

**Lachgasemissionen aus
der Schweizer Landwirtschaft**
**Emissions de protoxyde d'azote
de l'agriculture suisse**

Martin Schmid, Albrecht Neftel, Jürg Fuhrer



Eidgenössische Forschungsanstalt für
Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz
Station fédérale de recherches en agroécologie et
agriculture, Zurich-Reckenholz

Vorwort

Der vorliegende Bericht entstand vor dem Hintergrund der Klimakonvention, welche die Schweiz dazu verpflichtet, die durch den Menschen verursachten Emissionen von Treibhausgasen wie CO₂, Methan und Lachgas detailliert zu erheben und nach Möglichkeiten zu suchen, diese Emissionen im Interesse der Klimastabilität zu vermindern. Eine Verminderung der Lachgasemissionen bedeutet gleichzeitig auch eine effizientere Ausnützung der wertvollen Ressource Stickstoff in der Landwirtschaft. Der Bericht ist der zweite Teil einer Trilogie, die sich mit den Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft in der Schweiz befasst. Der erste Teil „Methan-Emissionen der schweizerischen Landwirtschaft“ wurde 1998 in der Schriftenreihe Umwelt des BUWAL (Nr. 298) publiziert.

Lachgas ist rund 310-mal klimawirksamer als das bekannteste und bedeutendste Treibhausgas CO₂. Relativ kleine Mengen können daher massgebliche Beiträge zur nationalen Treibhausgasbilanz leisten. Gut 70 Prozent der anthropogenen Lachgasemissionen in der Schweiz sind landwirtschaftlichen Ursprungs. Das BUWAL hat deshalb das Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL) der FAL beauftragt, eine Übersicht über den Kenntnisstand zu den Mengen, der Entstehung und Entwicklung sowie zu den Auswirkungen landwirtschaftlicher Lachgasemissionen zu erstellen. Besondere Aufmerksamkeit wurde methodischen Fragestellungen der Emissionserfassung gewidmet, um hier einen Beitrag zur internationalen Verbesserung der Grundlagen zu leisten.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse auf übersichtliche und transparente Weise zusammen. Er bildet eine solide Basis, um die Datenqualität beurteilen und verbessern zu können und dient damit auch den steigenden Anforderungen der Klimakonvention an die Dokumentierung der Grundlagen zur Bestimmung der Emissionen im nationalen Treibhausgasinventar.

Die Studie zum Lachgas ist im Rahmen einer Zusammenarbeitsvereinbarung zwischen dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft und dem Bundesamt für Landwirtschaft mit seinen Forschungsanstalten entstanden. Die mehrjährige Forschungserfahrung des heute in die FAL integrierten IUL auf dem Gebiet der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen wird vom BUWAL auch bei der Bearbeitung weiterer anstehender Fragen genutzt werden. So ist eben eine Studie auf dem Gebiet der Bindung von atmosphärischem CO₂-Kohlenstoff in landwirtschaftlichen Böden der Schweiz angelaufen.

Wir danken allen, die zum Gelingen dieses Berichts beigetragen haben, ganz herzlich.

*Bundesamt für Umwelt, Wald und
Landschaft (BUWAL)*

*Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie
und Landbau (FAL)*

Gilbert Verdan

Vizedirektor

Franz X. Stadelmann

*Leiter Produkt Umweltressourcen/
Landwirtschaftlicher Umweltschutz*

Avant-propos

Le présent rapport a été rédigé dans le contexte de la Convention sur les changements climatiques, qui oblige la Suisse à faire des relevés détaillés des émissions anthropiques de gaz à effet de serre tels que le CO₂, le méthane et le protoxyde d'azote et à chercher des moyens de réduire ces émissions afin d'assurer la stabilité du climat. Diminuer les émissions de protoxyde d'azote signifie notamment utiliser de manière plus efficace l'azote – cette ressource précieuse – dans l'agriculture. Ce rapport constitue la deuxième partie d'une trilogie consacrée aux émissions de gaz à effet de serre dans l'agriculture. La première partie „Methan-Emissionen der schweizerischen Landwirtschaft“ (Emissions de méthane dues à l'agriculture suisse) a été publiée en 1998 en allemand dans le Cahier de l'environnement 298 de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEPF).

L'effet du protoxyde d'azote pour le réchauffement du climat est 310 fois plus grand que celui du CO₂, le gaz à effet de serre d'origine anthropique le plus connu et le plus important. C'est pourquoi des quantités relativement faibles peuvent contribuer de manière déterminante à influencer le bilan national des gaz à effet de serre. Plus de 70 % des émissions anthropiques de protoxyde d'azote en Suisse sont dues à l'agriculture. L'OFEPF a donc chargé l'Institut de recherches en protection de l'environnement et en agriculture (IUL) rattaché à la Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture (FAL) d'établir une vue d'ensemble faisant le point sur les quantités d'émissions de protoxyde d'azote dues à l'agriculture, leur origine, leur évolution et leurs effets. Une attention particulière a été accordée aux méthodes utilisées pour le relevé des émissions, dans le but de contribuer à une amélioration de ces méthodes sur le plan international.

Ce rapport présente les résultats de l'étude de manière claire et transparente. Il constitue une base solide pour évaluer et améliorer la qualité des données. Il sert de ce fait aussi à documenter les données de base en vue de déterminer les émissions dans le cadre de l'inventaire des gaz à effet de serre – une exigence de la Convention sur les changements climatiques.

L'étude sur le protoxyde d'azote est le fruit d'une collaboration entre l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage et l'Office fédéral de l'agriculture ainsi que ses instituts de recherche. Dans le futur, l'OFEPF profitera de la longue expérience de l'IUL – aujourd'hui intégré dans le FAL - dans le domaine des émissions de gaz à effet de serre dues à l'agriculture pour étudier d'autres questions. C'est ainsi qu'une nouvelle étude a été lancée. Elle portera sur la fixation du carbone contenu dans le CO₂ atmosphérique dans les sols agricoles de Suisse.

Nous remercions vivement tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce rapport.

*Office fédéral de l'environnement, des forêts
et du paysage (OFEPF)*

*Station fédérale de recherches en agroécologie
et en agriculture (FAL)*

*Gilbert Verdan
Sous-directeur*

*Franz X. Stadelmann
Chef Ressources environnementales/
Protection de l'environnement en agriculture*

Preface

The present report has been developed against the background of the Climate Convention, under which Switzerland is obliged to keep detailed records of anthropogenic emissions of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O), and to seek ways to reduce these emissions, in the interests of climatic stability. A reduction in the emissions of nitrous oxide implies, at the same time, more efficient use of nitrogen as a valuable resource in agriculture. The report is the second part of a trilogy, dealing with emissions of greenhouse gases from agriculture in Switzerland. The first part "Methan-Emissionen der schweizerischen Landwirtschaft" ("Methane Emissions from Swiss Agriculture") was published in 1998 by the Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) as volume no. 298 in the series of environmental reports "Schriftenreihe Umwelt".

The global warming potential of nitrous oxide is about 310 times greater than that of carbon dioxide, which is the best-known, and most important greenhouse gas. For this reason, relatively small quantities of nitrous oxide can make a considerable contribution to the national net greenhouse gas production. About 70 percent of anthropogenic emissions of nitrous oxide in Switzerland come from agriculture. Therefore, the SAEFL commissioned the Institute for Environmental Protection and Agriculture (IUL) of the Swiss Federal Research Station for Agroecology and Agriculture (FAL) to prepare an overview of the state of knowledge with regard to quantities of nitrous oxide, its formation, current and future trends, and the effects of agricultural emissions of nitrous oxide. In order to make a contribution to improving basic information at the international level, particular attention has been paid to the methodological aspects of emission recording.

The present report gives an overview of the results in a transparent way. It constitutes a solid basis for assessing the quality of data and to make improvements, and in this way serves to meet the increasing requirements of the Climate Convention as regards documentation of the methodological basis for the determination of emissions in the national inventory of greenhouse gases.

The study on nitrous oxide was elaborated in the context of an agreement of collaboration between the Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) and the Federal Office for Agriculture and its research stations. Several years of research experience at the IUL (which has now been integrated into the FAL) in the field of agricultural greenhouse gas emissions are also being exploited by the SAEFL, working on other matters facing us. Indeed, a study has begun on the sequestration of carbon from atmospheric CO₂ in agricultural soil in Switzerland.

We wish to express our thanks to all those who have played a part in producing this report.

*Swiss Agency for the Environment,
Forests, and Landscape (SAEFL)*

*Swiss Federal Research Station for
Agroecology and Agriculture (FAL)*

*Gilbert Verdan
Vice-Director*

*Franz X. Stadelmann
Department Head Natural Resources/
Environmental Protection*

Abstracts

Lachgasemissionen aus der Schweizer Landwirtschaft

Der vorliegende Bericht fasst den wissenschaftlichen Kenntnisstand über die Entstehung, die Messung und die Modellierung der Emissionen von Lachgas (N_2O) aus der Landwirtschaft zusammen. Er beschreibt detailliert die Methode zur Abschätzung der Lachgasemissionen aus der Schweizer Landwirtschaft, ihrer zeitlichen Entwicklung von 1901 bis 2020 und ihrer geographischen Verteilung. Ein prozessorientiertes Modell wird vorgestellt, mit welchem der Einfluss der Bewirtschaftung und der Umweltbedingungen auf die Lachgasemissionen von Wiesen simuliert werden kann. Die Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft machen zur Zeit gut 5 % der Treibhausgasemissionen (in CO_2 -Äquivalenten) der Schweiz aus. Die wichtigsten Quellen sind dabei die Verwendung von Hof- und Mineraldüngern, die Lagerung von Mist und die indirekten Emissionen, welche nach der Auswaschung von Nitrat und nach der Ammoniakverflüchtigung entstehen. Die Lachgasemissionen der Schweizer Landwirtschaft sind bis in die 80er Jahre als Folge der Intensivierung der Stickstoffflüsse angestiegen. Seit 1990 sinken sie wieder, weil weniger mineralischer Stickstoffdünger eingesetzt wird und weniger Nutztiere gehalten werden. Die Unsicherheit bei der Schätzung der Lachgasemissionen ist wegen der hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität der Emissionen und wegen der Schwierigkeiten bei der Messung und Modellierung sehr gross. Zur genaueren Abschätzung werden zuverlässige Langzeitmessreihen der Lachgasemissionen aus den verschiedenen Quellen und verbesserte prozessorientierte Modelle der Entstehung und Emission von Lachgas benötigt. Die Lachgasemissionen könnten durch die Verminderung der Stickstoffflüsse bei der Düngung und bei der Fütterung der Nutztiere oder durch eine Einschränkung der Tierproduktion gesenkt werden.

Emissions de protoxyde d'azote de l'agriculture suisse

Le présent rapport résume l'état des connaissances scientifiques sur la formation, la mensuration et la modélisation des émissions de protoxyde d'azote (N_2O) provenant de l'agriculture. Il décrit de manière détaillée la méthode permettant d'estimer les émissions de protoxyde d'azote de l'agriculture suisse, leur développement au cours du temps, de 1901 jusqu'à 2020, et leur répartition géographique. Un modèle axé sur les processus est présenté. Il permet de simuler l'influence des pratiques agricoles et des conditions environnementales sur les émissions de protoxyde d'azote des prairies. Les émissions de protoxyde d'azote de l'agriculture représentent actuellement 5 % des émissions de gaz à effet de serre (en équivalents CO_2) en Suisse. Les sources les plus importantes sont l'utilisation d'engrais de ferme et d'engrais minéraux, le stockage de fumier et les émissions indirectes créées par le lessivage des nitrates et par les volatilisations d'ammoniacque. Les émissions de protoxyde d'azote de l'agriculture ont augmenté jusque dans les années 80, conséquence de l'intensification des flux d'azote. Elles sont en baisse depuis 1999 parce que l'utilisation des engrais azotés minéraux et le cheptel de bétail de rente ont diminué. L'insécurité lors de l'estimation des émissions de protoxyde d'azote est élevée à cause de la forte variabilité temporelle et spatiale des émissions et à cause des difficultés lors de la mesure et de la modélisation. Une estimation plus précise nécessite des mesures à long terme fiables et l'amélioration des modèles axés sur les processus de la formation et de l'émission de protoxyde d'azote. Les émissions de protoxyde d'azote

pourraient être diminuées par une réduction du flux d'azote lors de la fertilisation et de l'affouragement des animaux de rente ou par une limitation de la production animale.

Emissioni di gas esilarante derivanti dall'agricoltura in Svizzera

Il presente rapporto riassume le attuali conoscenze scientifiche sull'origine, il rilevamento e la modellizzazione delle emissioni di gas esilarante (N₂O) derivanti dall'agricoltura. Esso descrive nel dettaglio il metodo di valutazione delle emissioni di gas esilarante provenienti dall'agricoltura in Svizzera, il loro andamento temporale dal 1901 al 2020 e la loro distribuzione geografica. Viene presentato un modello orientato al processo col quale è possibile simulare l'influenza della coltivazione agricola e delle condizioni ambientali sulle emissioni di gas esilarante provenienti dai prati. Le emissioni di gas esilarante derivanti dall'agricoltura costituiscono attualmente ben il 5 % delle emissioni svizzere di gas a effetto serra (in equivalenti CO₂). Le principali fonti sono l'uso di concimi da fattoria e minerali, il deposito di letame e le emissioni indirette, derivanti dal dilavamento di nitrati e dalla volatilizzazione dell'ammoniaca. Le emissioni di gas esilarante dell'agricoltura svizzera sono aumentate fino agli anni ottanta in conseguenza dell'intensificazione dei flussi di azoto. Dal 1990 sono andate nuovamente diminuendo perché si utilizzano meno concimi azotati minerali e meno animali da fattoria. L'incertezza nella valutazione delle emissioni di gas esilarante è molto elevata a causa della notevole variabilità temporale e spaziale delle emissioni e per via delle difficoltà di rilevamento e modellizzazione. Una più precisa valutazione richiede delle serie di rilevamenti, attendibili nel lungo periodo, delle emissioni di gas esilarante dalle diverse fonti e migliori modelli orientati al processo sull'origine e l'emissione di gas esilarante. Le emissioni di gas esilarante potrebbero essere ridotte diminuendo i flussi di azoto nella concimazione e nel foraggiamento degli animali da fattoria o contenendo la produzione animale.

Nitrous oxide emissions from Swiss agriculture

The present report summarizes the current state of knowledge concerning sources, measurements, and modelling of nitrous oxide (N₂O) emissions from agriculture. The method used to estimate nitrous oxide emissions from Swiss agriculture is described in detail, and the development of the calculated emissions between 1901 and 2020, and their spatial distribution are presented. A process-based model is outlined which can be used to simulate the influence of land management and of variable environmental conditions on nitrous oxide emissions from grasslands. At present, nitrous oxide from agricultural sources contributes about 5 % to total greenhouse gas emissions (in CO₂-equivalents) of Switzerland. The main sources are the application of farmyard manure and mineral fertilizers, manure storage, and indirect emissions caused by leaching of nitrate and volatilization of ammonia. Nitrous oxide emissions from agricultural sources in Switzerland increased until the mid 1980's due to the intensification of the nitrogen flows. After 1990 they declined because of the reduction in mineral fertilizer use and declining cattle numbers. Considerable uncertainty in nitrous oxide emission estimates is due to the large spatial and temporal variability, and because of difficulties in measuring and modelling emissions. Thus, improvements in the accuracy of emission estimates would depend on long-term measurements of nitrous oxide emissions from the various sources, and improved process-based models for the nitrous oxide production and emission. Emissions of nitrous oxide could be reduced primarily by lowering the nitrogen flows associated with fertilization and animal nutrition, or by reducing animal production.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	14
2	Résumé	20
3	Riassunto	26
4	Summary	32
5	Einführung	38
5.1	Ausgangslage	38
5.2	Lachgas (N ₂ O)	38
5.3	Lachgas in der Atmosphäre	39
5.4	Globales Budget	40
5.5	Treibhauseffekt	41
5.6	Klimakonvention und Kyoto-Protokoll	42
5.7	Treibhausgasemissionen der Schweiz	43
5.8	Abbau der Ozonschicht	43
6	Stickstoff in der Landwirtschaft	45
6.1	Uebersicht	45
6.2	Stickstoffquellen für die Landwirtschaft	46
6.3	Stickstoffflüsse innerhalb der Landwirtschaft	47
6.4	Senken für Stickstoff aus der Landwirtschaft	48
6.5	Folgen der verstärkten Stickstoffflüsse	49
6.6	Stickstoffbilanz der Schweizer Landwirtschaft	50
7	Entstehung von Lachgas	52
7.1	Uebersicht	52
7.2	Denitrifikation	53
7.3	Nitrifikation	54
7.4	Anteile von Nitrifikation und Denitrifikation an den Lachgasemissionen	55
7.5	Landwirtschaftliche Lachgasquellen	55
7.6	Weitere Lachgasquellen	56

8	Messung der Lachgasemissionen	59
8.1	Uebersicht	59
8.2	Räumliche und zeitliche Variabilität der Lachgasemissionen	59
8.3	Messungen mit Kammern	60
8.4	Mikrometeorologische Messungen	61
8.5	Messungen der Lachgaskonzentration im Boden	62
9	Inventarisierung der Lachgasemissionen	63
9.1	Zweck eines Lachgasinventars	63
9.2	Die Methoden IPCC und IULIA	63
9.3	Berücksichtigte Emissionsquellen	64
9.4	Verursacherprinzip	65
9.5	Eintrag von Mineraldüngern	65
9.6	Stickstoffausscheidungen der Nutztiere	66
9.7	Aufteilung der Stickstoffausscheidungen der Nutztiere	67
9.8	Stickstoffverluste an die Atmosphäre (mit nachfolgender Deposition)	68
9.9	Stickstoffeinträge aus Hofdüngern	69
9.10	Stickstoffeinträge aus der Einarbeitung von Ernterückständen	70
9.11	Stickstoffeinträge aus Ernterückständen auf Wiesen und Weiden	71
9.12	Biologische Stickstofffixierung	72
9.13	Stickstoffverluste an die Gewässer	73
9.14	Lachgasemissionen aus der Kultivierung organischer Böden	75
9.15	Zusammenfassender Vergleich der Stickstoffflüsse nach IPCC und IULIA	76
10	Lachgasinventar der Schweizer Landwirtschaft	77
10.1	Lachgasinventar des Jahres 1996	77
10.2	Im Inventar nicht berücksichtigte Lachgasemissionen	79
10.3	Fehlerabschätzung	80
10.4	Zeitliche Entwicklung der Lachgasemissionen 1901 – 2020	81
10.5	Geographische Verteilung der Lachgasemissionen	82
10.6	Lachgasemissionen der Testbetriebe	87
10.7	Internationaler Vergleich	88

11	Modellierung der Lachgasemissionen	90
11.1	Uebersicht	90
11.2	Verschiedene Modellansätze	90
11.3	Schwierigkeiten der prozessorientierten Modellierung	91
11.4	Modellierung der Lachgasemissionen mit PaSim	91
11.5	Schlussfolgerungen aus der Modellierung	97
12	Ausblick	98
12.1	Agrarpolitisches Umfeld	98
12.2	Möglichkeiten zur Senkung der Lachgasemissionen	99
12.3	Wissenslücken und Forschungsbedarf	100
Anhang		
A	Berechnungen	102
A.1	Zuordnung der Nutztierkategorien	102
A.2	Stickstoffeinträge aus Ernterückständen und biologischer Fixierung	102
A.3	Stickstoffeinträge in die Gewässer	105
A.4	Berechnungsgrundlagen für die Lachgasemissionen von 1901 bis 2020	105
A.5	Zeitliche Entwicklung der Lachgasemissionen von 1901 bis 2020	109
A.6	Geographische Verteilung des Mineraldüngerverbrauchs im Jahr 1996	110
B	Beschreibung des Modells PaSim zur Berechnung der N₂O-Emissionen	113
B.1	Uebersicht	113
B.2	Variablen und Konstanten	114
B.3	Nitrifikation	116
B.4	N ₂ O-Produktion aus der Nitrifikation	117
B.5	Denitrifikation	117
B.6	Entstehung und Abbau von N ₂ O bei der Denitrifikation	118
B.7	Austausch von N ₂ O zwischen dem Boden und der Atmosphäre	119
B.8	Biologische Stickstofffixierung und Aufnahme von mineralischem Stickstoff durch Pflanzen	122
B.9	Eintrag von Stickstoff durch Ernterückstände	123
B.10	Hofdünger	123
C	Literatur	125

Verdankung

Die Autoren danken allen, die bei der Entstehung dieses Berichtes mitgeholfen haben, besonders Dr. Marcel Riedo für die wertvolle Unterstützung bei der prozessorientierten Modellierung der Lachgasemissionen.

Die Arbeiten zum vorliegenden Bericht wurden vom BUWAL finanziert.

Abkürzungen

BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
FAO	Food and Agriculture Organisation of the United Nations
FAT	Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
IUL	Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft, Bern-Liebefeld
IULIA	am IUL entwickelte Methode zur Inventarisierung der Lachgasemissionen
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
SBV	Schweizerischer Bauernverband
SOM	soil organic matter, organische Bodenmaterial
TS	Trockensubstanz
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change, Klimakovention
WMO	World Meteorological Organisation

1 Zusammenfassung

1.1 Umfeld

Lachgas ist eine Stickstoffverbindung, die von Bakterien bei den natürlichen Prozessen der **Denitrifikation** und der **Nitrifikation** erzeugt wird. Je mehr **Stickstoff** für diese Prozesse zur Verfügung steht, desto mehr Lachgas wird erzeugt. Die **Intensivierung der Landwirtschaft** mit dem Ziel vermehrter Nahrungsmittelproduktion hat zu einer starken Erhöhung der Stickstoffflüsse geführt. Die Landwirtschaft verursacht so den grössten Teil der anthropogenen Lachgasemissionen. Diese Emissionen entstehen entweder **direkt** bei der Anwendung von Mineral- und Hofdüngern und bei der Lagerung von Hofdüngern oder **indirekt** aus dem Stickstoff, welcher mit Ammoniakverflüchtigung und Nitratauswaschung aus der Landwirtschaft verloren geht.

Emittiertes Lachgas verbleibt während gut 100 Jahren in der Atmosphäre und trägt dort zur Verstärkung des **Treibhauseffektes** bei. Schliesslich wird es in der Stratosphäre zu Stickoxiden abgebaut, welche in der Stratosphärenchemie eine wichtige Rolle spielen und den **Abbau der Ozonschicht** fördern.

Die Schweiz hat sich mit der Unterzeichnung der **Klimakonvention** und des **Kyoto-Protokolls** zu einer Senkung der Treibhausgasemissionen und zur regelmässigen Veröffentlichung von **Inventaren** ihrer Treibhausgasemissionen verpflichtet.

In diesem Umfeld (Abbildung 1) ist es die Aufgabe der landwirtschaftlichen Forschung, die Lachgasemissionen aus den verschiedenen landwirtschaftlichen Quellen abzuschätzen und die Prozesse der Entstehung und Emission von Lachgas mit **Messungen** und **prozessorientierten Modellen** zu erforschen.

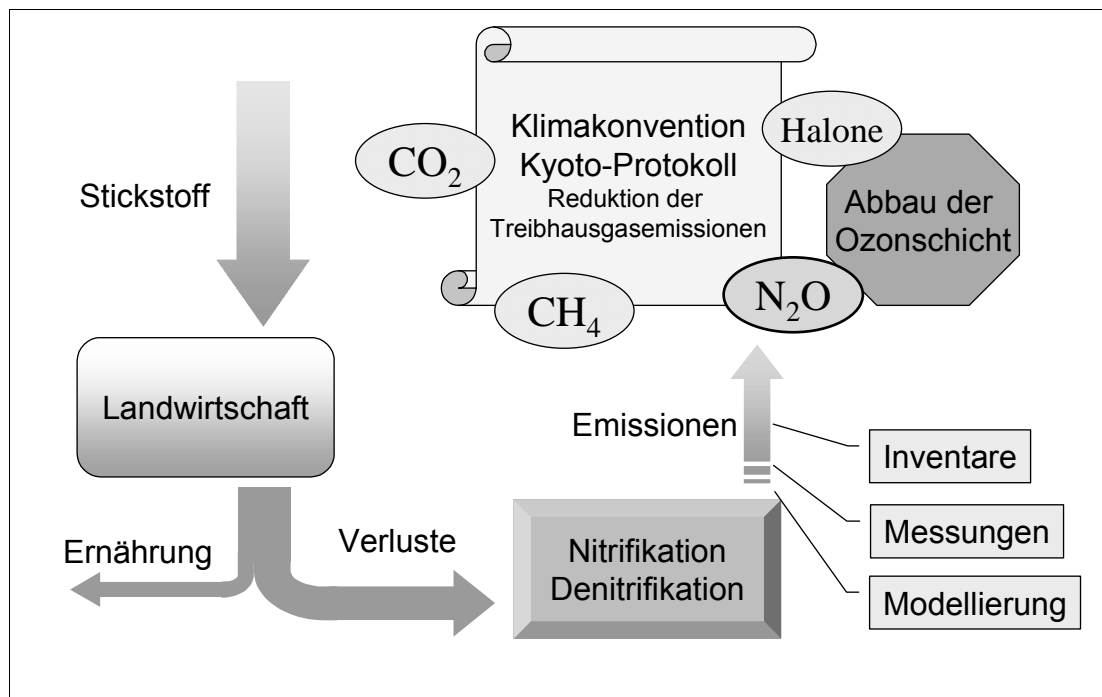


Abbildung 1: Ursachen und Folgen der Entstehung von Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft.

1.2 Fragestellungen

Dieses Projekt wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW) durchgeführt. Es hatte zum Ziel, die Grundlagen für die Einhaltung der Verpflichtungen des Bundes im Zusammenhang mit der Klimakonvention zu verbessern. Dazu wurde folgende **Fragestellung** bearbeitet:

Wieviel Lachgasemissionen werden von der Landwirtschaft verursacht, wie und wo entstehen diese Emissionen und wie teilen sie sich auf die verschiedenen Quellen auf?

Der vorliegende Bericht setzt sich mit dieser Fragestellung auseinander und

- ↳ fasst die **wissenschaftlichen Kenntnisse** über die Entstehung und die Auswirkungen von Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft und die Methoden zur Messung dieser Emissionen zusammen;
- ↳ beschreibt detailliert die **Methoden zur Inventarisierung** der Lachgasemissionen aus der Schweizer Landwirtschaft;
- ↳ zeigt die **zeitliche Entwicklung** von 1901 bis 2020 und die **geographische Verteilung** der Lachgasemissionen;
- ↳ beschreibt Methoden und Ergebnisse der **prozessorientierten Modellierung** der Lachgasemissionen;
- ↳ gibt einen Ueberblick über die Möglichkeiten zur **Senkung** der Lachgasemissionen, beurteilt diese Möglichkeiten aber nicht im Gesamtzusammenhang.

Weiter stellt sich die Frage, wie und um welchen Anteil die Lachgasemissionen reduziert werden können und was die Kosten und Nebenwirkungen möglicher Massnahmen sind. Diese Fragestellung wird im vorliegenden Bericht nur andeutungsweise behandelt.

1.3 Methode der Inventarisierung

Das **IPCC** (Intergovernmental Panel of Climate Change) hat eine Methode zur Inventarisierung der Lachgasemissionen entwickelt. Diese Methode berücksichtigt die **direkten Emissionen**, welche durch Stickstoffeinträge in landwirtschaftliche Böden und bei Lagerung von Hofdüngern entstehen und die **indirekten Emissionen**, welche durch Stickstoffeinträge aus der Landwirtschaft in Gewässer und via die Atmosphäre in andere Oekosysteme verursacht werden. Die einzelnen **Stickstoffflüsse** werden abgeschätzt und die Emissionen durch Multiplikation mit **Emissionsfaktoren** berechnet.

Die IPCC-Methode hat den Vorteil, dass mit ihr die Lachgasemissionen fast ausschliesslich mit den statistischen Angaben der FAO abgeschätzt werden können. Sie soll von Ländern angewendet werden, denen die wissenschaftlichen und statistischen Grundlagen zur Entwicklung einer an ihr Land angepassten Methode fehlen.

Das IPCC fordert aber dazu auf, bei der Inventarisierung der Lachgasemissionen nationale Gegebenheiten soweit möglich zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde ausgehend von der IPCC-Methode die Methode **IULIA** entwickelt. Alle **Stickstoffflüsse** wurden in dieser Methode basierend auf nationalen Statistiken und Forschungsergebnissen der letzten Jahre neu berechnet. Als **zusätzliche Lachgasquellen** sind in der Methode IULIA die biologische Stickstofffixierung und

der Abbau von Ernterückständen auf Wiesen und Weiden berücksichtigt. In der IPCC-Methode werden diese Emissionen nur für Ackerkulturen berechnet, nicht aber für Wiesen und Weiden. Die **Emissionsfaktoren** wurden vom IPCC unverändert übernommen, weil in der Schweiz bisher zu wenige Messungen durchgeführt wurden, um eine Anpassung der Emissionsfaktoren ausreichend begründen zu können.

1.4 Ergebnisse der Inventarisierung

Mit der IPCC-Methode ergeben sich deutlich höhere Werte für die Stickstoffausscheidungen der Nutztiere und für die Nitratauswaschung als mit der Methode IULIA. Die Emissionen sind deshalb nach der Methode IULIA um 14 % niedriger als nach IPCC, obwohl IULIA zusätzliche Emissionsquellen berücksichtigt. Im Folgenden werden nur noch die Ergebnisse der Methode IULIA behandelt, weil diese besser an die Gegebenheiten der Schweizer Landwirtschaft angepasst ist als die Methode IPCC.

Im Jahr 1996 emittierte die Schweizer Landwirtschaft nach der Methode IULIA 5.5 kt N₂O-N. Die wichtigsten Quellen sind der Einsatz (1.0 kt N₂O-N) und die Lagerung (0.9 kt N₂O-N) von **Hofdüngern**, die indirekten Emissionen aus **Gewässern** (1.0 kt N₂O-N) und der Einsatz von **Mineraldüngern** (0.8 kt N₂O-N). Von den 165 kt Stickstoff, die im Jahr 1996 in die Schweizer Landwirtschaft eingebracht wurden, wurden etwa 3.5 % als N₂O in die Atmosphäre abgegeben.

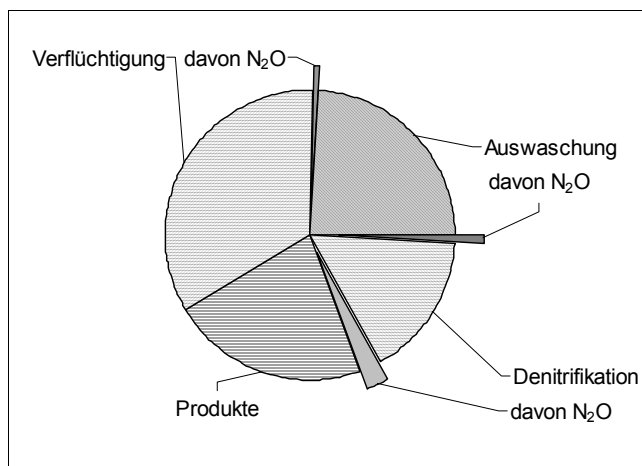


Abbildung 2: Schicksal der 165 kt Stickstoff, welche im Jahr 1996 über Mineraldünger, biologische Fixierung, atmosphärische Deposition und Import von Futtermitteln in die Schweizer Landwirtschaft gelangten, berechnet nach der Methode IULIA. Insgesamt wurden rund 3.5 % des Stickstoffs in Lachgas umgewandelt.

Zu den gesamten **Treibhausgasemissionen** der Schweiz trug das Lachgas im Jahr 1996 8 % bei, davon stammten drei Viertel aus der Landwirtschaft. 82 % der Treibhausgasemissionen waren CO₂ und 10 % Methan.

Die **Entstehung** von Lachgasemissionen bei der Nitrifikation und bei der Denitrifikation hängt stark von den **Umweltbedingungen** ab. Kleine Veränderungen der Bedingungen können grosse Unterschiede in den Emissionen bewirken. Die Emissionen variieren deshalb von Feld zu Feld und sogar innerhalb eines Feldes stark. Zusammen mit der Vielzahl unterschiedlicher Lachgasquellen (verschiedene Kulturen, verschiedene Methoden bei der Hofdüngerlagerung, indirekte Emissionen) führt dies zu sehr grossen **Unsicherheiten** bei der Abschätzung der Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft.

Das IPCC gibt 95 %-Vertrauensintervalle für die Emissionsfaktoren an. Bei Verwendung der maximalen Emissionsfaktoren ergeben sich rund 10 mal grössere Emissionen als bei Verwendung der minimalen Faktoren. Das heisst, es steht nicht eindeutig fest, ob die Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft einen bedeutenden Teil der Treibhausgasemissionen der Schweiz ausmachen oder ob sie praktisch vernachlässigbar sind.

Etwas Vertrauen lässt sich immerhin aus der globalen Lachgasbilanz gewinnen. Die weltweiten Emissionen, berechnet mit der IPCC-Methode, sind nicht allzu weit von den Emissionen entfernt, die für ein ausgeglichenes globales Budget benötigt werden.

Die **zeitliche Entwicklung** (Abbildung 3) zeigt eine deutliche Zunahme der Emissionen mit der Intensivierung der Landwirtschaft vom zweiten Weltkrieg bis 1980. In den 90er Jahren ergeben sich abnehmende Emissionen, verursacht durch die Verminderung der Nutztierzahlen und des Mineraldüngerverbrauchs. Allerdings kann daraus nicht mit Sicherheit geschlossen werden, dass die Lachgasemissionen in den 90er Jahren wirklich abgenommen haben. Die zunehmende Eutrophierung kann in manchen Systemen bei gleichbleibenden Stickstoffeinträgen zu höheren Lachgasemissionen führen, so dass sich einzelne Emissionsfaktoren verändern. Solche Veränderungen können mit den verwendeten Inventarmethoden nicht nachvollzogen werden.

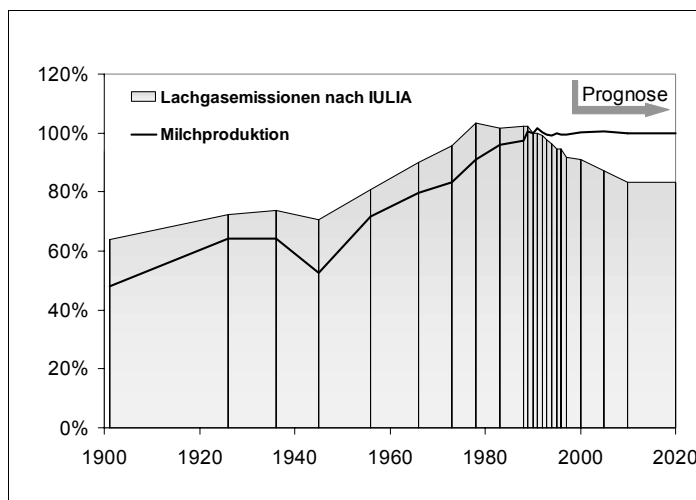


Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der Lachgasemissionen, berechnet nach der Methode IULIA und der Milchproduktion der Schweizer Landwirtschaft von 1901 bis 2020. Die Werte von 1990 entsprechen 100 %. Die Vertikallinien markieren die Jahre, für welche die Emissionen berechnet wurden.

Die Lachgasemissionen wurden für alle Gemeinden der Schweiz mit der Methode IULIA berechnet und in Karten dargestellt. Die **geographische Verteilung** zeigt erwartungsgemäss die höchsten Lachgasemissionen in Gebieten mit intensiver Landwirtschaft. Ein guter Indikator für die Emissionen scheint die Anzahl der Grossvieheinheiten pro Graslandfläche zu sein.

1.5 Prozessorientierte Modellierung der Lachgasemissionen

Simulationen mit prozessorientierten Modellen können zu einem besseren **Verständnis der Prozesse** bei der Entstehung und der Emission von Lachgas führen und bei der Abschätzung von **Emissionsfaktoren** oder bei der Beurteilung der **Wirkung von Massnahmen** zur Senkung der Emissionen helfen. Für die Berechnung der Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden gibt es mehrere Modelle. Mit keinem von ihnen kann aber bisher die Dynamik der Emissionen für verschiedene Standorte zuverlässig vorhergesagt werden. Modelle für die Emissionen aus Gewässern oder aus der Lagerung von Hofdüngern wurden noch nicht entwickelt.

Die prozessorientierte Modellierung der Entstehung und Emission von Lachgas erfordert theoretisch eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung. Mit der Auflösung eines Modells steigt aber auch die Anzahl der Annahmen, welche für die Randbedingungen und die Prozesse des Modells getroffen werden müssen, was den praktischen Nutzen des Modells einschränkt.

Im Rahmen dieses Projektes wurde das Modell **PaSim** (Pasture Simulation Model), ein Modell zur Simulation der Kohlenstoff-, Stickstoff-, Wasser- und Energieflüsse in Grünlandökosystemen, so erweitert, dass mit ihm auch die Lachgasemissionen berechnet werden können. Die ersten Resultate der Simulationen zeigen das Potenzial des Modells auf. Es reagiert sinnvoll auf die wichtigsten Einflüsse, welche für die Lachgasemissionen bestimmend sind. Erste Vergleiche von Simulationen mit Messwerten zeigen eine gute Übereinstimmung. Weitere Vergleiche mit Messresultaten sind aber notwendig, um das Modell verfeinern zu können und Vertrauen in die Vorhersagen des Modells zu gewinnen.

Aus den Simulationen mit PaSim konnten in diesem Projekt einige wichtige Schlussfolgerungen gezogen werden:

- ↳ Durch Düngergaben zur richtigen Zeit können die Erträge erhöht und die Lachgasemissionen gesenkt werden.
- ↳ Die Emissionsfaktoren des IPCC unterschätzen vermutlich die langfristige Wirkung veränderter Düngermengen auf die Lachgasemissionen.
- ↳ Die Vernachlässigung der Lachgasemissionen aus biologischer Fixierung und Ernterückständen auf Wiesen und Weiden in der IPCC-Methode führt zu einer deutlichen Unterschätzung der totalen Emissionen.

1.6 Möglichkeiten zur Senkung der Lachgasemissionen

In der Literatur wurden zahlreiche Möglichkeiten zur Senkung der Lachgasemissionen vorgeschlagen. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Vorschläge für eine effizientere Nutzung des Stickstoffs. Eine **Verminderung der Tierproduktion** würde die Stickstoffverluste und damit die Lachgasemissionen verringern, weil in der Pflanzenproduktion der Stickstoff viel effizienter genutzt werden kann als in der Tierproduktion. **Anpassen der Düngermengen und -zeitpunkte** an den Bedarf der Pflanzen vermindert die Verfügbarkeit von mineralischem Stickstoff für die Entstehung von Lachgas. Durch Massnahmen bei der **Fütterung** kann die Stickstoffverwertung der Nutztiere optimiert und der Stickstoffanfall in den Ausscheidungen vermindert werden.

Die **Erfolgskontrolle** ist ein grosses Problem bei der Senkung der Lachgasemissionen. Eine echte Erfolgskontrolle kann nur mit Messungen sichergestellt werden. Es ist aber sehr schwierig, die Lachgasemissionen zu **messen**, ohne die Prozesse zu beeinflussen, die zur Entstehung der Emissionen führen. Am ehesten ist dies mit mikrometeorologischen Methoden möglich. Diese sind aber aufwendig und nur für grössere Flächen an ebenen Standorten brauchbar. Zudem ist die Extrapolation von Messungen an einzelnen Standorten zu den Emissionen grösserer Gebiete wegen der hohen Variabilität der Emissionen mit grossen Unsicherheiten verbunden.

Selbstverständlich ist es nicht sinnvoll, landwirtschaftliche Prozesse einseitig in Bezug auf die Lachgasemissionen zu optimieren. Jeder Eingriff in den Stickstoffkreislauf hat verschiedene Auswirkungen auf die Umwelt. So dürfen zum Beispiel die Auswirkungen auf die Ammoniakemissionen, die Eutrophierung naturnaher Ökosysteme, die Bodenversauerung, die Gewässerbelastung oder die Methanemissionen bei der Beurteilung von Massnahmen zur Senkung der Lachgasemissionen nicht übersehen werden. Schliesslich muss jede Massnahme auch an den Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion und an der Praxistauglichkeit im Alltag der Bauern gemessen werden.

1.7 Ausblick

Aus den Ergebnissen dieses Projektes und den festgestellten Lücken im Kenntnisstand über die Entstehung und die Emission von Lachgas ergibt sich für die nächsten Jahre folgender **Forschungsbedarf**:

- ↳ Die prozessorientierten Modelle sollen so weit verbessert werden, dass mit ihnen die Dynamik der Emissionen und die Bilanzen aller Treibhausgase wie auch die einzelnen Stickstoffflüsse für verschiedene Standorte zuverlässig vorhergesagt werden können.
- ↳ Für die Modellevaluation werden qualitativ hoch stehende Messreihen der Lachgasflüsse zwischen landwirtschaftlichen Böden und der Atmosphäre über mehrere Jahre hinweg benötigt.
- ↳ Die Emissionsfaktoren für die Berechnung des Lachgasinventars, besonders der Faktor für die indirekten Emissionen aus Gewässern, bedürfen einer kritischen Ueberarbeitung.
- ↳ Die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft sollen integral beurteilt werden. Zu diesem Zweck werden Methoden zur gleichzeitigen Abschätzung der Bilanzen von Methan, Lachgas und Kohlendioxid für einzelne Standorte oder Betriebe benötigt.

2 Résumé

2.1 Contexte

Le protoxyde d'azote (N_2O) est une liaison azotée produite par des bactéries lors des processus naturels de la **dénitrification** et de la **nitrification**. Plus il y a **d'azote** à disposition pour ces processus, plus la production de protoxyde d'azote est importante. **L'intensification de l'agriculture**, ayant pour but d'augmenter la production de denrées alimentaires, a mené à un fort accroissement des flux d'azote. L'agriculture cause ainsi la majeure partie des émissions anthropogènes de protoxyde d'azote. Ces émissions sont produites soit **directement** par l'utilisation des engrais minéraux et des engrais de ferme ainsi que par le stockage des engrais de ferme, soit indirectement à partir d'azote qui quitte le cycle agricole par la volatilisation d'ammoniaque et le lessivage de nitrate.

Le protoxyde d'azote demeure une centaine d'années dans l'atmosphère. Là, il contribue au renforcement **de l'effet de serre**. Finalement, il est décomposé dans la stratosphère en oxydes d'azotes, lesquels jouent un rôle important dans la chimie de la stratosphère et contribuent à la **dégradation de la couche d'ozone**.

En signant la **convention sur le climat** et le **protocole de Kyoto**, la Suisse s'est engagée à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à publier régulièrement des **inventaires** des émissions de ces gaz.

Dans ce contexte (illustration 1), il est du devoir de la recherche agricole suisse d'estimer les émissions de protoxyde d'azote des différentes sources agricoles et d'étudier les processus de formation et d'émission de ce gaz par des **mesures** et des **modèles axés sur les processus**.

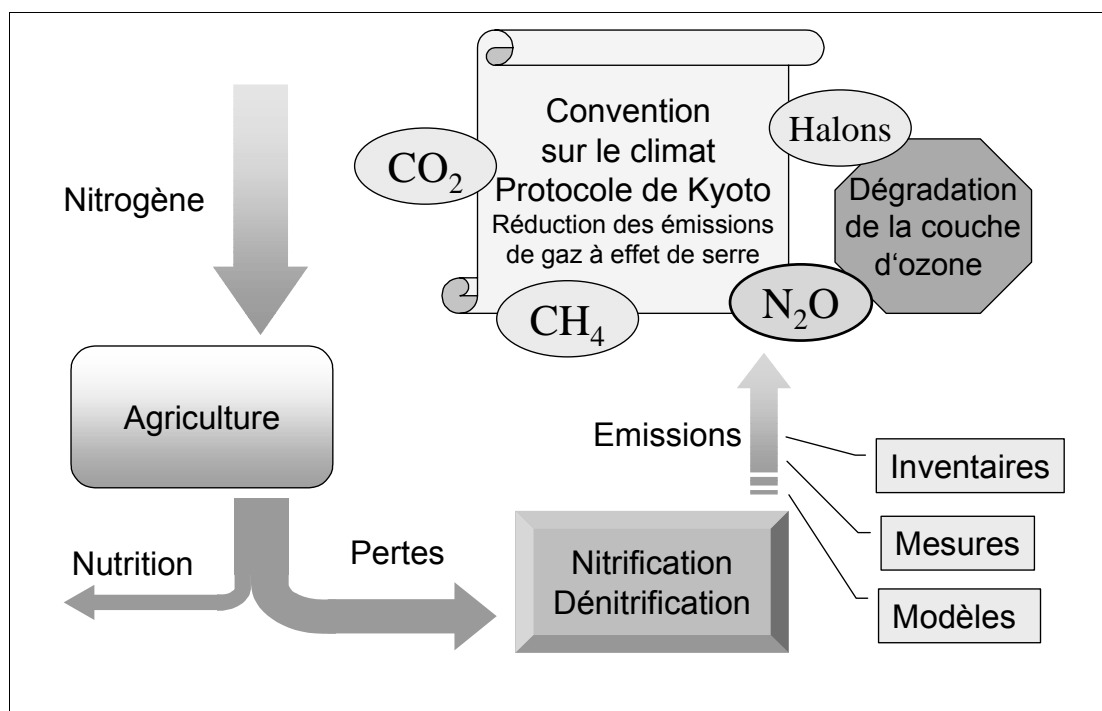


Illustration 1: Causes et conséquences de la formation de protoxyde d'azote de l'agriculture.

2.2 Problématique

Ce projet a été réalisé à la demande de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) et de l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG). Il avait pour but d'améliorer les connaissances afin de respecter les engagements de la Confédération envers la convention sur le climat. Pour cela, la **question** suivante a été traitée:

Quelles sont les quantités de protoxyde d'azote émis par l'agriculture, comment et où sont produites ces émissions et quelle est leur répartition par source?

Le présent rapport se penche sur cette problématique et

- ↳ résume les **connaissances scientifiques** concernant la formation et les effets des émissions de protoxyde d'azote de l'agriculture ainsi que les méthodes de mesure des émissions;
- ↳ décrit en détail les **méthodes d'inventaire** des émissions de protoxyde d'azote de l'agriculture suisse;
- ↳ présente le **développement temporel** de 1901 à 2020 et la **répartition géographique** des émissions de protoxyde d'azote;
- ↳ explique les méthodes et les résultats de la **modélisation axée sur les processus** des émissions de protoxyde d'azote;
- ↳ donne une vue d'ensemble des possibilités de **réduire** les émissions de protoxyde d'azote mais ne les évalue pas dans le contexte global.

Il faut également se demander comment et de combien de pour-cent les émissions de protoxyde d'azote peuvent être réduites et quels sont les coûts et les effets secondaires de possibles mesures. Ce rapport n'aborde cette problématique que superficiellement.

2.3 Méthode d'inventaire

L'**IPCC** (Intergovernmental Panel of Climate Change) a développé une méthode pour inventorier les émissions de protoxyde d'azote. Cette méthode tient compte des **émissions directes** qui sont produites lors d'apports d'azote dans des sols agricoles et lors de stockage d'engrais de ferme ainsi que des **émissions indirectes** causées par des apports d'azote provenant de l'agriculture dans les eaux et via l'atmosphère dans d'autres écosystèmes. Les différents **flux d'azote** sont estimés et les émissions sont calculées par la multiplication avec des **facteurs d'émissions**.

La méthode IPCC présente l'avantage que les émissions de protoxyde d'azote peuvent être estimées en ne se basant quasiment que sur les données statistiques de la FAO. Elle doit être utilisée par les pays n'ayant pas les bases scientifiques et statistiques nécessaires pour développer une méthode adaptée à leur pays.

L'IPCC propose de tenir compte des conditions nationales lors de l'inventaire des émissions de protoxyde d'azote. Pour cette raison, la méthode **IULIA** a été développée en partant de la méthode IPCC. Dans cette méthode, tous les **flux d'azote** ont été recalculés en se basant sur les statistiques nationales et les résultats de la recherche. La méthode IULIA prend en considération des **sources d'émissions de protoxyde d'azote supplémentaires**: la fixation d'azote biologique et la décomposition des résidus des récoltes des prairies et des pâturages. Dans la méthode IPCC, ces émissions

ne sont calculées que pour les grandes cultures mais pas pour les prairies et les pâturages. Les **facteurs d'émission** ont été repris sans modification de la méthode IPCC, car jusqu'à aujourd'hui, trop peu de mesures ont été réalisées en Suisse pour justifier une adaptation des facteurs d'émission.

2.4 Résultats des inventaires

Avec la méthode IPCC, on obtient des valeurs nettement plus élevées pour les excréments d'azote par les animaux de rente et pour le lessivage d'azote qu'avec la méthode IULIA. Par conséquent, les émissions sont plus basses de 14 % avec la méthode IULIA qu'avec l'IPCC, bien que IULIA prenne d'autres sources d'émission en considération. Pour la suite, seuls les résultats de la méthode IULIA seront traités car elle est mieux adaptée aux conditions de l'agriculture suisse que la méthode IPCC.

En 1996, l'agriculture suisse a émis 5.5 kt N₂O-N selon la méthode IULIA. Les sources les plus importantes sont l'utilisation (1.0 kt N₂O-N) et le stockage (0.9 kt N₂O-N) **d'engrais de ferme**, les émissions indirectes provenant **des eaux** (1.0 kt N₂O-N) et l'application **d'engrais minéraux** (0.8 kt N₂O-N). Des 165 kt d'azote qui ont été introduits dans le cycle de l'agriculture suisse en 1996, environ 3.5 % ont été dégagés sous forme de N₂O dans l'atmosphère.

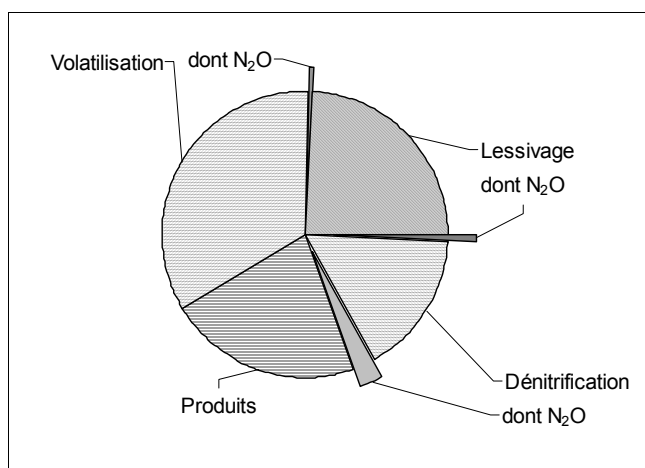


Illustration 2: Destin des 165 kt d'azote qui sont parvenus dans l'agriculture suisse via les engrais minéraux, la fixation biologique, les dépositions atmosphériques et les importations de foin, calculé selon la méthode IULIA. En tout, environ 3.5 % de l'azote ont été transformés en protoxyde d'azote.

En 1996, le protoxyde d'azote représentait 8 % de l'ensemble **des émissions de gaz à effet de serre**. De cette part, trois quart provenaient de l'agriculture. 82 % des gaz à effet de serre étaient du CO₂ et 10 % du méthane.

La **formation** de protoxyde d'azote lors de la nitrification et de la dénitrification dépend fortement des **conditions environnementales**. De petits changements des conditions peuvent provoquer de grandes différences d'émissions. C'est pour cela que les émissions varient considérablement d'un champ à un autre et même dans un même champ. Ensemble avec le nombre élevé de différentes sources de protoxyde d'azote (différentes cultures, différentes méthodes de stockage des engrais de ferme, émissions indirectes) ces changements amènent de grandes **insécurité**s lors de l'estimation des émissions de protoxyde d'azote de l'agriculture.

L'IPCC donne des intervalles de confiance de 95 % pour les facteurs d'émissions. En utilisant les facteurs les plus élevés, on obtient des émissions dix fois plus importantes qu'avec les plus petits facteurs. Cela veut dire qu'on ne peut pas déterminer si les émissions de protoxyde d'azote provenant de l'agriculture représentent une part importante des émissions suisses de gaz à effet de serre ou si elles peuvent être

négligées. Le bilan global du protoxyde d'azote redonne tout de même une certaine confiance. Les émissions mondiales, calculées avec la méthode IPCC, ne se démarquent pas trop des émissions nécessaires à un budget équilibré.

Le **développement temporel** (illustration 3) montre une nette augmentation des émissions en parallèle avec l'intensification de l'agriculture à partir de la deuxième guerre mondiale jusqu'en 1980. Les années 90 présentent une baisse des émissions due à la diminution du nombre de bétail de rente et de l'utilisation des engrais minéraux. Mais on ne peut pas conclure avec certitude que les émissions de protoxyde d'azote ont vraiment baissé pendant les années 90. Une eutrophisation croissante peut dans de nombreux systèmes mener à des émissions de gaz plus importantes même si les apports d'azote restent constants, ce qui modifie certains facteurs d'émissions. Les méthodes d'inventaire utilisées ne peuvent pas prendre de tels changements en considération.

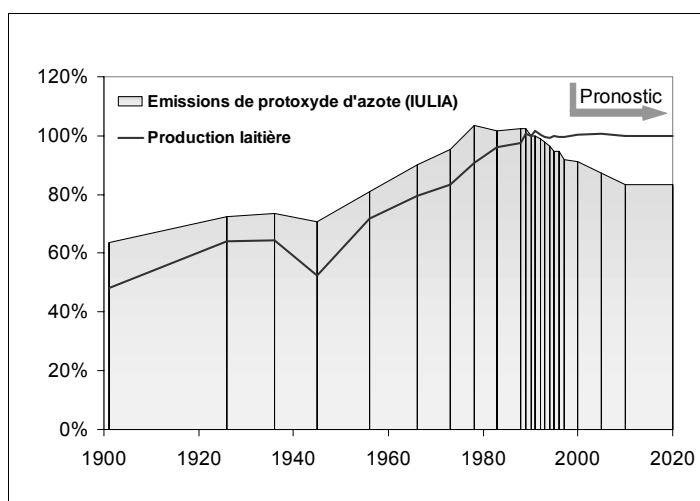


Illustration 3: Développement temporel des émissions de protoxyde d'azote calculées selon la méthode IULIA et la production laitière de l'agriculture suisse de 1901 à 2020. Les valeurs de 1990 correspondent à 100 %. Les lignes verticales indiquent les années pour lesquelles des émissions ont été calculées.

Les émissions de protoxyde d'azote ont été calculées avec la méthode IULIA pour toutes les communes suisses et ont été représentées sur des cartes. La **répartition géographique** situe, comme on pouvait s'y attendre, les émissions de protoxyde d'azote les plus élevées dans les régions à agriculture intensive. Le nombre d'unités de gros bétail par surface herbagère semble être un bon indicateur pour les émissions.

2.5 Modélisation axée sur les processus d'émissions de protoxyde d'azote

Des simulations avec des modèles axés sur les processus peuvent améliorer la **compréhension des processus** de formation et d'émission de protoxyde d'azote. Elles peuvent aider à estimer les **facteurs d'émissions** ou à juger les **effets des mesures de réductions** des émissions. Il existe différents modèles pour calculer les émissions provenant des sols agricoles. Mais aucun ne permet actuellement de prédire de manière fiable la dynamique des émissions pour des emplacements différents. Des modèles pour les émissions des eaux ou du stockage des engrais de ferme n'ont pas encore été développés.

La modélisation axée sur les processus de formation et d'émission de protoxyde d'azote nécessite théoriquement une résolution temporelle et spatiale élevée. Mais le nombre de suppositions qui doivent être faites pour les conditions générales et pour les processus des modèles, augmente avec la résolution d'un modèle. Ceci limite l'utilité pratique des modèles.

Dans le cadre de ce projet, le modèle **PaSim** (Pasture Simulation Model), un modèle de simulation des flux du carbone, de l'azote, des eaux et des énergies dans des écosystèmes de prairies, a été développé de manière à pouvoir calculer les émissions de protoxyde d'azote. Les premiers résultats de simulation démontrent le potentiel de ce modèle. Les réactions aux influences les plus importantes pour les émissions de protoxyde d'azote sont sensées. Les premières comparaisons des simulations avec des valeurs mesurées montrent une bonne concordance. Mais des comparaisons supplémentaires avec des résultats de mesures sont nécessaires pour affiner le modèle et pour gagner de la confiance en ses pronostics.

Les simulations réalisées avec PaSim lors du projet ont permis de tirer quelques conclusions importantes:

- ↳ Des apports d'engrais au moment opportun permettent d'accroître les rendements et de réduire les émissions de protoxyde d'azote.
- ↳ Les facteurs d'émissions de l'IPCC sous-estiment probablement les effets à long terme de la modification des quantités d'engrais sur les émissions de protoxyde d'azote.
- ↳ La négligence des émissions de protoxyde d'azote provenant de la fixation d'azote biologique et des résidus de récolte sur les prairies et pâturages avec la méthode IPCC conduit à une nette sous-estimation des émissions totales.

2.6 Possibilités de réduction des émissions de protoxyde d'azote

La littérature propose de multiples possibilités pour abaisser les émissions de protoxyde d'azote. Il s'agit surtout de propositions visant une utilisation plus efficace de l'azote. Une **diminution de la production animale** réduirait nettement les pertes d'azote et par conséquent les émissions de protoxyde d'azote, car l'azote est utilisé plus efficacement dans la production végétale que dans la production animale. **L'adaptation des quantités d'engrais et du moment de l'épandage** aux besoins des plantes réduit la disponibilité de l'azote minéral pour la formation de protoxyde d'azote. La valorisation de l'azote des animaux de rente peut être optimisée par des mesures au niveau de **l'affouragement**, ce qui permet de diminuer la part d'azote dans les excréments.

L'évaluation des résultats pose un gros problème lors de la réduction des émissions de protoxyde d'azote. Une réelle évaluation ne peut qu'être assurée par des mesures. Mais il est très difficile de **mesurer** les émissions de protoxyde d'azote sans influencer les processus qui mènent à la formation des émissions. Cela est plus facilement réalisable en utilisant des méthodes de micro-météorologie. Mais ces méthodes prennent beaucoup de temps et ne peuvent être utilisées que sur des emplacements plats et des surfaces assez importantes. De plus, l'extrapolation de mesures provenant d'emplacements isolés aux émissions de plus grandes surfaces est liée à de grandes insécurités à cause de la variabilité élevée des émissions.

Bien entendu, cela n'a pas de sens d'optimiser unilatéralement des processus agricoles en relation avec les émissions de protoxyde d'azote. Chaque intervention dans le cycle de l'azote a différentes répercussions sur l'environnement. Ainsi, il ne faut, par exemple, pas oublier les effets sur les émissions d'ammoniaque, l'eutrophisation d'écosystèmes proches de la nature, l'acidification du sol, la charge des eaux ou les émissions de méthane lors de l'évaluation des mesures de réduction des émissions de protoxyde d'azote. Finalement, chaque mesure doit être également appréciée selon ses effets sur la production agricole et sa praticabilité dans le quotidien des agriculteurs.

2.7 Perspectives

D'après les résultats de ce projet et les manques de connaissances constatés concernant la formation et l'émission de protoxyde d'azote on peut formuler les **besoins de recherches** suivants pour les années à venir:

- ↳ Les modèles axés sur les processus doivent être améliorés de manière à permettre une prédiction fiable de la dynamique des émissions et des bilans de tous les gaz à effets de serre ainsi que des différents flux d'azote pour des emplacements variés.
- ↳ L'évaluation des modèles nécessite des mesures qualitativement élevées, réparties sur plusieurs années des flux du protoxyde d'azote entre les sols agricoles et l'atmosphère.
- ↳ Les facteurs d'émissions pour le calcul de l'inventaire du protoxyde d'azote, doivent être revus de manière critique, spécialement le facteur des émissions indirectes provenant des eaux.
- ↳ Les émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture doivent être évalués intégralement. A cet effet, il s'avère nécessaire de développer des méthodes permettant d'estimer en même temps les bilans du méthane, du protoxyde d'azote et du carbone pour des emplacements isolés ou pour des exploitations.

3 Riassunto

3.1 Contesto

Il gas esilarante è un composto dell'azoto prodotto da batteri durante i processi naturali di **denitrificazione** e di **nitrificazione**. La quantità di gas esilarante prodotto aumenta con l'aumentare dell'**azoto** disponibile per tali processi. La **diffusione dell'agricoltura intensiva** ai fini di una maggiore produzione alimentare ha condotto ad un forte aumento dei flussi di azoto. In tal modo l'agricoltura è la fonte principale di emissioni antropogene di gas esilarante. Queste emissioni possono derivare **direttamente** dall'utilizzo di concimi minerali e da fattoria e dal deposito di concimi da fattoria o **indirettamente** dall'azoto perso con la volatilizzazione dell'ammoniaca e il dilavamento di nitrati derivanti dall'agricoltura.

Il gas esilarante emesso rimane nell'atmosfera per ben 100 anni e qui contribuisce ad aumentare l'**effetto serra**. Infine si decompone nella stratosfera in ossidi di azoto, che rivestono un ruolo importante nella chimica della stratosfera e favoriscono la **riduzione dello strato di ozono**.

Con la sottoscrizione della **Convenzione sul clima** e del **Protocollo di Kyoto**, la Svizzera si è impegnata a ridurre le emissioni di gas ad effetto serra e a pubblicare con regolarità **inventari** delle proprie emissioni di gas ad effetto serra.

In tale ambito (Figura 1) spetta alla ricerca in agricoltura valutare le emissioni di gas esilarante provenienti dalle diverse fonti agricole e studiare i processi relativi all'origine e all'emissione di gas esilarante mediante **rilevamenti** e **modelli orientati al processo**.

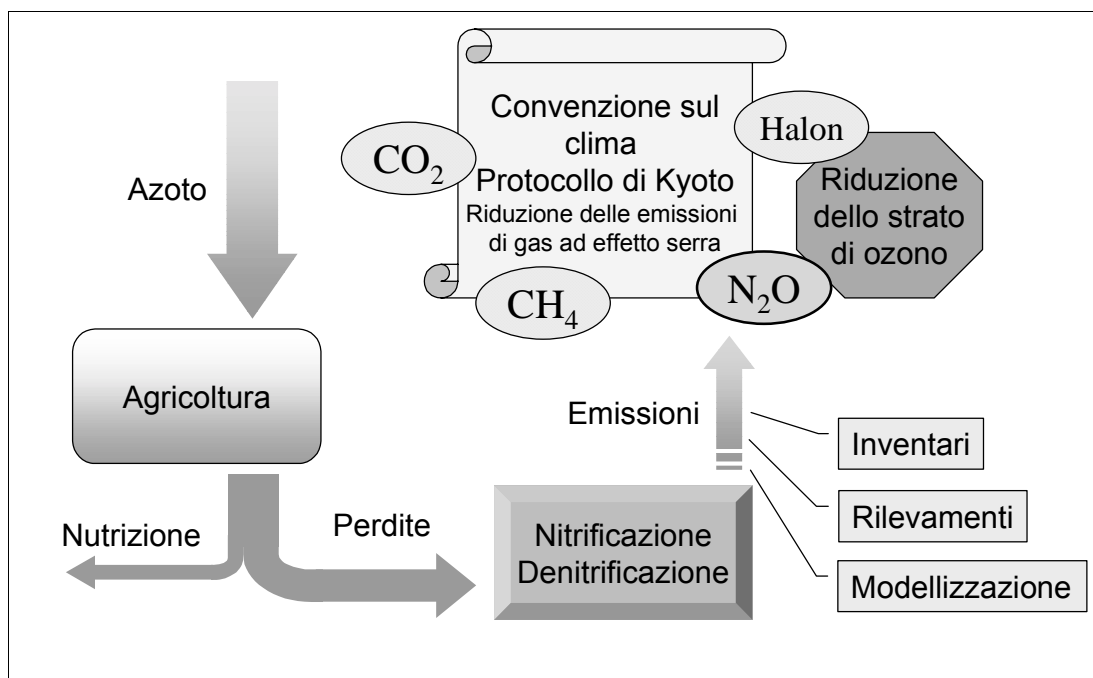


Figura 1: cause ed effetti delle emissioni di gas esilarante derivanti dall'agricoltura.

3.2 Quesiti

Il progetto è stato svolto su incarico dell'Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio (UFAPF) e dell'Ufficio federale dell'agricoltura (UFAG). Esso mirava a migliorare le premesse per l'osservanza degli obblighi della Confederazione rispetto alla Convenzione sul clima. Si è formulato a tal fine il seguente **quesito**:

Quante emissioni di gas esilarante sono originate dall'agricoltura, come e dove si formano tali emissioni e come si ripartiscono tra le diverse fonti?

Il presente rapporto affronta tale quesito e

- ↳ riassume le **conoscenze scientifiche** sull'origine e gli effetti delle emissioni di gas esilarante provenienti dall'agricoltura nonché sui metodi di rilevamento di tali emissioni;
- ↳ descrive nel dettaglio i **metodi di inventarizzazione** delle emissioni di gas esilarante derivanti dall'agricoltura in Svizzera;
- ↳ mostra l'**andamento temporale** dal 1901 al 2020 e la **distribuzione geografica** delle emissioni di gas esilarante;
- ↳ descrive metodi e risultati della **modellizzazione orientata al processo** delle emissioni di gas esilarante;
- ↳ fornisce una panoramica delle possibilità di **riduzione** delle emissioni di gas esilarante e valuta tali possibilità, anche se non nel contesto generale.

Ci si chiede inoltre come e in quale misura si possano ridurre le emissioni di gas esilarante e quali siano i costi e gli effetti collaterali delle possibili misure. Nel presente rapporto ci si limiterà ad accennare a tale problematica.

3.3 Metodo di inventarizzazione

L'**IPCC** (Intergovernmental Panel of Climate Change) ha elaborato un metodo di inventarizzazione delle emissioni di gas esilarante. Tale metodo prende in considerazione le **emissioni dirette**, originate da immissioni di azoto in terreni agricoli e dal deposito di concimi da fattoria nonché le **emissioni indirette**, causate da immissioni di azoto provenienti dall'agricoltura nelle acque e – attraverso l'atmosfera – in altri ecosistemi. Si stimano i singoli **flussi di azoto** e si calcolano le emissioni mediante moltiplicazione con **fattori di emissione**.

Il metodo IPCC presenta il vantaggio di consentire di valutare le emissioni di gas esilarante quasi esclusivamente con le indicazioni statistiche della FAO. Va applicato dai paesi in cui non vi siano le premesse scientifiche e statistiche per sviluppare un metodo adatto specificatamente al loro paese.

L'IPCC richiede però che nell'inventarizzazione delle emissioni di gas esilarante si considerino il più possibile le condizioni nazionali. Per tale ragione si è elaborato – sulla base del metodo IPCC – il metodo **IULIA**. In esso si sono ricalcolati tutti i **flussi di azoto** partendo dalle statistiche e dai risultati della ricerca a livello nazionale degli ultimi anni. Nel metodo IULIA si considerano quali **fonti aggiuntive di gas esilarante** la fissazione biologica dell'azoto e la decomposizione di resti del raccolto su prati e pascoli. Nel metodo IPCC tali emissioni vengono calcolate esclusivamente per le colture agricole e non per prati e pascoli. I **fattori d'emissione** sono stati ripresi senza

modifiche dall'IPCC, in quanto finora in Svizzera si sono effettuati troppo pochi rilevamenti per poter giustificare un adeguamento dei fattori di emissione.

3.4 Risultati dell'inventarizzazione

Col metodo IPCC risultano valori sensibilmente più elevati per le emissioni di azoto causate dagli animali da fattoria e per il dilavamento di nitrati rispetto al metodo IULIA. Pertanto, le emissioni secondo il metodo IULIA sono inferiori del 14 % rispetto a quanto indicato dall'IPCC, anche se IULIA tiene in considerazione fonti di emissioni aggiuntive. Di seguito tratteremo solo i risultati del metodo IULIA in quanto più in linea con la situazione agricola svizzera rispetto al metodo IPCC.

Nel 1996 l'agricoltura svizzera rilevò con il metodo IULIA 5,5 kt di N₂O-N. Le fonti principali sono l'impiego (1,0 kt di N₂O-N) e il deposito (0,9 kt di N₂O-N) di **concimi da fattoria**, le emissioni indirette da **acque** (1,0 kt di N₂O-N) e l'utilizzo di **concimi minerali** (0,8 kt di N₂O-N). Delle 165 kt di azoto immesso nell'agricoltura svizzera nel 1996, circa il 3,5 % è stato emesso nell'atmosfera sotto forma di N₂O.

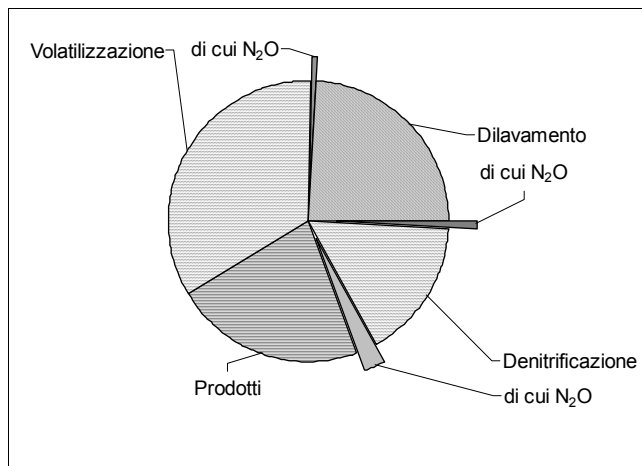


Figura 2: destino delle 165 kt di azoto pervenute nell'agricoltura svizzera nel 1996 attraverso concimi minerali, fissazione biologica, deposizione atmosferica ed importazione di foraggio, calcolate secondo il metodo IULIA. In totale, si è trasformato in gas esilarante circa il 3,5 % dell'azoto.

Nel 1996 il gas esilarante - proveniente per tre quarti dall'agricoltura - contribuì per l'8 % alle **emissioni totali di gas ad effetto serra** in Svizzera. L'82 % delle emissioni di gas ad effetto serra erano CO₂ e il 10 % metano.

L'**origine** delle emissioni di gas esilarante nella nitrificazione e nella denitrificazione dipendono fortemente dalle **condizioni ambientali**. Lievi alterazioni delle condizioni possono comportare grandi differenze nelle emissioni. Le emissioni variano dunque fortemente da campo a campo e persino all'interno dello stesso campo. Unitamente alla varietà delle diverse fonti di gas esilarante (colture diverse, metodi differenti di deposito dei concimi da fattoria, emissioni indirette), questo provoca notevolissime **incertezze** nella valutazione delle emissioni di gas esilarante provenienti dall'agricoltura.

L'IPCC indica intervalli di fiducia del 95 % per i fattori di emissione. Utilizzando i fattori massimi di emissione risultano emissioni circa 10 volte superiori a quelle conseguenti all'utilizzo di fattori minimi. Ciò significa che non è del tutto certo se le emissioni di gas esilarante derivanti dall'agricoltura costituiscano una porzione significativa delle emissioni di gas ad effetto serra in Svizzera o se siano praticamente trascurabili. E' tuttavia possibile ottenere maggiore fiducia dal bilancio globale del gas esilarante. Le emissioni mondiali, calcolate col metodo IPCC, non si scostano troppo dalle emissioni necessarie per un budget globale equilibrato.

L'andamento temporale (Figura 3) mostra un chiaro aumento delle emissioni con la diffusione dell'agricoltura intensiva dalla seconda guerra mondiale al 1980. Negli anni 90 risulta una diminuzione delle emissioni a causa della riduzione numerica degli animali da fattoria e del minore uso di concimi minerali. Tuttavia, non è possibile dedurre con sicurezza un effettivo calo delle emissioni di gas esilarante negli anni 90. La crescente eutrofizzazione può causare in determinati sistemi maggiori emissioni di gas esilarante a parità di immissioni di azoto, così che mutano singoli fattori di emissione. I metodi di inventarizzazione impiegati non riescono a dar conto di tali alterazioni.

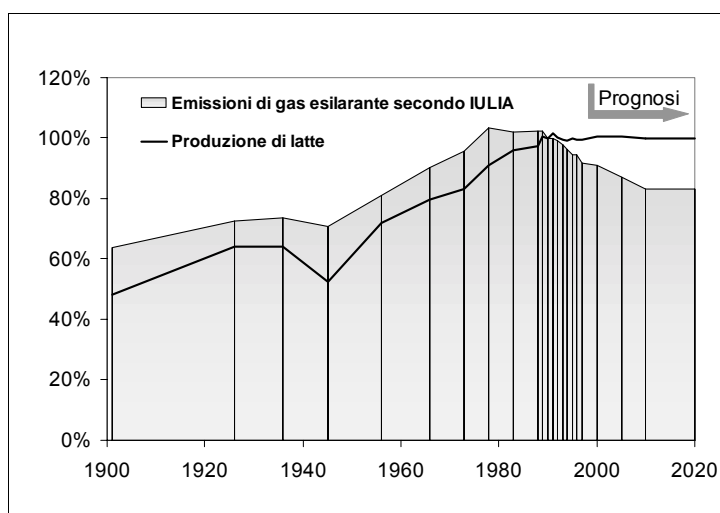


Figura 3: andamento temporale delle emissioni di gas esilarante, calcolate secondo il metodo IULIA e della produzione di latte da parte dell'agricoltura svizzera dal 1901 al 2020. I valori del 1990 corrispondono al 100 %. Le linee verticali evidenziano gli anni per i quali si sono calcolate le emissioni.

Le emissioni di gas esilarante sono state calcolate per tutti i Comuni svizzeri col metodo IULIA e rappresentate mediante carte. La **distribuzione geografica** presenta, conformemente alle aspettative, le maggiori emissioni di gas esilarante in zone ad agricoltura intensiva. Il numero di grandi capi di bestiame per superficie di pascolo sembra costituire un buon indicatore delle emissioni.

3.5 Modellizzazione orientata al processo delle emissioni di gas esilarante

Le simulazioni con modelli orientati al processo possono portare ad una migliore **comprensione dei processi** relativamente all'origine e all'emissione di gas esilarante e alla stima di **fattori di emissioni** o alla valutazione dell'**effetto di misure** volte a ridurre le emissioni. Esistono vari modelli per il calcolo delle emissioni provenienti da terreni agricoli. Finora però nessuno di essi consente di prevedere in modo attendibile la dinamica delle emissioni per diversi luoghi. Non sono ancora stati elaborati modelli per le emissioni da acque o derivanti dal deposito di concimi da fattoria.

La modellizzazione orientata al processo dell'origine e dell'emissione di gas esilarante richiede a livello teorico un'elevata risoluzione temporale e spaziale. Con la risoluzione di un modello cresce però anche il numero di supposizioni da formulare per le condizioni marginali e i processi del modello, fattore che limita l'utilità pratica del modello.

Nel quadro del progetto si è ampliato il modello **PaSim** (Pasture Simulation Model) – un modello per la simulazione dei flussi del carbonio, dell'azoto, dell'acqua e dell'energia in ecosistemi pratici – in modo da riuscire a calcolare con esso anche le emissioni di gas esilarante. I primi risultati delle simulazioni mostrano il potenziale del modello. Esso reagisce in modo ragionevole agli effetti principali, determinanti per le emissioni di gas esilarante. I primi confronti tra simulazioni e valori rilevati sono in buon accordo. Sono

però necessarie altre confronti con i risultati delle misure per perfezionare il modello e guadagnare fiducia nelle previsioni dello stesso.

Le simulazioni con PaSim hanno consentito di trarre alcune importanti conclusioni nell'ambito del progetto:

- ↳ la concimazione al momento giusto consente di aumentare i raccolti e di diminuire le emissioni di gas esilarante.
- ↳ i fattori di emissione dell'IPCC sottovalutano presumibilmente l'effetto nel lungo periodo sulle emissioni di gas esilarante di quantitativi diversi di concime.
- ↳ trascurare le emissioni di gas esilarante provenienti dalla fissazione biologica e dai resti del raccolto su prati e pascoli nel metodo IPCC porta ad una chiara sottostima delle emissioni totali.

3.6 Possibilità di ridurre le emissioni di gas esilarante

Nella letteratura specifica si sono proposte numerose possibilità di ridurre le emissioni di gas esilarante. Si tratta principalmente di proposte volte ad un più efficiente impiego dell'azoto. Una **riduzione della produzione animale** comporterebbe una riduzione significativa delle perdite di azoto e dunque le emissioni di gas esilarante in quanto l'impiego dell'azoto nella produzione vegetale è molto più efficiente della produzione animale. **L'adeguamento dei quantitativi e dei tempi di concimazione** alle esigenze delle piante riduce la disponibilità di azoto minerale per la formazione di gas esilarante. Attraverso opportune misure nella fase di **foraggiamento** è possibile ottimizzare l'utilizzazione dell'azoto degli animali da fattoria e ridurre l'accumulo di azoto negli escrementi.

Il **controllo d'efficacia** è un grosso problema nella riduzione delle emissioni di gas esilarante. Solo i rilevamenti garantiscono un vero controllo d'efficacia. E' però molto difficile **rilevare** le emissioni di gas esilarante senza influenzare i processi all'origine delle emissioni stesse. Il modo migliore per farlo è con metodi micrometeorologici che sono però dispendiosi ed applicabili unicamente a grandi superfici e in punti pianeggianti. Inoltre l'estrapolazione dei rilevamenti effettuati presso singoli posti per determinare le emissioni di aree più ampie è legata ad elevate incertezze a causa della notevole variabilità.

Naturalmente non ha senso ottimizzare i processi agricoli solo in relazione alle emissioni di gas esilarante. Ogni intervento sul ciclo dell'azoto ha diverse conseguenze sull'ambiente. Nel valutare misure volte a ridurre le emissioni di gas esilarante non si devono ad esempio tralasciare gli effetti sulle emissioni di ammoniaca, l'eutrofizzazione di ecosistemi naturali, l'impoverimento del suolo, l'inquinamento delle acque o le emissioni di metano. In definitiva, ciascuna misura deve essere considerata anche in relazione alle sue conseguenze per la produzione agricola e alla sua applicabilità pratica nel quadro delle normali attività agricole.

3.7 Prospettive

In base ai risultati del progetto e alle lacune accertate nello stato delle conoscenze relative all'origine e all'emissione di gas esilarante, nei prossimi anni si presenteranno queste **esigenze di ricerca**:

- ↳ si dovranno migliorare i modelli orientati al processo in modo che consentano di prevedere con affidabilità la dinamica delle emissioni e i bilanci di tutti i gas ad effetto serra nonché i singoli flussi di azoto per diversi luoghi.
- ↳ per la valutazione del modello saranno necessarie serie di rilevamenti di alta qualità dei flussi di gas esilarante tra i terreni agricoli e l'atmosfera nell'arco di parecchi anni.
- ↳ è necessario rivedere in modo critico i fattori di emissione per il calcolo dell'inventario del gas esilarante e in particolare il fattore relativo alle emissioni indirette dalle acque.
- ↳ le emissioni di gas ad effetto serra provenienti dall'agricoltura vanno valutate nella loro interezza. A tal fine sono necessari metodi per la valutazione contemporanea dei bilanci di metano, gas esilarante e anidride carbonica per singoli luoghi o aziende.

4 Summary

4.1 Context

Nitrous oxide (N_2O) is a nitrogen-containing compound which is naturally produced by bacteria during the two processes called **denitrification** and **nitrification**. The amount of nitrous oxide produced increases with increasing **nitrogen availability**. **Intensification of agriculture** with the aim to increase production of food has led to a strong increase in the flows of nitrogen. As a result of this, today's agriculture contributes the largest fraction to the total anthropogenic nitrous oxide emissions. These emissions result either **directly** from the application of mineral fertilizers or farmyard manure and from manure storage, or **indirectly** from the conversion of nitrogen lost from agriculture by leaching and runoff of nitrate or volatilization of ammonia.

Once emitted, nitrous oxide remains in the atmosphere for about 100 years and thus contributes to the increase in the **greenhouse effect**. Finally, it is converted in the stratosphere to nitrogen oxides which play an important role in stratospheric chemistry and contribute to the **destruction of the ozone layer**.

With the signing of the **Climate Convention** and the **Kyoto Protocol**, Switzerland has committed itself to the reduction of greenhouse gas emissions and to reporting regularly the national **inventory** of greenhouse gas emissions.

In this context, it is the task of agricultural research to estimate nitrous oxide emissions from different agricultural sources, and to investigate the processes leading to nitrous oxide emissions through **experimentation** and **process-based modelling** (Figure 1).

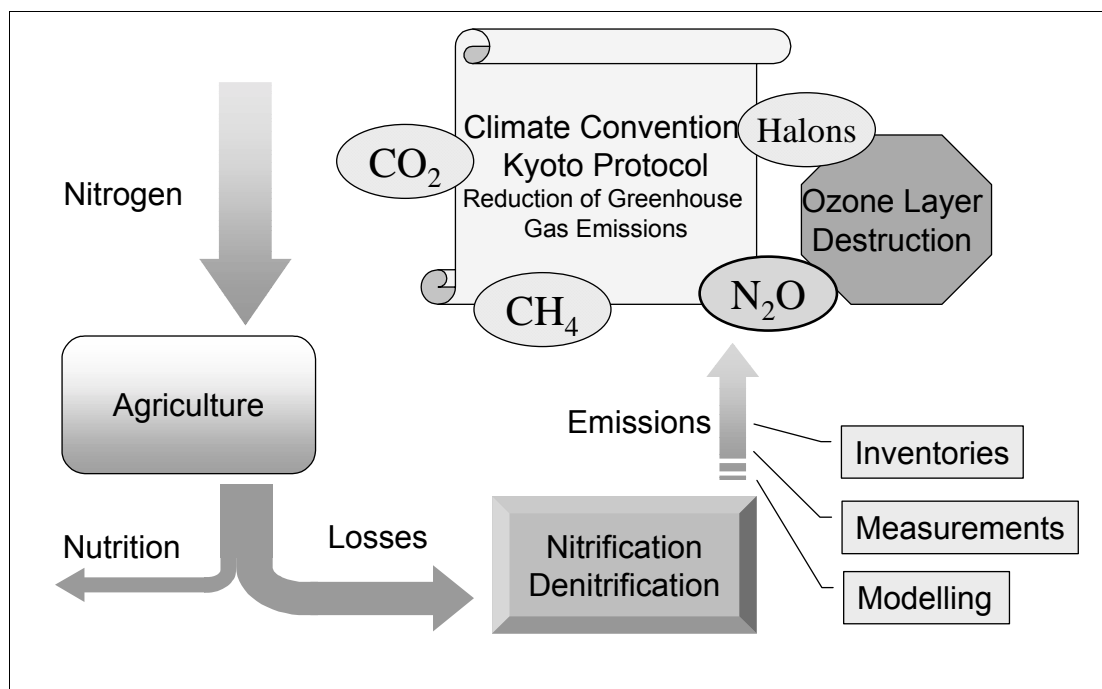


Figure 1: Causes and effects of nitrous oxide emissions from agricultural sources.

4.2 Aim of the project

This project was commissioned by the Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAFEL) and the Federal Office of Agriculture (OFAG). The aim was to improve the scientific basis needed to fulfil the national obligations with respect to the Climate Convention. To provide the necessary information, the following **questions** were addressed:

What is the amount of nitrous oxide emissions caused by agriculture? How and where do these emissions occur, and what is the contribution to these emissions from different sources?

The present report addresses these questions and

- ↪ summarizes the **scientific state of knowledge** with respect to the production of nitrous oxide emissions from agriculture and their effects, and with respect to emission measurements;
- ↪ describes in detail the **method used for the inventory** of nitrous oxide emissions from Swiss agriculture;
- ↪ shows the **temporal development** between 1901 and 2020 and the **geographic distribution** of nitrous oxide emissions;
- ↪ describes the methods and results from **process-based modelling** of nitrous oxide emissions;
- ↪ gives an overview of possible **measures to reduce** nitrous oxide emissions, but an evaluation of these options in a broader context was outside the scope of this report.

The questions about by what means and by how much nitrous oxide emissions could be reduced, and about the costs and side-effects of these measures are also very important, but they are only briefly addressed in this report.

4.3 Inventory method

The **IPCC** (Intergovernmental Panel of Climate Change) has developed a method for the national inventory of nitrous oxide emissions. This method considers the **direct emissions** caused by nitrogen inputs to agricultural soils and manure management systems, and the **indirect emissions** caused by the input of nitrogen used in agriculture to rivers and by the input of atmospheric nitrogen to soils of other ecosystems following the volatilization of ammonia. Individual **flows of nitrogen** are estimated and the emission of nitrous oxide is calculated by multiplication with **emission factors**.

The IPCC approach has the advantage that nitrous oxide emissions can be almost completely estimated from data in the statistical database of FAO. Thus, it could be applied by countries in which the statistical and scientific data for the development of a country-specific method are lacking.

However, IPCC suggests to consider – as far as possible – country-specific conditions for the inventory of nitrous oxide emissions. For this reason, the method **IULIA** was developed in this study which is based on the current IPCC methodology. For this country-specific method, national statistical data and results from recent research have been used to recalculate all **flows of nitrogen**.

Additional sources of nitrous oxide considered by the method IULIA are biological nitrogen fixation and the decay of plant residues returned to soils in meadows and pastures. The IPCC method only considers these emissions for arable crops, but not for meadows and pastures. Due to the lack of measurements in Switzerland necessary to adjust **emission factors** to the specific conditions, emission factors used in the IPCC method were left unchanged.

4.4 Results from the inventory

Compared with IULIA, the IPCC method yields significantly higher values for nitrogen excretion by animals and for nitrate leaching. This leads to a reduction by 14% in the estimated nitrous oxide emissions obtained with IULIA, as compared to the IPCC method, in spite of the additional sources included in IULIA. Below, only results from calculations with IULIA are presented since this method is better adapted to the conditions of Swiss agriculture, compared to the IPCC method.

The results obtained with IULIA indicate that in 1996 Swiss agriculture emitted 5.5 kt N₂O-N. The main sources are application (1.0 kt N₂O-N) and storage (0.9 kt N₂O-N) of **farmyard manure**, indirect emissions from **rivers** (1.0 kt N₂O-N) and the use of **mineral fertilizers** (0.8 kt N₂O-N). Thus, of the 165 kt of nitrogen used in Swiss agriculture in 1996, approximately 3.5% were lost to the atmosphere in the form of nitrous oxide.

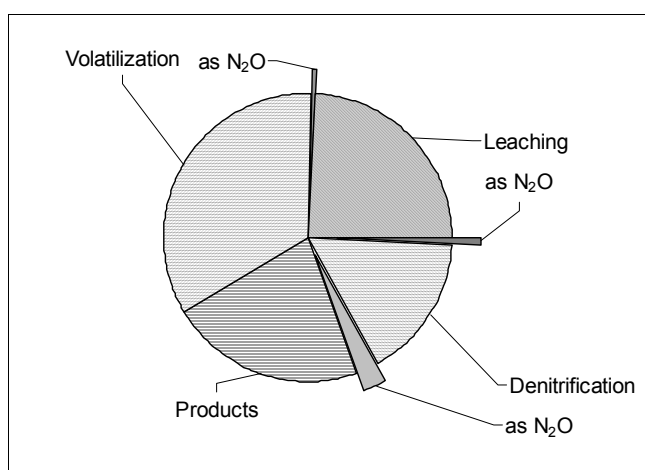


Figure 2: Fate of 165 kt of nitrogen put into Swiss agriculture in 1996 from mineral fertilizers, biological nitrogen fixation, atmospheric deposition and import of animal feed, as calculated with the method IULIA. Overall, approximately 3.5% of the nitrogen was converted to nitrous oxide.

In 1996, nitrous oxide contributed 8% to the total **greenhouse gas emissions** in Switzerland, of which 75% were from agricultural sources. 82% of greenhouse gas emissions were caused by CO₂ and 10% by methane.

The **production** of nitrous oxide emissions by nitrification and denitrification depends strongly on **environmental conditions**. Small changes in these conditions can lead to large changes in emissions. This leads to large differences between fields, and even within a single agricultural field. In combination with the large number of different sources of nitrous oxide (different crops, different methods of manure storage, indirect emissions) this variability causes a large **uncertainty** in the estimate of agricultural nitrous oxide emissions.

IPCC provides 95%-confidence limits for emission factors. Emissions estimated based on the maximum emission factors are about 10 times larger than those obtained with the minimum. Thus, it is uncertain whether today's nitrous oxide emissions from agriculture make, in fact, a significant contribution to the total greenhouse gas emissions

in Switzerland, or if they are negligible. More certainty can be gained by analyzing the global nitrous oxide budget. Global emissions calculated with the IPCC method are in reasonable agreement with emissions necessary for a balanced global budget.

The **temporal development** (Figure 3) shows a pronounced increase in the emissions associated with agricultural intensification between the 2nd World War and 1980. During the 1990's, emissions declined due to reductions in animal numbers and in mineral fertilizer use. However, from this it cannot be concluded with certainty that nitrous oxide emissions have declined in reality during these years, because increasing eutrophication in many ecosystems may lead to increasing nitrous oxide emissions, even when nitrogen loads are constant, which in turn leads to changed emission factors. Such changes could not be accounted for on the basis of the methods used for the inventory.

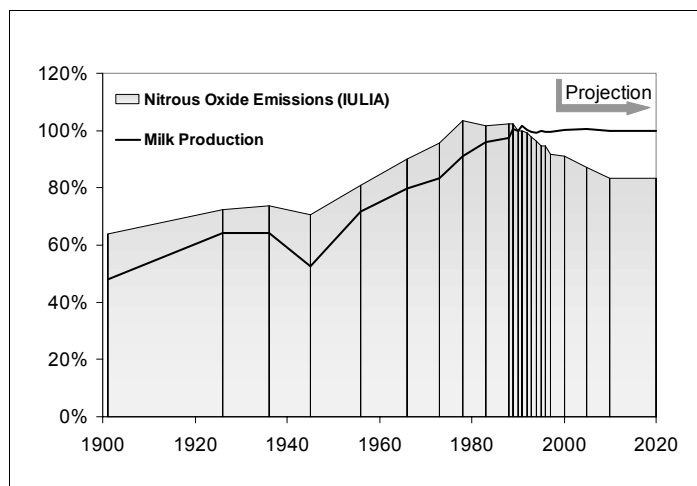


Figure 3: Temporal trend in nitrous oxide emissions, as calculated with the IULIA method, and in milk production in Swiss agriculture between 1901 and 2020. Values for 1990 are used as the reference (100%). Vertical lines mark the years for which emissions have been calculated.

Nitrous oxide emissions were calculated for each community in Switzerland using the method IULIA, and the results were mapped. As expected, the **spatial distribution** showed the highest nitrous oxide emissions in areas with intensive agriculture. The number of livestock units per unit of grassland area appeared to be a good indicator for the emissions.

4.5 Process-based modelling of nitrous oxide emissions

Simulations with process-based models can help to better **understand the processes** leading to nitrous oxide production and emission, to estimate **emission factors**, or to evaluate the **effectiveness of measures** taken to reduce the emissions. Several models are available for the calculation of emissions from agricultural soils. However, none of these models is able to predict reliably the dynamics of the emissions at different sites. Models for the emissions from rivers or from manure management systems have not yet been developed.

Theoretically, process-based modelling of the production and emission of nitrous oxide requires a high temporal and spatial resolution. However, with increasing resolution of the model the number of assumptions concerning limiting conditions or processes goes up, which can lower the benefits of using the model.

In this project, **PaSim** (Pasture Simulation Model), a model developed to simulate fluxes of carbon, nitrogen, water, and energy in grassland ecosystems, was expanded to calculate also the fluxes of nitrous oxide. First simulation results reveal the potential of the model. It responds plausibly to the most important influences which determine the emission of nitrous oxide. First comparisons show good agreement of model results

with measurements, but further comparisons are necessary to improve the model and to gain further confidence in the model results.

From the PaSim simulations in this project, the following important conclusions can be drawn:

- ↳ By applying fertilizers at the appropriate times, the yield can be increased while at the same time the emissions of nitrous oxide can be reduced;
- ↳ IPCC emission factors are likely to underestimate the long-term effect of a change in fertilizer amounts;
- ↳ Neglecting nitrous oxide emissions associated with biological nitrogen fixation and from plant residues in pastures and meadows in the IPCC method leads to a significant underestimation of total emissions.

4.6 Possible measures to reduce nitrous oxide emissions

The literature contains a large number of possible measures to reduce nitrous oxide emissions. These concern mainly the more efficient use of nitrogen. A **reduction in animal production** would lower nitrogen losses and hence nitrous oxide emissions because nitrogen is used much more efficiently in plant production than in animal production. **Adjusting the amount and the time of fertilizer application** to the nutrient requirements of the plants would reduce the amount of available nitrogen and thus the emission nitrous oxide. Measures taken with respect to **animal feeding** could improve nitrogen utilization by the animals and reduce nitrogen excretion.

Controlling the efficiency of the measures taken to reduce nitrous oxide emissions is very difficult. A true control can only be achieved by independent measurements. However, it is very difficult to **measure** nitrous oxide emissions without influencing the processes leading to the production of nitrous oxide. The best way to do this is by using micrometeorological techniques, but these are labour intensive and can only be applied in flat terrain. An additional problem exists with respect to the extrapolation of point measurements to larger areas; this leads to uncertainty because of the large spatial variability in the emissions.

Naturally, it is not sensible to optimise agricultural processes only with respect to nitrous oxide emissions. Every influence on the nitrogen cycle can have different effects on the environment. When evaluating practical measures to reduce nitrous oxide emissions, the emissions of ammonia, eutrophication of natural ecosystems, soil acidification, water pollution, or methane emissions must equally be taken into account. Finally, each measure must be evaluated in the light of its effects on agricultural productivity and its practicality in the farmers' daily business.

4.7 Outlook

Based on the results from this project and the gaps in knowledge identified here with respect to nitrous oxide production and emission, the following **research needs** for the next years can be identified:

- ↳ Process-based models must be further developed in order to improve their predictive power with respect to the dynamics of the emissions and the budget of all greenhouse gases, as well as the various nitrogen flows at different sites;
- ↳ To validate the model results, multi-year, high-quality measurements of nitrous oxide fluxes between agricultural soils and the atmosphere are necessary;
- ↳ Emission factors for the nitrous oxide inventory analysis, especially for the indirect emissions from rivers, must be re-evaluated critically;
- ↳ Greenhouse gas emissions from agriculture must be assessed in an integral way. To do this, methods to estimate the combined budgets of methane, nitrous oxide, and carbon dioxide at a range of different sites and for farming enterprises are necessary.

C Literatur

- Alkemade, F.J.M. (1999).** The changing ozone layer: Variability analysis and model predictions. PhD Thesis, Universiteit Utrecht.
- Arah, J.R.M. & A.J.A. Vinten (1995).** Simplified models of anoxia and denitrification in aggregated and simple-structured soils. *European Journal of Soil Science*, 46, 507-517.
- Arnone III, J.A. & P.J. Bohlen (1998).** Stimulated N₂O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO₂. *Oecologia*, 116, 331-335.
- Bach, M. & H.-G. Frede (1998).** Agricultural nitrogen, phosphorus and potassium balances in Germany - Methodology and trends 1970 to 1995. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 161, 385-393.
- Becker, K.H., J.C. Lörzer, R. Kurtenbach, P. Wiesen, T.E. Jensen & T.J. Wallington (1999).** Nitrous Oxide (N₂O) Emissions from Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 33, 4134-4139.
- Berges, M.G.M. & P.J. Crutzen (1996).** Estimates of Global N₂O Emissions from Cattle, Pig and Chicken Manure, Including a Discussion of CH₄ Emissions. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 24, 241-269.
- Berges, M.G.M., R.M. Hofmann, D. Scharffe & P.J. Crutzen (1993).** Nitrous Oxide Emissions From Motor Vehicles in Tunnels and Their Global Extrapolation. *Journal of Geophysical Research*, 98 (D10), 18527-18531.
- BFS (1997).** Betriebsstrukturerhebung 1996. Bundesamt für Statistik, Bern.
- BFS (1998).** Arealstatistik der Schweiz 1979/85. Bundesamt für Statistik, GEOSTAT, Bern.
- Blicher-Mathiesen, G. & C.C. Hoffmann (1999).** Denitrification as a Sink for Dissolved Nitrous Oxide in a Freshwater Riparian Fen. *Journal of Environmental Quality*, 28, 257-262.
- BLW (1999).** Evaluation der Oekomassnahmen und Tierhaltungsprogramme. Konzeptbericht. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- BLW/FAT/FiBL/LBL/SRVA (1998).** Oekologische und produktionstechnische Entwicklung landwirtschaftlicher Pilotbetriebe 1991 bis 1996. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon.
- Bouscaren, R., C. Houllier & B. Crozet (1992).** Possibilities of control of greenhouse gases emissions other than CO₂ in the European Community. Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, Paris.
- Bouwman, A.F. (1996).** Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46, 53-70.
- Bouwman, A.F., K.W. Van der Hoek & J.G.J. Olivier (1995).** Uncertainties in the global source distribution of nitrous oxide. *Journal of Geophysical Research*, 100 (D2), 2785-2800.
- Braun, M., P. Humi & E. Spiess (1994).** Phosphor- und Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft und Para-Landwirtschaft. Schriftenreihe der FAC Liebefeld 18. FAC, Liebefeld-Bern.
- Bremner, J.M. (1997).** Sources of nitrous oxide in soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49, 7-16.

- Brugger, H. (1968).** Statistisches Handbuch der schweizerischen Landwirtschaft. Verbandsdruckerei, Bern.
- Brugger, H. (1979).** Die schweizerische Landwirtschaft 1850-1914. Verlag Huber, Frauenfeld. ISBN 3-7193-0607-0.
- Brugger, H. (1985).** Die schweizerische Landwirtschaft 1914-1980. Verlag Huber, Frauenfeld. ISBN 3-7193-0943-6.
- BUWAL (1993).** Der Stickstoffhaushalt der Schweiz. Konsequenzen für Gewässerschutz und Umweltentwicklung. Schriftenreihe Umwelt 209. BUWAL, Bern.
- BUWAL (1996).** Strategie zur Reduktion von Stickstoffemissionen. Schriftenreihe Umwelt 273. BUWAL, Bern.
- BUWAL (1997).** UN Framework Convention on Climate Change: Second National Communication of Switzerland 1997, Greenhouse Gas Inventory 1995. BUWAL, Bern.
- Casella, S., C. Leporini & M.P. Nuti (1984).** Nitrous Oxide Production by Nitrogen-Fixing, Fast-Growing Rhizobia. *Microbial Ecology*, 10, 107-114.
- Chang, C., H.H. Janzen, C.M. Cho & E.M. Nakonechny (1998).** Nitrous Oxide Emissions through Plants. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 35-38.
- Chen, X., P. Boeckx, S. Shen & O. Van Cleemput (1999).** Emission of N₂O from rye grass (*Lolium perenne* L.). *Biology and Fertility of Soils*, 28, 393-396.
- Chèneby, D., A. Hartmann, C. Hénault, E. Topp & J.C. Germon (1998).** Diversity of denitrifying microflora and ability to reduce N₂O in two soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 28, 19-26.
- Cho, C.M., D.L. Burton & C. Chang (1997).** Kinetic formulation of oxygen consumption and denitrification processes in soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 77, 253-260.
- Cicerone, R.J. (1989).** Analysis of Sources and Sinks of Atmospheric Nitrous Oxide (N₂O). *Journal of Geophysical Research*, 94 (D15), 18265-18271.
- Cliff, S.S. & M.H. Thiemens (1997).** The ¹⁸O/¹⁶O and ¹⁷O/¹⁶O Ratios in Atmospheric Nitrous Oxide: A Mass-Independent Anomaly. *Science*, 278, 1774-1776.
- Conen, F. & K.A. Smith (1998).** A re-examination of closed flux chamber methods for the measurement of trace gas emissions from soils to the atmosphere. *European Journal of Soil Science*, 49, 701-707.
- Conrad, R., W. Seiler & G. Bunse (1983).** Factors Influencing the Loss of Fertilizer Nitrogen Into the Atmosphere as N₂O. *Journal of Geophysical Research*, 88 (C11), 6709-6718.
- Czepiel, P., P. Crill & R. Harriss (1995).** Nitrous Oxide Emissions from Municipal Wastewater Treatment. *Environmental Science & Technology*, 29, 2352-2356
- Daniel, R.C., P. Lischer & G. Theiller (1993).** Four new CII reference materials for the chemical analysis of plants: Pine needles, oak leaves, barley-straw and apple fruit. in: Fragoso, M.A.C., M.L. Van Beusichem & A. Houwers (ed.), *Optimization of Plant Nutrition* (ISBN 0-7923-2519-2). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 31-35.
- Dehérain, P.P. & L. Maquenne (1882).** Sur la réduction des nitrates dans la terre arable. *Comptes rendus hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, 95, 691-693.
- Dendooven, L., P. Splatt, J.M. Anderson & D. Scholefield (1994).** Kinetics of the denitrification process in a soil under permanent pasture. *Soil Biology & Biochemistry*, 26 (3), 361-370.

- Dou, Z., L.E. Lanyon, J.D. Ferguson, R.A. Kohn, R.C. Boston & W. Chalupa (1998).** An Integrated Approach to Managing Nitrogen on Dairy Farms: Evaluating Farm Performance Using the Dairy Nitrogen Planner. *Agronomy Journal*, 90 (5), 573-581.
- EEA (1999).** Groundwater quality and quantity in Europe. Environmental Assessment report No. 3. European Environment Agency (EEA), Kopenhagen.
- Enquete-Kommission (1992).** Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung. Erster Bericht der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages. Economica Verlag, Bonn. ISBN 3-87081-332-6
- FAO (1998).** Current World Fertilizer Situation and Outlook 1996/97 - 2002/2003. FAO. Rome.
- FAO (1999).** FAOSTAT Statistics Data Base. <http://apps.fao.org/>
- FAT (1997a).** Ergebnisse der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten – Bericht über ausgewählte Betriebsgruppen. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon.
- FAT (1997b).** Ergebnisse der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten – Hauptbericht 1996. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon.
- FAT (1998).** Ergebnisse der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten – Bericht über biologisch bewirtschaftete Betriebe 1997. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon.
- Flückiger, J., A. Dällenbach, T. Blunier, B. Stauffer, T.F. Stocker, D. Raynaud & J.-M. Barnola (1999).** Variations in Atmospheric N₂O Concentration During Abrupt Climatic Changes. *Science*, 285, 227-230.
- Freibauer, A. & M. Kaltschmitt (eds.) (2000a).** Emission Rates and Emission Factors of Greenhouse Gas Fluxes in Arable and Animal Agriculture. Project Report Task 1, EU Concerted Action „Biogenic Emissions of Greenhouse Gases Caused by Arable and Animal Agriculture (FAIR3-CT96-1877) (in Vorbereitung).
- Freibauer, A. & M. Kaltschmitt (eds.) (2000b).** Measurement Technologies for the Estimation of Greenhouse Gas Fluxes in Arable and Animal Agriculture. Project Report Task 2, EU Concerted Action „Biogenic Emissions of Greenhouse Gases Caused by Arable and Animal Agriculture (FAIR3-CT96-1877) (in Vorbereitung).
- Frolking, S.E., A.R. Mosier, D.S. Ojima, C. Li, W.J. Parton, C.S. Potter, E. Priesack, R. Stenger, C. Haberbosch, P. Dörsch, H. Flessa & K.A. Smith (1998).** Comparison of N₂O emissions from soils at three temperate agricultural sites: simulations of year-round measurements by four models. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 77-105.
- Galloway, J.N., W.H. Schlesinger, H. Levy II, A. Michaels & J.L. Schnoor (1995).** Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement - environmental response. *Global Biogeochemical Cycles*, 9 (2), 235-252.
- Goran, M. (1947).** The Present-Day Significance of Fritz Haber. *American Scientist*, 35 (3), 400-403.
- Goulding, K.W.T., N.J. Bailey, N.J. Bradbury, P. Hargreaves, M. Howe, D.V. Murphy, P.R. Poulton & T.W. Willison (1998).** Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. *New Phytologist*, 139, 49-58.
- Granli, T. & O.C. Bøckman (1994).** Nitrous oxide from agriculture. *Norwegian Journal of Agricultural Science*, Suppl. 12, 1-128.

- Grant, R.F., M. Nyborg & J.W. Laidlaw (1993).** Evolution of nitrous oxide from Soil: I. Model development. *Soil Science*, 156 (4), 259-265.
- Groffman, P.M., A.J. Gold & P.-A. Jacinthe (1998).** Nitrous oxide production in riparian zones and groundwater. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 179-186.
- Gut, U.A. (1998).** Characterisation of the soil-atmosphere exchange fluxes of nitric oxide. Dissertation Nr. 12694, ETH Zürich.
- Häfliger, M., A. Keusch, B. Lehmann, H.-P. Thomi & H.P. Wolf (1995).** Stickstoffhaushalt Schweiz – Anpassungsschritte landwirtschaftlicher Betriebe zwecks Abbau der N-Emissionen. ETH Zürich, Institut für Agrarwirtschaft, Zürich.
- Hansen, S., H.E. Jensen, N.E. Nielsen & H. Svendsen (1991).** Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. *Fertilizer Research*, 27, 245-259.
- Hansen, S., H.E. Jensen, N.E. Nielsen & H. Svendsen (1993).** Description of the Soil Plant System Model DAISY. Jordbrugsforlaget, The Royal Veterinary and Agricultural University, Kopenhagen.
- Heinemeyer, O., J.C. Munch & E.-A. Kaiser (1995).** Variabilität von N₂O-Emissionen – Bedeutung der Gasfangsysteme. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 76, 543-546.
- Holland, E.A., B.H. Braswell, J.-F. Lamarque, A. Townsend, J. Sulzman, J.-F. Müller, F.J. Dentener, G. Brasseur, H. Levy II, J.E. Penner & G.-J. Roelofs (1999).** Variations in the predicted spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition and their impact on carbon uptake by terrestrial ecosystems. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D13), 15849-15866.
- Horgan, J. (1996).** The End of Science. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts. ISBN 0-201-62679-9.
- Hutchinson, G.L. & A.R. Mosier (1981).** Improved Soil Cover Method for Field Measurement of Nitrous Oxide Fluxes. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 311-316.
- IPCC (1994).** Climate Change 1994 - Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 0-521-55962-6.
- IPCC (1996).** Climate Change 1995 - The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 0-521-56436-0.
- IPCC/OECD/IEA (1996).** Reference Manual. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol.3. UK Meteorological Office, Bracknell.
- IPCC (2000)** Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (in Vorbereitung).
- Kaiser, E.-A., K. Kohrs, M. Kücke, E. Schnug, J.C. Munch & O. Heinemeyer (1998).** Nitrous oxide release from arable soil: importance of perennial forage crops. *Biology and Fertility of Soils*, 28, 36-43.
- Kammann, C., L. Grünhage, C. Müller, S. Jacobi & H.-J. Jäger (1998).** Seasonal variability and mitigation options for N₂O emissions from differently managed grasslands. *Environmental Pollution*, 102 (Supplement 1), 179-186.

- Kasimir-Klemedtsson, Å., L. Klemedtsson, K. Berglund, P.J. Martikainen, J. Silvola & O. Oenema (1997).** Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil Use and Management*, 13, 245-250.
- Klemedtsson, L., G. Hansson & A.R. Mosier (1990).** The Use of Acetylene for the Quantification of N₂ and N₂O Production from Biological Processes in Soil. in: Revsbech, N.P. & J. Sørensen (ed.), *Denitrification in Soil and Sediment*. Plenum Press, New York, 167-180.
- Knowles, R. (1990).** Acetylene Inhibition Technique: Development, Advantages, and Potential Problems. in: Revsbech, N.P. & J. Sørensen (ed.), *Denitrification in Soil and Sediment*. Plenum Press, New York, 151-166.
- Ko, M.K.W., N.D. Sze & D.K. Weisenstein (1991).** Use of Satellite Data to Constrain the Model-Calculated Atmospheric Lifetime for N₂O: Implications for Other Trace Gases. *Journal of Geophysical Research*, 96 (D4), 7547-7552.
- Kohlmann, J.-P. & D. Poppe (1999).** The Tropospheric Gas-Phase Degradation of NH₃ and Its Impact on the Formation of N₂O and NO_x. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 32, 397-415.
- Körschens, M., A. Weigel & E. Schulz (1998).** Turnover of Soil Organic Matter (SOM) and Long-Term Balances - Tools for Evaluating Sustainable Productivity of Soils. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 161, 409-424.
- Kroeze, C., A.R. Mosier & A.F. Bouwman (1999).** Closing the global N₂O budget: A retrospective analysis 1500 - 1994. *Global Biogeochemical Cycles*, 13 (1), 1-8.
- Kurakov, A.V., O.V. Pakhnenko, N.V. Kostina & M.M. Umarov (1997).** (Microscopic fungi producing nitrous oxide in nutrient media and in sterile soil). *Pochvovedenie*, 12, 1497-1503.
- Larsson, L., M. Ferm, Å. Kasimir-Klemedtsson & L. Klemedtsson (1998).** Ammonia and nitrous oxide emissions from grass and alfalfa mulches. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51, 41-46.
- LBL (1997).** Landwirtschaftliches Handbuch 1997. Witz Verlag, Basel.
- Leuenberger, M. & U. Siegenthaler (1992).** Ice-age atmospheric concentration of nitrous oxide from an Antarctic ice core. *Nature*, 360, 449-451.
- Machida, T., T. Nakazawa, Y. Fujii, S. Aoki & O. Watanabe (1995).** Increase in the atmospheric nitrous oxide concentration during the last 250 years. *Geophysical Research Letters*, 22 (21), 2921-2924.
- Marchetti, R., M. Donatelli & P. Spallacci (1997).** Testing Denitrification Functions of Dynamic Crop Models. *Journal of Environmental Quality*, 26, 394-401.
- Martin, T.L., N.K. Kaushik, J.T. Trevors & H.R. Whiteley (1999).** Review: Denitrification in temperate climate riparian zones. *Water, Air, and Soil Pollution*, 111, 171-186.
- Matthies, C., A. Griebhammer, M. Schmittroth & H.L. Drake (1999).** Evidence for Involvement of Gut-Associated Denitrifying Bacteria in Emission of Nitrous Oxide (N₂O) by Earthworms Obtained from Garden and Forest Soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 65 (8), 3599-3604.
- McElroy, M.B. & D.B.A. Jones (1996).** Evidence for an additional source of atmospheric N₂O. *Global Biogeochemical Cycles*, 10 (4), 651-659.
- McMahon, P.B. & K.F. Dennehy (1999).** N₂O Emissions from a Nitrogen-Enriched River. *Environmental Science & Technology*, 33, 21-25.

- Mengis, M., R. Gächter & B. Wehrli (1997a).** Sources and sinks of nitrous oxide (N₂O) in deep lakes. *Biogeochemistry*, 38, 281-301.
- Mengis, M., R. Gächter & B. Wehrli (1997b).** Stickstoff-Elimination in Schweizer Seen. *Gas, Wasser, Abwasser*, 77 (3), 174-180.
- Menzi, H., R. Frick & R. Kaufmann (1997).** Ammoniak-Emissionen in der Schweiz: Ausmass und technische Beurteilung des Reduktionspotentials. Schriftenreihe der FAL 26, Eidgenössische Anstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich-Reckenholz.
- Meyer, J., M. Sommer & R. von Schulthess (1996).** Stickstofffrachten aus Abwasserreinigungsanlagen. Istzustand, Eliminationspotential und Kostenwirksamkeit von Massnahmen. Schriftenreihe Umwelt 276. BUWAL, Bern.
- Minonzo, G., A. Grub & J. Fuhrer (1998).** Methan-Emissionen der schweizerischen Landwirtschaft. Schriftenreihe Umwelt 298. BUWAL, Bern.
- Minschwaner, K., R.J. Salawitch & M.B. McElroy (1993).** Absorption of Solar Radiation by O₂: Implications for O₃ and Lifetimes of N₂O, CFCl₃, and CF₂Cl₂. *Journal of Geophysical Research*, 98 (D6), 10543-10561.
- Monteith, J.L. & M.H. Unsworth (1990).** Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, London. ISBN 0-7131-2931-X.
- Mosier, A.R., C. Kroeze, C.D. Nevison, O. Oenema, S. Seitzinger & O. Van Cleemput (1998).** Closing the global atmospheric N₂O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 225-248.
- Mühlherr, I.H. & K.M. Hiscock (1998).** Nitrous oxide production and consumption in British limestone aquifers. *Journal of Hydrology*, 211, 126-139.
- Müller, C., R.R. Sherlock & P.H. Williams (1997).** Mechanistic model for nitrous oxide emission via nitrification and denitrification. *Biology and Fertility of Soils*, 24, 231-238.
- Müller, C., R.R. Sherlock & P.H. Williams (1998).** Field method to determine N₂O emission from nitrification and denitrification. *Biology and Fertility of Soils*, 28, 51-55.
- Neftel, A., A. Blatter, M. Schmid, B. Lehmann & S.V. Tarakanov (2000).** An Experimental Determination of the Scale Length of N₂O in the Soil of a Grassland. *Journal of Geophysical Research*, 105 (D10), 12095-12104.
- Neftel, A., H. Wanner, A. Blatter, W. Eugster, M. Fahmi, R. Hesterberg & M. Rosset (1994).** Stickstoffeintrag aus der Luft in ein Naturschutzgebiet. Umwelt-Materialien 28. BUWAL, Bern.
- Nevison, C.D., R.F. Weiss & D.J. Erickson III (1995).** Global oceanic emissions of nitrous oxide. *Journal of Geophysical Research*, 100 (C8), 15809-15820.
- NOAA (1999).** Atmospheric Nitrous Oxide Concentration Measurements. National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), Nitrous Oxide and Halocompounds Group (NOAH). <http://www.cmdl.noaa.gov/noah/>.
- Oenema, O., G.L. Velthof, S. Yamulki & S.C. Jarvis (1997).** Nitrous oxide emissions from grazed grassland. *Soil Use and Management*, 13, 288-295.
- Olivier, J.G.J., A.F. Bouwman, K.W. Van der Hoek & J.J.M. Berdowski (1998).** Global air emission inventories for anthropogenic sources of NO_x, NH₃ and N₂O in 1990. *Environmental Pollution*, 102 (Supplement 1), 135-148.

- Ortiz-Monasterio, J.I., P.A. Matson, J. Panek & R.L. Naylor (1996).** Nitrogen Fertilizer Management: Consequences for N₂O and NO Emissions in Mexican Irrigated Wheat. in: Diekkrüger, B., O. Heinemeyer & R. Nieder (ed.), *Transactions of the 9th Nitrogen Workshop*. Technische Universität Braunschweig und Forschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, 531-534.
- Paris, K. (1998).** Agricultural nutrient balances as agri-environmental indicators: an OECD perspective. *Environmental Pollution*, 102 (Supplement 1), 219-225.
- Parton, W.J., A.R. Mosier, D.S. Ojima, D.W. Valentine, D.S. Schimel, K.L. Weier & A.E. Kulmala (1996).** Generalized model for N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification. *Global Biogeochemical Cycles*, 10 (3), 401-412.
- Pleijel, H., J. Sild, H. Danielsson & L. Klemetsson (1998).** Nitrous oxide emissions from a wheat field in response to elevated carbon dioxide concentration and open-top chamber enclosure. *Environmental Pollution*, 102 (Supplement 1), 167-171.
- Pollard, R., R. West & W. Sutherland (1993).** Alternative Treaties: Synergistic Processes for Sustainable Communities and Global Responsibility. A Revised Edition of the Alternative Treaties from the International NGO Forum Rio de Janeiro, June 1-14, 1992. Ideas for Tomorrow Today & International Synergy, Millford, England.
- Poth, M. & D.D. Focht (1985).** ¹⁵N Kinetic Analysis of N₂O Production by *Nitrosomonas europaea*: an Examination of Nitrifier Denitrification. *Applied and Environmental Microbiology*, 49 (5), 1134-1141.
- Prasad, S.S., E.C. Zipf & X. Zhao (1997).** Potential atmospheric sources and sinks of nitrous oxide. 3. Consistency with the observed distributions of the mixing ratios. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D17), 21537-21541.
- Prasuhn, V. & M. Braun (1994).** Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Schriftenreihe der FAC Liebefeld 17. FAC, Liebefeld-Bern.
- Presler, J. & C. Gysi (1989).** Organische Böden des schweizerischen Mittellandes. Nationales Forschungsprogramm "Boden", Liebefeld-Bern.
- Riedo, M., A. Grub, M. Rosset & J. Fuhrer (1998).** A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling*, 105, 141-183.
- Riedo, M., D. Gyalistras & J. Fuhrer (2000).** Net primary production and carbon stocks in differently managed grasslands: site-specific sensitivity to an increase in atmospheric CO₂ and to climate change. *Ecological Modelling* (eingereicht).
- Rihm, B. (1996).** Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Eutrophying Atmospheric Deposition. Environmental Series 275, BUWAL, Bern.
- Robinson, D. & J.P. Conroy (1999).** A possible plant-mediated feedback between elevated CO₂, denitrification and the enhanced greenhouse effect. *Soil Biology & Biochemistry*, 31, 43-53.
- Ronen, D., M. Magaritz & E. Almon (1988).** Contaminated aquifers are a forgotten component of the global N₂O budget. *Nature*, 335, 57-59.
- Rudaz, A.O., E. Wälti, G. Kyburz, P. Lehmann & J. Fuhrer (1999).** Temporal variation in N₂O and N₂ fluxes from a permanent pasture in Switzerland in relation to management, soil water content and soil temperature. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 73, 83-91.

- Ruser, R., H. Flessa, R. Schilling, H. Steindl & F. Beese (1998).** Soil Compaction and Fertilization Effects on Nitrous Oxide and Methane Fluxes in Potato Fields. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 1587-1595.
- SBV (1922 - 1998).** Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung. Schweizerischer Bauernverband, Brugg.
- Schmid, M., A. Neftel, M. Riedo & J. Fuhrer (2000).** Process-based modelling of nitrous oxide emissions from different nitrogen sources in grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (eingereicht).
- Schwarzenbach, R.P., P.M. Gschwend & D.M. Imboden (1993).** Environmental Organic Chemistry. John Wiley & Sons, Inc., New York. ISBN 0-471-83941-8.
- Schwinning, S. & A.J. Parsons (1996).** Analysis of the coexistence mechanisms for grasses and legumes in grazing systems. *Journal of Ecology*, 84, 799-813.
- Seitzinger, S. & C. Kroeze (1998).** Global distribution of nitrous oxide production and N inputs in freshwater and coastal marine ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 12 (1), 93-113.
- Seneviratne, G. (1999).** A Cheap Way to Control N₂O in Agriculture. *Ambio*, 28 (4), 378.
- Shindell, D.T., D. Rind & P. Lonergan (1998).** Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse-gas concentrations. *Nature*, 392, 589-592.
- Skiba, U., L.J. Sheppard, C.E.R. Pitcairn & D. Fowler (1996).** Nitrous oxide emission and methane oxidation in woodland soil downwind of a poultry farm. in: Diekkrüger, B., O. Heinemeyer & R. Nieder (ed.), *Transactions of the 9th Nitrogen Workshop*. Technische Universität Braunschweig und Forschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, 561-564.
- Smith, K.A., I.P. McTaggart & H. Tsuruta (1997).** Emissions of N₂O and NO associated with nitrogen fertilization in intensive agriculture, and the potential for mitigation. *Soil Use and Management*, 13, 296-304.
- Sommer, J., G. Ciplak, A. Linn, E. Sümer, G. Benckiser & J.C.G. Ottow (1998).** Quantification of emitted and retained N₂O in a municipal waste water treatment plant with activated sludge and nitrifying-denitrifying units. *Agribiological Research*, 51 (1), 59-73.
- Spieß, E. (1999).** Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 1995. Schriftenreihe der FAL 28. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich-Reckenholz.
- Stevens, R.J., R.J. Laughlin & J.P. Malone (1998).** Soil pH affects the processes reducing nitrate to nitrous oxide and di-nitrogen. *Soil Biology & Biochemistry*, 30 (8/9), 1119-1126.
- SZG (1998).** Jahresbericht 1997 der Schweizerischen Zentralstelle Gemüsebau (SZG). Schweizerische Zentralstelle Gemüsebau, Koppigen.
- Thomley, J.H.M. (1998).** Grassland Dynamics. An Ecosystem Simulation Model. CAB International, Oxon. ISBN 0-85199-227-7.
- Thomley, J.H.M., J. Bergelson & A.J. Parsons (1995).** Complex Dynamics in a Carbon-Nitrogen Model of a Grass-Legume Pasture. *Annals of Botany*, 75, 79-94.
- Titus, J.S. & S.-M. Kang (1982).** Nitrogen Metabolism, Translocation, and Recycling in Apple Trees. *Horticultural Reviews*, 4, 204-246.
- UNFCCC (1999).** Greenhouse Gas Inventory Database. <http://www.unfccc.de>.

- Van Aardenne, J.A., C. Kroeze & L. Hordijk (1998).** Analysis of the Uncertainties in the IPCC Default Method for Estimating N₂O Emissions from Agricultural Soils. in: Chan, K., S. Tarantola & F. Campolongo (ed.), *SAMO Second International Symposium on Sensitivity Analysis of Model Output*, EC Joint Research Centre, Ispra, Italy, 305-308.
- Van der Hoek, K.W. (1998).** Nitrogen efficiency in global animal production. *Environmental Pollution*, 102 (Supplement 1), 127-132.
- Velthof, G.L. & O. Oenema (1995).** Nitrous oxide fluxes from grassland in the Netherlands: I. Statistical analysis of flux-chamber measurements. *European Journal of Soil Science*, 46, 533-540.
- Velthof, G.L. & O. Oenema (1997).** Nitrous oxide emission from dairy farming in the Netherlands. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 45, 347-360.
- Vitousek, P.M., J.D. Aber, R.W. Howarth, G.E. Likens, P.A. Matson, D.W. Schindler, W.H. Schlesinger & D.G. Tilman (1997).** Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 7 (3), 737-750.
- Volk, C.M., J.W. Elkins, D.W. Fahey, G.S. Dutton, J.M. Gilligan, M. Loewenstein, J.R. Podolske, K.R. Chan & M.R. Gunson (1997).** Evaluation of source gas lifetimes from stratospheric observations. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D21), 25543-25564.
- Von Schulthess, R., M. Kühni & W. Gujer (1995).** Release of nitric and nitrous oxides from denitrifying activated sludge. *Water Research*, 29 (1), 215-226.
- Wagner-Riddle, C. & G.W. Thurtell (1998).** Nitrous Oxide Emissions from Agricultural Fields during Winter and Spring Thaw as Affected by Management Practices. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 151-163.
- Walther, U., H. Menzi, J.-P. Ryser, R. Flisch, B. Jeangros, W. Kessler, A. Maillard, A.F. Siegenthaler & P.A. Vuilloud (1994).** Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. *Agrarforschung*, 1 (7), Beilage, 1-40.
- Weier, K.L., J.W. Doran, J.F. Power & D.T. Walters (1993).** Denitrification and the Dinitrogen/Nitrous Oxide Ratio as Affected by Soil Water, Available Carbon, and Nitrate. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 66-72.
- Weiss, R.F. & B.A. Price (1980).** Nitrous oxide solubility in water and seawater. *Marine Chemistry*, 8, 347-359.
- Weslien, P., L. Klemetsson, L. Svensson, B. Galle, Å. Kasimir-Klemetsson & A. Gustafsson (1998).** Nitrogen losses following application of pig slurry to arable land. *Soil Use and Management*, 14, 200-208.
- Whitehead, D.C. (1995).** Grassland Nitrogen. CAB International, Oxon. ISBN 0-85198-915-2.
- Wild, D., R. von Schulthess & W. Gujer (1995).** Structured modelling of denitrification intermediates. *Water Science and Technology*, 31 (2), 45-54.
- Williams, E.J., G.L. Hutchinson & F.C. Fehsenfeld (1992).** NO_x and N₂O emissions from soil. *Global Biogeochemical Cycles*, 6 (4), 351-388.
- Wu, L. & M.B. McGechan (1998).** A Review of Carbon and Nitrogen Processes in Four Soil Nitrogen Dynamics Models. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69, 279-305.