

BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT BLW
BUNDESAMT FÜR UMWELT BAFU

Stickstoff-Flüsse der schweizerischen Landwirtschaft

Evaluation von Wissenslücken in der Forschung

Schlussbericht

Zürich, 21. Oktober 2010

N-FLÜSSE-LANDWIRTSCHAFT-DEFINITIV.DOC



INFRAS

INFRAS

BINZSTRASSE 23
POSTFACH
CH-8045 ZÜRICH
t +41 44 205 95 95
f +41 44 205 95 99
ZUERICH@INFRAS.CH

MÜHLEMATTSTRASSE 45
CH-3007 BERN

WWW.INFRAS.CH

Stickstoff-Flüsse der schweizerischen Landwirtschaft

Evaluation von Wissenslücken in der Forschung

Bundesamt für Landwirtschaft BLW

Bundesamt für Umwelt BAFU

Schlussbericht, Zürich, 21. Oktober 2010

Mitwirkende

Auftraggeber

BLW, Projektbegleitung Anton Candinas

BAFU, Projektbegleitung Beat Achermann

Experten

Roger Biedermann, Neunkirch

Christian Stamm, EAWAG Dübendorf

AutorInnen INFRAS

Jürg Heldstab

Fabio Leippert

Judith Reutimann

Othmar Schwank

N-Flüsse-Landwirtschaft-definitiv.doc

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG	5
1. AUSGANGSLAGE	13
2. STICKSTOFF IN DER UMWELT	15
2.1. STICKSTOFF: VERBINDUNGEN, UMWANDLUNGEN UND KREISLAUF	15
2.1.1. Verbindungen und Vorkommen	15
2.1.2. Umwandlungen und Kreislauf	17
2.2. STICKSTOFFPROBLEMATIK	23
2.3. REGULIERUNGEN	25
2.4. STICKSTOFFFLÜSSE SCHWEIZ	32
2.4.1. Gesamtsystem	32
2.4.2. Stickstoffflüsse der schweizerischen Landwirtschaft	35
2.4.3. Treibende und induzierte Stoffflüsse	38
2.5. IMPLIKATIONEN AUS DER STOFFFLUSSANALYSE FÜR DIE LANDWIRTSCHAFTLICHE FORSCHUNG	39
3. LANDWIRTSCHAFTLICHE FORSCHUNG: AKTEURE UND FORSCHUNGSFELDER	41
3.1. UMFRAGE, INTERVIEWS, WEITERE QUELLEN	41
3.1.1. Umfrage	41
3.1.2. Interviews	42
3.1.3. Weitere Quellen	42
3.2. AKTEURE UND FORSCHUNGSFELDER IN DER SCHWEIZ	44
3.3. FORSCHUNGSFELDER IN EINIGEN EUROPÄISCHEN LÄNDERN	49
4. STAND DER FORSCHUNG UND FORSCHUNGSLÜCKEN	51
4.1. WAS IST EINE FORSCHUNGSLÜCKE?	51
4.2. GESAMTBETRACHTUNGEN	51
4.2.1. Globaler Stickstoffkreislauf – Klimawandel	51
4.2.2. Stickstoffkreislauf - Prozessketten	55
4.3. FORSCHUNGSLÜCKEN METHODISCHER ART	57
4.4. FORSCHUNGSLÜCKEN PROZESSE UND BEWIRTSCHAFTUNG	60
4.5. KONTRAPUNKT	64
4.6. FORSCHUNGSLÜCKEN AUS WEITEREN QUELLEN	64
4.6.1. Stickstoffkreislauf/-Stoffflüsse	64

4.6.2.	Stickstoff als Nährstoff und Ressource	72
4.6.3.	Stickstoff als Klimafaktor	73
4.6.4.	Stickstoff als gesellschaftliches Thema	75
4.6.5.	Übersicht über die weiteren Quellen	77
5.	BEWERTUNG	79
5.1.	BEWERTUNGSPROBLEMATIK	79
5.2.	ARBEITSTHEMEN	81
5.3.	DIE WICHTIGSTEN FORSCHUNGSLÜCKEN	83
5.3.1.	Forschungslücken im thematischen Kontext	83
5.3.2.	Zusammenfassung Forschungslücken, Priorisierung	89
	EPILOG	96
	ZUR ENTSTEHUNG DER VORLIEGENDEN STUDIE	96
	EMPFEHLUNGEN DER AUTOREN UND EXPERTEN	96
	LITERATUR	101

ZUSAMMENFASSUNG

Stickstoff ist ein Schlüsselement für die organische Natur dank seiner Funktion als Nährstoff und als Bestandteil von Eiweissen. 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 Konzentrationsstörungen in der Umwelt verursacht, die zunehmend negative Auswirkungen auf Umwelt, Biodiversität und Gesundheit führen.

Die Funktionsweisen des Stickstoffkreislaufs in der Landwirtschaft sind dank der Forschung in ihren wesentlichen Grundzügen bekannt. Schwierigkeiten bestehen aber nach wie vor in der Quantifizierung verschiedener Teilflüsse und deren Beeinflussung durch die landwirtschaftlichen Prozesse. Ebenfalls besteht in der Steigerung der Stickstoffeffizienz in der Landwirtschaft grosser Optimierungs- und damit Forschungsbedarf. Aus diesen Gründen hat das Bundesamt für Landwirtschaft BLW in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt BAFU ein Projekt realisiert mit dem Ziel, Forschungslücken zu identifizieren und zu priorisieren. Die vorliegende Studie dokumentiert die Ergebnisse. Folgende Arbeiten wurden ausgeführt:

- › Interpretation von Ergebnissen der aktualisierten Stoffflussanalyse Stickstoff der Schweiz im Hinblick auf Forschungslücken,
- › Befragung von Forschenden in der Schweiz und im europäischen Ausland zur aktuellen Stickstoffforschung,
- › Auswertung von Literatur.

Die Stoffflussanalyse zeigt, dass erstens die grössten Stickstoffflüsse in und zwischen den Subsystemen Land/Forstwirtschaft und Umwelt fliessen und dass zweitens wichtige Stoffflüsse, z.B. Nitratauswaschung, noch beträchtliche Unsicherheiten aufweisen. Die Befragungen und die Literatursauswertung weisen auf mannigfaltige Forschungslücken, die sich nach Methoden, Prozessen und Bewirtschaftungsformen gliedern lassen. Bezüglich Unterschieden zwischen der Schweiz und dem Ausland scheint es auf der Forschungsebene keine grundlegenden Diskrepanzen zu geben, aber selbstverständlich gibt es unterschiedliche Forschungsobjekte wegen der spezifischen, schweizerischen Produktions- und Umweltbedingungen. Als grosse Herausforderung für die Stickstoffforschung wird die Steigerung der Produktivität bei gleichzeitiger Verbesserung der Nachhaltigkeit betrachtet und dies im Wissen um die grossen Unsicherheiten über die künftigen Entwicklungen der Agrarmärkte und des Klimas.

Um Forschungslücken als solche zu identifizieren, braucht es Zielvorstellungen. Der Bundesrat hat sich z.B. auf eine Entwicklung unter der Bezeichnung „schwache Nachhaltigkeit plus“ festgelegt und beruft sich dabei auf Verfassungsartikel, auf die Bundesgesetze zur Landwirtschaft und zum Umweltschutz und internationale Vereinbarungen (Göteborg Protokoll). Dabei bleibt zwar offen, wie dieser Weg beschritten werden soll, aber immerhin gibt es zusätzlich agrarökologische Ziele und die Umweltziele Landwirtschaft in denen die Zielwerte für die Schweiz skizziert sind. Im Weiteren existiert Konsens zum Vorgehen zur Entschärfung der Stickstoffproblematik, dass nämlich die Stickstoffeinträge und –verluste reduziert, die Stickstoff-Effizienz gesteigert und die Stickstoffflüsse gesamthaft betrachtet werden müssen. Aus diesen Positionen lassen sich Arbeitsthemen formulieren, die für die Strukturierung und Priorisierung der Forschungslücken hilfreich sind:

- a) synthetischer Forschungsansatz (gesamte Stickstoffkaskade in die Forschung einbeziehen),
- b) Ernährung/Nachhaltigkeit,
- c) Globale Entwicklungen/Klimawandel,
- d) Einbindung der Landwirtschaftsforschung in Gesellschaft/Wirtschaft
- e) Integration der räumlichen Aspekte.

Zur Priorisierung der Forschungslücken benutzen die Autoren der vorliegenden Studie folgende Kriterien: Die Priorität ist umso höher, je grösser die von der Forschungslücke betroffenen Stickstoffflüsse sind, je grösser die Unsicherheiten der betroffenen Stickstoffflüsse sind und je mehr der Arbeitsthemen a) bis e) von der Forschungslücke tangiert werden (was einen Bezug zur Aktualität und zur Bedeutung der Forschungslücke schafft). Kosten/Nutzen-Überlegungen und politische Gewichtungen wurden für die Priorisierung explizit nicht berücksichtigt.

Die wichtigsten Forschungslücken werden im Kapitel 5 zuerst in den Kontext der fünf Arbeitsthemen eingebunden und anschliessend in einer Tabelle zusammengefasst (siehe Tabelle 1 auf den nächsten Seiten). In der letzten Spalte ist die Punktzahl zur Priorisierung der Forschungslücken angegeben: 6 höchste Priorität, 5, hohe Priorität etc.

FORSCHUNGSLÜCKEN					
Stichwort	Forschungslücke	Stichworte und verkürzte Zitate aus Interviews	Arbeits-themen	Flüsse	Pri or.
Stickstoff-Prozesse					
Ganzheitliche Experimente	Planung von full nitrogen approach Experimenten, Interpretationen	Ganze N-Flusskette betrachten (Stadelmann, Richner). Erfassung gesamter Stickstoffbilanz auf Parzellen-/Betriebsebene (Huguenin-Elie). Bedeutung der versch. N-Flüsse am Total ist sehr unsicher (Sutton). System analysis is key, system boundaries should not be set at too low scales (Schroder).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp.	› Flux › Unsh.	5
Potenzielle N-Effizienz	Potenzielle zur Erhöhung der N-Effizienz, zur Schliessung der N-Kreisläufe identifizieren	N Fixierungsleistung in Abhängigkeit der angepflanzten Futterpflanzen zu wenig bekannt (Huguenin-Elie). Kenntnis über symbiotische N ₂ -Fixierung in Gras-/Ackerbausystem (Richner) und für gesamte Schweizer Landwirtschaft (Oberson) nötig.	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp.	› Flux › Unsh.	6
Grenzen N-Effizienz	Naturwissenschaftlichen Grenzen für die Steigerung der N-Effizienz erforschen.	Einflussfaktoren N-Effizienz zu wenig verstanden (Menzi, Oberson).	a) Synthet. F. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	4
Zulässiger N-Input	Grenzen für N-Inputs zur Erreichung Umweltziele Landwirtschaft	Quantifizierung von N-Flüssen/-Verlusten und N-Pools (Richner, Stadelmann, Vertes). Verteilung von Dünger nach Ausbringung im Boden verstehen (Neftel).	a) Synthet. F. d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	5
Düngerverbrauch	Potenzielle zur Reduktion des Düngerverbrauchs identifizieren.	Wenig bekanntes Schicksal des gedüngten, aber nicht wirksamen Stickstoffs im Boden (Berner)	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp.	› Flux › Unsh.	6
N-Verluste	Potenzielle zur Reduktion von Verlusten in Tierhaltung/Pflanzenbau identifizieren	Nitrifikationspotential bestimmen (Willmann et al.). Minimierung NH ₃ Emissionsmessaufwand (Menzi). Quant. Nitratverluste abhängig von Kulturfolge/Hof- und Mineraldünger nötig (Peter). Quant. NH ₃ Verluste auf Feld- und Stallebene nötig (CH spezifisch) (Neftel).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	6
Nitrat	Nitratauswaschung Wald (induzierte Flüsse, vgl 2.4.3)	Mechanismen zur Nitratauswaschung im Wald wenig verstanden (Braun).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	5
Erfolgskontrolle	Keine unabhängige Erfolgskontrolle der Massnahmen	Unabhängige Methoden zur Erfolgskontrolle von Stickstoffminderungsstrategien benötigt (Sutton, Oenema)	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	5

FORSCHUNGSLÜCKEN					
Stichwort	Forschungslücke	Stichworte und verkürzte Zitate aus Interviews	Arbeits- the- men	Flüsse	Pri or.
Kopplung C-/N-Kreislauf	Kopplung unter schweiz. Produktionsbedingungen im Hinblick auf die Klimaerwärmung erforschen.	Zusammenhänge klimatische Variation - N-Prozesse unbekannt (Keck). Interaktionen verstärkten Stickstoffkreislaufs - andere biogeochemischen Kreisläufe im Zusammenhang mit dem Klimawandel unverstanden (Gruber). Einfluss Klimaänderung - N-Flüsse unklar (Stadelmann), Auswirkung Klimawandel auf die Mineralisierung unbekannt (Willmann et. al).	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	6
Anammox	Bedeutung Schweiz nicht bekannt	Neue N-Umwandlungsreaktionen wie Anammox sind in ihrer Tragweite in der Umwelt noch wenig verstanden (Wehrli)	a) Synthet. F e) räuml. Asp	› Unsh.	3
Messen					
Ganzheitliche Feldexperimente	Experimentelle Bestimmung aller N-Flüsse auf Feldskala für die wichtigsten schweiz. Produktionsbedingungen.	Gesamt-Experimente zu N-Umsatz, N-Prozesse, N-Verluste und N-Flüsse (Stadelmann, Oberholzer). Quantifizierung N-Flüsse/Verluste Weidesysteme, Nutztiere, Boden-Pflanzenwurzel.	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	6
Luftstickstoff	Wenig bekannte N ₂ -Flüsse	N ₂ -Emissionen sind nur indirekt ermittelbar (Peter).	a) Synthet. F. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	4
Ammoniak	Fehlende Daten NH ₃ (induzierte Flüsse, vgl 2.4.3)	Routinemässige Methodik zur Quantifizierung NH ₃ -Trockendeposition fehlt (Sutton).	a) Synthet. F. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	3
N-Deposition	Fehlende Zeitreihen	Abschätzung der historischen N-Depositionen (Braun).	a) Synthet. F. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	4
Messmethode		Kostengünstige Messung von Spurengasemissionen, Weiterentwicklung Tracermethoden nötig (Richner).			
Nitrat	Messdaten Nitratauswaschung (induzierte Flüsse, vgl 2.4.3)	Keine quantitative Werte zu Nitratauswaschung (Menzi, Oenema) & keine Differenzierung nach Düngemittel (Peter) und Bodenbearbeitung (Richner).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima	› Flux › Unsh.	4

FORSCHUNGSLÜCKEN					
Stichwort	Forschungslücke	Stichworte und verkürzte Zitate aus Interviews	Arbeits- the- men	Flüsse	Pri- or.
Modellieren					
Ganzheitliche N-Modellierung	Entwickeln, kalibrieren, validieren von ganzheitlichen Stickstoffflussmodellen.	Ganzheitliches Modell nötig, um Szenarien zu entwickeln (Berner). N-Flüsse modellieren, um agrarpolitische Strategien & praktische Empfehlungen & Lenkungsmassnahmen einzuleiten (Stadelmann). Full nitrogen approach important to consider many synergies and antagonisms (Sutton). Konzept der Stickstoffkaskade implementieren (Neftel). Es fehlt belastbare Datengrundlage (nach Tierkategorie/Haltungssystem/klimatische Variation/Funktion/Management) (Keck). Quellen reaktiver N-Verbindungen gut bekannt, Senken nicht (Wehrli). Optimierte Modelle nötig um N-Flüsse besser zu schätzen (Oberholzer).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	6
Bodenprozesse	Verständnis N-Mobilisierung, Denitrifikation erweitern. Modelle sind vorhanden, es fehlen aber aktuelle, flächendeckende Resultate und Quantifizierung der Prozesse und ihrer Unsicherheiten.	Dynamik organischer N-Pool zu wenig verstanden (Wehrli). Entwicklung der Humusgehalte unverstanden (Richner). Keine Daten zu Bruttomineralisierung und Immobilisierung (Oberson). NO und N ₂ O Austauschflüsse im Boden modellieren (Neftel). Grosse Unsicherheiten der Lachgasemissionskoeffizienten (Peter) & Quellen/Pathways von N ₂ O unsicher (Oenema). Verständnislücke Soil organic matter turn-over modelling (Vertes) & N-Flüsse an der Schnittstelle Boden-Atmosphäre (Richner). Quantifizierung Denitrifikationsverlust sehr unsicher & schwierig (Oenema, Neftel, Sutton, Vertes, Menzi, Stadelmann, Oberholzer, Braun)	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	6
Nitrat	Nitratauswaschung	Modellierung der Nitratauswaschung: Modelle sind vorhanden, es gibt aber Abweichungen zu jüngsten Beobachtungen (Willmann). Keine quantitative Werte zu Nitratauswaschung (Menzi, Oenema) & keine Differenzierung nach Düngemittel (Peter) und Bodenbearbeitung (Richner).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp.	› Flux › Unsh.	5
N-Pools	Mangelhafte Kenntnisse	Bessere Kenntnisse zu N-Pools im Boden sind nötig, um agronomische Steuerung zu optimieren (Stadelmann, Richner, Vertes). N-Bodenpools grosse Herausforderung (Richner).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp.	› Flux › Unsh.	5
Umweltziele Landwirtschaft	Erreichbarkeit Umweltziele Landwirtschaft ist ungewiss	Unter welchen Bedingungen (Düngerinput, Bestockung) sind die den Stickstoff betreffenden Umweltziele Landwirtschaft erreichbar? (siehe Kap.5.1), Vgl auch Kpt 2.5; Implikationen aus der Stoffflussanalyse	a) Synthet. F. d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	5

FORSCHUNGSLÜCKEN					
Stichwort	Forschungslücke	Stichworte und verkürzte Zitate aus Interviews	Arbeitsthe- men	Flüsse	Pri or.
Mitigation	Reduktionspotenziale Klimagase	Klimawirksamkeit von Stallbausystem /Düngerketten/ Anbausystem zuwenig bekannt (Berner)	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima	› Flux › Unsh.	4
Adaptation	Wirkung von Anpassungsmassnahmen auf N-Kreislauf	Der Einfluss der klimatischen Variation auf die Stickstoffprozesse ist wenig verstanden (Keck). Vgl auch Kpt 2.5; Implikationen aus der Stoffflussanalyse.	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	5
Unsicherheiten	Mangelhafte Kenntnisse	Quantifizieren der Unsicherheiten in allen Modellrechnungen (Menzi, Oene- ma, Peter; siehe auch Kap. 2.4.2 und Kpt 2.5; Implikationen aus der Stoffflus- sanalyse	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp	› Unsh.	4
Wissenstransfer, Umsetzung, Kosten					
Traditionelles Wissen	Traditionelles Wissen in der landwirt- schaftlichen Forschung zu wenig be- kannt/genutzt	Wie kann traditionelles Wissen/Erfahrungswissen genutzt werden, um bspw. natürliche Stickstofffixierung, Ressourceneffizienz und Mineraldüngereinsatz zu optimieren. (IAASTD 2008, 2009, UNCTAD 2009, Royal Society 2009))	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. d) Ges./Wirt.	› Flux › Unsh.	5
Datentransfer Forschung	Wie können die relevanten Daten und Informationen zum Stickstoff in der For- schung besser bekannt und verfügbar gemacht werden?	Belastbare Grundlagendaten zur Verbreitung von Produktionstechnik und Emissionsraten benötigt (Richner, Stadelmann).	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. d) Ges./Wirt.	› Flux › Unsh.	5
Internat. Aus- tausch	Know-how-/Erfahrungsaustausch CH- Europa	Europäische Forschungen im Auge behalten, deren Erkenntnisse und Er- gebnisse partizipieren (v.a. Project Concept 6, NinE).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp		3
Bewusstsein N-Problematik	Mangelnde Kenntnisse in der Öffentlich- keit	Bedeutung des N-Kreislaufs und das Wissen um die aktuellen/künftigen Probleme im Umfeld Ernährung/Klimawandel in Wissenschaft, Politik, Bevöl- kerung vermehrt bekannt machen.	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt.	› Flux › Unsh.	5
Kosten	Zu wenig Kenntnis von Kostenfolgen	Quantifizieren der Kosten, die durch Stickstoffproblematik in der Umwelt verursacht werden.	b) Ernähr./Nh. d) Ges./Wirt.		1

FORSCHUNGSLÜCKEN					
Stichwort	Forschungslücke	Stichworte und verkürzte Zitate aus Interviews	Arbeitsthe- men	Flüsse	Pri- or.
Wissen um- setzen	Forschungsbeiträge zur Anpassung der landw. Regelwerke (DZV, GRU-DAF,...), um Landwirtschaft auf effizientere N-Nutzung/Reduktion N-Verluste auszurichten.	Ohne Reduktion der Futtermittelimporte und Anpassung Viehbestand sind N-Ziele nicht erreichbar (Bundi). Ökolog. Direktzahlungen nicht nach Giesskannenprinzip verteilen, sondern zielgerichtet nach ökolog. Nutzen ausrichten (Stadelmann), Informationsfluss zu verwendeten Technologien & Tauglichkeit von Anwendern zu Forschung & Verwaltung nötig (Vertes). Forschung soll besser & verständlicher gegenüber Zielpublikum (Anwender) kommunizieren (Schröder).	a) Synthet. F. d) Ges./Wirt.		2
Hot spots	Verbesserung der hot spots Problematik in der Schweiz	Interregionale Optimierungsmöglichkeiten der N-Flüsse, um z.B. die heutigen hot spots der schweizerischen Landwirtschaft, d.h. die Gebiete mit maximalen Ammoniakemissionen, nachhaltig umzuwandeln.	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp.	› Flux	5
"Low/high input	Künftige Ausrichtung der schweiz. Landwirtschaft	Es braucht eine Modellierungsstudie mit spezifischen Szenarien (am restriktiven System schrauben, ökonomische Auswirkungen modellieren. Low Input/high output) (Berner). Vgl. auch Kpt 2.5.	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp.	› Flux	6
Raumplanung	Verknüpfung Landwirtschaft-Urbanisierung	Was für Bedingungen kann die N-Forschung identifizieren, die das Landwirtschaftssystem mit der zunehmend urbanisierten Gesellschaft optimal verknüpfen?	a) Synthet. F. d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp.		3

Tabelle 1 Forschungslücken Stickstoff. Beschreibung mit Stichworten und verkürzten Zitaten. Zuordnung zu den fünf Arbeitsthemen a) synthetischer Forschungsansatz, b) Ernährung/Nachhaltigkeit, c) globale Entwicklungen/Klimawandel, d) Einbindung Landwirtschaftsforschung in die Gesellschaft/Wirtschaft, e) Integration der räumlichen Aspekte. Wo grosse N-Flüsse („Flux“) und/ oder grosse Unsicherheiten („gr. Unsh.“) der N-Flüsse betroffen sind, stehen Einträge in der Spalte „Flüsse“. Die Punktzahl in der Spalte „Priorität“ berechnet sich aus der Anzahl Nennungen in den Spalten Arbeitsthemen und Flüsse. 6: Höchste Priorität, 5: hohe Priorität, 4-1: mittlere bis geringere Prioritäten.

1. AUSGANGSLAGE

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

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 synthetische Herstellung von Stickstoffdünger durch den Haber-Bosch Prozess war Voraussetzung für die grüne Revolution und hat die landwirtschaftlichen Erträge bedeutend gesteigert. Gleichzeitig führen die Emissionen von Stickstoffverbindungen wie Ammoniak/Ammonium ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) Stickstoffmonoxid und -dioxid (NO , NO_2) usw. in die Umweltmedien 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 marine Küstengewässer bei (z.B. Nordsee).

Die Funktionsweisen des Stickstoffkreislaufs in der Landwirtschaft sind dank der Forschung in ihren wesentlichen Grundzügen bekannt. Schwierigkeiten bestehen aber nach wie vor in der Quantifizierung verschiedener Teilflüsse und deren Beeinflussung durch die landwirtschaftlichen Prozesse. Ebenfalls besteht in der Steigerung der Stickstoffeffizienz in der Landwirtschaft grosser Optimierungs- und damit Forschungsbedarf. Wissenslücken bestehen ausserdem bei der Synthese von Teilschritten und bei der Gesamtbetrachtung, bei der die Landwirtschaft als Bestandteil des Systems Ernährung – Biodiversität – Klimawandel betrachtet wird.

Das Bundesamt für Landwirtschaft BLW hat im Jahr 2007 zwei Workshops durchgeführt. Im Hinblick auf die Festlegung der Umweltziele Landwirtschaft und auf die Weiterentwicklung des Direktzahlungssystems wurden dabei bereits Grundsatzdiskussionen zum Thema Stickstoff geführt. Zwecks Fortsetzung des Themas hat das Bundesamt für Landwirtschaft BLW in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt BAFU die vorliegende Untersuchung in Auftrag gegeben mit dem Ziel, Forschungslücken zu identifizieren und zu priorisieren. Es sollte eine

Übersicht über den Stand des Wissens geschaffen, die Bedeutung der Prozesse und die aktuellen Forschungen benannt und schliesslich die grössten Forschungslücken bezeichnet werden. Kosten-/Nutzenüberlegungen waren explizit nicht Bestandteil der vorliegenden Studie. Auch die politische Gewichtung der Forschungslücken war nicht Aufgabe für deren Identifizierung. Für die Priorisierung der Forschungslücken wurden folgende Kriterien benutzt:

Bedeutung der Forschungslücken mit Blick auf den Konsens in der Fachwelt, wie die Stickstoffproblematik entschärft werden kann, nämlich durch

- › Stickstoff-Inputs in das System reduzieren
- › Stickstoff-Verluste aus dem System reduzieren
- › Stickstoff-Effizienz steigern
- › Stickstoff-Flüsse immer gesamthaft betrachten

Die Grösse der betroffenen Stickstoffflüsse und deren Unsicherheiten mit Blick auf deren ökologische Bedeutung im Stoffflusssystem Schweiz.

Die Bedeutung der Forschungslücken für Ernährung, Nachhaltigkeit, Klimawandel; die Tragweite der Forschungslücke in Bezug auf die räumlichen Skala und auf die Einbindung der Landwirtschaft in die Gesellschaft.

Im Kapitel 2 sind Vorarbeiten zum Stickstoff zusammengefasst: Im Auftrag des BAFU wurde gleichzeitig eine Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2005 erstellt inklusive Trends seit 1994. Dabei stand das System Landwirtschaft bereits im Vordergrund, weil die grössten Stickstoffflüsse in das System hinein- oder hinausführen oder indirekt damit in Verbindung stehen. In dieser Arbeit sind auch Informationen zu den Unsicherheiten enthalten und ergeben zusammen mit der Information über die Stoffflüsse Implikationen für die Frage nach Forschungslücken. Die Arbeiten an der Stoffflussanalyse stehen kurz vor Abschluss, provisorische Ergebnisse sind in der vorliegenden Studie zusammengefasst. Im Kapitel 3 sind Akteure aufgezählt, mit denen Interviews oder Umfragen durchgeführt wurden, und ihre Forschungsfelder werden charakterisiert. Zusätzlich sind weitere gewichtige und aktuelle Quellen beschrieben, die Informationen zu Forschung und Forschungslücken enthalten. Im Kapitel 4 folgen eine Auswertung der Umfragen und Interviews und eine Aufzählung der genannten Forschungslücken. Im Kapitel 5 werden schliesslich die Ergebnisse bewertet und die wichtigsten Forschungslücken bezeichnet. In einem Epilog wird die Entstehung der vorliegenden Studie kurz beschrieben und Empfehlungen aus der Sicht der Autoren und Experten der Begleitgruppe zuhanden der Auftraggeber gegeben.

2. STICKSTOFF IN DER UMWELT

2.1. STICKSTOFF: VERBINDUNGEN, UMWANDLUNGEN UND KREISLAUF

2.1.1. VERBINDUNGEN UND VORKOMMEN

Der vorliegende Text ist eine Kurzfassung aus der BAFU-Publikation „Stoffflussanalyse Stickstoff Schweiz 2005“ (BAFU 2010). 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 und welche sich in allen Umweltkompartimenten bewegen. (Figur 1). Neben dem unreaktiven Luftstickstoff N_2 finden sich reaktive Stickstoffverbindungen, welche ökologisch relevant sind. In Tabelle 2 sind deren Steckbriefe angegeben.

STICKSTOFFVERBINDUNGEN			
Stickstoff- verbindung	Chem. Eigen- schaften	Hauptquelle / Entstehung	Auswirkungen
N ₂ Luftstickstoff	Gasförmig	78 % der Atemluft	Keine
R-NH ₂ organisch gebundener Stickstoff		Biologische Prozesse	Beim biologischen Abbau von Biomasse in den Gewässern Sauerstoffzehrung
NO _x (NO, NO ₂) Stickoxide (Stick- stoffmonoxid, - dioxid), Peroxy- acetylnitrat PAN	Gasförmig	› Verbrennungsprozesse im motorisierten Verkehr, bei der Erzeugung von Raumwärme und Prozesswärme › NO₂, PAN sind Sekundär-schadstoffe, die durch atmosphärische Reaktionen aus NO entstehen	› Bildung von bodennahem Ozon und weiteren Photo-oxidantien 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/Am- monium(ion)	NH ₃ gasförmig NH ₄ ⁺ wasser- löslich	› Nutztierhaltung in der Landwirtschaft (Umgang mit Wirtschaftsdüngern) › Herstellung und Anwen- dung von Düngemitteln › Abwassereinleitung in Oberflächengewässer	› Versauerung, Eutrophierung der Böden und Ökosysteme › Bildung von sekundären Aerosolen › Fischgift
N ₂ O Lachgas	Gasförmig	› Mikrobielle Umwandlungs- prozesse in Böden und Gewässern (Denitrifikation) › Landwirt. Produktion › Bodenverdichtung › Industrieprozesse	› Starkes Treibhausgas (310 mal stärker als CO₂) › Beitrag zur Zerstörung der stratosphärischen Ozon- schicht (Erhöhung der Haut- krebs- und Mutationsrate)
NO ₃ ⁻ Nitrat(ion)	Wasserlöslich	› Oxidationsprodukt aus Stickstoffoxiden, organi- schen N-Verbindungen und aus NH₃ / NH₄⁺ › Ackerbau › Industrie- und Kommunal- abwässer › Deposition von atmosph. N-Verbindungen	› Belastung von Grund- und Oberflächengewässern › Gesundheitsprobleme bei stark belastetem Trinkwas- ser (Nitrosaminproben) › Eutrophierung von Ökosys- temen › Belastung von Meeres- und Küstenökosystemen
NO ₂ ⁻ Nitrit(ion)	Wasserlöslich, kurzlebig	› Zwischenprodukt bei der Nitrifikation von Ammoni- um zu Nitrat in Böden und Gewässern	› Fischgift

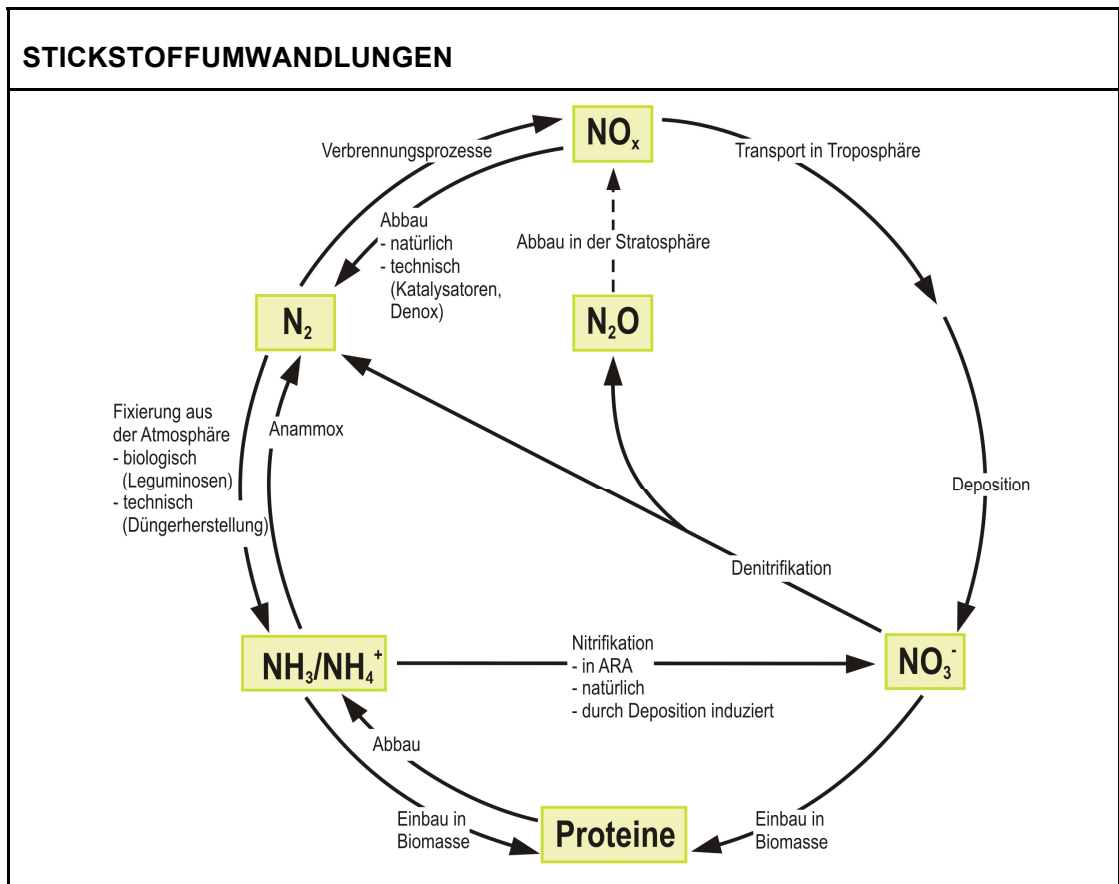
Tabelle 2 Die wichtigsten Stickstoffverbindungen in der Umwelt, ihre Eigenschaften, Quellen und Auswirkungen. Es gibt weitere Verbindungen, die aufgrund ihres geringeren Vorkommens in der Tabelle nicht aufgeführt sind (z. B. Salpetersäure). Neben den in der Tabelle wiedergegebenen Schädwirkungen von 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 (Quelle BAFU 2010).

Die Stickstoffreservoirs der Erde befinden sich in der Atmosphäre, in der Erdkruste, Sedimenten und Böden, in Gewässern und in der Biosphäre. Obwohl die Luft zu vier Fünfteln aus Stickstoff besteht, macht er in der Atmosphäre nur ein knappes Fünftel des auf der Erde vorkommenden Stickstoffs aus (GSK 1993). Der grösste Teil, rund 80 %, befindet sich in Ausgangsgesteinen. Davon ist nur ein kleiner Teil bioverfügbar; rund 90% liegt als schwerlöslicher Bodenstickstoff vor. 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.

Für alle Lebewesen ist Stickstoff ein essenzielles Element, ohne das es kein Leben gibt. 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.

2.1.2. UMWANDLUNGEN UND KREISLAUF

Figur 1 zeigt eine vereinfachte schematische Darstellung der wesentlichen Umwandlungsprozesse im Stickstoffkreislauf. Die für die Landwirtschaft besonders relevanten Prozesse werden im Folgenden erläutert.



Figur 1 Im Kreislauf durchläuft Stickstoff verschiedene Oxidationsstufen in verschiedenen Umweltkompartimenten (Quelle BAFU 2010).

Stickstoff-Fixierung aus der Atmosphäre (biologisch, technisch)

Biologische N-Fixierung: Spezialisierte Mikroorganismen (Bakterien und Blaualgen in Böden und Gewässern) können den reaktionsträgen Luftstickstoff dank des Enzyms Nitrogenase zum Aufbau von körpereigenem Protein 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).

Technische N-Fixierung: Mit Hilfe des Haber-Bosch-Verfahrens wird Luftstickstoff zu Ammoniak synthetisiert und teilweise weiter umgewandelt und als Mineraldünger eingesetzt. Der Prozess verläuft nach der gleichen Bruttoformel wie die biologische N-Fixierung: $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \leftrightarrow 2 \text{NH}_3$. Die Herstellung von Mineraldünger ist sehr energieintensiv: sie verbraucht rund 1 bis 2 Liter Diesel pro Kilogramm Dünger-Stickstoff (FiBL 2009, PG N-Haushalt CH 1996).

Nitrifikation

Nitrifikation ist der Prozess, bei dem Mikroorganismen (Nitrosomas, Nitrobacter) in Böden und Gewässern zur Energiegewinnung Ammonium (NH_4^+) in Nitrit (NO_2^-) und nachfolgend zu Nitrat (NO_3^-) umwandeln. Optimale Bedingungen für diesen Prozess sind relativ hohe pH-Werte, Temperaturen von 25°-35°C, sowie eine hohe Sauerstoff- und Ammoniumversorgung. Die Nitrifikation kann sowohl in natürlichen Systemen (Böden, Gewässer) als auch in 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. Der umgekehrte Prozess, die Reduktion von Nitrat zu Ammonium (Nitratammonifikation) wird ebenfalls von Bakterien bewerkstelligt, ist aber quantitativ von untergeordneter Bedeutung (GSK 1993).

Denitrifikation

Die Denitrifikation ist der Prozess bei dem Nitrat (NO_3^-) von Bakterien in die gasförmigen N-Verbindungen NO, N_2O und N_2 umgewandelt wird. Da dieser Prozess unter anaeroben Bedingungen abläuft, treten Emissionen von Lachgas vor allem in schweren, verdichteten und schlecht drainierten Böden sowie in stau- oder grundwasserbeeinflussten Böden auf (GRUDAF 2009). Zudem findet die Denitrifikation in Abwasserreinigungsanlagen und anaeroben Gewässern (Sedimenten) statt.

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.

Nitrat-Auswaschung und Abschwemmung

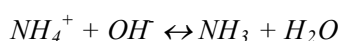
Da Nitrat sehr gut wasserlöslich ist und selten seine gesamte verfügbare Menge im Boden von den Pflanzen aufgenommen wird, wird das überschüssige Nitrat mit den versickernden Nieder-

schlagen ins Grundwasser ausgewaschen und belastet das Trinkwasser. 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 Nitrat aus Böden ins Grundwasser wird beeinflusst durch die Sickerwassermenge, die Art und Dauer des Bodenbewuchses, die Bodenart und -durchlässigkeit (Wasser-Rückhaltevermögen), die biologische Aktivität (N-Fixierung und N-Mineralisierung), die Bodenbearbeitung und Drainage sowie die 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 (GSK 1993, Leu et al. 1986).

Ammoniak-Verflüchtigung

Stickstoffverluste aus Boden erfolgen gemäss folgendem Gleichgewicht:



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 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 Vorgruben.
- › 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).

Einbau in Biomasse

Immobilisierung: Unter Immobilisierung wird die Überführung anorganischer Formen, v.a. Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-) in organische Verbindungen (v.a. Proteine) im Boden verstanden. Die Festlegung erfolgt durch den Einbau von Stickstoff in die Körpersubstanz von Mikroorganismen. Bei einem knappen Stickstoffangebot in der Bodenlösung und einem C:N-Verhältnis grösser 20 in den abzubauenen Humusbestandteilen kann der gesamte, leicht verfügbare Stickstoff für den Stoffwechsel von Mikroorganismen benötigt werden. Somit kommt es 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).

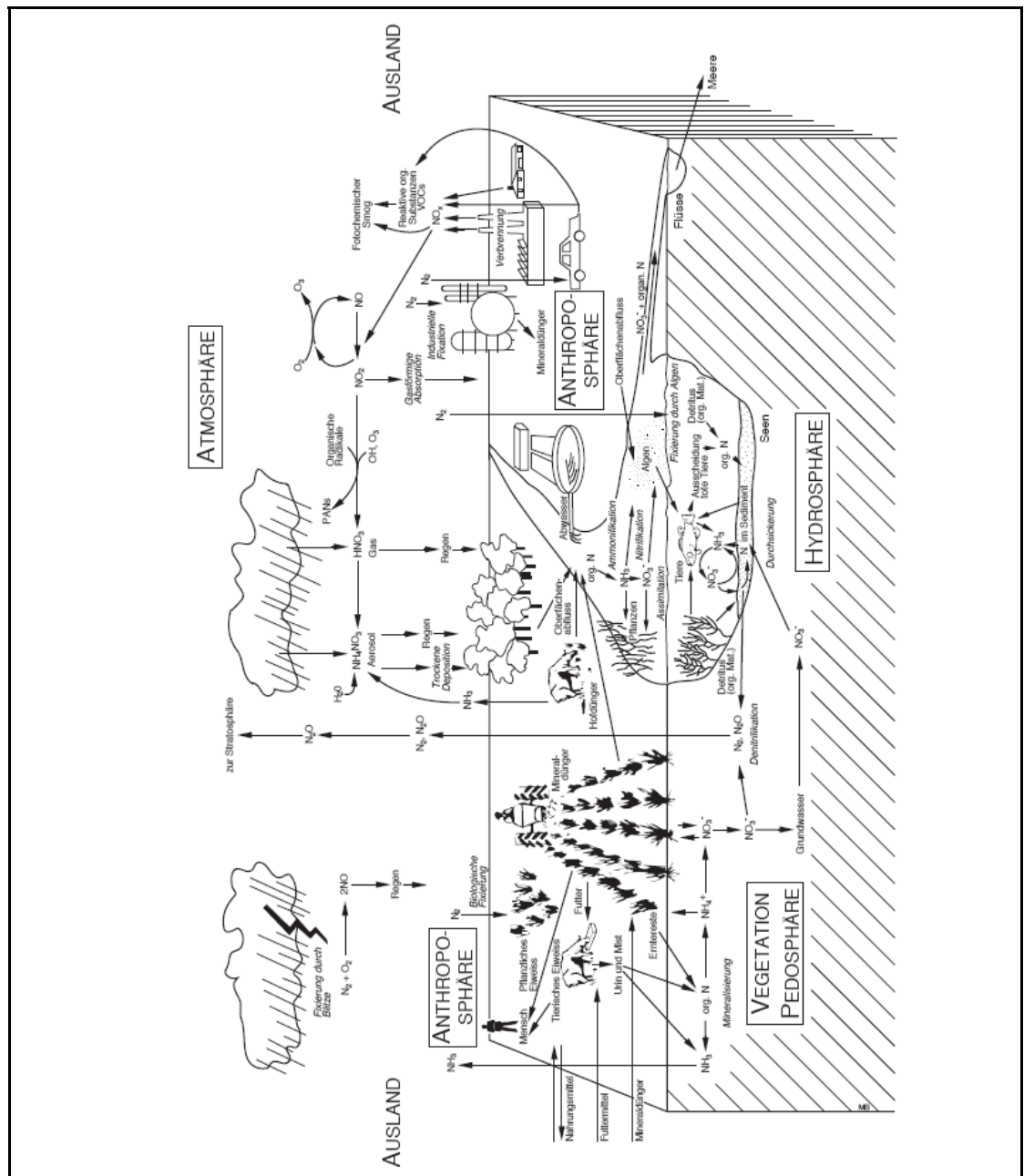
Aufnahme durch Pflanzen (Absorption und Assimilation): Pflanzen nehmen Stickstoff vor allem über die Wurzeln auf, in Form von Nitrat oder Ammonium. Über die Spaltöffnungen der Blätter können auch gasförmige Verbindungen aufgenommen werden (Stickoxide, Ammoniak), ebenfalls ist eine Blattdüngung mit bestimmten N-Verbindungen möglich. Der Hauptteil des Stickstoffs wird für den Aufbau von Eiweissen verwendet; aber auch die Erbsubstanz und viele andere Inhaltsstoffe enthalten Stickstoff (GSK 1993).

Abbau: Humusbildung 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 langsam ablaufenden *Humusabbau (Mineralisierung)* werden die verschiedenen organischen Stickstoffverbindungen des Humus mikrobiell über Zwischenstufen zu Ammonium abgebaut. Dieses kann von Pflanzen und Mikroorganismen zum Aufbau von Körpersubstanz (vor allem Eiweissen) aufgenommen werden. Es kann auch an Tonbestandteile angelagert oder zu Nitrat oxidiert werden. Bei hohem Boden-pH-Wert wird es

zu Ammoniak umgewandelt, welches sich verflüchtigen kann. In der Schweiz werden durchschnittlich ca. 100-200 kg N pro Hektare und Jahr mineralisiert, in anmoorigen Boden aber erheblich mehr (GSK 1993).

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



Figur 2 Vereinfachte Darstellung des Stickstoffkreislaufs in der Natur und der anthropogen beeinflussten Umwelt (nach PG N-Haushalt CH 1996). In den letzten Jahren sind zusätzliche Prozesse (z. B. Vergärung) relevant geworden, die in der Figur nicht enthalten sind.

2.2. STICKSTOFFPROBLEMATIK

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.

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 und Nährstoffe allgemein sehr nachhaltig. (GSK 1993, PG N-Haushalt CH 1996). Nach dem Minimumgesetz von Liebig ist jeweils derjenige Nährstoff wachstumsbestimmend, welcher bei dem von der jeweiligen Pflanze benötigten Mengenverhältnis in der minimalen Menge verfügbar ist. 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 Gesetzmässigkeiten treten alle emittierten Stickstoffformen früher oder später irgendwo als Nitrat auf. Dabei ist der Kreislauf aber nicht etwa beendet, sondern geht insofern weiter als Nitrat unter Sauerstoffausschluss von denitrifizierenden Bakterien wieder zu Lachgas (N_2O) oder elementarem Stickstoff (N_2) reduziert wird.

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. Schlesinger (2009) hat abgeschätzt, dass die anthropogen verursachten Stickstoffeinträge ins globale Landsystem mehr als doppelt so gross sind wie die Einträge in der vorindustriellen Zeit. Die Menschen haben damit in die natürlichen Stickstoffkreisläufe eingegriffen und erhebliche Konzentrationsstörungen in der Umwelt verursacht (EKL 2005). Die Emission von Stickstoffverbindungen wie Ammonium/Ammoniak ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$) Stickoxide (NO_x) 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 ihrem zeitlichen 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.

2.3. REGULIERUNGEN

a) Strategie

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 Departements 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.

b) Nationale Regulierungen

Umweltschutzgesetz (USG, SR 814.01)

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 Gewäs-

serschutzesgesetz 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.

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

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.

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.

Chemikalien-Risikoreduktionsverordnung (ChemRRV, SR 814.81)

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 Naturschutzgebieten, 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).

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

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 trotz vorsorglicher Emissionsbegrenzung übermässige Immissionen verursacht. Weiter gibt die LRV Immissionsgrenzwerte für Stickstoffdioxid vor. Verursachen mehrere Quellen zusammen trotz vorsorglicher Emissionsbegrenzungen übermässige Immissionen (Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte), 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 abstützt. Ein Teil der Massnahmen fällt in die Zuständigkeit des Bundes. Falls die Massnahmen in die Zuständigkeit des Bundes fallen, können die Kantone ihre Massnahmenpläne dem Bundesrat unterbreiten und entsprechende Anträge stellen.

Agrarpolitik 2007/2011: Stickstoffeffizienz, Stickstoffverluste

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:

- › **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 und weil die gemessenen Ammoniak- und Ammoniumkonzentrationen in der Luft und im Niederschlag keine entsprechenden Abnahmen zeigten. Es hat sich herausgestellt, 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 2 % 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 pro Jahr festgelegt. Zum Nitrat wurde kein weiteres Ziel definiert (BLW 2008).

Landwirtschaftsgesetzgebung

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.

Nach dem Grundsatz von Art. 77a richtet der Bund im Rahmen der bewilligten Kredite Beiträge an regionale und branchenspezifische Projekte zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit in der Nutzung natürlicher Ressourcen aus. Beiträge werden der verantwortlichen Trägerschaft gewährt, wenn die im Projekt vorgesehenen Massnahmen aufeinander abgestimmt sind und die Massnahmen voraussichtlich in absehbarer Zeit selbsttragend sind. Die Höhe der Beiträge richtet sich laut Art. 77b nach der ökologischen und agronomischen Wirkung des Projekts, namentlich der Steigerung der Effizienz im Einsatz von Stoffen und Energie. Sie beträgt höchstens 80 Prozent der anrechenbaren Kosten für die Realisierung der Projekte und Massnahmen.

Lebensmittelgesetz

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.

Umweltziele Landwirtschaft

2008 haben das BAFU und das BLW gemeinsame Umweltziele in der Landwirtschaft erarbeitet (BAFU/BLW 2008). Die Umweltziele beruhen auf bestehenden rechtlichen Grundlagen wie Gesetzen, Verordnungen, internationalen Abkommen und Bundesratsbeschlüssen und wurden gemäss wissenschaftlichen Erkenntnissen konkretisiert. Die Umweltziele sind nicht mit zeitlichen Vorgaben versehen, da die Rechtsgrundlagen in der Regel auch nicht terminiert sind. Massnahmen und allfällige Etappenziele sind in den Umweltzielen Landwirtschaft nicht enthalten. Diese werden für die einzelnen Sektoren unter Berücksichtigung des technischen Fortschritts, anderer gesetzter Ziele und der wirtschaftlichen Auswirkungen in den einzelnen Sektoren festgelegt. Der Weg zur Erreichung der Umweltziele ist damit noch offen.

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 75200 t N abgeflossen. Der Anteil aus diffusen Quellen (Landwirtschaft) unterhalb der Seen machte gegen 40 % aus (Prashun und Sieber 2005).

c) Internationale Regulierungen

Genfer Konvention (CLRTAP) / Göteborg-Protokoll

Das gemeinsame Ziel der ratifizierenden Staaten der 1979 in Genf unterzeichnete UN ECE Konvention über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigungen („Convention on Long-range Transboundary Air Pollution“ CLRTAP), 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 2009b).

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 die verschiedenen Schadstoffe fest (UNECE 2009c). Das Göteborg-Protokoll enthält unter anderem das längerfristige Ziel, die Überschreitungen der Critical Loads für Stickstoff- und Säureeinträge schrittweise abzubauen. Die Emissionshöchstmenge 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_x 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 senken, was einer Reduktion um -13 % entspricht.

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

Die Klimakonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change UNFCCC), 1992 in Rio de Janeiro verabschiedet, hat als Ziel die Stabilisierung

der Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau, das eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert. Sie ist 1994 in Kraft getreten. Quantifizierbare Ziele wurden 1997 in Kyoto mit dem Kyoto-Protokoll beschlossen (UNFCCC 2009). 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 senken. Die Schweiz hat sich mit ihrer Ratifizierung 2003 zu einer 8-prozentigen Reduktion verpflichtet (UNFCCC 1997).

OSPAR-Übereinkommen / PARCOM

Das OSPAR-Übereinkommen 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).

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).

Internationale Nordseeschutz-Konferenzen (INK)

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. An der 5. INK in 2002 in Bergen wurde festgestellt, dass die bei Stickstoff durch die verspätete Umsetzung der Richtlinie der Europäischen Gemeinschaft („Nitrat-Richtlinie“) und die regional verzögerte Umsetzung der Richtlinie der EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser die Zielerreichung erheblich hinter der Planung liegt (IAW 2006).

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

Die Unterzeichnerstaaten und die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) 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).

Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB)

Das Übereinkommen der Bodenseeanliegerstaaten (IGKB) 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).

Nitrat-Richtlinie der EU

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

Die Richtlinie schreibt für Mitgliedstaaten eine gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft vor, welche von den Mitgliedstaaten mittels Programmen und Grenzwerten umgesetzt werden soll. Konkret werden die Mitgliedstaaten verpflichtet, den Einsatz von Hofdünger derart einzuschränken, dass der damit verbundene Stickstoffeintrag pro Hektar maximal 170 kg beträgt. Entsprechend der Richtlinie gelten Gewässer als gefährdet, wenn Grundwasser mehr als 50 mg Nitrat/l enthält (Europa 2009).

2.4. STICKSTOFFFLÜSSE SCHWEIZ

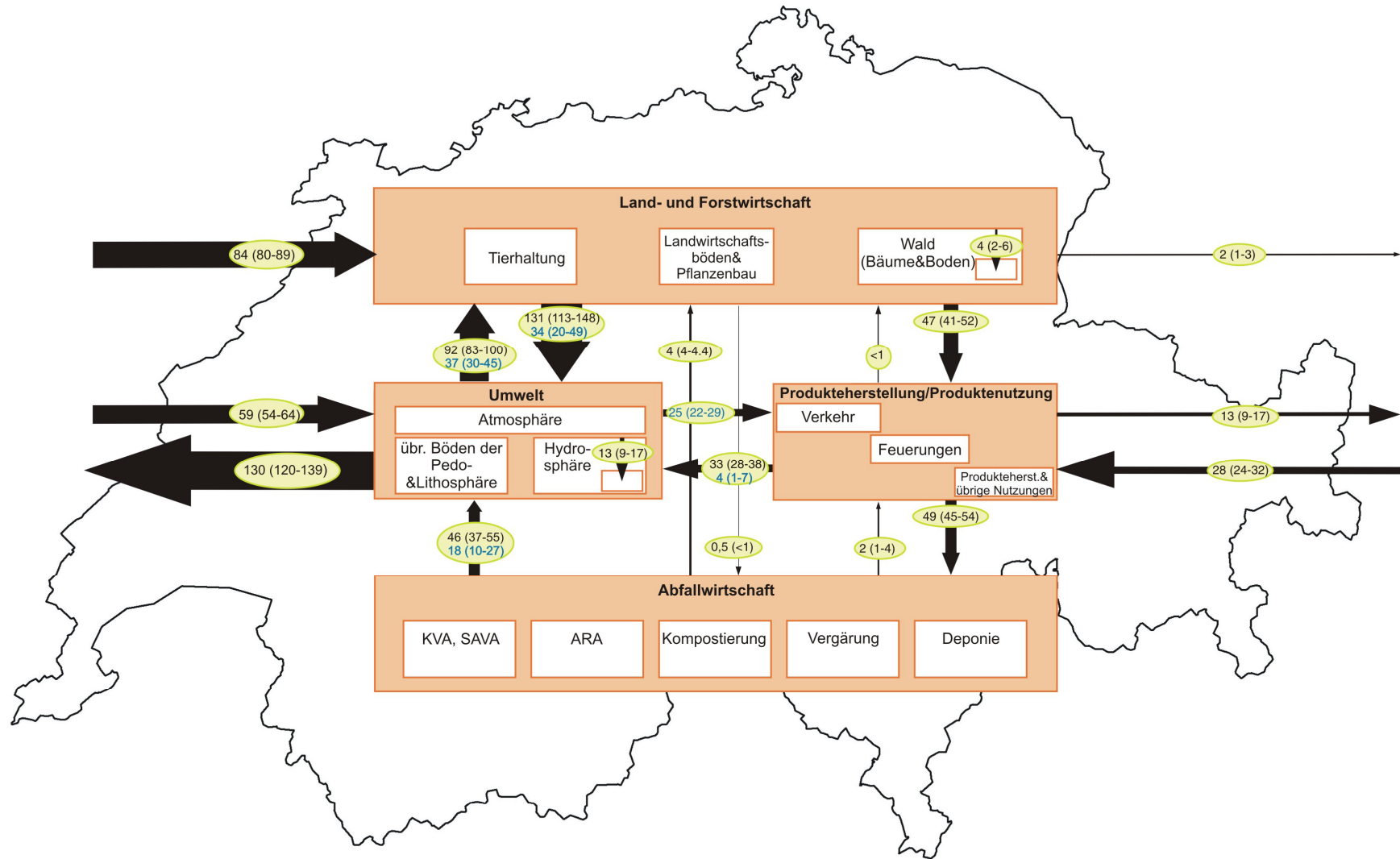
2.4.1. GESAMTSYSTEM

Figur 3 zeigt die Stickstoffflüsse der Schweiz im Jahr 2005 (BAFU 2010). Das Gesamtsystem mit der Systemgrenze Schweiz wird in die vier Subsysteme (farbige Kästchen) *Land- und*

Forstwirtschaft, Produkteherstellung/Produktenutzung, Umwelt und Abfallwirtschaft zerlegt, die jeweils mehrere „Prozesse“ (weisse Kästchen) enthalten. Die Pfeile, die zwischen den Prozessen und dem Ausland fliessen, charakterisieren die Stickstoffflüsse in 1000 Tonnen N pro Jahr (kt N/a) und beziehen sich auf das Jahr 2005. Angegeben sind nur die wichtigsten (grössten) Flüsse. Nicht eingetragen sind u.a. reine Luftstickstoffflüsse, weil diese ökologisch nicht relevant sind.

Auf eine Beschreibung aller Flüsse wird an dieser Stelle verzichtet. Ausnahme bilden einige der grossen Stickstoffflüsse aus dem Subsystem Land- und Forstwirtschaft. Leser und Leserinnen sind gebeten, sich weitere Informationen aus der Originalpublikation zu beschaffen (BAFU 2010).

STICKSTOFFFLÜSSE SCHWEIZ 2005



Figur 3 Stickstoffflüsse Schweiz 2005. Pfeile charakterisieren Stickstoffflüsse mit Zahlen in 1000 Tonnen N pro Jahr (kt N/a). In schwarzer Schrift sind die Gesamtflüsse, in blauer Schrift die Anteile Luftstickstoff angegeben. Quelle BAFU (2010).

2.4.2. STICKSTOFFFLÜSSE DER SCHWEIZERISCHEN LANDWIRTSCHAFT

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.

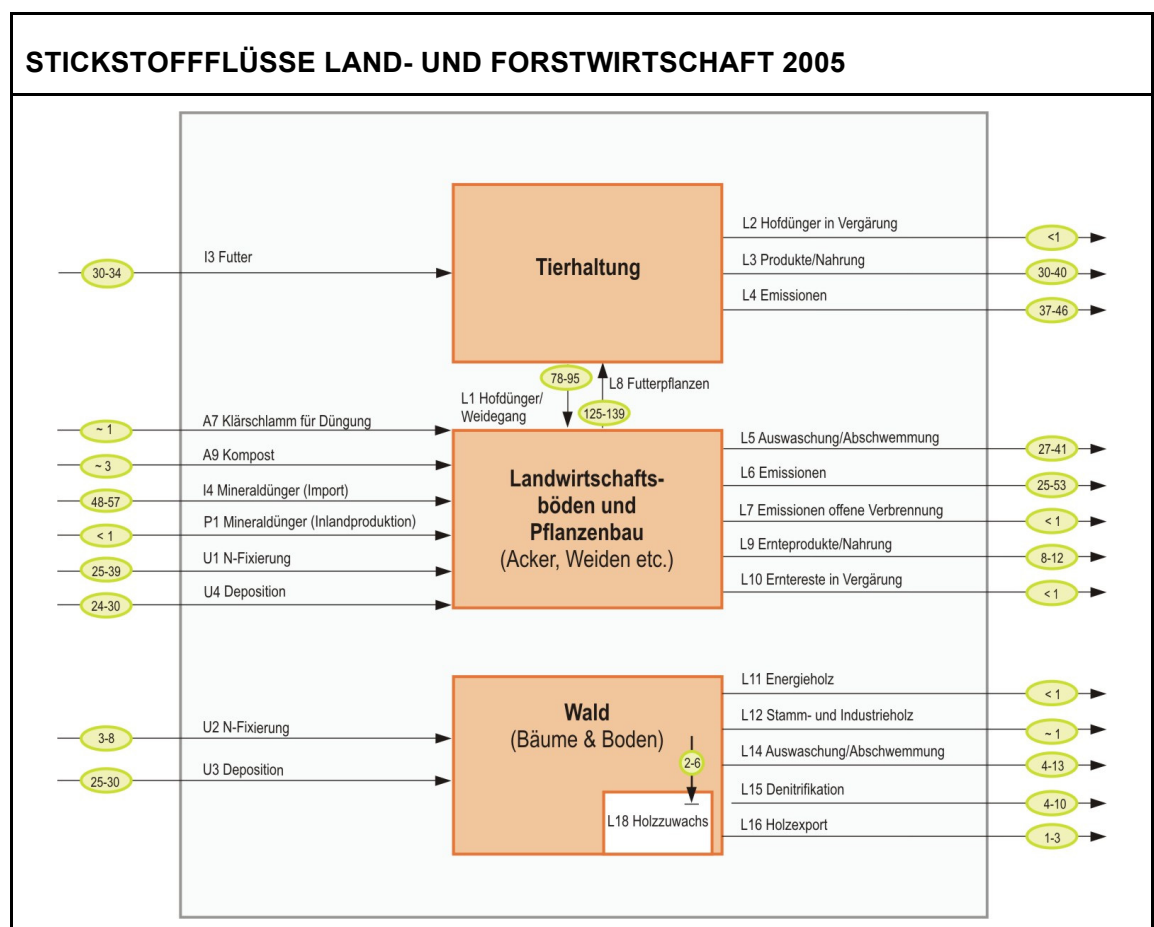
Andererseits werden aus N_2 industriell hergestellte mineralische Stickstoffdünger sowie Hofdünger aus der Tierproduktion in der Landwirtschaft verwendet. Durch die Verwendung von Hofdünger wird Stickstoff intern recycelt, falls die Menge des anfallenden Stickstoffs im Einklang mit dem Bedarf für die Düngung ist. Dies ist besonders dort der Fall, wo die Tierzahl an die verfügbare Fläche gebunden ist.

Im Vergleich zu anderen Sektoren wird heute innerhalb der Landwirtschaft mit der Nahrungsmittelproduktion weitaus am meisten Stickstoff umgesetzt. Ein Teil des Stickstoffs geht aus den landwirtschaftlichen Produktionssystemen verloren und gelangt direkt oder indirekt als N_2 oder Lachgas (N_2O) wieder in die Atmosphäre. Weitere Verlustpfade sind u.a. die Emission von Ammoniak (NH_3) in die Atmosphäre oder die Auswaschung von Nitrat (NO_3^-) ins Grundwasser. Diese Stickstoffverluste nehmen mit der Intensivierung des Stickstoffkreislaufs zu. Unter heutigen Bedingungen gelangen in der Schweiz durchschnittlich nur 25-30 % des Stickstoffs aus Düngern und biologischer Fixierung in pflanzliche und tierische Produkte (N-Effizienz nach OSPAR 2009). Der Rest geht an die Umwelt verloren. 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 wichtigsten Stickstoff Output-Flüsse aus der Land- und Forstwirtschaft entstehen erstens durch die Herstellung von tierischen und pflanzlichen Produkten/Nahrungsmitteln, die ins Subsystem Produkteherstellung/Produktenutzung, in den Prozess "Produkteherstellung und übrige Nutzungen" geführt werden. Dieser Prozess umfasst u.a. Nutzungen von Produkten in Haushalt und Wirtschaft. Dazu gehören z.B. Produktion, Verarbeitung und Konsum von Lebensmitteln, sowie Fleischverarbeitung.

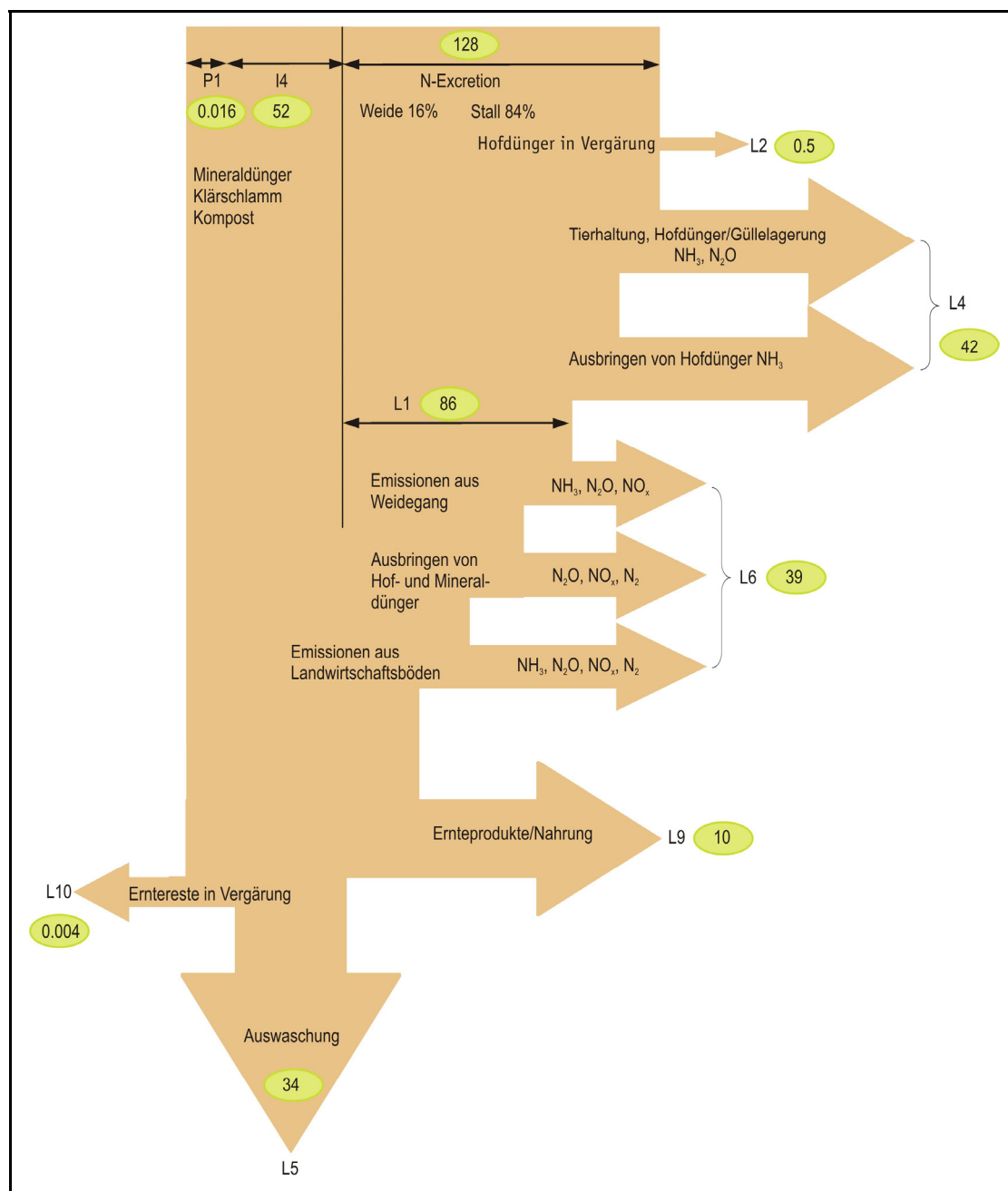
Zweitens entstehen Stickstoffverluste, die im Subsystem "Umwelt" sichtbar werden, z.B. Emissionen in die Atmosphäre und Auswaschung in die Hydrosphäre. Für die Berechnung der

Ammoniakemissionen, die in der folgenden Figur angegeben sind, wurden die neuen Zahlen aus dem Agrammon-Modell verwendet (BAFU 2009). Es ist wichtig, **Figur 4 nicht isoliert, sondern als Teil von Figur 3 zu betrachten**, sonst kann leicht der Eindruck entstehen, es gäbe z.B. zwischen Landwirtschaftsböden und Wald keinen Stickstoffaustausch. Ein solcher erfolgt via Atmosphäre, die aber im Subsystem Umwelt liegt, wie in Figur 3 zu sehen ist. Die Emissionen aus der Tierhaltung (L4) und jene aus den Landwirtschaftsböden (L6) gelangen via Atmosphäre als Deposition in Wald und Landwirtschaftsböden (U3, U4).



Figur 4 Stickstoffflüsse des Subsystems schweizerische Land- und Forstwirtschaft. Zahlen in 1000 Tonnen N/Jahr. Quelle BAFU (2010).

Die Definition der grössten, umweltrelevanten Stoffflüsse des Subsystems Land/Forstwirtschaft folgen bei den Systemgrenzen dem schweizerischen Treibhausgasinventar (FOEN 2010), die ihrerseits auf den Emissionskategorien des IPCC aufbauen (IPCC 1997, 2000). Die folgende Darstellung mag die Definitionen illustrieren.



Figur 5 Illustration Stickstofffluss Landwirtschaft. Inputs bilden (oben) die N-Anteile des Mineraldüngers und die der Tierausscheidung (Werte in kt N für 2005). Die Flüsse L2, L4 etc. korrespondieren den Flüssen in Figur 4.

- › L1 Hofdünger/Weidegang: Organisch gebundener und mineralisierter Stickstoff (NH_3 , NH_4^+ , NO_3^-), der mit Hofdünger in Landwirtschaftsböden gelangt und Eintrag von Stickstoff in Weideflächen durch den Weidegang von Hoftieren (86 kt N, $\pm 10\%$).
- › L3 Produkte/Nahrung: Organisch gebundener Stickstoff in Milch, Eier, Honig etc. sowie Schlachtvieh (35 kt N, $\pm 15\%$).
- › L4 Emissionen: NH_3 , NO_x , N_2O -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_2O -Emissionen – diese sind in Fluss L6 enthalten) die NH_3 -Emissionen aus dem Weidegang der Tiere gehören jedoch nicht dazu. (42 kt N, $\pm 10\%$)
- › L5 Auswaschung/Abschwemmung: Nitrat-Auswaschung und -Abschwemmung aus Landwirtschaftsböden in Grund- und Oberflächengewässer, verursacht durch Einträge von Hofdünger, Mineraldünger, Kompost, Klärschlamm etc. (34 kt N, $\pm 20\%$).
- › L6 Emissionen: NO_x , N_2O , NH_3 -Emissionen aus Landwirtschaftsböden durch Weidegang, Austrag von Hofdünger (hier nur NO_x - und N_2O -Emissionen, ohne NH_3 -Emissionen – diese sind im Fluss L4 enthalten), Mineraldünger, Kompost, Klärschlamm, Ernterückstände, N-fixierenden Pflanzen und organischen Böden sowie indirekte Emissionen (39 kt N, $\pm 36\%$).
- › I4 Mineraldünger (Import): Stickstofffracht im Mineraldünger aus ausländischer Produktion (52 kt N, $\pm 8\%$).
- › U1 N-Fixierung: Fixierung von Luftstickstoff durch landwirtschaftliche Nutzpflanzen (32 kt N, $\pm 22\%$).
- › U4 Deposition: Atmosphärische Deposition von N-Verbindungen (NO_x , NH_y) auf Landwirtschaftsböden (27 kt N, $\pm 10\%$).

Im Wald ist die Deposition ebenfalls hoch (U3 28 kt N, $\pm 10\%$). Die Flüsse N-Fixierung, Auswaschung und Denitrifikation sind zwar nicht so gross, sie sind jedoch mit grossen Unsicherheiten behaftet und deshalb für die Forschung ebenfalls von Bedeutung.

2.4.3. TREIBENDE UND INDUZIERT E STOFFFLÜSSE

- › Die grössten Flüsse finden in und zwischen den Subsystemen Land-/Forstwirtschaft und Umwelt statt. Die Prozesse Tierhaltung, Landwirtschaftsböden/Pflanzenbau, Atmosphäre, Hydrosphäre spielen dabei die wichtigste Rolle.

- › Der Konsum von Nahrungsmitteln, die Importe von Nahrungs- und Futtermitteln, Mineraldünger, fossile Energieträger und deren Verbrennung sowie die Ammoniakverluste aus der Landwirtschaft sind „**treibende**“ Stoffflüsse.
- › „**Induzierte**“ Stoffflüsse sind z.B. Emissionen aus den Böden in die Atmosphäre, Deposition aus der Atmosphäre auf die Böden, Auswaschung und Abschwemmung von Böden in die Hydrosphäre und Abfluss aus der Hydrosphäre ins Ausland.

Die treibenden Flüsse sind im Allgemeinen besser und genauer bekannt als die induzierten Flüsse, entsprechend sind die Unsicherheiten der induzierten Flüsse grösser als bei den treibenden Flüssen.

2.5. IMPLIKATIONEN AUS DER STOFFFLUSSANALYSE FÜR DIE LANDWIRTSCHAFTLICHE FORSCHUNG

Die Stoffflussanalyse zeigt, dass

- › die grössten Stickstoffflüsse in und zwischen den Subsystemen Land/Forstwirtschaft und Umwelt fliessen,
- › wichtige Stoffflüsse, z.B. Nitratauswaschung, noch beträchtliche Unsicherheiten aufweisen, wobei besonders die induzierten Stoffflüsse betroffen sind.

Die heutige Stickstoff-Wirtschaft erzeugt diverse Probleme wie in Kap. 2.2 erwähnt: Hohe Stickstoffverluste und darauffolgend der Verlust an Biodiversität, die sinkende Wasserqualität, "dead zones" bei Meeresmündungen, Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit u.ä.m. Um diese Probleme zu lösen, bedarf es grundsätzlich zweier Stossrichtungen: Erstens einer Reduktion der treibenden Stoffflüsse und zweitens einer Schliessung der Kreisläufe: Bei beiden Stossrichtungen spielt die Landwirtschaft eine dominante Rolle:

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

Solche Eingriffe ins Stickstoffsystem haben aber relevante, gesellschaftliche Folgen. Für die Forschung ergeben sich daraus besondere **Herausforderungen**, und es werden erste **Forschungslücken** sichtbar:

- › Was für Rahmenbedingungen und was für Produktionsformen sind möglich und sinnvoll (im Kontext des europäischen Freihandels und unter optimierter Nutzung der vorhandenen Agrarflächen und unterschiedlicher Bodenqualitäten), um mit geringeren Stickstoff-Inputs die Nahrungsmittelproduktion aufrecht zu erhalten, die Effizienz zu steigern und gleichzeitig die Verluste zu reduzieren?
- › Nochmals dieselbe Frage aber mit dem Zusatz, dass sich wegen des Klimawandels die Produktionsbedingungen rasch ändern und die Voraussage, in welche Richtung diese Änderungen gehen werden, mit grossen Unsicherheiten behaftet sind.
- › Inwiefern wird mit den obigen Fragen die bisherige Position des Bundesrats zur Aufrechterhaltung des Selbstversorgungsgrads¹ tangiert? Wie ist Selbstversorgung unter Berücksichtigung von Futtermittel-, Mineraldünger- und Brenn/Treibstoffimport zu definieren, und welche Szenarien zur Selbstversorgung sind realistisch, auch im Hinblick auf eine reduzierte Verfügbarkeit fossiler Energieträger (peakoil) und unter Berücksichtigung der erwähnten Unsicherheiten?
- › Wie verteilen sich die Stickstoffinputs in die verschiedenen Umweltkompartimente, in welcher Form treten sie dort auf? Wie können die Unsicherheiten verringert werden?

¹ Der aktuelle Bruttoselbstversorgungsgrad beträgt 57% (vgl. Kapitel 5)

3. LANDWIRTSCHAFTLICHE FORSCHUNG: AKTEURE UND FORSCHUNGSFELDER

3.1. UMFRAGE, INTERVIEWS, WEITERE QUELLEN

3.1.1. UMFRAGE

Im Mai und Juni 2009 hat INFRAS in Zusammenarbeit mit zwei Experten (R. Biedermann, C. Stamm, EAWAG) 25 Landwirtschaftsforscherinnen und -forscher im In- und Ausland zur Stickstoffproblematik befragt. Die meisten von ihnen wurden schriftlich befragt, einige im persönlichen Interview (vgl. Kap. 3.1.2).

Die Antworten sind zwischen Juni und August schriftlich in Form eines ausgefüllten Fragebogens eingetroffen. Auch die Antworten aus den Interviews wurden in einem Fragebogen festgehalten. Total wurden 20 Fragebogen ausgewertet. Die Fragebogen waren aufgrund der offenen Fragen und der Literaturverzeichnisse unterschiedlich ausführlich und hatten einen Umfang von 6-12 Seiten. Der Fragebogen setzt sich aus folgenden Teilen zusammen:

Teile A und B Information zum Forschungsgebiet

Fragen zum Forschungsbereich mittels „multiple choice“ Antworten und einem optionalen Textfeld.

Teil C Angaben zu Forschungsergebnissen

Fragen zu den Forschungsschwerpunkten. Dazu haben die Befragten teilweise ausführliche Publikationslisten zu Ihren drei wichtigsten Forschungsschwerpunkten abgegeben (BLW/BAFU 2010). Ebenfalls wurde die Relevanz dieser Forschungsschwerpunkte bezüglich der Problemlösung (Reduktion N-Verluste/ Steigerung N-Effizienz) und der Landwirtschaftspolitik erfragt.

Teil D Forschungslücken

Offene Fragen zum Thema Forschungslücken in der Erforschung von Stickstoffflüssen:

- › Welches sind aktuell die grössten methodischen Herausforderungen?
- › Wo liegen die grössten Verständnislücken der Stickstoffprozesse?
- › Wo sind die grössten Unsicherheiten?
- › Wie weit sind Schweizer Forschungsergebnisse international vergleichbar?

Teil E Handlungsempfehlungen

Offene Fragen zu Handlungsempfehlungen:

- › Wie können Forschungsdefizite am besten behoben werden?
- › Welches sind die Trade-offs, welche die Formulierung von Handlungsempfehlungen erschweren?
- › Welches sind die wichtigsten Empfehlungen zur künftigen Ausrichtung der Landwirtschaftspolitik in Bezug auf den Umgang mit Stickstoff?

3.1.2. INTERVIEWS

Die in Tabelle 4 angegebenen Personen wurden eingeladen, sich zum Stand der Forschung und zu den aus ihrer Sicht aktuellsten Forschungslücken zu äussern. Allen wurde ein Fragebogen zugeschickt, den sie ausfüllten oder zu dem sie in einem Interview Stellung nahmen. Die vollständigen Antworten sind aus Platzgründen in der vorliegenden Studie nicht enthalten (Aufbewahrung beim BLW).

3.1.3. WEITERE QUELLEN

Zusätzlich zu der Umfrage/Interviews wurden weitere Quellen für die Evaluation der Forschung ausgewertet, um eine umfassende Betrachtung des Problembereichs zu gewährleisten: Forschungsliteratur, Literaturreviews und Workshops des BLW zum Thema Stickstoffproblematik und Landwirtschaft. Die Aufzählung folgt der räumlichen Skala von global bis national.

WEITERE QUELLEN		
Titel, Herausgeber	Referenz	Forschungslücken)
Globale Skala		
Climate Change 2007 Synthesis Report on 4th Assessment report, IPCC	IPCC (2007)	Prozesse/ Bewirtschaftung
Weltagrarbericht 2009: A synthesis of the Global and Sub-Global IAASTD Reports, FAO und Weltbank	IAASTD (2009)	Gesamtbetrachtung, Globaler N-Kreislauf, Prozesse/ Bewirt.
World Development Report 2008, Agriculture for Development, World Bank	World Bank (2008)	Gesamtbetrachtung, Prozesse/ Bewirt.
An Earth system perspective of the global nitrogen cycle, Gruber and J. N. Galloway, Nature, 451, 293-296	Gruber et. al (2008)	Globaler N-Kreislauf
The role of organic farming for global food security, J.Kotschi, GAIA 18/3	Kotschi (2009)	Gesamtbetrachtung, Prozesse/ Bewirt.
Reaping the benefits-science and the sustainable intensification of global agriculture	Royal Society (2009)	Gesamtbetrachtung, Globaler N-Kreislauf, Prozesse/ Bewirt.
Do We Have Sufficient Safety Margins in Climate Policy? Andreas Fischlin, GAIA 18/3	Fischlin (2009)	Umgang mit Unsicherheiten
Europäische Skala		
Managing the European Nitrogen Problem, A Proposed Strategy for Integration of European Research on the Multiple Effects of Reactive Nitrogen, UNECE CLRTAP Task Force on Reactive Nitrogen & NinE!	UNECE (2009a)	Globaler N-Kreislauf aus europ. Perspektive, Gesamtbetrachtung
Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen & Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoffminderungsstrategie, UBA Deutschland	UBA (2009a) UBA (2009b)	N-Kreislauf, Prozesse/ Bewirtschaftung, Methodisch
Analytical framework for food security, SDC global programme food security, INFRAS	INFRAS (2009)	Gesamtbetrachtung
Wirtschaft, Wachstum und Umwelt, Schlussbericht, WWF	WWF (2008)	Gesamtbetrachtung
Leitfaden über Techniken zur Vermeidung und Verringerung von Ammoniakemissionen, UNECE	UNECE (2007)	Prozesse/ Bewirtschaftung
Empirical critical loads for N, UNECE expert workshop proceedings, BAFU	BAFU (2002)	Methodisch
Nationale Skala		
Agrarbericht des Bundesamts für Landwirtschaft: Bericht des Bundesrates 2008 und 2004	BLW (2008; 2004)	N-Kreislauf, Prozesse/ Bewirtschaftung
Nahrungsmittelkrise, Rohstoff- und Ressourcenknappheit, Bericht des Bundesrates zum Postulat Stadler	Bundesrat (2009a)	Gesamtbetrachtung, Globaler N-Kreislauf
Luftreinhaltekonzept LRK des Bundesrates	Bundesrat (2009c)	Prozesse/ Bewirtschaftung
1. und 2. N-Workshop, BLW	BLW (2007)	Method., Proz./ Bew.
Möglichkeiten und Grenzen zur Vermeidung landwirtschaftlicher Treibhausgase in der Schweiz, THG 2020	Peter et al. (2009)	Prozesse/ Bewirtschaftung
Analytical framework for food security, SDC, global programme food security, 1st draft report	INFRAS (2009)	Gesamtbetrachtung

Tabelle 3 Übersicht weitere Quellen und geortete Forschungslücken (Bezeichnung gemäss 4. Kap.)

3.2. AKTEURE UND FORSCHUNGSFELDER IN DER SCHWEIZ

Aus der Gilde der Schweizer Landwirtschaftsforschenden wurde eine Auswahl von Experten befragt, welche die aktuellen Forschungsthemen mehr oder weniger repräsentativ abdecken. Um die Legitimation der Aussagen bzw. die Auswahl der Befragten im Kontext der Gesamtschweizer Forschung zu sehen, zeigen die folgenden Tabellen einen Überblick über die Forschungslandschaft Schweiz und die befragten Experten mit den Schwerpunkten ihrer Forschung.

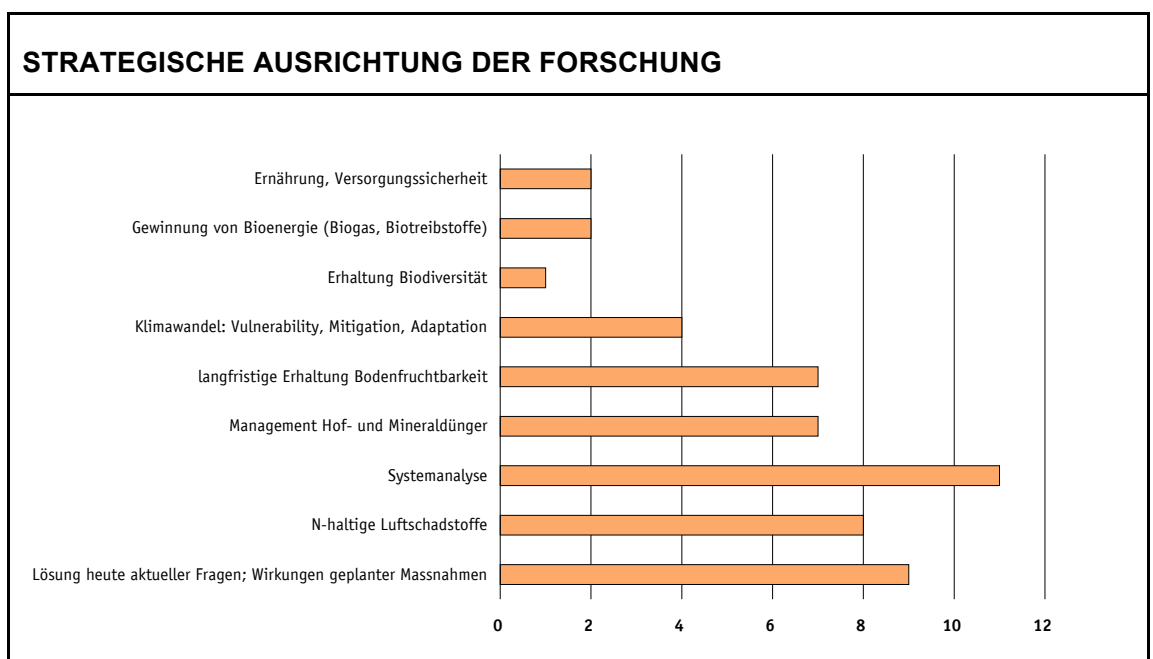
FORSCHUNGSLANDSCHAFT SCHWEIZ - ÜBERSICHT INTERVIEWPARTNER			
Institut	Allgemeines	Name Interview-partner/ Gruppe	Systemgrenzen / Schwerpunkte
ALP	Forschungsanstalt des Bundes (BLW). Vernetzte Forschung „von der Weide auf den Teller“, das heisst vom Futtermittel über die Produktion und Verarbeitung bis zum Lebensmittel.	P. Schlegel	Spezifisch Tierfütterung, Proteinhaushalt von Nutztieren und Optimierung N Input-Output bei Nutztieren
ART	Forschungsanstalt des Bundes (BLW), Forschung für umweltschonende und wettbewerbsfähige Landwirtschaft. Nachhaltige Produktionssysteme Pflanzenbau und Tierhaltung, Ganzheitliche Verbindung von Ökologie, Ökonomie und Agrartechnik	A. Neftel, Lufthygiene/Klima	Lokale bis globale Perspektive, N-Kreisläufe, sämtliche N-Verbindungen, Boden-Luft Interaktionen (NO ₂ und NO ₃), Biosphären-Atmosphären Austausch NH ₃ , Einfluss Klimawandel
		H.-R. Oberholzer, Bodenmikrobiologie	National, Bodenprozesse, Bewirtschaftung Boden, Bodenqualität, Bodenverdichtung
		W. Richner, Gewässerschutz/ Stoffhaushalt	Nationale, Prozesse der Agrikultur, gesamtheitliche N-Flüsse, Boden-Luft Interaktionen, Nitratauswaschung, ökologischer Landbau
		O. Huguenin-Elie	Forschung auf Betriebsebene (Landwirtschaft), N-Effizienz optimierte Produktion von Futterpflanzen, N Fixierung
		M. Keck, Emissionen/ Tierhaltung	Lokal bis national, Schwerpunkt Ammoniakproblematik in der Tierhaltung und Quantifizierung NH ₃ Verluste
		F. X. Stadelmann (Ex ART)	Lokale bis globale Perspektive, ganzheitliche N-Flüsse und Problematik, Evaluation Ökomassnahmen
EAWAG	Wasser- und Gewässerforschung	B. Wehrli	Lokal bis global, Gewässer, sämtliche N-Verbindungen, Klimawandel, Systemanalyse
		U. Bindi (Ex EAWAG)	Aktuell keine Forschung mehr, vollzugsbezogene Lösungen, strategische Überlegungen
ETH-IED	Forschungsbereiche sind Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, Agrarwirtschaft, Umweltpolitik und Umweltökonomie.	S. Peter, Agrar-, Lebensmittel und Umweltökonomie	National, ganzheitlicher Ansatz/Systemanalyse N-Verbindungen, Bioenergie, Klimawandel, Stall und Düngermanagement, Pflanzenbau, ökonomische Aspekte
ETH-IfU	Ein Forschungsbereich des IfU, Grundwasser und Hydromechanik, befasst sich mit Nitratproblematik im Grundwasser	M. Willmann, W. Kinzelbach, F. Stauffer	Lokal bis europäisch. Agronomisch-hydrogeologische Aspekte, Nitrat im Grundwasser, Denitrifikation, Grundwasserschutz
ETH-IPW	Forschungsbereiche sind Pflanzenbiologie, Pflanzenbauwissenschaften und Phytomedizin	A. Oberson, Pflanzenernährung	Kleinräumig, N-Prozesse Boden, Management Hofdünger, N-Fixierung, konventionelle und biologische Kultursysteme
FiBL	Forschungseinrichtungen zur ökologischen Landwirtschaft	P. Mäder, P. Berner,	Lokal bis national, angewandte Forschung der biologischen Landwirt-

FORSCHUNGSLANDSCHAFT SCHWEIZ - ÜBERSICHT INTERVIEWPARTNER			
Institut	Allgemeines	Name Interview-partner/ Gruppe	Systemgrenzen / Schwerpunkte
	im Kontext der Nachhaltigkeit: Interdisziplinär, Zusammenarbeit mit Landwirten & Lebensmittelindustrie, lösungsorientierte Entwicklungsprojekte und rascher Wissenstransfer	U. Niggli, H.U. Die-rauer	schaft, Schwerpunkt Bodenbearbeitung, N-Fixierung, Gründüngung, Auswirkung auf das Klima, Systemanalysen, LCA, Modellierung
IAP	Institut für angewandte Pflanzenbiologie: Forschung im Bereich Wald, critical loads, Eutrophierung, Biodiversität	S. Braun, W. Flücki-ger	National bis Europa, Critical loads, Waldökosysteme und deren Reaktion auf erhöhte N-Einträge, Walddauerbeobachtung
SHL	Fachhochschulinstitution der Land-, Forst- und Lebensmit-telwirtschaft	H. Menzi	Lokal bis National, NH ₃ Emissionen und Modellierung, Umweltauswir-kungen Tierhaltung
SHL	Fachhochschulinstitution der Land-, Forst- und Lebensmit-telwirtschaft	P. Spring	Lokal bis national, Schwerpunkt Steigerung N-Effizienz Schweinemast. NH ₃ und Gesamtstickstoff
ACW	Agroscope Changins-Wädenswil : Forschungsanstalt des Bundes (BLW)		Forschung in den Bereichen Acker- und Futterbau, Obst-, Reb-, Gemü-se- und Zierpflanzenbau sowie Beeren, Arznei- und Gewürzpflanzen
Uni Basel	Departement Umweltwissenschaften		Schwerpunkte in Biodiversität, Beziehung Eutrophierung-Verlust Arten-vielfalt, Einfluss CO ₂ Konzenatration auf Pflanzengesellschaften
Uni Bern	Departement Biologie. Institut für Ökologie und Evolution		Schwerpunkte in Conservation Biology (Biodiversität) und ökologische Schädlingsbekämpfung in der Landwirtschaft (experimentell &praktisch)
Uni Genf	Climatic Change and Climate Impacts		Fragen zum Einfluss des Klimawandels auf Schweizerische Ökosysteme speziell auf den Wasserhaushalt
Uni Neu-enburg	Ecofoc		Zusammenhang Klimawandel und Ökologie
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft:		Nutzung und Schutz von Landschaften und Lebensräumen, Grundlagen für eine nachhaltige Schweizer Umweltpolitik erarbeiten.

Tabelle 4 Übersicht Forschungslandschaft Schweiz und Interviewpartner aus der Schweiz².

² Auf eine Befragung von Personen aus dem Vollzug wurde verzichtet. Bei den Arbeiten zu Klärung des Bedarfs nach Vollzugshilfen des Bundes im Bereich Umweltschutz in der Landwirtschaft wurden Akteure des Vollzugs bereits befragt. Soweit Empfehlungen zur Forschung gemacht wurden, sind sie in der vorliegenden Arbeit enthalten.

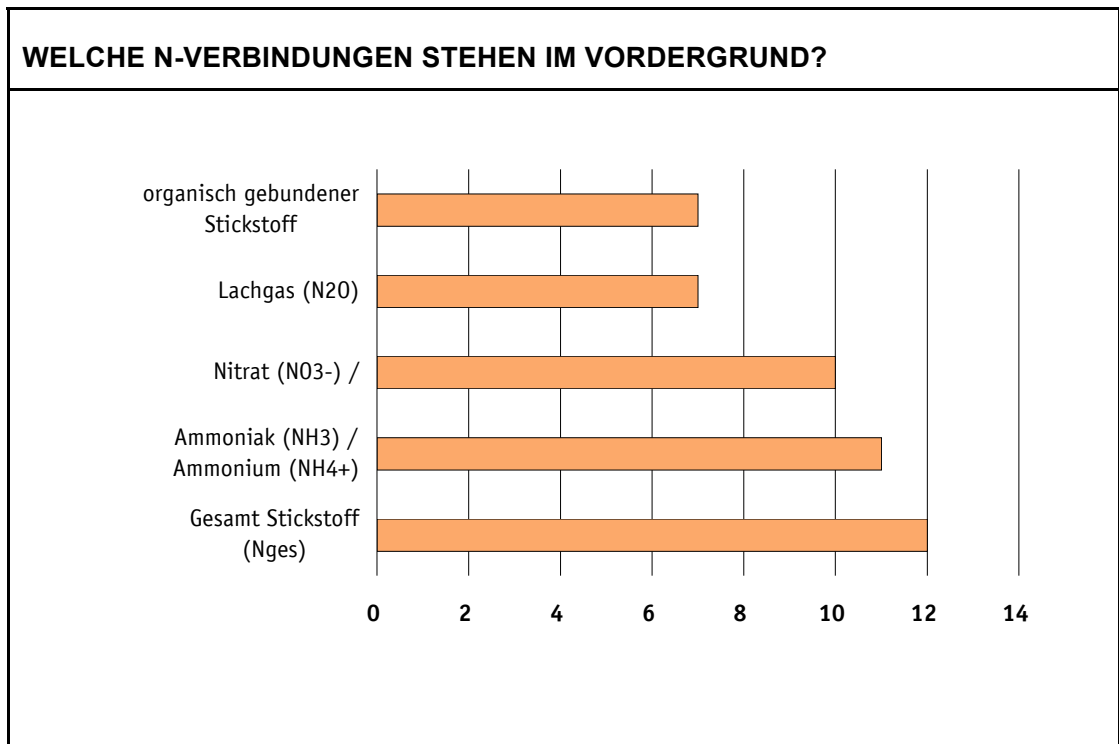
Eine Auswertung des ersten Teils („Multiple Choice“) zu den Forschungsgebieten, ergibt folgendes Bild: Eine Übersicht zur Ausrichtung der strategischen Forschung der Befragten zeigt, dass neben der Systemanalyse schwergewichtig an aktuellen Fragen der Landwirtschaftspraxis (Wirkung von Massnahmen, Bodenfruchtbarkeit, Düngermanagement) geforscht wird. Ebenfalls messen viele Befragte den stickstoffhaltigen Luftschadstoffen eine grosse Bedeutung bei. Etwas weniger oft werden Fragen aus dem Bereich Klimawandel untersucht. Fragen in den Bereichen Ernährung, Bioenergie und vor allem Biodiversität spielen als strategische Ausrichtung eine marginale Rolle.



Figur 6 Auswertung Anzahl Antworten zur strategischen Ausrichtung der Forschung

Bezüglich Systemgrenzen (regional, national, europäisch, global) der Forschungsgebiete ist eine deutliche Abnahme von lokal, national (n=11,9) zu europäisch, global (n=5,4) ersichtlich. Die Befragten konzentrieren sich **schwergewichtig auf schweizerische** Fragestellungen.

Die Prioritäten bezüglich der untersuchten Stickstoffverbindungen waren relativ gleichmässig verteilt, etwas häufiger sind Nitrat, Ammoniak und Gesamtstickstoff genannt worden.



Figur 7 Auswertung Anzahl Antworten zu den N-Verbindungen im Vordergrund der Forschung

Ein noch ausgeglicheneres Bild ergibt sich zu der Frage der Stickstoffumwandlungen. Die 4 zur Auswahl gestellten Umwandlungen „(De)Nitrifikation“, „N-Fixierung“ und „Mineralisierung“ halten sich mit jeweils sieben bzw. acht Antworten in etwa die Waage wobei „Immobilisierung“ etwas weniger oft angekreuzt, respektive im Interview angegeben wurde (n=5).

Bei den Forschungsinhalten zeigt sich, dass unter den Befragten mehr Forschungsaktivitäten im Themenbereich „Tierhaltung/Hofdüngermanagement“ (n=39) als im Frageblock „Pflanzenbau“ (n=26) angekreuzt wurden.

Innerhalb des Frageblocks „Tierhaltung/Hofdüngermanagement“ waren die Antworten gleichmässig verteilt (n=5-7), einzig „Vergärung, Kompostierung“ war mit zwei Antworten untervertreten.

Innerhalb des Frageblocks „Pflanzenbau“ ergab sich ein ausgeglichenes Bild wobei „Bewässerung“ (n=2) und „Züchtung/Zuchtprogramme“ mit einer Antwort untervertreten waren und Bodenfruchtbarkeit (n=7) am häufigsten war.

Im Frageblock „Generelles“ ist das am häufigsten untersuchte Forschungsthema die „Systemanalyse“ (n=8). Mittlere Häufigkeit (n=4-6) haben die Themen „Klimawandel und C/N Kreisläufe“, „agronomisch-hydrogeologische Aspekte“, „Erfolgskontrolle“ und „N-Prozesse in

Atmosphäre“. Selten (n=3) angekreuzt wurden „ökonomische Aspekte“ und „naturnahe Ökosysteme“.

Aus dieser Übersicht ergibt sich, dass die schweizerische Stickstoff-Forschungslandschaft mit den durchgeführten Befragungen ausgewogen repräsentiert werden kann: Praxisorientierte Fragen der Landwirtschaft werden auch aufgrund von Gesetzgebung, Vollzug und Reduktionszielen (Ammoniak, Tierhaltung) vielfältig und praxisbezogen, auf lokaler bis nationaler Ebene untersucht. Weniger intensiv erforscht werden globale Fragen, gesamtheitliche Ansätze und Gesamtkreisläufe sowie der Bezug zum Klimawandel und Food Security.

Zu beachten:

- › Die Themen Biodiversität und Biotreibstoffen wurden nicht befragt.
- › Unter den Interviewpartnern beschäftigen sich zwei (Richner et al., ART und forscher der FiBL) explizit mit Forschungsfragen der biologischen, nachhaltigen Landwirtschaft, während sich die Restlichen mit Fragen im Zusammenhang der konventionellen Landwirtschaft auseinandersetzen.

Zusätzlich wurden selektiv für gewisse Fragestellungen und Themen noch weitere Experten und Publikationen berücksichtigt, vgl. Kapitel 3.1.3)

3.3. FORSCHUNGSFELDER IN EINIGEN EUROPÄISCHEN LÄNDERN

Von den sechs angeschriebenen Experten im Ausland (diese wurden von den Auftraggebern und Experten empfohlen) haben vier einen Fragebogen ausgefüllt. Ausstehend sind die Fragebogen von Brian Kronwag, Dänemark und Karl Richards, Irland. Zusätzlich wurden zwei Experten des UBA anhand des Fragebogens befragt (R. Biedermann). Deren Antworten sind ebenfalls in den Bericht eingeflossen. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die ausländischen Interviewpartner:

ÜBERSICHT AUSLÄNDISCHE INTERVIEWPARTNER		
Name / Gruppe	Institut, Ort, Land	Charakterisierung/ Schwerpunkte
Markus Geupel Wirkungen von Luftverunreinigungen auf terrestrische Ökosysteme FG II 4.3	UBA, Dessau, D	Lokal bis global, integrale Betrachtungsweise: multimediale Strategie zur Minderung der N-Emissionen. Beschreibung und Bewertung des Zustandes der Umwelt mittels Critical Loads und Critical Levels, Entwurf von fachlichen Konzepten, Vorschlag von wirksamen Massnahmen zu Handen der Ministerien.
Oene Oenema Nutrient Management and soil fertility, sect. soil quality	Universität Wageningen, NL	Lokal bis global, sämtliche relevanten Prozesse der Landwirtschaft, gasförmige N-Emissionen und Nitrat- auswaschung, Tierzucht, Gesetzgebung
Jaap Schröder Plant sciences group	Universität Wageningen, NL	Lokal bis global, sämtliche NH ₃ und NO ₃ relevanten Prozesse der Landwirtschaft, Wirkungsanalyse von Massnahmen, Gesetzgebung und Umsetzungsaspek- te in diesem Bereich, Pro's und con's Extensivie- rung/Intensivierung, LCA's mit globalem N Einfluss
Dietrich Schulz Bodennutzung und – bewirtschaftung, Landwirt- schaft FG II 2.8	UBA, Dessau, D	Lokal bis global, integrale Betrachtungsweise: multi- mediale Strategie zur Minderung der N-Emissionen. Beschreibung und Bewertung des Zustandes der Umwelt, Entwurf von fachlichen Konzepten, Vorschlag von wirksamen Massnahmen zu Handen der Ministe- rien.
Mark Sutton Centre for Ecology and Hydrology (CEH)	CEH Edinburgh, UK	Lokal bis Europa, Interaktionen Ammoniakflüsse und Stickstoffflüsse - Klimawandel. Gesamteuropäische Perspektive und integrierter Ansatz. Critical levels NH ₃ , Biodiversität. Verantwortlicher europäisches NinE-Programm
Francoise Vertes Institut national de la re- cherche agronomique	INRA, Bre- tagne, F	Lokale Forschung, Gras-/Kulturland und Milchwirt- schaft (Weidemanagement, Fruchtfolgen), hydrogeo- logische Aspekte, NO ₃

Tabelle 5 Übersicht der befragten ausländischen Interviewpartner

Die befragten ausländischen Experten äusserten sich aus verständlichen Gründen nicht sehr ausführlich zur Schweizer Landwirtschaftspolitik und möglichen Handlungsempfehlungen. For- schungslücken wurden aber bezeichnet. Gerade zur Beurteilung der lokal bis national ausgerich- teten Forschung ist eine europäische Perspektive zum Vergleich sehr wichtig.

4. STAND DER FORSCHUNG UND FORSCHUNGSLÜCKEN

In diesem Kapitel wird eine inhaltlich geordnete und mit Originalaussagen belegte Übersicht zu den Forschungslücken gegeben. Diese stammen aus den in Kapitel 3 beschriebenen Quellen, das heisst es sind Antworten zu Wissens- und Forschungslücken aus Teil D der Umfrage und Interviews sowie Zitate aus den zusätzlich berücksichtigten weiteren Quellen. Textteile in Anführungszeichen sind wörtliche Zitate, Aussagen mit Referenzen in Klammern sind sinngemässe Aussagen von befragten Experten. Die benannten Forschungslücken werden in einem ersten Schritt grob strukturiert in

- › Gesamtbetrachtungen (globale Kreisläufe/Klimawandel, Stickstoffkreislauf/Prozessketten),
- › Forschungslücken methodischer Art
- › spezifische Forschungslücken zu einzelnen Prozessen und Bewirtschaftungsformen.

4.1. WAS IST EINE FORSCHUNGSLÜCKE?

In diesem Bericht wird der Begriff „Forschungslücke“ pragmatisch im Sinne von Wissensdefizit verwendet. Je nach Zielvorstellung kann ein Defizit mehr oder weniger akut sein, sodass Diskrepanzen in der Einschätzung, ob ein solches Defizit nun effektiv eine Forschungslücke sei oder nicht, vorkommen können. In Zweifelsfällen werden in diesem Bericht erwähnte Defizite als Forschungslücken mitgeführt.

4.2. GESAMTBETRACHTUNGEN

4.2.1. GLOBALER STICKSTOFFKREISLAUF – KLIMAWANDEL

a) Problem

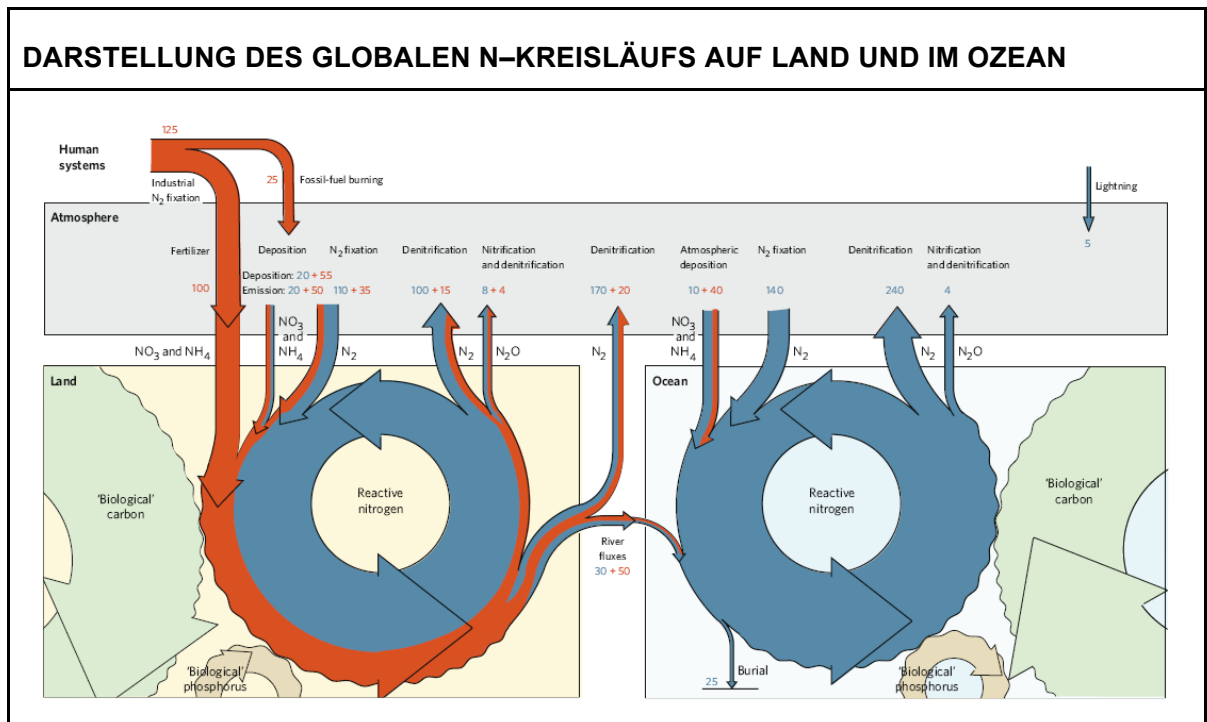
Zitate aus den Quellen zu Wissenslücken, die den Klimawandel betreffen:

- › „Während die Quellen reaktiver N-Verbindungen heute recht gut bekannt sind, bleiben die Senken vorerst rätselhaft“ (Wehrli).
- › „Die sich abzeichnende Klimaänderung wird u.a. auch die N-Flüsse inkl. N-Emissionen in der Landwirtschaft verändern. Diese N-Flüsse gilt es bereits heute zu modellieren mit dem Ziel, rechtzeitig agrarpolitische Strategien zu entwickeln sowie praxistaugliche Empfehlungen und Lenkungsmaßnahmen einzuleiten“ (Stadelmann).
- › „Der Einfluss der klimatischen Variation auf die N-Prozesse ist eine Verständnislücke“ (Keck).

- › Eine Lücke besteht in der Abschätzung der Auswirkung von Klimawandel: Führt er zu einer höheren Mineralisierung?“ (Willmann et. al)
- › „Es ist noch sehr viel unverstanden bezüglich den Interaktionen eines verstärkten Stickstoffkreislaufs mit anderen biogeochemischen Kreisläufen, bspw. C-Kreislauf und dem Zusammenhang mit dem Klimawandel“ (Gruber).

Der Stickstoffkreislauf unterliegt aktuell zwei voneinander abhängigen, globalen Veränderungen:

- › Erhöhung des Eintrags reaktiver N-Verbindungen in die Umwelt erstens wegen der Nahrungsmittelproduktion via Haber-Bosch Prozess zur Gewinnung von Mineraldünger aus atmosphärischem Stickstoff und zweitens durch NO_x-Emissionen aus Verbrennung von Energieträgern, wobei ebenfalls atmosphärischer Stickstoff in reaktive Verbindungen umgewandelt wird. (Das Total der jährlichen anthropogenen N-Fixierung durch diese Prozesse ist höher als die gesamte biologische N-Fixierung auf dem Land oder in den Ozeanen!)
- › Erhöhung des CO₂ - Gehalts in der Atmosphäre und in der Folge davon auch eine Erhöhung von Temperatur und „CO₂ – Düngung“ von Gewässer und Böden, ausgelöst durch global wachsenden fossilen Energieverbrauch.



Figur 8 Der globale N-Prozess an Land (links unten), im Ozean (rechts unten) und der Atmosphäre (oben) und der Zusammenhang mit dem Phosphor und Kohlenstoffkreislauf. In blau unveränderte N-Flüsse, in rot die anthropogen beeinflussten (Gruber et. al 2008)

Die Biosphäre koppelt C- und N-Kreislauf aufs Engste zusammen, wobei N als limitierender Faktor auftritt. Ob der N-Kreislauf auf die zwei Veränderungen mit positivem oder negativem Feedback reagiert, ist **eine der grössten offenen Fragen** mit höchster Relevanz für die Menschheit, ja die gesamte Natur: Ein positiver Feedback verstärkt die Klimaerwärmung wegen reduziertem CO₂-Absorptionsvermögen durch die Biosphäre, ein negativer Feedback vermindert die Klimaerwärmung dank erhöhtem CO₂-Absorptionsvermögens / N-uptake (Gruber et. al 2008). Bisher ist diese Frage für Prozesse auf dem Land (Ausweitung der lokalen Abschätzungen der N-Fixierung und Denitrifikation auf globale Ebene) wenig untersucht und trotz der immensen Relevanz für Zukunftsprognosen in Klimamodellen ausgeklammert. Im Kielwasser dieser „Super-Frage“ öffnen sich zahlreiche Lücken in der Landwirtschaftsforschung.

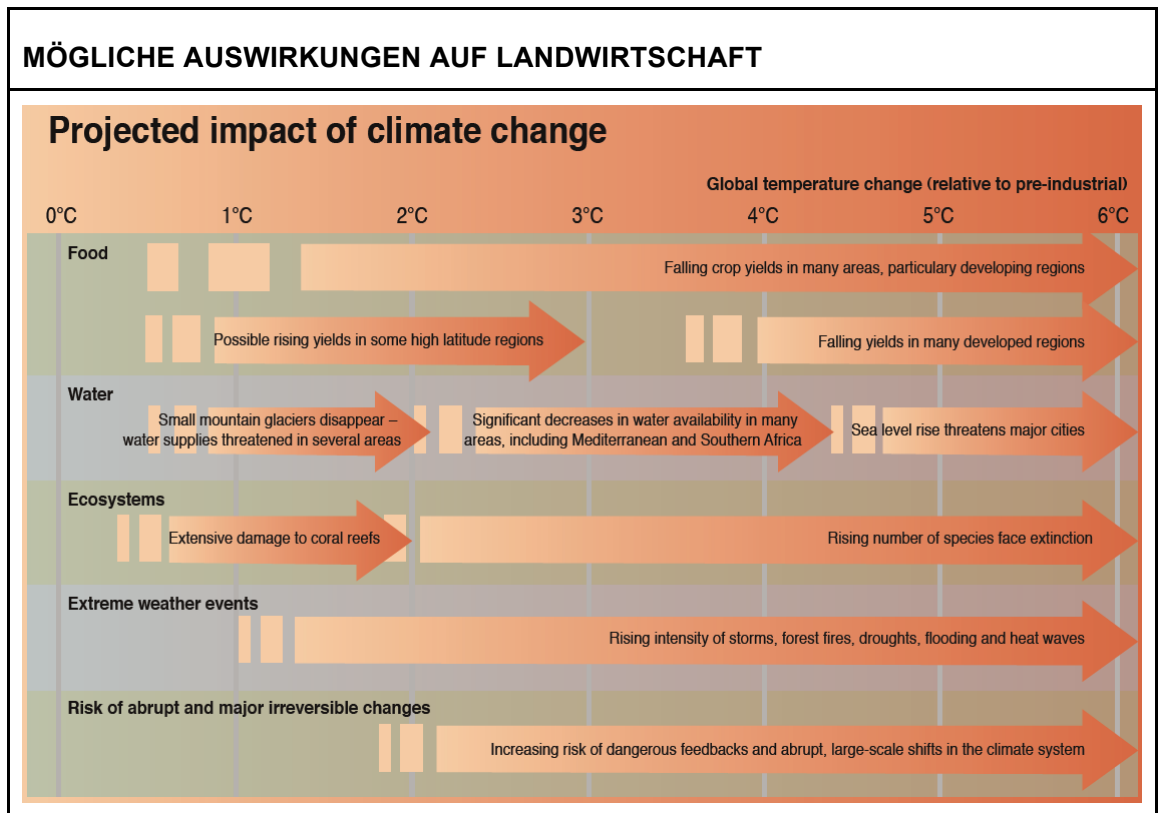
b) Identifizierte Forschungslücken

- › Die Landwirtschaft trägt mit Lachgas- und Stickoxidemissionen selber zur Erhöhung von N-Einträgen und zur Klimaerwärmung bei. Welche Folgen ergeben sich dadurch rückwirkend auf die globale landwirtschaftliche Produktion (vgl. Figur 9)? Was für regionale Unterschiede

de werden relevant, wie sehen die Folgen in der Schweiz mit ihren verschiedenen Klima- und Produktionszonen aus? (Impacts)

- › Reduktionsmassnahmen für N-Verbindungen: Was und wie kann die Landwirtschaft zur verstärkten Bindung von CO₂ aus der Atmosphäre beitragen?
 - › Wie wirken sich Reduktionsstrategien wie z.B. extensive Produktionsformen, „no tillage agriculture“³ auf die Lachgasemissionen und Nitratauswaschung aus (Gruber et al. 2008) und was bedeuten sie für die inländische Nahrungsmittelproduktion und –preise?
 - › Ist eine verstärkte Bildung von Humus anzustreben, der nicht nur als CO₂ Senke wirkt, sondern die auch Speicherkapazität für Wasser erhöht und die Oberflächentemperatur des Bodens senkt?
- › Wie gross ist der Einfluss der unterschiedlichen landwirtschaftlichen Praktiken auf die klimarelevanten N₂O- und NO_x-Emissionen? „Die Klimawirksamkeit ganzer Stallbausysteme, Düngerketten und Anbausysteme ist zu wenig bekannt.“ (Berner, FiBL)

³ no tillage:



Figur 9 Mögliche Auswirkungen auf globaler Ebene abhängig von der tatsächlich eintretenden Klimaerwärmung auf die Landwirtschaft (IAASTD 2008)

4.2.2. STICKSTOFFKREISLAUF - PROZESSKETTEN

a) Problem

Die wissenschaftliche Methode basiert auf dem Reduktionismus: Ein zunächst unbekanntes System wird im ersten Schritt in seine Teile aufgespaltet, weil seine Komplexität eine Untersuchung als Ganzes nicht zulässt. Im zweiten Schritt werden die Teile einzeln untersucht, um deren Funktionsweise zu verstehen. Schliesslich soll im dritten Schritt wieder zum Ganzen zurückgekehrt werden, um die Frage zu beantworten, was die Kombination, Verknüpfung, die Synthese der Einzelfunktionen für das Gesamtsystem bedeutet. J. W. Goethe hat dieses Vorgehen poetisch und in aller Kürze in seinem berühmten Zweizeiler ausgedrückt, siehe auch Kap. 1: *Dich im Unendlichen zu finden - musst unterscheiden, dann verbinden (J.W. Goethe)*

Wegen der Vielfalt der Erscheinungsformen von Stickstoff kommt dem dritten Schritt, der Verknüpfung der einzelnen Prozesse zum ganzen Kreislauf eine besonders wichtige Funktion zu. Fast alle Forschenden haben sich in der Umfrage dazu geäußert und auf die Wichtigkeit des Verständnisses der **gesamten Prozesskette** - der gesamten Stickstoffkaskade - hingewiesen.

b) Identifizierte Forschungslücken

Damit die Prognosen (und damit die getroffenen Massnahmen) verlässlicher werden, sollen die Stickstoffflussmodelle wahrheitsnäher und realistischer werden. In den Interviews wurden speziell erwähnt: Subprozesse Soil organic matter turn-over modelling (Vertes); NO und N₂O Austauschflüsse mit prozessbasierten Modellen (Neftel). Ebenfalls muss das Konzept der Stickstoffkaskade⁴ implementiert werden (Neftel). Für die Modellierung wäre es wichtig, die Streuung der Resultate von Einzelstandorten gebührend berücksichtigen zu können (Sutton, Berner). Die **Weiterentwicklung dieser Stickstoffmodelle** ist ein laufender Prozess, der elementar wichtig ist. Ebenfalls müssen die Modelle laufend **validiert** werden. Dazu braucht es **belastbare Grundlegendaten** zur Verbreitung von Produktionstechnik und Emissionsraten (Richner, Stadelmann). Eine Schwierigkeit besteht in den fehlenden Zeitreihen und falls doch vorhanden, deren Unsicherheit als Basis für die Modellierungen (Menzi).

Durch optimierte Modelle sollen bessere Schätzungen von N-Flüssen als einfach „via eines fixen Prozentsatzes an eingesetztem Stickstoff“ möglich werden (Oberholzer)⁵. Ein ganzheitliches Modell soll danach genutzt werden, um am restriktiven System zu schrauben, ökonomische Auswirkungen zu modellieren. Verschiedene Szenarien sollen durchgespielt werden (bspw. low input/ high output), um so Aufschlüsse über verschiedene Alternativen zu erhalten. Dabei soll es keine Tabus geben, provokative Ansätze können durchaus förderlich sein (Berner).

„Although progress is being made in understanding the individual Nr threats, it is becoming increasingly clear that a holistic research strategy is needed. Such a ‘**full nitrogen approach**’ is important because of the many synergies and antagonisms: fixing one form of reactive Nitrogen pollution often creates another (Sutton, UNECE 2009a)“.

Ausserdem wurde auf folgende Besonderheit des N-Kreislaufs hingewiesen: „Während die Quellen reaktiver N-Verbindungen heute recht gut bekannt sind, bleiben die Senken vorerst rätselhaft (Wehrli). Bei der Erforschung der Senken öffnet sich damit eine weitere Wissenslücke.“

⁴ Ein Molekül Stickstoff auf verschiedenen Ebenen zu verschiedenen Zeitpunkten wirksam. Bspw. zuerst als photochemischer Smog, nach Oxidation in Atmosphäre, Deposition als Salpetersäure, wo es zur Übersäuerung und Eutrophierung beiträgt (Gruber)

⁵ Anspielung bspw. auf die IPCC Methodik Agriculture GHG Inventory

4.3. FORSCHUNGSLÜCKEN METHODISCHER ART

a) Problem

Basierend auf den Antworten zum Thema Forschungslücken, ergaben sich viele Aussagen zu Forschungslücken **methodischer** Art. Die meisten Aussagen dazu stammen aus den beiden Fragen über die „grössten methodischen Herausforderungen“ und den „grössten Unsicherheiten“. Ebenfalls viele Antworten über die „grössten Lücken im Verständnis der Stickstoffprozesse“ enthielten Hinweise zu methodischen Forschungslücken.

Unter „Forschungslücken methodischer Art“ verstehen wir Aussagen über Probleme mit der Quantifizierung einzelner und ganzheitlicher Prozesse. Es besteht die Schwierigkeit, bestimmte N-Flüsse oder Gesamtbilanzen zu messen, von denen man eigentlich die Funktionsweise kennt und das Prozessverständnis hat, aber keine oder zu wenige verlässliche, verifizierte Daten dazu. Einerseits wurden Schwierigkeiten im experimentellen Design für eine Quantifizierung, andererseits auch Hinweise zu entwickelnder oder sich in Entwicklung befindender Messtechnik, genannt. Zu den methodischen Forschungslücken wurden auch Aussagen zur Erfolgskontrolle von Massnahmen sowie Wissenstransfer gezählt.

b) Identifizierte Forschungslücken

Messung ganzheitlicher N-Prozesse, nochmals „Ganzheitliche Systemanalyse“ Stickstoff

Es sollte in einem ganzheitlichen Ansatz, d.h. in einem einzigen Experiment, z.B. Feldversuch, der gesamte N-Umsatz, alle wichtigen N-Prozesse, N-Verluste und N-Flüsse gleichzeitig quantitativ erfasst werden, z.B. Nettoverluste aus der Bilanz des bidirektionalen Austauschs (Stadelmann, Oberholzer).

Die Quantifizierung der Umwandlungsprozesse von reaktivem Stickstoff der in das System gelangt, ist eine grosse Herausforderung. Die Aufteilung zwischen nachfolgenden Prozessen ist ziemlich unsicher: „There remain major challenges to quantify the overall fate of reactive N entering eco-systems, so that the partitioning between processes remains rather uncertain. This is important, if the benefits e.g. for C sequestration, should be estimated“ (Sutton).

Dasselbe gilt auch im kleineren räumlichen Massstab, bspw. für die Erfassung einer gesamten Stickstoffbilanz auf Parzellen- und Betriebsebene (Huguenin-Elie). Es fehlt eine belastbare, im Feld quantifizierte, Datengrundlage, die verallgemeinert werden kann: je nach Tierkategorie, Haltungssystem, klimatische Variation, Funktion, Management (Keck). Die Quantifizierung von N-Flüssen/Verlusten aus Weidesystemen, Nutztieren, Schnittstelle Boden-Pflanzenwurzel (Rhizodeposition, wurzelbürtiger N-Umsatz) und N-Pools im Boden ist eine grosse methodische Herausforderung (Richner).

Stickstoff in Nahrungskettenanalysen zu quantifizieren ist eine methodische Herausforderung (Oenema)

Messung (Quantifizierung) spezifischer Prozesse

Einige Experten haben allgemeine Aussagen zu N-Flüssen gemacht, andere haben Prozesse spezifisch benannt oder als Beispiele in den Aussagen zur Systemanalyse aufgeführt. Zwischen den Forschungslücken im Bereich Stickstoffketten und ganzheitliche Systemanalyse und den hier bezeichneten spezifischen Prozessen, bestehen folglich Überschneidungen. Aufgeführt werden hier nur die am häufigsten, ausdrücklich benannten Prozesse.

- › Nitratauswaschung: Es fehlen quantitative Werte zur Nitratauswaschung (Menzi, Oenema). Eine Quantifizierung der Nitratauswaschung differenziert nach Düngemittel (Peter) und Bodenbearbeitung gibt es ebenfalls nicht (Richner).
- › Lachgas: Es gibt grosse Unsicherheiten bei der Bestimmung der Lachgasemissionskoeffizienten (IULIA) (Peter) und den Quellen und Pathways von N_2O (Oenema).
- › Denitrifikation: Die quantitative Bestimmung des Denitrifikationsverlustes ist sehr schwierig und unsicher (Oenema, Neftel, Sutton, Vertes, Menzi, Stadelmann, Oberholzer).
- › Ammoniak: Die quantitative Bestimmung von NH_3 Verlusten auf Feld - und Stallebene für typisch schweizerische Bedingungen (komplexe Topographie, austauscharme Nächte) ist eine methodische Herausforderung (Neftel). Es fehlen primär Emissionsdaten NH_3 zur Landwirtschaft sowie eine Abschätzung der historischen N-Depositionen (Braun).
- › N_2 Fixierung: eine breitere verlässliche Quantifizierung des N-Inputs über symbiotische N_2 -Fixierung in Gras- und Ackerbausystem ist nötig (Richner). Die N-Zufuhr durch symbiotische N_2 -Fixierung in die gesamte Schweizer Landwirtschaft ist eine Schätzung (Oberson).

Messmethodische Innovationen

Es braucht einfache und kostengünstige Messungen von Spurengasemissionen aus dem System Boden-Pflanze-Dünger und eine Weiterentwicklung von Tracermethoden (Einsatz von stabilen Isotopen) (Richner). Es braucht eine Minimierung des Aufwandes für Emissionsmessungen von Ammoniak (Menzi). Beispielsweise ist eine routinemässige Methodik zur Quantifizierung von NH_3 -Trockendeposition immer noch in weiter Ferne: Es fehlt ein „fast response, open path ammonia analyzer (Sutton).

Umgang mit Unsicherheiten

Die unvermeidbaren Unsicherheiten von wissenschaftlichen Aussagen müssen bei der Interpretation und beim Ziehen von Konsequenzen (Massnahmen) unbedingt berücksichtigt werden. In der im Kapitel 2 zitierten Stoffflussanalyse Stickstoff für die Schweiz wurde der Versuch unternommen, die Unsicherheiten der Stoffflüsse zu quantifizieren. Dabei zeigt sich, dass es bei den N-Flüssen aus dem Subsystem Landwirtschaft wesentliche Unsicherheiten gibt, was sich auch in der Umfrage herausgestellt hat (Menzi, Oenema, Peter).

Erfolgskontrolle Massnahmen

Unabhängige Methoden zur Erfolgskontrolle von Stickstoffminderungsstrategien werden benötigt (Sutton, Oenema). Der Zusammenhang zwischen kleinräumigen, kurzzeitigen Massnahmen und grossräumigen Entwicklungen muss abgeschätzt werden. Systemgrenzen dürfen in der Forschung nicht zu eng gesetzt werden:

“To truly and honestly evaluate the impact of measures taken at lower spatial and temporal scales, in terms of their contribution at higher spatial scales. System analysis is key- system boundaries should not be set at too low scales.” (Schröder). ⁶

Wissenstransfer

Eine methodische Herausforderung liegt in der Gewährleistung des Informationsflusses über verwendete Technologien und deren Tauglichkeit für die gewünschte Steuerung von Stickstoffflüssen von den Anwendern hin zu Forschung und Verwaltung (Vertes)⁷.

Ebenfalls soll sich die Stickstoff-Forschung ihres Auftrages und der Auftraggeber besser bewusst sein, und die Forschungsergebnisse dem eigentlichen Zielpublikum ihrer Arbeit, dem Anwender, verständlich kommunizieren (Schröder).

⁶ Diese Bemerkungen kommen von drei ausländischen Experten. In der Schweiz besitzen wir mit den Immissionsmessungen von NABEL ein relativ unabhängiges Kontrollsystem für die generellen Trends: An zwei Standorten werden seit April 1993 Tagesproben im Rahmen des Programms EMEP (European Monitoring and Evaluation Program) gasförmige und partikuläre Stickstoffkomponenten (N-Komponenten) gemessen. Seit 2005 wird an beiden Standorten kontinuierlich auch spezifisch NH₃ gemessen.

⁷ In der Schweiz wurde für ein neues Modell zur Modellierung von Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft (AGRAMMON) durch die SHL mit Unterstützung des BAFU eine Betriebserhebung (N=3000) zu NH₃ Emissionsrelevanten Parametern unter Schweizer Landwirtschaftsbetrieben gemacht. Es ist geplant diese alle 4-5 Jahre zu wiederholen. Im Rahmen des LBZ (landwirtschaftliche Betriebszählung) führt das BFS eine umfassende (N= 13'000) Bestandsaufnahme der Schweizerischen Landwirtschaft durch, deren Schwerpunkt allerdings in den ökonomischen Parametern liegt. Um den Mehraufwand der Verwaltung und der Landwirte sowie Doppelspurigkeiten zu vermeiden, könnten die nötigen Parameter für Emissionsmodellierungen zukünftig in diesem Rahmen durchgeführt werden. Die Aufgabe der Forschung besteht darin, die zu erfragenden Daten zu definieren und zusammenzutragen (Koordinationsaufgabe BAFU-BLW-BFS).

4.4. FORSCHUNGSLÜCKEN PROZESSE UND BEWIRTSCHAFTUNG

a) Problem

Im Gegensatz zu den Forschungslücken methodischer Art, geht es hierbei um Forschungslücken im grundlegenden Verständnis der Prozesse und der Bewirtschaftungsformen. Die Antworten waren nicht immer eindeutig den methodischen Forschungslücken (Kap. 4.3.) oder den Prozessen / Bewirtschaftung zuzuordnen. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel nur einzelne Prozesse aufgeführt. Lücken, die das Verständnis des gesamten Stickstoffkreislaufs und dessen Zusammenhänge betreffen, wurden oft bereits im Kapitel 4.2.1. und 4.3. aufgeführt.

Die meisten der nachfolgend aufgeführten Aussagen stammen aus der Frage über die „grössten Lücken im Verständnis der Stickstoffprozesse“.

b) Identifizierte Forschungslücken

Verständnislücken N-Bodenprozesse allgemein

Im Bereich der Stickstoff-Umsatzprozesse im Boden scheinen viele Forschungs- und Verständnislücken zu bestehen. Um diese Umsatzprozesse besser agronomisch zu steuern (bspw. durch geeignete Bewirtschaftungsmassnahmen) und damit die Emissionen zu minimieren, bedarf es vermehrter Kenntnisse bezüglich der N-Pools und der zeitlich und räumlich gebildeten N-Verbindungen im Boden. (Stadelmann, Richner, Vertes). Neue N-Umwandlungsreaktionen sind in ihrer Tragweite in der Umwelt noch wenig verstanden, bspw. Anammox⁸ (Wehrli).

„Die Dynamik des organischen N-Pools und seiner Komponenten ist noch zu wenig verstanden“ (Wehrli).

Verständnislücken werden auch in den vielfältigen Zusammenhängen zwischen Bewirtschaftungsform (Rotation Gras/Nutzpflanzen) und Düngung geortet (“soil organic matter turnover in grass/crop rotations receiving animal returns/manures”, Vertes). Langfristige Daten dazu fehlen, die temporären Veränderungen der N-Gehalte des Bodens sind mehrheitlich unbekannt, geeignete Indikatoren fehlen (Oberson). Die Entwicklung der Humusgehalte ist unverstanden (Richner), eine Abschätzung historischer N-Depositionen (Braun) und Daten über die Bruttomineralisierung und Immobilisierung im Boden (Oberson) fehlen.

⁸ Anammox: Anaerobe Ammoniumoxidation, bei der Ammonium (NH_4^+) mit Nitrit (NO_2^-) unter anaeroben Bedingungen zu molekularem Stickstoff (N_2) umgesetzt: $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Verständnislücken N-Bodenprozesse spezifisch

Im Verständnis der N-Flüsse an der Schnittstelle Boden-Atmosphäre (biologische N₂-Fixierung, Denitrifikation etc.) besteht eine der grössten Verständnislücken (Richner). S. Braun ortet ebenfalls eine Verständnislücke bei der Denitrifikation (Braun). Die umweltneutralen N₂-Emissionen lassen sich nur indirekt⁹ ermitteln (Peter). Auch die Bestimmung der Nitratverluste/-auswaschung in Abhängigkeit der Kulturfolge und in Abhängigkeit unterschiedlicher Anteile Hof- und Mineraldünger (Peter) sind nur ungenau bekannt. Für den Wald sind die Mechanismen zur Auswaschung von Nitrat am wenigsten verstanden (Braun). Das Nitrifikationspotential ist schwer zu bestimmen (Willmann et al.).

N-Effizienz

Es besteht eine Forschungslücke bezüglich N-Effizienz. Die Einflussfaktoren (Produktions- und Anbausystem, Düngermanagement, Kulturpflanzen, Umweltbedingungen)¹⁰ sind zuwenig verstanden (Menzi, Oberson).

N₂O

Die grössten Wissenslücken bestehen in der Lachgasentstehung (Willmann et. al).

Düngung

Im Bereich Düngung werden von verschiedener Seite Forschungslücken geortet. Nötig ist es, die ganze N-Flusskette anzusehen, in der die Hofdünger im weiteren Sinne eine Schlüsselstellung einnehmen (Stadelmann, Richner).

Konkret erwähnt wird die Verteilung von Dünger (organischer und mineralischer) nach der Ausbringung im Boden (Neftel).

Auch die Relevanz der einzelnen Prozesse in den ganzen Stall-, Dünge- und Anbausystemen ist zuwenig bekannt. (Berner).

Über das Schicksal des gedüngten, aber nicht direkt wirksamen, im Boden verbleibenden Stickstoffs ist zu wenig bekannt. (Berner, FiBL). Die Source-Receptor Beziehung von NH₃ auf „landscape“-Ebene (10 km²) ist unbekannt (Neftel).

Das Verständnis über Langzeiteffekte in Verbindung mit Bewirtschaftungsformen ist ebenfalls lückenhaft (Vertes).

⁹ d.h. als Differenz zwischen dem NVP und den umweltrelevanten N-Verluste. Für beide Grössen gibt es Berechnungsmethoden

¹⁰ Bemerkung: (Die NUE von 60% des Hofdünger-N ist im internationalen Vergleich eher hoch angesetzt)

Bodenbewirtschaftung

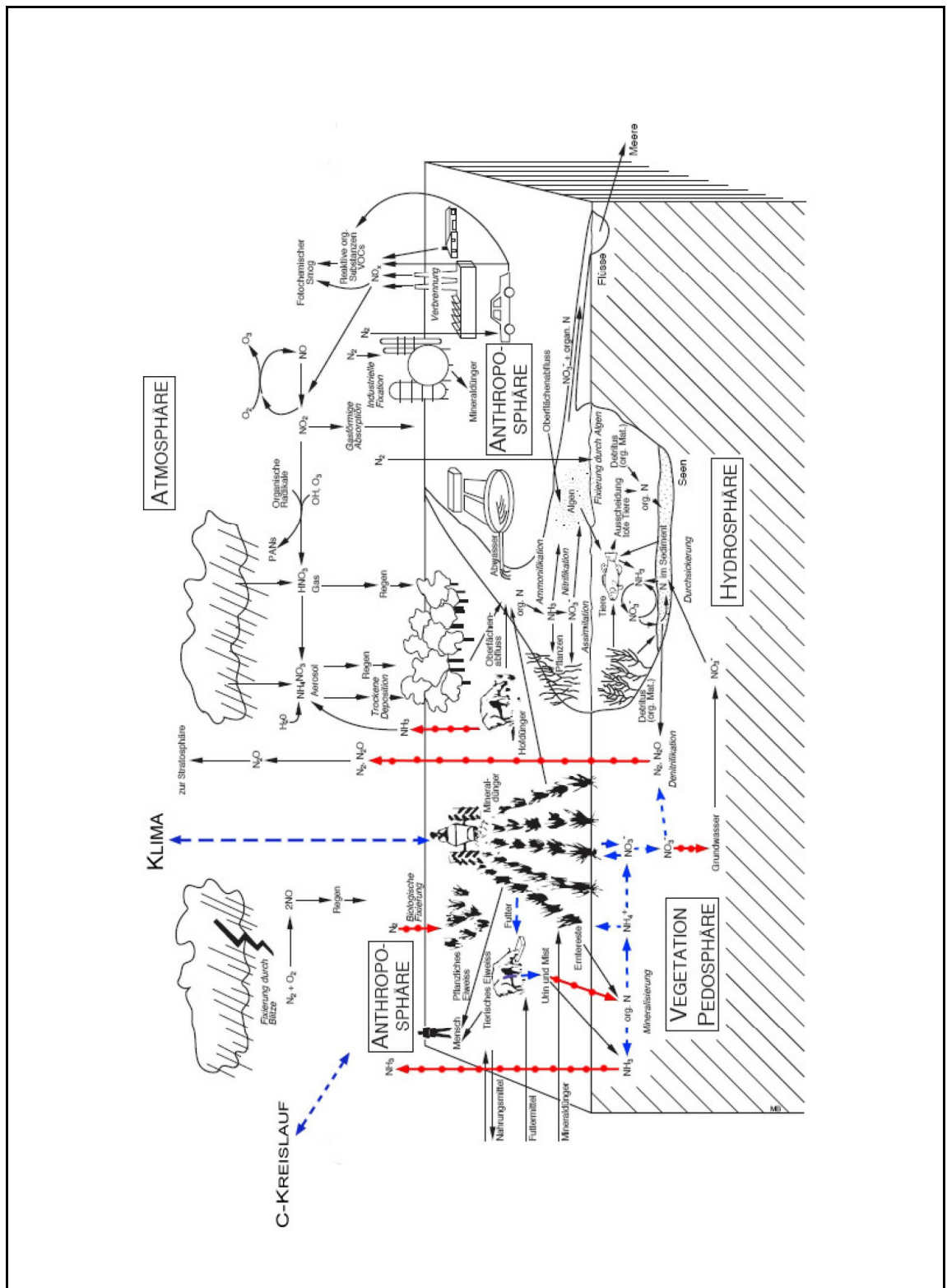
Die N Fixierungsleistung in Abhängigkeit der botanischen Zusammensetzung der angepflanzten Futterpflanzen sowie die dadurch optimierte Produktion von hochwertigem Futter ist zuwenig bekannt (Huguenin-Elie).

Haltungssysteme

Es gibt eine Verständnislücke in den Unterschieden bezüglich der N- Emissionen der verschiedenen Haltungssysteme der Schweiz und den verschiedenen Verfahrensschritten Fütterung, Stall, Weide, Lager (Keck).

Fütterungsmassnahmen

Die Auswirkung von anderen Fütterungsmassnahmen (als die Reduktion des Proteineinsatzes), beispielsweise einer Modifikation der Eigenschaften (z.B. pH), auf die Stickstoffflüsse sind höchstens kurzfristig im Stallsystem einigermaßen beschrieben. Deren Einfluss auf das ganze System ist weitgehend ungeklärt (Spring).



Figur 10 Vereinfachte Übersicht der Stickstoffflüsse (Figur 2). In **rot (gepunktet)** sind diejenigen deren Quantifizierung als Forschungslücke bezeichnet wurde (Kap. 4.3.) eingezeichnet, in **blau (gestrichelt)** jene, für welche im Prozessverständnis noch Forschungslücken bestehen (Kap. 4.4).

4.5. KONTRAPUNKT

Einzelne Befragte betonen, dass zwar noch Forschungslücken bestehen, dass wir aber im Grunde genug wissen, um das Grundproblem beim Stickstoff mit geeigneten Massnahmen zu entschärfen.

4.6. FORSCHUNGSLÜCKEN AUS WEITEREN QUELLEN

4.6.1. STICKSTOFFKREISLAUF/-STOFFFLÜSSE

a) N-Problematik gesamthaft, Bilanzen, Stoffflussanalysen

Im Kap. 2.2 wird auf die Stickstoffproblematik hingewiesen, die aus den anthropogenen Emissionen reaktiver Stickstoffverbindungen in Luft, Boden und Wasser entsteht. Diese führen zu unerwünschten Konzentrationsstörungen mit den bekannten negativen Folgen. Ein zuverlässiges Mass zur Bestimmung unerwünschter Änderungen ist die Bilanzierung der landwirtschaftlichen N-Flüsse nach der OSPAR-Methode, mit der N-Verluste und N-Effizienz berechnet werden können. Im Agrarbericht des Bundesamts für Landwirtschaft ist die OSPAR-Bilanz für die Schweiz dargestellt (BLW 2008). In den letzten Jahren schwankte die N-Effizienz zwischen 25% und 30%, die übrigen 70% bis 75% sind Verluste in Form von Ammoniak (>35 kt), Nitrat (>30 kt) und Lachgas (>5 kt).

Gemäss dem Agrarbericht sind die Anstrengungen um eine Verbesserung der N-Effizienz notwendig; eine integrale Betrachtungsweise ist essentiell, um nicht bloss eine Verlagerung von N-Verlustpfaden zu bewirken. Zahlreiche Fragen bleiben aber unbeantwortet; relevante Prozesse bei denen Forschungslücken bestehen, sind etwa folgende: die Fütterung der Tiere, das Stallsystem, die Reinigung der Oberflächen, die Art der Mist- und Gülleproduktion, die Nährstoffausscheidungsrate der Tiere, die Aufbereitung der Hofdünger wie Verdünnung, Vergärung, Kompostierung etc., die Ausbringtechnik der Dünger, die Kulturenwahl, die Bodenbearbeitung und die Art der futterbaulichen Nutzung, das Weidemanagement, der Humusauf- und -abbau im Boden.

Die N-Problematik ist nicht nur in der Schweiz ein Thema, sondern in ganz Europa. Sie wurde in einem vielbeachteten und oft zitierten Artikel von James Galloway et al. unter dem Begriff der „Stickstoffkaskade“ beschrieben (Galloway 2003). In einem Folgeartikel wurde von Galloways Gruppe für jeden Kontinent eine Stoffflussanalyse Stickstoff erstellt (Galloway 2004). Jüngst wurden von Schlesinger auch die globalen N-Flüsse quantifiziert, und zwar getrennt nach vorindustriellen und heutigen anthropogenen Flüssen. Letztere sind inzwischen partiell gleich gross wie die vorindustriellen, nämlich je ca. 125 Tg N pro Jahr (Schlesinger 2009).

Global hat sich demnach die Produktion reaktiver Stickstoffverbindungen durch Aktivitäten der Menschen im letzten Jahrhundert mehr als verdoppelt.

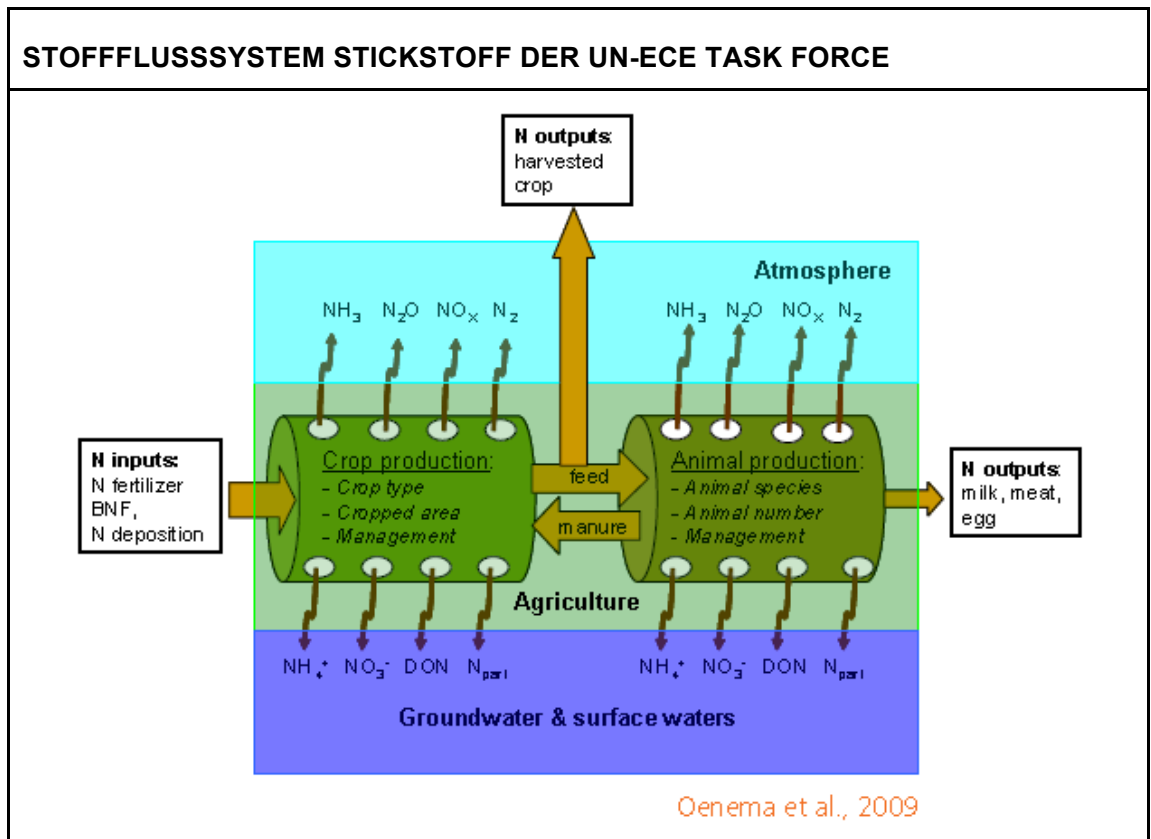
Die UNO-Kommission für Europa UN-ECE hat sich sogar des Themas angenommen und hat auf Basis ratifizierter internationaler Abkommen (UN Millenium development goals, Göteborger Protokoll, UNFCCC, UN Convention on Biological diversity, etc) eine integrierte, europäische Forschungsstrategie zu den multiplen Effekten von reaktiven Stickstoff vorgeschlagen: **Managing the European Nitrogen Problem, A Proposed Strategy for Integration of European Research on the Multiple Effects of Reactive Nitrogen** (UNECE TFRN Task Force on Reactive Nitrogen & NinE, UNECE 2009a). Zielpublikum sind die europäische Forschungs- und Landwirtschaftspolitik sowie die Forschungsgesellschaften. Am Anfang der Strategie steht die Forderung: „Although progress is being made in understanding the individual nitrogen threats, it is becoming increasingly clear that a holistic research strategy is needed. Such a ‘full nitrogen approach’ is important because of the many synergies and antagonisms: fixing one form of reactive nitrogen pollution often creates another”. Ziel der Strategie ist eine bedeutende Reduktion der Stickstoffemissionen, eine Steigerung der N-Effizienz in der Landwirtschaft (um 50% gegenüber heutigem Niveau) und eine Verringerung der Unsicherheiten von Schlüsselparametern der N-Modellierung. Damit liegen die Ziele der Strategie in derselben Richtung wie in der Schweiz. Sieben europäische Forschungsschwerpunkte werden priorisiert, inkl. Vorschläge zu Konzepten und Kosten. Die Schwerpunkte seien an dieser Stelle kurz genannt, 6 und 7 sind direkt mit den landwirtschaftlichen N-Flüssen verknüpft und greifen genau die Themen der vorliegenden Studie auf:

Die 7 Forschungsschwerpunkte der UNECE Task Force on Reactive Nitrogen (TFRN) und des Programms Nitrogen in Europe (NinE)

- › Project Concept 1: Integrating the biospheric and atmospheric effects of nitrogen on global radiative balance. *In support of FCCC and CLRTAP. Large collaborative project: €8M, 2011-2014.* (Übersetzung: Integration der biosphärischen und atmosphärischen Effekte von Stickstoff auf die globale Strahlungsbilanz)
- › Project Concept 2: Developing new approaches to quantify and minimize the impacts of atmospheric nitrogen deposition on European habitats. *In support of CBD, CLRTAP, Habitats Directive, Water Framework Directive and EU policies on soils and eutrophication).* (Medium-sized collaborative project €5M, 2011-2014. (Übersetzung: Entwicklung neuer Ansätze zur Quantifizierung und Minimierung des Einflusses von atmosphärischer Stickstoffdeposition auf europäische Habitate.)
- › Project Concept 3: Quantifying the multiple roles of atmospheric chemistry on European impacts of reactive nitrogen. *In support of the CLRTAP, FCCC and CBD. Large collaborative*

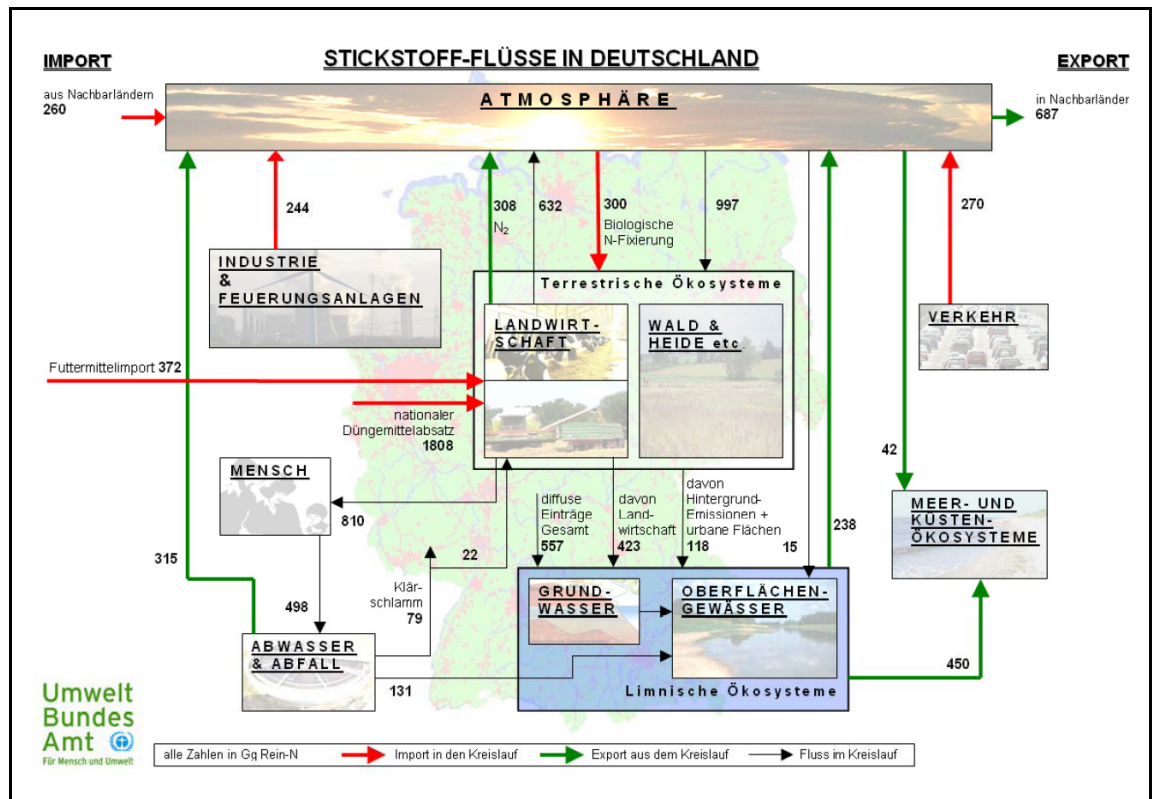
project: €6M, 2012-2015. (Übersetzung: Quantifizierung der multiplen Rollen der Atmosphärenchemie auf den Stickstoffeintrag in Europa)

- › Project Concept 4: Integrating the role of nitrogen in catchment, coastal and marine eutrophication. *In support of Nitrates Directive, WFD, Water and Marine Conventions.) (Large collaborative project: €8M, 2012-2015. (Übersetzung: Erfassen der Funktionen des Stickstoffs bei der Eutrophierung von Einzugsgebieten, Küsten- und maritimen Ökosystemen)*
- › Project Concept 5: Integrating the consequences of EU and international policies on nitrogen-related impacts in European landscapes as a basis to develop locally optimized solutions. *In support of FCCC, CLRTAP, CBD, WFD, CAP and EU policies on soils and eutrophication. Large collaborative project ca. €9M, 2013-2016. (Übersetzung: Auswirkungen der europäischen und internationalen N-Politik für die europäischen Ökosysteme als Basis für die Optimierung lokaler Lösungen)*
- › Project Concept 6: Understanding nitrogen flows and emissions in the food production and consumption chain of Europe. *In support of FCCC, CLRTAP, CBD, WFD, CAP and EU policies on soils and eutrophication. Large collaborative project ca. €5M, 2012-2015. (Übersetzung: Verständnis der Stickstoffflüsse und –emissionen in der Nahrungsmittelproduktion und Verbraucherkette Europas.)*
- › Project Concept 7: Managing the European nitrogen cycle to increase nitrogen use efficiency by 50%. *In support of FCCC, CLRTAP, CBD, WFD, CAP and EU policies on soils and eutrophication. Large collaborative project ca. €8M, 2013-2016. (Übersetzung: Erhöhung der Stickstoffeffizienz um 50% im europäischen Stickstoffkreislauf.)*



Figur 11 Quelle: UNECE 2009a

In unserem Nachbarland Deutschland wird die N-Problematik ähnlich aufgefasst. Die „Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen“ des Umweltbundesamts (UBA 2009b) enthält eine Stoffflussanalyse Deutschlands (siehe Figur 12) und hält fest: „Ein Gesamt-Import nach Deutschland von ca. 3200 kt/a und ein Export von ca. 2000 kt/a bedeuten einen Verbleib von ca. 40 % aller eingetragenen reaktiven Stickstoffverbindungen in den Ökosystemen und damit ein Jahr für Jahr wachsendes Risiko, dass negative Wirkungen auf die Umwelt entstehen. Der wesentliche Teil der Akkumulation findet in terrestrischen Ökosystemen statt. Der landwirtschaftliche Sektor ist mit mehr als 50 % oder ca. 1060 kt/a Hauptverursacher reaktiver Stickstoffemissionen in alle Umweltmedien..... Das größte Emissionsminderungspotential liegt in der Landwirtschaft“.



Figur 12 Quelle: UBA (2009b)

Die vorgeschlagene Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen enthält eine Priorisierung des Forschungsbedarfs, der auch für die Schweiz von Bedeutung sein kann. Im Folgenden die Originalzitate:

„Der Wissensstand vor allem zu Wirkungen, Stickstoffflüssen, Technik, Kosten sowie zu Prognosen und Szenarien ist kontinuierlich zu verbessern.

Erforderlich sind:

- › genauere Analysen der Wirkungen erhöhter Stickstoffemissionen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit sowie der Wechselwirkungen mit Klimaänderungen.
- › Schließen der relevanten Erkenntnislücken über den Stickstoffkreislauf in Deutschland, insbesondere Quantifizierung und Bewertung globaler Handelsströme im Hinblick auf Stickstoffwirkungen.
- › Verbesserte Quantifizierung der Nebenwirkungen und Synergieeffekte auf andere Umweltmedien oder Regelungsregime.
- › Prognosen der Entwicklung der Stickstoffflüsse und –wirkungen.
- › Quantifizierung der Kosteneffekte soweit methodisch möglich, insbesondere der synergetisch und antagonistisch („Pollution Swapping“) wirkenden Maßnahmen und Instrumente.

› ...“

Das Strategiepapier des UBA ist auf der Basis des „Hintergrundpapiers zu einer multimedialen Stickstoffemissionsminderungsstrategie, UBA, Stand April 2009“ (UBA 2009a) erstellt worden. In diesem Hintergrundpapier werden weitere Lücken zu Unsicherheiten, Wissenslücken und Forschungsbedarf aufgezeigt:

- › Zu allen Prozessen einer Freisetzung von elementarem Stickstoff aus terrestrischen und aquatischen Ökosystemen liegen bisher nur grobe Schätzungen vor.
 - › Auch die Interpretation von Emissionsdaten sowie die meisten der aus ihnen resultierenden Modellberechnungen sind noch wenig zuverlässig und kaum verifizierbar.
 - › Dies gilt ganz besonders auch im Bereich der landwirtschaftlichen Emissionen, wo es beispielsweise bis heute keine europaweit abgestimmte Strategie zur Erfassung der Ammoniakströme gibt.
 - › Des Weiteren sind hier alle Daten zu Konzentrationsveränderungen von einzelnen Stickstoffverbindungen zu nennen sowohl in kleinräumigen als auch in großräumigen Systemen, die bei Messungen entweder unzureichend berücksichtigt wurden oder hinsichtlich der vorliegenden Ergebnisse regelmäßig eine große Variationsbreite aufweisen.
- Abhilfe wäre beispielsweise möglich durch eine Intensivierung von Messungen (als Stichworte zu nennen sind hier eine Ausweitung der bestehenden Emissionsinventare sowie die räumliche und zeitliche Auflösung der Daten in Form von Emissionsfaktoren, Aktivitätsdaten oder Tierzahlen; UNECE, 2007).

Forschungslücken treten aber nicht nur auf nationaler Skala auf. Bis hinunter auf Betriebsstufe zeigen sie sich bei Gesamtbetrachtungen. Eine ausführliche Review über Stickstoff-Optimierung von Shepherd/Chambers (2007) bemerkt zum Schluss: „The agri-environmental scientists have done a good job. However, their work is not yet complete, as we have also identified that ‘the devil is in the detail’. Whilst we can successfully combine some measures, there are also occasions where methods provide conflict: for example, saving nitrate but increasing manure ammonia losses; increasing P loss by shifting manure for example, saving nitrate but increasing manure ammonia losses; increasing P loss by shifting manure applications to the spring to reduce nitrate loss.“

b) Unsicherheiten von Stickstoffflüssen

Die Stickstoffprozesse (Figur 2) sind im Grossen und Ganzen zwar schon gut verstanden, bei Aufstellen der Stoffflussanalysen für ganze Länder zeigen sich aber grosse Unsicherheiten. Diese sind in Figur 3 und Figur 4 angegeben. Aufwendige und detaillierte Untersuchungen wurden

vor einigen Jahren für die Niederlande (de Vries 2003, Oenema 2003) durchgeführt. Die grössten absoluten Unsicherheiten wurden für Denitrifikation im Boden und N-Fixierung (uptake) gefunden. Die grössten relativen Unsicherheiten treten jedoch bei der Auswaschung (inflow surface water) und bei der Denitrifikation im Grundwasser auf.

Table 16. Uncertainties in the fate of nitrogen in the Netherlands (values in Gg N.yr⁻¹) for agricultural and natural terrestrial ecosystems.

Process	Agricultural ecosystems			Natural ecosystems		
	Mean	Standard deviation	CV (%)	Mean	Standard deviation	CV (%)
Input ¹	1169	0	0	20.2	0.0	0.0
Emission	165	24	15	0.0	–	–
Uptake	436	49	11	2.1	0.7	25
Accumulation soil	–48	8	–17	6.3	3.1	50
Denitrification soil	445	50	11	4.8	1.0	21
Leaching from rootzone	111	24	22	6.4	2.2	34
- Denitrification groundwater	46	16	35	1.1	0.4	38
- Inflow groundwater	65	17	26	5.3	1.8	35
Runoff to ditch	60	16	27	0.71	0.28	40
- Denitrification ditch	41	12	31	0.42	0.14	35
- Inflow surface water	19	9	47	0.29	0.16	55

¹The uncertainty in N input was not included in the uncertainty analysis. Consequently, the standard deviation and coefficient of variation are negligible.

Figur 13 Unsicherheiten von N-Flüssen je Prozess in den Niederlanden. Zum Mittelwert des Flusses (Mean) ist die Standardabweichung (Standard deviation) und der Variationskoeffizient (CV) [Standardabweichung dividiert durch Mittelwert in Prozent] angegeben. Alle Prozesse sind separat für landwirtschaftliche (links) und natürliche (rechts) Ökosysteme eingetragen. Einheit der Flüsse und Standardabweichung: 1000 t N pro Jahr (Gg). Quelle: de Vries (2003)

c) Stickstoffdeposition

In einem UN-ECE-Workshop „Empirical critical loads for N“ wurden 2002 die wichtigsten Forschungslücken im Bereich der critical loads (maximale Stickstoff- Eintragsmengen in ein Ökosystem ohne dass dieses Schaden nimmt) diskutiert und benannt. Für die Schweiz lässt sich zusammengefasst sagen, dass es für wichtige Ökosysteme (bspw. high altitude systems, gewisse Waldtypen) zuwenig Daten gibt und die Langzeiteffekte von N-Deposition in diesen Ökosystemen quantifiziert werden sollten. Langzeitexperimente mit N-Zugaben in einer repräsentativen Anzahl Ökosystemen werden benötigt um die aktuellen critical loads zu verifizieren und robustere Modelle zu entwickeln (BAFU 2002). In einem Folgeworkshop 2007 wurde festgehalten, dass das Verständnis über die Effekte von N-Einträgen besser wurde, aber weitere Forschung und Koordination zwischen Feldforschung, Monitoring und Modellierung in diesem Bereich nötig ist (ECE/EB.AIR/WG.1/2007/15). „In conclusion, it was crucial to **understand the long-term effects of increased nitrogen deposition on ecosystem processes** in a representative range of ecosystems. It was thus very important to quantify the effects of nitrogen loads by manipulation of nitrogen inputs in longterm ecosystem studies in unaffected and affected areas. Such data were essential to validate the set critical loads and to develop robust dynamic ecosys-

tem models and / or multiple correlative species models, which were reliable enough to calculate critical loads for nitrogen deposition in (semi-) natural ecosystems and to predict (natural) recovery rates for nitrogen-affected systems.)”

d) NH₃-Massnahmen

Ein Leitfaden der UN-ECE stellt, basierend auf einem umfassenden Literatur-Review, die aktuell global bekannten Techniken zur Vermeidung und Verringerung von Ammoniakemissionen zusammen und bewertet sie nach 3 Kategorien (UN-ECE 2007):

- › Kat. 1: Gut erforschte, als praktikabel betrachtete Techniken, für deren emissionsmindernde Wirkung zumindest auf experimenteller Ebene quantitative Daten vorliegen.
- › Kat. 2: Erfolgversprechende Techniken, die jedoch bislang nicht ausreichend erforscht wurden, oder für die es immer schwierig sein wird Wirkung zu quantifizieren. Das bedeutet aber nicht, dass sie je nach lokalen Gegebenheiten nicht als Teil einer Strategie zur Ammoniakminderung eingesetzt werden können.
- › Kat. 3: Techniken der Kategorie 3: Techniken, die sich als unwirksam erwiesen haben, oder aus praktischen Gründen vermutlich ausgeschlossen werden.

Während Techniken der Kategorie 1 in der Praxis dem Stand der Technik nach schweizerischer Luftreinhalteverordnung (LRV) entsprechen, zeigen Techniken der Kategorie 2 Forschungsbedarf im Bereich NH₃ –Minderungsmassnahmen auf. Diese sind für die vorliegende Studie bedeutsam. Beispielsweise werden solche Kategorie 2 Techniken im Bereich der Gülleausbringung mittels Hochdruckinjektion geortet oder im Bereich der Abluftreinigung von Ställen (in Schweineställen mittels Biofiltern, in Geflügelställen mittels Säure- / Biowäschern, in Haltungssystemen für Mastpoulets mittels verschiedener Systeme der Belüftungstrocknung).

e) N-Emissionen im Luftreinhalte-Konzept des Bundesrat

In seinem „Konzept betreffend lufthygienische Massnahmen des Bundes“ vom 11. September 2009 bezeichnet der Bundesrat die zur „Einhaltung der Schutzziele notwendige Emissionsreduktionen“ für die wichtigsten Luftschadstoffe (Bundesrat 2009c). Dabei erscheinen die stickstoffhaltigen Schadstoffe sowohl in der Form von NO_x mit 50%, von NH₃ mit 40% (Reduktionen gegenüber Basisjahr 2005) und implizit von Feinstaub (mit Nitrat als wichtiger Bestandteil) mit 45%.

Unter „Weiteres Vorgehen zur Schliessung der Lücken“ nennt der Bundesrat Reduktionsmassnahmen und schreibt, dass das „Engagement der landwirtschaftlichen Forschungsanstalten des Bundes bei der weiteren Verbesserung des Standes der Technik zur Emissionsminderung“

zur Ausschöpfung des NH_3 -Reduktionspotenzials genutzt werden solle. Konkretere Hinweise zu Forschungslücken sind im Konzept allerdings nicht angegeben.

4.6.2. STICKSTOFF ALS NÄHRSTOFF UND RESSOURCE

Stickstoff ist in natürlichen Ökosystemen typischerweise der limitierende Wachstumsfaktor; mit dem Einsatz stickstoffhaltiger Dünger können deshalb die landwirtschaftlichen Erträge gesteigert werden. Bereits im Mittelalter wurde dieser Umstand mit der Einführung der Dreifelderwirtschaft ausgenutzt. Im 20. Jahrhundert verhalfen dann die Mineraldünger, die dank des Haber-Bosch-Verfahrens grosse Mengen von Stickstoff aus der Luft für die Düngerproduktion verfügbar machen konnten, der Landwirtschaft zu einer gewaltigen Steigerung der Erträge im Pflanzenbau. Diese ist allerdings begrenzt, ein Überangebot von Stickstoff kann neben unerwünschten Verlusten in die Umwelt auch zu Ertragsverlusten führen. Damit ist die Rolle des Stickstoffs als Nährstoff und als Ressource kurz charakterisiert.

Das Postulat von Ständerat H. Stadler „Nahrungsmittelkrise, Rohstoff- und Ressourcenknappheit“ vom 29.5.2008 beauftragte den Bundesrat „dem Parlament Bericht über Analyse, Folgerungen, Strategien und Massnahmen bei drohender Nahrungsmittel-, Rohstoff- und Ressourcenknappheit zu erstatten“. In seiner Antwort bezeichnet der Bundesrat prioritär zwei Handlungsfelder für die Landwirtschaft (Bundesrat 2009a):

- › Die Forschung muss einen wichtigen Beitrag leisten, um bei den eingesetzten Ressourcen die Effizienz und die Nachhaltigkeit bei Produktion zu steigern. Der Staat hat seine Rahmenbedingungen konsequent auf die Maximen der Effizienz und Nachhaltigkeit auszurichten und stimmt die geeigneten Massnahmen in Landwirtschaft, Energie, Umwelt, Raumplanung und Entwicklungszusammenarbeit aufeinander ab.
- › Das Engagement der Schweiz in der Entwicklungszusammenarbeit erfordert eine stärkere Betonung der Landwirtschaft und der nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen.

Auch der Weltagrarbericht der FAO (IAASTD 2009) und der Weltentwicklungsbericht Landwirtschaft der Weltbank (World Bank 2008) beschäftigen sich mit der Rolle des Stickstoffs in der Landwirtschaft. Der Bericht enthält eine Liste von Forschungslücken (und eine Forschungsagenda). Darunter finden sich auch solche mit direkter Stickstoffrelevanz, z.B. Wirkung von Düngern in Böden, Düngungsverfahren, Kreislaufsysteme von Pflanzenbau und Tierhaltung [für eine Diskussion der Forschungslücken siehe Bongert und Albrecht (2008)].

4.6.3. STICKSTOFF ALS KLIMAFAKTOR

Einzelne Stickstoffverbindungen sind klimawirksam und tragen damit zur Klimaerwärmung bei (siehe Kap.2.2). Für die Landwirtschaft steht das Lachgas (N_2O) im Vordergrund, ein Zwischenprodukt aus den Prozessen Nitrifikation/Denitrifikation von landwirtschaftlich verursachten Ammoniak- und Nitratflüssen. Die Landwirtschaft emittiert zurzeit knapp 8000 t N_2O , was wegen seines hohen Treibhausgaspotenzials (global warming potential ist 310) knapp 2.5 Mio t CO_2 Äquivalenten oder 4.6% des schweizerischen Totals der Treibhausgasemissionen entspricht (FOEN 2010). Werden auch noch die weiteren Treibhausgasemissionen aus landwirtschaftlichen Aktivitäten (Verdauung der Nutztiere, Treibstoffverbrauch Maschinen/ Geräte) mitgerechnet, beträgt der Anteil der Landwirtschaft ca. 13% am nationalen Emissionstotal. Damit ist die Landwirtschaft einer der wichtigen Verursacher von Treibhausgasemissionen. Gleichzeitig ist die Landwirtschaft aber auch von der Klimaerwärmung betroffen. Nach einer möglichen, anfänglichen Produktivitätssteigerung wird bei ungebremstem Klimawandel „die landwirtschaftliche Produktion langfristig beeinträchtigt sein, insbesondere wenn infolge früherer Schneeschmelze und schwindender Gletscher das verfügbare Wasser während der Vegetationsperiode knapp wird. Auch die erhöhte Variabilität wird die schweizerischen Landwirte vor besondere Herausforderungen stellen und die Ertragssicherheit gefährden“ (OcCC 2007)¹¹.

Für die Landwirtschaft stellt sich deshalb die doppelte Herausforderung, wie sie erstens ihre Treibhausgasemissionen reduzieren kann und wie sie sich zweitens auf die Klimaerwärmung anpassen soll. In Bezug auf den Stickstoff ergeben sich gemäss Einschätzung des IPCC-Klimaberichtes dabei Synergien mit den Massnahmen welche auch für die N-Reduktionen durch eine nachhaltige Entwicklung genannt werden (IPCC 2007). In diesem Bereich besteht aber nach Ansicht des IPCC noch erheblicher Forschungsbedarf.

Konkret kann man sich fragen, ob ein nationales Treibhausgasreduktionsziel von 20% gegenüber 1990¹² für die Landwirtschaft erreichbar ist und was es kostet? Ein Modell der ETH zeigt, dass die Entwicklung der landwirtschaftlichen THG-Emissionen auch in der näheren Zukunft in erster Linie von der Entwicklung der Tierbestände abhängig sein wird (Peter et al. 2009). Der Einsatz technischer Reduktionsmassnahmen dürfte kurzfristig von untergeordneter Bedeutung sein. Die Autoren kommen zum Schluss: „Eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Forschung auf dem Gebiet der THG-Reduktionstechnologien könnte eine wirksame Inves-

¹¹ siehe weitere Ausführungen zu den Wirkungen auf die Landwirtschaft in OcCC (2007)

¹² Die Botschaft zur Revision des CO₂-Gesetzes sieht in der ersten Variante eine solche Reduktion um 20% vor <http://www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=de&msg-id=23658>

tition sein, mit der die Landwirtschaft nachhaltig und ökonomisch sinnvoll auch in Zukunft ihren Beitrag zur THG-Reduktion leisten könnte.“

Eine weitere grosse Forschungslücke zeigt sich bei der folgenden Betrachtung: Die globalen biogeochemischen Kreisläufe (Stickstoff, Kohlenstoff, Phosphor) sind eng gekoppelt. Bewirkt ein verstärkter N-Kreislauf ein positives oder negatives Feedback auf die CO₂-Adsorptionsfähigkeit der Biosphäre? Ein positives Feedback verstärkt die Klimaerwärmung wegen reduziertem CO₂-Absorptionsvermögen, ein negatives Feedback vermindert die Klimaerwärmung. Umgekehrt sind die Auswirkungen des verstärkten CO₂-Kreislaufs, d.h. der Klimaerwärmung auf den N-Kreislauf und die Biosphäre und damit die Landwirtschaft, in vieler Hinsicht unklar, siehe dazu Gruber (2008). Während viel Forschung zu den globalen marinen N-Prozessen (Stickstofffixierung und Denitrifikation) stattfindet, ist dies für die globale N-Bilanz terrestrischer Prozesse nicht der Fall - die dazu nötige Hochrechnung von lokaler zu globaler Ebene gestaltet sich sehr schwierig. Aktuelle Klimamodelle berücksichtigen zwar die zunehmende CO₂ Düngung (infolge höherer atmosphärisches CO₂ Gehalte) und dadurch verstärktes CO₂ Adsorptionsvermögen der Biosphäre. Die Verknüpfung zum N-Kreislauf, die bestehende N-Limitierung durch ein relativ fixes C/N Verhältnis in Pflanzen, ist dabei jedoch nicht mitberücksichtigt, obwohl für die modellierten Mengen an verstärkter CO₂ Adsorption gar nicht genügend verfügbarer Stickstoff vorhanden ist. Um die Unsicherheiten der Klimaprognosen zu reduzieren, muss ergo der N-Kreislauf besser verstanden, modelliert und integriert werden.

Bemerkenswert sind aber auch die Aussagen des SRU¹³ (2008) im Umweltgutachten von 2008, welches sich schwergewichtig mit dem Klimaschutz befasst, Statements zu Natur- und Bodenschutz, Landwirtschaft, Gewässer- und Meeresschutz usw. aber nicht vernachlässigt. „Die starke öffentliche Fokussierung auf die Klimaschutzproblematik darf nicht dazu führen, dass andere drängende Umweltprobleme aus dem Blick geraten. Im Zeichen des Klimawandels gewinnen einige andere politische Handlungsfelder sogar an umweltpolitischer Bedeutung, sei es wegen ihrer möglichen Beiträge, den Klimawandel und seine Auswirkungen abzuschwächen, sei es wegen drohender Beeinträchtigungen gerade dieser Umweltgüter durch die Klimaerwärmung. Hervorzuheben sind hierbei die Bedeutung der Wälder, Moore und des Grünlandes sowie die besondere Bedeutung der Böden als Speicher bzw. Senken für Treibhausgase und die negativen Klimafolgen ihrer unsachgemäßen Nutzungen.“. Der SRU weist zudem auf sein Sondergutach-

13 Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) ist ein wissenschaftliches Beratungsgremium der deutschen Bundesregierung mit dem Auftrag, die Umweltsituation und Umweltpolitik in der Bundesrepublik Deutschland und deren Entwicklungstendenzen darzustellen und zu begutachten sowie umweltpolitische Fehlentwicklungen und Möglichkeiten zu deren Vermeidung oder Beseitigung aufzuzeigen. Alle vier Jahre publiziert der SRU ein Umweltgutachten

ten „Meeresumweltschutz für Nord- und Ostsee“ (SRU 2004) hin, indem relevante Aussagen zur Nährstoffbelastung (N) der flachen Meere gemacht werden. Darin wird unter dem Titel „Natur- und Bodenschutz aufwerten“ auf die besonderen Funktionen der Ökosysteme Moore, Wälder und Grünland als Kohlenstoffspeicher und -senken hingewiesen und für deren Aufwertung bzw. Erhaltung plädiert.

4.6.4. STICKSTOFF ALS GESELLSCHAFTLICHES THEMA

Die Ergebnisse der landwirtschaftlichen Stickstoffforschung dienen nicht einem Selbstzweck, sondern haben gesellschaftlich relevante Konsequenzen. Diese sind äusserst vielschichtig und werden in der Gesellschaft teilweise kontrovers diskutiert. Es ist deshalb wichtig, dass die Forschung ihre Resultate im Hinblick auf mögliche Anwendungen und Auswirkungen beschreibt. Diese Beschreibung kann selber Forschungsaktivitäten zur Folge haben. Fehlt die Diskussion kann dies auch als Forschungslücke betrachtet werden.

In Bezug auf die Stickstoffforschung stellen sich z.B. wichtige Fragen zur Qualität und Quantität des Düngerinputs in die landwirtschaftlichen Nutzflächen, denn die Inputs sollen so erfolgen, dass gleichzeitig Erträge optimiert und Verluste minimiert werden, Bodenfruchtbarkeit und Biodiversität erhalten bleiben. Dabei sind auch ökonomischen Bedingungen einzuhalten, die nötigen politologischen und juristischen Instrumente zu entwickeln und die gesellschaftlichen Auswirkungen zu untersuchen. In wichtigen Publikationen wird dazu Forschungsbedarf festgestellt:

In der oben erwähnten europäischen Strategie mit den sieben Forschungsschwerpunkten der UNECE Task Force on Reactive Nitrogen (TFRN) und des Programms Nitrogen in Europe (NiNE) beschäftigt sich Projekt 5 mit Auswirkungen der europäischen und internationalen Stickstoff-Politik für die europäischen Ökosysteme als Basis für die Optimierung lokaler Lösungen („Integrating the consequences of EU and international policies on nitrogen-related impacts in European landscapes as a basis to develop locally optimized solutions“). Aus europäischer Sicht besteht bei dieser Frage ein bedeutender Forschungsbedarf, der wegen der engen Verknüpfungen mit den Nachbarländern auch aus Schweizer Sicht relevant ist.

Im Weltentwicklungsbericht, der in seiner Ausgabe 2008 der Landwirtschaft gewidmet ist, nennt die Weltbank als Voraussetzung für weiteres Produktionswachstum die Steigerung „öffentlicher und privater Forschung und Entwicklung in den Bereichen Produktivität und nachhaltige Produktionssysteme z.B. pfluglose Bodenbearbeitung, angepasste Fruchtfolgen, biologische Schädlingsbekämpfung etc.“ (World Development Report 2008, Agriculture for Development, World Bank 2008). Als besonders gravierend wird der Stickstoffabbau auf den landwirtschaftli-

chen Nutzflächen der Entwicklungsländer betrachtet, der dort zu einer weit verbreiteten Verarmung der Bodenfruchtbarkeit (Sanchez 1997) und zu einem unerwünschten Netto-Stickstofftransfer von der Süd- zur Nordhalbkugel geführt hat (Galloway 2004, INFRAS 2009). Galloway weist in seiner Analyse auf die grossen Unsicherheiten hin und plädiert auf vertiefte Analysen zum globalen Stickstoffkreislauf. Die DEZA sieht hier einen direkten Link zur schweizerischen Entwicklungspolitik in der Frage der Ernährungssicherheit (SDC 2009). Hier besteht ebenfalls erheblicher Forschungsbedarf, allerdings nicht direkt im Umfeld Stickstoff, sondern in der Evaluation entwicklungspolitischer Instrumente, um die Stickstofftransfers langfristig zu korrigieren.

Eine weitere Frage, bei der Stickstoff gesellschaftliche Relevanz zeigt, betrifft den Biolandbau. Biologische Produktionsformen weisen - neben ihrer Bedeutung in der Qualität der Lebensmittel - gemäss verschiedenen Experimenten ein hohes Potenzial für die Reduktion von Stickstoffverlusten und gleichzeitig für ein hohes Anpassungsvermögen unter der Klimaerwärmung. Allerdings besteht auch hier ein grosser Forschungsbedarf sowohl direkt bei der Bedeutung des Stickstoffs in der biologischen Produktion als auch in der Frage nach der Förderung solcher Produktionsformen. Siehe dazu den Bericht der United Nations Conference on Trade and Environment Review - Promoting poles of clean growth to foster the transition to a more sustainable economy (UNCTAD 2009) und die Proceedings der Sommer-Universität in Ranco (Biala 2007).

Ausserdem haben alle Fragen im Zusammenhang der Umsetzung von Massnahmen zur Verbesserung von Stickstoffkreisläufen in der Landwirtschaft eine ökonomische Seite, welche gesellschaftlich wahrgenommen wird und sich letztlich als Bereitschaft für Direktzahlungen äussert. In einer kürzlich im Auftrag des BLW von der ETH erstellten Studie werden Reduktionsmassnahmen für N₂O und Methan bis und mit ihren ökonomischen Auswirkungen diskutiert. Die Studie kommt u.a. zum Schluss, dass es wünschenswert wäre, „wenn die Forschung vor allem in diesem Bereich praxisfähige und wirtschaftliche Reduktionsoptionen entwickeln würde. In diesem Sinne könnte eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Forschung auf dem Gebiet der THG-Reduktionstechnologien eine wirksame Investition sein, mit der die Landwirtschaft nachhaltig und ökonomisch sinnvoll auch in Zukunft ihren Beitrag zur THG-Reduktion leisten könnte“ (Peter et al. 2009).

4.6.5. ÜBERSICHT ÜBER DIE WEITEREN QUELLEN

WEITERE QUELLEN	
Themen	Referenzen
Stickstoff: Kreislauf/Stoffflüsse	
a) N Problem gesamthaft	› Agrarbericht des BLW (2008) › The nitrogen cascade, Galloway (2003) › On the fate of anthropogenic nitrogen, Schlesiger (2009) › Managing the European Nitrogen Problem, A Proposed Strategy for Integration of European Research on the Multiple Effects of Reactive Nitrogen, UNECE (2009a) › Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen, UBA (2009 a/b) › Managing nitrogen on the farm (Shepherd/Chambers 2007)
b) Unsicherheiten N-Flüsse	› Uncertainties in the fate of nitrogen, De Vries (2003) › Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies, Oenema (2003)
c) Stickstoffdepositionen	› Empirical critical loads for Nitrogen, BAFU (2002)
d) NH ₃ Massnahmen	› Leitfaden über Techniken zur Vermeidung und Verringerung von Ammoniakemissionen, UNECE (2007)
e) N-Emissionen LRK	› Luftreinhalte-Konzept des Bundesrat (2009c)
Stickstoff thematisch	
N als Nährstoff/Ressource: <i>Ernährung, Nachhaltigkeit</i>	› Bericht zum Postulat Stadler „Nahrungsmittelkrise, Rohstoff- und Ressourcenknappheit“, Bundesrat (2009a) › Weltagrarbericht, FAO & Weltbank (IAASTD 2009) › Lehren aus dem Weltagrarbericht (Bongert/Albrecht 2008)
N als Klimafaktor: <i>Globale Entwicklungen, Klimawandel</i>	› OcCC (2007) › Climate Change 2007 Synthesis Report/4th Ass. Rep IPCC (2007) › ETH Peter et al. (2009) › Earth-system perspective of the global N cycle, Gruber (2008)
N als gesellschaftl. Thema: <i>Low/high input, Ökonomie, Strategie, Forschungsbedarf</i>	› Managing the European Nitrogen Problem, UNECE (2009a) › World Development Report 2008, Agriculture for Development, World Bank 2008 › Sanchez (1997), Changes in the global nitrogen cycle as a result of anthropogenic influences, Galloway (2004) › Analytical framework for food security, global programme food security SDC/INFRAS (2009) › Promoting poles of clean growth to foster the transition to a more sustainable economy, UNCTAD (2009) › Low Input Farming Systems, Biala (2007) › Möglichkeiten und Grenzen zur Vermeidung landwirtschaftlicher Treibhausgase in der Schweiz, ETH (Peter et al. 2009)

Tabelle 6 Übersicht weitere Quellen

Die oben stehende Auswahl könnte noch erweitert werden. Die Aussagen decken sich aber weitgehend mit Aussagen in anderen relevanten Publikationen, die den Autoren bekannt sind oder

die ihnen auch von Teilnehmern der Umfrage zugestellt wurden. Speziell zu erwähnen sind etwa noch folgende, von der Agroscope Reckenholz genannte und berücksichtigte Reviews und Publikationen: Royal Society 2009, Aeberhard et. al 2009.

Ein weiteres wichtiges Thema im Zusammenhang mit Lücken und Chancen in der Landwirtschaftsforschung und Stickstoff ist die Gentechnologie und den von ihr angestrebten Leistungs- und Effizienzsteigerungen. Das im November 2005 in einer Volksabstimmung gutgeheissene Moratorium „für Lebensmittel aus gentechnikfreier Landwirtschaft“ sieht vor, dass während dessen Laufzeit gentechnisch veränderte Pflanzen in der schweizerischen Landwirtschaft nicht angebaut und gentechnisch veränderte Tiere für die Produktion von Lebensmitteln und anderen landwirtschaftlichen Erzeugnissen nicht in Verkehr gebracht werden dürfen. (Die Aussaat zu Forschungszwecken ist hingegen unter strengen Auflagen erlaubt.) Nach dem Inkrafttreten des Moratoriums hat der Bundesrat ein nationales Forschungsprogramm über Nutzen und Risiken der Freisetzung von gentechnisch veränderten Pflanzen lanciert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen bis Mitte 2012 vorliegen¹⁴. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Studie das Thema nicht weiter berücksichtigt.

¹⁴ Das NFP 59 „Nutzen und Risiken der Freisetzung gentechnisch veränderter Pflanzen“ hat zum Ziel, das Anwendungspotenzial der pflanzlichen Biotechnologie in der Schweiz zu prüfen. Dabei stehen besonders Fragen nach dem Nutzen und den Risiken der Biotechnologie im Vordergrund. Ferner soll im NFP der Problemkreis des Risikomanagements auf rechtlicher, politischer und administrativer Ebene behandelt werden.“ zitiert aus Website des Schweiz. Nationalfonds
/www.snf.ch/D/forschung/Forschungsprogramme/LaufendeNFP/Seiten/_xc_nfp59.aspx

5. BEWERTUNG

5.1. BEWERTUNGSPROBLEMATIK

Wie verschiedene Publikationen zeigen, spielen weltanschauliche Vorstellungen eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, die Ausrichtung der Landwirtschaft hin zur Nachhaltigkeit zu konkretisieren. Der Synthesebericht des Weltagrarrats markiert z.B. in dieser Frage eine klare Position: Das alte Paradigma einer industriellen high-input Landwirtschaft mit hohem Energie- und Chemikalieneinsatz sei nicht mehr zeitgemäß, der volle Einbezug lokalen und indigenen Wissens und ein Forschungsschwerpunkt auf kleinbäuerliche und agro-ökologische Anbaumethoden seien wesentliche Elemente einer zukunftsfähigen Landwirtschaft (IAASTD 2009). Etwas anders tönt es im Bericht der Weltbank (2009), der sich optimistischer über Entwicklungschancen äussert, welche sich aus den Anwendungen grüner Biotechnologie ergeben. Der neuste Bericht der Royal Society (2009) zum selben Thema sieht hingegen für beide Produktionsformen Chancen, dabei kann je nach biogeografischen Voraussetzungen das eine oder das andere Konzept mehr Erfolg versprechen. Je nach Standpunkt ergeben sich somit auch unterschiedliche Priorisierungen für die Forschungslücken.

Die Schweiz hat sich in der Bundesverfassung zu Nachhaltigkeit und Umweltschutz (Art. 73 BV¹⁵, Art. 74¹⁶ BV) verpflichtet und speziell für die Landwirtschaft zusätzlich deren Multifunktionalität betont (Art. 104¹⁷ BV). Im Landwirtschaftsgesetz wird dieser Anspruch für die Landwirtschaft konkretisiert und im Umweltschutzgesetz wird das Vorsorgeprinzip implementiert. In der Umweltschutzgesetzgebung und in internationalen Vereinbarungen finden sich festgelegte Normen und konkrete Ziele. Damit hat sich die Schweiz für einen mehr oder weniger umrissenen Bewertungsmassstab unter der Bezeichnung „schwache Nachhaltigkeit plus“¹⁸ ent-

¹⁵ **BV Art. 73 Nachhaltigkeit:** Bund und Kantone streben ein auf Dauer ausgewogenes Verhältnis zwischen der Natur und ihrer Erneuerungsfähigkeit einerseits und ihrer Beanspruchung durch den Menschen andererseits an

¹⁶ **BV Art. 74 Umweltschutz:**

- (1) Der Bund erlässt Vorschriften über den Schutz des Menschen und seiner natürlichen Umwelt vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen.
- (2) Er sorgt dafür, dass solche Einwirkungen vermieden werden. Die Kosten der Vermeidung und Beseitigung tragen die Verursacher.
- (3) Für den Vollzug der Vorschriften sind die Kantone zuständig, soweit das Gesetz ihn nicht dem Bund vorbehält.

¹⁷ **BV Art. 104 Landwirtschaft, Ziff. 1**

Der Bund sorgt dafür, dass die Landwirtschaft durch eine nachhaltige und auf den Markt ausgerichtete Produktion einen wesentlichen Beitrag leistet zur:

- a. sicheren Versorgung der Bevölkerung;
- b. Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen und zur Pflege der Kulturlandschaft;
- c. dezentralen Besiedlung des Landes.

¹⁸ Der Bundesrat vertritt die Position, dass einzelne Elemente der Kapitalstöcke (Arbeit, Kapital, Boden/Umwelt) ersetzt werden können. Deshalb ist eine begrenzte Substitution zwischen den drei Kapitalstöcken zulässig, sofern in den Abwägungsprozessen sichergestellt wird, dass diese transparent erfolgen, nicht systematisch zu-

schieden. Dieser Ansatz wird im Bericht des Bundesrates zum Postulat Stadler bekräftigt und für die Landwirtschaft konkretisiert (Bundesrat 2009a, siehe Anhang). Der Bundesrat hat sich in dieser Frage bisher allerdings kaum exponiert.

- › er konkretisiert keine Ziele zum Grad der Selbstversorgung mit Nahrungsmitteln¹⁹,
- › er lässt offen, wie die nachhaltige Produktion von Lebensmitteln geschehen soll und legt sich in der Frage „high input“ oder „low input“ Bewirtschaftungsmethoden nicht fest,
- › er zeigt nicht auf, wie und in welchen Etappen die Umweltziele erreicht werden können, und in welchem Bezug sie zu weiteren bundesrätlichen Zielen stehen.

Die momentan dem Parlament vorliegende „Weiterentwicklung des Direktzahlungssystems“ (Bundesrat 2009b) widmet sich dieser Thematik und auch den Aspekten, die im Postulat Stadler nicht angesprochen werden inklusive einer gezielteren Abgeltung der multifunktionalen Anforderungen²⁰ an die Landwirtschaft. Im Presserohstoff vom 6.5.2009 zur Weiterentwicklung des Direktzahlungssystems heisst es: „Das Leitbild der Schweizer Agrarpolitik ist eine multifunktionale Landwirtschaft. Gemäss Artikel 104 der Bundesverfassung soll die Landwirtschaft die gemeinwirtschaftlichen Leistungen durch eine nachhaltige und auf den Markt ausgerichtete Produktion erbringen. Da die für die landwirtschaftliche Produktion zur Verfügung stehende Fläche mit 0,14 ha pro Einwohner sehr klein ist, sollte das natürliche Potenzial zur Produktion von qualitativ hochstehenden Nahrungsmitteln soweit wie möglich genutzt werden. Dies ist auch vor dem Hintergrund der weltweiten Verknappung von Lebensmitteln bzw. der begrenzten natürlichen Ressourcen sinnvoll. Das Produktionsniveau muss dabei nachhaltig sein, dass heisst die Tragfähigkeit der Ökosysteme darf nicht überschritten werden.“ Im Bericht zur Weiterentwicklung des Direktzahlungssystems formuliert der Bundesrat für die sichere Versorgung der Bevölkerung das Ziel „Produktionskapazität durch Kalorienproduktion in heutigem Ausmass und strategisch wichtige Kulturen erhalten“ (p. 5, Bundesrat 2009b). Inwieweit dieses Konzept umgesetzt wird und wie konkret, verbindlich und zielgerichtet die verschiedenen Anforderungen beispielsweise bezüglich der Reduktion übermässigen Stickstoffeinträge und dem Erhalt der Lebensgrundlage schlussendlich definiert werden, ist momentan noch nicht abzuschätzen.

lasten der gleichen Nachhaltigkeitsdimension gehen und dass insgesamt die Biosphäre nicht überbelastet wird („schwache Nachhaltigkeit plus“), Bundesrat (2009a).

¹⁹ gemäss Agrarbericht 2008 lag der kalorienmässige Bruttoselbstversorgungsgrad bei tierischen und pflanzlichen Lebensmitteln im Jahr 2006 bei 57% (BLW 2008). Wird berücksichtigt, dass dabei auch die Produktion auf der Basis von importierten Futtermitteln, Mineraldünger und Energieträgern enthalten ist, ergibt sich ein tieferer Nettoversorgungsgrad.

²⁰ Pflege Kulturlandschaft, Versorgungssicherheit, Erhaltung Lebensgrundlage/Biodiversität, Tierwohl, dezentrale Besiedelung

Um die Tragfähigkeit der Ökosysteme nicht zu überschreiten, sind in diesem Bereich Verbesserungen in Richtung der Umweltziele nötig. Es gilt einerseits die Kreisläufe zu schliessen (Stickstoff- und weitere Verluste minimieren) und andererseits die treibenden Flüsse zu reduzieren. Gleichzeitig soll die Produktionskapazität erhalten bleiben. Diese beiden Ziele zu erreichen wird nicht einfach sein, umso mehr als die Bevölkerung weiter wachsen und der Druck auf die landwirtschaftliche Nutzfläche zunehmen wird (in den letzten Jahren hat diese stetig abgenommen²¹). Es braucht dazu eine Steigerung der Ressourceneffizienz (z.B. bezüglich Stickstoff, Phosphor, Wasserverbrauch, Energieverbrauch), die aber ohne Erhöhung des Ressourceninputs, oder noch besser bei reduziertem Input, erfolgen muss.

5.2. ARBEITSTHEMEN

Im Folgenden werden fünf Arbeitsthemen für die Landwirtschaftsforschung definiert. Mit deren Hilfe kann die Vielzahl der im Kapitel 4 gesammelten Forschungslücken strukturiert werden, und je nach Präferenz und Priorität der Themen ergibt sich für den Leser und die Leserin der Studie eine Priorisierung der Forschungslücken.

²¹ BFS: „Die landwirtschaftlich genutzte Fläche ist abnehmend. Seit 1996 werden rund 24'700 ha weniger genutzt, alleine im Jahr 2007 wurde die Nutzung von rund 2100 ha aufgegeben, was der Fläche des Murtensees entspricht (www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/07/03/blank/ind24.indicator.240204.2402.html)

ARBEITSTHEMEN
a) Synthetischer Forschungsansatz Die Besonderheit des Stickstoffs, geprägt durch die Vielfalt seiner umweltrelevanten Verbindungen und deren Umwandlungsprozesse, erfordert besondere Anstrengungen in der Erforschung des gesamten N-Kreislaufs, der gesamten Prozesskette („Kaskade“) und deren Wechselwirkungen in allen betroffenen Räumen (auch z.B. Wald). Die naturwissenschaftliche Forschung darf in der Erforschung der landwirtschaftlichen Zusammenhänge nicht zu sehr in der reduktionistischen Analyse der einzelnen Teilprozesse und Subsysteme stehenbleiben, sondern muss, auch wenn noch nicht jeder Teilprozess bis ins kleinste Detail bekannt ist, die Synthese ihrer Resultate, deren Verbindung und Gesamtheit vermehrt ins Auge fassen.
b) Ernährung/Nachhaltigkeit Die Sicherstellung der Ernährung der heutigen und künftigen Bevölkerung sowohl global wie auch national ist die Hauptaufgabe der Landwirtschaft. Zur Zeit ist die Frage noch offen, in welcher Richtung sich die schweizerische Landwirtschaft in den kommenden Jahren entwickeln soll, um ihrer Ur-Aufgabe in unfassender Weise gerecht zu werden, namentlich unter Einhaltung ökologischer, sozialer und wirtschaftlicher Ziele. Die Herausforderung ist umso grösser, als sich momentan die globalen Rahmenbedingungen stark wandeln.
c) Globale Entwicklungen/Klimawandel Durch schnell ablaufende Veränderungsprozesse (Temperaturerhöhung, Wasserkreislauf, etc.) und Änderungen in den N-/C-Kreisläufen übt der Klimawandel Druck auf die Biodiversität und auf die landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen aus und beeinflusst damit das gesamte irdische Leben. Auf globaler Skala lassen sich heute zwar bereits wichtige Auswirkungen bezeichnen und voraussagen. Auf regionaler Skala sind hingegen die Auswirkungen noch mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet. Die möglichen Entwicklungen mit ihren Unsicherheiten zu berücksichtigen, stellt eine grosse, dringende Herausforderung für die Landwirtschaftsforschung dar.
d) Einbindung der Landwirtschaftsforschung in Gesellschaft/Wirtschaft Landwirtschafts-/Stickstoffforschung darf sich nicht auf Produktions- und Umweltaspekte beschränken, sondern muss in einen gesellschaftlich/sozialen und wirtschaftlichen Kontext gestellt werden. Dabei geht es um die Wechselwirkungen der Forschung mit den politischen Zielen der Landwirtschaft und des Umweltschutzes, den Strategien und Regulierungen und mit den aktuellen Themen der Gesellschaft wie etwa Ernährung und Gesundheit. Die landwirtschaftliche Forschung muss sich deshalb in angemessener Weise mit Gesetzgeber und Entscheidungsträgern auseinandersetzen – und mit der Frage, mit welchen politologischen Instrumenten Ziele und Strategien effektiv umgesetzt werden können. Weiter muss sie Bedeutung und Verantwortung der Gesellschaft in den Rollen des Nachfragers und des Konsumenten landwirtschaftlicher Produkte gebührend berücksichtigen.
e) Integration der räumlichen Aspekte Die schweizerische Landwirtschaft hat ihre Eigenheiten durch historische, wirtschaftliche und geografischen Bedingungen entwickelt. Sie zeichnet sich durch eigene Produktionsbedingungen (Grasland/Alpweiden, Bodenqualität, Wasserüberfluss, Kleinräumigkeit, etc.) aus. Analog haben auch die Nachbarländer ihre Landwirtschaftsformen entwickelt. Zur Erreichung nachhaltiger Produktionsformen sind internationale Abstimmungen zu diskutieren: Wo können Getreide, Gemüse, Fleisch und Milch am ehesten nachhaltig produziert und verteilt werden? Die Fragen an die landwirtschaftliche Forschung sind auf mehreren räumlichen Skalen verschachtelt, von der globalen hinunter zur kontinentalen, nationalen, regionalen und schliesslich betrieblichen Skala. Wie diese miteinander zu verknüpfen sind, um grösstmögliche Nachhaltigkeit zu erzielen, ist eine weitere offene Frage, mit der sich die landwirtschaftliche Forschung in Zukunft noch intensiver beschäftigen muss.

Tabelle 7 Die Arbeitsthemen werden unten zur Strukturierung der Forschungslücken benutzt.

5.3. DIE WICHTIGSTEN FORSCHUNGSLÜCKEN

5.3.1. FORSCHUNGSLÜCKEN IM THEMATISCHEN KONTEXT

In diesem Kapitel werden aus der Vielzahl von Forschungslücken (Kapitel 4.2, 4.3, 4.4, 4.6) die wichtigsten ausgewählt und zusammengefasst.

Auswahlkriterien für die Bewertung der „Wichtigkeit“ von Forschungslücken

a) Die betroffenen Stickstoffflüsse sind in der Schweiz gross und/oder ihre Unsicherheiten sind gross. Siehe dazu Kap. 2.4.2 und die dort angegebene Liste der grössten Stoffflüsse. Betroffen sind in erster Linie: L1 Hofdünger/Weidegang, L3 Produkte/Nahrung. L4 Emissionen: NH_3 , NO_x , N_2O -Emissionen aus der Tierhaltung, L5 Auswaschung/Abschwemmung, L6 Emissionen: NO_x , N_2O , NH_3 -Emissionen aus Landwirtschaftsböden.

b) Die Forschungslücke steht in einem direkten Sinn-Zusammenhang mit den fünf Arbeitsthemen (vgl. Kap. 5.2.) und nimmt dort einen prominenten Platz ein.

Kosten/Nutzen-Überlegungen und politische Gewichtungen wurden für die Bewertung der Wichtigkeit nicht berücksichtigt.

Die Aufzählung der Forschungslücken erfolgt in Struktur und Reihenfolge der Arbeitsthemen.

a) Forschungslücken synthetischer Forschungsansatz (Stickstoffkreislauf/-kaskade, Prozessketten)

Getreu dem Zitat „dich im Unendlichen zu finden, musst unterscheiden, dann verbinden“ kommt die Verbindung – sprich Synthese – erst nach der Unterscheidung, nach dem Einzelprozess. Die Interviews haben gezeigt, dass einzelne Stufen in der Kaskade noch weniger gut bekannt sind als andere:

Einzelprozesse

Bei folgenden Einzelprozessen sind trotz intensiver Forschung immer noch Wissenslücken bezüglich dem Verständnis der Prozesse aber auch deren Messung, der Quantifizierung des Beitrages einzelner N-Flüsse vorhanden (in der folgenden Aufzählung nach Häufigkeit der Nennung in den Umfragen und Quellen und damit nach Wichtigkeit geordnet). Zu einzelnen gewichtigen Stickstoffflüssen in der Schweiz fehlen quantitative Angaben oder die Daten sind veraltet, teil-

weise sind die Daten zwar neu, aber die Unsicherheiten sind gross. Generell betrifft dies die induzierten Flüsse: Emissionen aus den Böden in die Atmosphäre, Deposition aus der Atmosphäre auf die Böden, Auswaschung und Abschwemmung aus Böden in die Hydrosphäre und Abfluss aus der Hydrosphäre ins Ausland. Was z.B. die Nitratauswaschung betrifft, so gibt es zwar Modelle; sie wurden aber in den vergangenen Jahren nicht mehr angewendet und sollten unbedingt aktualisiert/erweitert werden.

⇒ Forschungslücken Stickstoff:

Quantifizierung der Nitratauswaschung in Abhängigkeit von Düngemittel, Bodentypen/-bearbeitung.

Verständnis des Prozesses sowie Quantifizierung der Denitrifikationsverluste im Boden in Abhängigkeit von Bodentypen/-bearbeitung,

Verständnis Entwicklung N-Pools im Boden (Immobilisierung/ Mineralisierung/ Humusbildung) und mögliche Steuerung dieser Prozesse,

Quantifizierung der biologischen N_2 -Fixierung,

NH_3 -Trocken-/Nassdeposition und NH_3 -Verluste quantitativ erfassen,

Prozessverständnis Anammox-Reaktion und deren Bedeutung für die schweizerische Landwirtschaft.

Gesamte Stickstoffkaskade betrachten

Entwickeln von Stickstoffflussmodellen, die in der Lage sind, die gesamte Kaskade der Tierhaltungs- und Anbausysteme zu umfassen, um die Ganzheit der Systeme besser zu verstehen und um beispielsweise „pollution swapping“²² bei Planung und Modellierung von Massnahmen vermeiden zu können. Am Beispiel der Schweiz, welches als klassisches Grasland für die Produktion von Milch und (Rind-)fleisch prädestiniert ist, wird die Optimierung der für eine nachhaltige Produktion erlaubten Emissionen (z.B. Ammoniak und Lachgas) vor dem Hintergrund der Raumnutzung bedeutend sein. Dazu braucht es eine Stickstoffbilanz mit „full nitrogen approach“²³ und Langzeitbeobachtungen.

²² Beispiel: Ammoniak-Minderung kann Lachgasbildung verstärken

²³ Wird auch im Rahmen von NINE und NitroEurope angestrebt

⇒ **Forschungslücken Stickstoff:**

Erarbeiten/erweitern belastbarer Messdaten über die gesamte N-Kaskade– verallgemeinerbar nach Tierkategorie, Haltungssystem, klimatische Variation, Funktion, Management.

Modellierung der Bodenprozesse (Entwicklung der N-Pools/Mobilisierung und Denitrifikation, Nitratauswaschung) inkl. N-Fixierung weiterentwickeln.

Modelle mit den Messdaten validieren. Modellapplikationen mit Sensitivitätsanalysen und Bestimmung der Unsicherheiten ausstatten.

Weitere europäische/globale Initiativen im Auge behalten und deren Erkenntnisse und Ergebnisse partizipieren (v.a. Project Concept 6, NinE).

Weiterführen und ausdehnen bzw. vermehrtes Schweizer Engagement in den „Kyoto-Experimenten“ in NitroEurope: Experimentelle Bestimmung aller N-Flüsse auf Feldskala, Parzellen- und Betriebsebene: Prozesse zur N-Flusskette Fütterung-Tierhaltung-Hofdüngerlagerung/-Ausbringung.

Langzeitbeobachtung von empfindlichen Ökosystemen, um Verständnis der N-Deposition und ihrer Wirkung zu gewinnen.

b) Forschungslücken Ernährung/Nachhaltigkeit/

Nachhaltige Sollzustände aufzeigen

Aus Sicht der Forschung ist aufzuzeigen, wie die schweizerische Landwirtschaft unter den politisch definierten Zielen wie der sicheren Versorgung der Bevölkerung, dem Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen und der Pflege der Kulturlandschaft, einer nachhaltigen Produktion, den Umweltnormen, dem Erhalt der Biodiversität, etc. in den Jahren 2020-2030 aussehen kann, welche Ernährungsformen damit verträglich sind und wo allenfalls naturwissenschaftliche Gesetze einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Landwirtschaft sehr hohe Kosten auferlegen. Die Forschung soll auch verschiedene Aufgabenteilungen zwischen der schweizerischen und der europäischen oder globalen Landwirtschaft aufzeigen: Gibt es nachhaltigere Aufgabenteilungen, um mit geringeren Stickstoff Inputs eine höhere Effizienz zu erreichen? Kann dies in Einklang mit den Zielen zum Selbstversorgungsgrad erreicht werden? Wo sind die Stärken der Schweiz für die landwirtschaftliche Produktion, welches sind die „Kernkompetenzen“? Welche Nahrungsmittel wollen wir in der Schweiz in Zukunft produzieren bzw. welche können hier am nachhaltigsten produziert werden? Wie kann die Schweizer Landwirtschaft aussehen, wenn ausländisches Futter und synthetischer Dünger aus Haber-Bosch Prozess zukünftig rarer bzw. teurer werden?

⇒ **Forschungslücken Stickstoff:**

Sind die Umweltziele Landwirtschaft, die direkt mit Stickstoffverbindungen zu tun haben (max. 25'000 t Ammoniakemissionen pro Jahr, max. 25 mg Nitrat pro Liter in Gewässern, die der Trinkwassernutzung dienen, 50% Reduktion der landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer gegenüber 1985) in der Schweiz erreichbar?

Wie gross sind die N-Reduktionspotenziale in den bedeutendsten und mit den grössten Unsicherheiten behafteten Flüssen Fütterung-Tierhaltung-Hofdünger-Pflanzenbau inkl. Bodenemissionen?

Wie können die Unsicherheiten und N-Verluste reduziert und die N-Effizienz gefördert werden, wie die N-Kreisläufe besser geschlossen werden?

Welche Rolle kann dabei z.B. die biologische Stickstofffixierung einnehmen und wie kann man diese stärken? (In diesem Bereich sind die Aktivitäten im Rahmen von NinE, Project Concept 6 und 7 im Auge zu behalten und gegebenenfalls zu koordinieren.)

c) Forschungslücken globale Entwicklungen/Klimawandel

Vulnerability (Verletzbarkeit, Schadenanfälligkeit) durch Klimawandel aufzeigen

Welches sind aus Sicht der Forschung die bedeutendsten Klimarisiken für die Schweizer Landwirtschaft und ihre internationale Verflechtung? Welchen Einfluss haben sie auf Selbstversorgungsgrad und Dünger-/ Futtermittelimporte im Hinblick auf die Zielvorstellungen der Agrarpolitik? Wo ortet die Forschung die wichtigsten Einflüsse des veränderten Klimas auf die landwirtschaftlichen Kulturen in der Schweiz und auf Vieh-/Milchwirtschaft und wo ist die schweizerische Landwirtschaft besonders verletzlich und schadenanfällig? Wie ändert sich die Kohlenstoff-Stickstoff-Kopplung unter dem veränderten Klima, wie antworten die Stickstoffflüsse auf die Veränderungen, was bedeutet das für die spezifisch schweizerischen Bedingungen, und welche Rolle spielt dabei der Stickstoff?

⇒ **Forschungslücken Stickstoff:**

Welches sind die wichtigsten Einflüsse des Klimawandels auf N-Kreisläufe in den für die Schweiz typischen Landwirtschaftsregionen: Änderungen in der Verfügbarkeit des Stickstoffs, der N-Fixierung, der N-Verluste in Atmosphäre, Hydrosphäre, Pedosphäre? Was ist der Einfluss auf die wichtigsten Nutzpflanzen (Getreide, Kartoffeln, Zuckerrüben etc.), welche Kulturen sind gefährdet?

Wie ändert sich die C-/N-Kopplung unter dem veränderten Klima, wie antworten die

Stickstoffflüsse auf die Veränderungen (Änderungen der Stickstoff-Senken/-Quellen) und was bedeutet das für die spezifisch schweizerischen Bedingungen?

Wie gross sind die Unsicherheiten der gesuchten Aussagen? Es sollen auch Inputs geliefert werden für den gesellschaftlichen Diskurs über den Umgang mit Unsicherheiten respektive mit den Risiken, die mit jedem Entscheid und jedem Nicht-Entscheid in Kauf genommen werden.

Mitigation (Verringerung, Minderung) von landwirtschaftlichen N_2O - und NO_x -Emissionen

Wo sieht die Forschung die grössten Reduktionspotenziale für klimawirksame Verluste, welche dieser Potenziale sind technisch, wirtschaftlich, sozial und politisch realisierbar?

⇒ Forschungslücken Stickstoff:

Welches sind die wichtigsten Parameter für die Klimawirksamkeit der Stallbausysteme, der Fütterung, der Düngerketten und der Anbausysteme?

Welche Rollen spielen dabei die verschiedenen Stickstoffverbindungen und -umwandlungen?

Welches ist namentlich die Rolle der Denitrifikation und wie gross sind die Unsicherheiten?

Adaptation (Anpassung)

Politik, Verwaltung und Gesellschaft werden in den kommenden Jahren Anpassungsmassnahmen an den Klimawandel für die Landwirtschaft realisieren.

⇒ Forschungslücken Stickstoff:

Welchen Einfluss haben die vorgesehenen Anpassungsmassnahmen der Landwirtschaft an den Klimawandel auf die landwirtschaftlichen N-Kreisläufe?

d) Forschungslücken zur Einbindung der Landwirtschaftsforschung in die Gesellschaft/Wirtschaft

Die Resultate der N-Forschung dienen letztlich der Erhaltung und Weiterentwicklung der Landwirtschaft auf technischer, ökonomischer, politischer und sozialer Ebene. Dazu sind je eigene Forschungszweige angesprochen, die mit ihren Resultaten und neuen Fragen u.U. wieder zur N-Forschung zurückkommen. Wie kann die N-Forschung ihre Resultate kommunizieren und was

für Forschungen sind in der Folge angesprochen? Ein weiteres Thema ist die Kontroverse über low- und high-Input Systeme, in welcher der Stickstoff eine zentrale Rolle spielt. Die landwirtschaftliche Forschung soll Tatsachen liefern, auf denen der gesellschaftliche Diskurs geführt werden kann.

⇒ Forschungslücken Stickstoff:

Wie können bereits vorhandenen Daten und Erkenntnisse besser genutzt und verfügbar gemacht werden?

Was kann die N-Forschung für die sozial- und politikwissenschaftliche Forschung zwecks Überwindung politischer Defizite im Dienste der Umsetzung naturwissenschaftlicher Befunde für die Reduktion von N-Emissionen beitragen?

Was kann die N-Forschung beitragen, um die Herstellung von Saatgut und landwirtschaftlichen Geräten zu ermöglichen, die mehr Nachhaltigkeit in der Produktion schaffen?

Wie kann die N-Forschung Erfahrungswissen sammeln, auswerten und für die Optimierung low/high-input Systeme nutzbar machen?

⇒ Weitere Forschungslücken:

Welche ökonomischen und politologischen Steuerungsinstrumente müssen unter besonderer Berücksichtigung des schweizerischen Systems der Direktzahlungen entwickelt werden, um die den Stickstoff betreffende international vorgegebene Zielsetzung (z.B. OSPAR, Göteborger Protokoll), bzw. der nationalen Umweltnormen (z.B. LRV) langfristig zu erreichen?

Wie können die Regelwerke Direktzahlungen, GRUDAF, etc angepasst werden, um die Landwirtschaft konsequent auf geringere Stickstoffverluste (und effizientere Stickstoffnutzung) auszurichten und dabei auch das Verursacherprinzip zu berücksichtigen? Dabei sind auch allfällige Zielkonflikte (Tierwohl, Klima) zu identifizieren.

Was für Bedingungen kann die N-Forschung identifizieren, die das Landwirtschaftssystem mit der zunehmend urbanisierten Gesellschaft optimal verknüpfen?

e) Forschungslücken zur Integration der räumlichen Aspekte

Die Forschung sollte vermehrt aufzeigen, wie die Schweiz als Teilsystem von Europa/Erde verstanden werden kann bezüglich Stickstoff, Landwirtschaft, Ernährung: Gibt es nachhaltige Aufgabenteilungen zwischen der schweizerischen und der europäischen oder globalen Landwirtschaft und wie kann eine solche internationale Aufgabenteilung erreicht werden? Wo sind die

Stärken der Schweiz für die landwirtschaftliche Produktion, welches sind die „Kernkompetenzen“? Welche Nahrungsmittel wollen wir in der Schweiz in Zukunft produzieren bzw. welche können hier am nachhaltigsten produziert werden?

⇒ **Forschungslücken Stickstoff:**

Wie können Stoffflussanalysen auf europäischer, nationaler, regionaler und Betriebsstufe verknüpft werden um Optimierungsmöglichkeiten in Richtung nachhaltiger Nahrungsmittelproduktion innerhalb der Schweiz zu identifizieren?

Interregionale Optimierungsmöglichkeiten der N-Flüsse, um z.B. die heutigen hot spots der schweizerischen Landwirtschaft, d.h. die Gebiete mit maximalen Ammoniakemissionen, nachhaltig umzuwandeln.

5.3.2. ZUSAMMENFASSUNG FORSCHUNGSLÜCKEN, PRIORISIERUNG

Tabelle 8 auf den folgenden Seiten fasst die im vorangehenden Kapitel nach übergeordneten Themen aufgezählten Forschungslücken Stickstoff und verknüpft sie

- › mit Stichworten resp. Zitaten aus den Interviews,
- › mit den fünf Arbeitsthemen, vgl. Kpt 5.3.1: a) synthetischer Forschungsansatz, b) Ernährung/Nachhaltigkeit, c) globale Entwicklungen/Klimawandel, d) Einbindung Landwirtschaftsforschung in die Gesellschaft/Wirtschaft, e) Integration der räumlichen Aspekte.
- › mit den betroffenen Stoffflüssen, sofern sich überhaupt eine direkte Zuordnung herstellen lässt und sofern es sich um grosse Frachten und/oder grosse Unsicherheiten handelt.

Diese Darstellung ermöglicht eine **Priorisierung der Forschungslücken**. Die Autoren der vorliegenden Studie benutzen dazu die folgenden drei Kriterien:

1. Wenn eine Forschungslücke einen **grossen N-Fluss** (grosse N-Fracht in t N pro Jahr) betrifft, trägt das zu einer hohen Priorität bei.
2. Wenn eine Forschungslücke einen N-Fluss betrifft, der mit einer **grossen Unsicherheit** (absolut in t N pro Jahr) behaftet ist, trägt das zusätzlich zu einer hohen Priorität bei.
3. Je mehr der fünf **Arbeitsthemen** (Kap. 5.2) durch eine Forschungslücke tangiert werden, umso grösser wird deren Bedeutung und Wichtigkeit, umso mehr Forschungsrichtungen und Institutionen sind angesprochen und umso höher ist deren Priorität zu anzusetzen.

In Tabelle 8 ist in der hintersten Spalten die Priorität in Form einer Zahl zwischen 1 und 6 angegeben. Jede Nennung eines Arbeitsthemas und jede Nennung für einen grossen Fluss und für eine grosse Unsicherheit wird mit einem Punkt bewertet. Die Prioritäten lassen sich auf diese Weise klassieren:

- › Punktzahl 6: Höchste Priorität
- › Punktzahl 5: Hohe Priorität
- › Punktzahl 4, 3, 2, 1: mittlere,..., geringere Prioritäten

Es gilt zu beachten, dass die Forschungslücken in Bezug auf **Kosten und Nutzen explizit NICHT untersucht und bewertet** wurden. Ebenso wenig wurden die Forschungslücken **politisch** gewichtet. Eine umfassende Priorisierung nach wissenschaftlichen, thematischen, ökonomischen und politischen Kriterien ist Aufgabe der auftraggebenden Amtsstellen respektive der Verwaltung.

FORSCHUNGSLÜCKEN					
Stichwort	Forschungslücke	Stichworte und verkürzte Zitate aus Interviews	Arbeits-the-men	Flüsse	Pri-or.
Stickstoff-Prozesse					
Ganzheitliche Experimente	Planung von full nitrogen approach Experimenten, Interpretationen	Ganze N-Flusskette betrachten (Stadelmann, Richner). Erfassung gesamter Stickstoffbilanz auf Parzellen-/Betriebsebene (Huguenin-Elie). Bedeutung der versch. N-Flüsse am Total ist sehr unsicher (Sutton). System analysis is key, system boundaries should not be set at too low scales (Schroder).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp.	› Flux › Unsh.	5
Potenziale N-Effizienz	Potenziale zur Erhöhung der N-Effizienz, zur Schliessung der N-Kreisläufe identifizieren	N Fixierungsleistung in Abhängigkeit der angepflanzten Futterpflanzen zu wenig bekannt (Huguenin-Elie). Kenntnis über symbiotische N ₂ -Fixierung in Gras-/Ackerbausystem (Richner) und für gesamte Schweizer Landwirtschaft (Oberson) nötig.	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp.	› Flux › Unsh.	6
Grenzen N-Effizienz	Naturwissenschaftlichen Grenzen für die Steigerung der N-Effizienz erforschen.	Einflussfaktoren N-Effizienz zu wenig verstanden (Menzi, Oberson).	a) Synthet. F. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	4
Zulässiger N-Input	Grenzen für N-Inputs zur Erreichung Umweltziele Landwirtschaft	Quantifizierung von N-Flüssen/-Verlusten und N-Pools (Richner, Stadelmann, Vertes). Verteilung von Dünger nach Ausbringung im Boden verstehen (Neftel).	a) Synthet. F. d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	5
Düngerverbrauch	Potenziale zur Reduktion des Düngerverbrauchs identifizieren.	Wenig bekanntes Schicksal des gedüngten, aber nicht wirksamen Stickstoffs im Boden (Berner)	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp.	› Flux › Unsh.	6
N-Verluste	Potenziale zur Reduktion von Verlusten in Tierhaltung/Pflanzenbau identifizieren	Nitrifikationspotential bestimmen (Willmann et al.). Minimierung NH ₃ Emissionsmessaufwand (Menzi). Quant. Nitratverluste abhängig von Kulturfolge/Hof- und Mineraldünger nötig (Peter). Quant. NH ₃ Verluste auf Feld- und Stallebene nötig (CH spezifisch) (Neftel).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	6
Nitrat	Nitratauswaschung Wald (induzierte Flüsse, vgl 2.4.3)	Mechanismen zur Nitratauswaschung im Wald wenig verstanden (Braun).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	5
Erfolgskontrolle	Keine unabhängige Erfolgskontrolle der Massnahmen	Unabhängige Methoden zur Erfolgskontrolle von Stickstoffminderungsstrategien benötigt (Sutton, Oenema)	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	5

FORSCHUNGSLÜCKEN					
Stichwort	Forschungslücke	Stichworte und verkürzte Zitate aus Interviews	Arbeitsthe- men	Flüsse	Pri or.
Kopplung C-/N-Kreislauf	Kopplung unter schweiz. Produktionsbedingungen im Hinblick auf die Klimaerwärmung erforschen.	Zusammenhänge klimatische Variation - N-Prozesse unbekannt (Keck). Interaktionen verstärkten Stickstoffkreislaufs - andere biogeochemischen Kreisläufe im Zusammenhang mit dem Klimawandel unverstanden (Gruber). Einfluss Klimaänderung - N-Flüsse unklar (Stadelmann), Auswirkung Klimawandel auf die Mineralisierung unbekannt (Willmann et. al).	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	6
Anammox	Bedeutung Schweiz nicht bekannt	Neue N-Umwandlungsreaktionen wie Anammox sind in ihrer Tragweite in der Umwelt noch wenig verstanden (Wehrli)	a) Synthet. F e) räuml. Asp	› Unsh.	3
Messen					
Ganzheitliche Feldexperimente	Experimentelle Bestimmung aller N-Flüsse auf Feldskala für die wichtigsten schweiz. Produktionsbedingungen.	Gesamt-Experimente zu N-Umsatz, N-Prozesse, N-Verluste und N-Flüsse (Stadelmann, Oberholzer). Quantifizierung N-Flüsse/Verluste Weidesysteme, Nutztiere, Boden-Pflanzenwurzel.	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	6
Luftstickstoff	Wenig bekannte N ₂ -Flüsse	N ₂ -Emissionen sind nur indirekt ermittelbar (Peter).	a) Synthet. F. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	4
Ammoniak	Fehlende Daten NH ₃ (induzierte Flüsse, vgl 2.4.3)	Routinemässige Methodik zur Quantifizierung NH ₃ -Trockendeposition fehlt (Sutton).	a) Synthet. F. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	3
N-Deposition	Fehlende Zeitreihen	Abschätzung der historischen N-Depositionen (Braun).	a) Synthet. F. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	4
Messmethode		Kostengünstige Messung von Spurengasemissionen, Weiterentwicklung Tracermethoden nötig (Richner).			
Nitrat	Messdaten Nitratauswaschung (induzierte Flüsse, vgl 2.4.3)	Keine quantitative Werte zu Nitratauswaschung (Menzi, Oenema) & keine Differenzierung nach Düngemittel (Peter) und Bodenbearbeitung (Richner).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima	› Flux › Unsh.	4

FORSCHUNGSLÜCKEN					
Stichwort	Forschungslücke	Stichworte und verkürzte Zitate aus Interviews	Arbeitsthe- men	Flüsse	Pri or.
Modellieren					
Ganzheitliche N-Modellierung	Entwickeln, kalibrieren, validieren von ganzheitlichen Stickstoffflussmodellen.	Ganzheitliches Modell nötig um Szenarien zu entwickeln (Berner). N-Flüsse modellieren um agrarpolitische Strategien & praktische Empfehlungen & Lenkungsmaßnahmen einzuleiten (Stadelmann). Full nitrogen approach important to consider many synergies and antagonisms (Sutton). Konzept der Stickstoffkaskade implementieren (Neftel). Es fehlt belastbare Datengrundlage (nach Tierkategorie/Haltungssystem/klimatische Variation/Funktion/Management) (Keck). Quellen reaktiver N-Verbindungen gut bekannt, Senken nicht (Wehrli). Optimierte Modelle nötig um N-Flüsse besser zu schätzen (Oberholzer).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	6
Bodenprozesse	Verständnis N-Mobilisierung, Denitrifikation erweitern. Modelle sind vorhanden, es fehlen aber aktuelle, flächendeckende Resultate und Quantifizierung der Prozesse und ihrer Unsicherheiten.	Dynamik organischer N-Pool zu wenig verstanden (Wehrli). Entwicklung der Humusgehalte unverstanden (Richner). Keine Daten zu Bruttomineralisierung und Immobilisierung (Oberson). NO und N ₂ O Austauschflüsse im Boden modellieren (Neftel). Grosse Unsicherheiten der Lachgasemissionskoeffizienten (Peter) & Quellen/Pathways von N ₂ O unsicher (Oenema). Verständnislücke Soil organic matter turn-over modelling (Vertes) & N-Flüsse an der Schnittstelle Boden-Atmosphäre (Richner). Quantifizierung Denitrifikationsverlust sehr unsicher & schwierig (Oenema, Neftel, Sutton, Vertes, Menzi, Stadelmann, Oberholzer, Braun)	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	6
Nitrat	Nitratauswaschung	Modellierung der Nitratauswaschung: Modelle sind vorhanden, es gibt aber Abweichungen zu jüngsten Beobachtungen (Willmann). Keine quantitative Werte zu Nitratauswaschung (Menzi, Oenema) & keine Differenzierung nach Düngemittel (Peter) und Bodenbearbeitung (Richner).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp.	› Flux › Unsh.	5
N-Pools	Mangelhafte Kenntnisse	Bessere Kenntnisse zu N-Pools im Boden sind nötig, um agronomische Steuerung zu optimieren (Stadelmann, Richner, Vertes). N-Bodenpools grosse Herausforderung (Richner).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp.	› Flux › Unsh.	5
Umweltziele Landwirtschaft	Erreichbarkeit Umweltziele Landwirtschaft ist ungewiss	Unter welchen Bedingungen (Düngerinput, Bestockung) sind die den Stickstoff betreffenden Umweltziele Landwirtschaft erreichbar? (siehe Kap.5.1), Vgl auch Kpt 2.5; Implikationen aus der Stoffflussanalyse	a) Synthet. F. d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	5

FORSCHUNGSLÜCKEN					
Stichwort	Forschungslücke	Stichworte und verkürzte Zitate aus Interviews	Arbeitsthe- men	Flüsse	Pri or.
Mitigation	Reduktionspotenziale Klimagase	Klimawirksamkeit von Stallbausystem /Düngerketten/ Anbausystem zuwenig bekannt (Berner)	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima	› Flux › Unsh.	4
Adaptation	Wirkung von Anpassungsmassnahmen auf N-Kreislauf	Der Einfluss der klimatischen Variation auf die Stickstoffprozesse ist wenig verstanden (Keck). Vgl auch Kpt 2.5; Implikationen aus der Stoffflussanalyse.	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp	› Flux › Unsh.	5
Unsicherheiten	Mangelhafte Kenntnisse	Quantifizieren der Unsicherheiten in allen Modellrechnungen (Menzi, Oene- ma, Peter; siehe auch Kap. 2.4.2 und Kpt 2.5; Implikationen aus der Stoffflus- sanalyse	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp	› Unsh.	4
Wissenstransfer, Umsetzung, Kosten					
Traditionelles Wissen	Traditionelles Wissen in der landwirt- schaftlichen Forschung zu wenig be- kannt/genutzt	Wie kann traditionelles Wissen/Erfahrungswissen genutzt werden, um bspw. natürliche Stickstofffixierung, Ressourceneffizienz und Mineraldüngereinsatz zu optimieren. (IAASTD 2008, 2009, UNCTAD 2009, Royal Society 2009))	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. d) Ges./Wirt.	› Flux › Unsh.	5
Datentransfer Forschung	Wie können die relevanten Daten und Informationen zum Stickstoff in der For- schung besser bekannt und verfügbar gemacht werden?	Belastbare Grundlagendaten zur Verbreitung von Produktionstechnik und Emissionsraten benötigt (Richner, Stadelmann).	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. d) Ges./Wirt.	› Flux › Unsh.	5
Internat. Aus- tausch	Know-how-/Erfahrungsaustausch CH- Europa	Europäische Forschungen im Auge behalten, deren Erkenntnisse und Er- gebnisse partizipieren (v.a. Project Concept 6, NinE).	a) Synthet. F. c) glo. E./Klima e) räuml. Asp		3
Bewusstsein N-Problematik	Mangelnde Kenntnisse in der Öffentlich- keit	Bedeutung des N-Kreislaufs und das Wissen um die aktuellen/künftigen Probleme im Umfeld Ernährung/Klimawandel in Wissenschaft, Politik, Bevöl- kerung vermehrt bekannt machen.	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt.	› Flux › Unsh.	5
Kosten	Zu wenig Kenntnis von Kostenfolgen	Quantifizieren der Kosten, die durch Stickstoffproblematik in der Umwelt verursacht werden.	b) Ernähr./Nh. d) Ges./Wirt.		1

FORSCHUNGSLÜCKEN					
Stichwort	Forschungslücke	Stichworte und verkürzte Zitate aus Interviews	Arbeits- the- men	Flüsse	Pri- or.
Wissen um- setzen	Forschungsbeiträge zur Anpassung der landw. Regelwerke (DZV, GRU-DAF,...), um Landwirtschaft auf effizientere N-Nutzung/Reduktion N-Verluste auszurichten.	Ohne Reduktion der Futtermittelimporte und Anpassung Viehbestand sind N-Ziele nicht erreichbar (Bundi). Ökolog. Direktzahlungen nicht nach Giesskannenprinzip verteilen, sondern zielgerichtet nach ökolog. Nutzen ausrichten (Stadelmann), Informationsfluss zu verwendeten Technologien & Tauglichkeit von Anwendern zu Forschung & Verwaltung nötig (Vertes). Forschung soll besser & verständlicher gegenüber Zielpublikum (Anwender) kommunizieren (Schröder).	a) Synthet. F. d) Ges./Wirt.		2
Hot spots	Verbesserung der hot spots Problematik in der Schweiz	Interregionale Optimierungsmöglichkeiten der N-Flüsse, um z.B. die heutigen hot spots der schweizerischen Landwirtschaft, d.h. die Gebiete mit maximalen Ammoniakemissionen, nachhaltig umzuwandeln.	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp.	› Flux	5
"Low/high input	Künftige Ausrichtung der schweiz. Landwirtschaft	Es braucht eine Modellierungsstudie mit spezifischen Szenarien (am restriktiven System schrauben, ökonomische Auswirkungen modellieren. Low Input/high output) (Berner). Vgl. auch Kpt 2.5.	a) Synthet. F. b) Ernähr./Nh. c) glo. E./Klima d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp.	› Flux	6
Raumplanung	Verknüpfung Landwirtschaft-Urbanisierung	Was für Bedingungen kann die N-Forschung identifizieren, die das Landwirtschaftssystem mit der zunehmend urbanisierten Gesellschaft optimal verknüpfen?	a) Synthet. F. d) Ges./Wirt. e) räuml. Asp.		3

Tabelle 8 Forschungslücken Stickstoff. Beschreibung mit Stichworten und verkürzten Zitaten. Zuordnung zu den fünf Arbeitsthemen a) synthetischer Forschungsansatz, b) Ernährung/Nachhaltigkeit, c) globale Entwicklungen/Klimawandel, d) Einbindung Landwirtschaftsforschung in die Gesellschaft/Wirtschaft, e) Integration der räumlichen Aspekte. Wo grosse N-Flüsse („Flux“) und/ oder grosse Unsicherheiten („gr. Unsh.“) der N-Flüsse betroffen sind, stehen Einträge in der Spalte „Flüsse“. Die Punktzahl in der Spalte „Priorität“ berechnet sich aus der Anzahl Nennungen in den Spalten Arbeitsthemen und Flüsse. 6: Höchste Priorität, 5: hohe Priorität, 4-1: mittlere bis geringere Prioritäten.

EPILOG

ZUR ENTSTEHUNG DER VORLIEGENDEN STUDIE

Die vorliegende Studie wurde, wie im Impressum vermerkt, von einer Expertengruppe begleitet. An mehreren Meetings wurden Meilensteine diskutiert und das Vorgehen besprochen:

- › Ergebnisse der Stickstoff-Stoffflussanalyse
- › Entwurf den Fragen an die Interviewpartner respektive an die schriftlich Befragten und deren Auswahl
- › Auswertung der Antworten und Diskussion der Arbeitsthemen
- › Auswahl der Forschungslücken und deren Priorisierung

Im Anschluss an die Zusammenstellung der Forschungslücken formulierten die Autoren zusammen mit den externen Experten Handlungsempfehlungen zuhanden der Auftraggeber BLW und BAFU (siehe unten).

Nach Erstellung des Entwurfs Schlussbericht wurden die Befragten zu einer Feedback-Runde eingeladen, an der ihnen die Ergebnisse vorgestellt wurde. Generell wurde der Bericht zustimmend zur Kenntnis genommen, die Forschenden bestätigten mehrheitlich, dass die von ihnen genannten Forschungslücken Eingang in das Dokument gefunden hatten. Sie formulierten aber auch vereinzelt Kritik und empfahlen, die Hauptergebnisse im Kapitel 5 stärker an die Aussagen der vorangehenden Kapitel anzubinden. Die Kritikpunkte wurden so weit möglich in der Schlussredaktion berücksichtigt. Die Forschenden äusserten sich auch zu den genannten Handlungsempfehlungen und gaben mehrheitlich ihrer Zustimmung Ausdruck.

EMPFEHLUNGEN DER AUTOREN UND EXPERTEN

Die folgenden Handlungsempfehlungen finden die Autoren und externen Experten wichtig. Sie seien an dieser Stelle kurz genannt. **Es gilt zu beachten, dass diese die Meinung der Autoren und Experten wiedergeben und mit den Ansichten der Auftraggeber nicht überein zu stimmen brauchen.**

1. Nationales Forschungsprogramm Stickstoff

Angesichts der Interdisziplinarität der identifizierten Forschungslücken engagieren sich BLW und BAFU zusammen mit weiteren Partnerinstitutionen beim zuständigen Staatssek-

retariat für Bildung und Forschung (SBF) im Eidg. Departement des Innern (EDI) für die Lancierung eines neuen nationalen Forschungsprogramms (NFP) unter dem Titel wie z.B. „Effiziente Stickstoffnutzung“ oder „Stickstoff – Ressource und Umweltfaktor“. Darin werden Szenarien definiert und durchgespielt, in denen die Bedeutung des Stickstoffs für Landwirtschaft, Nahrungsmittelproduktion, Umwelt- und Klimaschutz sichtbar wird: Szenarien vom Referenzszenario mit bereits beschlossenen Politikmassnahmen bis hin zum Szenario starker Nachhaltigkeit inkl. verschiedener Annahmen zur Klimaentwicklung und zur Entwicklung globaler Rahmenbedingungen. Es sollen explizit auch innovative Ansätze durchgespielt werden (z.B. Stickstoffabgaben, ausschliesslich biologische Landwirtschaft) um die Bandbreite an Handlungsmöglichkeiten und deren Konsequenzen bezüglich Erreichung der Umweltziele Stickstoff, Selbstversorgungsgrad (Auslandabhängigkeit bezügl. Nahrungsmittel/Futtermittel/Dünger/Energieträger), zukünftigen Formen der Landwirtschaft, ökonomischen/sozialen Auswirkungen, Implikationen Direktzahlungssystem zu analysieren. Sensitivitäten und Unsicherheiten der Szenarien sind aufzuzeigen.

BLW und BAFU binden die Aktivitäten des Schweizer Forschenden **verstärkt und prominenter** in europäische Stickstoffprojekte wie NitroEurope und NinE ein, wo zurzeit viel Aktivität herrscht und Know-how bezüglich Einzelprozesse/Prozessketten generiert. Zudem vernetzen sie das neue NFP mit den Bestrebungen der im Dezember 2009 in Kopenhagen unterzeichneten globalen Forschungsallianz zur Reduktion von Treibhausgasen²⁴. Die beiden Ämter schlagen Schweizer Beiträge zu einer internationalen Forschungsagenda in den Bereichen „Klimawirkung von green box Fördermassnahmen“ (Direktzahlungen) oder zu einer multifunktionalen Landwirtschaft zur Unterstützung von Ökosystem-Dienstleistungen vor.

2. **Forschungsförderung / -koordination**

Das BLW berücksichtigt bei seiner Forschungsplanung die Ergebnisse der vorliegenden Evaluation und insbesondere die Gewichtung der Forschungslücken gemäss vorangehendem Kapitel 5.3. Weitere Ämter, wie z.B. BVET, BFE, BAG, DEZA, SECO sowie NGOs werden konsultiert, um eine interdisziplinär und langfristig ausgerichtete Forschungsstrategie mit klarem Leistungsauftrag für die einzelnen Forschungsinstitute zu entwickeln. Das BLW

²⁴ Ziel der Forschungsallianz ist, die Forschungsressourcen und -aktivitäten bezüglich Reduktion von Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft und die Förderung des internationalen Informationsaustausches zwischen Forschungsinstitutionen und zwischen Forschenden zu verstärken und zu koordinieren.

spricht sich bei diesen Aktivitäten vorgängig mit dem BAFU ab²⁵, um Koordination mit BAFU-Aufträgen im selben Themenkreis sicherzustellen.

- › Das BLW stärkt die landwirtschaftliche Forschung und verwandte Forschungsthemen strukturell (finanziell, personell, langfristige Finanzierung), weil diese wichtige Pfeiler zur langfristigen Sicherung der Ernährung der schweizerischen Bevölkerung darstellen und weil in Übereinstimmung mit zitierten Quellen (z.B. IAASTD 2009, Weltbank 2008, Royal Society 2009, UNCTAD 2009) unmittelbarer Handlungsbedarf besteht. Das BAFU trägt im Rahmen seiner Strategie zur Auftragsvergabe diese Bemühungen mit.
- › Nachdem der IAASTD- Bericht (2009) sowie der Bericht der Weltbank (2008) das „Weiter wie bisher“ als nicht zukunftstauglich bewertet haben, berücksichtigt das BLW in der landwirtschaftlichen Forschung vermehrt auch auf starke Nachhaltigkeit ausgerichtete Konzepte, z.B. bei Züchtung lokal angepasster Pflanzensorten, Reaktivierung traditionellen Wissens, low input, high output, biologischer Schädlingsbekämpfung.
- › Neben den klassischen landwirtschaftlichen Themen wird dem BLW empfohlen, auch die Problematik von Marktversagen vermehrt in die landwirtschaftliche Forschungsplanung einzubeziehen.

*Die erste Empfehlung „Nationales Forschungsprogramm“ ist eine **zeitlich begrenzte Massnahme** (4-5 Jahre) und soll einen Impuls zu mehr interdisziplinärer Forschung im Bereich der landwirtschaftlichen Forschung als Voraussetzung für den Wandel hin zu mehr Nachhaltigkeit erzeugen. In Ergänzung dazu dient die zweite Empfehlung zur **langfristigen** Forschungsförderung.*

3. Beratendes Organ

Auf Initiative von BLW und BAFU prüft der Bund den Nutzen einer Transformation und Aufwertung des schweizerischen nationalen FAO-Komitees (CNS-FAO) in ein „Beratendes Organ für Ernährung/Ernährungssicherheit“ (Arbeitstitel) und empfiehlt den Departementen EVD, EDI und UVEK, dies in die Wege zu leiten. Als Vorbild soll das OcCC²⁶, welches

²⁵ BLW und BAFU haben unterschiedliche Strukturen: Das BLW verfügt über eigene Forschungsinstitutionen (Agroscope), die einen Leistungsauftrag des BLW erfüllen.

²⁶ Organe consultatif sur les changements climatiques - Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung. Ende 1996 erteilte Bundesrätin Ruth Dreifuss der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (scnat) das Mandat (welches vorläufig bis Ende 2011 befristet ist) zur Bildung eines Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung (Organe consultatif sur les changements climatiques, OcCC). Die Idee hinter dem Mandat war die Bildung eines Gremiums, das sich mit Forschungsfragen im Bereich Klima und Klimaänderung befasst und eine Schnittstelle zwischen Forschung, Wirtschaft und Verwaltung bildet. In diesem Gremium sollen Forschungsergebnisse, Probleme und Lösungsansätze diskutiert und Stellungnahmen und Empfehlungen zuhanden der zuständigen Departemente und Bundesämter formuliert werden. (www.occc.ch)

von EDI und UVEK 1996 eingesetzt worden ist, dienen. Die Zielsetzung soll erweitert werden. Namentlich erarbeitet es Vorschläge für **eine nationale Strategie „Ernährung und Landwirtschaft“** mit konkreten, von internationalen Zielen abgeleiteten, schweizerischen Zielen (z.B. zu Ernährungssicherheit/ Selbstversorgungsgrad, Ernährung und Gesundheit, Futtermittelimportanteil, Biodiversität auf Landwirtschaftsflächen, Reduktion der Emissionen und Verbesserung der Gewässer- und Bodenqualität, Umgang mit nicht erneuerbaren Ressourcen) heraus. Die personelle Zusammensetzung dieses Organs wäre entsprechend zu ergänzen bzw. anzupassen.

4. **Aktive Kommunikationsstrategie**

Die Forschungsergebnisse zum Stickstoff und zum Klimawandel müssen zusammen mit ihren Auswirkungen den Landwirten und der Bevölkerung praktisch vermittelt und kommuniziert werden, denn ohne Grundverständnis des Problems ist der Strukturwandel in Richtung Nachhaltigkeit nicht zu realisieren. BLW und BAFU berücksichtigen bei der Vergabe von Forschungsaufträgen auch die gezielte Kommunikation der Ergebnisse und deren Aufnahme in Aus- und Weiterbildungsprogramme von Fachhochschulen/Hochschulen.

BLW und BAFU sind sich bewusst, dass eine effizientere Nutzung des Stickstoffs und eine Reduktion der Umweltbelastungen nicht nur durch intensivere Forschung und aktive Kommunikation erreicht wird, sondern dass sie entschlossenes Handeln auf allen Ebenen erfordert: Von der Politik und den Behörden (Vollzug), von der Wirtschaft und der Gesellschaft, denn schliesslich sind nicht nur Produzenten, sondern auch Konsumenten betroffen, die mit ihren Lebens- und Ernährungsgewohnheiten die treibenden Stickstoffflüsse mittelbar beeinflussen.

LITERATUR

- A. Aeberhard et. al 2009:** A. Aeberhard, S. Rist, Transdisziplinäre Wissensproduktion im Bio-landbau, CDE, UniBE, AGRAR 10/09, 2009
- BAFU 2002:** Empirical critical loads for N, UNECE expert workshop proceedings, BAFU 2002
- BAFU 2009:** Ammoniakemissionen in der Schweiz: Neuberechnung 1990-2007, Bonjour Engineering GmbH, Leuenberger Energie und Umweltprojekte, METEOTEST, Oetiker+Partner AG, Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (SHL), Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Abteilung Luftreinhaltung und NIS, Sektion Luftqualität, 10.09.2009, Bern. <http://agrammon.ch/downloads/> [20.01.10]
- BAFU 2010:** Stickstoffflüsse in der Schweiz, Stoffflussanalyse für das Jahr 2005, Heldstab J., Reutimann J., Biedermann R., Leu D. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU, Umwelt-Wissen Nr. 1018. Bern..
- BAFU/BLW 2008:** Umweltziele Landwirtschaft, Umwelt-Wissen Nr. 08|20, Bern 2008
- BFE/BLW/ARE/BAFU 2009:** Biomassestrategie Schweiz, Strategie für die Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse, Bern, 23. März 2009
- Biala et al. 2007:** Low Input Farming Systems: an Opportunity to Develop Sustainable Agriculture Proceedings of the JRC Summer University Ranco, Editors: Katarzyna Biala, Jean-Michel Terres, Philippe Pointereau, Maria Luisa Paracchini 2-5 July 2007.
- BLW 2004:** Agrarbericht des Bundesamts für Landwirtschaft: Bericht des Bundesrates, Bern 2004
- BLW 2007:** Protokolle und Unterlagen zum 1. und 2. N-workshop, BLW, Bern 2007
- BLW 2008:** Agrarbericht des Bundesamts für Landwirtschaft: Bericht des Bundesrates, Bern 2008
- BLW/BAFU 2010:** Stickstoff-Flüsse der schweizerischen Landwirtschaft, Evaluation und Bewertung des Stands der Forschung, Dokumentationsband. INFRAS im Auftrag des Bundesamts für Landwirtschaft und des Bundesamts für Umwelt, Bern.
- Bongert und Albrecht 2008:** Lehren aus dem Weltagrarbericht. GAIA 17/3, 2008
- Bundesrat 2009a:** Bericht des Bundesrats zum Postulat Stadler, Bern, 18. Aug. 2009
- Bundesrat 2009b:** Weiterentwicklung des Direktzahlungssystems WZ, Bern, 6.5.2009
- Bundesrat 2009c:** Luftreinhalte-Konzept (LRK), Bern 2009
- De Vries et. al 2003:** De Vries, Kros, Oenema und de Klein: Uncertainties in the fate of nitrogen II: A quantitative assessment of uncertainties in major nitrogen fluxes in the Netherlands. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 66, 71-102, 2003

- DEZA 2009:** Analytical framework for food security, INFRAS mandated by SDC, global programme food security, 1st draft report, Zürich August 2009
- EKL 2005:** Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene 2005. Schriftenreihe Umwelt Nr. 384. Bern 2005
- 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://www.umwelt-online.de/recht/eu/90_94/91_676.htm [20.01.10]
- FiBL 2009:** Mündliche Mitteilung FiBL, Frick, Oktober 2009
- Fischlin 2009:** Berücksichtigen wir in der Klimapolitik genügend Sicherheitsmargen? GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society, Volume 18, Number 3, September 2009, pp. 193-199(7)
- FOEN 2010:** Switzerland's Greenhouse Gas Inventory, National Inventory Report under the UNFCCC and under the Kyoto Protocol, Submission 15 April 2010, Federal Office for the Environment, Bern. Daten zum Treibhausgasinventar siehe: <http://www.bafu.admin.ch/klima/09570/09574/index.html?lang=de> [26.03.2010]
- Galloway et al 2003:** Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B. und Cosby B.J.: The nitrogen cascade. BioScience 53, 341-356, 2003
- Galloway et. al 2004:** Galloway J.N., Bekunda M., Cai Z., Erisman J.W., Freney J., Howarth R.W., Martinelli L.A., Scholes M.C. und Seitzinger S.P.: A preliminary assessment of "Changes in the global nitrogen cycle as a result of anthropogenic influences". In: Third International Nitrogen Conference, Nanjing (China), 12-16 October 2004.
- Gruber et al 2008:** Gruber, N. and J. N. Galloway: An Earth system perspective on the global nitrogen cycle, Nature, 451, 293-296, 2008.
- GRUDAF 2009:** Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. Forschungsanstalten Agroscope Changins-Wädenswil ACW und Agroscope Reckenholz ART 2009.
- 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 1993.
- IAASTD 2008:** Global Summary for Decision Makers of the International Assessment of Agricultural Science and Technology for Development (2008)
- IAASTD 2009:** Weltagrarbericht Synthesebericht. dt. Übersetzung Hamburg University Press, Herausgegeben von Stephan Albrecht und Albert Engel. 2009

- IAW 2006:** Entwicklung der landwirtschaftlichen Emissionen umweltrelevanter Stickstoffverbindungen. Info Agrar Wirtschaft, Schriftenreihe 2006/1. Gruppe Agrar-, Lebensmittel und Umweltökonomie des Instituts für Umweltentscheidungen, ETH, 2006.
- IGKB 2009:** Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee IGKB.
<http://www.igkb.de/> [20.01.2010].
- IKSR 2000:** Bestandesaufnahme der Phosphor- und Stickstoffeinträge 1996. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz.
- Internutrition 2009:** <http://www.internutrition.ch/> [20.01.10], news point newsletter
- INFRAS 2009:** Analytical framework for food security, SDC, global programme food security, 1st draft report, Zürich August 2009
- IPCC 1997:** Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reporting Instructions (Volume 1-3). Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs4.htm> [26.02.2010]
- IPCC 2000:** Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (IPCC GPG). Intergovernmental Panel on Climate Change.
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/> [09.03.2010]
- IPCC 2007:** Climate Change: Synthesis Report on 4th Assessment report, IPCC 2007
- Kotschi 2009:** The role of organic farming for global food security, J.Kotschi, GAIA 18/3, 2009
- Leu et al. 1986:** D. Leu, R. Biedermann, J. Dettwiler, J. Hoigné und F.X. Stadelmann: Bericht über Nitrate im Trinkwasser Standortbestimmung 1985; Mitt. Gebiete Lebensm. Hyg. 77, 227- 315, 1986.
- NEU 2009:** NitroEurope, www.nitroeurope.eu [20.01.2010]
- OcCC 2007:** Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, OcCC, Organe consultatif sur les changements climatiques, Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, ISBN-Nummer: 978-3-907630-26-6
- OcCC 2008:** Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. OcCC - Organe consultatif sur les changements climatiques, Bern, 47 pp. ISBN: 978-3-907630-33-4
- Oenema et al. 2003** Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. Europ. J. Agronomy 20 (2003) 3/16
- OSPAR 2009:** OSPAR Commission, Protecting and preserving the North-EAST Atlantic and its resources. <http://www.ospar.org/> [6.4.2009].

- PG N-Haushalt CH 1996:** Strategie zur Reduktion von Stickstoffemissionen. Bericht der Projektgruppe Stickstoffhaushalt Schweiz, z. Hd. EDI du EVD. Hrg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landwirtschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 273, Bern 1996.
- Peter et al. 2009:** S. Peter, M. Hartmann, M. Weber, B. Lehmann, W. Hediger: "THG 2020": Möglichkeiten und Grenzen zur Vermeidung landwirtschaftlicher Treibhausgase in der Schweiz, Info Agrar Wirtschaft Schriftenreihe 2009/1, 2009
- Royal Society 2009:** Reaping the benefits, Science and the sustainable intensification of global agriculture, London, October 2009
- Sanchez 1997:** Sanchez, P.A., Sheperd, K.D., Soule, M.D., Place, F.M., Buresh R.J., Izac A.M.N., Mokwanye, A.U., Kwesiga, F.R., Ndiritu, C.G., and Wooner, P.L. 1997. Soil fertility replenishment in Africa: An investment in natural resource capital. In: Replenishing soil fertility in Africa. R.J. Buresh, P.A. Sanchez and F. Calhoun (eds.). pp. 1-46. Madison, Soil Science Society of America.
- Schlesinger 2009:** On the fate of anthropogenic nitrogen. PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences) 106, 203-208, 2009
- Shepherd/Chambers 2007:** Managing nitrogen on the farm: The devil is in the detail, J. Sci. Food Agric 87:558–568 (2007)
- SRU 2008:** Umweltgutachten 2008: Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels, Berlin 2008 (http://www.umweltrat.de/cln_137/DE/Publikationen/Umweltgutachten/umweltgutachten_node.html) [05.10.2010]
- SRU 2004:** Sondergutachten: Meeresumweltschutz für Nord- und Ostsee, Berlin 2004 (http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2004_SG_Meeresumweltschutz_fuer_Nord_und_Ostsee.html) [05.10.2010]
- UBA 2009a:** Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoffemissionsminderungsstrategie, UBA, April 2009 (<http://www.umweltbundesamt.de/luft/downloads/emissionen/hg-stickstoffemissionsminderungsstrategie.pdf>) [05.10.2010]
- UBA 2009b:** Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen. Umweltbundesamt Deutschland, April 2009 (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3813.pdf>) [05.10.2010]
- UNCTAD 2009:** Trade and Environment Review. Promoting poles of clean growth to foster the transition to a more sustainable economy, UNCTAD, Geneva November 2009. Siehe dort "Organic agriculture – A productive means of low-carbon and high biodiversity food pro-

duction”, p. 112 by Urs Niggli, Director, Research Institute of Organic Agriculture, Switzerland. http://www.unctad.org/en/docs/ditcted20092_en.pdf [19.02.2010]

UNECE 2007: Leitfaden über Techniken zur Vermeidung und Verringerung von Ammoniakemissionen, UNECE 2007

UNECE 2009a: Managing the European Nitrogen Problem, A Proposed Strategy for Integration of European Research on the Multiple Effects of Reactive Nitrogen, UNECE Task Force on Reactive Nitrogen (TFRN) & Nitrogen in Europe (NinE), 2009

UNECE 2009b: Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): <http://www.unece.org/env/lrtap/> [26.03.2010]

UNECE 2009c: Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)
http://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.htm [5.10.2010]

UNFCCC 1997: Kyoto Protokoll, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): <http://unfccc.int/2860.php>. [5.10.2010]

UNO 2009: The millennium development goals report, New York 2009

World Bank 2008: World Development Report 2008, Agriculture for Development, World Bank 2008