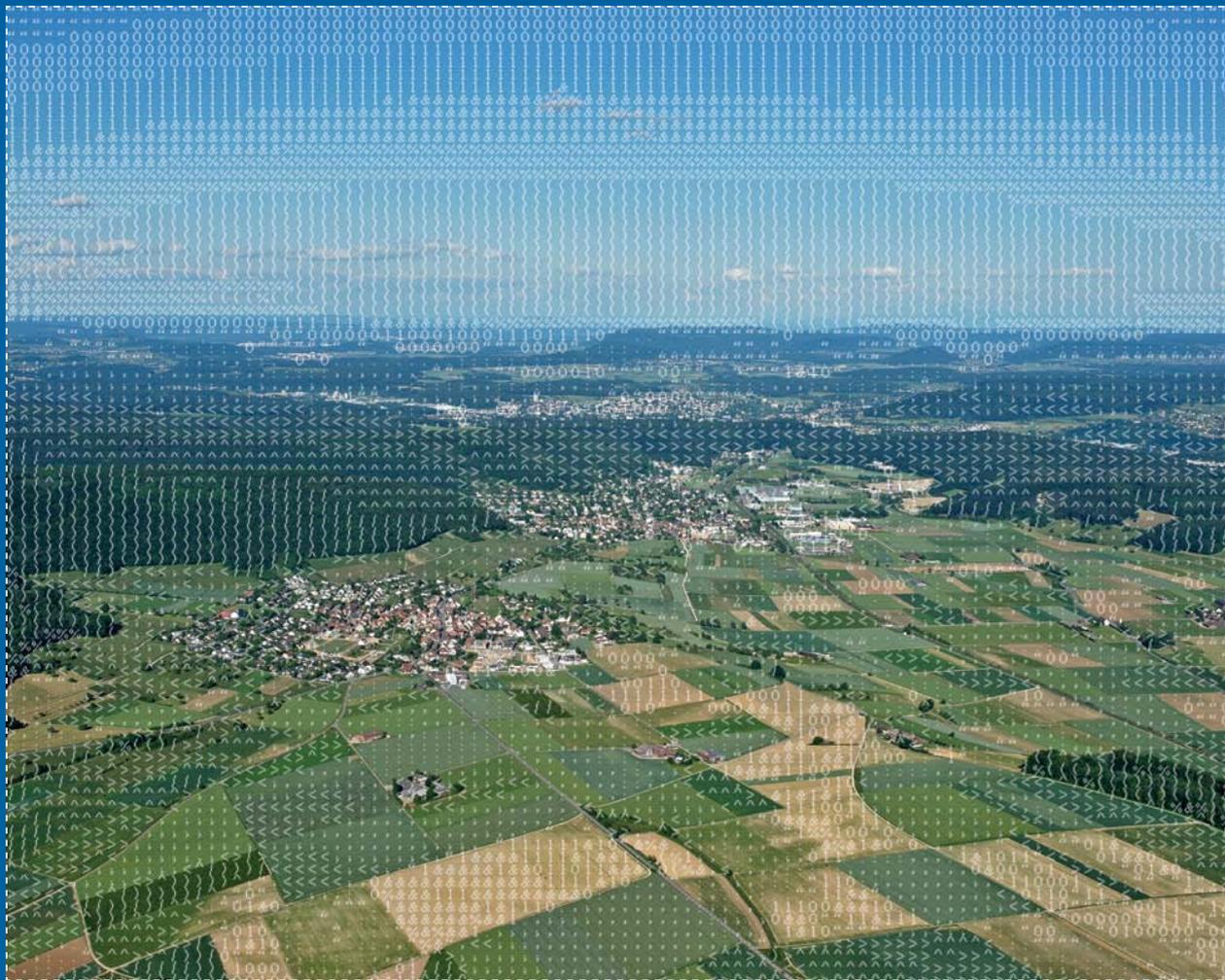


> Stickstoffflüsse in der Schweiz

Stoffflussanalyse für das Jahr 2005



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

> Stickstoffflüsse in der Schweiz

Stoffflussanalyse für das Jahr 2005

*Résumé de cette publication: www.environnement-suisse.ch/uw-1018-f
Riassunto della presente pubblicazione: www.ambiente-svizzera.ch/uw-1018-i
Summary of this publication: www.environment-switzerland.ch/uw-1018-e*

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autorinnen und Autoren

Jürg Heldstab (INFRAS), Judith Reutimann (INFRAS), Roger Biedermann (Leu und Partner), Daniel Leu (Leu und Partner)

Konsultierte Fachpersonen

BAFU: B. Achermann, S. Augustin, P. Fischer, A. Gassner, H.U. Gujer, D. Hartmann, H. Hosbach, M. Hügi, R. Kozel, A. Laube, S. Lehmann, P. Liechti, R. Murali, B. Müller, K. Schenk, U. Sieber, R. Von Arx, R. Volz

ART Reckenholz: D. Bretscher, V. Prasuhn, W. Richner, E. Spiess, Eawag: Ch. Stamm, J. Zobrist

Begleitung BAFU

Ch. Moor, B. Achermann, G. Karlaganis, H. Hosbach

Zitierung

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.

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelbild

Flugaufnahme von J.-M. Zellweger, Service des eaux, sols et assainissement, Lausanne: Landschaft mit relevanten Stickstoffflüssen: Schaffhauser Klettgau als typisches Ackerbaugebiet westlich des Rheinfalls mit GSchG Art. 62a-Projekt im Vordergrund. Zunahme der Industrialisierung in den besiedelten Gebieten (Bildmitte).

PDF-Download

www.umwelt-schweiz.ch/uw-1018-d
(eine gedruckte Fassung liegt nicht vor)

> Inhalt

Abstracts	5	4	Resultate für das Jahr 2005	52
Vorwort	7	4.1	Gesamtsystem	52
Zusammenfassung	8	4.2	Land- und Forstwirtschaft	54
<hr/>		4.2.1	Flussdiagramm Land- und Forstwirtschaft	54
1	Ausgangslage	4.2.2	Prozesse Land- und Forstwirtschaft	56
1.1	Ziel der Analyse	4.2.3	Resultate Land- und Forstwirtschaft	58
1.1.1	Problematik und frühere Studien	4.3	Produkteherstellung/Produktenutzung	59
1.1.2	Aktualisierung der Stickstoffbilanz Schweiz	4.3.1	Flussdiagramm	
1.1.3	Methoden und Datenquellen		Produkteherstellung/Produktenutzung	59
1.1.4	Überblick über den Status quo	4.3.2	Prozesse Produkteherstellung/Produktenutzung	61
1.2	Vorkommen und Bedeutung des Stickstoffs in der Umwelt	4.4	Umwelt	63
1.3	Bisherige Regulierungen	4.4.1	Flussdiagramm Umwelt	63
1.3.1	National	4.4.2	Prozesse Umwelt	66
1.3.2	International	4.5	Abfallwirtschaft	67
1.4	Bisherige Stoffflussanalysen Stickstoff	4.5.1	Flussdiagramm Abfallwirtschaft	67
		4.5.2	Prozesse Abfallwirtschaft	69
		4.6	Import- und Export-Flüsse	70
<hr/>		<hr/>		
2	Stickstoff in der Umwelt	5	Trends der Stoffflüsse in der Schweiz	71
2.1	Stickstoffverbindungen	5.1	Die wichtigsten Stoffflüsse 1994 und 2005	71
2.2	Stickstoff-Reservoirs	5.2	Zeitreihen der wichtigsten Stoffflüsse	74
2.3	Umwandlungsprozesse (Nitrifikation, Denitrifikation etc.)	5.2.1	Emissionen in Atmosphäre	74
2.4	Land- und Forstwirtschaft	5.2.2	Stoffflüsse der Landwirtschaft	75
2.5	Produkteherstellung und Produktnutzung	5.2.3	Stoffflüsse Hydrologie	78
2.6	Umwelt	<hr/>		
2.7	Abfallwirtschaft	6	Interpretation	82
<hr/>		6.1	Bedeutung der Resultate	82
3	Methodik	6.2	Interpretation Landwirtschaft	83
3.1	Stoffflussanalyse	6.3	Interpretation Luftschadstoffe	87
3.2	Prozesse und Stoffflüsse	6.4	Interpretation Hydrosphäre	89
3.3	Datenbeschaffung und Datenquellen	6.5	Interpretation Güterflüsse	91
3.4	Datenqualität	6.6	Datenlücken, Schwachstellen und nicht berücksichtigte Stickstoffflüsse	91
3.5	Stand der landwirtschaftlichen NH ₃ - und N ₂ O-Flüsse	6.7	Ausblick	93

Anhang	94
A1 Stickstoffflüsse	94
A2 Gesamtsysteme 2005 und 1994, detailliert mit den grössten Stickstoffflüssen	116
A3 Herleitung Güterimport und -export in/aus der Schweiz	118
A4 Nutztiere und tierische Produktion	121
A5 Linkliste	122
<hr/>	
Verzeichnisse	123
Literatur	125

> Abstracts

The report quantifies the material fluxes of nitrogen in Switzerland for the year 2005, and makes a comparison with figures from 1994. Thanks to successful measures in the areas of combustion and transport, emissions and depositions have decreased. The results show that some improvements have also been achieved in regard to inputs and losses in the area of agriculture. Nevertheless, agricultural processes continue to play a decisive role for environmentally relevant nitrogen losses. For a number of material fluxes the margin of error is high; e.g., for the exchange between soil and water, as well as between soil and air. The results form a scientific basis for the further development of strategies and measures to reduce undesirable nitrogen emissions in the environment so as to improve soil fertility and the quality of the environment.

Der Bericht quantifiziert die Stoffflüsse von Stickstoff in der Schweiz für das Jahr 2005 und vergleicht sie mit den Zahlen 1994. Dank erfolgreicher Massnahmen bei Feuerungen und Verkehr sind die Emissionen und Depositionen rückläufig. Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei Inputs und Verlusten im Bereich Landwirtschaft einige Verbesserungen erzielt worden sind. Trotzdem spielen landwirtschaftliche Prozesse nach wie vor eine entscheidende Rolle für die umweltrelevanten Stickstoffverluste. Bei etlichen Stoffflüssen sind die Unsicherheiten gross, z. B. bei den Wechselwirkungen zwischen Boden und Wasser sowie zwischen Boden und Luft. Die Ergebnisse sind eine sachliche Grundlage für die Weiterentwicklung von Strategien und Massnahmen zur Reduktion der unerwünschten Stickstoffemissionen in die Umwelt, um die Bodenfruchtbarkeit und die Qualität aller Umweltkompartimente zu verbessern.

Le présent rapport quantifie les flux d'azote en Suisse pour l'année 2005 et les compare aux chiffres de 1994. Les actions entreprises dans les secteurs de la combustion et des transports ont sensiblement réduit les émissions et les dépôts. Les résultats montrent aussi maintes améliorations du côté des inputs et des pertes en agriculture. Cependant, les processus agricoles sont encore grandement responsables des pertes d'azote ayant un impact sur l'environnement. Nombre de flux de matière sont très mal connus, p. ex. les interactions entre le sol et l'eau ainsi qu'entre le sol et l'air. Les résultats donnent une base objective pour développer des stratégies et des mesures de réduction des émissions indésirables d'azote dans l'environnement afin d'améliorer la fertilité du sol et la qualité de tous les compartiments environnementaux.

Il rapporto quantifica i flussi di composti azotati in Svizzera per il 2005 e li confronta con i dati del 1994. Le emissioni e le deposizioni calano grazie ai provvedimenti adottati nei trasporti e nel riscaldamento. I risultati mostrano alcuni miglioramenti anche per le immissioni e le perdite nell'agricoltura. I processi agricoli hanno un ruolo decisivo per quanto riguarda le perdite di azoto rilevanti per l'ambiente. Numerosi flussi di sostanze denotano notevoli incertezze, ad esempio in merito all'interazione tra suolo e acqua e tra suolo e aria. I risultati sono una base tecnica per l'ulteriore sviluppo di strategie e misure con cui ridurre le emissioni di azoto indesiderate e per migliorare la fertilità del suolo e la qualità dei compartimenti ambientali.

Keywords:

Nitrogen, nitrate, ammonia, nitrogen oxides, system analysis, substance flow, trend analysis

Stichwörter:

Stickstoff, Nitrat, Ammoniak, Stickoxide, Systemanalyse, Stofffluss, Trendanalyse

Mots-clés:

azote, nitrate, ammoniac, oxydes d'azote, analyse systémique, flux de substances, analyse des tendances

Parole chiave:

azoto, nitrato, ammoniaca, ossido di azoto, analisi del sistema, flusso di sostanze, analisi della tendenza

> Vorwort

Den verschiedenen reaktiven Stickstoffverbindungen kommt in der Umwelt eine zentrale Bedeutung zu. Durch menschliche Aktivitäten werden erhebliche Mengen an Stickstoffverbindungen freigesetzt. Zudem werden durch natürliche und technische Umwandlungsprozesse ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften und damit auch die Wirkungen auf die Umwelt völlig verändert. Dabei spielt das betrachtete Umweltkompartiment eine entscheidende Rolle: während zum Beispiel die Wirkung von Ammoniumsalzen als Nährstoffe in Landwirtschaftsböden beabsichtigt ist, ist die gleiche Wirkung in Gewässern unerwünscht, da sie zur Überdüngung der Gewässer beiträgt.

In dieser Studie werden die relevantesten Flüsse von Stickstoffverbindungen zwischen den verschiedenen Umweltkompartimenten identifiziert und quantifiziert. Eine ähnliche Studie wurde im Jahr 1994 durchgeführt. Gegenüber dieser früheren Version wurde diesmal die Methodik „Stoffflussanalyse Schweiz“ angewendet. Neue Stickstoffflüsse wurden in die Analyse miteinbezogen und die Daten aktualisiert. Die vorliegende Arbeit beschreibt nicht nur den Zustand im Jahr 2005, sondern stellt auch Vergleiche zum Zustand 1994 her. Dazu wurden die Daten der älteren Studie in die Darstellungsform der neuen Methodik transformiert. In ausgewählten, besonders relevanten Fällen wurden die zeitlichen Verläufe von 1994 bis 2005 aufgezeigt und die Veränderungen interpretiert.

Zwischen 1994 und 2005 gingen wichtige Stickstoffflüsse zurück. Die Emissionen von Stickoxiden aus Feuerungen und Verkehr konnten fast halbiert werden. Zudem haben die Hofdüngerausbringung auf Landwirtschaftsböden, der Mineraldüngereinsatz sowie die Emissionen aus der Tierhaltung in die Atmosphäre abgenommen. Auch die Stickstoffemissionen der Kläranlagen sind infolge eines gezielten Reduktionsprogramms zurückgegangen. Allerdings haben einzelne relevante Stickstoffflüsse wie der Import von Futtermitteln in der gleichen Periode zugenommen.

In Zukunft sind Veränderungen der Stickstoffflüsse zum Beispiel durch die vermehrte energetische Nutzung von Biomasse zu erwarten. Die Stickstoffbilanzen der Subsysteme Land- und Forstwirtschaft, Produkteherstellung und –nutzung, Umwelt und Abfallwirtschaft für das Jahr 2005 dienen deshalb als Ausgangslage für weitere Arbeiten.

Beim Erstellen dieser Publikation konnten wir Fachwissen und Mitarbeit von verschiedenen Stellen und Personen in Anspruch nehmen. Ihnen danken wir an dieser Stelle bestens, namentlich der Agroscope Reckenholz, der ETH sowie der Eawag für das Bereitstellen von Daten und Informationen zu Stoffflüssen der Landwirtschaft bzw. zur Hydrologie. Zudem möchten wir uns bei den zahlreichen Informanten aus den Kantonen, Beratungsbüros sowie von Industrie und Gewerbe bedanken.

Gérard Poffet
Vizedirektor
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

> Zusammenfassung

Ausgangslage

Stickstoff ist mit seinen vielfältigen Erscheinungsformen und dank seiner Funktion als Nährstoff ein Schlüsselement für die gesamte organische Natur. Er ist der wesentliche Baustein für die Produktion von Eiweiss und somit für unsere Nahrung. Die Menschen haben allerdings mit ihren Entwicklungen in Verkehr, Industrie, Haushalt und Landwirtschaft in den letzten Jahrzehnten grosse Mengen reaktiver Stickstoffverbindungen in Luft, Boden und Wasser emittiert und damit erhebliche Konzentrationsstörungen in der Umwelt verursacht. Die Emission von Stickstoffverbindungen wie Ammoniak/Ammonium ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) Stickstoffmonoxid und -dioxid (NO , NO_2) usw. in die Umweltmedien führt zu Schädigungen von Menschen, Tieren und Pflanzen und ihren Lebensgemeinschaften. Distickstoffoxid (N_2O , Lachgas) und Stickstofftrifluorid (NF_3) sind starke Klimagase und tragen zur Klimaerwärmung bei. Nitrat (NO_3^-) – ein Pflanzennährstoff – ist humantoxikologisch von Bedeutung und trägt zur Überdüngung von Oberflächengewässern inklusive flacher Meere (Nordsee) bei.

Ausgangslage

1993 wurde der Stickstoffhaushalt der Schweiz durch die Eidgenössische Gewässerschutzkommission erstmals analysiert. In der Folge entwickelte die «Projektgruppe Stickstoffhaushalt Schweiz», welche von den beiden Eidgenössischen Departementen für Inneres und Volkswirtschaft eingesetzt worden ist, eine Übersicht über die Stickstoffbilanz der Schweiz 1994 und eine Strategie zur Reduktion der Stickstoffemissionen in der Schweiz. Die vorgeschlagenen Massnahmen wurden durch die Landwirtschafts- und Umweltpolitik teilweise umgesetzt. Obwohl stickstoffhaltige Luftschadstoffe aus Verkehr, Industrie und Haushaltungen wirkungsvoll reduziert werden konnten, ist es nicht im selben Mass gelungen, die Stickstoffproblematik in der Landwirtschaft zu entschärfen. Die Schweiz ist heute noch weit vom Erreichen der Ziele entfernt.

Der vorliegende Bericht beschreibt die aktuellen Stickstoffflüsse in der Schweiz im Bezugsjahr 2005. Im Weiteren zeigt er auf, welche Trendentwicklungen seit der letzten Untersuchung 1994 stattgefunden haben. Er dient als sachliche Grundlage für eine Aktualisierung der Stickstoffstrategie und Planung künftiger Massnahmen. Adressaten des Berichts sind Entscheidungsträger, Landwirtschafts- und Umweltfachleute in öffentlichen Verwaltungen und Privatwirtschaft sowie Hochschulinstitute, die sich im weitesten Sinne mit der Thematik Stickstoff befassen.

Die Problematik der Stickstoffüberschüsse und deren Auswirkungen auf die Umwelt sind national und international von Bedeutung. Im Rahmen internationaler Abkommen (Genfer Konvention (CLRTAP)/Göteborg-Protokoll, Kyoto-Protokoll (Lachgas, Stickoxide), OSPAR-Übereinkommen, Internationale Nordseeschutz-Konferenzen (INK), Nordsee-Anliegerstaaten und Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) und Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB)) hat sich die Schweiz verpflichtet, Massnahmen zu ergreifen, um eine Reduktion der Stick-

stoffüberschüsse zu erreichen. Um diesen Verpflichtungen gerecht zu werden, reguliert die Schweiz den Stickstoffhaushalt mit Bestimmungen im Umweltschutz-, Gewässerschutz- und Landwirtschaftsrecht.

Stickstoffverbindungen

Reaktive Stickstoffverbindungen, die durch menschliche Aktivitäten entstehen, 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^-), die in durch verschiedenste Prozesse in der Atmosphäre, der Hydrosphäre, der Pedosphäre und durch menschliche Aktivitäten ständig ineinander umgewandelt werden.

Stickstoffverbindungen

Methodik

Die stickstoffrelevanten Prozesse der Schweiz werden in vier Subsysteme unterteilt:

Methodik

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

Ausserdem braucht es im System das Ausland als spezielles Subsystem, um Importe und Exporte erfassen zu können. Die Subsysteme werden in «Prozesse» zerlegt, zum Beispiel Tierhaltung, Verkehr, Atmosphäre etc. Prozesse sind Ursprung und Ziel der betrachteten Stickstoffflüsse im System.

Die Methodik der vorliegenden Stoffflussanalyse basiert auf der Anleitung des BUWAL «Stoffflussanalyse Schweiz» aus dem Jahre 1996.

Für die Quantifizierung der Stickstoffflüsse wurden in erster Linie vorhandene Daten verwendet, die primär aus (Forschungs-) Projekten und Publikationen von BAFU, ART, WSL, Eawag und FiBL stammen.

Die Qualität der Frachtangaben ist sehr unterschiedlich. Für einzelne Flüsse sind quantitative Unsicherheiten bekannt, bei der Mehrheit der Flüsse wurde die Unsicherheit jedoch abgeschätzt.

Resultate für das Jahr 2005

Die grössten Stickstofffrachten werden zwischen den Subsystemen Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Ausland ausgetauscht. Besonders komplex ist die Situation im Subsystem Land- und Forstwirtschaft, wo nicht nur zahlreiche Flüsse vorkommen, sondern auch bedeutsame Umwandlungen zwischen den Stickstoffverbindungen stattfinden.

Resultate für das Jahr 2005

Die grössten und wichtigsten Flüsse von ökologisch relevanten Stickstoffverbindungen sind:

- > Futterpflanzen aus Landwirtschaftsböden in die Tierhaltung 132 ktN (L8)
- > Hofdünger/Weidegang aus der Tierhaltung in Landwirtschaftsböden: 86 ktN (L1)
- > Abfluss via Flüsse: 73 kt (U14)
- > Verfrachtung via Luft ins Ausland: 56 ktN (U10)
- > Mineraldünger (Import) in Landwirtschaftsböden: 52 ktN (I4)
- > Import via Luft aus dem Ausland: 44 ktN (I8)
- > Abwasser in ARA: 43 ktN (P8)
- > Emissionen aus der Tierhaltung in die Atmosphäre: 42 ktN (L4)
- > Produkte/Nahrung aus der Tierhaltung: 35 ktN (L3)
- > Auswaschung aus Landwirtschaftsböden: 34 ktN (L5)
- > Futterimporte für die Tierhaltung 32 ktN (I3)
- > N₂-Fixierung durch Landwirtschaftspflanzen 32 ktN (U1)
- > Import Lebensmittel und übrige Stoffe 25 ktN (I2)

Trends der Stoffflüsse 1994–2005

- > *Abnehmende Stoffflüsse:* Dank erfolgreicher Massnahmen bei Feuerungen und Verkehr sind die NO_x-Emissionen in die Atmosphäre und entsprechend auch die Deposition auf Böden rückläufig. Zudem haben weitere Flüsse abgenommen: Hofdüngerausbringung auf Landwirtschaftsböden, Inlandproduktion Tierfutter, Mineraldüngereinsatz sowie NH₃- und N₂O-Emissionen in die Atmosphäre. Auch die N-Emissionen der Kläranlagen sind infolge eines gezielten Reduktionsprogramms zurückgegangen. Die Stickstofffrachten in den grenzüberschreitenden Flüssen zeigen ebenfalls einen sinkenden Trend.
- > *Zunehmende Stoffflüsse:* Der Import von Futtermitteln ist gestiegen. Primär haben die Importe von Soja zugenommen. Mögliche Ursachen dieses Effektes könnte der höhere Kraftfuttereinsatz bei der Tierproduktion und das Verbot zur Verfütterung von Tiermehl (wegen BSE) sein.
- > *Wenig veränderliche Stoffflüsse:* Produkte aus Tierhaltung und Pflanzenbau, Exporte aus der Lebensmittelindustrie sowie Auswaschung und Abschwemmung aus Böden haben sich in der Periode 1994 bis 2005 wenig verändert.

Trends der Stoffflüsse 1994–2005

Detaillierte Angaben zu den wichtigsten Stickstoffflüssen 1994 und 2005 sind in der folgenden Tabelle enthalten.

Abb. A > Gesamtsystem Schweiz 2005; Stickstoffflüsse zwischen den Subsystemen

Die grössten Stickstoffflüsse im Gesamtsystem 2005. Das Gesamtsystem enthält vier Subsysteme, welche jeweils mehrere Prozesse enthalten. Die Pfeile charakterisieren die aufsummierten Stickstoffflüsse die zwischen den Subsystemen fließen, in 1000 Tonnen N pro Jahr (kt N/a) und beziehen sich auf das Jahr 2005. Angegeben sind in schwarz die Gesamtflüsse an Stickstoff (Mittelwert und Unsicherheitsbereich), welche sowohl ökologisch relevante Stickstoffverbindungen als auch Luftstickstoff enthalten und in blau reine Luftstickstoffflüsse.

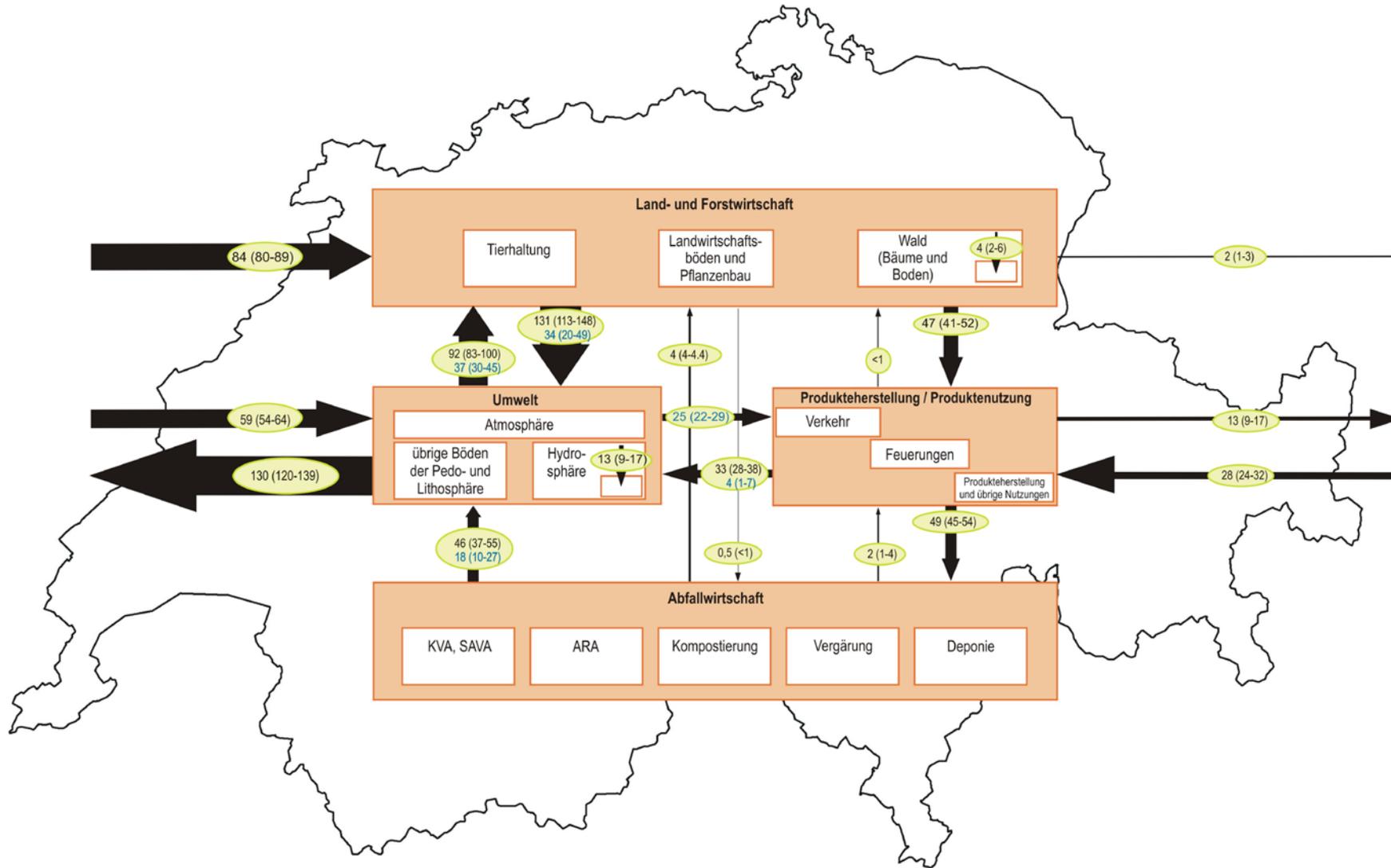
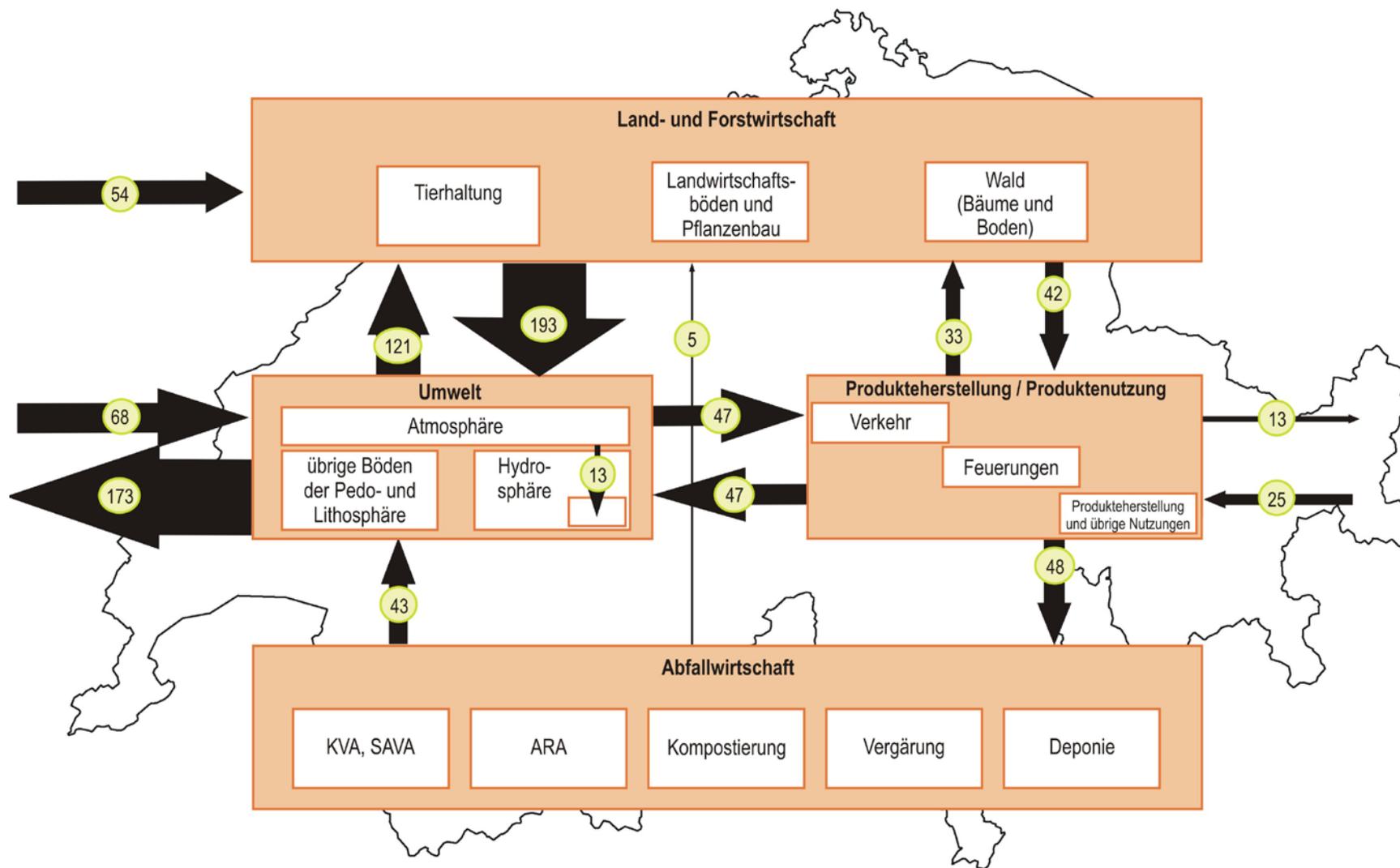


Abb. B > Gesamtsystem Schweiz 1994; Stickstoffflüsse zwischen den Subsystemen

Die grössten Stickstoffflüsse im Gesamtsystem 1994. Die Flüsse von 1994 sind ins neue System transformiert, dessen Subsysteme leicht anders definiert sind als in der Originalquelle (PG N-Haushalt CH 1996). Das Gesamtsystem enthält vier Subsysteme, welche jeweils mehrere Prozesse enthalten. Die Pfeile charakterisieren die aufsummierten Stickstoffflüsse die zwischen den Subsystemen fließen, in 1000 Tonnen N pro Jahr (kt N/a) und beziehen sich auf das Jahr 1994. Angegeben sind die Gesamtflüsse an Stickstoff (Mittelwerte), welche sowohl ökologisch relevante Stickstoffverbindungen als auch Luftstickstoff enthalten.



PG N-Haushalt CH (1996), GSK 1993 (1990).

Der Export von 173 kt N aus Umwelt entspricht 98 kt N Abfluss via Flüsse + 5 kt N Abfluss mit Grundwasser + 70 kt N Verfrachtung via Luft ins Ausland (Export)

Der Import von 25 kt N (gerundet) in Produkteherstellung/Produktnutzung entspricht 24 kt N Import Lebensmittel und übrige Stoffe + 0.5 kt N Holz-Import.

Der Import von 68 kt N in Umwelt entspricht 47 kt N Import via Luft aus dem Ausland + 21 kt N Zufluss via Flüsse

Der Fluss von 193 kt N aus Land- und Forstwirtschaft in Umwelt entspricht 83 kt N Denitrifikation Landwirtschaft (davon 8 kt N₂O-N) + 51 kt N NH₃-Ausgasung + 37 kt N NO₂-Verluste Landwirtschaft + 12 kt N NO₂-Verluste Wald + 10 kt N Denitrifikation Wald

Tab. A > Vergleich der grössten Stickstoffflüsse 1994/1990 vs. 2005

Vergleich der grössten Stickstoffflüsse aus der Stoffbilanz Schweiz 1994/1990 (PG N-Haushalt CH 1996; GSK 1993) mit aktuellen Stickstoffflüssen für das Jahr 2005 (vorliegende Studie). Die Bezeichnung der Flüsse bezieht sich auf die vorliegende Studie (Zahlen 2005). Die Bezeichnung der Stickstoffflüsse von 1994 wurde in Fällen, wo ein Interpretationsspielraum besteht, dazugeschrieben. Flüsse mit reinem Luftstickstoff (N₂) sind in **blauer Schrift** angegeben.

	1994/1990 [kt N]	2005 [kt N]	Bemerkungen zur Datenqualität	Erklärung der Trends 1994–2005
Land-/Forstwirtschaft				
L8: Futterpflanzen aus Landwirtschaftsböden in die Tierhaltung	180	132	Wert 1994, Futter von Landwirtschaftsböden in die Tierhaltung aus GSK 1993. Keine detaillierten Angaben dazu vorhanden; u.a. ist nicht ausgewiesen, ob N ₂ -Frachten mitberücksichtigt wurden. Wert vermutlich zu hoch.	
L1: Hofdünger/Weidegang aus der Tierhaltung in Landwirtschaftsböden	97	86	Wert 1994 nach Treibhausgasinventar, FOEN 2009b verwendet. Der Wert aus GSK 1993 (Fluss an Hofdünger von Tierhaltung in Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau) scheint mit 155 kt N zu hoch; es sind keine detaillierten Angaben dazu vorhanden.	
L4: Emissionen aus der Tierhaltung in die Atmosphäre L6 (r): Emissionen aus Landwirtschaftsböden in die Atmosphäre	51 (NH ₃ -Ausgasung) 8 (N ₂ O-Emissionen)	42 11	Denitrifikation von N ₂ mit hoher Unsicherheit verbunden. Unsicherheitsbereich 1994: 50–100 kt N.	Abnahme NH ₃ -Emissionen insgesamt wegen Rückgang der Tierzahlen und des Mineraldüngereinsatzes, Verbesserung des Hofdüngermanagements und Änderungen in der Tierhaltung. Hohe Unsicherheit bei Denitrifikation.
<u>Summe L4 + L6 (r)</u> <u>L6 (nr): Emissionen N₂ aus Landwirtschaftsböden in Atmosphäre</u>	<u>59</u> <u>75</u>	<u>53</u> <u>28</u>		
L3: Produkte/Nahrung aus der Tierhaltung L9: Ernteprodukte/Nahrung aus dem Pflanzenbau <u>Summe L3 + L9</u>	<u>42</u> (landw. Produkte)	35 10 <u>45</u>	Werte 1994 aus PG N-Haushalt CH 1996. Weitere Vergleichswerte 1994 nach OSPAR: Produkte/Nahrung aus der Tierhaltung: 28 kt N; Ernteprodukte/ Nahrung aus dem Pflanzenbau: 10 kt N.	Zunahme der tierischen Produkte wegen Intensivierung der Tierhaltung. Zunahme der Nutztierzahlen seit 2004 (siehe auch Abb. 16).
L5: Auswaschung/Abschwemmung aus Landwirtschaftsböden in die Hydrosphäre	37	34	Es sind keine aktuellen Werte verfügbar. Wert für 2005 hergeleitet (siehe Anhang, Fluss L5).	Abnahme gegenüber 1994 erwartet (Abschätzung).
L14: Auswaschung aus dem Wald in Hydrosphäre	12	9	Wert 1994 mit hoher Unsicherheit. Unsicherheitsbereich 1994: 8–16 kt N.	Die Auswaschung ist von der Waldfläche und der Deposition auf Waldböden abhängig. Eine leichte Zunahme der Waldfläche und eine deutliche Abnahme der Deposition haben stattgefunden. Dies erklärt eine Netto-Abnahme der Auswaschung.
L15 (r): Denitrifikation aus dem Wald (ohne N ₂) U11 (r): Denitrifikation aus übrigen Böden (ohne N ₂) <u>Summe L15 (r) + U11(r)</u> <u>L15 (nr) Denitrifikation N₂ aus dem Wald</u>	≤1 <u>9</u> (Denitrifikation Nicht-Landwirtschaftsböden)	1,1 0,4 <u>1,5</u> <u>6</u>	Denitrifikation von N ₂ mit hoher Unsicherheit verbunden. Unsicherheitsbereich 1994: 6–12 kt N.	Grosse Unsicherheiten; Denitrifikation schwer bestimmbar. N ₂ macht den grössten Teil des Flusses aus.
U13 (r): Denitrifikation N ₂ O, NO _x aus der Hydrosphäre <u>U13 (nr): Denitrifikation N₂ aus der Hydrosphäre</u> <u>Summe U13 (r) + U13 (nr)</u>	<u>13</u> (inkl. N ₂)	1 (ohne N ₂) <u>11</u> (N ₂) <u>12</u>	Grosse Schätzunsicherheit für N ₂ . Unsicherheitsbereich 1994: 9–18 kt N (inkl. N ₂).	

	1994/1990 [kt N]	2005 [kt N]	Bemerkungen zur Datenqualität	Erklärung der Trends 1994–2005
Produkteherstellung/-nutzung				
P8: Abwasser in ARA	Unbekannt, da interner Fluss	43		
P2: Emissionen NO _x , NH _y aus dem Verkehr in die Atmosphäre P3: Emissionen NO _x , NH _y aus Feuerungen in die Atmosphäre <u>Summe P2 + P3</u>	<u>47</u> (aus Verbren- nungsprozessen, davon 43 NO _x)	18 8 <u>26</u>	Gemäss neueren Bewertungen (FOEN 2009a) wurden die NO _x -Emissionen für 1994 damals um etwa 5 ktN überschätzt.	Abnahme der Emissionen dank Luftreinhalte- massnahmen.
P10: Export aus Lebensmittelindustrie und übrige Produkte	13	13	Abschätzung schwierig da durchschnitt- licher N-Gehalt von Exportprodukten unsicher ist. Unsicherheitsbereich 1994: 10–15 ktN	
Umwelt				
U14: Abfluss via Flüsse	98	73	Wert 1994: gemessene Frachten an Schweizer Grenze. Durchschnitt der Jahre 1986–1995. Daten NADUF, Eawag. Wert 2005: Mittelwert Rhein 1995–2007; hochgerechnet auf gesamte Schweiz. Daten NADUF, Eawag. Unsicherheitsbereich 1994: 90–110 ktN.	Abnahme dank erfolgreicher Reduktionsmassnahmen in, Industrie, Verkehr und Landwirtschaft
U16: Export via Grundwasser	5	<1	Daten 1994 mit hoher Unsicherheit.	Der Wert aus GSK 1993 (SRU 209) wird als zu hoch eingestuft, es liegen nur wenige Datenquellen vor.
U3: Deposition auf Wald U4: Deposition auf Landwirtschaftsböden U7: Deposition auf übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre U9: Deposition auf Gewässer <u>Summe U3 + U4 + U7 + U9 (gesamte Deposition)</u>	32 32 13 3 <u>80</u>	27 27 11 3 <u>69</u>	Die Gesamtdeposition für 1994 wurde gemäss aktuellster Kenntnisse der Depo- sitionsgeschwindigkeiten neu auf die vier Flächentypen Wald, Landwirtschafts- böden, übrige Böden und Wasser aufge- teilt, um eine Vergleichsbasis zu 2005 zu bilden.	Abnahme der Gesamt- deposition und der Deposition auf alle Flächentypen (ausser Wasser). Der gleichbleibende Wert von 3 kt N auf Gewässer erklärt sich aus Rundungsgründen.
U10: Verfrachtung via Luft ins Ausland (Export)	70	56	Unsicherheitsbereich 1994: 55–85 ktN (davon 30–55 NO _x und 20–35 NH _y).	Abnahme dank Luftreinhalte- massnahmen, primär NO _x reduziert.
U1: N-Fixierung durch landwirtschaftliche Nutzpflanzen	45	32	Datenqualität 1994 schlecht. Unsicherheitsbereich 1994: 30–60 ktN. Wert 1994 gemäss THG-Inventar Landwirtschaft und OSPAR: 37 ktN.	Abnahme möglich durch Abnahme Leguminosenanteil im Ackerbau. Schwierig abschätzbar.
U5: N ₂ -Verbrauch durch Verkehr, Feuerungen, Prozesse	47 (Verbren- nungsprozesse)	25		Abnahme dank Reduktions- massnahmen Luftreinhaltung
U12: Auswaschung aus übrigen Böden in Hydrosphäre	6	11	Datenlage 1994 und 2005 schlecht. Unsicherheitsbereich 1994: 2–10 ktN.	
U2: N ₂ -Fixierung Wald	12	5	Datenqualität 1994 schlecht. Unsicherheitsbereich 1994: 8–16 ktN.	Trend nicht real, methodisch bedingt. Vermutlich keine reale Zu- oder Abnahme.
Abfallwirtschaft				
A5: gereinigtes Abwasser aus der ARA in die Hydrosphäre	30	26		Abnahme wegen verbesser- ter Stickstoffelimination bei ARA.

	1994/1990 [kt N]	2005 [kt N]	Bemerkungen zur Datenqualität	Erklärung der Trends 1994–2005
Ausland → Inland				
I4: Mineraldünger (Import) in Landwirtschaftsböden	33	52	Summe Mineral- und Recyclingdünger 1994 gemäss THG-Inventar Landwirtschaft und OSPAR: 65 kt N.	Abnahme Mineraldünger- einsatz. Abnahme beim Einsatz von Recyclingdünger wegen Verbot von Klärschlamm für die Düngung / Übergangs- bestimmung für ausgewählte Flächen, die definitiv am 30. September 2006 auslief.
P1: Mineraldünger (Inlandproduktion)	33	<< 0,5		
<u>Summe Einsatz Mineraldünger</u>	<u>66</u>	<u>52</u>		
A7: Klärschlamm für Landwirtschaftsdünger		1		
A9: Kompost für Landwirtschaftsböden		3		
<u>Summe Recyclingdünger</u>	<u>5 (Klärschlamm, Kompost)</u>	<u>4</u>		
<u>Summe Mineral- und Recyclingdünger</u>	<u>71</u>	<u>56</u>		
I8: Import via Luft aus dem Ausland	47	44	Zahlen 1994 aus EMEP 1995. Unsicherheitsbereich 1994: 37–57 kt N (davon 27 NO _x und 20 NH _y).	
I2: Import Lebensmittel und übrige Stoffe	24	25		Zunahme Holznutzung.
I5: Holz-Import	0,5	2		
<u>Summe I2+I5</u>	<u>25</u>	<u>27</u>		
I3: Import Futter für die Tierhaltung	21	32	Wert 1994 gemäss OSPAR: 26 kt N.	Zunahme von Soja-Importen
I1: Zufluss via Flüsse	21	15	Wert für 2005 abgeschätzt aufgrund Daten von 1994. Unsicherheitsbereich 1994: 15–25 kt N.	

Interpretation

Der Input von Stickstoff über Futtermittel- und Handelsdüngerimporte, die durch Verbrennungsprozesse verursachten Stickoxid-Emissionen, sowie Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft sind die wichtigsten «treibenden» Stoffflüsse. Diese sind, gemeinsam mit der Art und Weise, wie die landwirtschaftlichen Böden bearbeitet und bepflanzt werden, verantwortlich für die Ankurbelung aller übrigen, sprich der «induzierten» Stoffflüsse wie Emissionen aus Böden, Auswaschung und Abschwemmung von Böden in die Hydrosphäre, Abflüsse ins Ausland, Depositionen aus der Atmosphäre auf die Böden. Im Zuge dieser induzierten Stoffflüsse entstehen die Probleme der hohen Stickstoffverluste: die sinkende Bodenfruchtbarkeit, der Verlust an Biodiversität, der Verlust von Wasserqualität, «dead zones» in Meeren, Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit u.ä.m. Um diese Probleme zu lösen, bedarf es erstens einer Reduktion der treibenden Stoffflüsse und zweitens einer Schliessung der Kreisläufe. Dabei wird generell eine der grossen Herausforderungen bei der Reduktion von Stickstoffverlusten darin bestehen, zu vermeiden, dass einseitige Vermeidungsstrategien zu Verlusten auf einem anderen Kanal führen. Eine integrale Betrachtungsweise muss über den Stickstoff hinausgehen und unter anderem die Ressourcen und die Überlegungen zum Klimaschutz einbeziehen.

Interpretation

Bei der Landwirtschaft haben die Handelsdüngerimporte zwar abgenommen, die Futtermittelimporte (v. a. Soja) sind aber angestiegen.

Bei den Luftschadstoffemissionen haben die oxidierten Verbindungen (NO_x) dank vielfältiger Reduktionsmassnahmen beim Verkehr und den Feuerungen deutlich abgenommen, die reduzierten Verbindungen (NH_y), die vorwiegend aus der Landwirtschaft stammen, hingegen nur wenig. Entsprechend sind auch die Depositionen von oxidier-

ten N-Verbindungen stärker rückläufig als jene von reduzierten N-Verbindungen. Die schweizerischen Immissionsgrenzwerte für NO₂ sind aber in den Stadtzentren und entlang der Nationalstrassen immer noch häufig überschritten. Die gesamten N-Depositionen überschreiten die Critical Loads für Stickstoff in der Schweiz noch grossräumig.

Der Stickstoffeintrag aus häuslichen und industriellen Abwässern in die Hydrosphäre hat sich trotz wachsender Bevölkerung reduziert, dank einem Investitionsprogramm, das gezielt zu verbesserten Eliminationsleistungen der Abwasserreinigungsanlagen führte. Die diffusen Einträge in die Hydrosphäre weisen ebenfalls einen sinkenden Trend auf. Das internationale Ziel, die Stickstoffeinträge in den Rhein und in die Nordsee zwischen 1985 und 2001 zu halbieren, wurde aber deutlich verfehlt, was auch auf die übrigen Mitgliedstaaten zutrifft.

Die Güterflüsse Lebensmittel, Erdölprodukte, Holz, etc. haben sich sowohl bei den Importen als auch bei den Exporten wenig verändert. Auffallend an diesen Flüssen ist der Wegfall der Inlandproduktion von Mineraldüngern und generell der Rückgang beim Gebrauch dieser Dünger. Gleichzeitig sind die Futtermittel-Importe – ein treibender Fluss – stark angestiegen (siehe oben).

Bei der Aktualisierung der Stoffflussanalyse wurden Datenlücken und grosse Unsicherheiten bei Stickstoffflüssen identifiziert. Deren Quantifizierung wäre sehr aufwändig. Das betrifft vor allem die induzierten Flüsse. Bei den treibenden Flüssen ist die Datelage besser.

Der Trend der vergangenen Jahre zeigt, dass die stickstoffhaltigen Luftschadstoffe aus Verkehr, Industrie und Haushaltungen wirkungsvoll reduziert werden konnten, während es nicht im selben Mass gelungen ist, die Stickstoffproblematik in der Landwirtschaft zu entschärfen. Waren früher Verkehr und Industrie die grössten Stickstoffemittenten, so ist es heute die Landwirtschaft. In den kommenden Jahren soll die Situation auch in diesem Sektor verbessert werden.

In Zukunft wird die Nutzung von Bioenergie (z. B. Agrotreibstoffe) intensiviert. Die laufenden Aktivitäten zielen daraufhin, Systeme mit hohem Wirkungsgrad zu entwickeln und betriebswirtschaftlich zu optimieren. Die Auswirkungen auf den Stickstoffkreislauf wurden vorerst noch wenig betrachtet. Diese könnten jedoch relevant sein, da bei der Produktion von Methangas aus organischer Substanz neben nicht reaktivem Luftstickstoff und weiteren Nebenprodukten auch Ammoniak anfällt.

1 > Ausgangslage

Stickstoff ist ein Schlüsselement für das Leben auf der Erde. Mit ihren Aktivitäten haben die Menschen in den vergangenen Jahrzehnten die Stickstoffumsätze vervielfacht, was sich zunehmend negativ auf die Biodiversität, die Bodenfruchtbarkeit und die menschlichen Gesundheit auswirkt. Zudem tragen sie zur Verstärkung der Klimaerwärmung bei. In zahlreichen internationalen Abkommen, Bundesgesetzen und Sektoren (Umwelt, Landwirtschaft) sind Ziele zur Reduktion von schädlichen Stickstoffverbindungen formuliert.

1.1 Ziel der Analyse

1.1.1 Problematik und frühere Studien

Stickstoff ist mit seinen vielfältigen Erscheinungsformen und dank seiner Funktion als Nährstoff ein Schlüsselement für die gesamte organische Natur. Er ist der wesentliche Baustein für die Produktion von lebensnotwendigem Eiweiss und somit für die Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung. Die Menschen haben allerdings mit ihren Entwicklungen in Verkehr, Industrie, Haushalt und Landwirtschaft in den letzten Jahrzehnten grosse Mengen reaktiver Stickstoffverbindungen in Luft, Boden und Wasser emittiert und damit erhebliche Konzentrationsstörungen in der Umwelt verursacht. Die Emission von Stickstoffverbindungen wie Ammonium/Ammoniak ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$) Stickstoffdioxid (NO_2) usw. in die Umweltmedien, führt zu Schädigungen von Menschen, Tieren und Pflanzen und ihren Lebensgemeinschaften. Distickstoffoxid (N_2O , Lachgas) und Stickstofftrifluorid (NF_3) sind starke Klimagase und tragen zur Klimaerwärmung bei. Nitrat (NO_3^-) – ein Pflanzennährstoff – ist humantoxikologisch von Bedeutung und trägt zur Überdüngung von Oberflächengewässern inklusive flache Meere (Nordsee) bei.

Aus diesem Grund ist die Kenntnis der Stickstoffflüsse und deren zeitlichem Verlauf relevant für die Erhaltung von Volksgesundheit, Ernährungssicherheit, Bodenfruchtbarkeit und Biodiversität. Quantität und Qualität der Stickstoffflüsse zu kennen, ist Voraussetzung für Strategieentwicklung und Massnahmenplanung in Landwirtschafts- und Forstwirtschaftspolitik, in Sozial- und Präventivmedizin sowie beim Umwelt- und im Klimaschutz.

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 (PG N-Haushalt CH 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.

Die Massnahmen fanden Eingang in Landwirtschafts- und Umweltpolitik und wurden teilweise umgesetzt. Vom Erreichen der Ziele ist die Schweiz heute allerdings noch weit entfernt. Der angestrebte Reduktionspfad kann nicht eingehalten werden, seit 2000 zeigen sich sogar punktuell wieder wachsende Stickstoffemissionen in der Luft als Folge von Wachstum, das die erzielten Emissionsreduktionen je Energieeinheit überkompensiert, oder als Folge von Zielkonflikten in der Landwirtschaft.

Dass die ergriffenen Massnahmen nicht immer den erwarteten Erfolg bringen, hat unter anderem auch mit den Verwandlungskünsten des Stickstoffs zu tun: Die Reduktion einer Stickstoffverbindung kann zu einer Erhöhung einer anderen Verbindung in einem anderem Bereich führen: Eine der grossen Herausforderungen bei der Reduktion von Stickstoffverlusten besteht darin, dass einseitige Vermeidungsstrategien zu Verlusten auf einem anderen Kanal führen können (Zielkonflikte). Dabei ist aber zu beachten, dass im Sinne einer integralen Betrachtung nicht nur die Verhältnisse im Kompartiment Landwirtschaft betrachtet werden, sondern auch die durch Vermeidungsstrategien verursachten Veränderungen bei induzierten N-Flüssen wie z. B. bei der durch N-Deposition induzierten Nitrat-Auswaschung und N₂O-Emission bei Waldökosystemen.

Die Kenntnis der Stickstoffflüsse im GESAMTSYSTEM ist – wie es die Strategiestudie im Jahr 1996 schon aufzeigte – daher notwendig, um Massnahmen zu treffen, die den Stickstoffumsatz insgesamt zu reduzieren vermögen.

1.1.2 Aktualisierung der Stickstoffbilanz Schweiz

Der vorliegende Bericht beschreibt die aktuellen Stickstoffflüsse in der Schweiz. Er dient als Basis für eine Aktualisierung der Stickstoffstrategie und Planung künftiger Massnahmen. Adressaten des Berichts sind politische Entscheidungsträger, Landwirtschafts- und Umweltfachleute in öffentlichen Verwaltungen und Privatwirtschaft sowie Hochschulen, die sich im weitesten Sinne mit Stickstoff befassen.

Der Bericht hat nicht das Ziel, Risiken aufzuzeigen und Strategien vorwegzunehmen. Die Darstellung der Mengenflüsse soll aber die sachliche Grundlage darstellen, um Risikoabschätzung vorzunehmen und Strategien zu aktualisieren.

Der Bericht fokussiert auf die Stickstoffflüsse im *Bezugsjahr 2005* und beschreibt den aktuellen Stickstoffkreislauf in der Schweiz. Im Weiteren zeigt er teilweise auf, welche Trendentwicklungen seit der letzten Untersuchung stattgefunden haben.

1.1.3 Methoden und Datenquellen

Methodisch basiert die Systemanalyse auf der Systematik des BAFU, wie sie in der Schriftenreihe Nr. 251 für Stoffflussanalysen vorgeschlagen wurde (BUWAL 1996a).

Im Vergleich mit den früheren Stoffflussanalysen (GSK 1993 und PG N-Haushalt CH 1996) wurden Prozesse teilweise feiner aufgelöst oder neue hinzugefügt (z. B. Vergärungsanlagen).

Für die Aktualisierung der Stoffflüsse wurden Daten benutzt, die in den Abteilungen des BAFU erhoben oder gesammelt werden oder die von weiteren Amtsstellen des Bundes und der Kantone stammen. Hier die wichtigsten Detaillieferanten:

- > BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und NIS: Luftschadstoffinventar (FOEN 2009a) und Treibhausgasinventar (FOEN 2009b)
- > BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe (BAFU 2008)
- > ART: Ein wesentlicher Teil der Landwirtschaftsdaten stammt von der Eidgenössischen Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART 2008a, 2008c).

Bezüglich der Qualität der Daten kann die Aussage gemacht werden, dass aufgrund der Verpflichtungen, die der Schweiz aus der Klimakonvention und dem Kyoto-Protokoll erwachsen (Klimareporting¹), die BAFU-Datenbank der Luftschadstoff- und Klimagasemissionen vollständig aktualisiert worden ist. Die Datenbasis für die Schweiz konnte damit wesentlich verbessert werden.

Im Weiteren wurden Informationen zu den Unsicherheiten der Stoffflüsse gesammelt. Für einige sind im Rahmen des Klimareporting Unsicherheiten detailliert und quantitativ erhoben worden, für andere gibt es keine konkreten Hinweise. Wo Daten vorhanden sind, werden sie genannt, wo unterschiedliche Angaben für einen Fluss vorliegen aber ohne Unsicherheiten, wird die Differenz (z. B. 12–16 kt N) als Hinweis auf die Grösse der möglichen Unsicherheit interpretiert.

1.1.4 Überblick über den Status quo

Der Trend der vergangenen Jahre zeigt, dass die stickstoffhaltigen Luftschadstoffe aus Verkehr, Industrie und Haushaltungen wirkungsvoll reduziert werden konnten, während es nicht im selben Mass gelungen ist, die Stickstoffproblematik in der Landwirtschaft zu entschärfen. Waren früher Verkehr und Industrie die grössten Stickstoffemittenten, so ist es heute die Landwirtschaft (EKL 2005). In den kommenden Jahren soll die Situation auch in der Landwirtschaft verbessert werden.

Ausserdem hat das Bundesamt für Landwirtschaft BLW in Zusammenarbeit mit dem BAFU die Wissenslücken im Umfeld Stickstoffflüsse abklären lassen (BLW/BAFU 2010).

¹ www.climatereporting.ch [10.05.2009]

Weiter hat das BLW eine Aktualisierung der ETH Studie über betriebswirtschaftliche Aspekte verschiedener Reduktionsszenarien (IAW 2006) in Auftrag gegeben und hat soeben neue Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau herausgegeben (GRUDAF 2009). Diese enthalten Informationen für eine «bedarfsgerechte Düngung zur Produktion von qualitativ hoch stehenden Nahrungs- und Futtermitteln; dabei sollen im Sinne einer nachhaltigen Landwirtschaft die Fruchtbarkeit des Bodens bewahrt und die Umwelt geschont werden».

Ausserdem haben BAFU und BLW kürzlich quantitative Umweltziele für die Landwirtschaft festgelegt (BAFU/BLW 2008) unter anderem für Ammoniak- und Lachgasemissionen sowie für Stickstoffeinträge in die Gewässer.

In Zukunft wird die Nutzung von Bioenergie (z. B. Agrotreibstoffe) intensiviert. Die laufenden Aktivitäten zielen daraufhin, Systeme mit hohem Wirkungsgrad zu entwickeln und betriebswirtschaftlich zu optimieren. Die Auswirkungen auf den Stickstoffkreislauf wurden vorerst noch nicht betrachtet. Wir stehen vor der Tatsache, dass bei der Produktion von Methangas aus organischer Substanz erhebliche Mengen an Stickstoff anfallen.

Auch in den anderen Sektoren sind Massnahmen in der Umsetzung oder vorgesehen:

- > Die Abgasvorschriften für Motorfahrzeuge wurden nochmals verschärft: Seit 1. September 2009 gilt die Euro 5 Norm für neue Personenwagen, ab 2014 Euro 6 Norm mit weiteren Senkungen der Grenzwerte für Stickoxide.
- > Dank Zielvereinbarungen zur Befreiung von der CO₂-Abgabe werden Emissionsreduktionen realisiert (z. B. Zementindustrie). Diese verringern nicht nur Klimagase, 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).

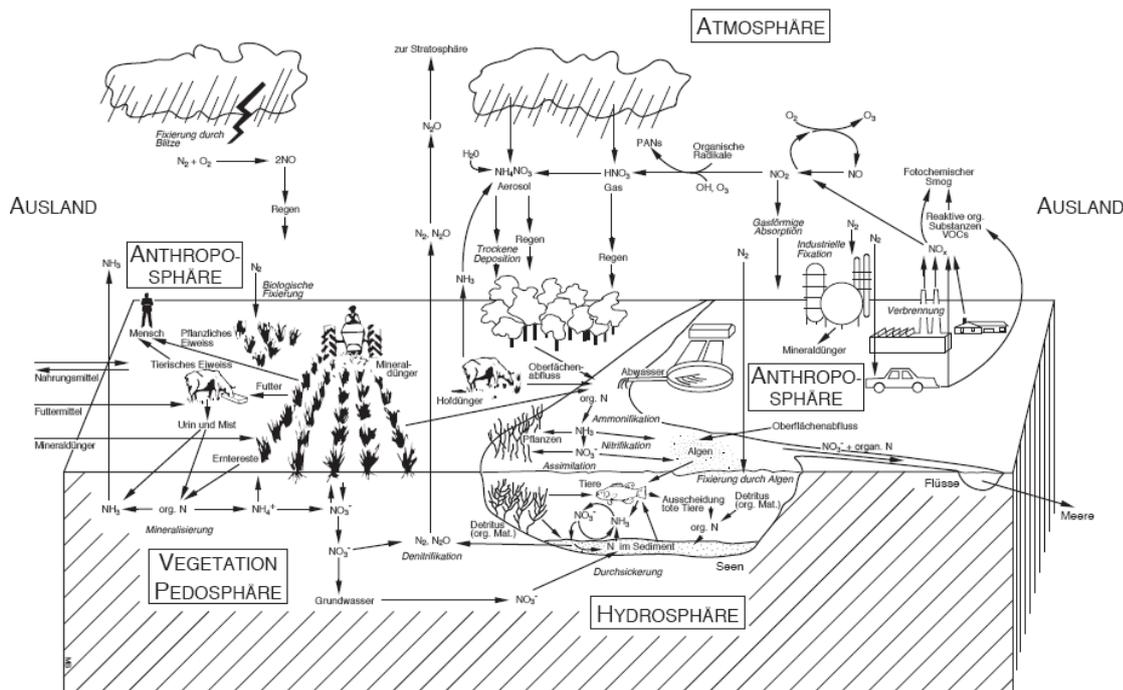
1.2

Vorkommen und Bedeutung des Stickstoffs in der Umwelt

Die folgende Figur zeigt in vereinfachter Weise das Vorkommen von Stickstoff in den verschiedenen Sphären und die vielfältigen Erscheinungsformen des Stickstoffs.

Abb. 1 > Stickstoffkreisläufe

Vereinfachte Darstellung des Stickstoffkreislaufs in der Natur und der anthropogen beeinflussten Umwelt (GSK 1993).
In den letzten Jahren sind zusätzliche Prozesse (z. B. Vergärung) relevant geworden, die in der Figur nicht enthalten sind.



Unter natürlichen Bedingungen sind Stickstoffeinträge in Ökosysteme gering, sodass Stickstoff in fast allen terrestrischen und einigen aquatischen Ökosystemen der limitierende Faktor ist, auf den sich die Lebensgemeinschaften in der Evolution eingestellt haben. Pflanzen und Tiere ungestörter Ökosysteme nutzen Stickstoff deshalb sehr nachhaltig (GSK 1993, PG N-Haushalt CH 1996). Abbauprodukte werden überwiegend innerhalb des jeweiligen Ökosystems verwertet, sodass Verluste durch Auswaschung oder Entgasung gering sind. Die Ökosysteme machen sich dabei die Eigenschaft des Stickstoffs zunutze, dass seine Verbindungen sehr mobil sind und über natürliche chemische Reaktionen ineinander umgewandelt werden. Aufgrund chemischer Naturgesetze treten alle emittierten Stickstoffformen früher oder später irgendwo als Nitrat auf. Unter Sauerstoffausschluss wird Nitrat von denitrifizierenden Bakterien wieder zu Lachgas (N_2O) oder elementarem Stickstoff (N_2) reduziert.

Die Menschen haben mit ihren Aktivitäten in die natürlichen Stickstoffkreisläufe eingegriffen, was in den letzten Jahrzehnten die Stickstoffumsätze zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre, Pflanzen und Böden vervielfacht hat mit negativen Folgen auf die Qualität der natürlichen Ressourcen, auf Bodenfruchtbarkeit, Biodiversität und auf die Gesundheit der Menschen.

1.3 Bisherige Regulierungen

1.3.1 National

Mit dem Umweltschutzgesetz von 1984 sollen nach Art. 1 Menschen, Tiere und Pflanzen sowie ihre Lebensräume vor schädlichen und lästigen Einwirkungen geschützt werden. Wie im Gewässerschutzgesetz kommt dabei das Verursacherprinzip zur Anwendung. Von Menschen verursachte Emissionen sollen gemäss Grundsatz des USG an der Quelle und unabhängig von der bereits bestehenden Umweltbelastung begrenzt werden.

Umweltschutzgesetz
(USG, SR 814.01)

Das 1991 erlassene Gewässerschutzgesetz soll die «Gewässer vor nachteiligen Einwirkungen schützen». Das Gesetz regelt den Umgang mit Hofdünger der landwirtschaftlichen Betriebe mit Nutztierhaltung und setzt einen Grenzwert von generell drei Düngergrossvieheinheiten (DGVE) pro Hektar, wobei dieser gemäss Art. 14, Abs. 4 GSchG kantonal nach Bodenbelastbarkeit, Höhenlage und topographischen Verhältnissen verschärft wird.

Gewässerschutzgesetz
(GSchG, SR 814.20) /
Gewässerschutzverordnung
(GSchV, SR 814.201)

Die im GSchG festgesetzte Höchstgrenze von drei DGVE pro Hektar ist in der Gewässerschutzverordnung (GSchV) entsprechend der jährlich ausgeschiedenen Nährelemente der Nutztiere berechnet und auf 105 kg Stickstoff und 15 kg Phosphor pro DGVE festgelegt.

Nach Art. 61 GSchG leistet der Bund den Kantonen Abgeltungen für Massnahmen zur Stickstoffelimination bei zentralen Abwasseranlagen, soweit internationale Vereinbarungen dies notwendig machen. Nach Art. 62a wiederum kann der Bund unter bestimmten Bedingungen Abgeltungen an Massnahmen der Landwirtschaft zur Verhinderung der Abschwemmung und Auswaschung von Stoffen (vor allem Stickstoff) in ober- und unterirdische Gewässer gewähren.

In Anhang 2 der GSchV finden sich die Bestimmungen über die Wasserqualität. Hervorzuheben bezüglich Stickstoff ist die numerische Anforderung von 25 mg Nitrat pro Liter (entspricht 5,6 mg/l N) für Grundwasser, welches als Trinkwasser genutzt wird. Im Weiteren finden sich in Anhang 3 Anforderungen an die Einleitung von Abwasser in empfindliche Gewässer. Konkret wurde festgeschrieben, dass im Zeitraum 1995 bis 2005 die Kantone im Einzugsgebiet des Rheins die Einleitung von Stickstoff mittels Modernisierung der Kläranlagen um insgesamt 2600 Tonnen pro Jahr zu verringern haben.

Im Zusammenhang mit dem Umweltschutz wird in der Chemikalien-Risikoreduktionsverordnung (ChemRRV) der Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen geregelt. Die Anwendung von Düngemitteln sowie der Umgang mit Kompost, Gärgut etc. sind im Anhang konkret geregelt. Stickstoffhaltiger Dünger soll nur dann ausgebracht werden, wenn die Pflanzen diesen auch aufnehmen können. Zudem verbietet die Verordnung in Anhang 2.6. (Ziffer 3.3.1) das Ausbringen von Dünger in Gewässer, im Wald, in Hecken und Feldgehölzen, in Natur-

Chemikalien-
Risikoreduktionsverordnung
(ChemRRV, SR 814.81)

schutzgebieten, in Riedgebieten und Mooren, sowie in einem Streifen von drei Metern um Gewässer und um Hecken und Feldgehölze.

Auch der Einsatz von Klärschlamm als Dünger ist seit kurzem verboten (Ende der Übergangsfrist: 30. September 2008).

Im Zusammenhang mit dem USG regelt die Luftreinhalteverordnung (LRV) von 1986 die höchstzulässige Belastung der Luft, um Menschen, Tiere, Pflanzen, deren Lebensgemeinschaften und Lebensräume sowie den Boden vor schädlichen und lästigen Luftverunreinigungen zu schützen. In den Artikeln 3 bis 11 der LRV finden sich die Bestimmungen über die Emissionsbegrenzungen. Diese sind von der Behörde vorsorglich so weit zu begrenzen, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist. Darüber hinaus kann die Behörde Emissionsbegrenzungen verschärfen, falls eine Anlage übermässige Immissionen verursacht. Weiter gibt die LRV Immissionsgrenzwerte für Stickstoffdioxid vor. Sind diese trotz vorsorglicher Emissionsbegrenzungen überschritten, ist die Kantonsbehörde nach den Artikeln 31 bis 34 LRV verpflichtet, einen Massnahmenplan zu erstellen und die Massnahmen zu verwirklichen. Sämtliche Kantone haben solche Pläne erstellt, da generell in der Schweiz die Immissionsgrenzwerte für Stickoxide und Ozon überschritten werden. Bei besonders hohen Ammoniakverlusten aus der Landwirtschaft kann eine Behörde, wie z. B. der Kanton Luzern (UWE 2007), auch einen Teilmassnahmenplan Ammoniak erstellen, der den Handlungsbedarf auf Überschreitungen von Critical Loads (siehe Kap. 1.3.2) abstützt. Da viele Massnahmen in die Zuständigkeit des Bundes fallen, können die Kantone ihre Massnahmenpläne dem Bundesrat unterbreiten und entsprechende Anträge stellen.

Luftreinhalteverordnung
(LRV, SR 814.318.142.1):
Vorsorgliche und verschärfte
Emissionsbegrenzung,
Immissionsgrenzwerte für
Stickstoffdioxid

Im Jahr 2002 legte der Bundesrat in der Botschaft zur Weiterentwicklung der Agrarpolitik 2007 erstmals mittelfristige agrarökologische Etappenziele fest. Von sieben Zielen betrafen drei den Stickstoff:

Agrarpolitik 2007/2011:
Stickstoffeffizienz,
Stickstoffverluste

- > Reduktion der umweltrelevanten N-Verluste um 23 % bis 2005 gegenüber dem Basisjahr 1994
- > Reduktion der Ammoniak-Emissionen um 9 % bis 2005 (Basisjahr 1990)
- > Nitratgehalt unter 40 mg/l in 90 % der Trinkwasserfassungen, deren Zuströmbereich von der Landwirtschaft genutzt wird.

Im Juni 2008 brachte eine aktuelle Einschätzung der Zielerreichung aufgrund der Zahlen von 2005 und neuer Erkenntnisse hervor, dass das Ziel der N-Bilanz mit einem tatsächlichen N-Überschuss von 111 000 t nicht erreicht wurde (BLW 2008).

Das Nitrat-Ziel hingegen wurde erreicht, da 93 % der Trinkwasserfassungen einen Nitratgehalt von unter 40 mg/l auswiesen. Die verwendete Zielgrösse macht jedoch eine Interpretation der Entwicklung der von der Landwirtschaft beeinflussten Nitratgehalte im Grundwasser schwierig, da Trinkwasserfassungen mit hohen Nitratgehalten teilweise nicht mehr genutzt werden und aus der betrachteten Kategorie fallen. Zudem ist die Übersicht über die Trinkwasserfassungen in der Schweiz nicht repräsentativ. Für Ammoniakemissionen wurde bisher eine Reduktion von gegen 20 % für die Zeit zwischen 1990 und 2002 angenommen. Diese wurde nun angezweifelt, insbesondere weil die berechnete Reduktion der Ammoniakemissionen eine stärkere Verminderung des N-Bilanzüberschusses in diesem Zeitraum hätte erwarten lassen. Es hat sich herausge-

stellt, dass das bisher für die Prognose der landwirtschaftlichen Ammoniakemissionen verwendete Modell verschiedene Teilprozesse nicht richtig abgebildet hat (BLW 2008).

In der Botschaft zur Weiterentwicklung der Agrarpolitik 2011 (AP 2011) wurde der agrarökologische Handlungsbedarf neu beurteilt. Folgende Ziele wurden gesetzt:

- > Reduktion der N-Überschüsse um 23 % bis 2015 auf 95 000 t N gegenüber dem Ausgangswert für 1994 von 123 000 t N (N-Bilanz nach OSPAR).
- > Reduktion landwirtschaftlicher NH₃-Emissionen Reduktion um 23 % bis 2009 gegenüber 1990.

Das ursprüngliche Ziel bezüglich N-Bilanz wurde dementsprechend von 2005 auf 2015 verschoben, dasjenige für die Ammoniakemissionen für 2009 auf 41 000 t N festgelegt. Zum Nitrat wurde kein weiteres Ziel definiert (BLW 2008).

Art. 104 der Bundesverfassung spricht sich für eine nachhaltige und auf den Markt ausgerichtete landwirtschaftliche Produktion aus. Zudem wird die rechtliche Basis für die Ergänzung des bäuerlichen Einkommens durch Direktzahlungen geschaffen. Diese unter der Voraussetzung eines ökologischen Leistungsnachweises. Das Landwirtschaftsgesetz (LWG, SR 910.1) konkretisiert den ökologischen Leistungsnachweis unter anderem indem eine ausgeglichene Düngerbilanz gefordert wird. Die Details werden in der Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (Direktzahlungsverordnung, DZV, SR 910.13) geregelt.

Landwirtschaftsgesetzgebung

Nach dem Grundsatz von Art. 77a LWG (unter Titel 3a «Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen») richtet der Bund Beiträge an regionale und branchenspezifische Projekte zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit in der Nutzung natürlicher Ressourcen aus. Die Höhe der Beiträge richtet sich laut Art. 77b LWG nach der ökologischen und agronomischen Wirkung des Projekts, namentlich der Steigerung der Effizienz im Einsatz von Stoffen und Energie.

Der Bundesrat kann nach Art. 10 des Lebensmittelgesetzes (LMG, Stand April 2008) auf Grund einer toxikologischen oder einer epidemiologischen Beurteilung Höchstkonzentrationen für Fremd- und Inhaltsstoffe festlegen. In der Fremd- und Inhaltsstoffverordnung (FIV) ist in der Folge für Trinkwasser neben Normen für Ammonium und Nitrit ein Toleranzwert von 40 mg Nitrat pro Liter vorgegeben worden.

Lebensmittelgesetz

2008 haben das BAFU und das BLW gemeinsame Umweltziele in der Landwirtschaft erarbeitet (BAFU/BLW 2008, Umwelt-Wissen Nr. 08|20). Die Umweltziele beruhen auf bestehenden rechtlichen Grundlagen wie Gesetzen, Verordnungen, internationalen Abkommen und Bundesratsbeschlüssen und wurden gemäss wissenschaftlichen Erkenntnissen konkretisiert.

Umweltziele Landwirtschaft

Bezüglich Stickstoff 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 Zuströmbereich 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.

Für das Ausgangsjahr 1985 sind jedoch nur konkrete Daten für den Abfluss des Rheins in Weil vorhanden. Jährlich sind damals 75 200 t N abgeflossen. Der Anteil aus diffusen Quellen (Landwirtschaft) unterhalb der Seen machte gegen 40 % aus (Prasuhn und Sieber 2005).

1.3.2 International

Die 1979 in Genf unterzeichnete UN ECE Konvention über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigungen («Convention on Long-range Transboundary Air Pollution» CLRTAP²), auch «Genfer Konvention» genannt, ist 1983 in Kraft getreten. Das gemeinsame Ziel der ratifizierenden Staaten ist eine Reduktion der Luftverunreinigungen und deren schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Auf dieser Grundlage wurden bisher sieben Übereinkommen mit jeweils konkreten Emissionsbegrenzungen verhandelt, u.a. 1988 für Stickoxide (UNECE 2009a).

Genfer Konvention (CLRTAP) /
Göteborg-Protokoll

Das Göteborg-Protokoll der UN/ECE Konvention zur Bekämpfung der Versauerung, der Eutrophierung und des troposphärischen Ozons, welches die Schweiz, die meisten Länder Europas sowie USA und Kanada unterzeichnet haben, legt quantitative Emissionsziele für verschiedene Schadstoffe fest, u.a. auch für die N-haltigen Luftschadstoffe Stickoxide und Ammoniak (UNECE 2009b).

Das Göteborg-Protokoll enthält unter anderem das längerfristige Ziel, die Überschreitungen der Critical Loads für Stickstoff- und Säureinträge schrittweise abzubauen. Die Emissionshöchstmengen des jetzigen Protokolls stellen einen ersten diesbezüglichen Schritt dar, genügen aber gerade bei den Stickstoffeinträgen bei weitem nicht, um die Critical Loads einzuhalten. Das Göteborg-Protokoll formuliert deshalb zusätzlich die Verpflichtung, noch vor 2010 ein weiteres Etappenziel auszuhandeln (UNECE 2009b).

Für die Schweiz wurden als Ziele folgende Emissionsobergrenzen festgelegt:

- > Die jährlich ausgestossene Menge an Stickoxiden darf in 2010 höchstens noch 79 000 t NO_x³ betragen, was einer Reduktion von 52 % gegenüber 1990 entspricht.
- > Für Ammoniakemissionen besteht die Verbindlichkeit, diese im Zeitraum 1990 bis 2010 von 72 000 t NH₃/Jahr auf 63 000 t NH₃/Jahr zu senken⁴, was einer Reduktion um -13 % entspricht.

² www.unece.org/env/lrtap

³ NO_x wird hier angegeben als NO₂. Umrechnung auf t N für den Vergleich mit den unten folgenden Stoffflüssen: 79 000 t NO_x entsprechen 24 043 t N.

Auf der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro wurde die Klimakonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change UNFCCC⁵) verabschiedet. Die Klimakonvention mit dem Ziel der Stabilisierung der Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau, das eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert, ist 1994 in Kraft getreten. Quantifizierbare Ziele wurden jedoch erst an der 3. Konferenz der Vertragsparteien 1997 in Kyoto mit dem Kyoto-Protokoll beschlossen (UNFCCC 1997).

UNO-Klimakonvention und Kyoto-Protokoll (Lachgas, Stickoxide)

Das Kyoto-Protokoll, welches 2005 für 128 Vertragsstaaten in Kraft getreten ist, verpflichtet die unterzeichnenden Industriestaaten, den Ausstoss der Treibhausgase im Zeitraum 2008–2012 insgesamt um 5 % unter das Ausgangsniveau von 1990 zu senken⁶. Die Schweiz hat sich mit ihrer Ratifizierung 2003 zu einer 8%igen Reduktion verpflichtet. Für die einzelnen Treibhausgase, zu denen auch N₂O gehört, bestehen keine expliziten Reduktionsziele. Auch für NO_x als indirektes Treibhausgas gibt es keine quantitative Reduktionsverpflichtung (UNFCCC 1997).

Das OSPAR-Übereinkommen⁷ zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks ist benannt nach seinen Vorläufern, der Oslo-Konvention und der Paris-Konvention. Die Vertragsparteien, darunter auch die Schweiz, verpflichten sich, alle nur möglichen Massnahmen zu treffen, um Verschmutzungen zu verhüten und zu beseitigen und unternehmen alle notwendigen Schritte zum Schutz des Meeresgebiets vor den nachteiligen Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten, um die menschliche Gesundheit zu schützen, die Meeresökosysteme zu erhalten und, soweit durchführbar, beeinträchtigte Meereszonen wiederherzustellen (OSPAR 2009).

OSPAR-Übereinkommen / PARCOM

Bereits mit der vorangegangenen PARCOM-Empfehlung 88/2 über die Reduzierung von Nährstoffeinträgen in das Vertragsgebiet des Paris-Übereinkommens, wurde eine Reduktion von Stickstoffeinträgen um 50 % für den Zeitraum 1985 bis 1995 vereinbart. Dieses Vertragsziel wurde jedoch von keinem Vertragsstaat erreicht. Dem OSPAR-Übereinkommen ist die Schweiz als Oberlieger im Einzugsgebiet der Nordsee 1994 beigetreten. Das Ziel ist eine Reduktion der Stickstoffeinträge in die Gewässer um 50 % gegenüber 1985 (FAL 2003).

Das Ziel der Internationalen Nordsee-Konferenzen ist es, politische Impulse für die Arbeit bestehender politischer Institutionen (wie der OSPAR-Kommission) zu geben und die wirksame Umsetzung der von diesen Organisationen verabschiedeten Konventionen und Strategien sicherzustellen. Zu den Mitgliedstaaten der internationalen Nordseekonferenzen zählen die Nordseeanrainer Belgien, Deutschland, Dänemark, Frankreich, Grossbritannien, die Niederlande, Norwegen, Schweden, die Europäische Kommission und seit der 3. INK von 1990 auch die Schweiz.

Internationale Nordseeschutz-Konferenzen (INK)

An der 5. INK in 2002 in Bergen wurde festgestellt, dass beim Stickstoff die Zielerreichung erheblich hinter der Planung liegt, wegen der verspäteten Umsetzung der Richtlinie der Europäischen Gemeinschaft («Nitrat-Richtlinie») und der regional verzöger-

⁴ 72 000 t NH₃ entsprechen 59 000 t N; 63 000 t NH₃ entsprechen 51 640 t N (1 t N ≈ 1.22 t NH₃).

⁵ <http://unfccc.int>

⁶ Dieses Reduktionsziel umfasst die gewichtete Summe der sechs Kyoto-Treibhausgase CO₂, CH₄, N₂O, HFC's, PFC's und SF₆.

⁷ www.ospar.org/

ten Umsetzung der Richtlinie der EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser (IAW 2006).

Die Unterzeichnerstaaten und die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)⁸ haben als Folge der im Laufe der achtziger Jahre deutlich gewordenen Überdüngungsauswirkungen beschlossen, die Stickstoffeinträge in die Nordsee von 1985 so bald als möglich (Zielgrösse 2002/2005) um 50 % zu vermindern, wobei 1985 28–34 % aller N-Einträge aus der Landwirtschaft stammten (BLW 2004). Die Schweiz hat den Beschluss unterzeichnet. Eine Bestandesaufnahme für das Jahr 1996 zeigte jedoch, dass die gesamten anthropogenen Stickstoffeinträge nur um 26 % verringert werden konnten (IKSR 2000).

Nordsee-Anliegerstaaten und
Internationale Kommission zum
Schutz des Rheins (IKSR)

Das Übereinkommen der Bodenseeanliegerstaaten (IGKB)⁹ trat 1961 in Kraft, mit dem Ziel, den Bodensee vor Verunreinigungen zu schützen. 1999 wurde von der Internationalen Bodenseekonferenz ein Massnahmenplan zu Landwirtschaft und Gewässerschutz erarbeitet (IGKB 2009).

Internationale
Gewässerschutzkommission für
den Bodensee (IGKB)

Im Dezember 1990 hat der Rat der EG die Richtlinie 91/676/EWG (Nitrat-Richtlinie)¹⁰ zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigungen durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen verabschiedet.

Nitrat-Richtlinie der EU

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 von den Mitgliedstaaten mittels Programmen und Grenzwerten umgesetzt werden soll. Konkret werden die Mitgliedstaaten verpflichtet, den Einsatz von Hofdünger derart einzuschränken, dass der Stickstoffeintrag pro Hektar maximal 170 kg beträgt. Gemäss der Richtlinie gelten Gewässer als gefährdet, wenn Grundwasser mehr als 50 mg Nitrat/l enthält (Europa 2009).

1.4 Bisherige Stoffflussanalysen Stickstoff

Die erste Stoffflussanalyse für die Schweiz wurde 1993 durch die Eidgenössische Gewässerschutzkommission erstellt (GSK 1993). Sie quantifizierte die Stoffflüsse mit dem Bezugsjahr 1990 (Hydrosphäre 1986) und ordnete sie den «Prozessen» Anthroposphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre und Pedosphäre zu. Diese Struktur wird auch heute noch benutzt und bildet ein Basiselement für die vorliegende Aktualisierung. Im zugehörigen Bericht wurden als wichtigste «treibende» Flüsse erkannt (GSK 1993):

Stoffflussanalysen Schweiz

⁸ www.iksr.org/

⁹ www.igkb.de/

¹⁰ <http://europa.eu/scadplus/leg/de/vb/l28013.htm>

- > der Import von Futtermitteln und Handelsdüngern (92 ktN)
- > Stickoxidemissionen in die Atmosphäre (56 ktN)
- > Stickstoffeintrag via Abwässer in die Hydrosphäre (46 ktN)¹¹.

Als Folge der «treibenden» Flüsse werden natürlich vorkommende Flüsse vergrössert («induzierte» Flüsse):

- > Emissionen aus der Pedosphäre in die Atmosphäre (180 kt N, davon 40 % in Form reaktiver Verbindungen und 60 % als N₂)
- > Auswaschung aus Böden in die Hydrosphäre (66 ktN).

Ausserdem wurden Stoffflussanalysen für vier Regionen berechnet und charakteristische Unterschiede in der Stickstoffbilanz zwischen urbanen, ländlichen und alpinen Regionen identifiziert. Schliesslich wurden Massnahmen zur Reduktion der Stickstoffflüsse in die Hydrosphäre vorgeschlagen, deren Auswirkungen quantifiziert, die Kosten geschätzt und Empfehlungen formuliert.

Im Anschluss an diese umfassende Untersuchung entwickelte eine von den beiden Eidgenössischen Departementen für Inneres und Volkswirtschaft eingesetzte «Projektgruppe Stickstoffhaushalt Schweiz» eine Strategie zur Reduktion der Stickstoffemissionen in der Schweiz (PG N-Haushalt CH 1996). Sie schrieb die Stickstoffbilanz der Schweiz zunächst für das Jahr 1994 fort. Sie konkretisierte und ergänzte Massnahmen zur Reduktion von Stickstoffemissionen in Atmosphäre und Hydrosphäre, ergänzte die ökologischen Ziele und diskutierte ausführlich Wirkung und Kosten der Massnahmen. Dabei stand folgende Fragestellung im Vordergrund: «Wie setze ich die vorhandenen Mittel ein, damit die Reduktion der Emissionen von schädlichen N-Verbindungen möglichst hoch wird?» Ein Szenario 2002 zeigte auf, wie sich die Stickstoffbilanz nach Umsetzung der von der Projektgruppe vorgeschlagenen Massnahmen bis ins Jahr 2002 entwickeln würde: Die möglichen Reduktionen von Emissionen in die Atmosphäre von 109 kt N auf 91 kt N (-17 %) und in die Hydrosphäre von 92 kt N auf 72 kt N (-22 %) beurteilte die Gruppe zwar als positiv, aber zu wenig weit reichend, um die ökologischen Ziele auch wirklich zu erreichen.

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene publizierte 2005 den Status-Bericht «Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz» mit aktualisierten Emissionsdaten. Mit enthalten im Bericht war auch eine einfache Stoffflussanalyse der Schweiz (EKL 2005, Seite 18). Das Hauptgewicht des Berichts liegt aber weniger auf dem Datengerüst als auf den Massnahmen zur Reduktion der Stickstoffflüsse. Fazit der Kommission war, dass sich die erforderlichen hohen Emissionsminderungen nur mittelfristig und nur mit einem Paket von zahlreichen Einzelmassnahmen in den Bereichen Verkehr, Landwirtschaft sowie Industrie und Gewerbe erreichen lassen. Es gälte die Möglichkeiten der Emissionsminderung bei den Stickoxiden und beim Ammoniak konsequenter auszuschöpfen. Dies unter anderem durch Anwendung des besten Standes der Technik, einer Neugestaltung des ökologischen Leistungsnachweis bei der Landwirtschaft, der Verlagerung des Schwerverkehrs auf die Schiene usw. In Ergänzung zu den techni-

¹¹ in der vorliegenden Stoffflussanalyse werden auch die Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft als treibenden Fluss betrachtet (siehe Kap. 6.1)

schen Ansätzen zur Emissionsminderung können nach der EKL von einem zielorientierten Einsatz von ökonomischen Instrumenten wesentliche Anreize für ein umweltschonendes Handeln erwartet werden.

Im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft erstellte die Gruppe Agrar-, Lebensmittel- und Umweltökonomie des Instituts für Umweltentscheidungen, ETH 2006 einen Bericht zur «Entwicklung der landwirtschaftlichen Emissionen umweltrelevanter Stickstoffverbindungen» (IAW 2006). Der Forschungsgegenstand der Studie bestand aus der Neuberechnung der landwirtschaftlichen Stickstoffemissionen. Neben der Bestandaufnahme der Ist-Situation (2000–2003) wurde auch die zukünftige Entwicklung (bis 2013) der entsprechenden N-Kennzahlen durch Modellrechnungen abgeschätzt. Dabei wurden die umweltpolitischen Rahmenbedingungen und Zielvorgaben berücksichtigt, insbesondere die Agrarpolitik 2011 im Bereich Stickstoff.

ETH-Studie:
Entwicklung der landw.
Emissionen umweltrelevanter
Stickstoffverbindungen

Ein Vergleich der nationalen Suisse-Bilanzen von 1995 mit dem Mittel der Jahre 2000–2003 ergab, dass das Ausmass der Überschreitung des Stickstoff-Normbedarfs in der Landwirtschaft angestiegen ist, und nicht – wie erwartet – gesunken. Die Modellresultate für die Zukunft liessen im Rahmen der Agrarpolitik 2007 und 2011 keine substantielle Reduktion der N-Emissionen erwarten. Einzig bei den Ammoniakemissionen wurde die angestrebte Zielsetzung einer 9%igen Reduktion gegenüber 1990 erreicht, mit der Agrarpolitik 2007 und 2011 versprach man sich jedoch gegenüber 2005 keine weiteren Verbesserungen.

Die Studie kommt zum Schluss, dass die alleinige Weiterführung des bisherigen agrarpolitischen Reformprozesses nicht genügt, um die aufgestellten Ziele hinsichtlich der umweltrelevanten N-Verluste und N-Überschüsse einzuhalten. Will man daran festhalten, sind konkrete wirtschaftliche und technische Massnahmen erforderlich, die einen positiven Einfluss auf den Rückgang der umweltschädlichen N-Emissionen, insbesondere Nitrat und Ammoniak, haben.

Bereits 1997 verabschiedeten die Länderumweltministerkonferenz sowie die Länderumweltagrarministerkonferenz Deutschland ein Stickstoffminderungsprogramm (NNA 1997), in dem Emissionen und nachfolgende Stickstoffströme in Deutschland und deren Auswirkungen u.a. auf Biodiversitätsverlust, troposphärisches Ozon, Versauerung, Eutrophierung, sekundäre Feinstaubpartikel und Klimaänderung analysiert wurden (UBA 2008a).

Studie des deutschen
Umweltbundesamtes

Ein Jahrzehnt später haben die Kenntnisse über die Stickstoffflüsse, ihre Wirkungen und deren räumliche Variabilität erheblich zugenommen. Das Umweltbundesamt (UBA 2007) stellt im «Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoffminderungsstrategie» den Stickstoffkreislauf in Deutschland dar, quantifiziert Qualitäts- und Emissionsminderungs-Ziele in verschiedenen Umweltbereichen sowie die bisherigen Erfolge zum Erreichen dieser Ziele. Zudem evaluiert es die bisherigen Massnahmen unter Berücksichtigung von Nebenwirkungen, und schlägt Massnahmen einer integrierten Stickstoffminderungsstrategie vor. Das Ziel ist, eine globale und multimediale Sichtweise auf das Stickstoff-Problem zu ermöglichen und Empfehlungen für nationale, kontinentale und globale Aktivitäten und Massnahmen der Agrar-, Verkehrs-, Energie-, Industrie- und Entwicklungspolitik abzugeben (UBA 2008a, UBA 2008b).

2 > Stickstoff in der Umwelt

Stickstoff ist auf der Erde sehr heterogen verteilt. Das grösste Reservoir sind zwar die Gesteine, aber für das Leben sind vor allem die Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre, in der Hydrosphäre und in den obersten Bodenschichten relevant. Vielfältige Prozesse finden statt, die sich in komplexer Weise zu Kreisläufen schliessen.

2.1 Stickstoffverbindungen

Stickstoff macht vier Fünftel unserer Atemluft aus und liegt dort als zweiatomiges Molekül N_2 in elementarem Zustand vor. Als solches ist es schwerlöslich und reaktionsträge. Unter hoher Energiezufuhr oder über biologische Prozesse kann Stickstoff, welcher als Verwandlungskünstler zu bezeichnen ist, eine grosse Zahl verschiedener chemischer Bindungen eingehen. In der Natur existieren sieben Oxidationsstufen von Stickstoff, die in einem komplexen Kreislauf umwandelt werden (Abb. 2) und welche sich in allen Umweltkompartimenten bewegen.

Neben dem unreaktiven Luftstickstoff N_2 finden sich reaktive Stickstoffverbindungen, welche ökologisch relevant sind. In Tab. 1 sind deren Steckbriefe angegeben.

Tab. 1 > Stickstoffverbindungen

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). Neben den in der Tabelle wiedergegebenen Schädigungen von ökologisch relevanten N-Verbindungen gilt es, auf die Summe verschiedener N-Verbindungen, also auf den Gesamtstickstoff N_{tot} , ein besonderes Augenmerk zu richten. Diese ist, wenn zu hoch, verantwortlich für die Schädigung terrestrischer Ökosysteme (z. B. Wald) und flacher Meere. Gleichzeitig wird die Artenvielfalt beeinträchtigt und es findet eine Verschiebung des Artenspektrums statt.

Stickstoffverbindung	Chem. Eigensch.	Hauptquelle/Entstehung	Auswirkungen
N ₂ Luftstickstoff	Gasförmig, nicht reaktiv (nr)	78 % der Atemluft	Keine
Organisch gebundener Stickstoff R-NH ₂	.	<ul style="list-style-type: none"> • Biologische Prozesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Beim biologischen Abbau von Biomasse in den Gewässern Sauerstoffzehrung
NO _x (NO, NO ₂) Stickoxide (Stickstoffmonoxid, -dioxid), Peroxyacetylnitrat PAN	Gasförmig, reaktiv (r)	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehr • Verbrennungsprozesse • Industrie • NO₂, 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 • Beitrag zur Eutrophierung von Ökosystemen • Beitrag zur Versauerung von Ökosystemen
NH ₃ /NH ₄ ⁺ Ammoniak/Ammonium(ion)	NH ₃ gasförmig NH ₄ ⁺ wasserlöslich reaktiv (r)	<ul style="list-style-type: none"> • Nutztierhaltung in der Landwirtschaft (Umgang mit Wirtschaftsdüngern) • Herstellung und -anwendung von Düngemitteln • Abwassereinleitung in Oberflächengewässer 	<ul style="list-style-type: none"> • Versauerung und Eutrophierung der Böden und Ökosysteme • Bildung von sekundären Aerosolen • Fischgift
N ₂ O Lachgas	Gasförmig, reaktiv (r)	<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 (310 mal stärker als CO₂) • Beitrag zur Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht (Erhöhung der Hautkrebs- und Mutationsrate)
NO ₃ Nitrat(ion)	Wasserlöslich, reaktiv (r)	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidationsprodukt aus Stickstoffoxiden, organischen N-Verbindungen und aus Ammonium/Ammoniak • Ackerbau • Industrie- und Kommunalabwässer • Deposition von atmosph. N-Verbindungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Belastung von Grund- und Oberflächengewässern • Gesundheitsprobleme bei stark belastetem Trinkwasser (Nitrosaminproblem) • Eutrophierung von Ökosystemen • Belastung von Meeres- und Küstenökosystemen
NO ₂ Nitrit(ion)	Wasserlöslich, kurzlebig, reaktiv (r)	<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

2.2 Stickstoff-Reservoirs

Die Luft besteht zu 78 % aus Stickstoff, der weitaus grösste Teil in Form des stabilen, elementaren Stickstoffs (N_2). Daneben gibt es verschiedene reaktive Spurengase mit Stickstoffanteilen wie z. B. Stickoxide (NO_x), Ammoniak (NH_3) und als langlebiger Spezialfall das Lachgas¹², das wegen seiner Wirkung als Treibhausgas bedeutsam geworden ist. Der Stickstoff in der Atmosphäre macht ein knappes Fünftel des auf der Erde vorkommenden Stickstoffs aus (GSK 1993).

Atmosphäre

Obwohl der Stickstoffgehalt der Ausgangsgesteine sehr gering ist, findet sich dort der überwiegende Teil, rund 80 % des Gesamtorkommens unseres Planeten. Von diesem grossen Vorrat kommen jedoch nur 0,05 % in der organischen Substanz (Humus) der Böden vor. Dieser Anteil ist nur über Abbauprozesse bioverfügbar. Der organisch gebundene, schwerlösliche Bodenstickstoff macht mehr als 90 % des Stickstoff-Gehalts eines Bodens aus. Der kleine Rest ist mineralisiert und wasserlöslich, in Form von Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) und somit direkt verfügbar für Pflanzen (GSK 1993).

Erdkruste, Sedimente, Böden

Der Grossteil des organischen Stickstoffs liegt als schwer abbaubarer Dauerhumus vor. Die leicht abbaubaren N-Verbindungen des Nährhumus sind vor allem Eiweisse und deren Spaltprodukte Aminosäuren und Harnstoff. Sie gelangen als Wurzel- und Pflanzenrückstände, Hofdünger usw. auf den Boden. Die Ab- und Umbauprozesse der N-Verbindungen in den Böden sind vielfältig verkoppelt und abhängig von Klima, Witterung, Boden- und Bewuchsart und vielen Arten menschlicher Eingriffe (GSK 1993).

In Flüssen liegt der Stickstoff vorwiegend als Nitrat vor. Weitere mineralisierte Formen (Nitrit NO_2^- , Ammonium NH_4^+) finden sich in naturnahen Gewässern nur in Spuren. Der Rhein enthält beispielsweise 1,44 mg/l Nitrat-Stickstoff und 1,56 mg/l N_{tot} bei Rhein-Weil (2005) und bei Schaffhausen 0,8 mg/l Nitrat-Stickstoff und 0,04 mg/l Ammonium-Stickstoff. Dies als Mittelwert der letzten 10 Jahre bei einem durchschnittlichen Abfluss von 390 m³/sec (NADUF 2008; Interkantonales Labor 2009).

Hydrosphäre

Stickstoff ist ein essenzielles Element für alle Lebensformen. Pflanzen und Mikroorganismen spielen die zentrale Rolle bei der Stickstoffversorgung der Lebewesen, weil sie aus anorganischen Formen (vor allem NO_3^- und NH_4^+) Aminosäuren und Eiweisse bilden können. 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 reaktionstragen Stickstoff N_2 entstand somit die grosse Artenvielfalt aller Lebensformen und dieses chemische Element ist Baustein für den Hauptnährstoff aller Lebewesen (GSK 1993).

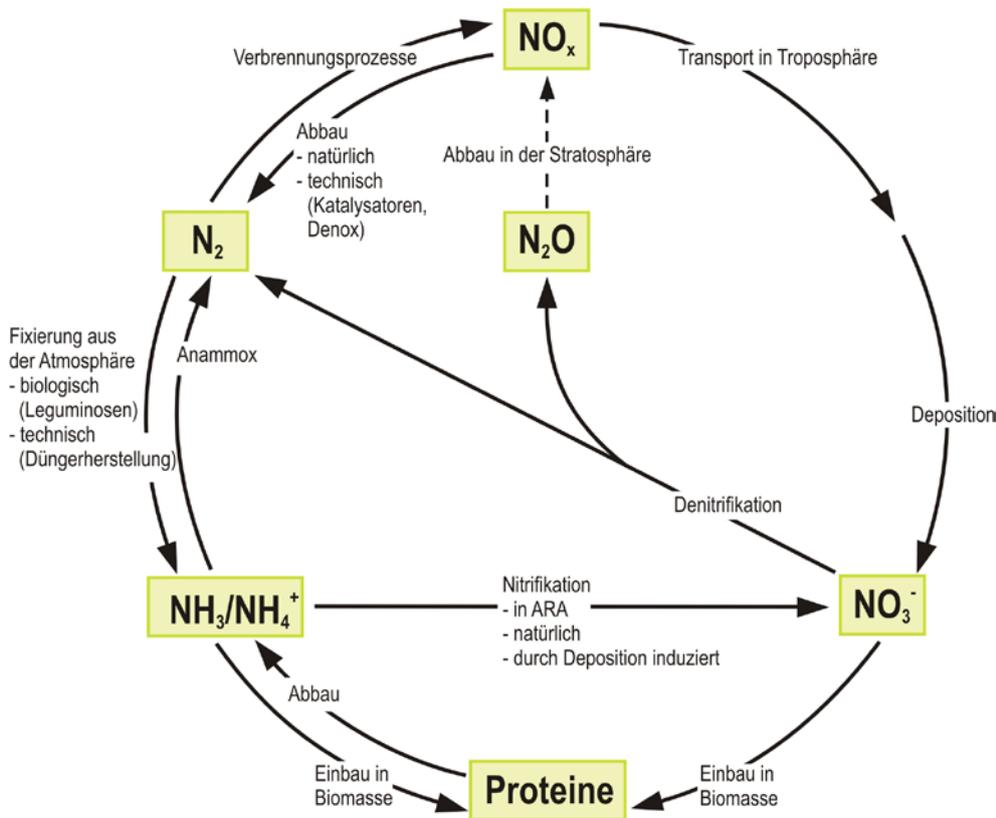
Biomasse

¹² Lachgas (N_2O) hat eine Lebenszeit in der Atmosphäre von ca. 120 Jahren. (www.epa.gov)

2.3 Umwandlungsprozesse (Nitrifikation, Denitrifikation etc.)

Abb. 2 > Stickstoffverbindungen und -umwandlungen

Vereinfachte schematische Darstellung der wesentlichen Umwandlungsprozesse im Stickstoffkreislauf. Im Kreislauf durchläuft Stickstoff verschiedene Umweltkompartimente und Oxidationszustände. N_2 , N_2O , NO_x und NH_3 emittieren in die Luft. Bei der Anammox (Anaerobe Ammonium Oxidation) läuft wie die Denitrifikation unter anaeroben Bedingungen ab.



Biologische N-Fixierung: Spezialisierte Mikroorganismen (Bakterien und Blaualgen in Böden und Gewässern) können den reaktionsträgen Luftstickstoff N dank des Enzyms Nitrogenase zum Aufbau von Körperprotein 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). Ihre Bindungsleistung beträgt bis zu 300 kg N/ha pro Jahr und macht rund 90 % der N-Fixierung in der Landwirtschaft aus (PG N-Haushalt CH 1996). Werden Leguminosen mit mineralischem Stickstoff gedüngt, so nehmen sie diesen auf und stellen die N-Fixierung ein. Insbesondere geht auch die Knöllchenzahl und -größe je Wurzellängeneinheit zurück (FiBL 2009, GRUDAF 2009).

Stickstoff-Fixierung
aus der Atmosphäre
(biologisch, technisch)

Technische N-Fixierung: Mit Hilfe des 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: $N_2 + 3 H_2 \leftrightarrow 2 NH_3$. Die Herstellung von Mineraldünger ist sehr energieintensiv, da der Fixierungsprozess viel Aktivierungsenergie benötigt. Es werden dazu rund 1 bis 2 Liter Diesel pro Kilogramm Dünger-Stickstoff gebraucht (FiBL 2009, PG N-Haushalt CH 1996) Obwohl die Industrie erhebliche Erfolge erzielt hat, den Energieverbrauch zu reduzieren, fliesst über ein Prozent des Weltenergieverbrauchs in die Ammoniakproduktion (Swaminathan 2004).

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, in ihrer Menge 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 aller Stickstoff in den NO_x -Emissionen stammt aus dem Luftstickstoff. Eine weitere Quelle von Stickoxiden sind Grossbrände, z. B. Waldbrände (GSK 1993).

Stickoxid-Bildung

Natürliche Stickoxid-Bildung: Durch elektrische Entladungen, vor allem Blitze, wird Luftstickstoff (N_2) zu Stickoxiden (NO und NO_2) oxidiert.

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° - $35^\circ C$, sowie eine hohe Sauerstoff- und Ammoniumversorgung. Die Nitrifikation kann sowohl in natürlichen Systemen (Böden, Gewässer) als auch technischen Systemen ablaufen (z. B. in Abwasserreinigungsanlagen). Eine Lockerung des Bodens kann die Nitrifikation um ein Mehrfaches steigern: Daher erfolgt in der Regel in gut durchlüfteten Ackerböden eine grössere Nitratproduktion als auf Grasland, ebenso wird mehr Nitrat auf sandigen, leichten als auf tonigen, schweren Boden produziert. Nitrat ist das wichtigste Nährsalz für Pflanzen.

Nitrifikation

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

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:

Denitrifikation



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 (GRUDAF 2009). Durch die Denitrifikation können in Böden bis zu 30 % der gesamten N-Düngung verloren gehen. 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 dadurch von den Gewässern fernzuhalten (GSK 1993).

Optimale Bedingungen für die Denitrifikation in Böden sind hohe Nitratkonzentrationen und wenn sie sauerstoffarm, das heisst schwer, wassergesättigt und verdichtet sind. Weiter spielen die Verfügbarkeit von organischem Kohlenstoff als Energiequelle, pH-Werte von 6 bis 8 und Temperaturen um 30 °C eine Rolle.

Während das unschädliche Denitrifikationsprodukt N_2 (Luftstickstoff) zur Elimination von ökologisch relevanten N-Verbindungen aus Ökosystemen beiträgt, wirkt N_2O als starkes Treibhausgas und trägt zur Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht bei (siehe Kapitel 2.6). Das Verhältnis zwischen N_2O und N_2 unterscheidet sich je nach Umweltbedingungen beträchtlich. Es wird in starkem Masse beeinflusst durch die Sauerstoffsättigung (Redoxpotenzial), Temperatur, Art des notwendigen Kohlenstoffsubstrates, und Nitratkonzentration sowie Konzentration und Adaptation der Mikroorganismenpopulationen und weitere Parameter (UBA 2008a).

Nitrifikation und Denitrifikation können in Böden und Gewässern als entgegengesetzte Prozesse gleichzeitig ablaufen, z. B. die Denitrifikation in wassergesättigten Aggregaten und die Nitrifikation in luftgefüllten Poren.

Der mikrobielle Prozess Anammox (Anaerobe Ammonium Oxidation) läuft wie die Denitrifikation unter anaeroben Bedingungen ab. Die Anammox-Bakterien setzen Ammonium mit Hilfe von Nitrit zu Luftstickstoff um. Der Prozess konnte 1995 erstmals in Bioreaktoren von Abwasserreinigungsanlagen nachgewiesen werden. Später wurde er auch in natürlichen Lebensräumen gefunden (Schubert et al. 2006). In Zukunft wird er vermutlich in modernen Kläranlagen eine wichtige Rolle spielen, da er eine Alternative bietet, anorganische Stickstoffverbindungen aus dem Abwasser zu entfernen.

Anammox
(Anaerobe Ammonium Oxidation)

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 und belastet das Trinkwasser.

Nitrat-Auswaschung
und Abschwemmung

Nitrat gelangt auch über Oberflächenabfluss und über das Grundwasser in Fließgewässer und Seen und schliesslich ins Meer (GSK 1993, BAFU/BLW 2008).

Die Auswaschung von dem im Boden gebildeten oder zugeführten Nitrat ins Grundwasser wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

> Sickerwassermenge

- > Art und Dauer des Bewuchses (resp. Bracheanteil)
- > Bodenart und -durchlässigkeit (Wasser-Rückhaltevermögen), die abhängig ist von Humusgehalt, biologischer Aktivität (N-Fixierung und N-Mineralisierung), Bodenbearbeitung und Drainage
- > Aktuelle N-Düngung (organisch und/oder mineralisch)

Dabei hat der Faktor «Sickerwassermenge» den grössten, die «aktuelle N-Düngung» den relativ kleinsten Einfluss. Allerdings stehen diese Faktoren in einem dynamischen Wechselverhältnis (Leu et al. 1986).

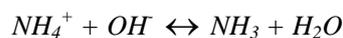
Die höchsten Auswaschungsverluste treten in der vegetationslosen Zeit (Herbst, Winter) oder zu einem Zeitpunkt geringen Stickstoffbedarfs im Frühjahr und besonders bei leichtem (sandigen) Boden auf. Geordnet nach Nutzungsart ergibt sich eine Zunahme der Auswaschungsgefahr etwa in der Reihenfolge: Wald < Grünland < Getreide < Hackfrüchte (Kartoffeln, Rüben) < Mais, Reben < Gemüse. Untersaaten und Zwischenfutteranbau können die Auswaschungsverluste entscheidend vermindern. Während bei günstigen Bedingungen die Auswaschungsrate unter Grasland um 5–10 kg N/ha pro Jahr liegt, kann sie bei ungünstigen Bedingungen unter Ackerland/Gemüse/Reben 300 kg N/ha pro Jahr oder mehr betragen. Folge davon sind Grund- und Trinkwasserprobleme (GSK 1993, Leu et al. 1986). Bei Waldökosystemen wird ab Stickstoffdepositionen von 10 kg N/ha pro Jahr eine zunehmende Nitratauswaschung beobachtet (de Vries et al. 2003).

Alle Stickstoffformen im Boden können kurz- oder langfristig an Ton, Humus und Ton-Humus-Komplexe angelagert werden (Adsorption). Als Humus bezeichnet man die organische Substanz eines Bodens. Tone sind Mineralienbestandteile verschiedener chemischer Zusammensetzung mit einem Korndurchmesser bis zu 2 μ (1 μ = 1/1000 mm). Negativ geladene Nitrationen werden allerdings – im Gegensatz zu Ammoniumionen (NH_4^+), Eiweissen und anderen Stickstoffverbindungen – nur zu einem sehr geringen Anteil adsorbiert und daher ausgewaschen, wenn genügend Sickerwasser vorhanden ist (Nitrat-Auswaschung) (GSK 1993).

Chemische Fixierung an
Bodenpartikel

Stickstoffverluste aus Böden erfolgen gemäss folgendem Gleichgewicht:

Ammoniak-Verflüchtigung



Die Verflüchtigung nimmt mit steigendem pH-Wert in der Bodenlösung zu, ebenso mit steigender Temperatur, Bodendurchlüftung und Windbewegung zur Oberfläche. Die weitaus wichtigste Emissionsquelle für Ammoniak ist jedoch die Nutztierhaltung. Die verschiedenen Verlustbereiche lassen sich folgendermassen aufteilen:

- > Stallverluste von der Ausscheidung des Tieres bis zum Einsammeln oder bis zum Abfluss in Kanäle und Vorruben.
- > Lagerverluste auf dem Miststock oder in Güllengruben. Die Verluste in offenen Behältern sind in der Anfangsphase der Befüllung am höchsten, und nehmen ab, falls sich eine geschlossene Schwimmdecke bildet. Dauerhaft abgedeckte Güllelager weisen deutlich geringere Ammoniak-Emissionen auf.

- > Verluste direkt beim Ausbringen (Transport und Verteilen). Mit emissionsarmen Techniken (z. B. Schleppschlauchtechnik) können diese Verluste wesentlich reduziert werden.
- > Feldverluste (unmittelbar nach dem Verteilen bis zur Aufnahme durch den Boden und die Pflanzen). Auf wassergesättigten, schweren und alkalischen (kalkhaltigen) Böden sind die Ammoniak-Verluste grösser, ebenso bei trockenem, heissem Wetter.

Alle Ammoniakverluste sind bei höheren Temperaturen grösser. Im Freien beeinflussen zudem die Windverhältnisse das Ausmass der Verflüchtigung (GSK 1993).

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. Die Festlegung erfolgt durch den Einbau von Stickstoff in die Körpersubstanz von Mikroorganismen. Bei einem knappen Stickstoffangebot in der Bodenlösung und einem relativ kleinen Anteil an Stickstoff im Verhältnis zu Kohlenstoff in den abzubauenen Humusbestandteilen kann der gesamte, leicht verfügbare Stickstoff für den Stoffwechsel von Mikroorganismen benötigt werden. Bei einem C:N-Verhältnis grösser 20 kommt es somit vorübergehend zu einem Stickstoffmangel für Pflanzen (sogenannte N-Sperre), die anhält, bis wegen der Mineralisierung schwer abbaubarer Humusbestandteile, respektive dem Abbau abgestorbener Bakterienmasse, wieder leicht lösliche Stickstoff-Formen zur Verfügung stehen (GSK 1993).

Einbau in Biomasse

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, Ammoniak), ebenfalls ist eine Blattdüngung mit bestimmten N-Verbindungen möglich. Der Hauptteil des Stickstoffs wird für den Aufbau von Eiweissen verwendet; aber auch die Erbsubstanz und viele andere Inhaltsstoffe enthalten Stickstoff. 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, NZZ 2002).

Die Aufnahme organischer Stickstoffverbindungen erfolgt hauptsächlich in Form von Eiweissen über pflanzliche und tierische Nahrung. Unerwünscht ist die Aufnahme von Nitrat über Lebensmittel. Der Gesetzgeber legte für Trinkwasser einen Toleranzwert von 40 mg/l fest (WHO-Richtwert 50 mg/l). Dieser kann praktisch überall in der Schweiz eingehalten werden. Für Nitrit (Pökelfleisch) gelten ebenfalls strenge Grenzwerte, die die Aufnahme auf ein unvermeidliches Minimum reduzieren sollen (Zielkonflikt zwischen Reduktion bakterieller Zersetzung von Fleischwaren und möglicher Gesundheitsgefährdung von Menschen) (Leu et al. 1986).

Aufnahme durch Tiere/Menschen

Nitrat ist in den Dosen, die üblicherweise 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 bei. Die Toxikologen sind sich nicht einig, wie hoch dieses Risiko einzuschätzen ist (Gangolli et al. 1994). Das BAG findet angesichts der Tatsache der beim Menschen beobachteten endogenen Nitratbildung und aus epidemiologischen Überlegungen, dass die Möglichkeit einer

indirekten Tumorinduktion durch endogen gebildete Nitrosamine heute stark an Bedeutung verloren habe (BAG 2000).

B. Spiegelhalter vom Deutsches Krebsforschungszentrum DKFZ hingegen relativiert die Bedeutung epidemiologischer Studien und plädiert dafür, dass im Sinne der Vorsorge die Nitrataufnahme als Vorläufer der Nitrosaminbildung möglichst niedrig gehalten werden soll (Workshop Nitrat des BAG, BLW und Buwal, Bern 2001). Die EU-Kommission hat denn auch im Jahr 2002 ihre Normen beim Gemüse verschärft (NZZ 2002).

Die IARC (IARC 2006) kommt in ihrer aktuellsten Beurteilung der Krebsinzidenz von Nitrat und Nitrit zum Schluss, dass «Oral aufgenommenes Nitrat oder Nitrit unter Bedingungen welche die endogene Nitrosierung fördern möglicherweise für den Menschen krebserregend» sei («*Ingested nitrate or nitrite under conditions that result in endogenous nitrosation is probably carcinogenic to humans*»). Konsequenterweise teilte das IARC diese Verbindungen in die «Group 2 A (die zweithöchste Klassierung, wobei die höchste Klassierung «Group 1», eindeutig beim Menschen krebserregende Stoffe umfasst)» ein, in welcher sich auch Stoffe wie Acrylamid, Ethylcarbammat befinden. Die «Group 2 A» umfasst Substanzen, die wahrscheinlich, «*probably*» (und nicht nur möglicherweise, «*possibily*») für den Menschen kanzerogen sind (auf der Basis von epidemiologischer und tierexperimenteller Evidenz sowie mechanistischer und anderer relevanter Daten); sie definiert «begrenzte Evidenz für Kanzerogenität in Menschen und ausreichende Evidenz im Tierexperiment» (Preamble to the IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenetic Risks to Humans; www.iarc.fr > Monographs in PDF > beliebiges Volume > Preamble). Die erwähnten Bedingungen für Nitrosierung umfassen das Vorhandensein nitrosierbarer Substanzen wie Amine und Amide, eine Bedingung, die bei durchschnittlicher Ernährung immer vorhanden ist. Somit wird Nitrat heute von einem internationalen Gremium von Experten bezüglich möglicher Erzeugung von Krebs beim Menschen toxikologisch relativ hoch eingestuft.

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

Abgestorbene organische Substanz wird im Zuge ihres Abbaus in die Biomasse von Boden- und Wasserorganismen (Destruenten¹³) aufgenommen. Die organische Substanz stammt aus Streustoffen (Laub, abgestorbene Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen, Losung), abgestorbener Wurzelmasse, und in landwirtschaftlichen Gebieten zu-

Aufnahme durch Boden- und Wasserorganismen

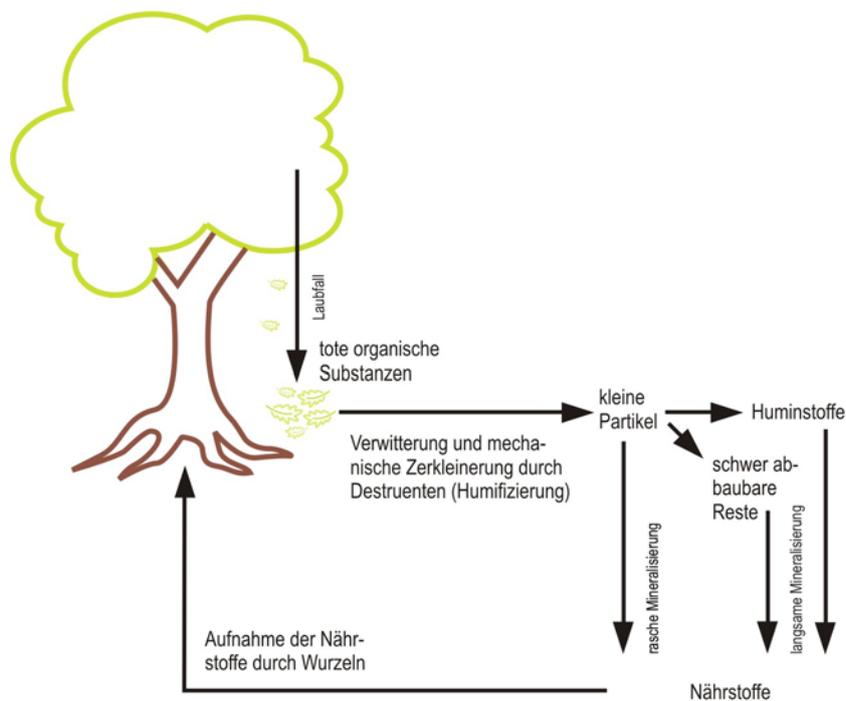
¹³ Destruenten sind Organismen, die organisches Material zerkleinern und zersetzen, z. B. Würmer, Asseln, Milben, Spinnen und Ameisen.

sätzlich aus Ernterückständen, Gründüngung, Hofdüngern, Klärschlamm, Kompost und anderen organischen Handelsdüngern.

Der grösste Teil des von Menschen ausgeschiedenen Stickstoffs wird in der Schweiz in Kläranlagen von Mikroorganismen umgewandelt und gelangt in die Oberflächengewässer oder kann wiederum in Kläranlagen zu Luftstickstoff denitrifiziert werden. Im Klärschlamm werden nur etwa 10 % des Stickstoffs aus den Abwässern zurückgehalten (GSK 1993).

Abb. 3 > Humusbildung und -abbau

Schematische Darstellung der Prozesse die bei Humusbildung und -abbau im Boden ablaufen.



Abbau: 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.

Die Mineralisierung ist ein langsam ablaufender Vorgang, an dem eine grosse Anzahl unterschiedlicher Mikroorganismen beteiligt sind. Er läuft sowohl unter aeroben als auch anaeroben Bedingungen ab. Ein hohes Angebot an leicht abbaubaren organischen Stickstoff-Verbindungen und ein kleines C:N-Verhältnis in den abzubauenden Humusverbindungen begünstigen die Mineralisierung. Die Stickstoff-Mineralisierung wird zudem durch häufigen Wechsel feuchter und trockener Perioden angetrieben. Dadurch wird der Zerfall von Aggregaten (Boden-Klümpchen) beschleunigt und somit die für den Stoffabbau zugängliche Oberfläche erhöht. Gleichartig wirkt sich eine intensive Bodenbearbeitung aus. In der Schweiz werden durchschnittlich ca. 100–200 kg N pro Hektare und Jahr mineralisiert, in anmoorigen Boden aber erheblich mehr (GSK 1993).

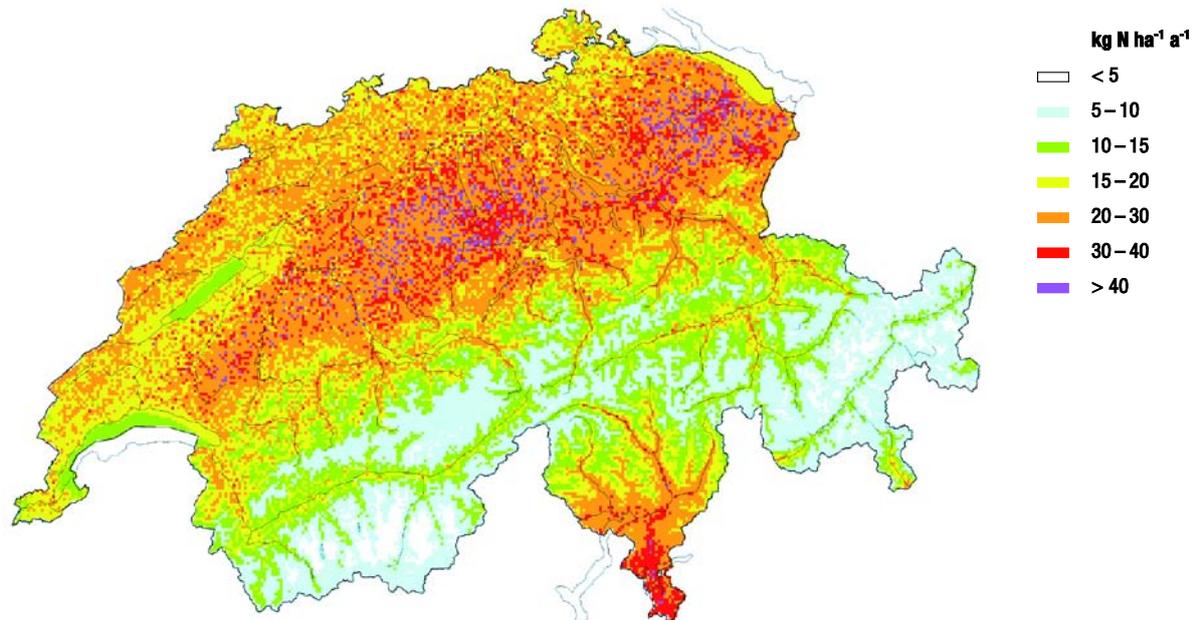
Stickoxide und Ammoniak unterliegen in der unteren Atmosphäre (Troposphäre) vielfältigen, gekoppelten (photo)-chemischen Reaktionen, wobei weitere Spurenstoffe beteiligt sind und neue, sekundäre Schadstoffe entstehen (z. B. Salpetersäure, Nitrat, Schwefelsäure, Ozon). Aller in die Luft emittierte Stickstoff (ausser Luftstickstoff N₂) 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 Stoffkonzentration 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), 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 Abb. 2 ist die räumliche Verteilung der Deposition von oxidierten und reduzierten Stickstoffverbindungen in der Schweiz für das Jahr 2000 wiedergegeben. Die höchsten Depositionen sind im schweizerischen Mittelland bis zu den Voralpen und auf der Alpensüdseite anzutreffen. Je nach Standort tragen die reduzierten Stickstoffverbindungen (von den Ammoniak-Emissionen stammend) 60–80 % zum Eintrag bei (EKL 2005).

Deposition aus der Atmosphäre

In der Stratosphäre sind Stickstoffverbindungen über komplexe chemische Reaktionsmechanismen am Abbau der stratosphärischen Ozonschicht («Ozonosphäre», obere Stratosphäre) beteiligt. Der Abbau der Ozonschicht resultiert in einer erhöhten, die Erdoberfläche erreichenden ultravioletten Strahlung, welche die menschliche Gesundheit gefährdet (erhöhtes Hautkrebsrisiko) und Ökosysteme schädigt (mutagene Wirkung auf die Vegetation) (UBA 2008a).

Abbau in der Stratosphäre

Abb. 4 > Stickstoff-Depositionen: Jahressumme 2000



BAFU (2009b)

2.4 Land- und Forstwirtschaft

In der Landwirtschaft wird der natürliche Umsatz von Stickstoff intensiviert, um eine Produktivität der Kulturen und damit die Nahrungsmittelversorgung der Bevölkerung sicher zu stellen. Diese Zufuhr von Stickstoff geschieht einerseits durch den Anbau von Pflanzen, welche aufgrund einer Symbiose mit Bakterien zur biologischen Stickstofffixierung befähigt sind und so Stickstoff (N_2) aus der Atmosphäre auf andere Nutzpflanzen übertragen. Dies sind vorab die Leguminosen (Schmetterlingsblütler), zu denen wichtige Kulturpflanzen wie Klee, Soja, Bohne und Erbsen gehören.

Andererseits werden aus N_2 industriell hergestellte mineralische Stickstoffdünger sowie Hofdünger aus der Tierproduktion in der Landwirtschaft verwendet. Durch die Verwendung von Hofdünger wird Stickstoff intern recycelt, falls die Menge des anfallenden Stickstoffs im Einklang mit dem Bedarf für die Düngung ist. Dies ist besonders dort der Fall, wo die Tierzahl an die verfügbare Fläche gebunden ist. Allerdings besteht bei Lagerung und Ausbringung dieser Hofdünger ein grosses Verlustpotenzial für Ammoniak und andere N-Verbindungen, das durch technische Massnahmen reduziert werden kann (EKL 2005).

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 und kehrt letztlich direkt oder indirekt als N_2 oder Lachgas (N_2O) wieder in die Atmosphäre zurück. Weitere Verlustpfade sind u.a. die Emission von Ammoniak

(NH₃), oder die Auswaschung von Nitrat (NO₃⁻) ins Grundwasser. Diese Stickstoffverluste nehmen mit der Intensivierung des Stickstoffkreislaufs zu. Dies führt dazu, dass unter heutigen Bedingungen in der Schweiz durchschnittlich nur 25–30 % des Stickstoffs aus Düngern und biologischer Fixierung in pflanzliche und tierische Produkte gelangen (N-Effizienz nach OSPAR (2009)). Der Rest geht an die Umwelt verloren (EKL 2005, FiBL 2009).

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 daraus resultierenden Probleme sind in Kapitel 2.6 beschrieben.

2.5 Produkteherstellung und Produktnutzung

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 allergrössten Teil aus dem Luftstickstoff und nur zu einem geringen Teil aus dem Brennstoff-Stickstoff (Heizöl extra-leicht enthält ca. 0,01 % N). Aus der Atmosphäre gelangen die Stickoxide durch Trockendeposition oder als Nitrat mit Regen und Schnee wieder auf die Erdoberfläche. Über die verschiedenen Depositionspfade wird den Ökosystemen zusätzlicher Stickstoff zugeführt.

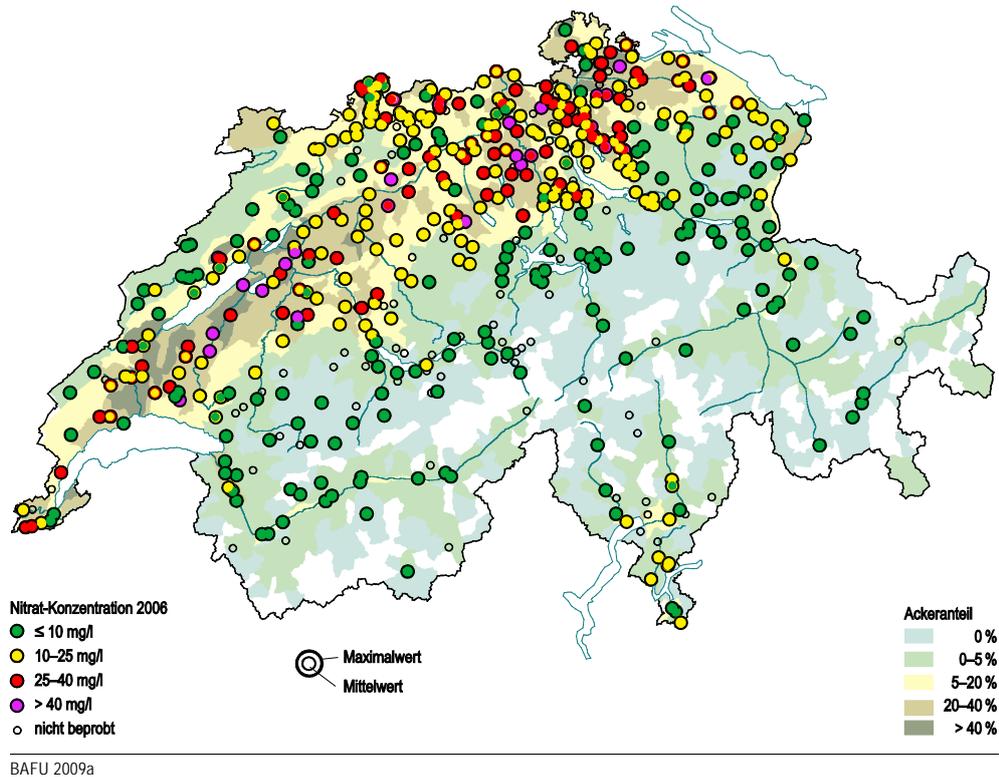
2.6 Umwelt

Stickoxide und Ammoniak, welche bei anthropogene Aktivitäten (Landwirtschaft, Verkehr etc.) emittiert wurden, werden über unterschiedliche Distanzen verfrachtet, umgewandelt und schliesslich nahe oder fernab der Emissionsquellen in naturnahe Ökosysteme eingetragen (PG N-Haushalt CH 1996, EKL 2005). Zudem werden wasserlösliche Stickstoffverbindungen 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).

Ökosysteme

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 wird das Grundwasser durch physikalische, chemische und mikrobiologische Prozesse positiv oder negativ verändert. Die landwirtschaftliche Praxis in den Ackerbaugebieten des schweizerischen Mittellandes bewirkt nun, dass vor allem Nitrat in grossen Mengen in dieses Medium ausgewaschen wird. Somit wird die Grund- und Trinkwasserqualität beeinträchtigt (BAFU 2009a).

Gewässer

Abb. 5 > Nitrat-Konzentration im Jahr 2006 und Ackeranteil*Mittel- und Maximalwert pro Messstelle.*

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 & 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 (GSK 1993, EKL 2005). Oberflächengewässer sind gegenüber Stickstoffverbindungen unterschiedlich empfindlich. Für das Pflanzenwachstum in Flüssen ist meistens Phosphor der wachstumslimitierende Nährstoff. Einige aquatische Organismen reagieren jedoch empfindlich auf hohe Stickstoffkonzentrationen (z. B. die Bachmuschel *Unio crassus*) (UBA 2008a). Die Folge sind Störungen der Lebensgemeinschaften in Wasserökosystemen und Artenverluste.

Überschüssige Stickstoffkonzentrationen in Flüssen und in kleinerem Ausmass die atmosphärische Deposition beeinträchtigen marine Ökosysteme (PG N-Haushalt CH 1996). Der Eintrag von Stickstoff in die Nordsee über die Zuflüsse ist heute auf das rund drei- bis vierfache der natürlichen Fracht angestiegen (Prasuhn & Sieber 2005). Als Folge davon hat sich beispielsweise im niederländischen Wattenmeer die Biomasseproduktion des Phytoplanktons innerhalb von 20 Jahren seit Mitte der 1970er Jahre verdoppelt bis verdreifacht. Anders als für Süssgewässer, welche phosphorlimitiert sind, liegt für viele Übergangs- und Küstengewässer zumindest zeitweise Stickstoffli-

mitierung vor. Aus diesem Grund ist die Begrenzung des Stickstoffeintrages hoch relevant (UBA 2009).

Lachgas, das als Zwischenprodukt bei der mikrobiellen Nitrifikation und Denitrifikation auf landwirtschaftlichen Böden, aquatischen und terrestrischen Ökosystemen entsteht, ist ein starkes Treibhausgas und trägt zudem zur Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht. Mit einem Treibhauspotential von ca. 310 CO₂-Äquivalenten und einer Verweilzeit in der Atmosphäre von 120 Jahren (IPCC 2009) trägt es weltweit ca. 12 % zum globalen Treibhauseffekt bei (European Science Foundation 2009). Die Lachgaskonzentration in der Atmosphäre ist von ungefähr 270 parts per billion (ppb) in vorindustrieller Zeit auf 319 ppb im Jahre 2005 gestiegen; die Fachwelt rechnet mit einer weiteren Zunahme. Im Jahre 2005 betrug der Strahlungsantrieb von Lachgas (Mass für die Klimawirksamkeit) etwa ein Zehntel des gesamten anthropogenen Strahlungsantriebes (IPCC 2007, UBA 2008a).

Beitrag zum Treibhauseffekt

Ein weiterer Klimaeffekt besteht darin, dass hohe 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 2008a).

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 produzierenden 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).

Versauerung

Stickoxide (NO_x) in der Atmosphäre führen bei Sonneneinstrahlung, durch Reaktion mit flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) zu erhöhten Ozonkonzentrationen. Bodennahes 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. Eine anhaltende Dauerbelastung durch Ozon kann das Wachstum und die Vitalität empfindlicher Pflanzenarten beeinträchtigen. Erhöhte troposphärische Ozonkonzentrationen tragen zudem wesentlich zum Treibhauseffekt bei: Vom aggregierten Radiative Forcing 1,6 W/m² rühren 0,35 W/m² vom troposphärischen Ozon (IPCC 2007, European Science Foundation 2009).

Bodennahes Ozon

2.7 Abfallwirtschaft

Bei der Behandlung von Abfällen und Abwasser sowie bei der Ablagerung von Abfällen in Deponien wird der gebundene Stickstoff umgewandelt. Dabei kann es auf verschiedene Weise zum Austrag von reaktiven Stickstoffverbindungen in die Umwelt

kommen. Ammoniakemissionen entstehen vor allem bei der Behandlung und Verwertung der biogenen Abfälle und des Klärschlammes. NO_x -Emissionen entstehen, sofern sie nicht durch Denox-Anlagen¹⁴ zu Luftstickstoff umgewandelt werden können, bei der energetischen Nutzung der Abfälle in Kehrlichtverbrennungsanlagen. Gelöste Stickstoffverbindungen (NO_3^- , NH_4^+) gelangen bei der Deponierung der Abfälle über Deponiesickerwasser in Kläranlagen und Gewässer (UBA 2008a).

In Abwasserreinigungsanlagen werden organische Stickstoffverbindungen zu Ammonium und Nitrat abgebaut. Im biolog. 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 Stickstoff (N_2) umwandeln. Dabei entsteht als Zwischenprodukt auch Lachgas (N_2O).

¹⁴ In der Schweiz stehen Entstickungsanlagen (Denox) seit 2002 überall in Betrieb (Webseite BAFU).

3 > Methodik

Die Stoffflussanalyse ist ein wohl etabliertes und erprobtes Instrument der schweizerischen Umweltforschung. Die vorliegende Analyse für Stickstoff entspricht dem Standard-Vorgehen. Es wurden keine neuen Daten generiert, sondern ausschliesslich vorhandene Daten gesammelt und verwendet. Weil die Datenqualität unterschiedlich ist, wurde versucht, Aussagen zur Unsicherheit zu gewinnen. Diese sind wichtig, um die Daten interpretieren zu können.

Die im Folgenden benutzte Methodik basiert auf der Anleitung des BUWAL «Stoffflussanalyse Schweiz» aus dem Jahre 1996. Diese stützt im Wesentlichen auf das Lehrbuch Regionaler Stoffhaushalt; Erfassung, Bewertung, Steuerung von P. Baccini und H.-P. Bader ab (Baccini 1996).

Die Berechnung der einzelnen Flüsse basiert auf sektorspezifischen Methoden. Diese werden in der vorliegenden Studie aber nicht im Einzelnen beschrieben, es wird lediglich auf die Quellen verwiesen.

3.1 Stoffflussanalyse

Mit einer Stoffflussanalyse werden Herkunft, Entstehung, Umwandlung und Entsorgungswege von Stoffen erfasst. Grundelemente der Stoffflussanalyse sind Prozesse und (Stoff)flüsse. Flüsse verbinden Prozesse und stellen damit Inputs und Outputs von Prozessen dar. Wenn beim Bilanzieren Inputs und Outputs eines Prozesses gleich sind, liegt ein Fliessgleichgewicht vor, andernfalls gibt es Lagerveränderungen oder Stoffabbau/-aufbau.

Die BUWAL-Anleitung «Stoffflussanalyse Schweiz» schlägt Grundprozesse, Begriffe und Bilanzierungen vor (BUWAL 1996a). Für die vorliegende Analyse wurden die Vorschläge weitgehend übernommen. Gewisse Anpassungen waren aber nötig, um den Eigenschaften des Stickstoffs, seinen Verbindungen und seiner grossen Bedeutung in der Landwirtschaft gerecht werden zu können.

Damit die Stoffbilanz stimmt, sollte die Summe aller Inputs in ein System/Subsystem/ Prozess der Summe aller Outputs entsprechen. Da alle Flüsse mit einer Unsicherheit behaftet sind, wurden Fehlerintervalle für die Inputs bzw. Outputs berechnet. Überlappt das Fehlerintervall der Inputs mit demjenigen der Outputs, kann angenommen werden, dass die Bilanz aufgeht.

Die stickstoffrelevanten Prozesse der Schweiz werden in die vier Subsysteme unterteilt:

Subsysteme

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

Ausserdem braucht es das Ausland als spezielles Subsystem, um Importe und Exporte erfassen zu können.

Räumlich wird das System von der schweizerischen Landesgrenze abgesteckt. Zeitliche Systemgrenze ist das Jahr 2005, das heisst, die Stickstoffflüsse beziehen sich auf 2005. Allerdings wird bei Stickstoffflüssen mit hoher Variabilität mit **mehrjährigen Mittelwerten** gerechnet, zum Beispiel bei der Stickstofffracht in den Abflüssen aus der Schweiz. (Gelegentlich sind in den Datentabellen zu Vergleichszwecken auch die Werte von 1994 aus der Vorgängerstudie aufgeführt, PG N-Haushalt CH 1996 – der Vergleich der Stoffflüsse 2005 mit 1994 erfolgt aber umfassend im Kapitel 5).

Systemgrenzen

3.2

Prozesse und Stoffflüsse

Die vier Subsysteme L, P, U, A werden in Prozesse a) bis n) zerlegt:

- > *Land- und Forstwirtschaft (L)*
 - a) Tierhaltung
 - b) Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau (Acker, Weiden etc.)
 - c) Wald (Bäume und Boden)
- > *Produkteherstellung/Produktenutzung (P)*
 - d) Verkehr
 - e) Feuerungen
 - f) Produkteherstellung und übrige Nutzungen
- > *Umwelt (U)*
 - g) Atmosphäre
 - h) Hydrosphäre (Oberflächengewässer und Grundwasser)
 - i) übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre
- > *Abfallwirtschaft (A)*
 - j) KVA, SAVA (Kehricht- und Sonderabfallverbrennungsanlagen)
 - k) ARA (Abwasserreinigungsanlagen)
 - l) Kompostierung
 - m) Vergärung
 - n) Deponien

Die Prozesse sind Ursprung und Ziel der betrachteten Stickstoffflüsse im System. In den Kapiteln 4.2 bis 0 werden die Subsysteme und deren Prozesse im Detail beschrieben.

Zwischen den Prozessen fließt der Stickstoff in verschiedenen Verbindungen (NO_x , NH_3 etc.) hin und her. Um diese miteinander vergleichen zu können, werden alle Frachten konsequent auf ihren Stickstoffanteil bezogen und in der Einheit 1000 Tonnen N (ktN) angegeben. In den Stoffflussdiagrammen kann ein einzelner Fluss, z. B. Emissionen aus der Tierhaltung, mehrere Verbindungen, Ammoniak und Lachgas, enthalten. In den tabellarischen Darstellungen (siehe Anhang A1) sind die Komponenten aber einzeln ausgewiesen, weil ihre Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit unterschiedlich sind, man denke etwa an Pflanzenverfügbarkeit von Dünger, Reaktivität in der Umwelt (z. B. Wasserlöslichkeit) und Gesundheitsgefährdung (reaktive Luftstickstoffverbindungen).

Zusammengesetzte
Stickstoffflüsse

Für die Umrechnung in ktN wurden folgende Faktoren benutzt:

Tab. 2 > Umrechnungsfaktoren der Stickstoffverbindungen

Für die Umrechnung in ktN wurden folgende Faktoren benutzt:

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

* NO_x -Emissionen werden in NO_2 -Äquivalent ausgewiesen.

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 *Luftstickstoff*. Bei Flüssen, die sowohl ökologisch relevante Anteile als auch Luftstickstoff enthalten, wurde zudem der *Gesamtfluss*, die Summe der beiden angegeben.

Jeder Fluss wird mit einem Buchstaben und einer Zahl eindeutig charakterisiert. Der Buchstabe am Anfang des jeweiligen Stoffflusses bezieht sich auf den Anfangsbuchstaben des Subsystems (L, P, U, A), aus dem der Stofffluss hervorgeht, z. B. L1, P1. 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 durch ein (r) für reaktive Stickstoffverbindungen und ein (nr) für den nicht-reaktiven Luftstickstoff. Unter (r) werden alle reaktiven N-Verbindungen, d. h. NO_x , NH_3 , N_2O und organische N-Verbindungen zusammengefasst (gemäß Tab. 1), unter (nr) nur N_2 .

Bezeichnung der Stickstoffflüsse

> *L1 Hofdünger/Weidegang (86,3 ktN/a)*

Output aus Tierhaltung, Input in Landwirtschaftsböden
Weil L2 keinen Luftstickstoff enthält ist $L1 = L1(r)$

> *L6 Emissionen (39,2 ktN/a)*

Output aus Landwirtschaftsböden/Pflanzenbau in die Atmosphäre

L6 enthält sowohl reaktive wie auch nicht-reaktive Anteile

$$L6 = L6(r) + L6(nr) = 10,8 \text{ ktN} + 28,4 \text{ ktN} = 39,2 \text{ ktN}$$

«L» weist daraufhin, dass die beiden Flüsse aus dem Subsystem Landwirtschaft hervorgehen.

Für Flüsse, die nur aus reaktiven N-Verbindungen bestehen, gilt: Fluss = Fluss (r),
z. B. $L1 = L1(r)$

Der Einfachheit halber wird in solchen Fällen die Bezeichnung (r) weggelassen.

Ebenso gilt für Flüsse, die nur aus Luftstickstoff bestehen: Fluss = Fluss (nr),
z. B. $U1 = U1(nr)$

Der Einfachheit halber wurde in solchen Fällen die Bezeichnung (nr) weggelassen.

Zur Verdeutlichung, dass diese Flüsse aus Luftstickstoff bestehen, erscheinen sie in Tabellen und Abbildungen in **blauer Schrift**.

Beispiele

3.3 Datenbeschaffung und Datenquellen

Es wurden keine neuen Daten erhoben, sondern vorhandene Daten direkt übernommen bzw. verwendet, um die gesuchten Flüsse zu berechnen. Die Daten stammen aus Forschungsprojekten und Publikationen von BAFU, ART, WSL, Eawag, FiBL oder beruhen auf Auskünften von Fachleuten. Besonders wichtig waren folgende Quellen:

- > EMIS Datenbank BAFU (Abt. LUNIS): Submissionstabellen zum Treibhausgasinventar (FOEN 2009b) und zur Genfer Konvention (FOEN 2009a)
- > Forschungsprojekte ART: IULIA-Modell, Grundlagen für die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft, ART (2008), GRUDAF (2009) und weitere Quellen.
- > Modell Agrammon: Neues Modell zur Berechnung der NH_3 -Emissionen aus der Landwirtschaft, Agrammon (2009).

Für eine Anzahl Flüsse mussten die Frachten aus Güterströmen und deren Stickstoffanteile bestimmt werden. Als Grundlage stand die kürzlich erschienene, vom BAFU herausgegebene Studie «Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006, Massen- und Energieflüsse» (BAFU 2008) zur Verfügung.

Bei wenigen Prozessen konnten Datenlücken rechnerisch geschlossen werden durch Ausbalancieren von Inputs und Outputs, sofern keine Lagerveränderungen im Prozess vorkamen.

3.4 Datenqualität

Die Qualität der Frachtangaben ist sehr unterschiedlich. Deshalb ist es wichtig, die Qualität der Zahlen zu kennen und wo immer möglich zu bezeichnen. Für eine Reihe von Flüssen sind quantitative Unsicherheiten bekannt; sie werden in den tabellarischen Darstellungen aufgeführt. Dies betrifft mehrere Flüsse aus der Landwirtschaft, weil Agroscope (ART 2008a) diese im Rahmen der Monte Carlo Simulationen fürs schweizerische Treibhausgasinventar bereitgestellt hat (FOEN 2009b). Bei einigen Emissionen in die Atmosphäre sind in der EMIS-Datenbank (EMIS 2008) 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 Unsicherheiten. Falls Frachten aus unterschiedlichen Quellen vorhanden waren, wurde die Differenz der Zahlen als Mass für die Unsicherheit benutzt.

Die Unsicherheiten werden benutzt, um in sämtlichen Stoffflussdiagrammen (Abb. 6 bis Abb. 18) 95 %-Vertrauensintervalle für die Stoffflüsse anzugeben. Dieselben Intervalle erscheinen auch in den Tabellen, die bei den vier Subsystemen unterhalb der Stoffflussdiagramme stehen, d. h. Tab. 3, Tab. 7, Tab. 9 bis Tab. 11. In diesen Tabellen sind jeweils auch die Summe S der Flüsse angegeben inklusive Fehlerintervall. Diese wird mit Hilfe der Regel (Gaus'sches Fehlerfortpflanzungsgesetz)¹⁵ berechnet

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

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 ist dann

$$S_{\min} \text{ bis } S_{\max}, \quad S_{\min} = S - \Delta S \quad S_{\max} = S + \Delta S$$

Beispiel Subsystem Land- und Forstwirtschaft: Die Summe der Inputs beträgt 180 kt N. Werden die Unsicherheiten der einzelnen Flüsse berücksichtigt, errechnet sich ein Fehlerintervall von 171–190 kt N. Die Summe der Outputs inkl. Senke (Holzzuwachs im Wald) beträgt 184 kt N und das Fehlerintervall 165–202 kt N. Obwohl die Bilanz nicht exakt aufgeht (4 kt N mehr Output als Input), 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 2005, den Unsicherheiten und dem Fehlerintervall.

¹⁵ unabhängige Messgrößen vorausgesetzt

3.5 Stand der landwirtschaftlichen NH₃- und N₂O-Flüsse

Im laufenden BAFU-Projekt Agrammon zur Bestimmung der NH₃-Emissionen aus der schweizerischen Landwirtschaft liegen seit September 2009 die neuen NH₃-Daten vor (www.agrammon.ch). Diese sind rund 15 % höher als die bisherigen Werte. Sie sind inzwischen in der EMIS-Datenbank des BAFU implementiert und auch in die Submissionstabellen für die Genfer Konvention integriert. In der vorliegenden Studie konnten aus terminlichen Gründen die NH₃-Emissionen zwar schon gemäss Agrammon übernommen werden, die auf die N₂O-Emissionen resultierenden Änderungen (durch höhere NH₃-Emissionen) standen jedoch noch nicht zur Verfügung. Konkret basieren die hier verwendeten landwirtschaftlichen N₂O-Emissionen für das Jahr 2005 auf dem Treibhausgasinventar der Submissionen 2009 (FOEN 2009a). Ein Vergleich mit dem Treibhausgasinventar der Submission 2010 zeigt (FOEN 2010), dass der Unterschied in den landwirtschaftlichen N₂O-Emissionen lediglich 2,5 % beträgt (im Inventar 2010 sind die Emissionen um diesen Betrag höher).

4 > Resultate für das Jahr 2005

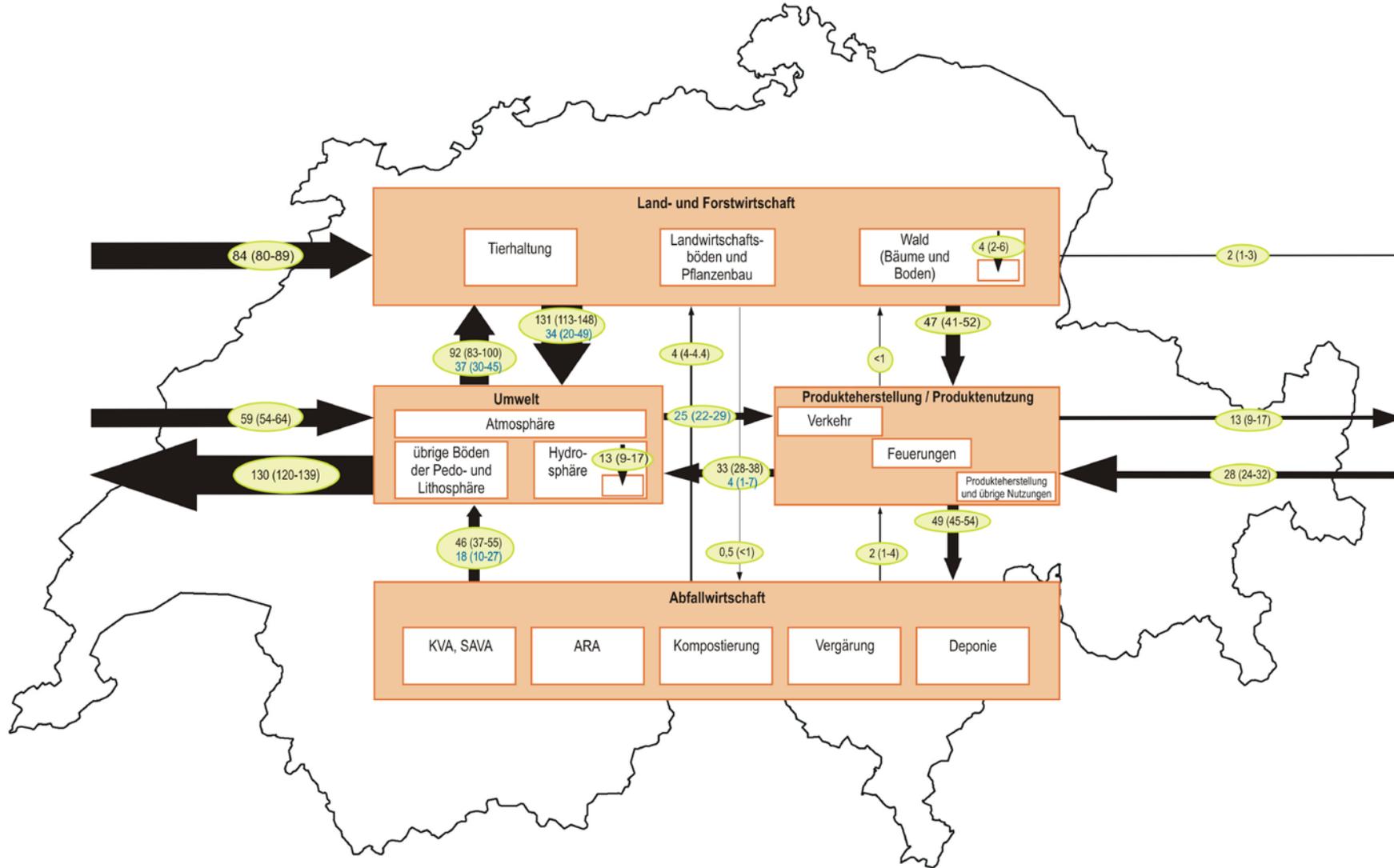
Die grössten Stickstofffrachten werden zwischen dem Ausland und den Subsystemen Land- und Forstwirtschaft und Umwelt ausgetauscht. Besonders komplex ist die Situation im Subsystem Land- und Forstwirtschaft, wo nicht nur zahlreiche Flüsse vorkommen, sondern auch bedeutsame Umwandlungen zwischen den Stickstoffverbindungen stattfinden.

4.1 Gesamtsystem

In Abb. 4 ist das Gesamtsystem abgebildet, in dem die Stoffflüsse je Subsystem über alle Prozesse aggregiert dargestellt sind. Darin ist ersichtlich, dass die grössten Stickstoffumsätze zwischen dem Ausland und den beiden Subsystemen Land- und Forstwirtschaft und Umwelt vorkommen. Die unten folgenden Ausführungen beschreiben die vier Subsysteme. Details zu den einzelnen Flüssen finden sich im Anhang A1.

Abb. 6 > Gesamtsystem Schweiz 2005, Stickstoffflüsse zwischen den Subsystemen

Die grössten Stickstoffflüsse im Gesamtsystem 2005. Das Gesamtsystem enthält vier Subsysteme, welche jeweils mehrere Prozesse enthalten. Die Pfeile charakterisieren die aufsummierten Stickstoffflüsse die zwischen den Subsystemen fließen, in 1000 Tonnen N pro Jahr (ktN/a) und beziehen sich auf das Jahr 2005. Angegeben sind in schwarz die Gesamtflüsse an Stickstoff (Mittelwert und Unsicherheitsbereich), welche sowohl ökologisch relevante Stickstoffverbindungen als auch Luftstickstoff enthalten und in blau reine Luftstickstoffflüsse.

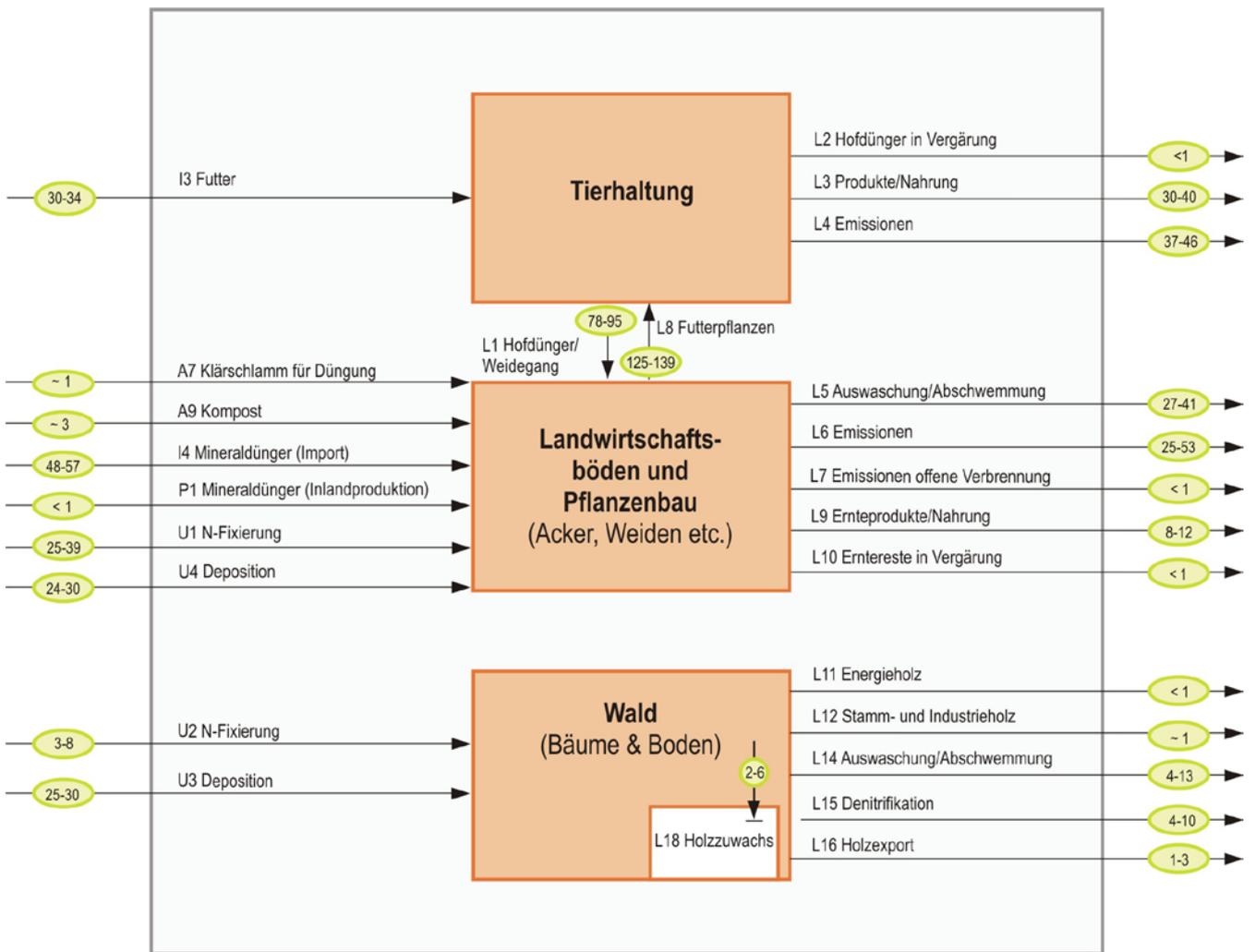


4.2 Land- und Forstwirtschaft

4.2.1 Flussdiagramm Land- und Forstwirtschaft

Abb. 7 > Subsystem Land- und Forstwirtschaft

Das Subsystem Land- und Forstwirtschaft besteht aus den Prozessen Tierhaltung, Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau und Wald. Die grün hinterlegten Zahlen bezeichnen die Grösse der Stickstoffflüsse in ktN/Jahr. Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten.



Tab. 3 > Übersicht Inputs/Outputs Land- und Forstwirtschaft

Überblick über die Stickstofffrachten die zwischen dem Subsystem Land- und Forstwirtschaft und anderen Subsystemen ausgetauscht werden (Frachten), sowie über die einzelnen Flüsse die dabei beteiligt sind (Teilfrachten, Stofffluss). Die Bilanz des Subsystems geht auf, die Fehlerintervalle von Output- und Input-Flüsse überschneiden sich. Flüsse an Luftstickstoff (N₂) sind separat ausgewiesen (blaue Schrift).

	Fracht [kt N/a]	Teilfrachten [kt N/a] Mittelwert, Unsicherheitsbereich	Flussbezeichnung, Stofffluss	
Output von Land- und Forstwirtschaft nach/in Subsystem				
Produkteherstellung/Produktenutzung	47	35	30–40 L3	Produkte/Nahrung (Milch, Eier, Fleisch etc.) aus der Tierhaltung
		10	8–12 L9	Ernteprodukte/Nahrung aus dem Pflanzenbau
		0,4	<1 L11	Energieholz für Feuerungen
		1	1–1,3 L12	Stamm- und Industrieholz für die Holz-/ Papierindustrie
Abfallwirtschaft	0,5	0,5	<1 L2	Hofdünger in die Vergärung
		0,004	<1 L10	Erntereste in die Vergärung
Umwelt	131	42	37–46 L4	Emissionen (NH ₃) aus der Tierhaltung
		34	27–41 L5	Auswaschung (NO ₃) aus Landwirtschaftsböden
		11	10–12 L6 (r)	Emissionen N ₂ O und NH ₃ aus Landwirtschaftsböden
		28	14–43 L6 (nr)	Emissionen N ₂ aus Landwirtschaftsböden
		0,1	<1 L7	Offene Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen inkl. illegale Müllverbrennung
		8,5	4–13 L14	Auswaschung (NO ₃) aus Waldböden
		1	1–2 L15 (r)	Emissionen (N ₂ O) durch Denitrifikation aus Waldböden
		6	3–9 L15 (nr)	Emissionen N ₂ durch Denitrifikation aus Waldböden
Ausland	2	2,0	1–3 L16	Holz-Export
Summe out-Flüsse	180			
Senke				
Land- und Forstwirtschaft	4	4	2–6 L18	Holz-Zuwachs im Wald
Summe out-Flüsse + Senke	184		165–202	
Input in Land- und Forstwirtschaft von/aus Subsystem				
Produkteherstellung/Produktenutzung	0,02	0,02	<1 P1	Mineraldünger Inlandproduktion für die Düngung im Pflanzenanbau
Abfallwirtschaft	4	3	3–3,4 A9	Kompost für die Düngung im Pflanzenanbau
		1	1–1,1 A7	Klärschlamm für die Düngung im Pflanzenanbau
Umwelt	92	32	25–39 U1	N-Fixierung durch Landwirtschaftspflanzen
		5	3–8 U2	N-Fixierung durch Waldpflanzen
		27	25–30 U3	Atmosphärische Deposition auf Wald
		27	24–30 U4	Atmosphärische Deposition auf Landwirtschaftsböden
Ausland	84	32	30–34 I3	Futter-Import in die Tierhaltung
		52	48–57 I4	Mineraldünger (Import) in den Pflanzenbau
Summe in-Flüsse	180		171–190	
Total in minus out minus Senke	-4	Die Unsicherheitsintervalle der Summe von Out-Flüssen (+Senke) und der Summe von In-Flüssen überlappen. Die Differenz ist deshalb nicht signifikant.		
Interne Stoffflüsse				
Land- und Forstwirtschaft	218	86	78–95 L1	Hofdünger/Weidegang
		132	125–139 L8	Stickstoffverbindungen in Futterpflanzen für die Tierhaltung

4.2.2 Prozesse Land- und Forstwirtschaft

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 Miststöcken. Ammoniakverluste bis und mit Ausbringung des Hofdüngers gehören ebenfalls zu diesem Prozess¹⁶.

a) Tierhaltung

Ammoniakverluste die auf Weiden durch den Weidegang der Hoftiere 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, Kompost und Klärschlamm entstehen.

Input in die Tierhaltung ist die Zufuhr von Stickstoff im Tierfutter aus dem In- und Ausland. Outputs sind 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 mit Hofdünger und Gülle abgeführt, die im Pflanzenbau eingesetzt werden oder in Vergärungsanlagen vergärt werden.

Der Prozess «Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau» umfasst die Stickstoffumwandlungsprozesse, die auf Landwirtschaftsflächen, Wiesen und Weiden und im Pflanzenbau stattfinden.

b) Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau

Ammoniakverluste in die Luft aufgrund des Ausbringens von Hofdünger sind im Prozess Tierhaltung integriert (entspricht der aktuell umgesetzten IPCC-Methodik im schweizerischen THG-Inventar). 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.

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

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

¹⁶ Die Zuordnung der Ammoniakemissionen entspricht der aktuell umgesetzten IPCC-Methodik im schweizerischen THG-Inventar

Der Prozess «Wald und Waldböden» beschreibt Umwandlung, Kumulierung und Abnahme von Stickstoff im Waldboden und in den Waldpflanzen.

c) Wald und Waldböden

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 Stickstoffsenke. Diese Lagerveränderung beträgt ungefähr 4 kt N (2–6 kt N), abgeschätzt aus dem Vergleich der Daten des dritten Landesforstinventars (LFI 3) mit dem zweiten (LFI 2)¹⁷.

Systemgrenzen Landwirtschaft: Hinweise zur Systemgrenze zwischen den Prozessen a) und b): Die BAFU-Datenbank für Luftschadstoff- und Klimagasemissionen EMIS lässt verschiedene Klassifikationen der Emissionsquellen zu. Die wichtigste basiert auf der IPCC-Systematik (IPCC 1997). Sie wird für die schweizerischen Inventare unter der UNO-Klimakonvention (FOEN 2009b) und unter der Genfer Konvention (FOEN 2009a) verwendet. Die folgende Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen den IPCC-Quellenkategorien und der Definition der Prozesse in der vorliegenden Stoffflussanalyse. Man beachte, dass die IPCC-Systematik nur für Emissionen in die Atmosphäre definiert ist. Stoffflüsse aus der Atmosphäre sind ebenso wenig enthalten wie flüssige oder feste Stoffflüsse in die Abfallwirtschaft etc.

Tab. 4 > Zusammenhang zwischen IPCC-Sektoren/-Kategorien und den Quellengruppen in den Prozessen a) Tierhaltung und b) Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau

IPCC sector Agriculture / source categories		Prozesse (Stoffflüsse)
NFR Code	Category	Nomenklatur Stoffflussanalyse
4B	Manure Management	a) Tierhaltung (L1, L4) <ul style="list-style-type: none"> • z. B. N-Eintrag in Boden (aus Hofdünger und Weidegang), NH_3-Emissionen (aus Hofdünger, nicht aber Weidegang)
4D	Agricultural Soils	b) Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau (L6, L7)
4D1	Direct Soil Emissions	<ul style="list-style-type: none"> • z. B. N_2O-Emissionen aus der Denitrifikation von Stickstoff aus Mineraldünger oder aus fixiertem Luftstickstoff (L6)
4D2	Pasture, Range and Paddock Manure	<ul style="list-style-type: none"> • NH_3-, N_2O-, NO_x-Emissionen aus dem Weidegang inkl. aus der Denitrifikation von Stickstoff aus Tierexkrementen
4D3	Indirect Emissions	<ul style="list-style-type: none"> • N_2O-Emissionen aus der Denitrifikation von deponiertem Stickstoff
4D4	Use of sewage sludge and compost as fertilizers	<ul style="list-style-type: none"> • N_2O-Emissionen aus der Denitrifikation von Stickstoff aus der Düngung mit Kompost und Klärschlamm
4F	Field Burning of Agricultural Residues	<ul style="list-style-type: none"> • NO_x-, N_2O-, NH_3-Emissionen aus der offenen Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen (L7)

¹⁷ Die Ergebnisse des Landesforstinventars werden 2010 erscheinen. Teilergebnisse sind auf www.lfi.ch/ publiziert.

4.2.3 Resultate Land- und Forstwirtschaft

Rund 94 % aller NH₃-Emissionen in der Schweiz sind landwirtschaftlicher Herkunft. 3 % stammen aus der Nutzung von Brenn- und Treibstoffen, 1 % aus dem Abfallsektor, 2 % aus verschiedenen Quellen.

Die landwirtschaftlichen NH₃-Emissionen stammen zu 83 % aus der Nutztierhaltung (davon 70 % vom Rindvieh), 15 % aus mineralischer Düngenanwendung und 2 % sind natürliche Verluste (Ernterückstände/Böden) (FOEN 2009b).

Lachgasemissionen der Land- und Forstwirtschaft entstehen in allen Prozessen des Subsystems. Tab. 5 gibt eine Übersicht über die N₂O-Teilflüsse der Land- und Forstwirtschaft.

Tab. 5 > Lachgasemissionen aus der Land- und Forstwirtschaft

Lachgasemissionen entstehen in allen drei Prozessen des Subsystems Land- und Forstwirtschaft.

N ₂ O-Emissionen aus Prozess	Teilflüsse	[kt N]
Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau	• Emissionen N ₂ O (Hofdünger, direct soil emissions)	0,89
	• Emissionen N ₂ O (Mineraldü, Kompost, Klärschl., direct soil emissions)	0,67
	• Emissionen N ₂ O (N-fixing crops)	0,40
	• Emissionen N ₂ O Ernterückstände	0,45
	• Emissionen N ₂ O aus organischen Böden	0,14
	• Emissionen N ₂ O (Weide)	0,32
	• indirekte Emissionen N ₂ O-N (Deposition von landwirtschaftl. N-Emissionen) * Umrechnungsfaktor für Landwirtschaftsböden	0,19
	• indirekte Emissionen N ₂ O-N (Deposition von NICHT-landwirtschaftl. N-Emissionen)* Umrechnungsfaktor für Landwirtschaftsböden	0,10
	Summe:	2,9
	Tierhaltung	• Emissionen N ₂ O (Hofdünger, Mist)
• Emissionen N ₂ O (Hofdünger, Gülle)		0,07
Summe:		0,8
Wald	• Denitrifikation Wald	1,1

Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau sowie Tierhaltung: THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c);

Denitrifikation Wald: TFIAM/COST 729 Workshop, Datenbasis 2000 (Rihm und Achermann 2007).

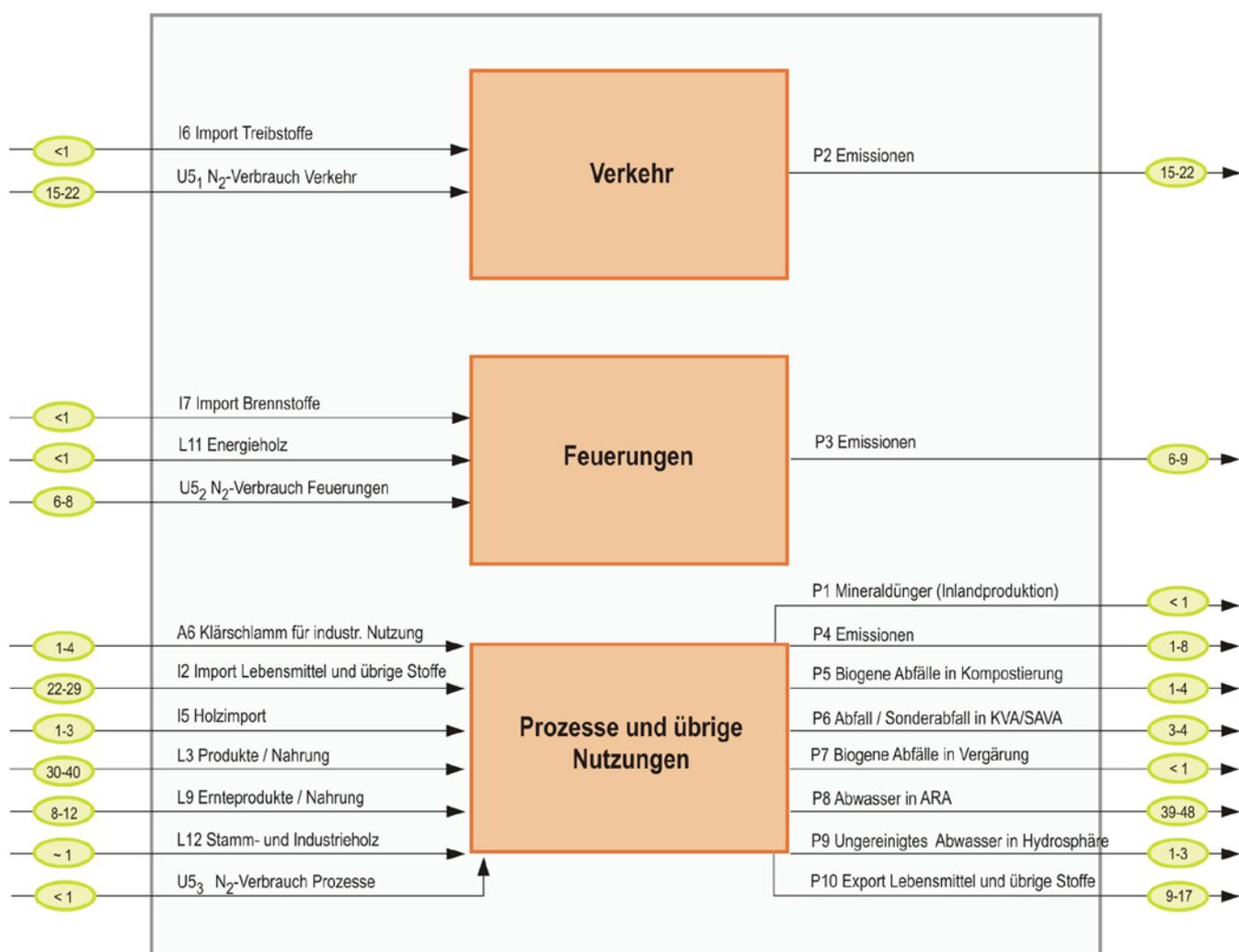
Tab. 6 > Stickstoffaustausch zwischen Land- und Forstwirtschaft und übrigen Subsystemen

Übersicht über die Stickstoffflüsse in die Land- und Forstwirtschaft aus übrigen Subsystemen bzw. aus der Land- und Forstwirtschaft in übrige Systeme. Der Austausch mit dem Subsystem Umwelt ist am intensivsten.

Input von/aus Subsystem	[kt N]	Output nach/in Subsystem	[kt N]
Produkteherstellung/Produktenutzung	<1	Produkteherstellung/Produktenutzung	41–52
Abfallwirtschaft	~4	Abfallwirtschaft	<1
Umwelt	83–100	Umwelt	113–148
Ausland	80–89	Ausland	1–3
Summe Inputs	171–190	Summe Outputs	162–198
		Senke durch Holzzuwachs im Wald	2–6
		Summe Outputs +Senke	165–202

4.3 **Produkteherstellung/Produktenutzung**4.3.1 **Flussdiagramm Produkteherstellung/Produktenutzung****Abb. 8 > Subsystem Produkteherstellung/Produktenutzung**

Das Subsystem Produkteherstellung/Produktenutzung besteht aus den Prozessen Verkehr, Feuerungen und Produkteherstellung und übrige Nutzungen (orange). Die grün hinterlegten Zahlen bezeichnen die Grösse der Stickstoffflüsse in ktN/Jahr. Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten.



Tab. 7 > Übersicht Inputs/Outputs Produkteherstellung/Produktenutzung

Überblick über die Stickstofffrachten die zwischen dem Subsystem Produkteherstellung/Produktenutzung und anderen Subsystemen ausgetauscht werden (Frachten), sowie über die einzelnen Flüsse die dabei beteiligt sind (Teilfrachten, Stofffluss). Die Bilanz des Subsystems geht auf, die Fehlerintervalle von Output- und Input-Flüsse überschneiden sich. Flüsse an Luftstickstoff (N₂) sind separat ausgewiesen (blaue Schrift).

	Fracht [kt N/a]	Teilfrachten [kt N/a] Unsicherheitsbereich	Mittelwert		Flussbezeichnung, Stofffluss
Output aus Produkteherstellung/ Produktnutzung nach/in Subsystem					
Land- und Forstwirtschaft	0,02	0,02	<1	P1	Mineraldünger (Inlandproduktion) für Düngung im Pflanzenanbau
Umwelt	33	18	15–22	P2	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus dem Verkehr
		8	6–9	P3	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus Feuerungen
		0,5	<1	P4	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus übrigen Nutzungen
		4	1–7	P4 (nr)	Emissionen (N ₂) aus übrigen Nutzungen
		2	1–3	P9	ungereinigtes Abwasser
Abfallwirtschaft	49	4	3–4	P6	Abfall/Sonderabfall aus Haushalten und Industrie in KVA/SAVA
		43	39–48	P8	Abwasser
		2	1–4	P5	Biogene Abfälle in Kompostierung
		0,3	<1	P7	Biogene Abfälle in Vergärung
Ausland	13	13	9–17	P10	Export Lebensmittel und übrige Stoffe
Summe out-Flüsse	95		89–106		
Input in Produkteherstellung/ Produktnutzung von/aus Subsystem					
Land- und Forstwirtschaft	47	35	30–40	L3	Produkte/Nahrung aus der Tierhaltung
		0,4	<1	L11	Energieholz aus der Waldwirtschaft
		1,2	1,1–1,3	L12	Stamm- und Industrieholz aus der Waldwirtschaft
		10	8–12	L9	Ernteprodukte/Nahrung aus dem Pflanzenanbau
Abfallwirtschaft	2	2	1–4	A6	Klärschlamm in HT-Verbrennung
Umwelt	25	18,2	15–22	U5 ₁	N ₂ -Verbrennung durch Verkehr
		6,7	5–8	U5 ₂	N ₂ -Verbrennung durch Feuerungen
		0,5	0–1	U5 ₃	N ₂ -Verbrennung durch Produkteherstellung und übrige Nutzungen
Ausland	28	25,4	22–29	I2	Import Lebensmittel und übrige Stoffe
		2	1–3	I5	Holz-Import
		0,1	<1	I6	Import Treibstoffe
		0,6	<1	I7	Import Brennstoffe
Summe in-Flüsse	102		94–110		
Total in minus out	7	Die Unsicherheitsintervalle der Summe von Out-Flüssen und der Summe von In-Flüssen überlappen. Die Differenz ist deshalb nicht signifikant.			

4.3.2 Prozesse 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.

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

d) Verkehr

Outputs sind die motorischen Emissionen in Form von Stickoxiden, Lachgas und Ammoniak. Input ist zum grössten Teil der Luftstickstoff. Ein geringer Teil besteht aus den Stickstoffanteilen in Benzin und Diesel. Wenn in Zukunft vermehrt Agrotreibstoffe eingesetzt werden, wird dieser Teil zunehmen.

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.

e) Feuerungen

Outputs sind Emissionen in Form von Stickoxiden, Lachgas und Ammoniak. Input ist wie beim Verkehr zum grössten Teil der Luftstickstoff. Ein geringer Teil besteht aus den Stickstoffanteilen in den Brennstoffen, insbesondere in Holz.

Der Prozess «Produkteherstellung und übrige Nutzungen» umfasst erstens Stickstoffumwandlungen in Industrieprozessen (mineralische, keramische, chemische Prozesse und Metallproduktion) und Nutzungen von Produkten in Haushalt und Wirtschaft. Für den Stickstoffkreislauf bedeutsam sind Produktion, Verarbeitung und Konsum von Lebensmitteln, Verarbeitung von Holz sowie Herstellung von Mineraldünger. Auch die Fleischverarbeitung und die Produktion von Tiermehl gehört in diesen Prozess. Die Tiermehlproduktion war früher wichtig und wird möglicherweise in Zukunft wieder an Bedeutung gewinnen, falls das aktuell geltende Fütterungsverbot (BSE¹⁸) wieder aufgehoben werden wird. Heute werden Schlachtabfälle in Zementwerken verbrannt, wodurch ein interner Stickstofffluss im Prozess «Produkteherstellung und übrige Nutzungen» entsteht.

f) Produktherstellung
und übrige Nutzungen

Outputs sind Emissionen in Form von Luftstickstoff, Stickoxiden, Lachgas und Ammoniak in die Atmosphäre, aber auch Stickstofffrachten im Abwasser und in Abfallstoffen sowie im Mineraldünger. Input ist Stickstoff in landwirtschaftlichen Produkten und Holz.

Hinweise zur Systemgrenze zwischen den Prozessen d), e) und f): Die BAFU-Datenbank für Luftschadstoff- und Klimagasemissionen lässt verschiedene Klassifikationen der Emissionsquellen zu. Die wichtigste basiert auf der IPCC-Systematik (IPCC 1997). Sie wird für schweizerische Inventare unter der UNO-Klimakonvention (FOEN 2009b) und unter der Genfer Konvention (FOEN 2009a) verwendet. Die fol-

¹⁸ Wegen der BSE-Krise darf seit 2001 in der Schweiz an kein Nutztier mehr Tiermehl verfüttert werden.

gende Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen den IPCC-Quellenkategorien und der Definition der Prozesse in der vorliegenden Stoffflussanalyse.

Tab. 8 > Zusammenhang zwischen IPCC-Sektoren/-Kategorien und den Quellengruppen in den Prozessen d) Verkehr, e) Feuerungen und f) Produkteherstellung und übrige Nutzungen

Zu beachten: Die hier dargestellte Zuordnung wurde ab dem Treibhausgasinventar 2010 leicht geändert (Verschiebungen zwischen 1A2, 1A3e und 1A5). Dies ist für vorliegende Analyse nicht relevant.

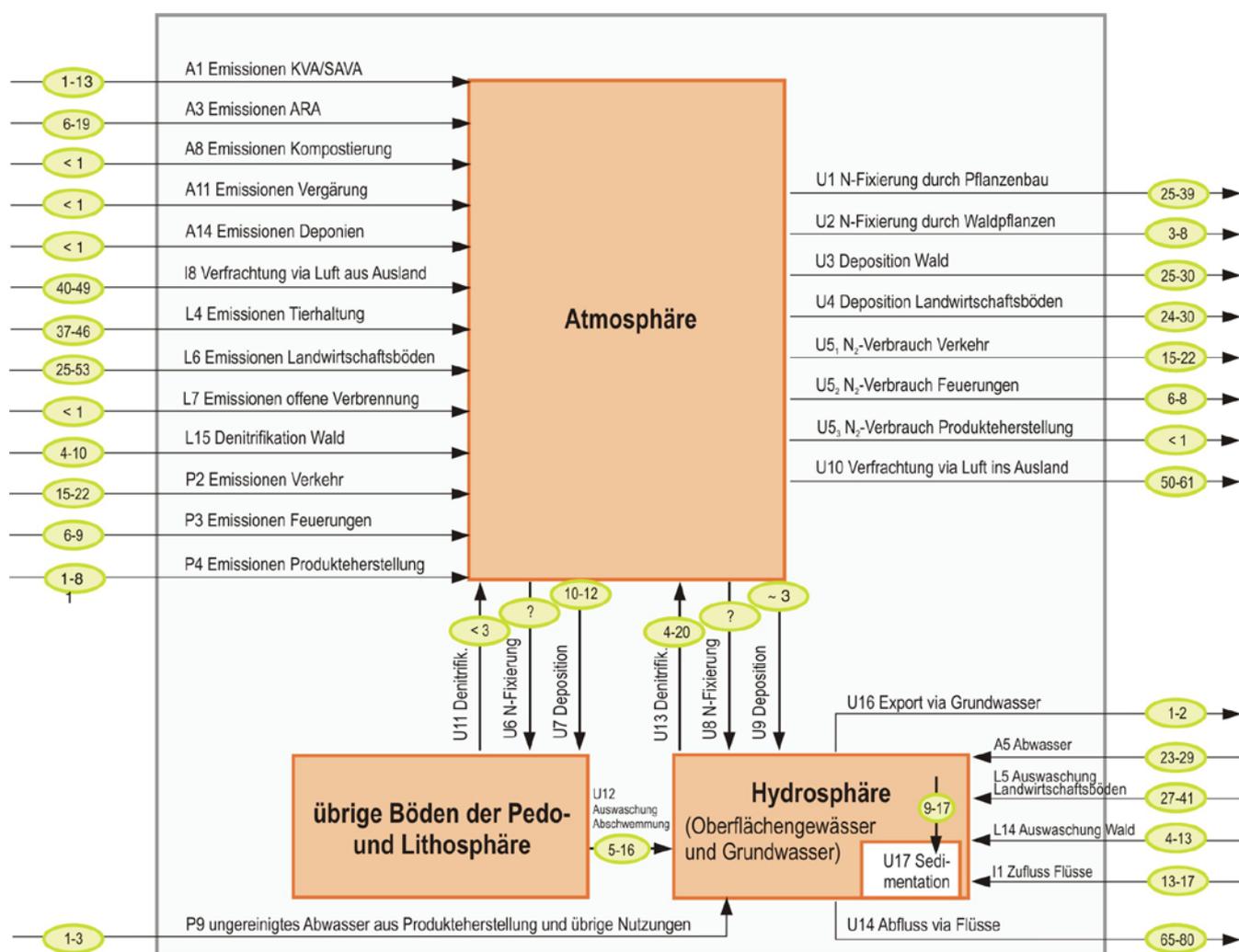
IPCC sectors / source categories		Prozesse und Quellen (Stoffflüsse)
NFR Code	Category	Nomenklatur Stoffflussanalyse
Energy		d) Verkehr (P2)
1A3a	Civil Aviation (domestic)	• Zivilluftfahrt (Inlandflüge)
1A3b	Road Transportation	• Strassenverkehr
1A3c	Railways	• Schienenverkehr
1A3d	Navigation	• Schiffsverkehr
1A3e	Other Transportation	• Militärflugverkehr
1A4c	Agriculture/Forestry/Fisheries	• Landwirtschaftliche Fahrzeuge und Maschinen
1A5	Other (other Off-road)	• übriger Offroad-Verkehr (Baumaschinen, Industriefahrzeuge, Garten/Hobby, Militärfahrzeuge)
		e) Feuerungen (P3)
1A1	Energy Industries	• Energieerzeugung (Kraftwerke, KVA, Fernheizung ...)
1A2	Manufacturing Industries and Construction	• ind./gew. Feuerungen
1A4a, 1A4b	Other Sectors	• Feuerungen Haushalte und Dienstleistungsbetriebe
1B	Fugitive Emissions from Fuels	• Flüchtige Emissionen, Verluste (Ergasnetz)
Industrial Processes / Solvent and other product use		f) Produkteherstellung und übrige Nutzungen (P4)
2A-G	Mineral products, Chemical Industry ...	• Ind. Prozess (Metalle, Chemie etc.)
3A-D	Paint Application, Degreasing ...	• Nutzung (Sprays, Anästhesie etc.)

4.4 Umwelt

4.4.1 Flussdiagramm Umwelt

Abb. 9 > Subsystem Umwelt

Das Subsystem Umwelt besteht aus den Prozessen Atmosphäre, übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre und Hydrosphäre (orange). Die grün hinterlegten Zahlen bezeichnen die Grösse der Stickstoffflüsse in ktN/Jahr. Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten.



Tab. 9 > Übersicht Inputs/Outputs Umwelt

Überblick über die Stickstofffrachten die zwischen dem Subsystem Umwelt und anderen Subsystemen ausgetauscht werden (Frachten), sowie über die einzelnen Flüsse die dabei beteiligt sind (Teilfrachten, Stofffluss). Die Bilanz des Subsystems geht auf, die Fehlerintervalle von Output- und Input-Flüsse überschneiden sich. Flüsse an Luftstickstoff (N₂) sind separat ausgewiesen (blaue Schrift).

	Fracht [kt N/a]	Teilfrachten [kt N/a] Mittelwert, Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Output von Umwelt nach/in Subsystem					
Land- und Forstwirtschaft	92	32	25–39	U1	N ₂ -Fixierung durch Landwirtschaftspflanzen
		5	3–8	U2	N ₂ -Fixierung durch Waldpflanzen
		27	25–30	U3	Atmosphärische Deposition auf Wald
		27	24–30	U4	Atmosphärische Deposition auf Landwirtschaftsböden
Produkteherstellung/ Produktenutzung	25	18,2	15–22	U5 ₁	N ₂ -Verbrauch durch Verkehr
		6,7	6–8	U5 ₂	N ₂ -Verbrauch durch Feuerungen
		0,5	0–1	U5 ₃	N ₂ -Verbrauch durch Prozesse
Ausland	130	56	50–61	U10	Verfrachtung von reakt. N-Verbindungen (NO _x , NH ₃) via Luft ins Ausland
		73	65–80	U14	Abfluss von Stickstoff durch Flüsse
		<1	<2	U16	Export via Grundwasser
Summe out-Flüsse	247		234–260		
Senke					
Sedimentation	13	13	9–17	U17	Zuwachs der Sedimente in Gewässern
Summe out-Flüsse und Senken	260		246–273		
Input in Umwelt von/aus Subsystem					
Land- und Forstwirtschaft	131	42	37–46	L4	Emissionen aus der Tierhaltung
		34	27–41	L5	Auswaschung (NO ₃) aus Landwirtschaftsböden in die Hydrosphäre
		11	10–12	L6 (r)	Emissionen (N ₂ O, NH ₃) aus Landwirtschaftsböden
		28	14–43	L6 (nr)	Emissionen (N ₂) aus Landwirtschaftsböden
		0,1	<1	L7	Offene Verbrennung von landw. Abfällen inkl. illegale Müllverbrennung
		9	4–13	L14	Nitrat- Auswaschung aus Waldböden
		1	<2	L15 (r)	Denitrifikation (N ₂ O) aus Waldböden
		6	3–9	L15 (nr)	Denitrifikation (N ₂) aus Waldböden
Produkteherstellung/ Produktenutzung	33	18	15–22	P2	Emissionen (NO _x , NH ₃ , N ₂ O) aus dem Verkehr
		8	6–9	P3	Emissionen (NO _x , NH ₃ , N ₂ O) aus Feuerungen
		0,5	<1	P4	Emissionen (NO _x , NH ₃ , N ₂ O) aus Prozessen und übrigen Nutzungen
		4	1–7	P4 (nr)	Emissionen (N ₂) aus und Prozessen und übrigen Nutzungen
		2	1–3	P9	Ungereinigtes Abwasser

	Fracht [kt N/a]	Teilfrachten [kt N/a] Mittelwert, Unsicherheitsbereich		Flussbezeichnung, Stofffluss	
Abfallwirtschaft	46	0,7	<1	A1 (r)	Emissionen (N ₂ O, N ₂ O, NH ₃) aus KVA, SAVA
		6	<12	A1 (nr)	Emissionen (N ₂) aus KVA, SAVA
		0,6	<1	A3 (r)	Emissionen (N ₂ O, NO _x) aus der Abwasserreinigung
		12	6–18	A3 (nr)	Emissionen (N ₂) aus der Abwasserreinigung
		26	23–29	A5	Gereinigtes Abwasser aus der ARA
		0,4	<1	A8 (r)	Emissionen (NO _x , NH ₃) aus der Kompostierung
		0,3	<1	A8 (nr)	Emissionen (N ₂) aus der Kompostierung
		0,1	<1	A11 (r)	Emissionen (NO _x , NH ₃) aus der Vergärung
		0,05	<1	A11 (nr)	Emissionen (N ₂) aus der Vergärung
		0,2	<1	A14	Emissionen (NH ₃) aus Deponien
Ausland	59	44	40–49	I8	N ₂ -Verfrachtung via Luft (vom Ausland)
		15	13–17	I1	Zufluss von Stickstoff durch Flüsse
Summe in-Flüsse	269		248–289		
Total in minus out minus Senke	9	Die Unsicherheitsintervalle der Summe von Out-Flüssen (+Senke) und der Summe von In-Flüssen überlappen. Die Differenz ist deshalb nicht signifikant.			

Interne Stoffflüsse

Umwelt	>39	?	?	U6	N-Fixierung auf übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre
		11	10–12	U7	Atmosphärische Deposition auf übrige Böden
		?	?	U8	N-Fixierung durch Wasserpflanzen
		3	2–3	U9	Atmosphärische Deposition auf Wasser
		0,4	<1	U11 (r)	Denitrifikation (N ₂ O) in übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre
		1,3	<2	U11 (nr)	Denitrifikation (N ₂) in übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre
		11	5–16	U12	Auswaschung/Abschwemmung aus übrigen Böden
		1,1	<2	U13 (r)	Denitrifikation (N ₂ O) aus der Hydrosphäre
		11	2–20	U13 (nr)	Denitrifikation (N ₂) aus der Hydrosphäre

4.4.2 Prozesse Umwelt

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

g) Atmosphäre

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) sowie aus Verkehr, Feuerungen und Produkteherstellung und übrige Nutzungen.

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.

Zum Prozess «Hydrosphäre» gehören Stickstoffumwandlungsprozesse in Oberflächengewässern und Sedimenten, im Grundwasser und in aquatischen Ökosystemen. Weiter gehören die Mineralisierung von Stickstoff durch den Abbau organischer Substanz, der N-Einbau in Biomasse und die Nitrifikation/Denitrifikation dazu.

h) Hydrosphäre

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

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

Ausserdem enthält die Hydrosphäre eine Senke: Jährlich werden netto ca. 9–17 kt N sedimentiert (der Wert wurde seit der letzten Stoffflussanalyse nicht neu bestimmt, Änderung sind vermutlich gering, deshalb wird für 2005 der bisherige Wert benutzt).

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

i) übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre

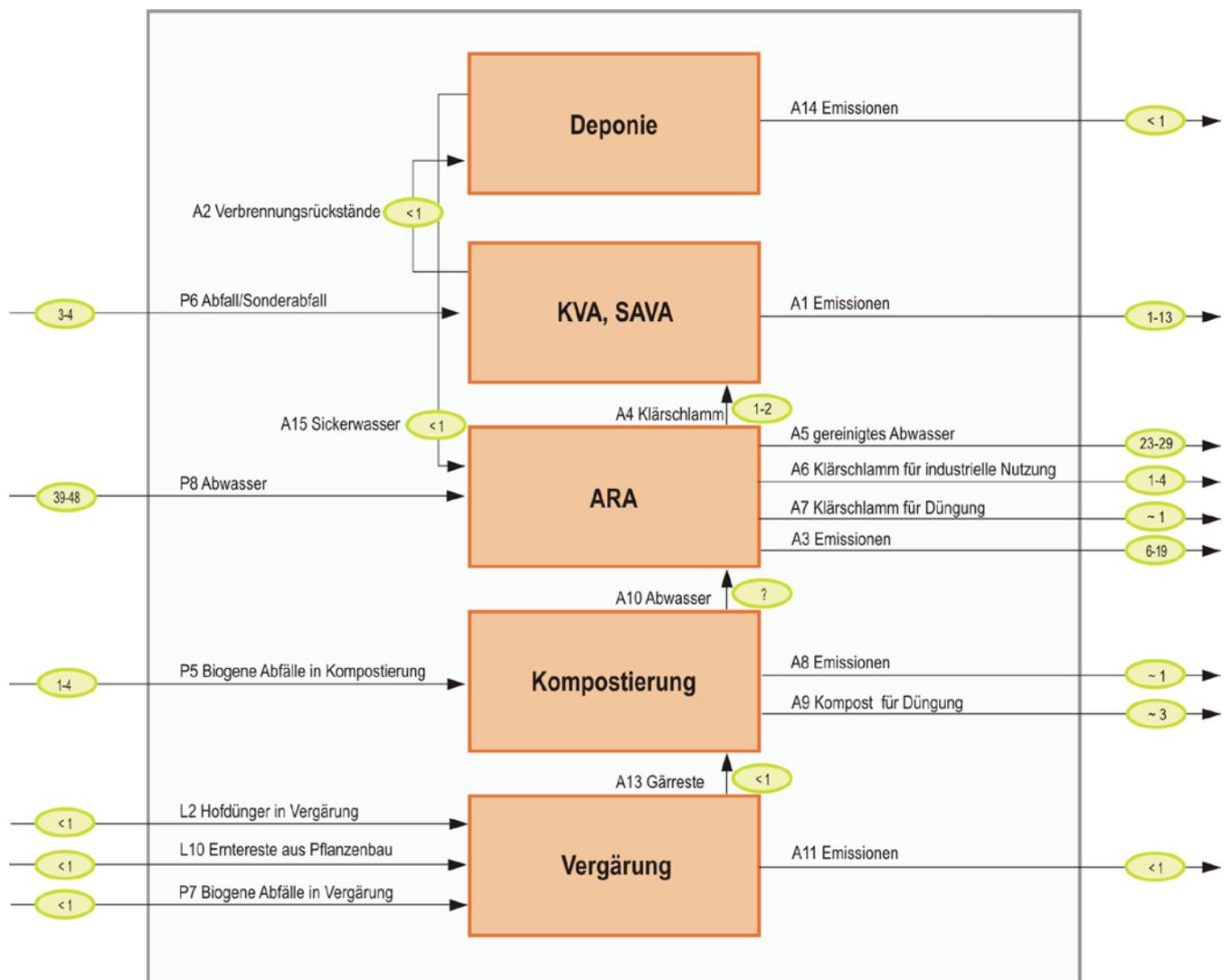
Inputs erfolgen durch N-fixierende Pflanzen und die atmosphärische N-Deposition. Outputs sind Emissionen der Denitrifikationsprodukte N_2O und N_2 sowie die Auswaschung von NO_3 in Gewässer.

4.5 Abfallwirtschaft

4.5.1 Flussdiagramm Abfallwirtschaft

Abb. 10 > Subsystem Abfallwirtschaft

Das Subsystem Abfallwirtschaft besteht aus den Prozessen Deponie, KVA/SAVA, ARA, Kompostierung und Vergärung (orange). Die grün hinterlegten Zahlen bezeichnen die Grösse der Stickstoffflüsse in ktN/Jahr. Es sind die Gesamtflüsse abgebildet, welche neben ökologisch relevanten Stickstoffflüssen teilweise auch Luftstickstoff enthalten.



Tab. 10 > Übersicht Inputs/Outputs Abfallwirtschaft

Überblick über die Stickstofffrachten die zwischen dem Subsystem Abfallwirtschaft und anderen Subsystemen ausgetauscht werden (Frachten), sowie über die einzelnen Flüsse die dabei beteiligt sind (Teilfrachten, Stofffluss). Die Bilanz des Subsystems geht auf, die Fehlerintervalle von Output- und Input-Flüsse überschneiden sich. Flüsse an Luftstickstoff (N₂) sind separat ausgewiesen (blaue Schrift).

	Fracht [kt N/a]	Teilfrachten [kt N/a] Mittelwert, Unsicherheitsbereich:	Flussbezeichnung, Stofffluss
Output von Abfallwirtschaft nach/in Subsystem			
Land- und Forstwirtschaft	4	3 1	3-3 A9 Kompost aus der Kompostierung 1-1,1 A7 Klärschlamm zur Düngung im Pflanzenanbau (heute besteht ein Austragungsverbot)
Produkteherstellung/Produktenutzung	2	2	1-4 A6 Klärschlamm in HT-Verbrennung
Umwelt	46	1 6 0,4 0,3 0,1 0,05 0,2 1 12 26	<1 A1 (r) Emissionen (N ₂ O, N ₂ O, NH ₃) aus KVA, SAVA <12 A1 (nr) Emissionen (N₂) aus KVA, SAVA <1 A8 (r) Emissionen (NO _x , NH ₃) aus der Kompostierung <1 A8 (nr) Emissionen (N₂) aus der Kompostierung <1 A11 (r) Emissionen (NO _x , NH ₃) aus der Vergärung <1 A11 (nr) Emissionen (N₂) aus der Vergärung <1 A14 Emissionen (NH ₃) aus Deponien <1 A3 (r) Emissionen (NO _x , N ₂ O, NH ₃) aus der Abwasserreinigung 6-18 A3 (nr) Emissionen (N₂) aus der Abwasserreinigung 23-29 A5 gereinigtes Abwasser aus der ARA
Summe out-Flüsse	53	44-62	
Input in Abfallwirtschaft von/aus Subsystem			
Land- und Forstwirtschaft	0,5	0,5 0,004	<1 L2 Hofdünger <1 L10 Erntereste in die Vergärung
Produkteherstellung/Produktenutzung	49	4 43 2 0,3	3-4 P6 Abfall/Sonderabfall 39-48 P8 Abwasser 1-4 P5 Biogene Abfälle in Kompostierung <1 P7 Biogene Abfälle in Vergärung
Summe in-Flüsse	50	45-55	
Total in minus out	-3	Die Unsicherheitsintervalle der Summe von Out-Flüssen und der Summe von In-Flüssen überlappen. Die Differenz ist deshalb nicht signifikant.	
Interne Stoffflüsse			
Abfallwirtschaft	>1	1 ? 0,001 0,02 <<1	1-2 A4 Klärschlamm aus der ARA in die KVA <1 A10 Abwasser aus der Kompostierung in die ARA <1 A13 Gärreste aus der Vergärung in die Kompostierung <1 A15 Sickerwasser aus Deponien <1 A2 Verbrennungsrückstände aus KVA in Deponie

4.5.2 Prozesse Abfallwirtschaft

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.

j) Kehricht- und Sonderabfallverbrennungsanlagen

Inputs sind Abfälle und Klärschlamm (und Luftstickstoff), Outputs sind stickstoffhaltige Abwässer und Luftschadstoffemissionen.

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

k) Abwasserreinigungsanlagen

Inputs sind Siedlungsabwasser, Abwasser aus Rauchgasreinigungsanlagen und Sickerwasser. Outputs sind geklärtes Abwasser, Klärschlamm und Luftschadstoffemissionen.

Der Prozess umfasst sämtliche Anlagen zur Kompostierung von biogenen Abfällen. Inputs sind biogene Abfälle, Outputs Kompost und Abwasser.

l) Kompostierung

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.

m) Vergärung

Inputs sind Hofdünger, Erntereste und biogene Abfälle. Outputs sind Gärreste und Luftschadstoffemissionen.

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

n) Deponien

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

4.6

Import- und Export-Flüsse

Tab. 11 > Übersicht Inputs/Outputs Schweiz/Ausland

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 Bilanz des Subsystems geht auf, die Fehlerintervalle von Output- und Input-Flüsse überschneiden sich. Die Senken von Stickstoff durch den Holzzuwachs im Wald sowie die Zunahme der Sedimente in Gewässern wurden in die Bilanz miteinberechnet.

	Fracht [kt N/a]	Teilfrachten [kt N/a] Mittelwert, Unsicherheitsbereich	Flussbezeichnung, Stofffluss
Export ins Ausland von Subsystem			
Land- und Forstwirtschaft	2	2	1-3 L16 Holz-Export
Produkteherstellung/Produktenutzung	13	13	9-17 P10 Export Lebensmittel und übrige Stoffe
Umwelt	130	73	65-80 U14 Abfluss via Flüsse
		56	50-61 U10 Export via Luft (NO _x und NH _y)
		1	<2 U16 Export via Grundwasser
Summe out-Flüsse	144		
Senken			
Senken	17	4	2-6 L18 Holz-Zuwachs im Wald
		13	9-17 U17 Zunahme der Sedimente in Gewässern
Summe Senken	17		
Summe out-Flüsse + Senken	161	153-175	
Import aus dem Ausland ins Subsystem			
Land- und Forstwirtschaft	84	52	48-57 I4 Mineraldünger (Import)
		32	30-34 I3 Futter-Import
Produkteherstellung/Produktenutzung	28	25,4	22-29 I2 Import Lebensmittel und übrige Stoffe
		2	1-3 I5 Holz-Import
		0,1	<1 I6 Import Treibstoffe
		1	<1 I7 Import Brennstoffe
Umwelt	59	15	13-17 I1 Zufluss via Flüsse
		44	40-49 I8 Import via Luft (vom Ausland) von NO _x -N und NH _y -N
Summe in-Flüsse	172	164-179	
Total in minus out minus Senken	10	Die Unsicherheitsintervalle der Summe von Out-Flüssen und der Summe von In-Flüssen überlappen. Die Differenz ist deshalb nicht signifikant.	

5 > Trends der Stoffflüsse in der Schweiz

Die Entwicklung der Stickstoffflüsse seit der letzten Stickstoffbilanz 1994 bis zum Bezugsjahr 2005 der vorliegenden Analyse lässt bei Emissionen in die Atmosphäre abnehmende Trends erkennen. Ähnliches trifft auch für Hof- und Mineraldünger sowie für die Stickstofffracht zu, die die Schweiz via Fliessgewässer exportiert.

5.1 Die wichtigsten Stoffflüsse 1994 und 2005

Tab. 12 stellt die grössten und wichtigsten Stickstoffflüsse von 1994 und 2005 einander gegenüber und beschreibt die Veränderungen dieser Flüsse in der Periode 1994–2005.

Tab. 12 > Vergleich der grössten Stickstoffflüsse 1994/1990 vs. 2005

Vergleich der grössten Stickstoffflüsse aus der Stoffbilanz Schweiz 1994/1990 (PG N-Haushalt CH 1996; GSK 1993) mit aktuellen Stickstoffflüssen für das Jahr 2005 (vorliegende Studie). Die Bezeichnung der Flüsse bezieht sich auf die vorliegende Studie (Zahlen 2005). Die Bezeichnung der Stickstoffflüsse von 1994 wurde in Fällen, wo ein Interpretationsspielraum besteht, dazugeschrieben. Flüsse mit reinem Luftstickstoff (N₂) sind in **blauer Schrift** angegeben.

	1994/1990 [kt N]	2005 [kt N]	Bemerkungen zur Datenqualität	Erklärung der Trends 1994–2005
Land-/Forstwirtschaft				
L8: Futterpflanzen aus Landwirtschaftsböden in die Tierhaltung	180	132	Wert 1994, Futter von Landwirtschaftsböden in die Tierhaltung aus GSK 1993. Keine detaillierten Angaben dazu vorhanden; u.a. ist nicht ausgewiesen, ob N ₂ -Frachten mitberücksichtigt wurden. Wert vermutlich zu hoch.	
L1: Hofdünger/Weidegang aus der Tierhaltung in Landwirtschaftsböden	97	86	Wert 1994 nach Treibhausgasinventar, FOEN 2009b verwendet. Der Wert aus GSK 1993 (Fluss an Hofdünger von Tierhaltung in Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau) scheint mit 155 ktN zu hoch; es sind keine detaillierten Angaben dazu vorhanden.	
L4: Emissionen aus der Tierhaltung in die Atmosphäre L6 (r): Emissionen aus Landwirtschaftsböden in die Atmosphäre	51 (NH ₃ -Ausgasung) 8 (N ₂ O-Emissionen)	42 11	Denitrifikation von N ₂ mit hoher Unsicherheit verbunden. Unsicherheitsbereich 1994: 50–100 ktN.	Abnahme NH ₃ -Emissionen insgesamt wegen Rückgang der Tierzahlen und des Mineraldüngereinsatzes, Verbesserung des Hofdüngermanagements und Änderungen in der Tierhaltung. Hohe Unsicherheit bei Denitrifikation.
<u>Summe L4 + L6 (r)</u> L6 (nr): Emissionen N ₂ aus Landwirtschaftsböden in Atmosphäre	<u>59</u> <u>75</u>	<u>53</u> <u>28</u>		
L3: Produkte/Nahrung aus der Tierhaltung L9: Ernteprodukte/Nahrung aus dem Pflanzenbau <u>Summe L3 + L9</u>	<u>42</u> (landw. Produkte)	<u>35</u> <u>10</u> <u>45</u>	Werte 1994 aus PG N-Haushalt CH 1996. Weitere Vergleichswerte 1994 nach OSPAR: Produkte/Nahrung aus der Tierhaltung: 28 ktN; Ernteprodukte/ Nahrung aus dem Pflanzenbau: 10 ktN.	Zunahme der tierischen Produkte wegen Intensivierung der Tierhaltung. Zunahme der Nutztierzahlen seit 2004 (siehe auch Abb. 16).

	1994/1990 [kt N]	2005 [kt N]	Bemerkungen zur Datenqualität	Erklärung der Trends 1994–2005
L5: Auswaschung/Abschwemmung aus Landwirtschaftsböden in die Hydrosphäre	37	34	Es sind keine aktuellen Werte verfügbar. Wert für 2005 hergeleitet (siehe Anhang, Fluss L5).	Abnahme gegenüber 1994 erwartet (Abschätzung).
L14: Auswaschung aus dem Wald in Hydrosphäre	12	9	Wert 1994 mit hoher Unsicherheit. Unsicherheitsbereich 1994: 8–16 kt N.	Die Auswaschung ist von der Waldfläche und der Deposition auf Waldböden abhängig. Eine leichte Zunahme der Waldfläche und eine deutliche Abnahme der Deposition haben stattgefunden. Dies erklärt eine Netto-Abnahme der Auswaschung.
L15 (r): Denitrifikation aus dem Wald (ohne N ₂) U11 (r): Denitrifikation aus übrigen Böden (ohne N ₂) <u>Summe L15 (r) + U11 (r)</u> L15 (nr) Denitrifikation N ₂ aus dem Wald	<1 9 (Denitrifikation Nicht-Landwirtschaftsböden)	1,1 0,4 <u>1,5</u> 6	Denitrifikation von N ₂ mit hoher Unsicherheit verbunden. Unsicherheitsbereich 1994: 6–12 kt N.	Grosse Unsicherheiten; Denitrifikation schwer bestimmbar. N ₂ macht den grössten Teil des Flusses aus.
U13 (r): Denitrifikation N ₂ O, NO _x aus der Hydrosphäre U13 (nr): Denitrifikation N ₂ aus der Hydrosphäre <u>Summe U13 (r) + U13 (nr)</u>	 <u>13 (inkl. N₂)</u>	1 (ohne N ₂) <u>11 (N₂)</u> <u>12</u>	Grosse Schätzunsicherheit für N ₂ . Unsicherheitsbereich 1994: 9–18 kt N (inkl. N ₂).	
Produkteherstellung/-nutzung				
P8: Abwasser in ARA	Unbekannt, da interner Fluss	43		
P2: Emissionen NO _x , NH _y aus dem Verkehr in die Atmosphäre P3: Emissionen NO _x , NH _y aus Feuerungen in die Atmosphäre <u>Summe P2 + P3</u>	 <u>47 (aus Verbrennungsprozessen, davon 43 NO_x)</u>	18 8 <u>26</u>	Gemäss neueren Bewertungen (FOEN 2009a) wurden die NO _x -Emissionen für 1994 damals um etwa 5 kt N überschätzt.	Abnahme der Emissionen dank Luftreinhaltemassnahmen.
P10: Export aus Lebensmittelindustrie und übrige Produkte	13	13	Abschätzung schwierig da durchschnittlicher N-Gehalt von Exportprodukten unsicher ist. Unsicherheitsbereich 1994: 10–15 kt N	
Umwelt				
U14: Abfluss via Flüsse	98	73	Wert 1994: gemessene Frachten an Schweizer Grenze. Durchschnitt der Jahre 1986–1995. Daten NADUF, Eawag. Wert 2005: Mittelwert Rhein 1995–2007; hochgerechnet auf gesamte Schweiz. Daten NADUF, Eawag. Unsicherheitsbereich 1994: 90–110 kt N.	Abnahme dank erfolgreicher Reduktionsmassnahmen in Industrie, Verkehr und Landwirtschaft
U16: Export via Grundwasser	5	<1	Daten 1994 mit hoher Unsicherheit.	Der Wert aus GSK 1993 (SRU 209) wird als zu hoch eingestuft, es liegen nur wenige Datenquellen vor.
U3: Deposition auf Wald U4: Deposition auf Landwirtschaftsböden U7: Deposition auf übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre U9: Deposition auf Gewässer <u>Summe U3 + U4 + U7 + U9 (gesamte Deposition)</u>	32 32 13 3 <u>80</u>	27 27 11 3 <u>69</u>	Die Gesamtdeposition für 1994 wurde gemäss aktuellster Kenntnisse der Depositionsgeschwindigkeiten neu auf die vier Flächentypen Wald, Landwirtschaftsböden, übrige Böden und Wasser aufgeteilt, um eine Vergleichsbasis zu 2005 zu bilden.	Abnahme der Gesamtdeposition und der Deposition auf alle Flächentypen (ausser Wasser). Der gleichbleibende Wert von 3 kt N auf Gewässer erklärt sich aus Rundungsgründen.

	1994/1990 [kt N]	2005 [kt N]	Bemerkungen zur Datenqualität	Erklärung der Trends 1994–2005
U10: Verfrachtung via Luft ins Ausland (Export)	70	56	Unsicherheitsbereich 1994: 55–85 kt N (davon 30–55 NO _x und 20–35 NH _y).	Abnahme dank Luftreinhalte- massnahmen, primär NO _x reduziert.
U1: N-Fixierung durch landwirtschaftliche Nutzpflanzen	45	32	Datenqualität 1994 schlecht. Unsicherheitsbereich 1994: 30–60 kt N. Wert 1994 gemäss THG-Inventar Landwirtschaft und OSPAR: 37 kt N.	Abnahme möglich durch Abnahme Leguminosenanteil im Ackerbau. Schwierig abschätzbar.
U5: N ₂ -Verbrauch durch Verkehr, Feuerungen, Prozesse	47 (Verbren- nungsprozesse)	25		Abnahme dank Reduktions- massnahmen Luftreinhaltung
U12: Auswaschung aus übrigen Böden in Hydrosphäre	6	11	Datenlage 1994 und 2005 schlecht. Unsicherheitsbereich 1994: 2–10 kt N.	
U2: N ₂ -Fixierung Wald	12	5	Datenqualität 1994 schlecht. Unsicherheitsbereich 1994: 8–16 kt N.	Trend nicht real, methodisch bedingt. Vermutlich keine reale Zu- oder Abnahme.
Abfallwirtschaft				
A5: gereinigtes Abwasser aus der ARA in die Hydrosphäre	30	26		Abnahme wegen verbesser- ter Stickstoffelimination bei ARA.
Ausland → Inland				
I4: Mineraldünger (Import) in Landwirtschaftsböden	33	52	Summe Mineral- und Recyclingdünger 1994 gemäss THG-Inventar Landwirtschaft und OSPAR: 65 kt N.	Abnahme Mineraldünger- einsatz. Abnahme beim Einsatz von Recyclingdünger wegen Verbot von Klärschlamm für die Düngung / Übergangs- bestimmung für ausgewählte Flächen, die definitiv am 30. September 2006 auslief.
P1: Mineraldünger (Inlandproduktion)	33	<< 0,5		
<u>Summe Einsatz Mineraldünger</u>	<u>66</u>	<u>52</u>		
A7: Klärschlamm für Landwirtschaftsdünger		1		
A9: Kompost für Landwirtschaftsböden		3		
<u>Summe Recyclingdünger</u>	<u>5 (Klärschlamm, Kompost)</u>	<u>4</u>		
<u>Summe Mineral- und Recyclingdünger</u>	<u>71</u>	<u>56</u>		
I8: Import via Luft aus dem Ausland	47	44	Zahlen 1994 aus EMEP 1995. Unsicherheitsbereich 1994: 37–57 kt N (davon 27 NO _x und 20 NH _y).	
I2: Import Lebensmittel und übrige Stoffe	24	25		Zunahme Holznutzung.
I5: Holz-Import	0,5	2		
<u>Summe I2+I5</u>	<u>25</u>	<u>27</u>		
I3: Import Futter für die Tierhaltung	21	32	Wert 1994 gemäss OSPAR: 26 kt N.	Zunahme von Soja-Importen
I1: Zufluss via Flüsse	21	15	Wert für 2005 abgeschätzt aufgrund Daten von 1994. Unsicherheitsbereich 1994: 15–25 kt N.	

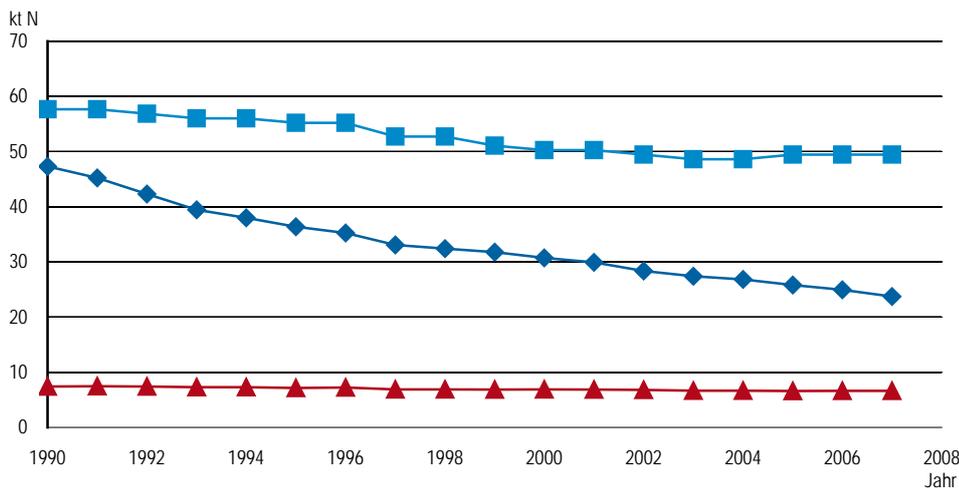
5.2 Zeitreihen der wichtigsten Stoffflüsse

5.2.1 Emissionen in Atmosphäre

In der BAFU-Datenbank EMIS sind alle Emissionen in die Atmosphäre als Zeitreihen gespeichert. Abb. 11 zeigt die zeitliche Entwicklung der gesamtschweizerischen NH_3 -, NO_x - und N_2O -Emissionen für die Periode 1990–2007. Die angegebenen Emissionen umfassen die Beiträge aller Quellengruppen.

Abb. 11 > Stickstoffhaltige Luftschadstoffemissionen in die Atmosphäre

In der Periode 1990 bis 2007 haben die Emissionen – vor allem von NO_x – abgenommen. Die NH_3 -Emissionen haben hingegen nur wenig abgenommen (Ergebnisse Agrammon)



FOEN (2009a), FOEN (2009b), Agrammon (2009)

Tab. 13 > Stickstoffhaltige Luftschadstoffemissionen in die Atmosphäre 1994 und 2005

In der Periode 1994 (letzte N-Bilanz Schweiz) bis 2005 (aktuelle N-Bilanz) haben die Emissionen abgenommen (Zahlen NH_3 , NO_x und N_2O auf zwei signifik. Ziffern gerundet).

	1994 PG N-Haushalt CH 1996 (SRU 273) [kt N]	1994 FOEN 2009a [kt N]	2005 vorliegende Studie [kt N]	Änderung 1994–2005 1. Zahl ggü PG N-Haushalt 1996, 2. Zahl ggü FOEN 2009a
NH_3	55	55	49	-13 % -12 %
NO_x	43	38	26	-40 % -32 %
N_2O	11	7,3	6,7	-36 % -9 %
Total N	109	101	82	-25 % -19 %

FOEN 2009a, FOEN 2009b

Bei den einzelnen Verbindungen sind in der Periode 1994 bis 2005, die die Zeit zwischen der N-Bilanz BUWAL (1996) und der vorliegenden Bilanz abdeckt, unterschiedliche Entwicklungen erkennbar (Tab. 13):

- > Für 1994 gibt es neben den Zahlen der früheren N-Bilanz (PG N-Haushalt 1996) aktualisierte Werte aus dem Treibhausgasinventar und dem neuen Agrammon-Modell. Bei den NO_x und den N_2O -Emissionen gibt es Differenzen. Die Änderungen 1994 bis 2005 sind demnach davon abhängig, welche Basis für die Werte 1994 benutzt wird.
- > NO_x : Dank erfolgreicher Massnahmen bei Feuerungen und im Verkehr konnten die NO_x -Emissionen um 40 % respektive 32 % reduziert werden.
- > NH_3 : Auch NH_3 wurde kontinuierlich reduziert, allerdings in weit geringerem Masse als NO_x . Die NH_3 -Emissionen werden zu fast 95 % von der Landwirtschaft verursacht. Die Reduktion um 12 % respektive 13 % ist primär auf eine Reduktion des Tierbestands, weniger Mineraldüngereinsatz und eine Verbesserung des Hofdüngermanagements zurückzuführen.
- > N_2O : Mit 36 % scheinen die Reduktionen beim N_2O im Vergleich mit der Datenbasis 1994 (PG N-Haushalt CH 1996) aus heutiger Sicht zu hoch. Aufgrund der neuen Datenbasis (Treibhausgasinventar) fällt die Reduktion mit 9 % weit geringer aus. Fast 80 % der N_2O -Emissionen stammen aus der Landwirtschaft, deren Emissionen auch um ca. 10 % reduziert wurden. Seit 2004 gibt es wieder einen leicht steigenden Trend.

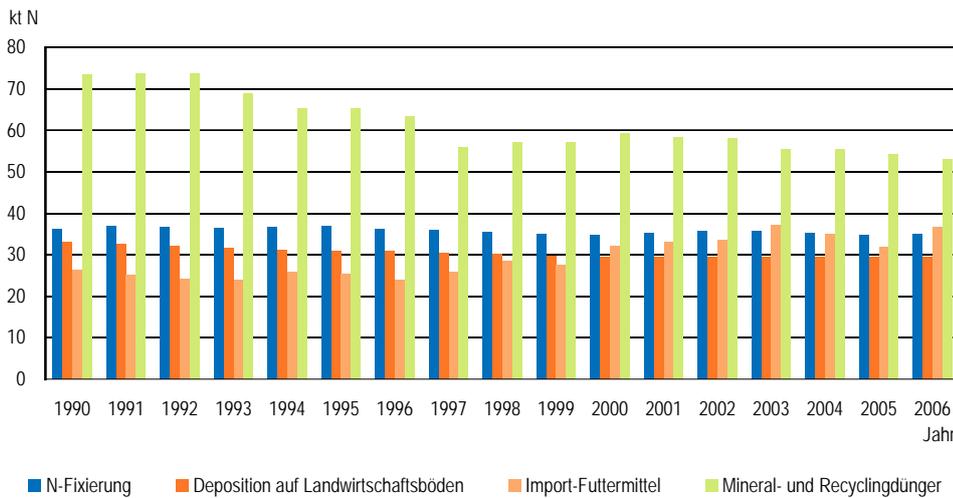
5.2.2 Stoffflüsse der Landwirtschaft

Die Daten der in diesem Kapitel angegebenen N-Flüsse wurden von Agroscope Reckenholz zur Verfügung gestellt (ART 2008b, Spiess 2009). Sie wurden gemäss der OSPAR-Methodik nach Spiess (2009) berechnet. Diese Input-Output-Bilanz für die Landwirtschaft (Pflanzenbau und Tierhaltung) bezieht Stickstoffflüsse mitein, die dem landwirtschaftlichen Kreislauf von aussen zugeführt werden oder ihn wieder verlassen. Dazu wurde die gesamte Schweizer Landwirtschaft als ein «landwirtschaftlicher Betrieb» betrachtet.

Abb. 12 > N-Flüsse IN die Landwirtschaft hinein (Inputs)

In der Periode 1994 (letzte N-Bilanz Schweiz) bis 2005 (aktuelle N-Bilanz) hat der Einsatz von Mineral- und Recyclingdünger um 17 % abgenommen, und die importierten Futtermittel um 23 % zugenommen. Die atmosphärische Deposition auf Landwirtschaftsböden und die N-Fixierung haben sich nur wenig verändert.

Input-Flüsse



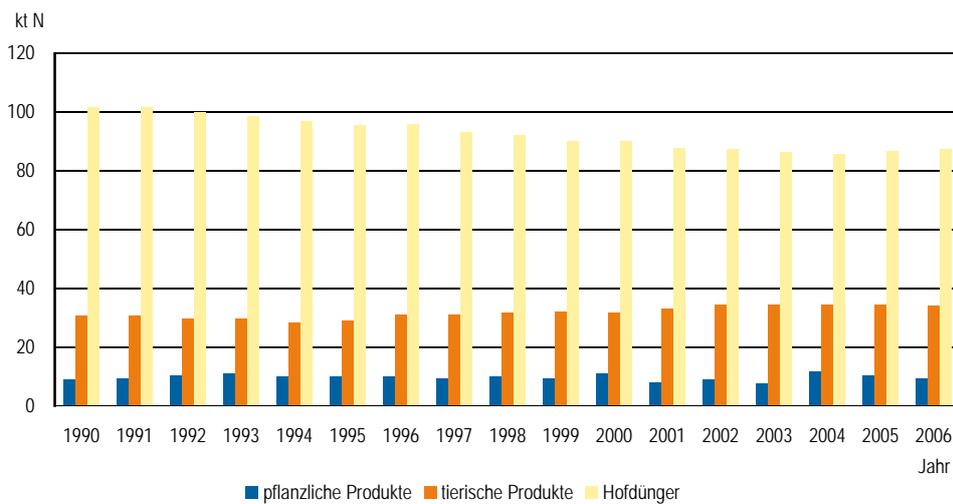
Spiess 2009, OSPAR-Bilanzierung (N-Fixierung, Deposition auf Landwirtschaftsböden, Import Futtermittel, Mineral- und Recyclingdünger)

- > Der Import von Futtermitteln aus dem Ausland hat gemäss OSPAR-Bilanzierung um 23 % zugenommen. Eine Differenzierung nach Futtermitteln, um die Ursache dieses Anstiegs zu finden (höherer Kraftfuttereinsatz bei der Tierproduktion, Verbot Tiermehl zu verfüttern), wurde nicht vorgenommen (siehe auch Abb. 13).
- > Die Deposition von stickstoffhaltigen Verbindungen auf Landwirtschaftsböden (Spiess 2009) hat von 1994 bis 2005 um 6 % abgenommen (Abb. 12). Dies ist vergleichbar mit der gesamtschweizerischen Deposition, die gemäss vorliegendem Bericht (Daten EMEP, Meteotest 2009) in diesem Zeitraum um 14 % abgenommen hat.
- > Die N-Fixierung kann sich in Abhängigkeit der landwirtschaftlichen Kulturen ändern. Gemäss ART hat in der Periode 1994 bis 2005 eine Abnahme um 5 % stattgefunden.

Abb. 13 > N-Flüsse AUS der Landwirtschaft hinaus (Outputs) und Hofdünger (interner Fluss im Subsystem Land-/Forstwirtschaft)

Output-Flüsse und Hofdünger

In der Periode 1994 (letzte N-Bilanz Schweiz) bis 2005 (aktuelle N-Bilanz) hat der Output von tierischen Produkten aus der Landwirtschaft um 22 % zugenommen und der Einsatz von Hofdünger um 11 % abgenommen. Der Output von pflanzlichen Produkten hat sich nur wenig verändert.



ART 2008b, THG-Inventar Landwirtschaft (Hofdünger); Spiess 2009, OSPAR-Bilanzierung (pflanzliche und tierische Produkte)

- > Entsprechend der Zunahme beim Input der Futtermittel hat auch der Output der tierischen Produkte in der Zeit 1994 bis 2005 zugenommen (22%). Dies ist hauptsächlich auf die steigende Produktion von Fleisch und Milch zurückzuführen.
- > Die pflanzlichen Produkte haben um lediglich 2% zugenommen.
- > Der interne Fluss Hofdünger folgt dem Tierbestand (siehe Abb. 16): Abnahme von 1990 bis 2004, seither leichte Zunahme.

Werden Input- und Output-Flüsse der Landwirtschaft einander gegenüber gestellt, erhält man die Bilanz nach OSPAR, aus der die Verluste und die Stickstoff-Effizienz bestimmt werden können (Tab. 14).

N-Bilanz nach OSPAR

Tab. 14 > N-Flüsse Land- und Forstwirtschaft, Vergleich 1994 und 2005

Bilanz von N-Flüssen, Überschüsse und N-Effizienz für 1994 (Spiess 2009) und 2005 gemäss vorliegender Analyse. Die Unsicherheit der N-Effizienz basiert auf einer Fehlerrechnung mit den Unsicherheiten der Inputs und Outputs.

	1994 SRU 273 (PG N-Haushalt CH 1996) [kt N]	1994 OSPAR (Spiess 2009) [kt N]	2005 (vorliegende Analyse) [kt N]
Input			
Importierte Futtermittel	21	26	32
Mineraldünger	66	59	52
Klärschlamm, Kompost	5	7	4
Deposition auf Landwirtschaftsböden	30	31	27
N-Fixierung Landw.	45	37	32
Summe In	167	160	147
Output			
Pflanzliche Produkte	15	10	10
Tierische Produkte	27	28	35
Hofdünger/Erntereste in die Vergärung			0,5
Summe Out	42	38	45
Differenz (In/Out)	125	122	102
N-Effizienz (Out/In)	25 %	24 %	31 % ± 4 %

Die Stickstoffbilanzierung nach OSPAR (Spiess 2009) weist für das Jahr 2005 geringfügig andere Werte aus (N-Fixierung: 35 kt N; Mineraldünger: 50 kt N) als die aus der vorliegenden Untersuchung gewonnenen Daten (Tab. 14). Auch im Agrarbericht 2008 (BLW 2008) sind einige Werte leicht anders im Jahr 2005. Die N-Effizienz hat in den 90er Jahren 24 % bis 27 % betragen und zeigt seit dem Beginn des 21. Jahrhunderts Werte zwischen 26 % und 30 % (2006: 28 %).

5.2.3 Stoffflüsse Hydrologie

Im Rahmen des langjährigen Projekts «Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fliessgewässer» (NADUF) werden Stickstofffrachten in Schweizer Fliessgewässern erhoben. Die Fliessgewässer zeigten bis Mitte der 90er Jahre eine Zunahme der Stickstofffrachten und -Konzentrationen. Ab Mitte der 90er Jahre werden Verringerungen der N-Konzentrationen festgestellt. Zobrist et al. wählen für die entsprechenden Berechnungen der detaillierten Zeitreihenanalysen einen einfachen mathematischen

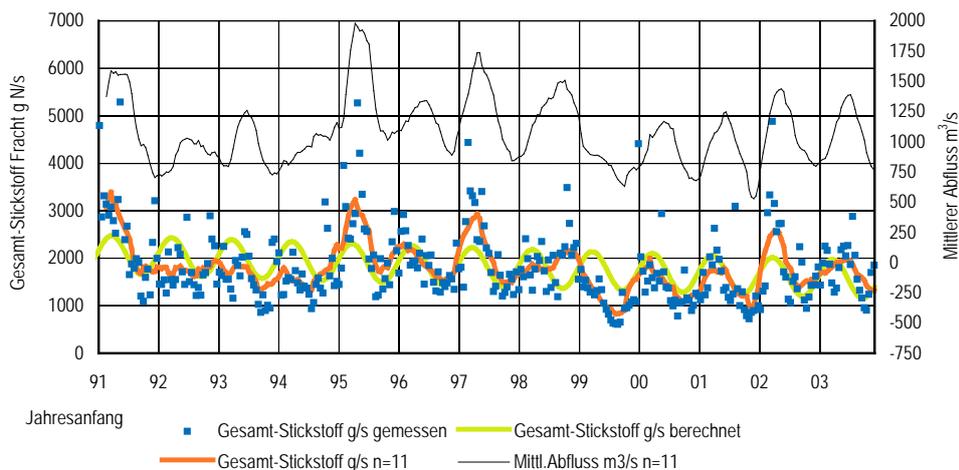
Ansatz (Zobrist et al. 2004, Zobrist 2010). Die N-Frachten variieren in Abhängigkeit der Abflussmengen (NADUF 2008).

Wie aus aktuellen Berechnungen hervorgeht (Zobrist 2009) nimmt der Gesamtstickstoff im Rhein bei Weil von 1995 bis 2007 ab, sowohl in der Konzentration (-1,5 % pro Jahr) als auch in der Fracht (-2,0 % pro Jahr). Beim Nitrat ist die Abnahme nicht so eindeutig. Die Konzentration nimmt statistisch zwar signifikant um 0,34 % pro Jahr ab, die Frachtabnahme ist hingegen nicht signifikant. Der Abfluss selber nimmt mit $9 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Jahr um 0,8 % ab. Diese Abnahme ist statistisch knapp nicht signifikant. In Abb. 14 ist für die Messstelle Rhein bei Weil der Trend der Gesamtstickstoff-Fracht über die Jahre 1991 bis 2003 dargestellt.

Rhein

Abb. 14 > Gesamtstickstofffracht und mittlerer Abfluss im Rhein bei Weil 1991–2003

Gesamtstickstofffracht im Rhein bei Weil gemessen und berechnet über die Jahre 1991 bis 2003 (linke Achse), sowie der mittlere Abfluss (rechte Achse). $n=11$ gleitendes Mittel des Abflusses über 22 Wochen, gleicht die starken saisonalen Schwankungen aus.



Zobrist 2009

Im Vergleich zur Periode 1986–1994 ist das Mittel der Fracht an Gesamtstickstoff der Periode 1995–2007 deutlich kleiner: die Fracht geht von 79,3 kt N auf 57,2 kt N pro Jahr zurück (Tab. 15). Sowohl die Abnahme der Konzentrationen von Gesamtstickstoff als auch von Nitrat ist über die gesamte Periode 1986 bis 2007 statistisch signifikant (Stamm 2009). Wie bereits oben bemerkt, ist die Frachtreduktion beim Nitrat deutlich geringer als beim Gesamtstickstoff. Somit ist im Wesentlichen die Fracht des organisch gebundenen Stickstoffs stark zurückgegangen. Die gleiche Beobachtung kann man bei den Stationen in Diepoldsau und Rekingen machen.

Tab. 15 > Übersicht der Frachten von Gesamtstickstoff (N tot) und Nitrat im Rhein

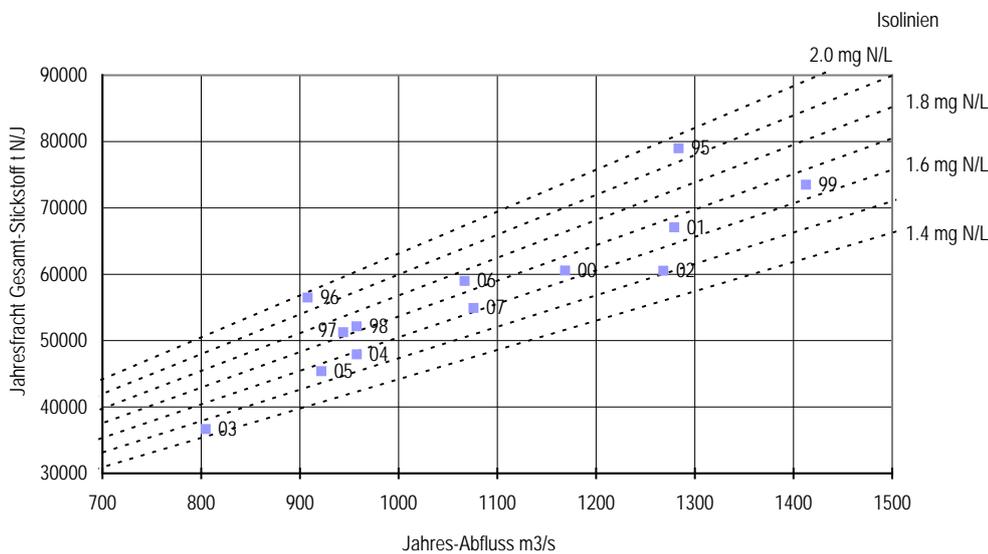
Datenquelle	NADUF			
	N tot	N tot	Nitrat	Nitrat
	Mittelwert 1986–1996* [kt N/a]	Mittelwert 1995–2007* [kt N/a]	Mittelwert 1986–1994 [kt N/a]	Mittelwert 1995–2007 [kt N/a]
Fracht Rhein bei Basel	Rhein Village-Neuf 79,3	Rhein-Weil 57,2	Village-Neuf 56,9	Rhein-Weil 49,3
Fracht Hochrhein (Rekingen)	24,9	20,8	18,2	17,8
Fracht Alpenrhein (Diepoldsau)	7,1	5,4	4,2	4,2

* Achtung: Vergleich zwischen zwei verschiedenen Stationen: Village-Neuf ist weniger repräsentativ wie Weil

Stellt man die Jahresfrachten des Gesamtstickstoffs den Jahresabflüssen in den letzten Jahren einander gegenüber (Abb. 15) zeigen sich für die Jahre 1995/96 hohe Konzentrationen. Bei gleichem Jahresabfluss wie 1995 liegen die Konzentrationen der Jahre 2001/02 deutlich tiefer. Generell ist die Abnahme bis 2003 recht deutlich.

Abb. 15 > Rhein-Weil Jahresfrachten Gesamt-Stickstoff 1995–2007 mit Isolinien Konzentrationen

Die Abbildung zeigt die Jahresfrachten Gesamtstickstoff (y-Achse) im Rhein bei Weil, sowie der mittlere Abfluss (x-Achse) für die Jahre 1991 bis 2007. Isoline Konzentrationen sind gestrichelt eingezeichnet.



Tab. 16 > Übersicht der ins Ausland emittierten Frachten von Gesamtstickstoff (N tot) der Grenzflüsse

Fluss	SRU 273	Naduf	Naduf	Naduf
	Mittelwert 1986–1995 [kt N/a]	Mittelwert 1986–1994 [kt N/a]	Mittelwert 1995–2007 [kt N/a]	Reduktion [kt N/a]
Rhône (Chancy)	13,0	12,7	9,3	3,4
Ticino (Riazzino)	3,0	2,6	2,2	0,4
Inn (Martina)	1,0	1,3	1,1	0,2
Übrige Grenzflüsse	3,0	3,6	2,9	0,7
Total	20,0	20,2	15,5	4,7

Übrige Grenzflüsse

Die Daten der Fliessgewässer Rhône und Ticino stammen aus den Messreihen des NADUF, ebenso diejenige des Inns für die Jahre 1986 bis 1994. Die übrigen Frachten wurden errechnet. Für die Hochrechnung wurden die Abflussdaten von Rhône und Ticino in Beziehung zu den Abflussdaten der übrigen Grenzflüsse (Allaine JU, Breggia TI, Doubs JU, Maggia TI, Maira GR, Poschiavino GR, Rom GR, Tresa TI, Verzasca TI) gesetzt. Im Zeitraum 2000 bis 2007 betragen sie bei Rhône und Ticino durchschnittlich 409 m³/sec gegenüber 104 m³/sec der Summe aller übrigen Grenzflüsse (BAFU 2010). Beim Inn wurde angenommen, dass eine ähnlich starke Abnahme stattgefunden hat wie beim Ticino (vergleichbares Einzugsgebiet).

Die über Fliessgewässer exportierten Frachten von Gesamtstickstoff nehmen von 99,5 kt N (Durchschnitt Naduf 1986 bis 1994) auf 72,7 kt N (Durchschnitt der Jahre 1995 bis 2007) ab.

Gesamtexport über
Fliessgewässer

Je nach Auswahl der Messperioden ergeben sich niederschlagsbedingt Schwankungen der Einträge von Stickstoff. So errechnet Jürg Zobrist (Zobrist 2010) auf der Basis der Einzugsgebiete folgende Exporte von Gesamtstickstoff:

- > 1990 bis 1994: 99,0 kt N
- > 1993 bis 1997: 90,3 kt N
- > 2003 bis 2007: 63,1 kt N

Eine deutliche Abnahme wird auch hier sichtbar.

6 > Interpretation

Mithilfe der Resultate aus der Stoffflussanalyse kann die Bedeutung der Stoffflüsse einzeln und im Vergleich mit dem Gesamtsystem abgeschätzt werden. Die Trends zeigen zwar mehrheitlich in Richtung mehr Nachhaltigkeit, in Zukunft müssen die «treibenden» Stoffflüsse jedoch weiter reduziert und die Kreisläufe besser geschlossen werden. Das betrifft in besonderem Masse die Landwirtschaft.

6.1 Bedeutung der Resultate

Die Stoffflussanalyse ist ein wichtiges Hilfsmittel, um einen Überblick über alle relevanten Flüsse zu gewinnen und um die Bedeutung eines interessierenden Flusses im Vergleich zu den übrigen Flüssen einschätzen zu können. Damit bietet die Analyse auch ein Instrument, um Reduktionsstrategien zu entwickeln.

Die Stoffflüsse werden in «treibende» (driving forces¹⁹) und «induzierte» (state und impact indicators) Stoffflüsse unterteilt (GSK 1993). Um die Stickstoffverluste zu reduzieren, können respektive müssen die treibenden Stoffflüsse reduziert werden.

Die wichtigsten Treiber sind:

- > Handelsdünger- und Futtermittel-Importe (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 landwirtschaftlichen Böden bearbeitet und bepflanzt werden, verantwortlich für die Ankurbelung aller übrigen, sprich der induzierten Stoffflüsse:

- > Emissionen aus Böden oder Abfallanlagen in die Atmosphäre (L6(r), L15(r), U11(r), A1(r), A3(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)

Im Zuge dieser induzierten Stoffflüsse entstehen die Probleme der hohen Stickstoffverluste und darauffolgend der Verlust an Biodiversität, die sinkende Wasserqualität,

¹⁹ Das sog. DPSIR-Modell beschreibt eine kausale Kette von Einflussgrössen: Driving forces üben Druck auf die Umwelt aus, Pressures sind die resultierenden Umweltbelastungen, State die Zustände von Umweltkompartimenten, Impacts sind die spezifische Wirkungen durch die Umweltbelastung und Responses sind die gesellschaftliche Reaktion auf Umweltbelastungen. Das Modell wird von der Europäischen Umweltbehörde EEA, vom UN Environment Programme UNEP und vom BAFU verwendet.

«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 Schliessung der Kreisläufe:

- > Reduktion der treibenden Stoffflüsse: z. B. Reduktion von Handelsdünger- und Futtermittel-Importen, Ammoniak-Emissionen, Stickoxid-Emissionen und direkten Stickstoffeinträgen in die Gewässer.
- > Schliessen der Stickstoffkreisläufe: z. B. landwirtschaftliche Massnahmen zur Verbesserung der Effizienzsteigerung wie Ersatz von Mineraldünger durch biologische Fixierung, verlustarme Düngerausbringung (z. B. Schleppschlauchverteiler), angemessener Umgang mit Fruchtfolgen und Weiterentwicklung der Katalysatortechnik.

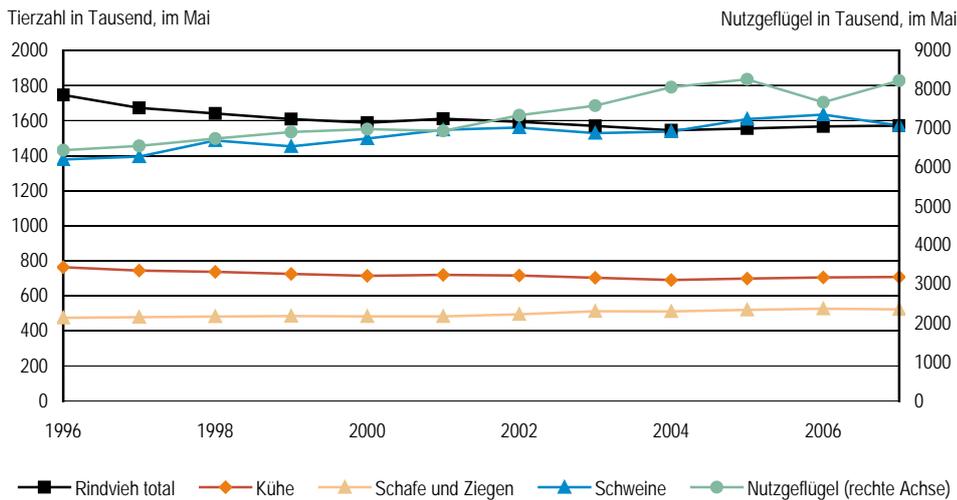
6.2 Interpretation Landwirtschaft

Die grössten Stickstoffflüsse entstehen in der Landwirtschaft. Dazu gehören die landwirtschaftsinternen Stickstofffrachten, die mit dem Futter aus dem Pflanzenbau in die Tierhaltung gelangen (Fluss L8) und mit dem Hofdünger/Weidegang aus der Tierhaltung in die Landwirtschaftsböden (Fluss L1). Im Weiteren sind die Flüsse aus der Landwirtschaft in die Umwelt relevant: Emissionen aus der Tierhaltung (Fluss L4) und dem Pflanzenbau (Fluss L6 (r)) und die Nitrat-Auswaschung aus Landwirtschaftsböden in die Hydrosphäre (L5).

Ein Vergleich der grössten Stickstoffflüsse aus 1994 und 2005 zeigt, dass die grössten Flüsse relativ betrachtet dieselben geblieben sind (Abb. 20 und Abb. 21 im Anhang A2). In absoluten Zahlen hat der **landwirtschaftsinterne Stickstofffluss** «Hofdünger/Weidegang aus der Tierhaltung in die Landwirtschaftsböden» (Fluss L1) abgenommen. Diese Reduktion ist auf die in den 90er Jahren abnehmenden Nutztierbestände, insbesondere von Rindvieh zurückzuführen (Abb. 16).

Abb. 16 > Entwicklung der Nutztierbestände

Entwicklung der Tierzahlen in der Schweiz von 1996 bis 2006. Nach einem Rückgang in den 90er Jahren nimmt die Zahl der Nutztiere in der Schweiz seit 2004 wieder zu



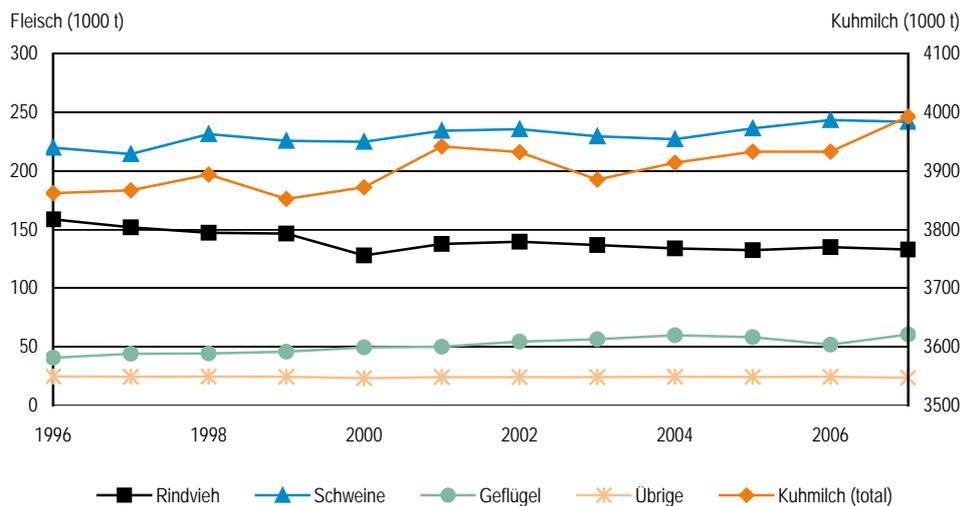
BFS (2009)

Die **Input-Flüsse** an Stickstoff in die Landwirtschaft konnten 2005 gegenüber 1994 von 160 kt N auf 147 kt N reduziert werden (Tab. 14). Vor allem der Mineraldüngereinsatz in der Landwirtschaft (Fluss I4) ist zurückgegangen. Im Jahr 2006 stieg der Input gemäss OSPAR-Bilanzierung wieder auf 154 kt N an. Gegenüber 2005 wurden vor allem mehr Futtermittel (36,7 ktN), importiert. Ins Auge fällt, dass die Importe von Sojaschrot, welches hauptsächlich aus Brasilien stammt, seit 2001 sprunghaft angestiegen sind. Während Sojaimporte Mitte der 90er Jahre bei ca. 50 000 Tonnen lagen, werden heute zwischen 200 000 und 250 000 Tonnen eingeführt (NZZ 2009).

Bei den **Output-Flüssen** aus der Landwirtschaft ist eine Zunahme der Produkte/Nahrung aus der Tierhaltung (Fluss L3) von 1994 bis 2005 ersichtlich. Dies ist auf die Entwicklung der tierischen Produkte zurückzuführen, welche einen Anstieg der Kuhmilchproduktion, der Schweinefleisch- und der Geflügelproduktion zeigt (Abb. 17). Auch die Stickstoffbilanz nach OSPAR zeigt eine Zunahme der tierischen Produkte im Betrachtungszeitraum (Abb. 13 und Tab. 14). Erhöhter Fleisch- und Milchkonsum dank erhöhter Nachfrage bei den Konsumenten haben diese Entwicklung begünstigt.

Abb. 17 > Entwicklung der tierischen Produktion

Zunahme Fleisch- und Milchproduktion in der Schweiz von 1996 bis 2006.



BFS (2009)

Die Landwirtschaft ist darum bemüht, eine hohe Stickstoffeffizienz zu erreichen. **Stickstoffüberschüsse**, die in der Landwirtschaft entstehen, entweichen hauptsächlich durch **Nitrat-Auswaschung** in Grund- und Oberflächengewässer (Fluss L5) und durch **Emissionen** in die Atmosphäre (Flüsse L4 und L6 (r)). Eine der grossen Herausforderungen bei der Reduktion von Stickstoffverlusten besteht darin, zu vermeiden, dass einseitige Vermeidungsstrategien zu Verlusten auf einem anderen Kanal führen (Zielkonflikte). Dabei ist zu beachten, dass im Sinne einer integralen Betrachtung nicht nur die Verhältnisse im Kompartiment Landwirtschaft betrachtet werden, 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 Kohlenstoff gilt es auch zu beachten, dass die heutige gute Eignung der Schweiz für Rindviehwirtschaft (Grasland Schweiz) zu unerwünschten (klimawirksamen) Methanemissionen führt, eine Förderung des Ackerbaus dagegen die Stickstoffproblematik verschärfen kann. Um Zielkonflikte zu vermeiden gilt es die Gesamtzusammenhänge zu betrachten: Was gibt es für Potenziale in der Landnutzung, die die C-Senkenleistung erhöhen und gleichzeitig die N-Verluste senken?

Die Entwicklung der **N-Auswaschung** ist nur mit etlicher Unsicherheit zu bestimmen. Gemäss Studien ist aber eine sinkende Tendenz ersichtlich. Nach Spiess und Prasuhn (2006) nahm in den 90er-Jahren im Kanton Bern, der durchaus repräsentativ für die Schweiz ist, der Nitratgehalt unter Flächen mit landwirtschaftlicher Bewirtschaftung um 12 % ab. Die Autoren führen dies auf eine optimiertere landwirtschaftliche Praxis zurück und sagen aus, dass «über die Hälfte der Reduktion eine Folge der 1993 eingeführten Ökomassnahmen sein dürfte.» In der gleichen Grössenordnung ist eine Abnahme der diffusen N-Verluste im Rheineinzugsgebiet der Schweiz zwischen 1996 und 2001 (Prasuhn und Sieber 2005) festgestellt worden.

Die Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA) hat mitgeteilt, dass an Grundwassermessstellen, für welche Datenreihen verfügbar sind, die Nitrat-Konzentration seit Mitte der 1990er Jahre bis etwa 2002 um durchschnittlich 10 % bis 20 % gesunken ist (BAFU 2009a). In den darauf folgenden Jahren hat sich diese Entwicklung nicht fortgesetzt. Gegenüber dem Jahr 2003 ist die mittlere Nitrat-Konzentration bis 2006 sogar gestiegen (dies vor allem an Messstellen mit der Hauptbodennutzung Ackerbau). Der 2006 beobachtete Anstieg der Nitrat-Konzentrationen kann primär auf ausserordentliche klimatische Gründe zurückgeführt werden. Allerdings ist nicht auszuschliessen, dass die seit 2004/5 bestehende Lockerung des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) mit dazu beigetragen hat (BAFU 2009a).

Zieht man die N-Bilanz nach OSPAR zur Interpretation heran, so stehen wir vor der Tatsache, dass sich die Differenz zwischen N-Inputs und N-Outputs von 122 kt N/Jahr (1994) auf 102 kt N/Jahr (Durchschnitt der Jahre 2004 bis 2006) verringert hat (Tab. 14). Diese Resultate sind vereinbar mit einer Studie des Instituts für Agrarwirtschaft an der ETH Zürich (IAW 2004), welche aufzeigt, dass die Nitratauswaschung von 37 kt N im Jahr 1994 auf 34 kt N im Jahr 2002 zurückgegangen ist. Im Weiteren findet sich als Indiz in der «Qualitative Grundwasserüberwachung» im Schaffhauser Klettgau im Zeitraum 1997 bis 2007 ein relativ grosser Rückgang der Nitratkonzentration im Hauptgrundwasserstrom, eine Tatsache, welche laut den Autoren (u.a. M. Boller, Eawag, K. Seiler, Interkantonales Labor AR, AI, GL, SH) einer veränderten landwirtschaftliche Praxis zugeschrieben werden muss. Dies wurde auch mit Modellen prognostiziert (Kanton Schaffhausen 2007).

Nach Auswertung der obigen Publikation und in Berücksichtigung von aktuellen Aussagen der ART (Spiess und Prasuhn 2010) darf angenommen werden, dass – konservativ geschätzt – im Jahr 2005 gegenüber 1994 10 % weniger Nitrat ausgewaschen worden ist. Dieser Wert bedarf aber einer dringenden Überprüfung, die Werkzeuge zur Modellierung stehen zur Verfügung.

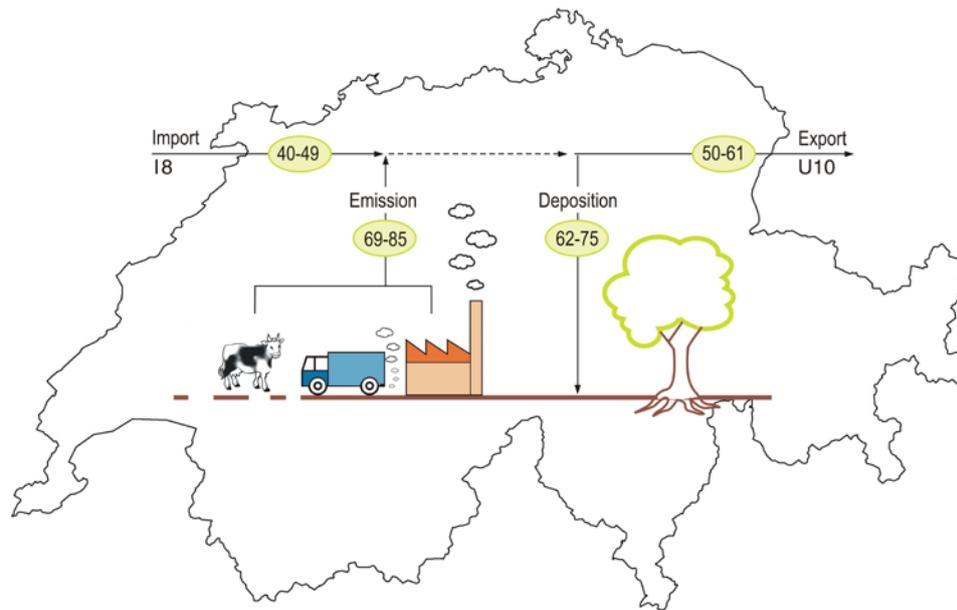
Für eine Verbesserung der Stickstoffeffizienz ist es letztendlich langfristig entscheidend, wie viel Stickstoff auf die Felder ausgebracht wird bzw. nach der Ernte im Boden verbleibt und ins Grundwasser und damit auch in die Oberflächengewässer ausgewaschen wird. Dabei kommt es auch darauf an, wie viel Stickstoff die Nutzung (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung) freisetzen kann.

Stickstoffemissionen, die als Ammoniak (NH_3) oder als Lachgas (N_2O) die Landwirtschaft verlassen, können Klima, Boden, Wasser, Luft und Pflanzengesellschaften, allen voran sensible Ökosysteme wie Wälder, Hochmoore und Magerwiesen belasten (BLW 2008). Die Emissionen aus der Tierhaltung und Landwirtschaftsböden in die Atmosphäre (Flüsse L4 und L6 (r)) haben von 1994 bis 2005 tendenziell abgenommen. Diese Entwicklung bestätigen die Daten der NH_3 - und N_2O -Emissionen in der BAFU-Datenbank EMIS, welche in diesem Zeitraum eine Reduktion von 12 % bzw. 9 % verzeichnen. Diese Reduktionen sind hauptsächlich auf Reduktionen im Tierbestand bis 2004 (Abb. 16) und verminderten Mineräldüngereinsatz zurückzuführen.

6.3 Interpretation Luftschadstoffe

Abb. 18 > Bilanzierung der Luftschadstoffe NO_x und NH_y in 2005

Stickstoffhaltige Luftschadstoffe (NO_x und NH_y) werden aus dem Ausland importiert, auf Böden deponiert, bei natürlichen und technischen Prozessen emittiert und über die Atmosphäre ins Ausland exportiert.



EMEP, Meteotest

Die Summe der NO_x - und NH_y -Emissionen ist in der Schweiz grösser als die deponierte Stickstoffmenge. Der Export von N-haltigen Luftschadstoffen ist grösser als der Import. Somit ist die Schweiz ein Netto-Exporteur von N-haltigen Luftschadstoffen (Abb. 18). Der Vergleich der Luftschadstoffbilanz von 2005 mit 1994 zeigt, dass der Export 1994 (gut 70 kt N) etwa 1,3 mal so hoch war wie 2005 (ca. 55 kt N). In Tab. 17 ist die Bilanzierung summarisch dargestellt. Der Rückgang der Emissionen und Depositionen, des Imports und des Exports ist vorwiegend auf eine Abnahme der Belastung mit oxidierten N-Verbindungen zurückzuführen. Die in Tab. 6 ausgewiesenen Zunahmen des Imports und Exports von reduzierten N-Verbindungen sind mit Vorsicht zu interpretieren, da im Verlauf der betrachteten Zeitperiode Weiterentwicklungen und Anpassungen beim europäischen EMEP-Modell vorgenommen wurden, welche insbesondere bei den reduzierten N-Verbindungen zu veränderten Anteilen der Eigendeposition an der Gesamtdeposition und in der Folge auch zu Änderungen bei Export und Import geführt haben. Es ist deshalb kaum möglich, von einer konsistenten Zeitreihe zwischen 1990 und 2005 zu sprechen.

Tab. 17 > Bilanzierung der Luftschadstoffe, Situationen 1994 und 2005

Vergleich der N-Flüsse in die Atmosphäre hinein (Input) und aus der Atmosphäre hinaus (Output) der Jahre 1994 und 2005. 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 2002–2006 und Meteotestdaten 2000.

	1994 (PG N-Haushalt CH 1996) [ktN]	2005 (EMEP; Meteotest, FOEN 2009a) [ktN]	Änderung 1994 bis 2005 [%]
Input			
Emission NO _x	43	26	-40 %
Emission NH _y	55	49	-12 %
Import NO _x	27	19	-30 %
Import NH _y	20	25	+25 %*
Summe	145	119	-18 %
Output			
Deposition NO _x	30	23	-23 %
Deposition NH _y	50	46	-8 %
Export NO _x	42	24	-43 %
Export NH _y	28	31	+11 %*
Summe	150	124	-17 %
Differenz (In-Out)	-5	-5	

1994: PG N-Haushalt CH 1996

2005: EMEP Mittel 2002–2006; Meteotest (2000)

* Zunahme höchstwahrscheinlich durch Änderungen beim EMEP-Modell bedingt

Wie Tab. 14 und Abb. 11 zeigen, ist bei den NO_x-Emissionen die Reduktion deutlich sichtbar. Sie sind von 1994 bis 2005 um 40 % zurückgegangen, dank 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 2, Euro 3 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 umso bemerkenswerter, als dass in derselben Periode das beheizte Gebäudevolumen nochmals stark zugenommen hat (mehr Einwohner und grössere Wohnfläche pro Person). Gemäss neuestem «Switzerland's Informative Inventory Report» (FOEN 2009a) wurden die gesamtschweizerischen NO_x-Emissionen für das Jahr 1994 damals mit 43 kt N etwas überschätzt und betragen nach heutigen Berechnungen nur 38 kt N, so dass die NO_x-Emissionen zwischen 1994 und 2005 aus heutiger Sicht um 32 % abgenommen haben.

Bei den NH_y-Emissionen beträgt der Rückgang von 1994 bis 2005 12 % (Tab. 17). Die NH₃-Emissionen werden zu über 90 % von der Landwirtschaft verursacht. Weitere Emittenten sind der Strassenverkehr, Gebäudeheizungen und die Abfallwirtschaft. Die

Reduktion ist primär auf die Reduktion des Tierbestandes, einen verringerten Mineraldüngereinsatz und eine Verbesserung des Hofdüngermanagements zurückzuführen.

Trotz der Verbesserungen sind die NO_x - und die NH_y -Emissionen immer noch zu hoch, denn die schweizerischen Immissionsgrenzwerte für NO_2 werden in den Stadtzentren und entlang der Nationalstrassen immer noch häufig überschritten. Ebenso sind stickstoffhaltige Depositionen immer noch deutlich und grossräumig über den Critical Loads für Stickstoffeinträge in empfindliche Ökosysteme.

Bei den N_2O -Emissionen ist die Unsicherheit in der Bewertung am grössten. Es ist deshalb aufgrund der verfügbaren Unterlagen kaum möglich, den zeitlichen Verlauf der Emissionen korrekt zu beurteilen (siehe dazu Kap. 5.2.2).

6.4 Interpretation Hydrosphäre

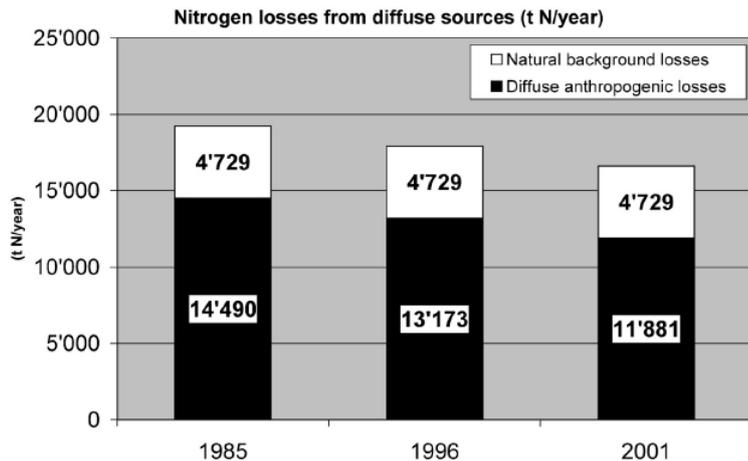
Zur Entwicklung der Stoffflüsse in und aus der Hydrosphäre sind weniger Informationen vorhanden als etwa bei der Atmosphäre. Relativ gut bekannt sind die Stickstofffrachten, die die Schweiz via Rhein verlassen. Diese stellen einen Summenparameter für die Entwicklung des Stickstoffs in den Gewässern dar. Wie im Kap. 5 dargestellt, ist die Tendenz generell abnehmend. Die einzelnen Stickstoffflüsse, aus denen sich der Summenparameter zusammensetzt, sind hingegen weniger gut bekannt.

Der Stickstoffeintrag aus **häuslichen und industriellen Abwässern** in die Hydrosphäre hat sich trotz wachsender Bevölkerung reduziert. Dies dank einem Investitionsprogramm welches durch eine Revision des GSchG ausgelöst worden ist und gezielt zu verbesserten Eliminationsleistungen der Abwasserreinigungsanlagen führte. Konkret hat sich die Schweiz in Teilerfüllung der internationalen Abkommen zum Schutz der Nordsee verpflichtet, die Stickstoffbelastung im Rhein bei Basel zwischen 1995 und 2005 um 2600 t N/Jahr mittels Denitrifikation in Kläranlagen zu reduzieren. Dieses Ziel ist erfüllt, ja überschritten worden. Allein im Kanton Zürich konnte trotz Wachstum der Bevölkerung die Summe der Stickstofffrachten gesenkt werden. Die Reduktion zwischen der Periode 1991 bis 1995 und der Periode 2001 bis 2005 betrug gegen 2 kt N/Jahr (AWEL 2006) und machte -23 % aus.

Die Entwicklung der **Auswaschung von Stickstoffverbindungen** in die Hydrosphäre ist nur mit etlicher Unsicherheit zu bestimmen. Dies gilt auch für die Denitrifikation und die Deposition. Es gibt aber immerhin eine Modellrechnung (Prashun und Sieber 2005), welche für die Jahre 1985, 1996 und 2001 die diffusen Einträge in den Rhein modelliert und dabei eine Tendenz zu sinkenden Einträgen aus der Landwirtschaft und aus Abschwemmungen nachzeichnet (dank Reduktionsmassnahmen und abnehmenden Landwirtschaftsflächen im Einzugsgebiet) (siehe Abb. 19 und Tab. 18). Über 90 % der diffusen Einträge stammen aus Auswaschung (Leaching) und Drainage, der Rest aus Abschwemmung, Erosion und Deposition.

Abb. 19 > Stickstoffverluste in den Rhein aus diffusen Quellen

Modellwerte für natürliche und anthropogene Stickstoffverluste (nur diffuse Quellen, ohne ARA) aus dem schweizerischen Einzugsgebiet des Rheins, beschränkt auf die «REZGUS» Fläche (nur Gemeinden unterhalb der grossen Mittellandseen).



Prasuhn und Sieber (2005)

Tab. 18 > Modellierte Stickstofffrachten im Rheineinzugsgebiet

Prasuhn und Sieber (2005) haben die Stickstoff-Einträge in den Rhein im Einzugsgebiet des Mittellands unterhalb der grossen Seen für drei Zeitabschnitte modelliert.

Bezugsjahr	1985 [kt N/a]	1996 [kt N/a]	2001 [kt N/a]
Punktuelle Quellen aus ARA	20,5	16,0	14,0
Diffuse Einträge aus Landwirtschaft, Erosion, Deposition etc.	14,5	13,2	11,9
Hintergrund-Einträge (natürlich)	4,7	4,7	4,7
Total	39,7	33,9	30,6

Datenquelle: Prasuhn und Sieber (2005)

Die Modellrechnungen zeigen, dass die Schweiz das internationale Ziel verfehlt hat, die Stickstoffeinträge in den Rhein und in die Nordsee zwischen 1985 und 2001 zu halbieren (die Modellrechnung ergibt eine Reduktion von 23 %). Damit steht die Schweiz allerdings nicht alleine da: auch alle übrigen Mitgliedstaaten haben das Ziel verfehlt (Details siehe Prasuhn und Sieber 2005).

Die in Kapitel 5 aufgeführten NADUF-Messwerte zeigen in Übereinstimmung mit den Modellrechnungen rückläufige Stickstofffrachten an den Stationen Rhein bei Basel, Rekingen und Diepoldsau sowie an der Rhône und am Ticino. Da verschiedene Unfälle im Jahr 1986 zeigten, dass mit der Rhein-Messstation von Village-Neuf die Verschmutzungsquellen (organische Stoffe aus der Chemieproduktion) im Raum Basel nicht repräsentativ erfasst werden konnten, wurde 1993 eine neue Station in Weil am Rhein in Betrieb genommen. Nun ist mit dieser Verschiebung, bei der die fünf Ansaugstellen über das Flussprofil verteilt sind, die Vergleichbarkeit der Zeitreihen in Abhängigkeit des Parameters «Stickstoff» etwas eingeschränkt.

6.5 Interpretation Güterflüsse

Tab. 19 > Bilanzierung der Stickstoffflüsse in Gütern, Situationen 1994 und 2005

Vergleich der Stickstoffflüsse durch Güterimporte und -exporte der Schweiz der Jahre 1994 und 2005. Der Input entsteht durch Lebensmittel-, Futter-, Holz-, Mineraldünger- und Treibstoffimporte, der Output durch Exporte von Lebensmitteln, Holz und übrigen Stoffen.

	Situation 1994, (PG N-Haushalt 1996) [kt N]	Situation 2005, (vorliegende Analyse) [kt N]
Input		
Import Lebensmittel und übrige Stoffe	24	25
Holz-Import		2
Import Futtermittel für die Tierhaltung	21*	32
Import Mineraldünger	33	52
Eigenproduktion Mineraldünger	33	0,02
Import Treibstoffe (Diesel)	wenig	0,1
Import Brennstoffe (Heizöl)	wenig	0,6
Summe	111	112
Output		
Export Lebensmittel und übrige Stoffe	12	13
Holz-Export	1	2
Summe	13	15
Netto-Import (In-Out)	98	97

* Wert 1994 OSPAR: 26 ktN; Daten: ART 2008c, BAFU 2008, PG N-Haushalt 1996

Beim Import und Export von Lebensmitteln, Holz und Erdölprodukten haben sich die Stickstofffrachten zwischen 1994 und 2005 kaum verändert. Auffallend ist der Wegfall der Inlandproduktion von Mineraldüngern und generell der Rückgang des Gebrauchs dieser Dünger. Gleichzeitig sind die Futtermittelimporte – ein treibender Fluss – stark angestiegen (siehe Kapitel 6.2).

6.6 Datenlücken, Schwachstellen und nicht berücksichtigte Stickstoffflüsse

Bei der Aktualisierung der Stoffflussanalyse wurden neben den interessierenden Stickstoffflüssen auch deren Unsicherheiten gesucht. Fehlende Flüsse oder fehlende Angaben zu Unsicherheiten werden im Folgenden als Datenlücken/Schwachstellen aufgeführt.

Generelle Aussagen:

- > Die Datenlage ist bei den «treibenden» Flüssen (siehe Kap. 6.1) besser als bei den «induzierten» Flüssen.
- > Unsicherheiten sind allgemein wenig bekannt, Ausnahme bilden die jüngsten Analysen zu den landwirtschaftlichen Stickstoffflüssen (ART 2008c)

Für den Fluss L5, Nitrat-Auswaschung/Abschwemmung aus Landwirtschaftsflächen ins Grundwasser, sind wohl die offizielle Daten aus dem THG-Inventar vorhanden, doch diese wurden seit 1992 nicht mehr aufdatiert und somit in diesem Bericht nicht eingesetzt. Nach Auswertung der aktuellsten Publikationen der ART (Spiess und Prasuhn 2006, Spiess und Prasuhn 2010) darf angenommen werden, dass im Jahr 2005 gegenüber 1994 10% weniger Nitrat ausgewaschen wurde. Dieser Wert bedarf aber einer dringenden Überprüfung. Ebenso basieren die Daten zur Nitrat-Auswaschung aus übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre (Fluss U12) auf veralteten Messdaten von 1990 (GSK 1993). Für diese Flüsse fehlen auch Angaben zur Unsicherheit.

Für den Grundwasseraustausch (Fluss U16) mit dem Ausland liegen praktisch keine Datenquellen vor. Der Wert aus GSK 1993, 5 kt N, wird als zu hoch eingestuft. Einzig im Grundwasserstrom Klettgau ist ein Fluss von 187 Tonnen Nitrat-N errechnet worden (Prasuhn und Hurni 1998). Von den Ausliefersystemen Rhein und Rhône ins Ausland fehlen relevante Angaben. Im Interreg IIIA-Projekt MoNit «Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrhein-Graben» (Interreg 2006) ist zwar eine grosse Datenfülle vorhanden, eine entsprechende Auswertung dieses Aquifers wäre aber erst noch durchzuführen (Stössel 2010).

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 N_2O , die bei der Denitrifikation entstehen, variieren 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 Schlachtabfällen.

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. Diese Prozesse zu identifizieren und quantifizieren ist aufwändig. In vorliegender Studie wurde ein Holzzuwachs von 2–6 kt N (Vergleich der Daten Landesforstinventar 3 mit 2) und eine Sedimentation von 9–17 kt N abgeschätzt (Wert 1994 aus PG N-Haushalt CH 1996). Weitere Akkumulationen in der Umwelt (z. B. Immobilisierung in Böden) wurden nicht 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 quantifi-

ziert 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 klein und für die Gesamtbilanz des Systems von untergeordneter Bedeutung.

Einzelne Stickstoffflüsse wurden nicht berücksichtigt. So zum Beispiel diejenigen, welche beim Import/Export von Textilien (Zolltarif XI «Spinnstoffe und Waren daraus, z. B. Seide, Baumwolle etc.) entstehen oder der gesamte Bereich des Prozesses «Wildtiere».

6.7 Ausblick

Der Trend der vergangenen Jahre zeigt, dass die stickstoffhaltigen Luftschadstoffe aus Verkehr, Industrie und Haushaltungen wirkungsvoll reduziert werden konnten, während es nicht im selben Mass gelungen ist, die Stickstoffproblematik in der Landwirtschaft zu entschärfen. Waren früher Verkehr und Industrie die grössten Stickstoffemittenten, so ist es heute die Landwirtschaft (EKL 2005). In den kommenden Jahren soll die Situation auch in der Landwirtschaft verbessert werden.

BAFU und BLW haben kürzlich quantitative Umweltziele für die Landwirtschaft festgelegt (BAFU/BLW 2008), unter anderem für Ammoniak- und Lachgasemissionen sowie für Stickstoffeinträge in die Gewässer.

Ausserdem hat das Bundesamt für Landwirtschaft BLW in Zusammenarbeit mit dem BAFU die Wissenslücken im Umfeld Stickstoffflüsse abklären lassen (BLW/BAFU 2010).

In Zukunft wird die Nutzung von Bioenergie (z. B. Agrotreibstoffe) intensiviert. Die laufenden Aktivitäten zielen daraufhin, Systeme mit hohem Wirkungsgrad zu entwickeln und betriebswirtschaftlich zu optimieren. Die Auswirkungen auf den Stickstoffkreislauf wurden vorerst noch nicht betrachtet. Wir stehen vor der Tatsache, dass bei der Produktion von Methangas aus organischer Substanz erhebliche Mengen an Stickstoff anfallen.

Auch in den anderen Sektoren sind Massnahmen in der Umsetzung vorgesehen:

- > Die Abgasvorschriften für Motorfahrzeuge werden nochmals verschärft: Seit 1. September 2009 gilt die Euro 5 Norm für neue Personenwagen, ab 2014 die Euro 6 Norm mit weiteren Senkungen der Grenzwerte für Stickoxide.
- > Die Revision des CO₂-Gesetzes sieht vor, die Treibhausgasemissionen der Schweiz bis zum Jahr 2020 mindestens um 20 Prozent gegenüber 1990 zu senken. Dafür ist eine Reihe von Massnahmen vorgesehen, die eine Verbrauchsreduktion fossiler Energieträger zum Ziel haben, was auch die Stickstoffemissionen vermindern wird.
- > Dank Zielvereinbarungen zur Befreiung von der CO₂-Abgabe werden Emissionsreduktionen realisiert (z. B. Zementindustrie). Diese verringern nicht nur Klimagase, 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).

> Anhang

A1 Stickstoffflüsse

A1-1 Stickstoffflüsse Land- und Forstwirtschaft

L1 Hofdünger/Weidegang:

Tierhaltung ⇒ Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau (Land- und Forstwirtschaft)

Charakterisierung	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. 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). 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).
Datenquellen	THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c)
Wert 2005	<i>L1 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> N-Eintrag Hofdünger (Gülle, Mist): 70,9 kt N N-Eintrag Weidegang: 16,0 kt N Abzug Hofdünger in Vergärung (Fluss L2): -0,53 kt N <i>L1 Gesamtfluss:</i> 86,3 kt N <i>Vergleichswerte (Diskussion siehe Tab. 12):</i> 1994: 97 kt N (Treibhausgasinventar, FOEN 2009b). 1990: 155 kt N (GSK 1993).
Datenqualität	78–95 kt N Teilunsicherheiten: N-Eintrag Hofdünger (Gülle, Mist): 12 % N-Eintrag Weidegang 6 % Unsicherheit Gesamtfluss: 10 % (ART 2008a, p. 7f. N, N_{ex})
Bemerkungen	Gesamte N-Fracht im Hofdünger abzüglich der N-Fracht im Hofdünger der in Vergärungsanlagen vergärt wird (Fluss L2).

L2 Hofdünger in Vergärung: Tierhaltung ⇒ Vergärung (Abfallwirtschaft)

Charakterisierung	Organisch gebundener und mineralisierter Stickstoff (NH_3 , NH_4^+ , NO_3^-) im Hofdünger, der in die Vergärung gelangt
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006 (BAFU 2008); GRUDAF 2009
Wert 2005	<i>L2 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L2 Gesamtfluss:</i> 0,53 kt N
Datenqualität	0 -1 kt N Unsicherheit: 100 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Durchschnittlicher N-Gehalt: 5,2 %. Es wird mit einem Verhältnis von Mist zu Gülle von 1:1 gerechnet. Weiter wird angenommen, dass die Gülle, die vergärt wird in Vergärungsanlagen, einen relativ grossen Anteil an Schweinegülle hat (Verhältnis Milchvieh zu Schweinegülle ca. 1:1). N-Gehalt Milchvieh Vollgülle ($4,3 \text{ kg N}_{\text{tot}}/\text{m}^3$; $90 \text{ kgTS}/\text{m}^3$): 4,7 % N-Gehalt Milchvieh Mist: 2,6 % N-Gehalt Schweinegülle (Mast und Zucht): 10,7 % N-Gehalt Schweinemist: 2,8 %

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 Produkthenutzung gelangen
Datenquellen	ART (Auskunft E. Spiess 2009)
Wert 2005	<i>L3 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L3 Gesamtfluss:</i> 35 kt N <i>Vergleichswerte:</i> 1994: 28 kt N (ART) 2006: 46,6 kt N (Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006 (BAFU 2008))* 2007: 39,2 kt N (ART, provisorischer Wert Mai 2010, Auskunft E. Spiess)
Datenqualität	30–40 kt N Unsicherheit: 15 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Der Hauptteil des Flusses stammt aus Milch und Schlachtvieh. Für die vorliegende Stoffflussanalyse wird aus Konsistenzgründen (Vergl. mit Wert 1994) der Wert 35 kt N gemäss ART verwendet. *Vergleichswert setzt sich zusammen aus: - Milch, Eier, Honig, andere 16,7 kt N (409 090 t TS Nicht-Fleisch-Erzeugnisse aus der Tierhaltung (davon Milch 97 %); N-Gehalt: 4,08 %) - Schlachtvieh (Summe inkl. Kadaver) 29,9 kt N (berechnet aus: 214 377 t TS in der Schweiz produzierte und importierte Tiere welche in die Fleischverarbeitung gelangen, inkl. zu entsorgende Tierkadaver; N-Gehalt tierische Organismen: 13,96 %) (Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006 (BAFU 2008)).
L4 Emissionen: Tierhaltung ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	NH ₃ , NO _x , 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 – diese sind in Fluss L6 enthalten). Die NH ₃ -Emissionen, die beim Weidegang der Tiere entstehen, gehören jedoch nicht dazu.
Datenquellen	THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c). NH ₃ -Emissionen: Agrammon 2009
Wert 2005	<i>L4 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> Emissionen NH ₃ -N (Mist, Gülle, ohne Weide): 40,1 kt N Emissionen N ₂ O-N (Mist): 0,75 kt N Emissionen N ₂ O-N (Gülle): 0,07 kt N Summe: 41,9 kt N <i>L4 (nr) Luftstickstoff</i> Emissionen N ₂ vernachlässigbar <i>L4 Gesamtfluss:</i> 41,9 kt N
Datenqualität	37–46 kt N Teilunsicherheiten: N ₂ O: 50–100 % (ART 2008a, p. 9) NH ₃ : ca. 10 % Unsicherheit Gesamtfluss: ca. 10 %
Bemerkungen	Der Teilfluss Emissionen NH ₃ -N (Weide) wird als Output im Prozess Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau (Fluss L6 (r)) berücksichtigt. Im neuen Ammoniak-Modell Agrammon werden in Zukunft die NH ₃ -Emissionen, die auf der Weide entstehen, separat von den NH ₃ -Emissionen aus Hofdünger ausgewiesen.

L5 Auswaschung/Abschwemmung: Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Nitrat-Auswaschung und -Abschwemmung aus Landwirtschaftsböden in Grund- und Oberflächengewässern, verursacht durch den über die landwirtschaftliche Praxis (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung) mobilisierten Stickstoff sowie Einträge von Hofdünger, Mineraldünger, Kompost, etc.
Datenquellen	Prasuhn und Sieber 2005, Spiess und Prasuhn 2006, Spiess und Prasuhn 2010
Wert 2005	<p><i>L5 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> Auswaschung/Abschwemmung Nitrat aus Hofdünger: ca. 70 % Auswaschung/Abschwemmung von Nitrat aus Mineraldünger, Klärschlamm, Kompost: ca. 30 %</p> <p><i>L5 Gesamtfluss= L5 Gesamtfluss:</i> 34 kt N</p> <p><i>Vergleichswert:</i> NO₃-Verluste Landwirtschaftsböden in Hydrosphäre 1996: 37 kt N (PG N-Haushalt CH 1996)</p>
Datenqualität	27–41 kt N Unsicherheit: 20 % (Schätzwert)
Bemerkungen	<p>Die Daten des THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c) wurden hier nicht eingesetzt, da gemäss Auskunft ART seit 1992 keine neuen Zahlen mehr ermittelt worden sind. Auch die Daten aus dem THG-Inventar Landwirtschaft basieren auf diesen veralteten Zahlen.</p> <p>Nach Auswertung der Publikation von Prasuhn und Sieber (2005) und in Berücksichtigung von aktuellen Aussagen der ART (Spiess und Prasuhn 2006, Spiess und Prasuhn 2010) darf angenommen werden, dass – konservativ geschätzt – im Jahr 2005 gegenüber 1994 10 % weniger Nitrat ausgewaschen worden ist. Auch ein Vergleich mit der N-Bilanz nach OSPAR zeigt, dass sich diese von 121 kt N/Jahr (1994) auf 109 kt N/Jahr (Durchschnitt der Jahre 2004 bis 2006) verringert hat.</p> <p>Indirekte N₂O-Emissionen aus Nitrat-Auswaschung/Abschwemmung aus Landwirtschaftsflächen, werden als Output-Fluss aus der Hydrosphäre berücksichtigt.</p>
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 Weidegang und Austrag von Hofdünger (hier nur NO _x - und N ₂ O-Emissionen, ohne NH ₃ -Emissionen, diese sind im Fluss L4 enthalten), Mineraldünger, Kompost und Klärschlamm, aus Ernterückständen, N-fixierenden Pflanzen und organischen Böden sowie indirekte Emissionen.
Datenquellen	THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c)
Wert 2005	<p><i>L6 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i></p> <p>Emissionen NO_x-N (Mist): 0,52 kt N Emissionen NO_x-N (Gülle): 0,26 kt N Emissionen NO_x-N (Weide): 0,11 kt N Emissionen NO_x-N (Mineraldünger, Kompost, Klärschlamm): 0,40 kt N Summe NO_x-N: 1,29 kt N</p> <p>Emissionen NH₃-N (Weide): 1,2 kt N Emissionen NH₃-N (Mineraldünger, Kompost, Klärschlamm.): 2,8 kt N Emissionen NH₃-N (landw. Nutzfläche): 2,4 kt N Summe NH₃-N: 6,4 kt N</p> <p>Emissionen N₂O-N (Hofdünger, direct soil emissions): 0,89 kt N Emissionen N₂O-N (Mineraldünger, Kompost, Klärschlamm, direct soil em.): 0,67 kt N Emissionen N₂O-N (N-fixing crops): 0,4 kt N Emissionen N₂O-N Ernterückstände: 0,45 kt N Emissionen N₂O-N aus organischen Böden: 0,14 kt N Emissionen N₂O-N (Weide): 0,32 kt N Indirekte Emissionen N₂O-N (Indirekte Emissionen N₂O-N (Deposition von landwirtschaftl. und NICHT-landwirtschaftl. N-Verbindungen) * Umrechnungsfaktor für Landwirtschaftsböden): 0,29 kt N Summe N₂O-N: 3,15 kt N</p> <p>Summe ökologisch relevante N-Verbindungen: 10,8 kt N</p> <p><i>L6 (nr) Luftstickstoff:</i> Emissionen N₂: 28,4 kt N (ART IUL)</p> <p><i>L6 Gesamtfluss:</i> 39,2 kt N</p>

Datenqualität	<p>Teilunsicherheiten: Emissionen direct soil emissions N₂O-N: 76 % (ART 2008a, p. 15) Emissionen Weide (animal prod.) N₂O-N: 85 % (ART 2008a, p. 15) indirekte Emissionen N₂O-N (Deposition): 160 % (ART 2008a, p. 15) indirekte Emissionen N₂O-N (Auswaschung, Abfluss): gross (> 50 %) Unsicherheit übrige Teilflüsse: > 50 % (Schätzwert) Emissionen N₂ (ART/IUL): 50 % (Schätzwert)</p> <p>L6 (r): 10–12 kt N; Unsicherheit: 11 % (Schätzwert) L6 (nr): 14–43 kt N; Unsicherheit 50 % (Schätzwert) L6 Gesamtfluss: 25–53 kt N; Unsicherheit: 36 % (Schätzwert)</p>
Bemerkungen	<p>Nach THG-Methodik fallen sämtliche NO_x-Emissionen aus Gülle und Mist erst beim Ausbringen auf landwirtschaftlichen Flächen an und sind damit Outputs aus Landwirtschaftsböden/Pflanzenbau (und nicht aus der Tierhaltung).</p> <p>Die Flüsse «indirekte Emissionen aus Deposition» enthalten sämtliche durch Deposition verursachte N₂O-Emissionen, die in Schweizer Böden entstehen (alle Bodentypen, auch Wald etc). Gemäss THG-Inventar werden alle indirekten Emissionen den Landwirtschaftsböden zugeordnet. Im vorliegenden System werden sie hingegen entsprechend ihrem Flächenanteil auf die vier Bodentypen Landwirtschaft (38 %), Wald (30 %), Gewässer (4 %) und übrige Böden (27 %) verteilt. Indirekte N₂O-Emissionen aus Nitrat-Auswaschung/Abschwemmung aus Landwirtschaftsflächen, werden als Output-Fluss aus der Hydrosphäre berücksichtigt (Fluss U13 (r)). Der Teilfluss «Emissionen NH₃-N (Mineraldünger, Kompost, Klärschlamm.)» beinhaltet auch NH₃-Emissionen die bei der Lagerung von Mineraldünger entstehen.</p>
<p>L7 Emissionen aus offener Verbrennung: Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenanbau ⇒ Atmosphäre (Umwelt)</p>	
Charakterisierung	Stickstoffemissionen aus offener Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen.
Datenquellen	FOEN 2008a, FOEN 2008b
Wert 2005	<p>L7 (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 N₂O-N + 0,1 kt NH₃-N</p>
Datenqualität	<p>0,07–0,2 kt N</p> <p>Teilunsicherheiten: NO_x: ±1 kg NO_x/t Abfall (40 %) N₂O, NH₃: gross (> 50 %) Unsicherheit Gesamtfluss: 50 %</p>
Bemerkungen	
<p>L8 Futterpflanzen: Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau ⇒ Tierhaltung (Land- und Forstwirtschaft)</p>	
Charakterisierung	Netto-Fluss an organisch gebundenem Stickstoff in Futterpflanzen, die für die Tierhaltung verwendet werden (Fütterungsverluste im Stall gehen via Mist wieder zurück auf Landwirtschaftsböden).
Datenquellen	Werte berechnet mit Daten für den Agrar-Umweltindikator «Stickstoffbilanz der Landwirtschaft nach OSPAR-Methode» (Auskunft E. Spiess 2009)
Wert 2005	<p>L8 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L8 Gesamtfluss: 132 kt N (138 kt N Futter, 6 kt N Fütterungsverluste, netto 132 kt N) Getreidestroh (kein Futter): Input = Output (ca. 5 kt N)</p> <p>Vergleichswert: 1994: 180 kt N (GSK 1993)</p>
Datenqualität	<p>125–139 kt N Unsicherheit: 5 % (Schätzwert)</p>
Bemerkungen	Berechnung mit Verzehr an Trockensubstanz Gras, Mais etc. je Tier und mit Tierzahlen sowie Angaben vom schweizerischen Bauernverband.

L9 Ernteprodukte/Nahrung: Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau ⇒ Produkteherstellung und übrige Nutzungen (Produkteherstellung/Produktenutzung)	
Charakterisierung	Stickstofffracht in Produkten für die Lebensmittelindustrie, in Saatgut, non-food Produkten und in Energiepflanzen.
Datenquellen	ART Berechnung mit Hilfe von Daten aus Statistik Bauernverband (Auskunft E. Spiess 2009)
Wert 2005	<i>L9 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L9 Gesamtfluss:</i> 10 ktN <i>Vergleichswerte:</i> 1994: 10 ktN (ART) 2006: 16 ktN (Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006 (BAFU 2008))*
Datenqualität	8–12 ktN Unsicherheit: 20 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Bei vielen Ernteprodukten gibt es Abfallprodukte, die im System Landwirtschaft weiter verwertet werden. Diese werden hier nicht berücksichtigt; es handelt sich um einen Netto-Fluss. * Vergleichswert 2006 setzt sich zusammen aus: <ul style="list-style-type: none"> • Produkte in Lebensmittelindustrie: 15,9 ktN (947 773 t TS; N-Gehalt (pflanzl. Produkte: Gemüse, Hülsenfrüchte, Kartoffeln, Getreide, Ölsaaten, Zuckerrüben, Früchte für menschliche Ernährung): 1,68 %.) • Saatgut und non-food Produkte: 0,36 ktN (Saatgut vom Pflanzenanbau in die Industrie: 36620 t TS; N-Gehalt (Saatgetreiden, Saatkartoffeln, Ernterückstände): 0,97 %.) • Energiepflanzen: 0,0001 ktN (Energiepflanzen (Raps, Sonnenblumen, Miscanthus) in verarb. Energie: 2487 t TS; N-Gehalt von Ölsaaten (Raps, Sonnenblumen, Soja): 0,01 %) (Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006 (BAFU 2008)).
L10 Erntereste: Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau ⇒ Vergärung (Abfallwirtschaft)	
Charakterisierung	Organisch gebundener Stickstoff in Ernteresten, die vergärt werden.
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006 (BAFU 2008)
Wert 2005	<i>L10 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L10 Gesamtfluss:</i> 0,004 ktN
Datenqualität	0,002–0,006 ktN Unsicherheit: 50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Berechnung Pflanzenbiomasse für Vergärung: 1998 t TS; N-Gehalt nachwachsende Rohstoffe (NWR): 0,21 %. Bei der Energienutzung von Biomasse handelt es sich um einen Fluss, den es in der Vergangenheit nicht gegeben hat, der in Zukunft wichtig werden könnte.
L11 Energieholz: Wald (Bäume und Böden) ⇒ Produkteherstellung/Produktenutzung	
Charakterisierung	Stickstofffracht im Energieholz, das in Industrie und Haushalten eingesetzt wird.
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006, Massen- und Energieflüsse (BAFU 2008)
Wert 2005	<i>L11 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L11 Gesamtfluss:</i> 0,38 ktN
Datenqualität	0,3–0,4 ktN Unsicherheit: 10 % (Schätzwert)
Bemerkungen	849 634 TS in t; 0,04 % N-Gehalt von Energieholz
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 2006, Massen- und Energieflüsse (BAFU 2008)
Wert 2005	<i>L12 ökologisch relevante N-Verbindungen = L12 Gesamtfluss:</i> 1,2 ktN
Datenqualität	1,1–1,3 ktN Unsicherheit: 10 % (Schätzwert)
Bemerkungen	1979 950 TS in t; 0,06 % N-Gehalt von Holzprodukten (Durchschnitt Schnittwaren, Sperrholz, Furniere, Produkte)

L14 Auswaschung/Abschwemmung: Wald (Bäume und Böden) ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)

Charakterisierung	Nitratverluste (NO ₃) aus Waldböden in Gewässer. Es findet hauptsächlich eine Auswaschung ins Grundwasser statt. Abschwemmung aus Waldböden in Oberflächengewässer vernachlässigbar klein.
Datenquellen	TFIAM/COST 729 Workshop (Rihm und Achermann 2007); Meteotest 2009
Wert 2005	<i>L14 ökologisch relevante N-Verbindungen = L14 Gesamtfluss:</i> 8,5 kt N <i>Vergleichswert:</i> 1994: 8–16 kt N (PG N-Haushalt CH 1996)
Datenqualität	4–13 kt N Unsicherheit: 50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Die Auswaschung aus dem Wald wird aus der Deposition berechnet (empirischer Zusammenhang). Werte sind langjährige Mittelwerte, die für ein durchschnittliches Klima berechnet wurden (mittlere Niederschlagsmenge 1960–1990). Die Trockenheit des Jahres 2003 hat zu einer Reduktion der Auswaschung aus dem Wald geführt, welche auch 2005 noch messbar war. Da die Stickstoffauswaschung jedoch von der atmosphärischen Deposition von Stickstoffverbindungen verursacht wird, welche sich in dieser Zeit auf konstantem Niveau bewegte, wurde für den Fluss L14 der langjährige Mittelwert verwendet, der über dem effektiven Wert von 2005 liegt. Die N-Auswaschung Wald ist laut Publikation von Sabine Braun tiefer als unser Fluss: ca. 2,5 kt N (seit 2003) ca. 7,6 kt N (bis 2002) mit Waldfläche von 2005 berechnet. (IAP Waldbericht) Diese Werte sind aber in die Berechnungen von Rihm und Achermann 2007 eingeflossen.

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	THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c) TFIAM/COST 729 Workshop (Rihm und Achermann 2007) SRU 257 (BUWAL 1996c)
Wert 2005	<i>L15 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> 1,14 kt N <i>L15 (nr) Luftstickstoff:</i> 6 kt N <i>L15 Gesamtfluss:</i> 7,14 kt N (Summe: N ₂ O, N ₂ (TFIAM/COST) und NO _x (BAFU 1996c))
Datenqualität	L15 (r): 1–2 kt N; Unsicherheit: 40 % (Schätzwert) L15 (nr): 3–9 kt N; Unsicherheit 50 % (Schätzwert) L15 Gesamtfluss: 4–10 kt N; Unsicherheit: 42 % Es gibt unterschiedliche Datenquellen mit unterschiedlichen Angaben zu den Teilflüssen (s. 1.–3.): 1. Berechnung aus Daten THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c): Indirekte Emissionen N ₂ O-N (Deposition von landwirtschaftl. und NICHT-landw. N-Emissionen) * Umrechnungsfaktor für Waldböden: 0,30 kt N 2. Daten TFIAM/COST: Emissionen N ₂ O: 1,1 kt N ₂ O-N (TFIAM/COST) Emissionen N ₂ : 6 kt N ₂ -N 3. Daten BUWAL 1996c, SRU 257: Emissionen N ₂ O: 0,66 kt N ₂ O-N (N ₂ O: 0,82 kg/ha.a) Emissionen NO _x : 0,043 kt NO _x -N (NO _x : 0,11 kg/ha.a) Waldfläche Schweiz 2005: 1271 645 ha

Bemerkungen	<p>Schätzung anhand TFIAM/COST 729 Workshop (Rihm und Achermann 2007) auf Basis N-Budget 2000 für Schweizer Wald.</p> <p>Die Flüsse «indirekte Emissionen aus Deposition» enthalten sämtliche durch Deposition verursachte N₂O-Emissionen die in Schweizer Böden entstehen (alle Bodentypen, auch Wald etc). Gemäss THG-Inventar werden alle indirekten Emissionen den Landwirtschaftsböden zugeordnet. Im vorliegenden System werden sie hingegen entsprechend ihrem Flächenanteil auf die vier Bodentypen Landwirtschaft (38 %), Wald (30 %), Gewässer (4 %) und übrige Böden (27 %) verteilt.</p> <p>Wegen verschiedenen Quellen für N₂O gibt es Inkonsistenzen. Unklar ist, wie viel die natürliche N₂O Emissionen aus dem Wald ausmachen (nicht durch die Deposition verursacht). Im Bericht SRU 257 (PG N-Haushalt CH 1996) wird nicht erläutert, woher die NO_x Emissionen stammen. Wenn sie aus der Denitrifikation stammen, müssen NO_x-Zahlen evt. neu bestimmt werden.</p> <p>NH₃-N: keine Emissionen aus dem Wald, weil die aus dem Waldboden stammende Menge offenbar von den Pflanzen direkt wieder absorbiert wird (BAFU 1996c).</p>
L16 Holzexport: Land- und Forstwirtschaft ⇒ Ausland	
Charakterisierung	Stickstofffracht in exportiertem Holz
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006 (BAFU 2008)
Wert 2005	<i>L16 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = L16 Gesamtfluss:</i> 2,0 ktN
Datenqualität	1–3 ktN Unsicherheit: 30 % (Schätzwert)
Bemerkungen	<p>Export Energieholz: 0,20 ktN Export von Holz für die Holz- und Papierindustrie: 1,79 ktN</p> <p>Export biogene Energieträger: 459 642 t TS N-Gehalt Energieholz: 0,04 % Export Papier und Holz: 3816 071 t TS N-Gehalt Zellstoff, Papier, Karton, Industrieholz, Restholz, Druckwaren: 0,05 %</p>

A1-2 Stoffflüsse Produkteherstellung/Produktenutzung

P1 Mineraldünger (Inlandproduktion): Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau (Land- und Forstwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht im Mineraldünger der im Inland industriell hergestellt und auf Schweizer Landwirtschaftsböden ausgebracht wird.
Datenquellen	Mündliche Auskunft Lonza AG, Visp 2009; Webseite Agroline 2009.
Wert 2005	<i>P1 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P1 Gesamtfluss:</i> 0,016 ktN Produktion Ammonsalpeter: 60 bis 65 t pro Jahr (mündliche Auskunft Lonza 2009) N-Gehalt Ammonsalpeter (Durchschnitt): 26 %
Datenqualität	0,015–0,018 ktN Unsicherheit der Summe Ausland- und Inland-Mineraldünger: 8 % (ART 2008a, p.11)
Bemerkungen	In der Schweiz produziert nur noch die Firma Lonza AG in Visp Dünger (Auskunft T. Henzen, Agricura). Die Lonza produziert 60 bis 65 Tonnen Ammonsalpeter-Dünger pro Jahr, der durch die Firma Agroline vertrieben wird. Der durchschnittliche N-Gehalt der verschiedenen Sorten Ammonsalpeter-Dünger der Lonza beträgt 26 % (Website Agroline).

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	FOEN 2008a, FOEN 2008b. Die Modellierungen für die einzelnen Verkehrsträger sind separaten Publikationen zu finden: BAZL 2008, INFRAS 2004, INFRAS 2008.
Wert 2005	<i>P2 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P2 Gesamtfluss:</i> 18,4 kt N
Datenqualität	15–22 ktN Unsicherheit: 20 % (Schätzwert)
Bemerkungen	
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	FOEN 2008a, FOEN 2008b
Wert 2005	<i>P3 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P3 Gesamtfluss:</i> 7,6 kt N
Datenqualität	6–9 ktN Unsicherheit: 20 % (Schätzwert)
Bemerkungen	
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	FOEN 2008a, FOEN 2008b
Wert 2005	<i>P4 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> 0,53 kt N <i>P4 (nr) Luftstickstoff:</i> 4 kt N <i>P4 Gesamtfluss:</i> 4,5 kt N
Datenqualität	1–8 ktN Unsicherheit P4 (r): 20 % Unsicherheit P4 (nr): 70 % (Schätzwert) Unsicherheit Gesamtfluss: 70 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Die Stickstofffracht in Schlachtabfällen, die in Zementwerken verbrannt werden (P11, interner Fluss), wird hauptsächlich in Emissionen von NO _x und N ₂ umgewandelt.
P5 Biogene Abfälle in Kompostierung: Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Kompostierung (Abfallwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht in biogenem Abfall (Grüngut/Speisereste), welche kompostiert werden.
Datenquellen	EMIS-Kommentare (FOEN 2008a, FOEN 2008b); mündliche Auskunft K. Schleiss, UMWEKO GmbH, Grenchen 2009
Wert 2005	<i>P5 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P5 Gesamtfluss:</i> 2,3 kt N
Datenqualität	1–4 ktN Teilunsicherheiten: Abfallmenge ± 10 %; N-Gehalt ±60 % Unsicherheit Gesamtfluss: 70 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Kompostierter Abfall insgesamt 780 000 t (EMIS-Kommentar). N-Gehalt Kompost: 0,1 % bis 0,4 % (mündliche Auskunft K. Schleiss, UMWEKO GmbH, Grenchen 2009). Rechenwert 0,3 %

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	Abt. Rohstoffe, Abfallmengen und Recycling 2005 im Überblick (BAFU 2005)
Wert 2005	<i>P6 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> 3 kt N (nur Siedlungsabfälle) 0,5 kt N (Sonderabfälle) <i>P6 Gesamtfluss:</i> 3,5 kt N
Datenqualität	3–4 kt N Teilunsicherheiten: Siedlungsabfälle ±5 %, Sonderabfälle ±5 %, N-Gehalt ±20 % (geschätzt). Unsicherheit Gesamtfluss: 20 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Siedlungsabfälle verbrannt (2005): 2415 600 t Sonderabfälle verbrannt: 414 800 t N-Gehalt Kehricht in KVA/SAVA: 0,125 % Kehricht in KVA/SAVA besteht ca. zu 50 % aus biogenen und zu 50 % aus nicht-biogenen Abfällen. N-Gehalt biogene Abfälle ca. 0,16 % (Holz: 0,06 %; Gemüse: 0,25 %) N-Gehalt nicht-biogene Abfälle ca. 0,09 % → N-Gehalt durchschnittlicher Kehricht: 0,125 %
P7 Biogene Abfälle in Vergärung: Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Vergärung (Abfallwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht in biogenen Abfällen, welche für die Vergärung verwendet werden.
Datenquellen	FOEN 2008a, FOEN 2008b; mündliche Auskunft K. Schleiss, UMWEKO GmbH, Grenchen 2009
Wert 2005	<i>P7 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P7 Gesamtfluss:</i> 0,3 kt N Vergärter Abfall insgesamt 90 000 t Feuchtsubstanz (EMIS-Kommentare) N-Gehalt Kompost: 0,1 % bis 0,4 % (mündliche Auskunft K. Schleiss, UMWEKO GmbH, Grenchen) Rechenwert 0,3 %
Datenqualität	0,1–0,5 kt N Teilunsicherheiten: Abfallmenge ± 10 %, N-Gehalt ±60 %. Unsicherheit Gesamtfluss: 70 % (Schätzwert)
Bemerkungen	
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	Abschätzung P. Fischer / U. Sieber / S. Lehmann, BAFU 2009
Wert 2005	<i>P8 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P8 Gesamtfluss:</i> 43,2 kt N
Datenqualität	39–48 kt N Unsicherheit: 10 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Zulauf Kläranlagen (Umfrage 2005): 1441 Mia. Liter. Gesamt N bei 30mg/l (Abschätzung verifiziert mit 4 grossen Kläranlagen) N-Zulauf Kläranlagen pro Jahr: 43,2 kt N
P9 ungereinigtes Abwasser / Überlauf: Produkteherstellung und übrige Nutzungen ⇒ Hydrosphäre	
Charakterisierung	Stickstofffracht in ungereinigtem Abwasser welches direkt den Gewässern zufließt
Datenquellen	Abschätzung P. Fischer / U. Sieber / S. Lehmann, BAFU 2009
Wert 2005	<i>P9 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P9 Gesamtfluss:</i> 2,2 kt N
Datenqualität	1–3 kt N Unsicherheit: 50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Zusätzlicher Eintrag in die Hydrosphäre von ungeklärtem Abwasser (Überlauf) (Abschätzung 10 % des Zulaufs Kläranlagen x 15 mg/l): 2,2 kt N

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	SBV Statistik 2008; Zollstatistik 2007; Schriftenreihe FAL 28 (FAL 1999); Nährwertdatenbank (N-Gehalte) (e feed 2010, NWDB 2010); Auskunft E.Spiess, ART 2009.																		
Wert 2005	<i>P10 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P10 Gesamtfluss:</i> 13 kt N <i>Vergleichswert</i> 1994: 13 kt N (PG N-Haushalt CH 1996); identisch mit Wert aus GSK 1993																		
Datenqualität	9–17 kt N Unsicherheit: 30 % (Schätzwert)																		
Bemerkungen	Schätzung Import landwirtschaftlicher Erzeugnisse anhand Importe von 2007 (in Tonnen) aus der Schweizer Zollstatistik und den statistischen Erhebungen des SBV (SBV, Statistische Erhebungen und Schätzungen 2008). N-Gehalte aus ART, Schriftenreihe FAL 28 sowie e feed 2010, NWDB 2010 (siehe A3).																		
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 (früher Verfütterung als Tiermehl).																		
Datenquellen	Website Centravo (Umweltbericht GZM 2008), Geschäftsbericht TMF 2009																		
Wert 2005	<i>P11 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = P11 Gesamtfluss:</i> 4 kt N																		
Datenqualität	3–4 kt N Unsicherheit: 15 % (Schätzwert)																		
Bemerkungen	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Werk</th> <th>GZM</th> <th>TMF</th> <th>Total</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Verarbeitete Menge</td> <td>117 kt</td> <td>48 kt</td> <td>165 kt</td> <td rowspan="3">(Rohproteingehalt Tiermehl: 600 g/kg. Es wurde mit einem N-Gehalt von 6,25 % im Eiweiss gerechnet.)</td> </tr> <tr> <td>Tiermehlproduktion</td> <td>30 kt</td> <td>10,3 kt</td> <td>40,3 kt</td> </tr> <tr> <td>N-Fluss</td> <td>2,9 kt</td> <td>1,0 kt</td> <td>3,9 kt</td> </tr> </tbody> </table>	Werk	GZM	TMF	Total		Verarbeitete Menge	117 kt	48 kt	165 kt	(Rohproteingehalt Tiermehl: 600 g/kg. Es wurde mit einem N-Gehalt von 6,25 % im Eiweiss gerechnet.)	Tiermehlproduktion	30 kt	10,3 kt	40,3 kt	N-Fluss	2,9 kt	1,0 kt	3,9 kt
Werk	GZM	TMF	Total																
Verarbeitete Menge	117 kt	48 kt	165 kt	(Rohproteingehalt Tiermehl: 600 g/kg. Es wurde mit einem N-Gehalt von 6,25 % im Eiweiss gerechnet.)															
Tiermehlproduktion	30 kt	10,3 kt	40,3 kt																
N-Fluss	2,9 kt	1,0 kt	3,9 kt																

A1-3 Stoffflüsse Umwelt

U1 N-Fixierung: Atmosphäre ⇒ Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau (Land- und Forstwirtschaft)	
Charakterisierung	Fixierung von Luftstickstoff durch landwirtschaftliche Nutzpflanzen.
Datenquellen	THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c)
Wert 2005	<i>U1 (nr) Luftstickstoff = U1 Gesamtfluss:</i> 32 kt N <i>Vergleichswert 1996:</i> 38–76 kt N, Schätzung für N-Fixierung aus Atmosphäre in gesamter Pedosphäre (PG N-Haushalt CH 1996)
Datenqualität	25–39 kt N Unsicherheit: 22 % (ART 2008a, p.10)
Bemerkungen	

U2 N-Fixierung Wald: Atmosphäre ⇒ Wald (Land- und Forstwirtschaft)	
Charakterisierung	Fixierung von Luftstickstoff durch Waldpflanzen.
Datenquellen	Mündliche Auskunft Sabine Augustin, Abteilung Wald, BAFU 2009
Wert 2005	<i>U2 (nr) Luftstickstoff = U2 Gesamtfluss</i> 5,1 ktN <i>Vergleichswert</i> 1994: 12 ktN (PG N-Haushalt CH 1996)
Datenqualität	3–8 ktN Unsicherheit: 50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	N-Fixierung Wald: 3–5 kg N/ha.a Waldfläche CH 2005: 1,27 Mio. ha
U3 Deposition auf Wald: Atmosphäre ⇒ Wald (Land- und Forstwirtschaft)	
Charakterisierung	Atmosphärische Deposition von Stickstoffverbindungen (NO _x , NH _y) auf Waldböden
Datenquellen	Meteotest 2009; FOEN 2009a
Wert 2005	<i>U3 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U3 Gesamtfluss:</i> 27 ktN <i>Vergleichswert:</i> 27,9 ktN BUWAL, SRU 384
Datenqualität	25–30 ktN Unsicherheit: ca. 10 %
Bemerkungen	Depositionsdaten Mittelwerte EMEP 2002–2006 (FOEN 2009a) und Meteotest 2000; anteilmässig auf Waldfläche umgerechnet. Da die Depositionsdaten seit 2000 konstant sind, entsprechen sie den Werten für 2005.
U4 Deposition auf Landwirtschaftsböden: Atmosphäre ⇒ Landwirtschaftsböden (Land- und Forstwirtschaft)	
Charakterisierung	Atmosphärische Deposition von Stickstoffverbindungen (NO _x , NH _y) auf Landwirtschaftsböden
Datenquellen	Meteotest 2009; FOEN 2009a, Deposition auf Landwirtschaftsböden (agriculture and alpine pastures)
Wert 2005	<i>U4 (nr) ökologisch relevante N-Verbindungen = U4 Gesamtfluss:</i> 27 ktN
Datenqualität	24–30 ktN Unsicherheit: ca. 10 %
Bemerkungen	Depositionsdaten Mittelwerte EMEP 2002–2006 (FOEN 2009a) und Meteotest 2000; anteilmässig auf Landwirtschaftsfläche umgerechnet. Da die Depositionsdaten seit 2000 konstant sind, entsprechen sie den Werten für 2005.
U5 N₂-Verbrauch durch Verkehr, Feuerungen, Prozesse: Atmosphäre ⇒ Produkteherstellung/Produktenutzung	
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	<i>U5 (nr) Luftstickstoff = U5 Gesamtfluss</i> 25 ktN U5 ₁ : 18,2 ktN U5 ₂ : 6,7 ktN U5 ₃ : 0,5 ktN
Datenqualität	21–31 ktN 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	
Wert 2005	unbekannt
Datenqualität	
Bemerkungen	

U7 Deposition auf übrige Böden: Atmosphäre ⇒ übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Atmosphärische Deposition von Stickstoffverbindungen (NO _x , NH ₃) auf übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre
Datenquellen	Meteotest 2009; FOEN 2009a n (Deposition auf übrige Böden (settlements and bare land))
Wert 2005	<i>U7 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U7 Gesamtfluss:</i> 11,3 kt N
Datenqualität	10–12 kt N Unsicherheit: ca. 10 %
Bemerkungen	Depositionsdaten Mittelwerte EMEP 2002–2006 (FOEN 2009a) und Meteotest 2000; anteilmässig auf übrige Böden (settlements and bare land) umgerechnet. Da die Depositionsdaten seit 2000 konstant sind, entsprechen sie den Werten für 2005.

U8 N-Fixierung: Atmosphäre ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Fixierung von Luftstickstoff durch Pflanzen der Hydrosphäre
Datenquellen	
Wert 2005	unbekannt <i>Vergleichswert</i> 1990: <1 kt N (GSK 1993)
Datenqualität	
Bemerkungen	

U9 Deposition auf Wasser: Atmosphäre ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Atmosphärische Deposition von Stickstoffverbindungen (NO _x , NH ₃) auf Gewässern.
Datenquellen	Meteotest 2009; FOEN 2009a, Deposition auf Gewässer (surface water)
Wert 2005	<i>U9 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U9 Gesamtfluss:</i> 2,8 kt N <i>Vergleichswert:</i> 1990: 4 kt N
Datenqualität	2,5–3,1 kt N Unsicherheit: ca. 10 %
Bemerkungen	Depositionsdaten Mittelwerte EMEP 2002–2006 (FOEN 2009a) und Meteotest 2000; anteilmässig auf Oberflächengewässer umgerechnet. Da die Depositionsdaten seit 2000 konstant sind, entsprechen sie den Werten für 2005.

U10 Verfrachtung via Luft ins Auland (Export): Atmosphäre ⇒ Ausland	
Charakterisierung	Atmosphärische Verfrachtung von reaktiven Stickstoffverbindungen ins Ausland.
Datenquellen	Meteotest 2009; FOEN 2009a (Mittelwerte 2002–2006)
Wert 2005	<i>U10 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> Export von NO _x -N aus der Schweiz: 24,4 kt N Export von NH ₃ -N aus der Schweiz: 31,4 kt N <i>U10 Gesamtfluss:</i> 55,8 kt N <i>Vergleichswerte:</i> 1994: N-Exporte Atmosphäre: 50–90 kt N (Summe von NO _x -N und NH ₃ -N) (PG N-Haushalt CH 1996).
Datenqualität	50–61 kt N Unsicherheit: ca. 10 %
Bemerkungen	Mittelwerte EMEP 2002–2006 (FOEN 2009a) und Meteotest 2000

U11 Emissionen N₂O, N₂: übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Emissionen von Stickstoffverbindungen (Denitrifikation) aus übrigen Böden der Pedo- u. Lithosphäre
Datenquellen	PG N-Haushalt CH 1996
Wert 2005	<p><i>U11 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> 0,36 kt N N₂O Emissionen: 0,13 kt N NH₃ Emissionen 0,01 kt N NO_x Emissionen 0,21 kt N</p> <p><i>U11 (nr) Luftstickstoff:</i> N₂ Emissionen: 1,3 kt N</p> <p><i>U11 Gesamtfluss:</i> 1,7 kt N</p>
Datenqualität	U11 (r): < 1 kt N; Unsicherheit: 80 % (Schätzwert) U11 (nr): < 2 kt N; Unsicherheit: 80 % (Schätzwert) U11 Gesamtfluss: < 3 kt N 80 % (Schätzwert)
Bemerkungen	
U12 Auswaschung/Abschwemmung: übrige Böden der Pedo- und Lithosphäre ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Nitrat-Auswaschung und -Abschwemmung aus übrigen Böden der Pedo- und Lithosphäre.
Datenquellen	Abschätzung aufgrund Deposition auf übrige Böden, Nitrifikation übrige Böden und Daten PG N-Haushalt CH 1996 (SRU 273); GSK 1993 (SRU 209).
Wert 2005	<p><i>U12 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U12 Gesamtfluss:</i> 11 kt N</p> <p><i>Vergleichswerte:</i> 1990: Oberflächenabschwemmung und Abfluss aus unversiegelten Flächen im Siedlungsgebiet: 7 kt N (GSK 1993 (SRU 209)) 1994 Nitratverluste übrige Böden in Oberflächengewässer: 2–10 kt N; Abschwemmung aus Anthroposphäre: 7 kt N (PG N-Haushalt CH 1996).</p>
Datenqualität	5–16 kt N Unsicherheit: 50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	
U13 Denitrifikation N₂O, N₂: Hydrosphäre ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Stickstoffemissionen (N ₂ O, N ₂ , NO _x) durch Denitrifikation aus öffentlichen Gewässern
Datenquellen	BAFU 1996, PG N-Haushalt CH 1996; THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c)
Wert 2005	<p><i>U13 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> 1,1 kt N Indirekte Emissionen N₂O (Auswaschung, Abfluss) (THG-Inventar): 0,92 kt N Indirekte Emissionen N₂O-N (Deposition von landwirtschaftl. und NICHT-landw. N-Emissionen) * Umrechnungsfaktor für surface waters (THG-Inventar): 0,03 kt N N₂O Emissionen Seen, Flüsse, Feuchtgebiete (BAFU 1996): 0,14 kt N NO_x Emiss. Seen und Flüsse (ohne Feuchtgebiete) (BAFU 1996): 0,0033 kt N</p> <p><i>U13 (nr) Luftstickstoff:</i> 11 kt N</p> <p><i>U13 Gesamtfluss:</i> 12 kt N</p> <p><i>Vergleichswerte:</i> 1990: 13 kt N (GSK 1993) 1994: 9 - 18 kt N (PG N-Haushalt CH 1996)</p>
Datenqualität	U13 (r): <2 kt N; Unsicherheit: 70 % (Schätzwert) U13 (nr): 2–20 kt N; Unsicherheit: 80 % (Schätzwert) U13 Gesamtfluss: 4–20 kt N; Unsicherheit: 70 % (Schätzwert)
Bemerkungen	N ₂ -Emissionen Seen und Flüsse (geschätzt: 10 mal mehr als N ₂ O-Emissionen)

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 2008, Mittelwerte Rhein, Weil, Rhône, Ticino von 1995–2007. Hochrechnung der anderen Grenzflüsse.
Wert 2005	<i>U14 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U14 Gesamtfluss:</i> 72,7 kt N <i>Vergleichswerte:</i> 1990: 99 kt N (GSK 1993) 1994: 98 kt N (90 -110 kt) (PG N-Haushalt CH 1996) 1986–94: 99,5 kt (NADUF)
Datenqualität	65–80 kt N Unsicherheit: 10 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Daten NADUF. Hochrechnung der kleineren Grenzflüsse mit Hilfe der Abflussdaten von Rhône und Ticino (siehe Kapitel 5). Zu beachten: Die Zeitreihe der N-Frachten zeigt eine grosse Variabilität, die zu ca. 80 % durch den Abfluss geprägt ist (die nichts mit den Unsicherheiten zu tun hat). Aus diesem Grund wurde für das Jahr 2005 statt eines Werts 2005 ein Mittelwert 1995–2007 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	Experteninterviews (Willmann 2010, Stössel 2010)
Wert 2005	<i>U16 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = U16 Gesamtfluss:</i> < 1 kt N Vergleichswert 1990: 5 kt N (GSK 1993)
Datenqualität	Unsicherheit: 50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Der Wert aus GSK 1993 (SRU 209) wird als zu hoch eingestuft. Es liegen aber nur wenige Datenquellen vor. Es gibt drei grössere Aquifersysteme, aus denen Grundwasser aus der Schweiz ins Ausland abfließt: Klettgau, Basel und Genf (Willmann 2010). Im Grundwasserstrom Klettgau ist ein N-Fluss von 187 Tonnen Nitrat-N errechnet worden (Prasuhn und Hurni 1998). Im Interreg IIIA-Projekt MoNit «Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben» (Interreg 2006) ist zwar eine grosse Datenfülle vorhanden, eine entsprechende Auswertung dieses Aquifers wäre aber erst noch durchzuführen (Stössel 2010).

A1-4 Stoffflüsse Abfallwirtschaft

A1 Emissionen: KVA/SAVA ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Emissionen (NO _x , NH _y , N ₂ O) aus KVA/SAVA in die Atmosphäre Teilflüsse: Energiegewinnung KVA Energiegewinnung SAVA
Datenquellen	FOEN 2008a, FOEN 2008b; Auskunft M. Hügi, ABRO, BAFU 2009
Wert 2005	<i>A1 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> 0,7 kt N Energiegewinnung KVA: 0,64 kt N = 0,40 kt NO _x -N+ 0,23 kt N ₂ O-N+ 0,02 kt NH ₃ -N Energiegewinnung SAVA: 0,05 kt N= 0,03 kt NO _x -N+ 0,02 kt N ₂ O-N <i>A1 (nr) Luftstickstoff:</i> 6,2 kt N <i>A1 Gesamtfluss:</i> 6,9 kt N <i>Vergleichswerte:</i> 2007: 0,95 kt N (Auskunft M.Hügi, ABRO, BAFU 2009) 1994: ca. 2 kt N (PG N-Haushalt CH 1996)

Datenqualität	A1 Gesamtfluss: 1–13 ktN; Unsicherheit: 85 % A1(r): 0–1 ktN; Unsicherheit: 30 % A1 (nr): 0–12 ktN; Unsicherheit: 100 % (Schätzwert) Teilunsicherheiten: NO _x : 10 % (EMIS) NH ₃ : 15 % (EMIS) N ₂ O: 30 % (EMIS)
Bemerkungen	Die Luftreinhalteverordnung schreibt für KVA Emissionsgrenzwerte für NO _x und NH ₃ vor; diese Parameter werden entsprechend erfasst. Im BAFU-Projekt LEA (2005) wurden gesamtschweizerisch mittlere Emissionsfaktoren pro Tonne verbranntem Abfall für KVA errechnet. Diese sind wie folgt: NO _x : 404 g/t, entspricht 184 g/t N bei der Annahme, dass die Zusammensetzung des NO _x aus 95 % NO und 5 % NO ₂ besteht. NH ₃ : 6 g/t, entspricht 5 g/t N N ₂ O: 120 g/t; entspricht 76 g/t N Der summierte Emissionsfaktor beträgt somit 265 g N pro Tonne Abfall. 2007 wurden in den 29 Schweizer KVA 3,58 Mio. t Abfälle verbrannt. Dabei wurden 949 Tonnen Stickstoff freigesetzt (BAFU, ABRO, Auskunft M. Hügi). N wird in der Denoxanlage in N ₂ überführt. Eine Denox-Anlage verringert den Ausstoss von Stickoxiden (NO _x) um 75–95 % (Annahme für vorliegende Studie: 85 %) (Internetrecherche; diverse Quellen, u.a. www.pm10.ch/loesungen/denox.html ; www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC5-Atmos/Poster/Stickstoffverbindungen_B_Troegel.pdf ; www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?IA=EP2006000242&DISPLAY=DESC)
A2 Verbrennungsrückstände: KVA/SAVA ⇒ Deponie (Abfallwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht in Verbrennungsrückständen aus KVA/SAVA, die in Deponien gelagert werden (Schlacke, Filterkuchen etc.).
Datenquellen	Schätzung (Autoren)
Wert 2005	A2 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A2 Gesamtfluss: < 1 ktN, vernachlässigbar klein
Datenqualität	Unsicherheit: 100 % (Schätzwert)
Bemerkungen	
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	Gesamtfluss: Abschätzung P. Fischer / U. Sieber / S. Lehmann, BAFU 2009 Teilflüsse reaktive N-Verbindungen: FOEN 2008a, FOEN 2008b
Wert 2005	A3 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen: 0,6 ktN 0,055 kt NO _x -N 0,41 kt N ₂ O-N 0,09 kt NH ₃ -N A3 (nr) Luftstickstoff: 11,9 ktN A3 Gesamtfluss: 12,5 ktN Vergleichswerte: 1994: 11 ktN ₂ , 2 ktNH ₃ (BUWAL 1993/BUWAL 1996)
Datenqualität	A3 (r): <1 ktN, Unsicherheit: 50 % A3 (nr): 6–18 ktN; Unsicherheit: 50 % (Schätzung) A3 Gesamtfluss: 6–19 ktN; Unsicherheit: 50 % Teilunsicherheiten: NO _x 50 % (FOEN 2008a) N ₂ O 50 % (FOEN 2008a)

Bemerkungen	Zulauf ARA (Umfrage 2005): 1441 Mia. Liter. Gesamt N bei 30mg/l (Abschätzung verifiziert mit vier grossen Kläranlagen) N-Zulauf ARA pro Jahr: 43,2 kt N (Fluss P8). N-Elimination in ARA: 39 % (Berechnung via Ausbaugrad ARA gemäss Stammdatenbank ARA). Es werden etwa 26 kt N in die Hydrosphäre abgegeben (Fluss A5) und 17 kt N in den ARA eliminiert (durch Emissionen in die Atmosphäre (Fluss A3), und Abfuhr Klärschlamm (Flüsse A4, A6 und A7)).
A4 Klärschlamm in KVA: ARA ⇒ KVA (Abfallwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht in (ausgefaultem und rohem) Klärschlamm, welcher in der KVA verbrannt wird. Teilflüsse: Rohschlamm direkt von ARA in KVA Klärschlamm aus Rohschlammvergärung (ARA) in KVA
Datenquellen	Biogene Güter in der Schweiz 2006 (BAFU 2008)
Wert 2005	<i>A4 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A4 Gesamtfluss:</i> 1,3 kt N Rohschlamm direkt von ARA in KVA (N-Gehalt: 0,021 %): 0,0002 kt N Klärschlamm aus Rohschlammvergärung (ARA) in KVA (N-Gehalt: 4,40 %): 1,3 kt N <i>Vergleichswerte:</i> 1990/94: 5 kt in Pedosphäre (BUWAL 1993/BUWAL 1996)
Datenqualität	1–2 kt N Unsicherheit: 50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Siehe Bemerkung A3
A5 gereinigtes Abwasser: ARA ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Stickstofffrachten (NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻) im gereinigten Abwasser aus Kläranlagen in öffentliche Gewässer
Datenquellen	Abschätzung P. Fischer / U. Sieber / S. Lehmann, BAFU 2009
Wert 2005	<i>A5 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A5 Gesamtfluss:</i> 26 kt N <i>Vergleichswerte:</i> 1994: 28,7 kt N (BAFU 1996, SRU 276) 1994: 30 kt N (PG N-Haushalt CH 1996)
Datenqualität	23–29 kt N Unsicherheit: 10 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Zulauf ARA (Umfrage 2005): 1441 Mia. Liter. Gesamt N bei 30mg/l (Abschätzung verifiziert mit 4 grossen Kläranlagen). N-Zulauf ARA pro Jahr: 43,2 kt N (Fluss P8). N-Elimination in ARA: 39 % (Berechnung via Ausbaugrad ARA gemäss Stammdatenbank ARA). Es werden etwa 26 kt N in die Hydrosphäre abgegeben (Fluss A5) und 17 kt N in den ARA eliminiert (durch Emissionen in die Atmosphäre (Fluss A3), und Abfuhr Klärschlamm (Flüsse A4, A6 und A7)).
A6 Klärschlamm in HT-Verbrennung: ARA ⇒ Produkteherstellung und übrige Nutzungen (Produkteherstellung/Produktenutzung)	
Charakterisierung	Stickstofffracht in (ausgefaultem und rohem) Klärschlamm aus der ARA, welcher industriell verbrannt wird in Zementwerken. Teilflüsse: sewage sludge dried (NIR/Eawag News) Monoverbrennung von Rohschlamm in industrieller Verbrennung Klärschlamm aus Vergärung (ARA) in die industr. Verbrennung (insb. Zementindustrie)
Datenquellen	BAFU 2008; Eawag News 53 (Eawag 2002)
Wert 2005	<i>A6 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A6 Gesamtfluss:</i> 2,2 kt N
Datenqualität	1–4 kt N Unsicherheit: 70 % (Schätzwert)

Bemerkungen	Zulauf ARA (Umfrage 2005): 1441 Mia. Liter. Gesamt N bei 30mg/l (Abschätzung verifiziert mit 4 grossen Kläranlagen). N-Zulauf ARA pro Jahr: 43,2 ktN (Fluss P8). N-Elimination in ARA: 39 % (Berechnung via Ausbaugrad ARA gemäss Stammdaten-bank ARA). Es werden etwa 26 ktN in die Hydrosphäre abgegeben (Fluss A5) und 17 ktN in den ARA eliminiert (durch Emissionen in die Atmosphäre (Fluss A3), und Abfuhr Klärschlamm (Flüsse A4, A6 und A7)).
A7 Klärschlamm für Düngung: ARA ⇒ Landwirtschaftsböden (Land- und Forstwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht im Klärschlamm, der zur Düngung in der Landwirtschaft eingesetzt wird.
Datenquellen	THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c); ART 2008a
Wert 2005	<i>A7 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A7 Gesamtfluss:</i> 1,0 ktN <i>Vergleichswert:</i> 1996: 5ktN Klärschlamm, Kompost in Pedosphäre (PG N-Haushalt CH 1996)
Datenqualität	0,95–1,05 ktN Unsicherheit: 5 % (ART 2008a, p.14)
Bemerkungen	Nur noch kleiner Fluss, da Klärschlamm inzwischen nicht mehr als Dünger verwendet werden darf. Die Übergangsbestimmung für ausgewählte Flächen lief definitiv am 30. September 2006 aus.
A8 Emissionen: Kompostierung ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Emissionen (N ₂ O, NH ₃) aus der Kompostierung
Datenquellen	FOEN 2009a, FOEN 2009b
Wert 2005	<i>A8 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> 0,35 ktN = 0,03 kt N ₂ O-N + 0,32 kt NH ₃ -N <i>A8 (nr) Luftstickstoff:</i> 0,3 ktN <i>A8 Gesamtfluss:</i> 0,7 ktN
Datenqualität	A8 (r): 0,1–0,6 ktN A8 (nr): <1 ktN (Schätzwert) A8 Gesamtfluss: 0,1–1,2 ktN; Unsicherheit: 80 % (Schätzwert) Teilunsicherheiten: NH ₃ : 40 % N ₂ O: 50 % N ₂ : 80 % (Schätzwert)
Bemerkungen	
A9 Kompost: Kompostierung ⇒ Landwirtschaftsböden (Land- und Forstwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht im Kompost, der zur Düngung in der Landwirtschaft eingesetzt wird.
Datenquellen	THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c); PG N-Haushalt CH 1996
Wert 2005	<i>A9 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A9 Gesamtfluss:</i> 3,2 ktN <i>Vergleichswert:</i> 1994: 5ktN Klärschlamm, Kompost in Pedosphäre (PG N-Haushalt CH 1996)
Datenqualität	3,0–3,4 ktN Unsicherheit: 5 % (ART 2008a, p.14)
Bemerkungen	Gespräch mit J. Fuchs, FiBL: 90 % des Stickstoffs im Kompost ist organisch gebunden. Dies ist wichtig für die N-Verfügbarkeit in der Landwirtschaft, wenn Kompost als Dünger eingesetzt wird. Gespräch mit K. Schleiss: Der Wert aus dem THG-Inventar scheint richtig. Dies entspricht ca. 500 t Kompost und festen Produkten aus der Vergärung.
A10 Abwasser aus Kompostierung: Kompostierung ⇒ ARA (Abfallwirtschaft)	
Charakterisierung	Abwasser aus Kompostieranlagen, welches in Abwasserreinigungsanlagen gereinigt wird

Datenquellen	
Wert 2005	unbekannt
Datenqualität	
Bemerkungen	
A11 Emissionen: Vergärung ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Emissionen (N ₂ O, NH ₃) aus der Vergärung
Datenquellen	FOEN 2009a, FOEN 2009b; Mündliche Auskunft J. Fuchs, FiBL 2009; mündliche Auskunft K. Schleiss, UMWEKO GmbH, Grenchen 2009
Wert 2005	<i>A11 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen:</i> 0,07 kt N = 0,005 kt N ₂ O-N + 0,07 kt NH ₃ -N <i>A11 (nr) Luftstickstoff:</i> 0,05 kt N <i>A11 Gesamtfluss:</i> 0,12 kt N
Datenqualität	A11 (r): < 0,1 kt N; Unsicherheit: 30 % A11 (nr): < 0,1 kt N; Unsicherheit: 100 % (Schätzwert) A11 Gesamtfluss: 0,06–0,2 kt N, Unsicherheit: 50 % Teilunsicherheiten: NH ₃ : Unsicherheit 30 % N ₂ O: Unsicherheit 50 %
Bemerkungen	Gespräch mit J. Fuchs, FiBL: Emissionen sind schwierig messbar, keine systematische Datenerfassung. NH ₃ -Emissionen machen den grössten Anteil am N-Verlust aus. Je nach Verarbeitung/Vorbehandlung der vergärten Abfälle entsteht mehr oder weniger NH ₃ . Gespräch mit K. Schleiss: Heisse Abflut von Blockheizkraftwerken wird z. T. in Vergärungsanlagen eingeleitet, was zu hohen NH ₃ -Verlusten führt.
A13 Gärreste: Vergärung ⇒ Kompostierung (Abfallwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht im Gärgut aus der Vergärung, das in die Kompostierung gelangt.
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006 (BAFU 2008); mündliche Auskunft K. Schleiss, UMWEKO GmbH, Grenchen 2009.
Wert 2005	<i>A13 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A13 Gesamtfluss:</i> 0,001 kt N
Datenqualität	<< 0,05 kt N Unsicherheit: 50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Gärgut aus der Vergärungsanlage in Kompostierung: 3250 t TS; N-Gehalt von «Output aus Vergärung, andere (nicht Klärschlamm)»: 0,02 % (BAFU 2008) Gespräch mit J. Fuchs, FiBL: Gärgut enthält ca. 15 kg N pro t TS. Die meisten Kompostieranlagen machen keine «Nachrottung» des Gärgutes. Meistens wird nur belüftet. Es gibt aber z. B. in Genf oder Pratteln Vergärungsanlagen die mit Kompostieranlagen gekoppelt sind. Gespräch mit K. Schleiss: Kompogas ist im Besitz mehrerer Kompostieranlagen. Kleiner Fluss: max. 10000 t; Frischgehalt 5 kg N/t → max. 0,05 kt N
A14 Emissionen: Deponie ⇒ Atmosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Emissionen (NO _x , NH ₃) aus Deponien
Datenquellen	FOEN 2009a, FOEN 2009b
Wert 2005	<i>A14 ökologisch relevante N-Verbindungen = A14 Gesamtfluss:</i> 0,25 kt N = 0,0007 kt NO _x -N + 0,25 kt NH ₃ -N
Datenqualität	0,1–0,4 kt N Unsicherheit: 50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	

A15 Sickerwasser: Deponie ⇒ ARA (Abfallwirtschaft)	
Charakterisierung	Stickstofffracht im Sickerwasser aus Deponien, das in Abwasserreinigungsanlagen gereinigt wird.
Datenquellen	Datenquellen: Abfallstatistiken BAFU. Erfahrungswerte aus Messungen von Sickerwasserkonzentrationen Reaktor-/Reststoffdeponien. BAFU, ABRO (Auskunft M. Hügi, A. Laube 2009).
Wert 2005	<i>A15 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = A15 Gesamtfluss:</i> 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	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.

A1-5 Stoffflüsse aus dem Ausland (Import-Flüsse)

I1 Zufluss via Flüsse: Ausland ⇒ Hydrosphäre (Umwelt)	
Charakterisierung	Zufluss von Stickstoff mit Flüssen, die in die Schweiz fließen.
Datenquellen	PG N-Haushalt CH 1996; GSK 1993
Wert 2005	<i>I1 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = I1 Gesamtfluss:</i> 15 kt N <i>Vergleichswerte:</i> 1994 (PG N-Haushalt CH 1996): 21 (15–25) kt N Aktuelle Hochrechnungen auf der Basis der 4 Hauptemittenten über die Einzugsgebiete (Zobrist 2010): 1993 bis 1997: 18 (15–21) kt N 2003 bis 2007: 12 (10,5–14,5) kt N
Datenqualität	13–17 kt N Unsicherheit: 15 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Wert hergeleitet aus PG N-Haushalt CH 1996; Keine neueren Daten verfügbar. Annahme, dass ähnlich starke Abnahme stattgefunden hat wie bei Fluss U14. PG N-Haushalt CH 1996: In Bodensee 13 kt N, in Lac Lemane 2 kt N und in Rhein zwischen Stein am Rhein und Basel 6 kt N (Daten für 1994).
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	SBV Statistik 2008; Zollstatistik 2007; Schriftenreihe FAL 28 (FAL 1999); Nährwertdatenbank (N-Gehalte) (e feed 2010, NWDB 2010); Auskunft E.Spiess, ART 2009.
Wert 2005	<i>I2 ökologisch relevante N-Verbindungen = I2 Gesamtfluss:</i> 25,4 kt N <i>Vergleichswert</i> 1994: 24 kt N (PG N-Haushalt CH 1996)
Datenqualität	22–29 kt N Unsicherheit: 15 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Schätzung Import landwirtschaftlicher Erzeugnisse anhand Importe von 2007 (in Tonnen) aus der Schweizer Zollstatistik und den statistischen Erhebungen des SBV (SBV, Statistische Erhebungen und Schätzungen 2008). N-Gehalte aus ART, Schriftenreihe FAL 28 sowie e feed 2010, NWDB 2010 (siehe A3).

13 Futter: Ausland ⇒ Tierhaltung (Land- und Forstwirtschaft)

Charakterisierung	Stickstofffracht in Futter-Importen für die Tierhaltung. Importierte Futtermittel umfassen hauptsächlich: <ul style="list-style-type: none"> • Getreide und Getreideprodukte, Stroh (Spreu), Heu, Sojabohnen, Sonnenblumensamen, andere geniessbare pflanzliche Waren. • Rückstände aus der Gewinnung von Sojaöl und anderen Ölen, Backfutter und anderes zubereitetes Futter, Rückstände aus der Zucker- und Stärkefabrikation, und andere Tierfutter pflanzlicher Art, Fischmehl (Statistik Bauernverband 2007).
Datenquellen	Berechnung mit Daten aus Importstatistik Futtermittel / Bauernverband und mit N-Gehalten für verschiedene Teilflüsse. Zahlen zu N-Gehalten stammen aus GRUDAF 2009 und weiteren Quellen (Auskunft E. Spiess 2009, ART).
Wert 2005	<i>13 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = 13 Gesamtfluss:</i> 32 kt N <i>Vergleichswerte:</i> 1994 26 kt N (ART) 1994 21 kt N (GSK 1993/ PG N-Haushalt CH 1996)
Datenqualität	30–34 kt N Unsicherheit: 7 % (Schätzwert)
Bemerkungen	

14 Mineräldünger (Import): Ausland ⇒ Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau (Land- und Forstwirtschaft)

Charakterisierung	Stickstofffracht im Mineräldünger aus ausländischer Produktion, der in der Landwirtschaft eingesetzt wird (Anteil Inlandmineräldünger siehe Fluss P1).
Datenquellen	THG-Inventar Landwirtschaft (ART 2008c)
Wert 2005	<i>14 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = 14 Gesamtfluss:</i> 52 kt N <i>Vergleichswert:</i> 1994: 33 kt N Mineräldüngerimport und 33 kt N Mineräldünger Inlandproduktion (PG N-Haushalt CH 1996)
Datenqualität	48–57 kt N Unsicherheit Summe Ausland- und Inland-Mineräldünger: 8 % (ART 2008a, p.11)
Bemerkungen	Siehe Bemerkungen Fluss P1.

15 Holz-Import: Ausland ⇒ Produkteherstellung und übrige Nutzungen (Produkteherstellung/Produktenutzung)

Charakterisierung	Stickstofffracht in importiertem Holz.
Datenquellen	Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006, Massen- und Energieflüsse (BAFU 2008)
Wert 2005	<i>15 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = 15 Gesamtfluss:</i> 2,0 kt N Teilflüsse: Import Papier und Holz: 1,8 kt N Import biogene Energieträger: 0,2 kt N
Datenqualität	1–3 kt N Unsicherheit: 30 % (Schätzwert)
Bemerkungen	

16 Import Treibstoffe: Ausland ⇒ Verkehr (Produkteherstellung/Produktenutzungen)

Charakterisierung	Stickstofffracht im importierten Treibstoff für den Verkehr.
Datenquellen	BFE 2001, EMPA-Treibstoffzollproben 2000
Wert 2005	<i>16 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = 16 Gesamtfluss:</i> 0,12 kt N
Datenqualität	< 0,2 kt N Unsicherheit: 100 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Endverbrauch Diesel 1,71 Mio. t. N-Gehalt Diesel 0,007 % Der Endverbrauch Diesel wird als Proxi 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 16 und 17 ist deshalb künstlich.

I7 Import Brennstoffe: Ausland ⇒ Feuerungen (Produkteherstellung/Produktenutzung)

Charakterisierung	Stickstofffracht im importierten Brennstoff für Feuerungen.
Datenquellen	BFE 2001, EMPA-Treibstoffzollproben 2000
Wert 2005	<i>I7 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = I7 Gesamtfluss:</i> 0,6 ktN
Datenqualität	< 1 ktN Unsicherheit: 100 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Endverbrauch Brennstoffe 5,05 Mio t. N-Gehalt Heizöl EL 0,012 %. Der Endverbrauch Brennstoffe wird als Proxi 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 Ausland (Import): Ausland ⇒ Atmosphäre (Umwelt)

Charakterisierung	Atmosphärische Verfrachtung von reaktiven Stickstoffverbindungen aus dem Ausland (Import).
Datenquellen	Meteotest 2009; FOEN 2009a
Wert 2005	<i>I8 (r) ökologisch relevante N-Verbindungen = I8 Gesamtfluss:</i> 44 ktN Teilflüsse: Import von NO _x -N in die Schweiz: 19 ktN Import von NH _y -N in die Schweiz: 25 ktN <i>Vergleichswerte:</i> 1994 gemäss EMEP 1995 und PG N-Haushalt CH 1996: Import von NO _x -N in die Schweiz: 27 ktN Import von NH _y -N in die Schweiz: 20 ktN N-Importe Atmosphäre total: 33–61 ktN (Summe von NO _x -N und NH _y -N)
Datenqualität	40–49 ktN Unsicherheit: ca. 10 %
Bemerkungen	Mittelwerte EMEP 2002–2006 (FOEN 2009a) und Meteotest 2000

A1-6

Lagerveränderungen/Stickstoffakkumulationen in Prozessen**L18 Holzzuwachs im Wald: Wald ⇒ Wald (Land- und Forstwirtschaft)**

Charakterisierung	Akkumulation von organisch gebundenem Stickstoff im Wald, die durch den Zuwachs von Holz/Aufforstung zustande kommt.
Datenquellen	Landesforstinventare (LLF 2 und LFI 3)
Wert 2005	4 ktN
Datenqualität	2–6 ktN; Unsicherheit: 50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Wert ermittelt durch Vergleich von LFI 2 und LFI 3.

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	Siehe Bemerkungen
Wert 2005	13 ktN
Datenqualität	9–17 ktN; Unsicherheit: 30 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Wert von 1994 übernommen für N-Zuwachs in Sedimenten; übernommen aus PG N-Haushalt CH 1996. Weitere Akkumulationen in der Umwelt wurden nicht beziffert. Relativ alte Studien lassen infolge einer grossen Streuung des Zahlenmaterials keine präzise aktuelle Abschätzung zu (Mengis et al. 1997, IGKB 2000).

A1-7 Kleine Stickstoffflüsse, die in den Subsystemen nicht enthalten sind

Erntereste: Landwirtschaftsböden (Acker, Weiden etc.) und Pflanzenbau ⇒ Kompostierung (Abfallwirtschaft)

Charakterisierung	Organischer gebundener Stickstoff in Ernteresten die kompostiert werden
Datenquellen	ART, Auskunft E.Spiess 2009
Wert 2005	<i>Ökologisch relevante N-Verbindungen = Gesamtfluss:</i> vernachlässigbar klein Vgl. Fluss P5: kompostierte Menge total (780 000 t feucht)
Datenqualität	Unsicherheit: >50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Die meisten landwirtschaftlichen Abfälle werden innerhalb des Systems Landwirtschaft kompostiert und wiederverwertet. Es ist unklar, wie viel Material ausserhalb der Landwirtschaft kompostiert wird. Annahme, dass dieser Fluss vernachlässigt werden kann (ART, Auskunft E.Spiess). Kein Fluss angegeben in Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006 (BAFU 2008). Gespräch mit J. Fuchs, FiBL: Ca. 5 % des Materials, das in Kompostieranlagen und Vergärungsanlagen verwertet wird, besteht aus landwirtschaftlichen Produkten, z. B. Rüstabfällen, Gemüseabfällen von Grossverteilern wie Coop und Migros, Abfällen aus Pferdemanstalten, Heu etc. Gespräch mit K. Schleiss: Mühleabfälle, Rossmist etc. werden kompostiert. Rüstabfälle werden z. T. betriebsintern verwertet. Die effektiv aus der Landwirtschaft stammenden Abfälle, die kompostiert werden, sind wahrscheinlich marginal. Erntereste die in die <u>Vergärung</u> gelangen: vereinzelt werden z. B. schlechte Silagen, Zuckerrübenblätter vergärt. Diese ist aber finanziell nicht relevant und daher sind diese Flüsse mengenmässig klein.

Abwasser aus KVA/SAVA: KVA/SAVA ⇒ ARA (Abfallwirtschaft)

Charakterisierung	Stickstofffracht im Abwasser aus KVA/SAVA
Datenquellen	Auskunft M. Hügi, ABRO, BAFU 2009
Wert 2005	<i>Ökologisch relevante N-Verbindungen = Gesamtfluss:</i> < 1 ktN, vernachlässigbar klein
Datenqualität	Unsicherheit >50 % (Schätzwert)
Bemerkungen	Die Einleitbedingungen für KVA-Abwasser sind in der Gewässerschutzverordnung (GSchV) geregelt. Darin sind keine Grenzwerte für N-haltige Verbindungen (z. B. Ammonium) aufgelistet. Selbst wenn mittlere Konzentrationswerte vorliegen würden, wären Frachtberechnungen ausserst schwierig, da die abgeleitete Wassermenge von KVA zu KVA sehr variieren kann (unterschiedliche Systeme der Nasswäsche) und nicht erfasst werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die N-Frachten im KVA-Abwasser vernachlässigbar gering sind.

Düngerproduktion: Vergärung ⇒ Produkteherstellung/Produktenutzung

Charakterisierung	Stickstofffracht in Gärresten aus der Vergärung, die zur Düngerproduktion verwendet werden
Datenquellen	Siehe Bemerkungen
Wert 2005	<i>Ökologisch relevante N-Verbindungen = Gesamtfluss:</i> Vernachlässigbar klein.
Datenqualität	
Bemerkungen	Fluss in Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006 (BAFU 2008) nicht vorhanden. Gespräch mit J. Fuchs, FiBL: In der Schweiz werden Gärreste nicht für die Produktion von Mineral- oder Kunstdünger weiterverarbeitet. Gärgut wird üblicherweise wie Mist oder Gülle in der Landwirtschaft verwertet. Teilweise werden dafür die festen und flüssigen Bestandteile voneinander getrennt (Kompogas).

A2 Gesamtsysteme 2005 und 1994, detailliert mit den grössten Stickstoffflüssen

Abb. 20 > Gesamtsystem Schweiz 2005 mit den grössten Stickstoffflüssen

Stickstoffflüsse im Gesamtsystem mit vier Subsystemen, welche jeweils mehrere Prozesse enthalten. Die Pfeile charakterisieren die Stickstoffflüsse zwischen den Prozessen in 1000 Tonnen N pro Jahr (ktN/a) und beziehen sich auf das Jahr 2005. Angegeben sind in schwarz die Gesamtflüsse an Stickstoff (mit Unsicherheitsbereich), welche sowohl ökologisch relevante Stickstoffverbindungen als auch Luftstickstoff enthalten und in blau reine Luftstickstoffflüsse. Angaben zu den einzelnen Flüssen sind in den Detailbeschreibungen der Subsysteme enthalten (Anhang A1).

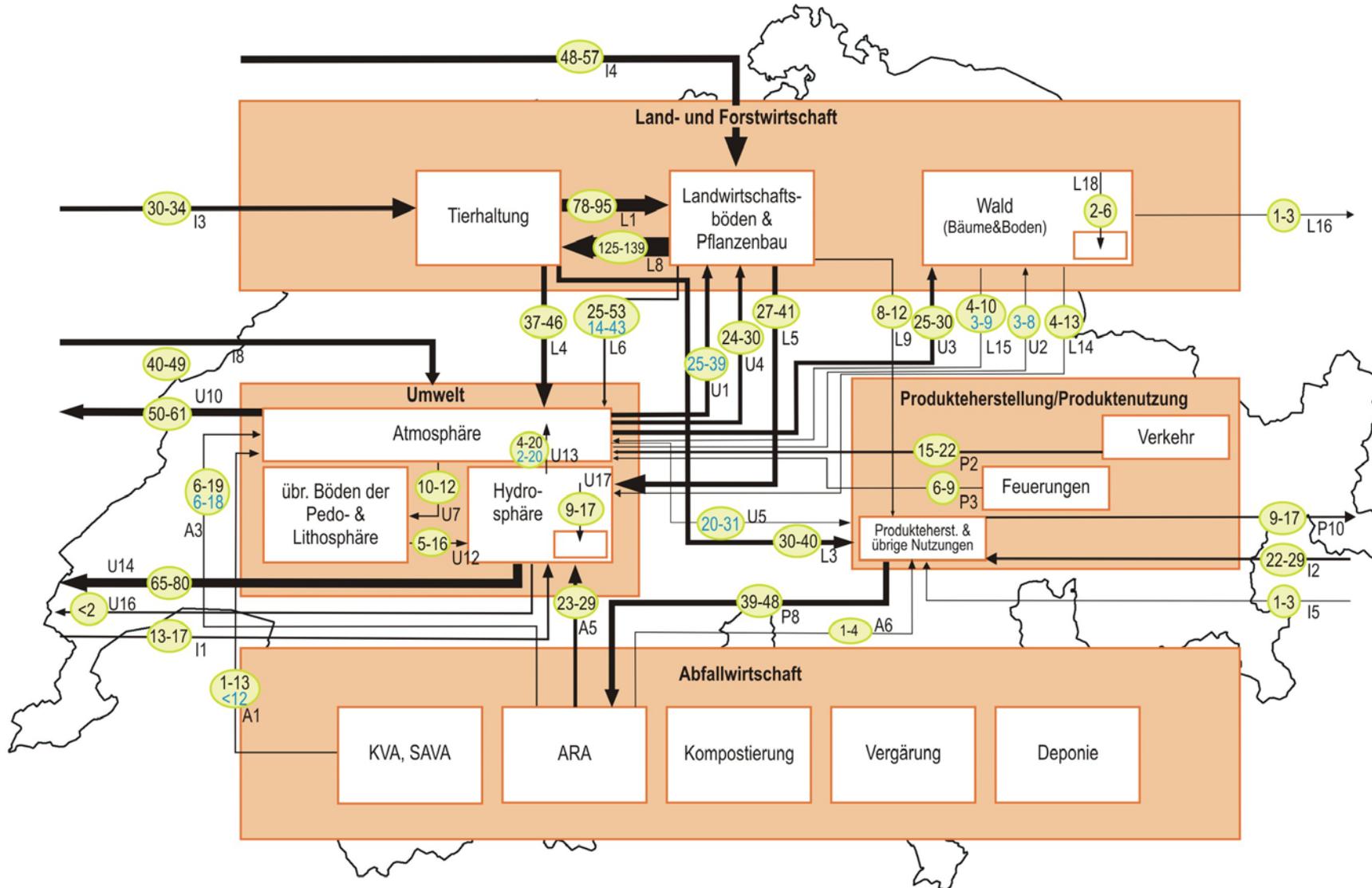
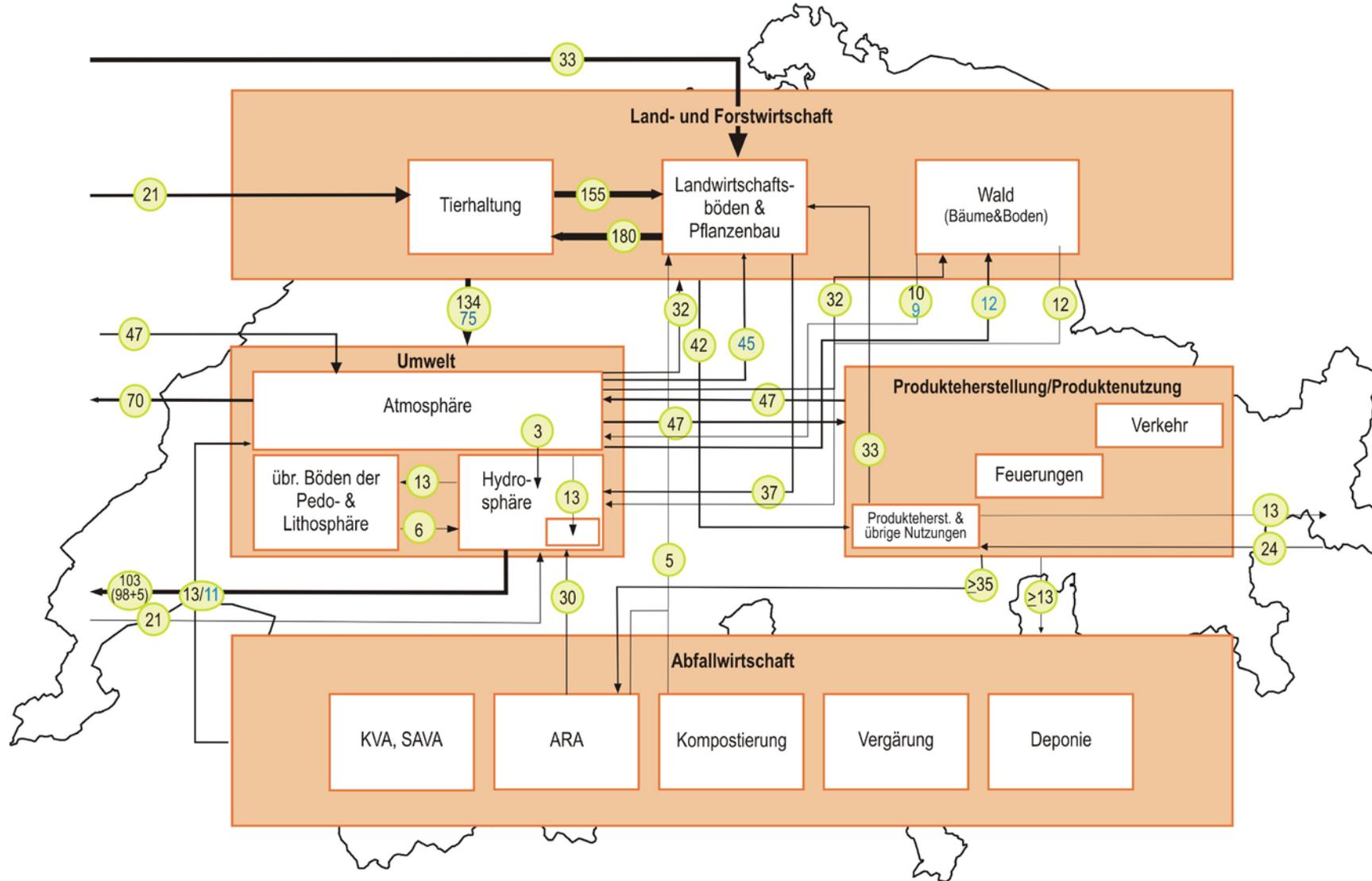


Abb. 21 > Gesamtsystem Schweiz 1994 mit den grössten Stickstoffflüssen

Die grössten Stickstoffflüsse im Gesamtsystem im Jahr 1994. Die Flüsse sind ins neue System transformiert, dessen Subsysteme leicht anders definiert sind als in der Originalquelle. Das System enthält vier Subsysteme die jeweils mehrere Prozesse enthalten. Die Pfeile charakterisieren die wichtigsten Stickstoffflüsse zwischen den Prozessen in 1000 Tonnen N pro Jahr (ktN/a) und beziehen sich auf das Jahr 1994. Angegeben sind in schwarz die Gesamtflüsse an Stickstoff (Mittelwert), welche sowohl ökologisch relevante Stickstoffverbindungen als auch Luftstickstoff enthalten und in blau reine Luftstickstoffflüsse.



PG N-Haushalt CH (1996) alle Flüsse, mit Ausnahme von: GSK 1993 (1990): Fluss an Hofdünger von Tierhaltung in Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau (155 ktN) und Fluss an Futter von Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau in Tierhaltung (180 ktN). Für diese Flüsse sind keine detaillierten Angaben vorhanden. Flüsse aus der Produkteherstellung/Produktenutzung in die Abfallwirtschaft (13 ktN) und in die ARA (35 ktN) wurden in PG N-Haushalt 1996 nicht explizit ausgewiesen, sondern nur die Emissionen aus der KVA/SAVA (13 ktN) und der Output aus der ARA (30 ktN). Im neuen, transformierten Modell wurden, um die Bilanz auszugleichen, die Darstellung dieser Flüsse jedoch notwendig.

A3 Herleitung Güterimport und -export in/aus der Schweiz

Tab. 20 > Herleitung Stickstoff-Import und -Export in/aus der Schweiz (Flüsse I2 und P10)

Ein- und Ausfuhr von landwirtschaftlichen Erzeugnissen 2007.

Zolltarif-Nr.	Bezeichnung	Einfuhr [t]	Ausfuhr [t]	N [g/kg]	Quellen N-Gehalt*	Einfuhr [kt N]	Ausfuhr [kt N]
01	Total lebende Tiere	3 800	3 620	24,00	ART	0,09	0,09
0201	Fleisch Rind	15 070	24	25,00	ART	0,38	0,00
0202/3	FleischSchwein	7 220	163	22,20	ART	0,16	0,00
0204/5	Fleisch Schaf, Ziege, Pferd	11 140		25,00	Rind	0,28	0,00
0207	Fleisch Geflügel	44 530	104	26,00	ART	1,16	0,00
0206	Schlachtnebenprodukte	20 450	13 430	25,00	Rind	0,51	0,34
0208	anderes Fleisch	7 149	31	25,00	Rind	0,18	0,00
0209/10	gesalzenes, getrockn. Fleisch	2 750	1 679	25,00	Rind	0,07	0,04
02	Total Fleisch	108 309	15 431				
03	Total Fisch, Krebs- und Weichtiere	41 620	180	28,00	NWDB (18 % Eiweiss)	1,17	0,01
0401	Milch, Rahm	24 450	3 873	5,16	ART	0,13	0,02
0402	Milch, Rahm eingedickt	2 241	8 559	10,00	NWDB, Kondensmilch	0,02	0,09
0403	Joghurt etc.	7 351	9 439	6,00	NWDB, Joghurt	0,04	0,06
0404	Molke, auch eingedickt	7 915		20,00	Molkenpulver, ART	0,16	
0404	Molke, auch eingedickt **		64 241	6,00	Molke eingedickt, e feed		0,39
0406	Käse		54 320	48,00	NWDB, Hartkäse	0,00	2,61
0406	Käse	37 230		36,00	NWDB, Weichkäse	1,34	0,00
0405	Butter	6 909	12				
0407/8	Eier	40 130	33	19,00	ART, NWDB	0,76	0,00
0409	Honig und Produkte tierischen Ursprungs	7 070	553	0,60	NWDB	0,00	0,00
04	Total Milch etc.	133 296	141 030				
0504	Därme, Blasen, Magen	10 229	1 940	25,00	Rind, ART	0,26	0,05
0506	Knochen, K'mehl, K'abfall***	304	37 435	72,00	e feed Fleischknochenmehl	0,02	2,70
0511	andere tier. Ursprungs (Futter, Abfall)**	4 968	24 818	35,00	Rind, Analyse	0,17	0,87
05	Total andere Waren tier. Ursprungs	15 501	64 193				
06	Total Pflanzen und Pflanzenteile	148 630	1 668	2,56	ART Gemüse	0,38	0,00
0701	Kartoffeln	47 512		3,00	ART	0,14	0,00
0702	Tomaten	38 964		1,60	NWDB	0,06	0,00
0704	Kohlarten	23 511		3,50	NWDB	0,08	0,00
0705	Salate	41 849		1,90	NWDB, Kopfsalat	0,08	0,00
0708	Hülsenfrüchte frisch	3 462		4,80	NWDB	0,02	0,00
	Andere	71 431		2,56	ART Gemüse	0,18	0,00
	Verschiedene zusammengefasst	57 440		2,56	ART Gemüse	0,15	0,00
0713	Hülsenfrüchte getrocknet	13 105		36,00	NWDB; Linsen, Bohnen	0,47	0,00
0714	Gemüse getrocknet	3 402		34,90	ART	0,12	0,00
07	Total Gemüse	300 676	2 716	2,56	ART Gemüse		0,01
0803	Bananen	78 234		1,60	NWDB, 1 % Eiweiss	0,13	0,00
0805	Zitrusfrüchte	131 923		1,30	NWDB, 0,8 % Eiweiss	0,17	0,00
0809	Kern- und Steinobst	55 392		1,00	NWDB, 0,6 % Eiweiss	0,06	0,00

Zolltarif-Nr.	Bezeichnung	Einfuhr [t]	Ausfuhr [t]	N [g/kg]	Quellen N-Gehalt*	Einfuhr [kt N]	Ausfuhr [kt N]
	andere	162 156		0,61	ART Früchte	0,10	0,00
0801/2	Schalenfrüchte	28 670		32,00	NWDB	0,92	0,00
08	Total Früchte	456 375	5 467	0,61	ART Früchte		0,00
09	Total Kaffee, Tee, Gewürze	111 440	19 685	18,00	NWDB, Kaffee	2,01	0,35
1001	Weizen	332 770		23,00	ART, e feed	7,65	0,00
1002	Roggen	4 780		16,98	ART	0,08	0,00
1003	Gerste	82 750		17,32	ART	1,43	0,00
1004	Hafer	55 630		17,70	ART	0,98	0,00
1005	Mais	162 270		13,44	ART	2,18	0,00
1006	Reis	118 430		12,00	NWDB	1,42	0,00
1007/8	anderes Getreide, Hirse	15 270		15,27	ART, Hirse	0,24	0,00
10	Total Getreide	771 900	2 122	17,00	Annahme		0,04
	Mehl von anderen Getreide	710		26,70	ART	0,02	0,00
	Getreide, anders bearbeitet	9 180		20,00	ART	0,18	0,00
1101	Mehl von Weizen	2 340		27,97	ART Weizenmehl hell	0,07	0,00
1107	Malz	67 080		17,60	Brauereien: 10–12 % Eiweiss	1,18	0,00
1108	Stärke, Inulin	39 780		0,48	NWDB	0,02	0,00
1109	Kleber von Weizen	3 380		128,00	e feed	0,43	0,00
	weitere Müllereierzeugnisse, Griess	2 492		20,00	N Griess	0,05	0,00
11	Total Müllereierzeugnisse	124 962	2 453	20,00	Annahme		0,05
1201	Sojabohnen	38 150		60,00	ART, NWDB	2,29	0,00
1202	Erdnüsse	3 377		41,60	NWDB	0,14	0,00
1204	Lein	5 741		33,00	ART	0,19	0,00
1205	Rapssamen	14 247		31,50	ART	0,45	0,00
1206	Sonnenblumen	14 372		34,00	ART, NWDB	0,49	0,00
1207	andere Ölsamen, -saaten	5 037		39,00	Sesam, Senf	0,20	0,00
1208	Mehle	286		17,00	Roggen	0,00	0,00
1209	Sämereien	6 637		24,00	Annahme	0,16	0,00
1210/11	für Pharma etc/Hopfen.	5 432		24,00	Annahme	0,13	0,00
	andere	21 416		11,00	Zrüben getrocknet / Johannisbrot	0,24	0,00
1213	Stroh	246 261		4,93	ART	1,21	0,00
1214	Heu	107 574		13,66	ART	1,47	0,00
1214	Runkeln	1 093		2,10	ART	0,00	0,00
12	Total Samen, Stroh, Futter	469 623	6 273	13,66	ART, Heu		0,09
1601-3	Würste, Fleischkonserven	11 435		32,00	NWDB	0,37	0,00
1604	Fischkonserven	17 247		36,80	NWDB Thonkons. etc	0,63	0,00
1605	Krebsskons. etc	4 636		32,00	NWDB Shrimps	0,15	0,00
16	Total Würste, Fisch-, Fleischkonserven	33 318	400	32,00	NWDB		0,01
2002	Tomatenzubereitungen	49 173		4,00	NWDB Tomatenprod. 2,5 % Eiweiss	0,20	0,00
2009	Säfte	74 936	179 054	0,50	NWDB Apfelsaft: 0,3 % Eiweiss	0,04	0,09
2001/03-08	übrige	89 114	66 706	2,00	NWDB	0,18	0,13
20	Total Gemüse-, Fruchtzubereitung	213 223	245 760				
2301	Fisch- u. Fleischmehl	6 560	5 192	107,00	ART Fischmehl	0,70	0,56
2302	Kleie	660		25,00	ART	0,02	0,00

Zolltarif-Nr.	Bezeichnung	Einfuhr [t]	Ausfuhr [t]	N [g/kg]	Quellen N-Gehalt*	Einfuhr [kt N]	Ausfuhr [kt N]	
2303	Kartoffelprotein	8 027		120,00	ART Kartoffelprotein	0,96	0,00	
2303	Stärkeproduktionsrückstände >30 % TS	50 152		99,00	Maiskleber 60 efeed	4,97	0,00	
2303	Bagasse (Melasse / Rückst. Zuckerrohr)	14 848		14,20	ART Melasse	0,21	0,00	
2303	Brennerei-/Brauereiabfälle	6 288		36,00	ART Treber	0,23	0,00	
2304	Sojaschrot	232 421		77,90	ART	18,11	0,00	
2306	Raps- und andere Schrote	18 754		52,20	ART Rapsschrot, e feed	0,98	0,00	
2308	Tierfutter aus anderen Pflanzen	21 498		11,70	Maiskolbenschrot efeed	0,25	0,00	
2309	Backfutter**	103 440	83 349	40,00	Futtermittelbranche	4,14	3,33	
	Ölkuchen etc.		4 902	56,00	ART Rapsschrot		0,27	
23	Total Futterwaren	462 647	93 443					
41	Total rohe Häute und Felle	110	15 290	52,00	Analyse	0,01	0,8	
	Total Import/Export (t)	3 537 057	635 162					
	Total Import/Export (ktN)	Fluss-Bezeichnung						
	Import gesamt (ktN)	I2 + Futtermittelimporte 2007 Futtermittelimporte 2007 (Spiess 2010)					67 41,6	
	Import (ktN) ohne Futtermittelimporte	I2					25,4	
	Export (ktN)	P10						13,0

Quellen: ART: FAL 1999 oder Auskunft E. Spiess; e feed: e feed 2010 Schweizerische Futtermitteldatenbank; NWDB: NWDB 2010 Nährwertdatenbank ETH (www.swissfir.ethz.ch/datenbank/index); Schweizerische Futtermitteldatenbank ALP (www.feed-alp.admin.ch/start.php?action=adv_search&cmd=list_feed)

* Es wurde mit einem Stickstoffgehalt im Eiweiss von 6,25 % gerechnet

** Unsichere Datenlage

*** Aktuell werden Knochen frisch ins Ausland zur Gelatineproduktion exportiert und nicht als Knochenmehl. Somit ergeben sich bei einem N-Gehalt (nach Analyse) von 35 g/kg: 1,3 kt N-Export pro Jahr

Bei der Neuberechnung der Güterflüsse in und aus der Schweiz wurde mit den Daten der Statistik des Schweizerischen Bauernverbandes 2007 (SBV Statistik 2008) gearbeitet. Diese stützt sich auf die schweizerische Aussenhandelsstatistik und umschreibt «landwirtschaftliche Erzeugnisse» nach dem Anhang II des Römer Vertrages (EG). Die Systematik hält sich an das Tarifnummernverzeichnis zum elektronischen Zolltarif Tares (EZV 2010).

Alle als relevant angesehenen Flüsse wurden berücksichtigt. Hier eine Zusammenstellung der für diese Arbeit nicht als relevant angesehenen wesentlichen Positionen: Fette (Zolltarif 15), Zucker und Zuckerwaren (Zolltarif 17), Kakao und Kakaozubereitungen (Zolltarif 18), Backwaren (Zolltarif 19), Verschiedene Nahrungsmittelzubereitungen (Zolltarif 21), Getränke (Zolltarif 22), Tabak (Zolltarif 24) sowie kleinere Positionen wie Harze, Hanf etc. Einerseits sind bei einzelnen Nahrungsmittelgruppen die N-Gehalte gleich Null und andererseits sind bei anderen Positionen die Import- und Exporttonnagen praktisch gleich, weil es sich um Veredlungsverkehr handelt (Kakao zu Schokolade, Produktion von Nahrungsmittelzubereitungen).

A4 Nutztiere und tierische Produktion

Tab. 21 > Entwicklung der Nutztierbestände

Entwicklung der Nutztierbestände von 1996 bis 2007 (in Tausend Stück, im Mai).

	Rindvieh total [1000 Stück]	Kühe [1000 Stück]	Schafe und Ziegen [1000 Stück]	Schweine [1000 Stück]	Nutzgeflügel [1000 Stück]
1996	1747	764	475	1379	6440
1997	1673	744	478	1395	6551
1998	1641	737	482	1487	6740
1999	1609	725	485	1453	6908
2000	1588	714	483	1498	6983
2001	1611	720	483	1548	6939
2002	1594	716	495	1561	7339
2003	1570	703	512	1529	7587
2004	1545	691	511	1538	8061
2005	1555	699	520	1609	8260
2006	1567	705	527	1635	7670
2007	1572	708	523	1573	8228

Bundesamt für Statistik BFS 2009, Landwirtschaftliche Betriebszählungen, Landwirtschaftliche Betriebsstrukturerhebungen

Tab. 22 > Tierische Produktion: Fleisch und Milch

Tierische Produktion: Fleisch und Milch der Jahre 1996 bis 2007 (in Tausend Tonnen).

	Rindvieh [1000 t]	Schweine [1000 t]	Geflügel [1000 t]	Übrige [1000 t]	Kuhmilch [total]
1996	158,6	219,9	40,5	24,6	3862,0
1997	151,8	214,4	43,9	24,3	3867,0
1998	147,2	231,5	44,2	24,4	3894,0
1999	146,5	225,7	45,6	24,3	3852,3
2000	127,9	224,9	49,3	23,1	3872,0
2001	137,6	234,3	49,9	24,0	3942,0
2002	139,6	235,6	54,2	24,0	3932,0
2003	136,7	229,6	56,3	24,0	3885,3
2004	133,9	227,1	59,7	24,2	3914,0
2005	132,3	236,3	58,0	24,1	3932,8
2006	134,9	243,5	51,7	24,3	3932,8
2007	132,9	242,0	60,4	23,4	3992,9

¹⁾ Inländische Bruttoproduktion; Schweizerischer Bauernverband 2009

A5

Linkliste

- > Agroline; Information zu Ammonsalpeter-Dünger der Lonza: www.agroline.ch
- > BAFU, Bundesamt für Umwelt: www.bafu.admin.ch
- > e Feed: Futtermittelkunde im Swiss Virtual Campus:
www.virtualcampus.ch/display.php?lang=2&pname=3016pres
- > European Science Foundation: www.nine-esf.org/; www.esf.org
- > Hydrologische Daten, Bundesamt für Umwelt: www.hydrodaten.admin.ch
- > IGKB, Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee: www.igkb.de/
- > IKSR, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins: www.iksr.org/
- > IPCC: www.ipcc.ch
- > Klimareporting (offizielle Schweizer Website unter UNFCCC):
www.climatereporting.ch
- > Kyoto Protocol, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): <http://unfccc.int/2860.php>
- > Landesforstinventar: www.lfi.ch/
- > LRTAP, Convention on Long-range Transboundary Air Pollution:
www.unece.org/env/lrtap/s
- > NADUF, Eawag:
www.eawag.ch/organisation/abteilungen/wut/schwerpunkte/chemievonwasserresourcen/naduf/index
- > NAQUA, Eawag:
www.bafu.admin.ch/grundwasser/07498/index.html?lang=de
www.bafu.admin.ch/grundwasser
- > Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL):
www.empa.ch/plugin/template/empa/699/*/--/l=1
- > Nährwertdatenbank ETH (www.swissfir.ethz.ch/datenbank/index)
- > OSPAR Commission, Protecting and Preserving the North-EAST Atlantic and its Resources: www.ospar.org/
- > Richtlinie 91/676/EWG des Rates vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen. Europa, das Portal der Europäischen Union:
<http://europa.eu/scadplus/leg/de/lvb/l28013.htm>.
- > Umweltbundesamt: www.umweltbundesamt.de/
- > UNECE United Nations Economic Commission for Europe, Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone: www.unece.org/env/lrtap/s

> Verzeichnisse

Abkürzungen

ART

Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon

BAFU

Bundesamt für Umwelt

BLW

Bundesamt für Landwirtschaft

BUWAL

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (heute BAFU)

DGVE

Düngergrössvieheinheit

LRV

Luftreinhalteverordnung

GSchG

Gewässerschutzgesetz

HT-Verbrennung

Hochtemperaturverbrennung

N

Stickstoff

NADUF

Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fließgewässer

N₂

Luftstickstoff

NH₃, NH₄⁺, NH_y

Ammoniak, Ammonium(ion), Summe Ammoniak/Ammonium

N₂O

Lachgas

NO, NO₂, NO_x, NO₂⁻, NO₃⁻

Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, Stickoxide, Nitrit(ion), Nitrat(ion)

USG

Umweltschutzgesetz

Abbildungen

Abb. A

Gesamtsystem Schweiz 2005; Stickstoffflüsse zwischen den Subsystemen 11

Abb. B

Gesamtsystem Schweiz 1994; Stickstoffflüsse zwischen den Subsystemen 12

Abb. 1

Stickstoffkreisläufe 21

Abb. 2

Stickstoffverbindungen und -umwandlungen 33

Abb. 3

Humusbildung und -abbau 39

Abb. 4

Stickstoff-Depositionen: Jahressumme 2000 41

Abb. 5

Nitrat-Konzentration im Jahr 2006 und Ackeranteil 43

Abb. 6

Gesamtsystem Schweiz 2005, Stickstoffflüsse zwischen den Subsystemen 53

Abb. 7

Subsystem Land- und Forstwirtschaft 54

Abb. 8

Subsystem Produkteherstellung/Produktenutzung 59

Abb. 9

Subsystem Umwelt 63

Abb. 10

Subsystem Abfallwirtschaft 67

Abb. 11

Stickstoffhaltige Luftschadstoffemissionen in die Atmosphäre 74

Abb. 12

N-Flüsse IN die Landwirtschaft hinein (Inputs) 76

Abb. 13

N-Flüsse AUS der Landwirtschaft hinaus (Outputs) und Hofdünger (interner Fluss im Subsystem Land-/Forstwirtschaft) 77

Abb. 14

Gesamtstickstofffracht und mittlerer Abfluss im Rhein bei Weil 1991–2003 79

Abb. 15 Rhein-Weil Jahresfrachten Gesamt-Stickstoff 1995–2007 mit Isolinien Konzentrationen	80	Tab. 8 Zusammenhang zwischen IPCC-Sektoren/-Kategorien und den Quellengruppen in den Prozessen d) Verkehr, e) Feuerungen und f) Produkteherstellung und übrige Nutzungen	62
Abb. 16 Entwicklung der Nutztierbestände	84	Tab. 9 Übersicht Inputs/Outputs Umwelt	64
Abb. 17 Entwicklung der tierischen Produktion	85	Tab. 10 Übersicht Inputs/Outputs Abfallwirtschaft	68
Abb. 18 Bilanzierung der Luftschadstoffe NO _x und NH _y in 2005	87	Tab. 11 Übersicht Inputs/Outputs Schweiz/Ausland	70
Abb. 19 Stickstoffverluste in den Rhein aus diffusen Quellen	90	Tab. 12 Vergleich der grössten Stickstoffflüsse 1994/1990 vs. 2005	71
Abb. 20 Gesamtsystem Schweiz 2005 mit den grössten Stickstoffflüssen	116	Tab. 13 Stickstoffhaltige Luftschadstoffemissionen in die Atmosphäre 1994 und 2005	74
Abb. 21 Gesamtsystem Schweiz 1994 mit den grössten Stickstoffflüssen	117	Tab. 14 N-Flüsse Land- und Forstwirtschaft, Vergleich 1994 und 2005	78
Tabellen		Tab. 15 Übersicht der Frachten von Gesamtstickstoff (N tot) und Nitrat im Rhein	80
Tab. A Vergleich der grössten Stickstoffflüsse 1994/1990 vs. 2005	13	Tab. 16 Übersicht der ins Ausland emittierten Frachten von Gesamtstickstoff (N tot) der Grenzflüsse	81
Tab. 1 Stickstoffverbindungen	31	Tab. 17 Bilanzierung der Luftschadstoffe, Situationen 1994 und 2005	88
Tab. 2 Umrechnungsfaktoren der Stickstoffverbindungen	48	Tab. 18 Modellierte Stickstofffrachten im Rheineinzugsgebiet	90
Tab. 3 Übersicht Inputs/Outputs Land- und Forstwirtschaft	55	Tab. 19 Bilanzierung der Stickstoffflüsse in Gütern, Situationen 1994 und 2005	91
Tab. 4 Zusammenhang zwischen IPCC-Sektoren/-Kategorien und den Quellengruppen in den Prozessen a) Tierhaltung und b) Landwirtschaftsböden und Pflanzenbau	57	Tab. 20 Herleitung Stickstoff-Import und -Export in/aus der Schweiz (Flüsse I2 und P10)	118
Tab. 5 Lachgasemissionen aus der Land- und Forstwirtschaft	58	Tab. 21 Entwicklung der Nutztierbestände	121
Tab. 6 Stickstoffaustausch zwischen Land- und Forstwirtschaft und übrigen Subsystemen	58	Tab. 22 Tierische Produktion: Fleisch und Milch	121
Tab. 7 Übersicht Inputs/Outputs Produkteherstellung/Produktenutzung	60		

> Literatur

Agrammon 2009: Modell Agrammon. Modellbeschreibung siehe www.agrammon.ch/ [3.11.2009]. Die Hochrechnung der der NH₃-Emissionen für die Schweiz ist im Tagungsband zur Agrammon-Tagung vom 10. September 2009 dokumentiert.

Amlinger 2002: Umweltrelevanz der Hausgartenkompostierung. Klimarelevante Gasemissionen, flüssige Emissionen, Massenbilanz, Hygienisierungsleistung. Kompost – Entwicklung & Beratung, Techn. Büro für Landwirtschaft, Dipl. Ing. Florian Amlinger, Perchtoldsdorf.

ART 2008a: Bretscher D., Leifeld J. Uncertainty in agricultural CH₄ and N₂O emissions of Switzerland 2007. Internes Dokument, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon, Zürich 2008.

ART 2008b: Spiess E. Daten zur N-Bilanz Schweiz. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon im Auftrag des Bundesamt für Landwirtschaft. Publiziert im Agrarbericht 2008, Bern 2008.

ART 2008c: THG-Inventar Landwirtschaft V3.5 Schweiz. Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. Zürich.

AWEL 2006: Wasserqualität der Seen, Fließgewässer und des Grundwassers im Kanton Zürich. Statusbericht 2006. Zürcher Umweltpraxis. www.gewaesserqualitaet.zh.ch [12.03.2010]

Baccini 1996: Regionaler Stoffhaushalt; Erfassung, Bewertung, Steuerung. P. Baccini und H.-P. Bader. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

BAG 2000: BAG-Bulletin 2/00 10. Bundesamt für Gesundheit (BAG), Januar 2000.

BAFU 2005: Abfall und Recycling 2005 im Überblick. Abteilung Abfall und Rohstoffe, Bundesamt für Umwelt BAFU.

BAFU 2008: Biogene Güteflüsse der Schweiz 2006, Massen- und Energieflüsse. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU. Bern.

BAFU 2009a: Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004–2006. Umwelt-Zustand Nr. 0903. Bundesamt für Umwelt, Bern. 144 S.

BAFU 2009b: Schadstoffkarten. Bundesamt für Umwelt. Bern. www.bafu.admin.ch/luft/luftbelastung/schadstoffkarten/stickstoff-deposition/index.html?lang=de; [3.11.2009].

BAFU 2010: Hydrologische Daten, Website Bundesamt für Umwelt: www.hydrodaten.admin.ch [Mai 2010]

BAFU/BLW 2008: Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. Umwelt-Wissen Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern: 221 S.

BAZL 2008: Emissionen der schweizerischen Zivilluftfahrt. Bundesamt für Zivilluftfahrt zuhanden EMIS Datenbank BAFU (teilveröffentlichte Resultate der BAZL Emissionsdatenbank). Bern.

BFE 2001: Schweizer Gesamtenergiestatistik 2000.

BLW 2004: Agrarbericht 2004. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern 2004.

BLW 2007: Agrarbericht 2007. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern 2007.

BLW 2008: Agrarbericht 2008. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern 2008.

BLW/BAFU 2010: Stickstoff-Flüsse der schweizerischen Landwirtschaft, Evaluation von Wissenslücken. Bundesamt für Landwirtschaft und Bundesamt für Umwelt, Publikation für 2010 vorgesehen.

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

BUWAL 1996a: Stoffflussanalyse Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 251. Bern.

BUWAL 1996b: Stickstofffrachten aus Abwasserreinigungsanlagen. Gewässerschutz. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 276. Bern.

BUWAL 1996c: Luftschadstoffemissionen aus natürlichen Quellen in der Schweiz. Luft. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 257. Bern.

De Vries W. et al. 2003: Empirical Critical Loads for Nitrogen, Proceedings of an Expert Workshop held under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Results on nitrogen impacts in the EC and UNECE ICP Forests Programme, Berne, 11–13 November 2002. In: Achermann B., Bobbink R (Ed). Published by the Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Environmental Documentation No. 164.

Eawag 2002: Eawag News 53. Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, Dübendorf.

E feed 2010: Schweizerische Futtermitteldatenbank ALP; www.feed-alp.admin.ch/start.php?action=adv_search&cmd=list_feed

EKL 2005: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene 2005. Schriftenreihe Umwelt Nr. 384. Bern.

EMEP 1995: European Transboundary Acidifying Air Pollution. Ten years calculated fields and budgets to the end of the First Sulphur Protocol. EMEP, Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmission of air pollutants in Europe. Meteorological Synthesis Centre- West; The Norwegian Meteorological Institute. EMEP/MS-CW Report 1/95. July 1995.

EMIS 2008: Datenbank der Luftschadstoff- und Klimagasemissionen der Schweiz. Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern.
(Das Klimagasinventar zuhanden der Klimakonvention und das Luftschadstoffinventar zuhanden der Genfer Konvention, CLRTAP, sind Exporte aus der EMIS-Datenbank).

Europa 2009: Richtlinie 91/676/EWG des Rates vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen. Europa, das Portal der Europäischen Union: <http://europa.eu/scadplus/leg/de/lvb/l28013.htm>. [6.4.2009].

European Science Foundation 2009: Nitrogen in Europe: Assessment of current problems and future solutions (NinE). Standing Committee for Life, Earth and Environmental Sciences (LESC).
www.nine-esf.org/; www.esf.org [15.5.2009]

EZV 2010: Eidgenössische Zollverwaltung EZV, Website Tares: www.tares.ch [02.08.2010].

FAL 1999: Schriftenreihe der FAL 28: Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 1995. Spiess E. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich Reckenholz. Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft, Liebefeld-Bern.

FAL 2000: Schriftenreihe der FAL 33: Lachgasemissionen aus der Schweizer Landwirtschaft. Schmid M., Neftel A. und Fuhrer J. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich Reckenholz. Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft, Liebefeld-Bern.

FAL 2003: Schriftenreihe der FAL 43: Stickstoff in Landwirtschaft und Umwelt. U. Sieber. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich Reckenholz. Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft, Liebefeld-Bern.

FiBL 2009: Mündliche Mitteilung FiBL, Frick, Oktober 2009.

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. Submissionstabellen). 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.

FOEN 2010: Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2008, National Inventory Report 2010. Submission of 15 April 2010 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.

Gangolli S.D., von den Brant P.A., Feron V.J., Janzowsky C., Koemann J.H., Speijers G.J.A., Spiegelhalter B., Walker R., Wishnok J.S. 1994: Assessment, nitrate, nitrite and nitroso compounds. Eur. J. Pharmacol, Environ. Toxicol. Pharmacol., Section 292, 1–38 1994:.

GRUDAF 2009: Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. Forschungsanstalten Agroscope Changins-Wädenswil ACW und Agroscope Reckenholz ART.

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.

HSW 2003: Biomassen-N-P-Gehalte zu biogene Güterflüsse der Schweiz, unveröffentlicht / pers. Mitteilung U. Baier, HSW 2003.

IAP 2009: Braun S., Flückiger W.: Wie geht es unserem Wald? IAP, Schönenbuch Mai 2009

IARC 2006: International Agency for Research on Cancer (IARC), part of the WHO: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 94 2006: INGESTED NITRATES AND NITRITES (Group 2A).

IAW 2004: Werder D. et al.: Technischer Bericht über die Entwicklung des N-Verlustpotentials der Schweizerischen Landwirtschaft von 1994 bis 2002. Zürich, April 2004.

IAW 2006: Peter S., Hartmann M., Hediger W.: Entwicklung der landwirtschaftlichen Emissionen umweltrelevanter Stickstoffverbindungen. Info Agrar Wirtschaft, Schriftenreihe 2006/1. Gruppe Agrar-, Lebensmittel und Umweltökonomie des Instituts für Umweltentscheidungen, ETH.

IGKB 2000: Dem Bodensee in den Abflussjahren 1996 und 1997 zugeführte Stofffrachten. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Bericht Nr. 53.

IGKB 2009: Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee IGKB. www.igkb.de/. [6.4.2009].

IKSR 2000: Bestandsaufnahme der Phosphor- und Stickstoffeinträge 1996. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz.

IKSR 2009: Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR): www.iksr.org/ [6.4.2009].

INFRAS 2004: Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1980–2030. INFRAS im Auftrag des BAFU. Bern.

- INFRAS 2008: Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie für die Jahre 1980–2020. INFRAS im Auftrag des BAFU. Bern.
- Interkantonaales Labor 2009: Mündliche Mitteilung U. Burkhardt 2009. Interkantonaales Labor Schaffhausen.
- Interreg 2006: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hg.) 2006: Interreg IIIA-Projekt MoNit «Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben», 4 Bände.
- IPCC 1997: Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reporting Instructions (Volume 1). Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/ql/invs4.htm [10.02.2009].
- IPCC 2007: Climate Change 2007, The Physical Basis, Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (p. 4), ISBN 92-9169-121-6.
- IPCC 2009: Website Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc.ch/ [23.06.2009].
- Kanton Schaffhausen 2007: Kanton Schaffhausen: Pilotprojekt Nitratreduktion im Klettgau, Schaffhausen, Mai 2007.
- Leu D., Biedermann R., Dettwiler J., Hoigné J., Stadelmann F.X. 1986: Bericht über Nitrate im Trinkwasser Standortbestimmung 1985; Mitt. Gebiete Lebensm. Hyg. 77, 227–315.
- Mengis M., Wehrli B. 1998: Nitratelimination in Gewässern und ihre Auswirkungen auf Nitratgehalte in Seen und Grundwasser. Mitt. Gebiete Lebensmittel Hygiene, 89, 63–76.
- Mengis M., Gächter R., Wehrli B. 1997: Kastanienbaum 1997: Stickstoff-Elimination in Schweizer Seen. gwa 3/97 77. Jahrgang.
- Meteotest 2009: Deposition of Nitrogen, Year 2000. Aggregation in six land-use classes: surface water, agriculture, alpine pastures, forest, settlements and bare land. B. Rihm, Meteotest, 12.1.2009.
- NADUF 2008: NADUF-Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fliessgewässer. Datendownload: www.eawag.ch/organisation/fabteilungen/wut/schwerpunkte/chemie/onwasserressourcen/naduf
- Nitrat Workshop, Bern 2001: BUWAL, BAG, BLW, 4. Mai 2001, Bern.
- NWDB 2010: Nährwertdatenbank ETH; www.swissfir.ethz.ch/datenbank/index [30.05.2010]
- NZZ 2002: Biedermann R.: Zweifelhafte Regelungen zum Nitrat / Eine Schlüsselsubstanz für Umwelt und Ernährung. NZZ 25.09.2002.
- NZZ 2009: Ein Moratorium für ein Schweizer Phantom, Bannstrahl gegen ausländische Agrotreibstoffe. NZZ Nr. 161, 15.7.2009, S.13.
- OSPAR 2009: OSPAR Commission, Protecting and preserving the North-EAST Atlantic and its resources. www.ospar.org/. Webseite aufgerufen am 6.4.2009.
- PG N-Haushalt CH 1996: Strategie zur Reduktion von Stickstoffemissionen. Bericht der Projektgruppe Stickstoffhaushalt Schweiz, z. Hd. EDI und EVD. Hrg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landwirtschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 273, Bern.
- Prasuhn V., Hurni P. 1998: Abschätzung der N- und P-Verluste aus diffusen Quellen in die Gewässer und Massnahmen zu deren Verminderung im Klettgau. Entwicklungskonzeption Klettgaurinne Interreg II, ISBN 3–906610–07–1.
- Prasuhn V., Sieber U. 2005: Changes in diffuse phosphorus and nitrogen inputs into surface waters in the Rhine watershed in Switzerland. Aquat. Science 67: 363–371.
- Rihm und Achermann 2007: Indirect leaching of Nitrate and Emissions of Nitrous Oxide from Agricultural Activities – Considerations for Switzerland. Informal Note. TFIAM/COST 729 Workshop on Integrated Modelling of Nitrogen 28–30 November 2007, Laxenburg, Austria.
- SBV Statistik 2008: Statistische Erhebungen und Schätzungen zu Landwirtschaft und Ernährung 2007. Schweizerischer Bauernverband.
- 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. doi:10.1111/j.1462–2920.2006.001074.x.
- Spiess 2009: Schriftliche Mitteilung. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Zürich.
- Spiess 2010: Schriftliche Mitteilung. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Zürich.
- Spiess und Prasuhn 2006: Weniger Nitrat im Grundwasser dank Ökomassnahmen. Agrarforschung 13: 4-9.
- Spiess und Prasuhn 2010: E-Mail Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Zürich, Juni 2010.
- Stamm C. 2009: Eawag, schriftliche Mitteilung an INFRAS, 01.10.2009.
- Stössel I. 2010: Interkantonaales Labor, Schaffhausen, mündliche Mitteilung, Juli 2010.
- Streudler et al. 1989: Influence of nitrogen -fertilization on methane uptake in temperate forest soils, Nature 341: 314–316.

Swaminathan 2004: Technology Transfer and Mitigation of Climate Change: the Fertilizer Industry Perspective. IPCC Expert Meeting on Industrial Technology Development, Transfer and Diffusion, Tokyo, 2004.

www.iccwbo.org/uploadedFiles/ICC/policy/Environment/TechTransferFertilize%20rInd.doc [Dez. 2009]

UBA 2008a: Hintergrundpapier zur einer multimedialen Stickstoffemissionsminderungsstrategie. Umweltbundesamt (UBA) September 2008, Dessau.

UBA 2008b: Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen. Umweltbundesamt (UBA) Oktober 2008, Dessau.

UBA 2009: Webseite Umweltbundesamt, Daten zur Umwelt: www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/ [23.6.2009].

UNECE 2009a: Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP), United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): www.unece.org/env/lrtap/s. Webseite aufgerufen am 6.4.2009.

UNECE 2009b: Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): www.unece.org/env/lrtap/s. Webseite aufgerufen am 6.4.2009.

UNFCCC 1997: Kyoto Protokoll, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): <http://unfccc.int/2860.php>. Webseite aufgerufen am 6.4.2009.

UWE 2007: Kanton Luzern, Dienststellen Umwelt und Energie UWE, Landwirtschaft und Wald LAWA, Luzerner Bäuerinnen und Bauernverband: Massnahmenplan Luftreinhaltung, Teilplan Ammoniak, 17.01.2007
www.umwelt-luzern.ch/teilplan_ammoniak.pdf [14.8.2009].

Webseite Agroline: www.agroline.ch/ [November 2009]

Website Centravo: www.centravo.ch/pdf/Umweltbericht_aktuell.pdf [11.06.2010]

TMF Geschäftsbericht 2009: TMF, Extraktionswerk AG Bazenhaid, Geschäftsbericht 2009.

Willmann 2010: Matthias Willmann, Institut für Umweltingenieurwissenschaften ETHZ, schriftliche Mitteilung, 04.02.2010

Zobrist J., Sigg L., Schoenenberger U. 2004: NADUF – thematische Auswertung der Messresultate 1974 bis 1998. Schriftenreihe der Eawag Nr. 18, ISBN: 3-906484-33-5, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz Eawag, Dübendorf.

Zobrist 2009: Schriftliche Mitteilung. Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz Eawag, Dübendorf.

Zobrist 2010: Schriftliche Mitteilung. Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz Eawag, Dübendorf.