein und für die Gesamtbilanz des Systems von untergeordneter Bedeutung.

Nicht berücksichtigte Flüsse

Einzelne Stickstoffflüsse wurden nicht berücksichtigt. So zum Beispiel diejenigen, welche beim Import/Export von Textilien (z.B. Seide, Baumwolle etc.) entstehen oder der gesamte Bereich „Wildtiere“.

8.8. Ausblick

Der Trend der vergangenen Jahre zeigt, dass die stickstoffhaltigen Luftschadstoffe aus Verkehr, Industrie und Haushaltungen wirkungsvoll reduziert werden konnten. In der Landwirtschaft konnte die Stickstoffeffizienz durch einen verlustärmeren Umgang mit Düngemitteln leicht gesteigert werden. Zudem gab es eine Effizienzsteigerung in der Tierproduktion. Gleichzeitig gab es jedoch eine Verschiebung von Schweinefleisch zu vermehrter Rindfleisch- und Geflügelproduktion, die höhere Stickstoffgehalte ausweisen. Daher ist die Stickstofffracht der tierischen Produkte insgesamt sogar angestiegen.

Die Futtermittelproduktion für die Landwirtschaft wurde leicht ins Ausland verlagert: Die inländische Futtermittelproduktion ist zurückgegangen und wurde durch vermehrte Futtermittelimporte kompensiert. Gesamthaft bewegen sich die landwirtschaftlichen Stickstoffflüsse auf konstant hohem Niveau. Mit den bisherigen Massnahmen ist es somit nicht gelungen, die Stickstoffproblematik in der Landwirtschaft zu entschärfen.

Um die Stickstoffverluste zu reduzieren und um substanzielle Fortschritte bei den Umweltzielen Landwirtschaft zu erzielen, müssen zukünftige Massnahmen weiter gehen als bestehende. Dabei ist neben technischen Verbesserungen und organisatorischen Massnahmen, die eine beschränkte Steigerung der Stickstoffeffizienz bewirken, auch eine Verminderung der Intensität der Landwirtschaft notwendig. Dies könnte die Schweizer Landwirtschaft jedoch stark verändern und hätte zum Beispiel eine Anpassung der Produktion zur Folge. Bei gleichbleibendem Konsum wäre ein zusätzlicher Nahrungsmittelimport unumgänglich. Dabei besteht das Risiko einer Verlagerung der Umweltbelastung ins Ausland, es kann jedoch auch sein, dass Standortvorteile (in der Schweiz und im Ausland) zu geringeren globalen N-Stickstoffeinträgen in die Umwelt führen.

Mit der Parlamentarische Initiative 19.475 «Das Risiko beim Einsatz von Pestiziden reduzieren», hat das Parlament gesetzliche Änderungen beschlossen; erste Massnahmen sollen per 1.1.2023 in Kraft treten. Die Initiative wurde mit dem Ziel einer angemessenen Reduktion der Nährstoffverluste in der Landwirtschaft ergänzt. Sie enthalten insbesondere folgende Massnahmen (BLW 2021):

- Die Stickstoff- und Phosphorverluste der Landwirtschaft werden angemessen reduziert.
- Kraftfutter- und Düngelieferungen sind dem Bund zu melden, damit dieser die Nährstoffüberschüsse national und regional bilanzieren kann.

In den anderen Sektoren sind folgende Massnahmen in der Umsetzung vorgesehen:

- Die Abgasvorschriften für Motorfahrzeuge werden nochmals verschärft: Seit 1. September 2021 gilt die Emissionsnorm Euro 6d für neue Personenwagen mit einer weiteren Verschärfung der Grenzwerte für Stickoxide.
- Aufgrund des Emissionshandelssystems werden bei industriellen Anlagen Emissionsreduktionen realisiert. Diese verringern nicht nur Treibhausgase, sondern können gleichzeitig auch stickstoffhaltige Luftschadstoffe reduzieren.
- Auch durch zahlreiche Fördermassnahmen zur Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien und zur Verbesserung der Energieeffizienz werden Emissionsreduktionen realisiert (z. B. Heizanlagen, Gebäudeisolation).

Annex

A1 Stickstoffflüsse

A1.1. Land- und Forstwirtschaft

L1 Hofdünger/Weidegang	Tierhaltung ⇒ Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	<p>Organisch gebundener und mineralisierter Stickstoff (NH_3, NH_4^+, NO_3^-) im Hofdünger, der im Pflanzenbau eingesetzt wird inkl. Eintrag von Stickstoff in Weideflächen durch Weidegang von Hoftieren.</p> <p>Enthalten sind Stickstofffrachten, welche durch Emissionen (NO_x, N_2O, NH_3 und N_2) aus Landwirtschaftsböden hervorgehen, beim Austrag von Hofdünger entstehen (hier nur NO_x^- und N_2O- Emissionen, ohne NH_3-Emissionen) und beim Weidegang verloren gehen (NO_x, N_2O, NH_3). (Entspricht den Emissionen aus Hofdünger von Fluss L6).</p> <p>Nicht enthalten sind Stickstofffrachten, welche durch Emissionen (NH_3, NO_x, N_2O und N_2) aus der Tierhaltung und aus Hofdüngerlager in die Atmosphäre gelangen, sowie NH_3-Emissionen, die beim Ausbringen des Hofdüngers auf Landwirtschaftsflächen entstehen. (Entspricht den Emissionen aus Hofdünger von Fluss L4).</p>
Datenquellen	Stickstoffbilanz BFS (BFS 2021) (Mittelwert 2017-2019)
Wert 2018	<p>L4 (N_r) ökologisch relevante N-Verbindungen/Berechnung L1 Gesamtfluss: Hofdünger, vom Vieh ausgeschiedene Bruttomenge (ohne Abzug der gasförmigen Verluste): 129.86 kt N (BFS 2021)</p> <p>Abzug Hofdünger in Vergärung (Fluss L2): - 2.9 kt N</p> <p>Abzug Emissionen aus Tierhaltung, Güllelager etc. (L4): -41.07 kt N</p> <hr/> <p>L1 Hofdünger/Weidegang (Gesamtfluss): 85.9 kt N</p> <hr/> <p>Vergleichswerte: BAFU 2010: 86.3 kt N (THG-Inventar Landwirtschaft, ART 2008c)</p>
Datenqualität	77-95 kt N; Annahme: kleine Unsicherheit von 10% beim Gesamtfluss
Bemerkungen	Die Abgrenzung des Flusses L1 von L2 und L4 erfolgt gleich wie in der Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010). Da neu die Datenquelle eine andere ist und die Rohdaten den Fluss L4 beinhalten, muss hier der Fluss L4 explizit von L1 abgezogen werden (in BAFU 2010 war dieser in den Rohdaten für den Fluss L1 nicht enthalten).
L2 Hofdünger in Vergärung	Tierhaltung ⇒ Vergärung (Abfall)
Charakterisierung	Organisch gebundener und mineralisierter Stickstoff (NH_3 , NH_4^+ , NO_3^-) im Hofdünger, der in die Vergärung gelangt.
Datenquellen	Kompostier- und Vergärungsanlagen – Erhebung in der Schweiz und Lichtenstein 2017, (UMWEKO 2019), GRUD (Agroscope 2017).
Wert 2018	<p>L2 (N_r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L2 Gesamtfluss 2.9 kt N</p> <hr/> <p>Vergleichswerte</p>

	BAFU 2010: 0.53 kt N
Datenqualität	1-4 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	718'095 t FS landwirtschaftliches Material im Jahr 2017 (UMWEKO 2019), abzüglich Anteil Erntereste 11'000 t FS (ZHAW 2018) = 707'095 t FS Hofdünger (davon 34'622 t FS in gewerblich/industriellen Anlagen und 672'473 t FS in landwirtschaftlichen Anlagen). Durchschnittlicher N-Gehalt: 0.5% (Vergärung in gewerblich/industriellen Anlagen, Annahme mehrheitlich Mist), 0.4% (Vergärung in landwirtschaftlichen Anlagen, Annahme mehrheitlich Gülle) (Agroscope 2017)
L3 Produkte/Nahrung	Tierhaltung ⇒ Produkteherstellung und übrige Nutzungen (Produkteherstellung/Produktenutzung)
Charakterisierung	Organisch gebundener Stickstoff in tierischen Produkten wie Milch, Eier, Honig etc. und im Schlachtvieh, welche in die Produkteherstellung und Produktnutzung gelangen.
Datenquellen	OSPAR 2021 (Mittelwert 2017-2019)
Wert 2018	L3 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L3 Gesamtfluss: 41.5 kt N
	Vergleichswerte: 2005: 35 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	35-48 kt N Unsicherheit: 15% (Schätzwert)
Bemerkungen	Der Hauptteil des Flusses stammt aus Milch und Schlachtvieh.
L4 Emissionen	Tierhaltung ⇒ Atmosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	NH ₃ , N ₂ O und N ₂ -Emissionen aus der Tierhaltung in die Atmosphäre. Dazu gehören die NH ₃ -Emissionen, die aus Ställen, Hofdüngerlagern und beim Ausbringen des Hofdüngers auf Landwirtschaftsflächen in die Atmosphäre entweichen (ohne NO _x - und N ₂ O-Emissionen beim Ausbringen des Hofdüngers und ohne NH ₃ , NO _x , N ₂ O-Emissionen, die beim Weidegang der Tiere entstehen – diese sind in Fluss L6 enthalten).
Datenquellen	Treibhausgasinventar der Schweiz 1990–2019 (BAFU, 2021a) (Mittelwert 2017-2019)
Wert 2018	L4 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen: Emissionen NH ₃ -N (Hofdünger, Ausbringung, Ställe und Lagerung ohne Weide): 38.3 kt N Emissionen N ₂ O-N (Hofdünger, Ställe und Lagerung): 0.3 kt N Summe ökologisch relevante N-Verbindungen: 38.6 kt N
	L4 (N _{nr}) Luftstickstoff Emissionen N ₂ : 2.4 kt N
	L4 Gesamtfluss: 41.1 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 41.9 kt N
Datenqualität	37-45 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 10%

Bemerkungen	<p>Die Abgrenzung des Flusses L4 von L1 erfolgt gleich wie in der Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010). Da neu die Datenquelle für den Fluss L1 eine andere ist (die Rohdaten beinhalten den Fluss L4), muss der Fluss L4 explizit von L1 abgezogen werden (in BAFU 2010 war dieser in den Rohdaten für den Fluss L1 nicht enthalten).</p> <p>Die Abgrenzung des Flusses L4 von L6 erfolgt gleich wie in der Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010). Die Abgrenzung weicht dadurch von der Zuordnung im aktuellen Treibhausgasinventar (BAFU, 2021a) ab. Die NH₃-Emissionen, die bei der Ausbringung von Hofdünger entstehen, werden im aktuellen Treibhausgasinventar den landwirtschaftlichen Böden (L6) zugeordnet.</p>
L5 Auswaschung/Abschwemmung	Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau ⇒ Hydro-sphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Diffuse Nitrat-Einträge aus Auswaschung, Abschwemmung, Erosion und Drainage aus Landwirtschaftsböden in Grund- und Oberflächengewässer, verursacht durch den über die landwirtschaftliche Praxis (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung) mobilisierten Stickstoff sowie Einträge von Hofdünger, Mineraldünger, Kompost, etc.
Datenquellen	MODIFFUS 3.0 (Agroscope 2015)
Wert 2018	L5 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L5 Gesamtfluss 32 kt N
	Vergleichswert: 2005: 34 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	26-38 ktN Unsicherheit: 20% (Schätzwert)
Bemerkungen	MODIFFUS rechnet mit langjährigen Durchschnittswerten. Der Berechnungszeitraum von MODIFFUS bezieht sich auf den Zeitraum um 2010. Tab. 21 in Agroscope (2015) mit den Gesamt-Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz pro Landnutzungskategorie. Der Landwirtschaft wurden die Kategorien Ackerland, Alpwirtschaftliche Nutzfläche, Grasland, Heimweiden, Rebbau und Obstbau zugeteilt.
L6 Emissionen	Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenanbau, inkl. landwirtschaftlich genutzte organisch Böden ⇒ Atmosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Emissionen von NO _x , N ₂ O und NH ₃ aus Landwirtschaftsböden durch Weidengang und Austrag von Hofdünger (Austragung nur NO _x - und N ₂ O- Emissionen, ohne NH ₃ -Emissionen, diese sind im Fluss L4 enthalten), Mineraldünger, Kompost aus Ernterückständen, N-fixierenden Pflanzen und organischen Böden sowie indirekte Emissionen aus der atmosphärischen Deposition und Auswaschung.
Datenquellen	Treibhausgasinventar der Schweiz 1990–2019 (BAFU 2021a) (Mittelwert 2017-2019)
Wert 2018	L6 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen: Emissionen NH ₃ -N (Hofdünger Weide, Mineraldünger): 4.1 kt N Emissionen NO _x -N (Hofdünger, Mineraldünger): 1.2 kt N Emissionen N ₂ O-N (Hofdünger, Mineraldünger, Ernterückstände, organische Böden, indirekte Emissionen): 3.2 kt N Summe ökologisch relevante N-Verbindungen: 8.5 kt N
	L6 (N _{nr}) Luftstickstoff

	Emissionen N ₂ : 29 kt N
	L6 Gesamtfluss: 37.5 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 39.2 kt N
Datenqualität	L6 (N _r): 8-9 kt N; Unsicherheit: 11% (Schätzwert) L6 (N _{nr}): 14-43 kt N; Unsicherheit 50% (Schätzwert) L6 Gesamtfluss: 24-51 kt N; Unsicherheit: 36% (Schätzwert)
Bemerkungen	Die Abgrenzung des Flusses L6 von L4 erfolgt gleich wie in der Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010). Da sich die Abgrenzungen in den publizierten Daten (BAFU 2021a) verändert haben, mussten die Flüsse L4 und L6 basierend auf den Rohdaten berechnet werden.
L7 offene Verbrennung	Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenanbau ⇒ Atmosphäre
Charakterisierung	Stickstoffemissionen aus offener Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen.
Datenquellen	Fluss unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010); Rohdaten: FOEN 2009a, FOEN 2009b
Wert 2018	L7 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L7 Gesamtfluss: Field burning of agric. waste: 0.13 kt N = 0.5 kt NO _x -N + 0.5 kt N ₂ O-N + 0.1 kt NH ₃ -N
Datenqualität	0.07-0.2 kt N, Unsicherheit Gesamtfluss: 50%
	Teilunsicherheiten: NO _x : ±1 kg NO _x /t Abfall (40%) N ₂ O, NH ₃ : gross (> 50%)
Bemerkungen	Da es sich um einen nicht relevanten, kleinen Fluss handelt, wurde dieser unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010).
L8 Futter	Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenanbau ⇒ Tierhaltung (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Fluss an organisch gebundenem Stickstoff in Futterpflanzen, die für die Tierhaltung verwendet werden (Fütterungsverluste im Stall gehen via Mist wieder zurück auf Landwirtschaftsböden). Entzug durch Futterbau, Wiesen und Weiden.
Datenquellen	Stickstoffbilanz BFS (BFS 2021), OSPAR 2021 (Mittelwert 2017-2019)
Wert 2018	L8 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L8 Gesamtfluss: 126.7 kt N
	Teilflüsse: Entzug durch Futterbau, Wiesen und Weiden: 112.0 kt N (BFS 2021) Entzug durch landwirtschaftliche Kulturen (BFS 2021) abzüglich Pflanzliche Produkte Nahrung (OSPAR 2021): 14.7 kt N Summe = L8 Gesamtfluss
	Vergleichswerte: 132 kt N (BAFU 2010) 128.0 kt N Pflanzliche Futtermittel (OSPAR 2020, Mittelwert 2017-2019)

Datenqualität	Unsicherheit: 5% (Schätzwert), 120-133 kt N
Bemerkungen	Teilflüsse: Raufutter = 112 kt N (Entzug durch Futterbau, Wiesen und Weiden, BFS 2021) Futtergetreide = 14.7 kt N (berechnet aus Total pflanzliche Produkte = 24 kt N (BFS 2021, Entzug durch landwirtschaftliche Kulturen), abzüglich des Anteils pflanzlicher Produkte als Nahrungsmittel = 10 kt N (entspricht Fluss L9, OSPAR 2021))
L9 Ernteprodukte Nahrung	Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau ⇒ Produkteherstellung und übrige Nutzungen (Produkteherstellung/Produktenutzung)
Charakterisierung	Stickstofffracht in pflanzlichen Nahrungsmitteln.
Datenquellen	OSPAR 2021 (Mittelwert 2017-2019)
Wert 2018	L9 (N _i) ökologisch relevante N-Verbindungen = L9 Gesamtfluss: 9.9 kt N
	Vergleichswerte: 10 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	8-12 kt N Unsicherheit: 20% (Schätzwert)
Bemerkungen	Bei vielen Ernteprodukten gibt es Abfallprodukte, die im System Landwirtschaft weiter verwertet werden (Feldrandkompostierung, untergepflügt). Diese werden hier nicht berücksichtigt.
L10 Erntereste in Vergärung	Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenanbau ⇒ Vergärung (Abfall)
Charakterisierung	Organisch gebundener Stickstoff in Ernteresten, die vergärt werden.
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2014, (ZHAW, 2018), Grundlagen für ein Biomasse- und Nährstoffmanagement in der Schweiz (EBP und ZHAW, 2010)
Wert 2018	L10 ökologisch relevante N-Verbindungen = L10 Gesamtfluss 0.04 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 0.004 kt N
Datenqualität	0-0.7 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 100% (Schätzwert)
Bemerkungen	1'430 t TS im Jahr 2014 (ZHAW, 2018) Durchschnittlicher N-Gehalt: 2.5% (N-Gehalt Pflanzenanbau in Vergärung gemäss EBP und ZHAW 2010)
L11 Energieholz	Wald (Bäume und Böden) ⇒ Produkteherstellung/Produktenutzung
Charakterisierung	Stickstofffracht im Energieholz für Industrie und Haushalte.
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2014 (ZHAW 2018)
Wert 2018	L11 ökologisch relevante N-Verbindungen = L11 Gesamtfluss 0.7 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 0.4kt N
Datenqualität	0.6-0.7 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 10% (Schätzwert)
Bemerkungen	1'498'041 TS im Jahr 2014 (ZHAW 2018)

	Durchschnittlicher N-Gehalt: 0.04% (Energieholz gemäss BAFU 2010)
L12 Stamm- und Industrieholz	Wald (Bäume und Böden) ⇒ Produkteherstellung/Produktenutzung
Charakterisierung	Stickstofffracht im Stamm- und Industrieholz, welches in Industrie (Holz-/ Papierindustrie) und Haushalten eingesetzt wird.
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2014 (ZHAW 2018)
Wert 2018	L12 ökologisch relevante N-Verbindungen = L12 Gesamtfluss 0.9 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 1.2kt N
Datenqualität	0.8-0.9 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 10% (Schätzwert)
Bemerkungen	1'465'413 t TS im Jahr 2014 (ZHAW 2018) Durchschnittlicher N-Gehalt: 0.06% (Holzprodukt gemäss BAFU 2010)
L14 Auswaschung und Abschwemmung	Wald (Bäume und Böden) ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Diffuse Gesamtstickstoffeinträge aus Waldböden in Gewässer, hauptsächlich Nitratverluste (NO ₃) ins Grundwasser. Auswaschung, Abschwemmung, Erosion und Drainage aus Wald unter 1200m und Wald über 1200m.
Datenquellen	MODIFFUS 3.0 (Agroscope 2015)
Wert 2018	L14 ökologisch relevante N-Verbindungen = L14 Gesamtfluss: 7.4 kt N
	Vergleichswert: 8.5 kt N (BAFU 2010, aus TFIAM/COST 729 Workshop (Rihm und Achermann 2007); Meteotest 2009) Eine weitere Studie des BAFU (BAFU 2016d) zeigt für das Jahr 2010 einen Stickstoffaustrag von 7.6 kt N und liegt somit in einem sehr ähnlichen Bereich.
Datenqualität	4-11 kt N Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	MODIFFUS rechnet mit langjährigen Durchschnittswerten. Der Berechnungszeitraum von MODIFFUS bezieht sich auf den Zeitraum um 2010. Tab. 21 in Agroscope (2015) mit den Gesamt-Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz pro Landnutzungskategorie. Dem Wald wurden die Kategorien Wald unter 1200m und Wald über 1200m zugeteilt. Es findet hauptsächlich eine Auswaschung ins Grundwasser statt. Abschwemmung aus Waldböden in Oberflächengewässer ist vernachlässigbar klein. Gemäss Agroscope 2016b (nach mündlicher Mitteilung von S. Braun) ist bei den N-Auswaschungswerten unter Wald kein zeitlicher Trend von 1998 – 2012 messbar (obwohl die N-Deposition abgenommen hat), auch ist aus den Daten ist kein jahreszeitlicher Trend (Sommer/Winter etc.) erkennbar (Agroscope 2016b).
L15 Denitrifikation	Wald (Bäume und Böden) ⇒ Atmosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Stickstoffemissionen (NO ₂ , N ₂ , NO _x) durch Denitrifikation aus dem Wald in die Atmosphäre.

Datenquellen	L15 (Nr) aus Bühlmann et al. (2014) für das Jahr 2010. Fluss für Luftstickstoff L15 (Nnr) unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010). Rohdaten: THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c), Schätzung anhand TFIAM/COST 729 Workshop (Rihm und Achermann 2007) auf Basis N-Budget 2000 für Schweizer Wald.
Wert 2018	L15 (Nr) ökologisch relevante N-Verbindungen: 3.86 kt N Teilflüsse: N ₂ O und NO Emissionen aus Waldfläche, 2010 (Bühlmann et al. , 2014): N ₂ O-N: 1.38±0.32 kt N NO-N: 2.48±0.32 kt N <hr/> L15 (Nnr) Luftstickstoff: 6 kt N <hr/> L15 Gesamtfluss: 9.9 kt N (Summe: N ₂ O, N ₂ (TFIAM/COST) und NO _x (BAFU 1996c)) <hr/> Vergleichswert (BAFU 2010): 7.14 kt N (Summe: N ₂ O, N ₂ (TFIAM/COST) und NO _x (BAFU 1996c))
Datenqualität	L15 (Nr): 1-2 kt N; Unsicherheit: 40% (Schätzwert) L15 (Nnr): 3-9 kt N; Unsicherheit 50% (Schätzwert) L15 Gesamtfluss: 4-10 kt N; Unsicherheit: 42%
L16 Holzexport	Land- und Forstwirtschaft ⇒ Ausland
Charakterisierung	Stickstofffracht in exportiertem Holz
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2014 (ZHAW 2018)
Wert 2018	L16 ökologisch relevante N-Verbindungen = L16 Gesamtfluss 1.4 kt N L16 Gesamtfluss: 1.4 kt N <hr/> Vergleichswerte BAFU 2010: 1.3 kt N
Datenqualität	1-2 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 30% (Schätzwert)
Bemerkungen	2'873'593 t TS Export Holz und Papier im Jahr 2014 (ZHAW, 2018) 44'004 t TS Export Energieträger in Verarb. Energie im Jahr 2014 (ZHAW 2018). Durchschnittliche N-Gehalte: 0.05% für Import Zellstoff, Papier, Karton, Industrieholz, Restholz, Druckwaren (BAFU, 2010) 0.04% für Energieholz (BAFU 2010)

A1.2. Stickstoffflüsse Produkteherstellung

P1 Mineraldünger (Inlandproduktion)	Produkteherstellung und übrige Nutzungen P Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Stickstofffracht im Mineraldünger der im Inland industriell hergestellt und auf Schweizer Landwirtschaftsböden ausgebracht wird.
Datenquellen	fenaco-LANDI 2021
Wert 2018	P1 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P1 Gesamtfluss: 0 kt N
	In der Schweiz hatte in der Vergangenheit nur noch die Firma Lonza in Visp Stickstoffdünger hergestellt (Auskunft T. Henzen, Agricura, BAFU 2010). Der Spezialitätenchemiehersteller Lonza hat sich jedoch entschieden, seine Stickstoffdüngerproduktion an seinem einzigen Schweizer Standort in Visp im 1. Quartal 2018 einzustellen (fenaco-LANDI 2021).
P2 Emissionen NO_x, NH_y, N₂O	Verkehr ⇒ Atmosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	NO _x -, NH _y -, N ₂ O-Emissionen, verursacht durch Flugverkehr (Inland), Strassenverkehr, Schienenverkehr, Schiffsverkehr, Militärflugverkehr und übrigen Offroadverkehr.
Datenquellen	EMIS 2021 (Mittelwert 2017-2018), Beschreibung der Datengrundlagen in BAFU 2021a und BAFU 2021b.
Wert 2018	P2 ökologisch relevante N-Verbindungen = P2 Gesamtfluss 14.1 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 18.4 kt N
Datenqualität	11-17 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 20% (Schätzwert)
P3 Emissionen NO_x, NH_y, N₂O	Feuerungen ⇒ Atmosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	N NO _x -, NH _y -, N ₂ O-Emissionen aus Energieproduktion und Feuerungen, flüchtige Emissionen und Verluste.
Datenquellen	EMIS 2021 (Mittelwert 2017-2018), Beschreibung der Datengrundlagen in BAFU 2021a und BAFU 2021b.
Wert 2018	P3 ökologisch relevante N-Verbindungen = P3 Gesamtfluss 5.5 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 7.6 kt N
Datenqualität	4-7 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 20% (Schätzwert)
P4 Emissionen NO_x, NH_y, N₂O	Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Atmosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	NO _x -, NH _y -, N ₂ O-Emissionen aus industriellen Prozessen (Metallindustrie, Chemie etc.) und Produktenutzung (Sprays, Anästhesie etc.).
Datenquellen	EMIS 2021 (Mittelwert 2017-2018), Beschreibung der Datengrundlagen in BAFU 2021a und BAFU 2021b.
Wert 2018	P4 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen: 1.6 kt N

	P4 (N _{nr}) Luftstickstoff: 4 kt N
	P4 Gesamtfluss: 5.6 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 4.5 kt N
Datenqualität	2-9 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 70% (Schätzwert)
P5 biogene Abfälle in Kompostie-Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Kompost (Abfallwirtschaft) rung	
Charakterisierung	Stickstofffracht in biogenem Abfall (Grüngut/Speisereste), welche kompostiert werden.
Datenquellen	EMIS 2021 (Mittelwert 2017-2018), Beschreibung der Datengrundlagen in BAFU 2021a und BAFU 2021b.
Wert 2018	P5 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P5 Gesamtfluss 4.2 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 2.3 kt N
Datenqualität	1-7 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 70% (Schätzwert)
Bemerkungen	Kompostierter Abfall insgesamt 602'927 t FS Mittelwert 2017-2019 (EMIS, 2021). N-Gehalt Kompost: 0.7% von FS (Agroscope, 2017)
P6 Abfall/Sonderabfall Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ KVA/SAVA (Abfallwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht im Abfall/Sonderabfall aus Industrie und Haushalten welcher in der KVA / SAVA verbrannt wird.
Datenquellen	EMIS 2021 (Mittelwert 2017-2018) (Beschreibung der Datengrundlagen in BAFU 2021a und BAFU 2021b), WSL 2017
Wert 2018	P6 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P6 Gesamtfluss 9.8 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 3.5 kt N
Datenqualität	5-15 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	Abfälle in KVA: 4'059'000 t FS (EMIS 2021), davon sind 2.8 Mio. t Siedlungsabfälle und der Rest gewerbliche Abfälle, Bauabfälle, Sonderabfälle (BAFU 2021). N-Gehalt: 0.24% (N-Gehalt Siedlungsabfälle: 0.3% von FS berechnet mit Angaben aus WSL (2017), N-Gehalt restliche Abfälle berechnet mit Angaben aus WSL (2017) unter der Annahme, dass diese zu 50% aus Plastik und zu 50% aus Papier/Karton/Holz bestehen).
P7 biogene Abfälle in Vergärung Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Vergärung (Abfallwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht in biogenen Abfällen, welche für die Vergärung verwendet werden.

Datenquellen	Kompostier- und Vergärungsanlagen – Erhebung in der Schweiz und Lichtenstein 2017, (UMWEKO 2019), Biogene Güterflüsse der Schweiz 2014 (ZHAW 2018), Grundlagen für ein Biomasse- und Nährstoffmanagement in der Schweiz (EBP und ZHAW 2010).
Wert 2018	P5 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P7 Gesamtfluss: 3 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 0.3 kt N
Datenqualität	1- 5 kt N Unsicherheit Gesamtfluss: 70% (Schätzwert)
Bemerkungen	793'080 t FS im Jahr 2017 (UMWEKO 2019), davon 294'733 t FS aus Industrie, 72'500 t FS aus Fleischverarbeitung, 425'847 t FS aus Konsum/Gartenbau N-Gehalt: Industrie: 0.4% (gewerblich/industrielle Anlage), Industrie: 0.6% (landwirtschaftliche Anlage), Fleischverarbeitung: 1.2% (gewerblich/industrielle Anlage), Industrie: 0.8% (landwirtschaftliche Anlage), Konsum/Gartenbau: 0.2% (beide Anlagen) (gemäss ZHAW 2018 und EBP und ZHAW 2010).
P8 Abwasser	Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ ARA (Abfallwirtschaft)
Charakterisierung	Stickstofffracht im Abwasser aus Produkteherstellung und übrigen Nutzungen (Industrie und Haushalte), welches in Abwasserreinigungsanlagen gereinigt wird.
Datenquellen	Swiss Academies 2020
Wert 2018	P8 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P8 Gesamtfluss: 40 kt N
	Vergleichswert 43.2 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	36-44 ktN Unsicherheit: 10% (Schätzwert)
Bemerkungen	Gemäss Rücksprache mit Damien Dominguez (BAFU) ist ein Wert von 40 kt N plausibel. In der Stoffflussanalyse Stickstoff von 2005 (BAFU 2010) war der Wert etwas überschätzt; die Überschätzung entspricht etwa dem Bevölkerungswachstum.
P9 ungereinigtes Abwasser/Überlauf	Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Stickstofffracht in ungereinigtem Abwasser welches direkt den Gewässern zufliesst
Datenquellen	Fluss unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010). Rohdaten: Abschätzung P. Fischer / U. Sieber / S. Lehmann, BAFU 2009.
Wert 2018	P9 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P9 Gesamtfluss: 2.2 kt N
	1-3 kt N Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Datenqualität	Wert errechnet sich durch Eintrag in die Hydrosphäre von ungeklärtem Abwasser (Überlauf) (Abschätzung 10 % des Zulaufs Kläranlagen x 15 mg/l): 2.2 kt N (BAFU 2010). Gemäss Experteneinschätzung dürfte der Überlauf tendenziell tiefer, d.h. eher bei 5% des Zuflusses liegen.

Bemerkungen	Da es sich um einen nicht relevanten, kleinen Fluss handelt, wurde dieser unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010).
P10 Export aus Lebensmittelindustrie und übrige Produkte	Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Ausland
Charakterisierung	Stickstofffracht in exportierten Lebens- und Genussmitteln und deren Ausgangsprodukten aus der Schweiz ins Ausland.
Datenquellen	Agristat 2021 (Mittelwert 2017-2018), Agroscope 2020
Wert 2018	P10 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P10 Gesamtfluss: 20.2 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 13 kt N
Datenqualität	14-26 kt N Unsicherheit: 30% (Schätzwert)
Bemerkungen	Siehe Herleitung Güterimport- und -export im Anhang A4. Jährlicher Export landwirtschaftlicher Erzeugnisse (Mittelwert von 2017-2019 in Tonnen) aus Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung (Agristat 2021), N-Gehalte aus Agroscope (2020) oder gemäss BAFU 2010.
P11 Schlachtabfälle (interner Fluss)	Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Zementwerke (Produkteherstellung/Produktenutzung)
Charakterisierung	Stickstofffracht in Schlachtabfällen, die in den zwei schweizerischen Extraktionswerken zu Tiermehl verarbeitet und in Zementwerken verbrannt werden.
Datenquellen	GMZ 2019, TMF, 2018, ZHAW 2018, BAFU 2016
Wert 2018	P11 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P11 Gesamtfluss: 2.7 kt N
	Vergleichswert: 2.7 kt N (t TS im Jahr 2014 gemäss ZHAW 2018, N-Gehalt: BAFU 2006) 3.9 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	2-3 kt N Unsicherheit: 15% (Schätzwert)
Bemerkungen	21'730 t FS im Jahr 2018 (GMZ 2019), 10'736 t FS im Jahr 2018 (TMF, 2018) Total: 32'466 t FS Tiermehl TS-Gehalt = 94% (ZHAW 2018), N-Gehalt von TS: 9% (BAFU 2006)
P12 Tierfutter aus Lebensmittelindustrie	Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Tierhaltung (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Stickstofffracht in Lebens- und Futtermitteln aus der Lebensmittelindustrie, die als Futter in der Tierhaltung verwendet werden.
Datenquellen	ZHAW 2018, EBP und ZHAW 2010
Wert 2018	P12 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P12 Gesamtfluss: 7.4 kt N
	Vergleichswert: -
Datenqualität	5-10 kt N Unsicherheit: 30% (Schätzwert)

Bemerkungen	369'192 t TS im Jahr 2014 (ZHAW 2018), N-Gehalt: 2% (EBP und ZHAW 2010) Bei diesem Fluss handelt es sich um Nebenerzeugnisse der Lebensmittelindustrie. Hinzu kommt eine (sehr) kleine Menge an Lebensmittel aus dem Handel/Gastro/Haushalten, die als Tierfutter verwendet werden.
-------------	---

A1.3. Stickstoffflüsse Umwelt

U1 N-Fixierung	Atmosphäre ⇒ Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Fixierung von Luftstickstoff durch landwirtschaftliche Nutzpflanzen.
Datenquellen	OSPAR 2021 (Mittelwert 2017-2019)
Wert 2005	U1 (N _{nr}) Luftstickstoff = U1 Gesamtfluss: 34.8 kt N
	Vergleichswert: 2005: 32 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	27-42 kt N Unsicherheit: 22% (Schätzwert)
U2 N-Fixierung Wald	Atmosphäre ⇒ Wald (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Fixierung von Luftstickstoff durch Waldpflanzen.
Datenquellen	Waldfläche gemäss Landesforstinventar LFI 4, Tab 12; N-Fixierung pro Hektar gemäss Auskunft Sabine Augustin, Abteilung Wald, BAFU, 14.1.2022
Wert 2018	U2 (N _{nr}) Luftstickstoff = U2 Gesamtfluss 6.6 kt N
Datenqualität	3-10 kt N Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	Der Stickstofffluss der N-Fixierung der Wälder berechnet sich über die Waldfläche und die pro Hektar fixierte Stickstoffmenge.
U3 Deposition auf Wald	Atmosphäre ⇒ Wald (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Atmosphärische Deposition von Stickstoffverbindungen (NO _x , NH _y) auf Waldböden.
Datenquellen	Meteotest 2021
Wert 2018	U3 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U3 Gesamtfluss: 25.5 kt N
	Vergleichswert 2005: 27.5 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	18 - 33 kt N Unsicherheiten: ca. 30%
Bemerkungen	Depositionsdaten gemäss Meteotest 2021; anteilmässig auf Waldfläche umgerechnet. Unter Waldflächen werden die folgenden Kategorien der Arealstatistik zusammengefasst: Geschlossener Wald, Aufgelöster Wald, Gebüschwald, Gehölze.
U4 Deposition auf Landwirtschaftsböden	Atmosphäre ⇒ Landwirtschaftsböden (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Atmosphärische Deposition von Stickstoffverbindungen (NO _x , NH _y) auf Landwirtschaftsböden.
Datenquellen	Meteotest 2021
Wert 2018	U4 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U4 Gesamtfluss: 24.5 kt N

	Vergleichswerte BAFU 2010: 27,1 kt N
Datenqualität	17 - 32 kt N Unsicherheiten: ca. 30%
Bemerkungen	Depositionsdaten gemäss Meteotest 2021; anteilmässig auf Landwirtschaftsfläche umgerechnet. Unter Landwirtschaftsflächen werden die folgenden Kategorien der Arealstatistik zusammengefasst: Rebbau, Obstbau, Gartenbau, Wies- und Ackerland, Heimweiden, Maiensässe, Heualpen, Bergwiesen, Alp- und Jura- weiden.
U5 N₂-Verbrauch durch Verkehr, Atmosphäre ⇒ Produkteherstellung/Produktenutzung Feuerungen, Prozesse	
Charakterisierung	Verbrennung von Luftstickstoff (N ₂) durch Verkehr, Feuerungen und weitere Prozesse U5 ₁ : Verbrennung von Luftstickstoff durch Verkehr U5 ₂ : Verbrennung von Luftstickstoff durch Feuerungen U5 ₃ : Verbrennung von Luftstickstoff durch weitere Prozesse
Datenquellen	Berechnung (Autoren)
Wert 2005	U5 (N _{nr}) Luftstickstoff = U5 Gesamtfluss 18.8 kt N U5 ₁ : 14.1 kt N U5 ₂ : 4.2 kt N U5 ₃ : 0.5 kt N
	Vergleichswert 2005: 25 kt N (BAFU 2010), mit U5 ₁ : 18.2 kt N U5 ₂ : 6.7 kt N U5 ₃ : 0.5 kt N
Datenqualität	15-23 kt N Unsicherheit: 20% (Schätzwert)
Bemerkungen	Berechnung anhand anderer Flüsse: U5 ₁ = Fluss P2 – Fluss I6 U5 ₂ = Fluss P3–Fluss I7- Fluss L11 U5 ₃ = Annahme.
U6 N-Fixierung Atmosphäre ⇒ übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Stickstofffixierung durch Pflanzen der übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre
Datenquellen	Fluss unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010); Wert 2005 unbekannt
Wert 2018	unbekannt
U7 Deposition auf übrige Böden Atmosphäre ⇒ übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Atmosphärische Deposition von Stickstoffverbindungen (NO _x , NH _y) auf übrige Böden
Datenquellen	Meteotest 2021
Wert 2018	U7 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U7 Gesamtfluss: 9.4 kt N

	Vergleichswerte BAFU 2010: 11.3 kt N
Datenqualität	7-11 kt N Unsicherheiten: ca. 30%
Bemerkungen	Depositionsdaten gemäss Meteotest 2021; anteilmässig auf übrige Böden umgerechnet. Unter übrige Böden werden die folgenden Kategorien der Arealstatistik zusammengefasst: Unproduktive Vegetation, Vegetationslose Flächen, Gebäudeflächen, Gebäudeumschwung, Industriegebäude, Industrieumschwung, Besondere Siedlungsflächen, Erholungs- und Grünanlagen, Strassenareal, Bahnareal, Flugplatzareal
U8 N-Fixierung	Atmosphäre ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Fixierung von Luftstickstoff durch Pflanzen der Hydrosphäre
Datenquellen	Fluss unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010); Wert 2005 unbekannt
Wert 2018	unbekannt
U9 Deposition auf Wasser	Atmosphäre ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Atmosphärische Deposition von Stickstoffverbindungen (NO _x , NH _y) auf Gewässer
Datenquellen	Meteotest 2021
Wert 2018	U9 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U9 Gesamtfluss: 2.4 kt N
	Vergleichswerte: BAFU 2010: 2.8 kt N
Datenqualität	1.7-3.1 kt N Unsicherheiten: ca. 30%
Bemerkungen	Depositionsdaten gemäss Meteotest 2021; anteilmässig auf Wasserflächen umgerechnet. Unter den Wasserflächen werden die folgenden Kategorien der Arealstatistik zusammengefasst: Stehende Gewässer, Fließgewässer.
U10 Verfrachtung via Luft ins Ausland (Export)	Atmosphäre ⇒ Ausland
Charakterisierung	Atmosphärische Verfrachtung von reaktiven Stickstoffverbindungen (NO _x , NH _y) ins Ausland
Datenquellen	EMEP 2017, 2018, 2019 (BAFU 2021b)
Wert 2018	U10 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen: Export von NO _x -N aus der Schweiz: 14.0 kt N Export von NH _y -N aus der Schweiz: 21.1 kt N U10 Gesamtfluss: 35.1 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: Export von NO _x -N aus der Schweiz: 24.4 ktN BAFU 2010: Export von NH _y -N aus der Schweiz: 31.4 ktN BAFU 2010: Total Export: 55,8 kt N (Summe NO _x -N und NH _y -N)
Datenqualität	32-39 kt N Unsicherheiten: ca. 10%
Bemerkungen	Mittelwerte EMEP 2017–2019 (EMEP 2021). Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung des EMEP-Modells ändern die N-Exportflüsse gegenüber der

	Stoffflussanalyse für 2005 (BAFU 2010) deutlich. Die Reduktion der Stickstoffexporte über die Atmosphäre ist somit nicht nur auf eine Reduktion der Emissionen zurückzuführen, sondern auch durch die Modelländerung bedingt.
U11 Emissionen N₂O, N₂ übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Emissionen von Stickstoffverbindungen (Denitrifikation) aus übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre.
Datenquellen	Fluss unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010); Rohdaten: BAFU 1996
Wert 2018	U11 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen: 0.36 kt N N ₂ O Emissionen: 0.13 kt N NH ₃ Emissionen 0.01 kt N NO _x Emissionen 0.21 kt N U11 (N _{nr}) Luftstickstoff: N ₂ Emissionen: 1.3 kt N U11 Gesamtfluss: 1.7 kt N Vergleichswert: N ₂ O und NO Emissionen von Grasfläche (grassland) in der Schweiz, 2010: 0.22±0.03 kt N ₂ O-N + 0.03±0.03 kt NO-N (Bühlmann et al. 2014)
Datenqualität	U11 (N _r): < 1 kt N; Unsicherheit: 80% (Schätzwert) U11 (N _{nr}): < 2 ktN; Unsicherheit: 80% (Schätzwert) U11 Gesamtfluss: < 3 kt N 80% (Schätzwert)
Bemerkungen	Da es sich um einen nicht relevanten, kleinen Fluss handelt, wurde dieser unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010).
U12 Auswaschung / Abschwemmung übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Diffuse Nitrat-Einträge in Gewässer aus übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre durch Auswaschung, Abschwemmung, Erosion und Drainage.
Datenquellen	MODIFFUS 3.0 (Agroscope 2015)
Wert 2018	9.5 kt N Vergleichswert: 2005: 11.0 kt N (BAFU 2020)
Datenqualität	4-15 kt N Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	MODIFFUS rechnet mit langjährigen Durchschnittswerten. Der Berechnungszeitraum von MODIFFUS bezieht sich auf den Zeitraum um 2010. Tab. 21 in Agroscope (2015) mit den Gesamt-Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer der Schweiz pro Landnutzungskategorie. Den übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre wurden die Kategorien Siedlungsgrün, Geröll, Sand, Fels, unproduktive Vegetation, Gletscher, Strassen ausserorts, Gartenbau, Strassen innerorts und Strassen überbaut zugeordnet.
U13 Denitrifikation N₂O, N₂ Hydrosphäre ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Stickstoffemissionen (N ₂ O, N ₂ , NO _x) durch Denitrifikation aus öffentlichen Gewässern.

Datenquellen	Berechnung basierend auf Schweizer Gewässerflächen gemäss Arealstatistik und N-Sedimentationsrate für Schweizer Seen aus Müller et al. 2021b.
Wert 2018	U13 Gesamtfluss: 17.6 kt N Schätzung für U13 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen: 1.6 kt N Schätzung für U13 (N _{nr}) Luftstickstoff: 16 kt N Vergleichswert 2005: 12 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	U13 Gesamtfluss: 9-26 kt N; Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	Zum Anteil N ₂ O bei der Denitrifikation gibt es keine repräsentativen Daten.
U14 Abfluss via Flüsse	Hydrosphäre ⇒ Ausland
Charakterisierung	Abfluss an Stickstoff mit den Flüssen Rhein, Rhône, Ticino, Inn, und weiteren Grenzflüssen, die aus der Schweiz fliessen
Datenquellen	NADUF 2021, Mittelwerte der verfügbaren Messwerte von Rhein Weil, Rhône und Ticino von 2008-2018. Hochrechnung der anderen Grenzflüsse.
Wert 2018	U14 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U14 Gesamtfluss: 60.6 kt N Vergleichswerte: 2005: 72.7 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	55 - 67 kt N Unsicherheiten: ca. 10%
Bemerkungen	Mittelwerte NADUF 2009–2018 für Rhein, Rhône und Ticino, wobei für den Ticino nur für die Jahre 2013-2015 Messdaten verfügbar sind (NADUF 2021). Für die weiteren grenzüberschreitenden Fliessgewässer (z.B. den Inn), sind keine neueren Messdaten verfügbar. Die gesamte exportierte Stickstofffracht wurde daher hochgerechnet unter der Annahme, dass der Anteil der restlichen Fliessgewässer an der gesamten Stickstofffracht gleich hoch ist, wie im Jahr 2005. Zu beachten: Die Zeitreihe der N-Frachten zeigt eine grosse Variabilität, die mehrheitlich durch den Abfluss geprägt ist und nichts mit den Unsicherheiten zu tun hat. Aus diesem Grund ist für das Jahr 2018 der Mittelwert 2009-2018 angegeben.
U16 Export via Grundwasser	Hydrosphäre ⇒ Ausland
Charakterisierung	Entlang der Schweizer Grenze fliesst Grundwasser unterirdisch aus der Schweiz ins Ausland und exportiert damit auch gelösten Stickstoff hauptsächlich als Nitrat.
Datenquellen	Fluss unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010); Rohdaten: Experteninterviews (Willmann 2010, Stössel 2010)
Wert 2005	U16 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U16 Gesamtfluss: < 1 kt N
Datenqualität	Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	Da es sich um einen nicht relevanten, kleinen Fluss handelt, wurde dieser unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010).

A1.4. Stickstoffflüsse Abfallwirtschaft

A1 Emissionen	KVA / SAVA ⇒ Atmosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus KVA/SAVA in die Atmosphäre
Datenquellen	EMIS 2021 (Mittelwert 2017-2018)
Wert 2018	<p>A1 (N_r) ökologisch relevante N-Verbindungen: NO_x-N: 0.52 kt NH_y-N: 0.02 kt N₂O-N: 0.04 kt N Summe: 0.6 kt N</p> <p>A1 (N_{nr}) Luftstickstoff: 5.2 kt N</p> <p>A1 Gesamtfluss 5.8 kt N</p> <p>Vergleichswerte: BAFU 2010: 6.4 kt N</p>
Datenqualität	0.9-11 kt N Unsicherheiten: ca. 85%
Bemerkungen	Mittelwert 2017-2018 (EMIS 2021).
A2 Verbrennungsrückstände	KVA / SAVA ⇒ Deponie (Abfallwirtschaft)
Charakterisierung	Stickstofffracht in Verbrennungsrückständen aus KVA/SAVA, die in Deponien gelagert werden (Schlacke, Filterkuchen etc.).
Datenquellen	Fluss unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010); dieser basierte auf einer Schätzung der Autoren.
Wert 2018	A2 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A2 Gesamtfluss: < 1 kt N , Fluss vernachlässigbar klein
Datenqualität	Unsicherheiten: ca. 100% (Schätzwert) 0-1 ktN
Bemerkungen	Da es sich um einen nicht relevanten, kleinen Fluss handelt, wurde dieser unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010).
A3 Emissionen	ARA ⇒ Atmosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Emissionen (NO _x , N ₂ O, NH ₃ , N ₂) aus Abwasserreinigungsanlagen durch Nitrifikation, Denitrifikation und Verbrennung von Klärgas.
Datenquellen	Swiss Academics 2020, EMIS 2021, EAWAG/HAFI 2021 ⁵⁶
Wert 2018	<p>A3 (N_r) ökologisch relevante N-Verbindungen: 1.3 kt N A3 (N_{nr}) Luftstickstoff: 18.5 kt N</p> <p>A2 Gesamtfluss: 19.8 kt N</p> <p>Vergleichswerte:</p>

⁵⁶ Die Stickstoffemissionen der Abwasserreinigungsanlagen in Form von Lachgas wurden nicht aus dem aktuellen Treibhausgasinventar der Schweiz übernommen, sondern aus einer Studie der EAWAG und der HAFI (EAWAG/HAFI 2021), welche aktuellere Daten umfasst, die in Zukunft auch in das Treibhausgasinventar der Schweiz übernommen werden sollen (voraussichtlich ab Submission 2023).

	12.5 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	Unsicherheiten: ca. 50% (Schätzwert) 10-30 ktN
Bemerkungen	Gemäss Rücksprache mit Damien Dominguez (BAFU) gibt es eine N-Elimination von 50% in Kläranlagen, also 20 kt N gehen in die Luft. Die N-Elimination lag schon 2005 bei ca. 47% (Annahme von 39% war zu tief).
A4 Klärschlamm in KVA	ARA ⇒ KVA (Abfallwirtschaft)
Charakterisierung	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus KVA/SAVA in die Atmosphäre
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2014 (ZHAW 2018), EAWAG 2002
Wert 2018	A4 (N _i) ökologisch relevante N-Verbindungen = A4 Gesamtfluss: 2.4 kt N
	Vergleichswerte BAFU 2010: 1.3 kt N
Datenqualität	1-4 kt N Unsicherheiten: ca. 50%
Bemerkungen	Klärschlamm in KVA: 55'448 t TS im Jahr 2014 (ZHAW 2018) N-Gehalt 4.4% (EAWAG 2002)
A5 gereinigtes Abwasser	ARA ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Stickstofffrachten (NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻) im gereinigten Abwasser aus Kläranlagen in öffentliche Gewässer.
Datenquellen	Swiss Academics 2020
Wert 2018	A5 (N _i) ökologisch relevante N-Verbindungen = A5 Gesamtfluss: 20 kt N
	Vergleichswert: 2005: 26 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	10-30 kt N Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	Gemäss Rücksprache mit Damien Dominguez (BAFU) gibt es eine N-Elimination von 50% in Kläranlagen, also 20 kt N gehen in die Luft. Es bleiben ca. 20 kt N im gereinigten Abwasser (Fluss A5); bisheriger Wert von 26 kt N war zu hoch. Die N-Elimination lag schon 2005 bei ca. 47% (Annahme von 39% war zu tief).
A6 Klärschlamm in HT-Verbrennung	ARA ⇒ Produkteherstellung und übrige Nutzungen (Produkteherstellung/Produktenutzung)
Charakterisierung	Stickstofffracht in (ausgefautem und rohem) Klärschlamm aus der ARA, welcher industriell verbrannt wird in Zementwerken.
Datenquellen	EMIS 2021 (Mittelwert 2017-2019)
Wert 2018	A4 (N _i) ökologisch relevante N-Verbindungen = A4 Gesamtfluss: 2.4 kt N
	Vergleichswerte 2005: 2.2 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	1-7 kt N Unsicherheiten: ca. 70%
Bemerkungen	Klärschlammverbrennung: 100'109 t Mittelwert 2017-2019 (EMIS 2021) N-Gehalt 4.4% (EAWAG 2002)

A7 Klärschlamm für Düngung		ARA ⇒ Landwirtschaftsböden (Land- und Forstwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht im Klärschlamm, der zur Düngung in der Landwirtschaft eingesetzt wird.		
Datenquellen	BAFU 2019a (Klärschlammverbot)		
Wert 2018	A4 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A4 Gesamtfluss: 0 kt N		
	Vergleichswerte 1 kt N (BAFU 2010)		
Datenqualität	–		
Bemerkungen	Seit 1. Oktober 2006 ist es in der Schweiz verboten, Klärschlamm als Dünger in der Landwirtschaft auszubringen (BAFU 2019a). Es gab eine Übergangsbestimmung für ausgewählte Flächen, die definitiv am 30. September 2006 auslief (BAFU 2010).		
A8 Emissionen		Kompostierung ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Emissionen (N ₂ O, NH ₃) aus der Kompostierung		
Datenquellen	EMIS 2021 (Mittelwert 2017-2019)		
Wert 2018	A8 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen: N ₂ O-N = 0.02 kt N NH ₃ -N = 0.25 kt N Summe = 0.27 kt N		
	A8 (N _{tot}) Luftstickstoff: 0.2 kt N		
	A8 Gesamtfluss: 0.4 kt N		
	Vergleichswerte: 2005: 0.7 kt N (BAFU 2010)		
Datenqualität	0.1 – 0.8 kt N Unsicherheit = 80% (Schätzwert)		
Bemerkungen			
A9 Kompost		Recyclingdünger ⇒ Landwirtschaftsböden (Land- und Forstwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht im Kompost/Recycling- und übrige Dünger, der zur Düngung in der Landwirtschaft eingesetzt wird.		
Datenquellen	OSPAR 2021 (Mittelwert 2017-2019)		
Wert 2018	A9 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A9 Gesamtfluss: 2.8 kt N		
	Vergleichswert: 2017: 2.8 kt N (UMWEKO 2019) 2005: 3.2 kt N (BAFU 2010)		
Datenqualität	2.6-2.9 kt N Unsicherheit: 5% (Schätzwert)		
A11 Emissionen		Vergärung ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Emissionen (N ₂ O, NH ₃) aus der Vergärung		
Datenquellen	EMIS 2021 (Mittelwert 2017-2019)		

Wert 2018	<p>A11 (N_r) ökologisch relevante N-Verbindungen: NO_x-N = 0.002 kt N NH₃-N = 0.15 kt N Summe = 0.16 kt N</p> <hr/> <p>A8 (N_{at}) Luftstickstoff: 0 kt N (keine Lachgasemissionen gemäss EMIS 2021)</p> <hr/> <p>A8 Gesamtfluss = 0.16 kt N</p>
Datenqualität	0.08 - 0.23 kt N Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	<p>Gespräch mit J. Fuchs, FiBL: Emissionen sind schwierig messbar, keine systematische Datenerfassung. NH₃ Emissionen machen den grössten Anteil am N-Verlust aus. Je nach Verarbeitung / Vorbehandlung der vergärten Abfälle entsteht mehr oder weniger NH₃ (BAFU 2010).</p> <p>Gespräch mit K. Schleiss: Heisse Abluft von Blockheizkraftwerken wird z.T. in Vergärungsanlagen eingeblasen, was zu hohen NH₃-Verlusten führt (BAFU 2010).</p>
A12 Gärgut für Düngung	Vergärung ⇒ Landwirtschaftsböden (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Stickstofffracht im Gärgut aus der Vergärung, das als Dünger in die Landwirtschaft gelangt.
Datenquellen	Kompostier- und Vergärungsanlagen - Erhebung in der Schweiz und Lichtenstein 2017 (UMWEKO 2019)
Wert 2018	<p>A12 (N_r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A13 Gesamtfluss: 4.6 kt N</p> <hr/> <p>Vergleichswerte -</p>
Datenqualität	3 – 6 kt N Unsicherheit: 30% (Schätzwert)
Bemerkungen	<p>179'393 m³ festes Gärgut aus Vergärung in die Landwirtschaft im Jahr 2017, davon 142'842 m³ aus Gew./Ind-Anlagen und 36'551 m³ aus LW -Anlagen (UMWEKO 2019)</p> <p>390'913 m³ flüssiges Gärgut aus Vergärung in die Landwirtschaft im Jahr 2017, davon 301'293 m³ aus Gew./Ind -Anlagen und 89'620 m³ aus LW-Anlagen (UMWEKO 2019)</p> <p>659'135 m³ Gärgülle aus Vergärung in die Landwirtschaft im Jahr 2017, alles aus LW-Anlagen (UMWEKO 2019)</p> <p>Volumengewicht: festes Gärgut = 0.47 t/m³ (BAFU 2007), flüssiges Gärgut/Gärgülle = 1 t/m³ (UMWEKO 2021)</p> <p>TS-Gehalt: festes Gärgut = 43%, flüssiges Gärgut (aus LW-Anlage) = 4.5%, flüssiges Gärgut (aus Gew/Ind. Anlage) = 14%, Gärgülle = 5% (UMWEKO 2019)</p> <p>N-Gehalt: festes Gärgut = 1.4%, flüssiges Gärgut (aus LW-Anlage) = 8%, flüssiges Gärgut (aus Gew/Ind. Anlage) = 4%, Gärgülle = 6.8% (UMWEKO 2019)</p>
A13 Gärreste	Vergärung ⇒ Kompostierung (Abfallwirtschaft)
Charakterisierung	Stickstofffracht im Gärgut aus der Vergärung, das in die Kompostierung gelangt.

Datenquellen	Kompostier- und Vergärungsanlagen - Erhebung in der Schweiz und Lichtenstein 2017 (UMWEKO 2019)
Wert 2018	A13 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A13 Gesamtfluss: 0.7 kt N
	Vergleichswerte 2005: 0.001 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	0.3 – 1 kt N Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	135'199 m ³ Kompost aus Vergärung in Kompostieranlagen im Jahr 2017 (UMWEKO 2019) Volumengewicht: 0.65 t/m ³ (BAFU 2007) TS-Gehalt: 54% (UMWEKO 2019) N-Gehalt: 1.4% (UMWEKO 2019)
A14 Emissionen	Deponie ⇒ Atmosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Stickstofffracht im Gärgut aus der Vergärung, das in die Kompostierung gelangt.
Datenquellen	EMIS 2021 (Mittelwert 2017-2019)
Wert 2018	A14 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen: NO _x -N = 0.0004 kt N NH ₃ -N = 0.2 kt N A14 Gesamtfluss: 0.2 kt N
	Vergleichswerte 2005: 0.25 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	0.1-0.3 kt N Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
A15 Sickerwasser	Deponie ⇒ ARA (Abfallwirtschaft)
Charakterisierung	Stickstofffracht im Sickerwasser aus Deponien, das in Abwasserreinigungsanlagen gereinigt wird.
Datenquellen	Fluss unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010); Rohdaten: Abfallstatistiken BAFU. Erfahrungswerte aus Messungen von Sickerwasserkonzentrationen Reaktor-/Reststoffdeponien. BAFU, ABRO (Auskunft M. Hügi, A. Laube 2009)
Wert 2018	A15 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A15 Gesamtfluss: 0.02 kt N
Datenqualität	0.00-0.04 kt N Unsicherheit: Median 18.2 mg/L, 25%-Quartil 5.94 mg/L, 75%-Quartil 40.8 mg/L.

Bemerkungen	Da es sich um einen nicht relevanten, kleinen Fluss handelt, wurde dieser unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010). Per 2006 sind in den 50 in Betrieb stehenden Reaktor-/Reststoffdeponien rund 40 Mio. m ³ Abfälle abgelagert. Bei einer Füllhöhe von 15 m entspricht dies einer Deponiefläche von rund 270 ha. Der Grossteil dieser Deponien leitet ihre Deponiesickerwasser in eine ARA. Zwecks "best guess" wird von einer Deponiefläche von 300 ha, einem Sickerwasseranfall von 0.11 l s ⁻¹ ha ⁻¹ (35% des mittleren Jahresniederschlags), und einer totalen N Konzentration von 18.2 mg N/l ausgegangen. Damit ergibt sich ein N-Fluss von rund 63 kg ha ⁻¹ a ⁻¹ respektive 19 t/a (BAFU 2010)
A16 Kompost in Gartenbau	Kompostierung ⇒ Produkteherstellung und übrige Nutzungen (Produkteherstellung/Produktenutzung)
Charakterisierung	Stickstofffracht im Kompost, der zur Düngung im Gartenbau oder bei Privaten eingesetzt wird.
Datenquellen	Kompostier- und Vergärungsanlagen - Erhebung in der Schweiz und Lichtenstein 2017, (UMWEKO 2019)
Wert 2018	A16 (N _i) ökologisch relevante N-Verbindungen = A16 Gesamtfluss: 1.2 kt N
Datenqualität	0.6 – 1.9 kt N Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	237'051 m ³ Kompost aus Kompostieranlagen im Jahr 2017 (UMWEKO 2019) Volumengewicht: 0.65 t/m ³ (BAFU, 2007) TS-Gehalt: 54% (UMWEKO 2019) N-Gehalt: 1.4% (UMWEKO 2019)

A1.5. Stickstoffflüsse aus dem Ausland (Import)

I1 Zufluss via Flüsse	Ausland ⇒ Hydrosphäre
Charakterisierung	Zufluss von Stickstoff mit Flüssen, die in die Schweiz fliessen.
Datenquellen	Schätzung
Wert 2018	I1 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = I1 Gesamtfluss: 12.5 kt N
	Vergleichswerte 2005: 15.0 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	9-16 kt N Unsicherheiten: ca. 30%
Bemerkungen	Wert hergeleitet aus BAFU 1996, da nur punktuell neuere Daten verfügbar sind. Annahme, dass seit 2005 ähnlich starke Abnahme stattgefunden hat, wie bei Fluss U14 (Abfluss via Flüsse). BAFU 1996: Importanteil bei Basel 13 kt N, Importanteil Rhône unterhalb von Genf 3 kt N. Der Importanteil wurde über den prozentualen Anteil der Einwohner im Einzugsgebiet berechnet. Eine detaillierte Übersicht über die verfügbaren Daten und die getroffenen Annahmen ist in Anhang A5 beschrieben.
I2 Import aus Lebensmittelindustrie und übrige Produkte	Ausland ⇒ Produkteherstellung und übrige Nutzungen
Charakterisierung	Stickstofffracht in importierten Lebens- und Genussmitteln und deren Ausgangsprodukte aus dem Ausland in die Schweiz.
Datenquellen	Agristat 2021 (Mittelwert 2017-2019), Agroscope 2020
Wert 2018	I2 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = I2 Gesamtfluss: 32.7 kt N
	Vergleichswerte 2005: 25.4 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	28-38 kt N Unsicherheiten: ca. 15%
Bemerkungen	Siehe Herleitung Güterimport- und -export im Anhang A4. Jährlicher Export landwirtschaftlicher Erzeugnisse (Mittelwert 2017-2019 in Tonnen) aus Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung (Agristat 2021), N-Gehalte aus Agroscope (2020) oder gemäss BAFU 2010.
I3 Futter	Ausland ⇒ Tierhaltung (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Stickstofffracht in Futter-Importen für die Tierhaltung.
Datenquellen	OSPAR 2021 (Mittelwert 2017-2019)
Wert 2018	I3 (N _r) ökologisch relevante N-Verbindungen = I3 Gesamtfluss: 51.2 kt N
	Vergleichswert: 2005: 32 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	48-55 kt N, Unsicherheit ca. 8% (Schätzwert)

I4 Mineraldünger (Import)	Ausland ⇒ Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Stickstofffracht im Mineraldünger aus ausländischer Produktion, der in der Landwirtschaft eingesetzt wird (Anteil Inlandmineraldünger Fluss P1 ist null).
Datenquellen	OSPAR 2021
Wert 2018	I4 (N _i) ökologisch relevante N-Verbindungen = I4 Gesamtfluss: 45.7 kt N
	Vergleichswert: 2005: 51 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	42-49 kt N Unsicherheit ca. 8% (Schätzwert)
Bemerkungen	-
I5 Holz-Import	Ausland ⇒ Produkteherstellung und übrige Nutzungen (Produkteherstellung/Produktenutzung)
Charakterisierung	Stickstofffracht in importiertem Holz.
Datenquellen	ZHAW 2018
Wert 2018	I5 (N _i) ökologisch relevante N-Verbindungen = I5 Gesamtfluss: 1.7 ktN
	Teilflüsse: Import Papier und Holz: 1.5 kt N Import biogene Energieträger: 0.2 kt N
	Vergleichswert: 2005: 2.0 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	1-3 kt N Unsicherheit: 30% (Schätzwert)
Bemerkungen	-
I6 Import Treibstoffe	Ausland ► Verkehr (Produkteherstellung/Produktenutzungen)
Charakterisierung	Stickstofffracht im importierten Treibstoff für den Verkehr.
Datenquellen	Fluss unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010); Rohdaten: BFE 2001, EMPA-Treibstoffzollproben 2000
Wert 2018	I6 (N _i) ökologisch relevante N-Verbindungen = I6 Gesamtfluss: 0.12 kt N
Datenqualität	< 0.2 kt N Unsicherheit: 100% (Schätzwert)
Bemerkungen	Da es sich um einen nicht relevanten, kleinen Fluss handelt, wurde dieser unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010). Endverbrauch Diesel 1.71 Mio. t. N-Gehalt Diesel 0.007% (BAFU 2010). Der Endverbrauch Diesel wird als Proxy für den Import von Treibstoffen verwendet. Erdölprodukte werden im Verhältnis 40% zu 60% als Rohöl und übrige Produkte eingeführt. Das Rohöl wird in den Inlandraffinerien zu Diesel, Benzin, Heizöl raffiniert. Die Trennung in die beiden Flüsse I6 und I7 ist deshalb künstlich.
I7 Import Brennstoffe	Ausland ► Feuerungen (Produkteherstellung/Produktenutzung)

Charakterisierung	Stickstofffracht im importierten Brennstoff für Feuerungen.
Datenquellen	Fluss unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010); Rohdaten: BFE 2001, EMPA-Treibstoffzollproben 2000
Wert 2018	I7 (N _i) ökologisch relevante N-Verbindungen = I7 Gesamtfluss: 0.6 kt N
Datenqualität	< 1 kt N Unsicherheit: 100% (Schätzwert)
Bemerkungen	Da es sich um einen nicht relevanten, kleinen Fluss handelt, wurde dieser unverändert übernommen aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010). Endverbrauch Brennstoffe: 5.05 mio t. N-Gehalt Heizöl EL: 0.012%. Der Endverbrauch Brennstoffe wird als Proxy für den Import von Brennstoffen verwendet. Erdölprodukte werden im Verhältnis 40% zu 60% als Rohöl und übrige Produkte eingeführt. Das Rohöl wird in den Inlandraffinerien zu Diesel, Benzin, Heizöl raffiniert. Die Trennung in die beiden Flüsse I6 und I7 ist deshalb künstlich.

I8 Verfrachtung via Luft aus Aus- Ausland ⇒ Atmosphäre (Umwelt) land (Import)

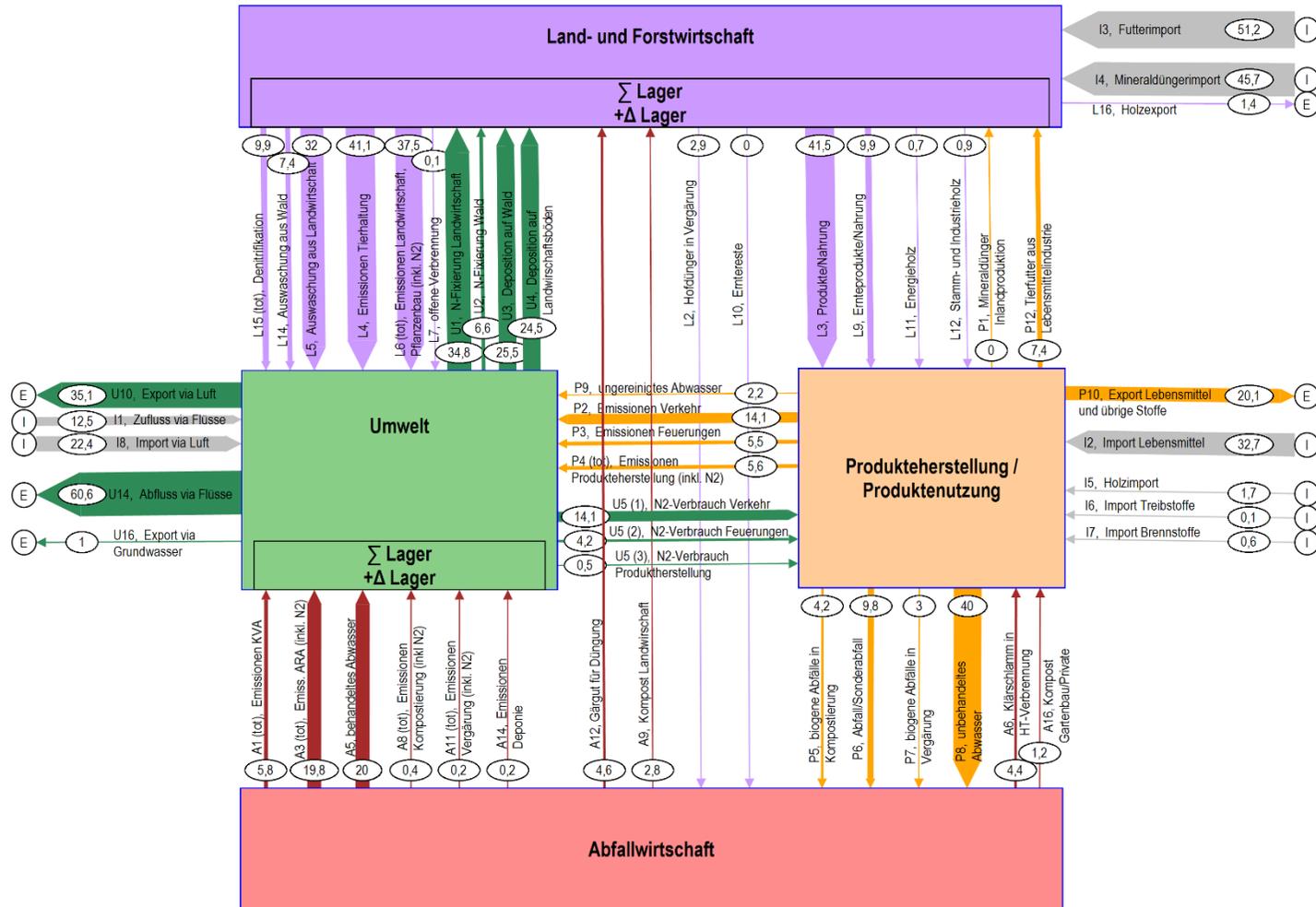
Charakterisierung	Atmosphärische Verfrachtung von reaktiven Stickstoffverbindungen (NO _x , NH _y) aus dem Ausland.
Datenquellen	EMEP 2017, 2018, 2019 (BAFU 2021b)
Wert 2018	I14 (N _i) ökologisch relevante N-Verbindungen: Import von NO _x -N in die Schweiz: 10,4 kt N Import von NH _y -N in die Schweiz: 12,0 kt N I14 Gesamtfluss: 22.4 kt N Vergleichswerte 2005: Import von NO _x -N in die Schweiz: 19 kt N (BAFU 2010) 2005: Import von NH _y -N in die Schweiz: 25 kt N (BAFU 2010) 2005: Total Import: 44 kt N (Summe NO _x -N und NH _y -N) (BAFU 2010)
Datenqualität	20-25 kt N Unsicherheiten: ca. 10%
Bemerkungen	Mittelwerte EMEP 2017–2019 (EMEP 2021). Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung des EMEP-Modells ändern die N-Importflüsse gegenüber der Stoffflussanalyse für 2005 (BAFU 2010) deutlich. Die Reduktion der Stickstoffimporte über die Atmosphäre ist somit nicht nur auf eine Reduktion der Emissionen im Ausland zurückzuführen, sondern auch durch die Modelländerung bedingt.

A1.6. Lagerveränderungen / Stickstoffakkumulationen in Prozessen

L18 Holzzuwachs Wald	Wald → Wald (Land- und Forstwirtschaft)
Charakterisierung	Akkumulation von organisch gebundenem Stickstoff im Wald, die durch den Zuwachs von Holz/Aufforstung zustande kommt.
Datenquellen	Holzzuwachs ermittelt durch Vergleich der Landesforstinventare LFI 4 und LFI 3. Holzdichte gemäss UN 2010 und gemäss Auskunft Sabine Augustin, Abteilung Wald, BAFU, 14.1.2022, N-Gehalte unverändert aus Stoffflussanalyse Stickstoff 2005 (BAFU 2010).
Wert 2018	5.1 kt N
Datenqualität	2.6-7.7 kt N; Unsicherheit: 50% (Schätzwert)
Bemerkungen	Gemäss LFI 4 beläuft sich der Holzvorrat im Schweizer Wald auf 442 Mio. m ³ (381.8 m ³ /ha). Im Mittelland hat er seit dem dritten LFI abgenommen, in den anderen Regionen aber zugenommen.
U17 Zuwachs der Seesedimente	Hydrosphäre ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Akkumulation von organisch gebundenem und mineralisiertem Stickstoff, die durch Zuwachs der Seesedimente zustande kommt (Sedimentation von organischen Partikeln).
Datenquellen	Berechnung mit Gewässerflächen der Arealstatistik (BFS) und N-Sedimentation für CH-Seen aus Müller et al. 2021b.
Wert 2018	4.5 kt N
	Vergleichswert 2005: 13 kt N (BAFU 2010)
Datenqualität	3-6 kt N; Unsicherheit: 30% (Schätzwert)
Bemerkungen	Daten basieren auf breiter Datenbasis von datierten Sedimenten, was eine repräsentative Übersicht über die grossen (meist oligotrophen) Seen gibt. Bisherige Abschätzungen der N-Nettosedimentation beruhen vermutlich stark auf den Analysen von eutrophierten Seen beruhen, was die 'Überschätzung' von einem Faktor 2-3 erklären kann (Experteneinschätzung B. Müller).
U18 Senke in Atmosphäre	Atmosphäre ⇒ Atmosphäre (Umwelt)
Charakterisierung	Stickstoff (insb. Luftstickstoff) verschwindet im riesigen N ₂ -Pool der Atmosphäre verschwinden. Die Differenz der Inputs in die Atmosphäre minus die Outputs aus der Atmosphäre wird daher mit als Senke in der Atmosphäre erfasst.
Datenquellen	Berechnung durch Ausgleichsbilanzierung aller N-Flüsse in die Atmosphäre hinein (Inputs) minus alle N-Flüsse aus der Atmosphäre hinaus (Outputs).
Wert 2018	23.5 kt N
Datenqualität	16 - 31 kt N; Unsicherheit: 30% (Schätzwert)
Bemerkungen	In der Stoffflussanalyse für das Jahr 2005 (BAFU 2010) wurde keine Senke in der Atmosphäre quantifiziert.

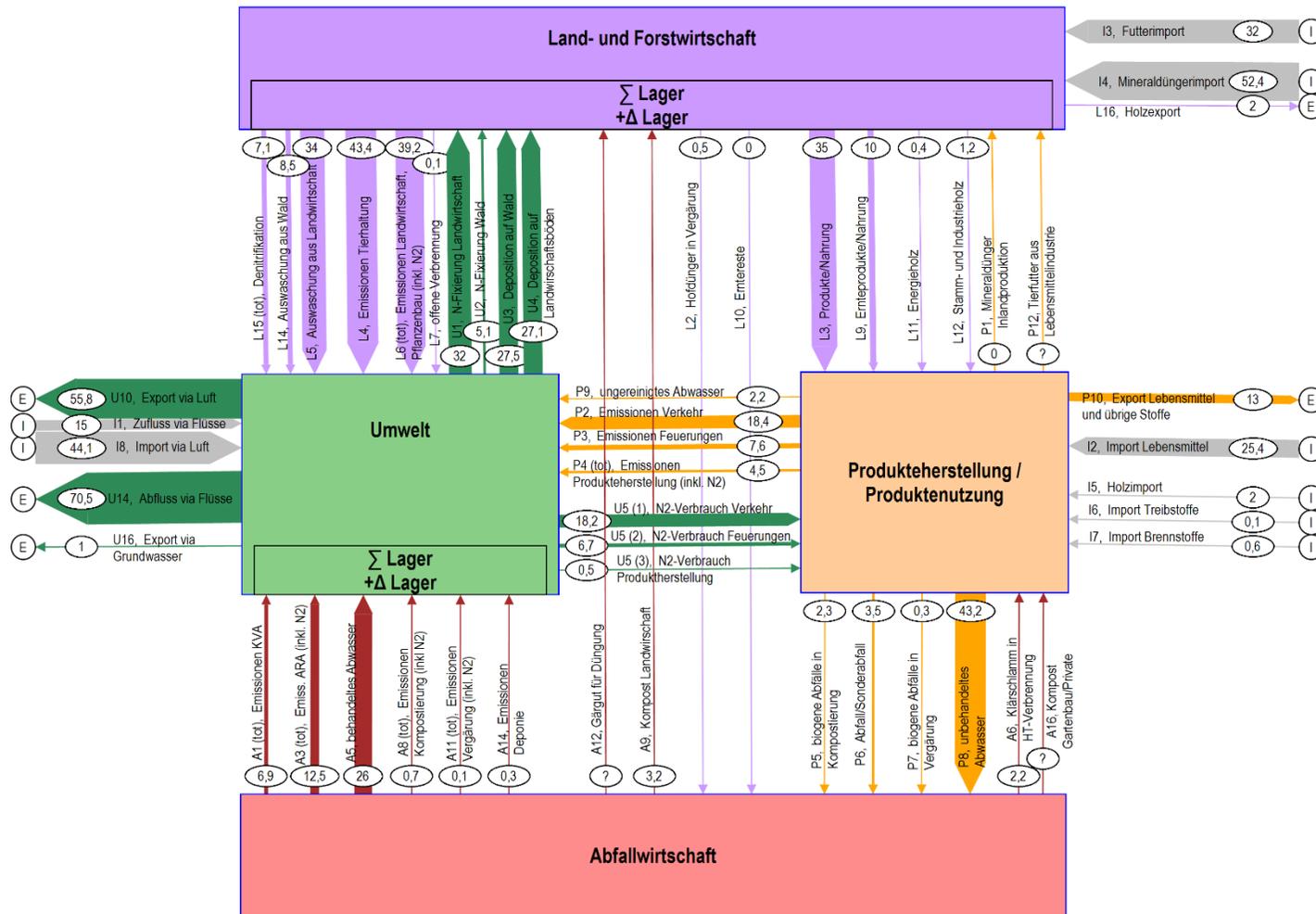
A2. Gesamtsysteme 2018 und 2005

Abbildung 18: Gesamtsystem 2018



Das Gesamtsystem enthält vier Subsysteme, welche jeweils mehrere Prozesse enthalten. Die Pfeile charakterisieren die Stickstoffflüsse, die zwischen den Subsystemen fließen, in 1000 Tonnen N pro Jahr (ktN/a) und beziehen sich auf das Jahr 2018. Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten. Grafik INFRAS.

Abbildung 19: Gesamtsystem 2005



Das Gesamtsystem gemäss der Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2005 (BAFU 2010) enthält vier Subsysteme, welche jeweils mehrere Prozesse enthalten. Die Pfeile charakterisieren die Stickstoffflüsse, die zwischen den Subsystemen fließen, in 1000 Tonnen N pro Jahr (ktN/a). Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten. Grafik INFRAS.

A3. OSPAR-Bilanz

Tabelle 23: Bilanz der Stickstoffflüsse 2005 vs. 2018 der Frost- und Landwirtschaft, Überschüsse und N-Effizienz gemäss der Stickstoffbilanzierung nach OSPAR

Fluss-Code und Name	Stofffluss-analyse N 2005, Tab. 14	2005	2018	Zu-/Ab-nahme	Bemerkungen	
		(Mittelwert 2004-2006)	(Mittelwert 2017-2019)			
		kt N	kt N	kt N	%	
I3 Importierte Futtermittel		32	36	51	42%	
I4 Mineraldünger		52	51	46	-10%	
A9 Recyclingdünger		4	4	3	-29%	
Saatgutimport		27	0.2	0.3	38%	Ist neu in Fluss I2 enthalten, andere Datenquelle.
U1 N-Fixierung		32	36	35	-3%	
Atmosphärische Deposition			16	12	-22%	Andere Datenquelle als in dieser Studie verwendet (Meteotest 2020).
Total Input		147	143	147	3%	
L3 Tierische Produkte		35	38	41	10%	
L9 Pflanzliche Produkte		10	9	10	5%	
Total Output		45	47	51	9%	
Verluste (Input-Output)		102	96	96	0%	
N-Effizienz		31%	33%	35%		

Vergleich der Stickstoffbilanz der Landwirtschaft gemäss der Stickstoffbilanzierung nach OSPAR (OSPAR 2021). Wert aus der Stoffflussanalyse 2005 (BAFU 2010), aktualisierter Wert für 2005 (Mittelwert 2004-2006) gemäss OSPAR (2021) und aktueller Wert der vorliegenden Studie für das Jahr 2018 (Mittelwert 2017-2019) gemäss OSPAR (2021). Die relative Veränderung von 2018 gegenüber dem aktualisierten Wert von 2005 (gemäss OSPAR 2021) wird ausgewiesen. Die Unsicherheit der N-Effizienz basiert auf einer Fehlerrechnung mit den Unsicherheiten der Inputs und Outputs.

Tabelle INFRAS. Quelle: BAFU 2010 und OSPAR 2021

A4. Herleitung Güterimport und -export in/aus der Schweiz

Tabelle 24: Ein- und Ausfuhr landwirtschaftlicher Erzeugnisse Mittelwert 2017-2019 und Herleitung Stickstoff-Import und Export in/aus der Schweiz (Flüsse I2 und P10)

Zolltarif-Nr.	Bezeichnung	Einfuhr (t)	Ausfuhr (t)	N (g/kg)	Quellen N-Gehalt	Einfuhr (kt N)	Ausfuhr (kt N)
01	Total lebende Tiere	5'900	2'259	24.00	ART	0.14	0.05
0201	Fleisch Rind frisch	20'762	11	25.00	Agroscope 2020	0.52	0.00
0202	Fleisch Rind gefroren	1'112	62	25.00	Agroscope 2020	0.03	0.00
0203	Schweinefleisch	3'272	900	26.00	Agroscope 2020	0.09	0.02
0204	Fleisch Schaf, Ziege	6'028	5	21.50	Agroscope 2020	0.13	0.00
0205	Pferdefleisch	2'591	0	25.00	Rind, Agroscope 2020	0.06	0.00
0206	Schlachtnebenprodukte	5'132	18'642	25.00	Rind, Agroscope 2020	0.13	0.47
0207	Fleisch Geflügel	40'988	1'483	29.00	Agroscope 2020	1.19	0.04
0208	anderes Fleisch	4'145	34	25.00	Rind, Agroscope 2020	0.10	0.00
0209	Schweinespeck	23	362	26.00	Agroscope 2020	0.00	0.01
0210	gesalzenes, getrocknetes Fleisch	3'611	2'101	25.00	Rind, Agroscope 2020	0.09	0.05
02	Total Fleisch	87'664	23'601			2.34	0.60
03	Total Fisch, Krebs- und Weichtiere	46'245	266	28.00	NWDB (18 % EW)	1.29	0.01
0401	Milch, Rahm	25'805	5'021	5.50	Agroscope 2020	0.14	0.03
0402	Milch, Rahm eingedickt	2'512	11'417	10.00	NWDB, Kondensmilch	0.03	0.11
0403	Joghurt etc.	9'805	5'606	6.00	NWDB, Joghurt	0.06	0.03
0404	Molke, auch eingedickt	8'631	56'861	20.19	Agroscope 2020	0.17	1.15
0405	Butter	261	1'075	0.00	Agroscope 2020	0.00	0.00
0406	Käse	-	66'593	48.00	NWDB, Hartkäse	0.00	3.20
0406	Käse	64'765	-	36.00	NWDB, Weichkäse	2.33	0.00
407	Eier in der Schale	28'372	68	18.00	Agroscope 2020	0.51	0.00
408	Eier ohne Schale, Eigelb	7'945	215	18.00	Agroscope 2020	0.14	0.00
0409/10	Honig und Produkte tierischen Ursprungs	8'234	602	0.60	NWDB	0.00	0.00
04	Total Milch etc.	153'945	149'843			3.39	4.53
0504	Därme, Blasen, Magen	2'956	5'083	25.00	Rind, Agroscope 2020	0.07	0.13

Zolltarif-Nr.	Bezeichnung	Einfuhr (t)	Ausfuhr (t)	N (g/kg)	Quellen N-Gehalt	Einfuhr (kt N)	Ausfuhr (kt N)
0506	Knochen, Knochenmehl und -abfall	226	54'892	72.00	e feed Fleischknochenmehl	0.02	3.95
0511	andere tierischen Ursprungs (Futter, Abfall)	33'378	56'820	35.00	Analyse, Berechnung	1.17	1.99
05	andere Waren tierischen Ursprungs	36'560	116'795			1.26	6.07
06	Total Pflanzen und Pflanzenteile	198'602	3'407	2.56	ART Gemüse	0.51	0.01
0701	Kartoffeln	32'847	8'357	3.31	Agroscope 2020	0.11	0.03
0702	Tomaten	37'031	64	1.60	NWDB	0.06	0.00
0703	Zwiebeln, Knoblauch, Lauch	11'473	54	2.56	Gemüse, Agroscope 2020	0.03	0.00
0704	Kohlarten	25'573	18	3.50	NWDB	0.09	0.00
0705	Salate	33'941	76	1.90	NWDB, Kopfsalat	0.06	0.00
0706	Karotten und andere geniessbare Wurzeln	4'678	205	2.56	Gemüse, Agroscope 2020	0.01	0.00
0707	Gurken und Cornichons	18'215	5	2.56	Gemüse, Agroscope 2020	0.05	0.00
0708	Hülsenfrüchte frisch	4'103	8	4.80	NWDB	0.02	0.00
0709	Andere Gemüse	89'804	79	2.56	Gemüse, Agroscope 2020	0.23	0.00
710/11	Gemüse gefroren, vorkonserviert	12'275	321	2.56	Gemüse, Agroscope 2020	0.03	0.00
0712	Gemüse getrocknet	3'410	140	34.90	ART	0.12	0.00
0713	Hülsenfrüchte getrocknet	19'109	156	36.00	NWDB; Linsen, Bohnen	0.69	0.01
0714	Wurzeln von Maniok, Süsskartoffeln	4'756	26	2.56	Gemüse, Agroscope 2020	0.01	0.00
07	Gemüse	297'216	9'509			1.51	0.04
0803	Bananen	95'684	34	1.60	NWDB, 1 % Eiweiss	0.15	0.00
0804	Datteln, Feigen, Ananas usw.	56'495	288	0.61	Obst/Früchte, Agroscope 2020	0.03	0.00
0805	Zitrusfrüchte	144'501	304	1.30	NWDB, 0.8 % Eiweiss	0.19	0.00
0806	Weintrauben	35'784	219	1.12	Agroscope 2020	0.04	0.00
0807	Melonen und Papayas	58'886	112	0.61	Obst/Früchte, Agroscope 2020	0.04	0.00
0808	Äpfel, Birnen, Quitten	25'186	3'575	0.61	Obst/Früchte, Agroscope 2020	0.02	0.00

Zolltarif-Nr.	Bezeichnung	Einfuhr (t)	Ausfuhr (t)	N (g/kg)	Quellen N-Gehalt	Einfuhr (kt N)	Ausfuhr (kt N)
0809	Kern- und Steinobst	49'819	157	1.00	NWDB, 0,6% Eiweiss	0.05	0.00
0810	Beeren	46'307	115	0.61	Obst/Früchte, Agroscope 2020	0.03	0.00
811/12/13	Früchte gefroren, vorkonserviert, getrocknet	26'405	683	0.61	Obst/Früchte, Agroscope 2020	0.02	0.00
8014	Schalen von Zitrusfrüchten	353	25	0.61	Obst/Früchte, Agroscope 2020	0.00	0.00
0801/2	Schalenfrüchte	32'636	1'156	32.00	NWDB	1.04	0.04
08	Früchte	572'055	6'669			1.61	0.04
09	Total Kaffee, Tee, Gewürze	193'455	83'214	18.00	NWDB, Kaffee	3.48	1.50
1001	Weizen	451'128	345	18.43	Agroscope 2020	8.31	0.01
1002	Roggen	2'247	1	15.72	Agroscope 2020	0.04	0.00
1003	Gerste	51'245	469	16.60	Agroscope 2020	0.85	0.01
1004	Hafer	52'384	16	16.03	Agroscope 2020	0.84	0.00
1005	Mais	142'477	768	13.20	Agroscope 2020	1.88	0.01
1006	Reis	118'084	3'324	12.80	Agroscope 2020	1.51	0.04
1007/8	anderes Getreide, Hirse	4'037	88	17.05	Agroscope 2020	0.07	0.00
10	Total Getreide	821'603	5'012			13.50	0.07
1101	Mehl von Weizen	10'851	7'541	24.87	Agroscope 2020	0.27	0.19
1102	Mehl von anderen Getreiden	1'626	119	26.70	ART	0.04	0.00
1104	Getreide, anders bearbeitet	12'520	580	20.00	ART	0.25	0.01
1107	Malz	72'763	32	17.60	Brauereien: 10-12 % EW	1.28	0.00
1108	Stärke, Inulin	27'745	345	0.48	NWDB	0.01	0.00
1109	Kleber von Weizen	4'178	23	128.00	NWDB	0.53	0.00
1103/5/6	Weitere Müllereiprodukte (Grütze, Griess, Kartoffelmehl)	4'743	3'230	20.00	NWDB	0.09	0.06
11	Total Müllereierzeugnisse	134'426	11'870			2.49	0.27
1201	Sojabohnen	13'554	182	56.99	Agroscope 2020	0.77	0.01
1202	Erdnüsse	3'389	4	33.28	Agroscope 2020	0.11	0.00
1204	Lein	8'664	31	32.95	Agroscope 2020	0.29	0.00
1205	Rapssamen	6'430	8	32.28	Agroscope 2020	0.21	0.00

Zolltarif-Nr.	Bezeichnung	Einfuhr (t)	Ausfuhr (t)	N (g/kg)	Quellen N-Gehalt	Einfuhr (kt N)	Ausfuhr (kt N)
1206	Sonnenblumen	6'962	28	27.06	Agroscope 2020	0.19	0.00
1207	andere Ölsamen und Ölsaaten	5'157	601	39.00	Sesam (Senf)	0.20	0.02
1208	Mehle	241	3	17.00	Roggen	0.00	0.00
1209	Sämereien	9'855	1'582	24.00	Annahme	0.24	0.04
1210/11	für Pharma etc./Hop- fen	5'843	395	24.00	Annahme	0.14	0.01
1212	andere	175'115	301	11.00	Zuckerrüben getr./ Johannisbrot	1.93	0.00
1213	Stroh	331'660	376	4.93	Agroscope 2020	1.64	0.00
1214	Heu	226'737	154	16.61	Agroscope 2020	3.77	0.00
12	Total Samen, Stroh, Futter	797'020	3'716			9.48	0.09
1601-3	Würste, Fleischkon- serven	14'081	1'741	32.00	NWDB	0.45	0.06
1604	Fischzubereitung und Kaviar	21'047	53	36.80	NWDB Thonkons. etc.	0.77	0.00
1605	Konserven v. Krebs und Weichtieren	5'307	27	32.00	NWDB Shrimps	0.17	0.00
16	Total Fisch- und Fleischkonserven	40'435	1'820			1.39	0.06
2002	Tomatenzubereitun- gen	45'325	939	4.00	NWDB Tomaten- prod. 2.5 %	0.18	0.00
2009	Säfte	72'190	8'018	0.50	NWDB Apfelsaft: 0.3 % EW	0.04	0.00
2001/03-08	übrige	108'616	11'346	2.00	NWDB	0.22	0.02
20	Total Gemüse-, und Fruchtzubereitung	226'131	20'303			0.43	0.03
2301	Fisch- u. Fleischmehl	3'641	11'614	106.76	Agroscope, 2020	0.39	1.24
2302	Kleie	11'715	274	25.00	ART	0.29	0.01
2303	Zucker- und Stärke- fabrikation	113'226	4'514	99.00	Maiskleber 60 efeed	11.21	0.45
2304	Gewinnung von So- jaöl	265'745	903	72.46	Agroscope, 2020	19.26	0.07
2306	Raps- und andere Schrote	77'618	122	53.94	Agroscope, 2020	4.19	0.01
2308	Tierfutter aus ande- ren Pflanzen	28'199	909	11.70	Maiskolbenschrot efeed	0.33	0.01
2309	Zubereitete Tierfutter	134'958	104'315	40.00	Futtermittelbran- che	5.40	4.17
23	Total Futter	635'185	122'654			41.06	5.95

Zolltarif-Nr.	Bezeichnung	Einfuhr (t)	Ausfuhr (t)	N (g/kg)	Quellen N-Gehalt	Einfuhr (kt N)	Ausfuhr (kt N)
41	Total rohe Häute und Felle	827	15'851	52.00	Analyse	0.04	0.82
Total Import / Export (kt N)						84	20
Futtermittelimporte 2018 (Fluss I3)						51	
Import (kt N) ohne Futtermittelimporte (Fluss I2)						33	
Export (kt N) (Fluss P10)							20

Herleitung Stickstoff-Import und -Export anhand der Ein- und Ausfuhr landwirtschaftlicher Erzeugnisse gemäss Agristat 2021 (Mittelwert 2017-2018).

Tabelle INFRAS. Quelle: Ein- und Ausfuhr gemäss Agristat 2021 basierend auf Daten der Eidgenössischen Zollverwaltung, N-Gehalt gemäss Agroscope 2020, weitere Quellenangaben zu N-Gehalt (ART, e feed, NWDB) siehe BAFU 2010

A5. Stickstoffimport in die Schweiz über Fliessgewässer (I1)

Für die Stickstoffimporte in die Schweiz über die grenzüberschreitenden Fliessgewässer sind nur punktuell Daten verfügbar, beispielsweise für die Einträge aus Deutschland in den Rhein unterhalb der Seen (Agroscope 2015) oder für die Einträge in den Lac Léman und die Rhone (Klein A. 2014). Es sind jedoch keine aktuelleren Daten für die Einträge aus Deutschland und Österreich in den Bodensee und den Alpenrhein verfügbar. Daher wurde die Stickstofffracht analog zur letzten Stoffflussanalyse (BAFU 2010) abgeschätzt über die Annahme das prozentuale Reduktion Importflüsse (I1) gleich hoch ist, wie bei den Exportflüssen (U14). Die Plausibilisierung mit den aus Agroscope 2015 und Klein A. 2014 zeigt bezüglich der Grössenordnung der Stickstoffeinträge eine gute Übereinstimmung. Aufgrund der schlechten Datenlage ist von einer hohen Unsicherheit auszugehen (Annahme 30%). Eine Übersicht über die getroffenen Annahmen zur Abschätzung der Stickstoffimporte über die Fliessgewässer und die Daten aus den früheren Studien sind in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Stickstoffimporte über Fliessgewässer. Vergleich der Stoffflussanalysen Stickstoff der Schweiz

	1993 (GSK 1993)		2002 (BAFU 1996)		2005 (BAFU 2010)		2018 (diese Studie)	
	kt N	Quelle	kt N	Quelle	kt N	Quelle	kt N	Quelle
1. Rhein und Bodensee	19	berechnet	16	Abschätzung über den prozentualen Anteil der Einwohner im Einzugsgebiet (Bsp. Rhein: 80% CH, 20% DE)	-	-	-	-
1.a Eintrag aus DE in den Rhein unterhalb der Seen	6	Braun et al. 1991, Tab 2 S. 8	-	-	-	-	2.8	Agroscope 2015, Tab 24
1.b. Eintrag aus DE und Österreich in den Bodensee und den Alpenrhein	13	Wagner G. und Bühler H. 1989: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bodensee-Obersee 9 kt N ▪ Radolfzeller Aach in den Zellersee 1 kt N ▪ Eintrag in Bodensee 1 kt N ▪ Eintrag Ill in Alpenrhein 2 kt N 	-	-	-	-	-	-
2. Eintrag aus Frankreich in Lac Léman und Rhône	2	Orand A. und Colon M 1991: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Eintrag Arve in Rhône bei Genf 1.5kt N, ▪ Eintrag Dranse in den Lac Léman 0.5 kt N 	3	Abschätzung über den prozentualen Anteil der Einwohner im Einzugsgebiet	-	-	3.0	Klein A. 2014 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dranse 0.46 kt N ▪ Arve 2.5 kt N
Total (1 + 2)	21		19		15⁵⁷		12.5⁵⁸	
<i>Veränderung</i>			<i>2002 ggü. 1994</i>	<i>-10%</i>	<i>2005 ggü. 2002</i>	<i>-21%</i>	<i>2018 ggü. 2005</i>	<i>-17%</i>

Legende: Entwicklung der Stickstoffeinträge in die Schweiz über Fliessgewässer gemäss früheren Stoffflussanalysen. Die Tabelle zeigt die verfügbaren Daten und die in den getroffenen Annahmen zur Abschätzung der zeitlichen Entwicklung. -: keine Daten

⁵⁷ Abschätzung über Annahme das prozentuale Reduktion Importflüsse gleich hoch ist, wie bei den Exportflüssen.

⁵⁸ Abschätzung über Annahme das prozentuale Reduktion Importflüsse gleich hoch ist, wie bei den Exportflüssen. Da nur für einzelne Importflüsse Daten verfügbar sind, wurden diese nur zur Plausibilisierung verwendet.

Glossar

ART	Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (heute BAFU)
ChemRRV	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung
DGVE	Dünergrossvieheinheit
DZV	Direktzahlungsverordnung
EU	Europäische Union
FS	Feuchtsubstanz
GSchG	Gewässerschutzgesetz
GSchV	Gewässerschutzverordnung
HT-Verbrennung	Hochtemperaturverbrennung
kt	Kilotonne = 1000 t
LRV	Luftreinhalteverordnung
LwG	Landwirtschaftsgesetz
N	Stickstoff
N ₂	Luftstickstoff
N ₂ O	Lachgas
NADUF	Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fließgewässer
NH ₃ , NH ₄ ⁺ , NH _y	Ammoniak, Ammonium(ion), Summe Ammoniak/Ammonium
NO, NO ₂	Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid,
NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻	Nitrit(ion), Nitrat(ion)
NO _x ,	Stickoxide
SNP	Schlachtnebenprodukten
TBDV	Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen
TS	Trockensubstanz
USG	Umweltschutzgesetz
VHK	Verordnung des EDI über die Höchstgehalte für Kontaminanten (Kontaminantenverordnung)

Literatur

- Agristat 2021:** Statistik der Schweizer Landwirtschaft. Schweizer Bauernverband. Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung (SES). Ein- und Ausfuhr landwirtschaftlicher Erzeugnisse 2017 - 2019. <https://www.sbv-usp.ch/de/services/agristat-statistik-der-schweizer-landwirtschaft/statistische-erhebungen-und-schaetzungen-ses/archiv-statistische-erhebungen-und-schaetzungen/>
- Agristat 2021b:** Statistik der Schweizer Landwirtschaft. Schweizer Bauernverband. Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung (SES). Vieh- und Geflügelbestände in Grossvieheinheiten (GVE) 2000 - 2020. <https://www.sbv-usp.ch/de/services/agristat-statistik-der-schweizer-landwirtschaft/statistische-erhebungen-und-schaetzungen-ses/archiv-statistische-erhebungen-und-schaetzungen/>
- Agroscope 2015:** Hürdler J., Prasuhn V., Spiess E.: Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz MODIFFUS 3.0 : Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Hrsg. Agroscope, Zürich. 2015, 1-117 S. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/umwelt-ressourcen/boden-gewaesser-naehrstoffe/landwirtschaftlicher-gewaesserschutz/modiffus.html>
- Agroscope 2016a:** Prasuhn V., Kupferschmied P., Spiess E., Hürdler J.: Szenario-Berechnungen für das Projekt zur Verminderung diffuser Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS: Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Hrsg. Agroscope, Zürich. 14. April, 2016, 76 S.
- Agroscope 2016b:** Abklärungen zum Umweltziel Landwirtschaft: Reduktion der landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer um 50% gegenüber 1985: Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Hrsg. Agroscope, Zürich. 18. August, 2016, 38 S.
- Agroscope 2017:** Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUD)). <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/umwelt-ressourcen/boden-gewaesser-naehrstoffe/projekte-zur-verbesserung-der-naehrstoffeffizienz/grud.html>
- Agroscope 2020:** Spiess, E. und Liebisch, F.. Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 2018. Agroscope Science, Nr. 100 / 2020. <https://doi.org/10.34776/as100g>
- AWEL 2013:** K. Hächler, J. Angleitner GEO Partner AG, 2013: Standortsspezifische Einleitbedingungen für Sickerwässer aus Deponien. AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Abteilung Abfallwirtschaft und Betriebe, Sektion Abfallwirtschaft, 2013. <https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/abfall->

[rohstoffe/abfallwirtschaft/publikationen/einleitbedingungen_sickerwasser_depotionen_2013.pdf](#)

Aqua & Gas 2013: Stickstoffelimination in Schweizer ARA. Aqua & Gas No.5, 2013.

https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/News/Newsletter/2014/pdf/08_stickstoffelimination.pdf

BAFU 1996: Strategie zur Reduktion von Stickstoffemissionen. Bericht der Projektgruppe Stickstoffhaushalt Schweiz, z. Hd. EDI und EVD. Herausgeber Bundesamt für Umwelt in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landwirtschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 273, Bern.

BAFU 2006: Schluep, M., Thomann, M., Häner, A., Gälli, R., Stucki, G.: Organische Mikroverunreinigungen und Nährstoffhaushalt. Eine Standortbestimmung für die Siedlungswasserwirtschaft. Umwelt-Wissen Nr. 0614. Bundesamt für Umwelt, Bern. 238 S.

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/uw-umwelt-wissen/organische_mikroverunreinigungenundnaehrstoffhaushalt.pdf.download.pdf/organische_mikroverunreinigungenundnaehrstoffhaushalt.pdf

BAFU 2007: Kupper, T. und Fuchs, J.: Kompost und Gärgut in der Schweiz. Studie 1: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut. Studie 2: Auswirkungen von Kompost und Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit. Umwelt-Wissen Nr. 0743. Bundesamt für Umwelt, Bern. 124 S.

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/uw-umwelt-wissen/kompost_und_gaergutinderschweiz.pdf.download.pdf/kompost_und_gaergutinderschweiz.pdf

BAFU 2008: Baum, S. und Baier, U. (ZHAW): Biogenen Güterflüsse der Schweiz 2006. Massen- und Energieflüsse. Umwelt-Wissen Nr. 0831. Bundesamt für Umwelt, Bern: 115 S.

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/uw-umwelt-wissen/biogene_gueterfluesseder-schweiz2006.pdf.download.pdf/biogene_gueterfluesseder-schweiz2006.pdf

BAFU 2010: Heldstab J., Reutimann J., Biedermann R., Leu D. 2010: Stickstoffflüsse in der Schweiz. Stoffflussanalyse für das Jahr 2005. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1018: 128 S.

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/chemikalien/publikationen-studien/publikationen/stickstofffluesse-schweiz.html>

BAFU 2013: Stickstoffflüsse in der Schweiz 2020, Stoffflussanalyse und Entwicklungen, Reihe

Umwelt-Wissen Nr. 1309: 107 S. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/chemikalien/publikationen-studien/publikationen/stickstofffluesse-schweiz-2020.html>

BAFU 2014: Grundlagenpapier zur Stickstoffproblematik Luft, Boden, Wasser, Biodiversität und

Klima, Bundesamt für Umwelt, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien, Sektion Luftqualität. Bern. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/stickstoffproblematik.pdf.download.pdf/stickstoffproblematik.pdf>

- BAFU 2016:** Biogasanlagen in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft Teilrevidierte Ausgabe. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/uv-umwelt-vollzug/biogasanlagen_inderlandwirtschaft.pdf.download.pdf/biogasanlagen_inderlandwirtschaft.pdf
- BAFU 2016b:** Abklärungen zum Umweltziel Landwirtschaft: Reduktion der landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer um 50% gegenüber 1985. V. Prasuhn, August 2016.
- BAFU 2016c:** Mandaliev, P., und Schleiss, K.: Kompostier- und Vergärungsanlagen. Erhebung in der Schweiz und in Liechtenstein. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1602: 32 S. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/uz-umwelt-zustand/kompostier-und-vergaerungsanlagen.pdf.download.pdf/kompostier-und-vergaerungsanlagen.pdf>
- BAFU 2016d:** Achermann B., Meier R., Rihm B., Durch atmosphärische Stickstoff-Deposition induzierte Stickstoff-Auswaschung aus Waldökosystemen in der Schweiz, BAFU und Meteo-test, 2016
- BAFU 2019:** Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1901: 138 S. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/uz-umwelt-zustand/zustandentwicklunggrundwasserschweiz.pdf.download.pdf/UZ-1901-D_NAQUA.pdf
- BAFU 2019a:** Webseite Klärschlamm. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/biogene-abfaelle/abfallarten/klaerschlamm.html> [Seite besucht am 19.1.2022]
- BAFU 2020:** Vom Menschen verursachte Treibhausgasemissionen, Bundesamt für Umwelt. Bern. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/vom_menschen_verursachtetreibhausgase.pdf.download.pdf/Treibhausgase_2020_DE.pdf
- BAFU 2021:** Mündliche Mitteilung Michael Hügi (BAFU). Dezember 2021
- BAFU 2021a:** Treibhausgasinventar der Schweiz 1990–2019, National Inventory Report 2021. Submission April 2021 unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und unter dem Kyoto Protokoll. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- BAFU 2021b:** Switzerland's Informative Inventory Report, Submission unter dem Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution), Submission März 2021, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

- BAFU 2021c:** Webseite Lebensmittelabfälle. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/biogene-abfaelle/abfallarten/lebensmittelabfaelle.html>
[Seite besucht am 19.1.2022]
- BAFU/BLW 2008:** Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. Umwelt-Wissen Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern: 221 S.
- BAFU/BLW 2016:** Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1633: 114 S.
- BFS 2021:** Stickstoffbilanz BFS. Stickstoffbilanz der Landwirtschaft, Bundesamt für Statistik. Tabelle je-d-07.02.05.01. Veröffentlicht am 6.7.2021. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.17884566.html>
- BFS 2021a:** Produktion und finanzielle Aspekte. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/land-forstwirtschaft/landwirtschaft/produktion-finanzielle-aspekte.html>
- BLMP AG WRRL 2007:** Eutrophierung in den deutschen Küstengewässern von Nord- und Ostsee - Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der Belastung durch Eutrophierung gemäß WRRL, OSPAR & HELCOM im Kontext einer Europäischen Wasserpolitik. Arbeitsgruppe der Bund-Länder-Messprogramm Meeresumwelt Nord- und Ostsee.
- BLV 2015:** Medienmitteilung: Erfolg nach 25 Jahren BSE-Bekämpfung. <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-57438.html>
- BLV 2018:** Webseite Tierische Nebenprodukte. <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/tiere/tierseuchen/entsorgung-von-tierischen-nebenprodukten.html>
[Seite besucht am 19.1.2022]
- BLV 2021:** Schweizer Ernährungsbulletin 2021: Verkaufen, kaufen und konsumieren. Eine Synthesestudie zu den Ernährungsunterschieden in den verschiedenen Gross- und Sprachregionen der Schweiz. Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen BLV. <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/lebensmittel-und-ernaehrung/ernaehrung/schweizer-ernaehrungsbulletin.html>
- BLW 2013:** Reutimann J, Heldstab J, Leippert F.: Stickstoff in der Land- & Ernährungswirtschaft: Stickstoffflüsse, Verluste und Reduktionspotentiale, INFRAS, Zürich. <https://www.newsd.admin.ch/newsd/NSBExterneStudien/731/attachment/de/3080.pdf>
- BLW 2021:** Webseite Parlamentarische Initiative: <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/politik/agrarpolitik/parlamentarischeinitiative.html> [Seite besucht am 4.1.2022]
- BMU 2018:** Zustand der deutschen Nordseegewässer 2018. Aktualisierung der Anfangsbewertung nach § 45c, der Beschreibung des guten Zustands der Meeresgewässer nach § 45d und der Festlegung von Zielen nach § 45e des Wasserhaushaltsgesetzes zur Umsetzung der

Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) Referat WR I 5 Meeresumweltschutz, Internationales Recht des Schutzes der marinen Gewässer.

Braun et al. 1991: Braun M., Frey M., Hurni P., Sieber U., Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (Stand 1956). Bericht 1. Teil, 87 S. FAC Liebefeld und BAFU Bern. 1991

Bundesrat 2021: Langfristige Klimastrategie der Schweiz. Bundesrat. 27.1.2021

<https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/65874.pdf>

Butterbach-Bahl und Kiese 2005: Stickstoffdynamik und biologische Prozesse in Ökosystemen. F- und E-Vorhaben 202 63 224.

Bühlmann et al. 2014: Tobias Bühlmann, E. Hiltbrunner, Ch. Körner, B. Rihm, B. Achermann.

Induction of indirect N₂O and NO emissions by atmospheric nitrogen deposition in (semi-) natural ecosystems in Switzerland. Atmospheric Environment 103 (2015) 94-101.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.037>

Centravo 2021: Mündliche Mitteilung René Burri (Centravo). November 2021

EAWAG 2002: EAWAG news 53d. Informationsbulletin der EAWAG. <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/141383/eth-22353-07.pdf?sequence=7&isAllowed=y>

EAWAG/HAFI 2021: Gruber W., Joss A, Luck M., Kupper T., Bühler M. und Bühler T. Elaboration of a data basis on greenhouse gas emissions from wastewater management - Final report N2OklimARA, EAWAG und HAFI im Auftrag des BAFU, 2021 (unveröffentlichter Entwurf).

EBP und ZHAW 2010: Grundlagen für ein Biomasse- und Nährstoffmanagement in der Schweiz.

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). https://www.ebp.ch/sites/default/files/project/uploads/zusammenfassung_biomasse_und_naehrstoffmanagement.pdf

EG 1991: Richtlinie 91/676/EWG des Rates vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften. <http://europa.eu/scadplus/leg/de/lvb/l28013.htm>.

EKL 2005: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene 2005. Schriftenreihe Umwelt Nr. 384. Bern <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/uw-umwelt-wissen/stickstoffhaltigeluftschadstoffeinderschweiz.pdf.download.pdf/stickstoffhaltigeluftschadstoffeinderschweiz.pdf>

EMEP 2021: European Monitoring and Evaluation Programme.

https://www.emep.int/mscw/mscw_moddata.html

EMIS 2021: Datenbank der Luftschadstoff- und Klimagasemissionen der Schweiz 1990 -2019.

Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern.

- ETH 2019:** Beretta, C. und Hellweg, S.: Lebensmittelverluste in der Schweiz: Mengen und Umweltbelastung. Wissenschaftlicher Schlussbericht, Oktober 2019. ETH Zürich. Im Auftrag des Bundes Amtes für Umwelt (BAFU). https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/externe-studien-berichte/lebensmittelverluste-in-der-schweiz-umweltbelastung-und-verminderungspotenzial.pdf.download.pdf/ETH-Bericht_Foodwaste_FINAL.pdf
- EU 2021:** Verordnung (EU) 2021/1372 der Kommission vom 17. August 2021 zur Änderung des Anhangs IV der Verordnung (EG) Nr. 999/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich des Verbots der Fütterung von anderen Nutztieren als Wiederkäuern, ausgenommen Pelztiere, mit tierischem Protein (Text von Bedeutung für den EWR). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32021R1372>
- Eversberg 2021:** Nutztierhaltung/Fütterung mit Tiermehl unter strengen Auflagen wieder erlaubt. Deutschlandfunk 19.10.2021. <https://www.deutschlandfunk.de/nutztierhaltung-fuetterung-mit-tiermehl-unter-strengen-100.html>
- Fenaco-LANDI 2021:** Aus Agroline wird Landor. Ein Interview mit Jürg Friedli. [\[https://www.ufarevue.ch/fenaco-landi/aus-agroline-wird-landor\]](https://www.ufarevue.ch/fenaco-landi/aus-agroline-wird-landor), Seite besucht am 15.11.2021.
- FOEN 2009a:** Switzerland's Informative Inventory Report, Submission under the UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, Submission of March 2009 to the United Nations ECE Secretariat. (Inkl. Submissions-tabellen). Federal Office for the Environment (FOEN/BAFU), Bern.
- FOEN 2009b:** Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2007, National Inventory Report 2009. Submission of 15 April 2009 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. (Inkl. CRF-Tabellen.) Federal Office for the Environment (FOEN/BAFU), Bern.
- GMZ 2019:** GZM Extraktionswerk AG. UMWELTBERICHT 2019. https://www.centravo.ch/images/content/pdf/GZM_Umweltbericht_2019.pdf
- GSK 1993:** Der Stickstoffhaushalt in der Schweiz. Konsequenzen für Gewässerschutz und Umweltentwicklung. Bericht der Arbeitsgruppe „Stickstoff“ der Eidg. Gewässerschutzkommission. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 209. Bern.
- IAP 2009:** Braun S., Flückiger W.: Wie geht es unserem Wald? IAP, Schönenbuch Mai 2009
- IPCC 2021:** Climate change 2021: The physical science basis, Intergovernmental panel on climate change. Working group I. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf (Entwurf)

- Janes-Basset et al. 2021:** Janes-Bassett V., Bassett R., Rowe Ed C., Tipping E., Yumashev D., Davies J., Changes in carbon storage since the pre-industrial era: A national scale analysis, Anthropocene, Volume 34, 2021, 100289, ISSN 2213-3054, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213305421000126?via%3Dihub>
- Klein 2014:** Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2013, 2014, 120-131 Les apports par les affluents au Léman et au Rhône à l'aval de Genève.
- KVU 2020:** Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzämter der Schweiz: Schema Stickstoffflüsse. Website KVU <https://www.kvu.ch/de/arbeitsgruppen?id=224> [Seite besucht am 17.1.2021].
- Mengis und Wehrli 1998:** Nitratelimination in Gewässern und ihre Auswirkungen auf Nitratgehalte in Seen und Grundwasser. Mitt. Gebiete Lebensmittel Hygiene, 89, 63-76.
- Meteotest 2016:** Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. UW-1642-E. Bundesamt für Umwelt. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/publications-studies/publications/Critical-Loads-of-Nitrogen-and-their-Exceedances.html>
- Meteotest 2019:** Mapping Nitrogen Deposition 2015 for Switzerland. Technical Report on the Update of Critical Loads and Exceedance, including the years 1990, 2000, 2005 and 2010. B Rihm, Th. Künzle, im Auftrag des BAFU. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/en/dokumente/luft/externe-studien-berichte/mapping-nitrogen-deposition-2015-for-switzerland.pdf>
- Meteotest 2020:** Stickstoffdeposition auf Landwirtschaftsflächen 1990–2015. Herausrechnen der landwirtschaftlichen Quellen. B. Rihm im Auftrag des BLW
- Meteotest 2021:** Lieferung von Depositionsdaten 2015 aufgeschlüsselt nach der Arealstatistik der Schweiz, B. Rihm, 15.10.2021.
- Minder 2021:** Kommt das Tiermehl auch in der Schweiz zurück? SRF news 03.09.2021. <https://www.srf.ch/news/schweiz/zermahlene-schlachtreste-kommt-das-tiermehl-auch-in-der-schweiz-zurueck>
- Müller et al. 2021:** Müller, B., Thoma, R., Baumann, K.B.L. et al. Nitrogen removal processes in lakes of different trophic states from on-site measurements and historic data. Aquat Sci 83, 37 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00027-021-00795-7>
- Müller et al. 2021b (eingereicht):** Müller B., Meyer J.S., Gächter R. Denitrification and nitrogen burial in freshwater lakes. Environmental Science & Technology (eingereicht).
- NADUF 2021.** NADUF und hydrologischen Messdaten (BAFU). <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/wasser--messnetze/nationale-beobachtung-oberflaechengewaesserqualitaet--nawa-/nationale-daueruntersuchung-fliessgewaesser--naduf-.html>; Letzte Änderungen der Website: 15.06.2021

- NAQUA 2019:** Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz (Stand 2016).
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/ergebnisse-grundwasserbeobachtung-schweiz-naqua.html>
- Orand A. und Colon M 1991:** Etude des affluents du Léman et de son émissaire. Rapp. Domm. int. prot- eaux Léman contre pollut, Campagne 1990
- OSPAR 2020.** Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 2018. Agroscope Science, 100, 2020, 1-30. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/45684>
- OSPAR 2021:** Datentabelle der OSPAR-Bilanzierung für die Jahre 1990 bis 2019 von E. Spiess, Agroscope. [schriftl. Mitteilung vom 1.11.2021].
- OSPAR 2008:** Towards the 50% reduction target for nutrients Assessment of Implementation of PARCOM Recommendations 88/2 and 89/4. OSPAR Commission, Protecting and preserving the North-EAST Atlantic and its resources. [https://qsr2010.ospar.org/media/assessments/p00310 PARCOM Rec 88 2 and 89 4.pdf](https://qsr2010.ospar.org/media/assessments/p00310_PARCOM_Rec_88_2_and_89_4.pdf)
- Prasuhn und Sieber 2005:** Prasuhn V. u. Sieber U.: Changes in diffuse phosphorus and nitrogen inputs into surface waters in the Rhine watershed in Switzerland. Aquat. Science 67: 363 – 371.
- Schleiss 2021:** Mündliche Mitteilung K. Schleiss (UMWEKO), November 2021
- Schubert et al. 2006:** Schubert C.J. Durisch-Kaiser E., Wehrli B., Thandrup B., Lam P. and Kuypers M.M. Brief report: Anaerobic methane oxidation in a tropical freshwater system (Lake Tanganyika). Environmental Microbiology 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01074.x>
- Streudler et al. 1989:** Influence of nitrogen -fertilization on methane uptake in temperate forest soils, Nature 341: 314–316. <https://www.nature.com/articles/341314a0>
- Swiss Academics 2020:** Übermäßige Stickstoff- und Phosphoreinträge schädigen Biodiversität, Wald und Gewässer. Swiss Academics Factsheets Vol. 15, No. 8, 2020.
https://api.swiss-academies.ch/site/assets/files/6719/fs_stickstoff_de-1.pdf
- TMF 2018:** TMF Extraktionswerk AG, Bazenheid. Geschäftsbericht 2018.
https://www.tmf.ch/files/documents/TMF_Geschaeftsbericht_2018_WEB.pdf
- UBA 2009:** Geupel, Jering, Frey, Gohlisch, Lambrecht, Jaschinski, Koppe, Mönch, Mäder, Nissler, Strogies, Mathan, Schneider, Mohaupt, Glante, Dominik, Mauscherding, Schulz, Hummel, Kacsóh, Trukenmüller, Graff, Spranger, Augustin, Neumann, Hofmann, Bernicke, Plickert, Beckers, Behnke, Brahner, Weiss, Butz, Herrmann, Fricke, Galander, Hintergrundpapier zur einer multimedialen Stickstoffemissionsminderungsstrategie. Umweltbundesamt (UBA) September 2008, Dessau. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3982.pdf>

- UBA 2020a:** DESTINO - Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010-2014: Texte | 64/2020, Forschungskennzahl 3716 51 2000, Umweltbundesamt, 166 S., Mai 2020. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/reaktive-stickstofffluesse-in-deutschland-2010-2014>
- UBA 2020b:** DESTINO - Integrierter Stickstoffindikator, nationales Stickstoffziel und IST-Zustand: Texte | 96/2020, Forschungskennzahl 3716 51 2000, Umweltbundesamt, 124 S., Juni 2020. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/integrierter-stickstoffindikator-nationales>
- UBA 2021:** Maßnahmenvorschläge für ein Aktionsprogramm zur integrierten Stickstoffminderung: Texte | 78/2021, Forschungskennzahl 3717 11 260 0, Umweltbundesamt, 277 S., Mai 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/massnahmenvorschlaege-fuer-ein-aktionsprogramm-zur>
- UBA 2022:** Umweltatlas zu Wirkungen von reaktivem Stickstoff im Boden. <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/wirkungen/boden/welche-folgen-hat-ein-uebermass-an-reaktivem> [Seite besucht am 17.1.2022]
- UMWEKO 2019:** Schleiss, K. 2019: Kompostier- und Vergärungsanlagen. Erhebung in der Schweiz und Liechtenstein. Massenfluss zu Input und Output im Jahr 2017. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). <https://umweko.ch/base/uploads/Kompostier-%20und%20Verg%C3%A4rungsanlagen%20Erhebung%20in%20der%20Schweiz%20und%20Lichtenstein.DE.4-5d6924b380399.pdf>
- UN 2010:** United Nations, FAO, Geneva timber and forest discussion paper 49 – Forest product conversion factors for the UNECE Region ECE/TIM/DP/49 <https://unece.org/fileadmin/DAM/timber/publications/DP-49.pdf>
- UNECE 2009a:** Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP), United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)
- UNECE 2009b:** Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)
- UNFCCC 1998:** Kyoto Protokoll, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- UNFCCC 2015:** Paris agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- SES 2020:** Energie & Umwelt 1/2020: Die Energie von morgen. Raus aus der Energieabhängigkeit. <https://www.energiestiftung.ch/id-2020-1-raus-aus-der-energieabhaengigkeit.html>
- Arealstatistik:** Arealstatistik <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/bodennutzung-bedeckung.html>

- Wagner G. und Bühler H. 1989:** Die Belastung des Bodensees mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen, organisch gebundenem Kohlenstoff und Borat im Abflussjahr 1958/86. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Bericht Nr. 40. 1989
- WSL 2017:** Thees, O., Burg, V., Erni, M., Bowman, G., Lemm, R. 2017: Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung, Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzentrums SCCER BIOSWEET. WSL Ber. 57: 299 S. <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A13277/datastream/PDF/view>
- ZHAW 2017:** Baier, U., Moser, Y., Rüschi, R., Warthmann, R., 2017: Biomassenutzung in der Schweizer Landwirtschaft. Stoffflussanalyse landwirtschaftlicher Biomassen auf Produktions- und Nutzungsebene. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). https://www.infothek-biomasse.ch/images//387_2017_Baier_Biomassenutzung_Schweizer_Landwirtschaft.pdf
- ZHAW 2018:** Mosberger L., Gröbly D., Baum S., Baier U. 2018. Biogene Güterflüsse – update 2014. Massenflussanalyse der Biomasseflüsse der Schweiz. Schlussbericht ZHAW, Wädenswil. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). https://digitalcollection.zhaw.ch/bitstream/11475/22122/3/2018_Mosberger-etal_Biogene-Gueterfluesse-2014.pdf