

Gasförmiger Austausch von Stickstoffverbindungen

Albrecht NEFTEL, Andreas BLATTER, Andreas GUT, Matthias FAHRNI und Thomas STAFFELBACH, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL) - Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL), Liebefeld, CH-3003 Bern

Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen findet durch den ständigen Auf- und Abbau von organischem Material ein grosser Stoffumsatz statt. Das Angebot von pflanzenverfügbarem Stickstoff ist eine sehr wichtige regulierende Grösse für das Wachstum. Stickstoffhaltige Moleküle werden ständig zwischen den Kompartimenten Boden-Pflanze-Tierwelt verschoben und gelangen in die Atmosphäre. Diesem Austausch gasförmiger Stickstoffverbindungen von NH₃, NO und N₂O kommt in ökologischer Hinsicht regional bis global eine wichtige Bedeutung zu.

Landwirtschaftliche Kulturpflanzen synthetisieren aus elementaren chemischen Bausteinen komplexere organische Moleküle (Eiweisse, Fette, Stärke usw.) in Form von Biomasse, welche Menschen und Nutztieren als Nahrungsmittel dienen. In einem Weizenfeld werden rund 15'000 kg Pflanzenmaterial pro Hektare und Jahr produziert; darin befinden sich etwa 1 % (Gewichtsprozent) Stickstoff, hauptsächlich gebunden in organischen Molekülen (Harper *et al.* 1987). Stickstoff wird zum grössten Teil in anorganischer Form als Nitrat (NO₃⁻) oder Ammonium (NH₄⁺) durch die Wurzeln aus dem Boden entnommen. Der anorganische Stickstoff wird bereitgestellt durch Zugabe von Stickstoffdüngern und durch die Umwandlung von organischem Material durch Mikroorganismen. Im Boden vermögen verschiedene Bakterien und Pilze organische N-Verbindungen abzubauen und Ammonium zu produzieren (Mineralisierung). Andere Bakterien können Ammonium weiter zu Nitrit (NO₂⁻) und Nitrat oxidieren (Nitrifikation). Andererseits kann bakteriell Nitrat zu Stickstoffmonoxid (NO), Lachgas (N₂O) und schliesslich zu molekularem Stickstoff (N₂) reduziert werden (Denitrifikation). Bei diesen Umwandlungsprozessen kann NO, N₂O und N₂ freigesetzt werden und in die Atmosphäre gelangen. Abbildung 1 zeigt ein vereinfachtes Schema der Nitrifikation und Denitrifikation und die Verluste stickstoffhaltiger Gase. In landwirtschaftlichen Ökosystemen werden stickstoffhaltige Moleküle ständig zwischen den Kompartimenten Boden-Pflanzenwelt-Tierwelt verschoben. Es handelt sich dabei um ein offenes System. Einerseits wird mit den landwirtschaftlichen Produkten Stickstoff entfernt, andererseits sind alle drei Kompartimente direkt

mit der Atmosphäre verbunden. An den Grenzflächen zwischen Biosphäre und Atmosphäre findet ständig ein Austausch von Energie und Materie und somit auch von gasförmigen Stickstoffkomponenten Ammoniak (NH₃), NO und N₂O statt.

Umwandlung stickstoffhaltiger Moleküle

Biochemisch gesehen ist die Pflanze eine Fabrik in der ständig organische Moleküle zusammengebaut und andere gleichzeitig wieder in elementare Bausteine zerlegt werden. Die Produktion richtet sich dabei nach den momentanen Bedürfnissen der Pflanze. Die wichtigen organischen Bausteine, Aminosäuren und Nukleinsäuren, enthalten Stickstoff. Diese Bausteine werden von Enzymssystemen aufgebaut, die Stickstoff aus Ammonium und Nitrat entnehmen. Der wichtigste Weg geht über die Glutamin-Synthetase und Glutamat-Synthase (GS/GOGAT), welche von Ammonium als Stickstoffsubstrat ausgeht. In der Pflanze wird anorganischer Stickstoff als Nitrat transportiert. Nitratreduktase und Nitritreduktase reduzieren Nitrat über Nitrit zu Ammonium und stellen dem GS/GOGAT-Zyklus Ammonium zur Verfügung. Ammonium selber ist ein Zellgift. Die Pflanze muss deshalb die Konzentrationen tief halten, entweder durch Ausga-

sen über die Spaltöffnungen der Blätter oder über die GS/GOGAT-Assimilation.

Gasaustausch: Pflanze-Atmosphäre

Die Spaltöffnungen (Stomata) sind eine der wichtigsten Grenzflächen zwischen der Biosphäre und der Atmosphäre. Sie regulieren den Gasaustausch, besonders von CO₂, O₂ und H₂O. Prinzipiell werden auch alle andern Spurengase, die sich in der Atmosphäre und/oder der Pflanze befinden ausgetauscht, somit auch NH₃. Der Gasfluss durch die Spaltöffnungen kann mathematisch dargestellt werden als:

$$F_{\text{Gas}} \propto \frac{1}{R_{\text{Stomata}}} \cdot (c_{\text{ausseen}} - c_{\text{innen}})$$

Durch die Spaltöffnung stellt sich beispielsweise ein NH₃-Fluss (F_{Gas}) ein, dessen Richtung vom Vorzeichen der Konzentrationsdifferenz zwischen dem Innenraum (c_{innen}) und der umgebenden Luft (c_{ausseen}) abhängt. Ist die Konzentration im Innern grösser als die Umgebungskonzentration, fliesst NH₃ nach aussen, die Pflanze gibt NH₃ ab. Im umgekehrten Fall nimmt die Pflanze NH₃ auf und muss dieses weiterverarbeiten. Die Spaltöffnungen regulieren den Austauschfluss. Sind die Spaltöffnungen weit offen, ist der Widerstand (R_{Stomata}) klein und somit der Fluss maximal und umgekehrt. Wenn die Innen- und die Aussenkonzentrationen gleich sind, ist der Fluss gleich Null und der sogenannte Kompensationspunkt ist erreicht. Die entsprechende Konzentration wird Kompensationskonzentration genannt.

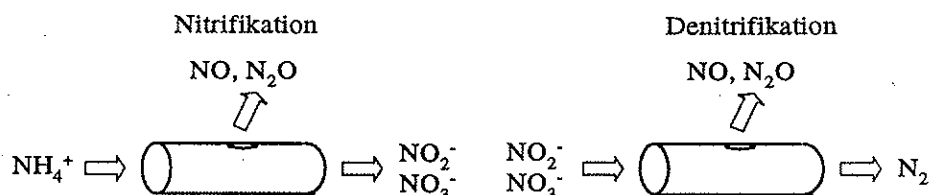


Abb. 1. «Hole in the pipe»-Modell nach Firestone und Davidson (1989). Nitrifikation und Denitrifikation, sind mikrobielle Prozesse, welche im Boden ablaufen. NO und N₂O sind gasförmige Zwischenprodukte, welche in die Atmosphäre entweichen können.

Abbildung 2 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein Weizenblatt. Ammonium gelangt durch die Zellmembran in die Apoplastenflüssigkeit. In Abhängigkeit des pH-Wertes und der Temperatur stellt sich im stomatären Raum die NH_3 -Konzentration gemäss dem chemischen Gleichgewicht ein.

NH_3 -Kompensationskonzentrationen von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen liegen typischerweise zwischen 2 und $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Sutton *et al.* 1995).

Analog der Definition der stomatären Kompensationskonzentration für NH_3 , kann im Porenraum des Bodens eine Kompensationskonzentration für Gase definiert werden. Diese ist dann erreicht, wenn die Produktions- und Aufnahmeprozesse gleich gross sind.

In einem voll ausgebildeten Weizenfeld geschieht der NH_3 -Austausch fast ausschliesslich über die Pflanze, der Austausch mit dem Boden ist vernachlässigbar. NH_3 wird vom Bodenmaterial stark absorbiert. NH_3 -Konzentrationen im Porenvolumen des Bodens sind sehr tief und der Boden ist deshalb allgemein ein Senke für NH_3 (Nefel *et al.* 1997). Dies gilt nicht für die Bodenoberfläche, die beispielsweise nach Ausbringen von Hofdüngern kräftig NH_3 abgibt. Auch abgestorbenes Pflanzenmaterial das auf dem Boden liegt und abgebaut wird, emittiert erhebliche Mengen an NH_3 .

NO und N_2O werden hingegen kaum von der Pflanze aufgenommen oder abgegeben, hier geschieht der überwiegende Anteil des Austausches zwischen dem Boden und der Atmosphäre. Da die Kompensationskonzentrationen für NO und N_2O im Boden generell höher sind als die Konzentrationen in der Luft, wird meistens NO und N_2O abgegeben (Conrad 1994).

Bedeutung der Austauschflüsse

Die durchschnittlichen NH_3 -Emissionen aus der Tierhaltung pro Hektare landwirtschaftlicher Nutzfläche (exklusive Alpweiden) der Schweiz liegen bei rund 43 kg N pro Jahr, was etwa 24 % des totalen N-Inputs entspricht (Stadelmann *et al.* 1996). Gelangt ein NH_3 -Molekül von einer Pflanze oder von der Bodenoberfläche in die Atmosphäre, wird es mit dem Wind fortgetragen. Typischerweise legen NH_3 -Moleküle einige Kilometer zurück; bevor sie wieder auf den Boden gelangen oder von einem Tröpfchen in der Atmosphäre aufgenommen werden.

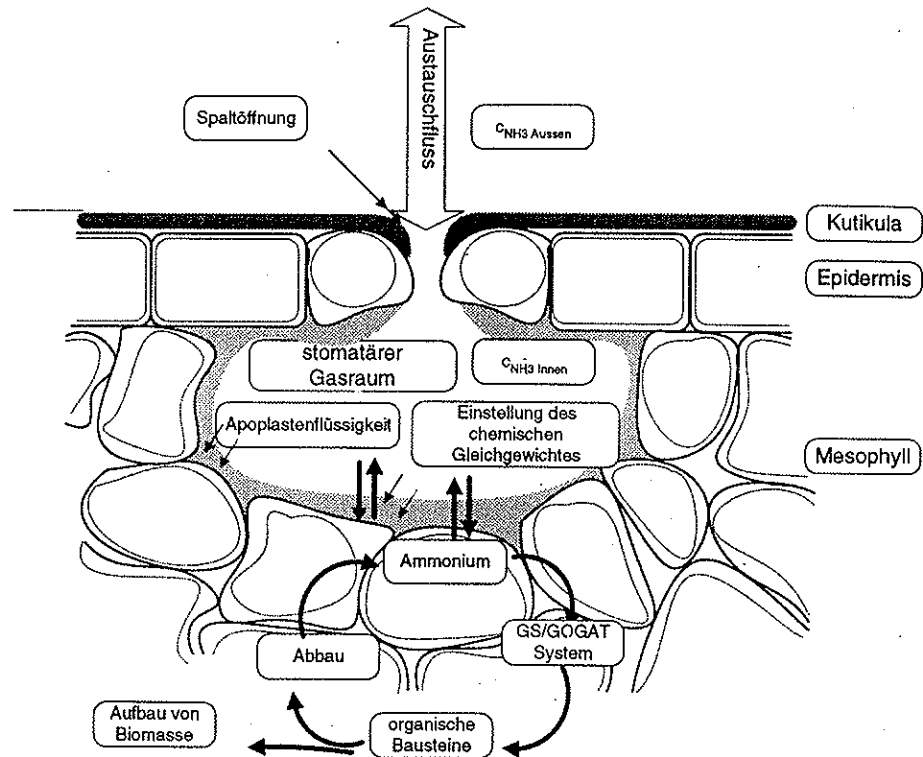


Abb. 2. Ammoniak- und Ammonium-Austauschvorgänge im stomatären Raum eines Blattes.

Die Grössenordnung der NH_3 -Konzentrationen (c_{mittel}) in den bodennahen Luftschichten über dem schweizerischen Mittelland ergibt sich auch aus einer einfachen Abschätzung. Angenommen wird, dass die mittlere Aufenthaltsdauer (t) von NH_3 -Molekülen in der Atmosphäre 6 bis 18 Stunden beträgt und die mittleren Emissionen (F_{Emiss}) (bezogen auf die Gesamtfläche des schweizerischen Mittellandes) 10 bis 30 kg N/ha und Jahr oder 0,03 bis 0,1 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ und s})$. Z_{mix} entspricht der Mächtigkeit der gut durchmischten Luftschicht über dem Boden. Als Formel gilt:

$$c_{\text{mittel}} = F_{\text{Emiss}} \cdot \frac{t}{Z_{\text{mix}}}$$

Mit einer Mächtigkeit für Z_{mix} von 1000 m ergeben sich NH_3 -Konzentrationen zwischen 1 bis $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dies ist etwa gleich oder tiefer als die Kompensationskonzentration landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Somit ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass Kulturpflanzen NH_3 emittieren. Etwa 2 bis 3 % der schweizerischen NO -Emissionen (Jahresfracht) stammten 1990 aus landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich genutzten Böden (Keller *et al.* 1995). Mit der systematischen Einführung der geregelten Dreiwegkatalysatoren und den verbesserten Feuerungsanlagen wird der prozentuale Anteil der NO -Emissionen aus dem Boden steigen. Da die mikrobielle NO -Produktion im Boden stark tempera-

turabhängig ist, ist der Anteil im Sommer höher und kann in ländlichen Gebieten die gleiche Grössenordnung annehmen, wie die vom Verkehr verursachten Emissionen. Bezogen auf die ganze Schweiz werden die Emissionen aus städtischen Agglomerationen und von den grossen Verkehrsachsen weiterhin überwiegen.

Stickstoffmonoxid spielt eine wichtige Rolle bei der Ozonbildung in den bodennahen Luftschichten. In den ländlichen Gebieten der Schweiz ist die Ozonproduktion durch das Angebot von NO_x (NO und NO_2) begrenzt. In erster Näherung darf man davon ausgehen, dass die Ozonproduktion linear mit dem Angebot von NO_x zunimmt. Modellrechnungen ergaben, dass die NO -Emissionen aus den Böden heute bis zu 7 % zur Ozonproduktion in der Schweiz beitragen (Staffelbach und Nefel 1997).

N_2O ist in der Troposphäre chemisch reaktionsträg und wird in der Stratosphäre durch die harte UV-Strahlung abgebaut. Die Lebensdauer in der Troposphäre beträgt ungefähr 120 Jahre. N_2O -Moleküle absorbieren Wärmestrahlung und beeinflussen deshalb die Temperatur auf der Erdoberfläche. Die N_2O -Konzentration ist in der Atmosphäre während der letzten Jahrzehnte systematisch angestiegen. Seit dem Beginn der Industrialisierung beträgt der Anstieg etwa 10 %. Daher ist dieses Gas an der globalen Erwärmung beteiligt. N_2O -Moleküle absorbieren Wärmestrahlung rund 400 mal effektiver als CO_2 -Moleküle.

Deshalb trägt N_2O mit 5 % zum Treibhaus-effekt bei, obwohl die Konzentration in der Atmosphäre 1000 mal kleiner ist als jene von CO_2 .

Die NO - und N_2O -Emissionen sind im Vergleich zu den NH_3 -Emissionen kleiner und haben für die Landwirtschaft als N-Verlust gesehen eine geringere Bedeutung. Wegen ihrer wichtigen Rolle in klimatischen und atmosphären-chemischen Prozessen müssen sie aber genauer quantifiziert werden.

FLUX - Ein Forschungsprojekt des IUL

Viele Aspekte des Austausches der N-haltigen Gase NH_3 , NO und N_2O zwischen der Atmosphäre und der Biosphäre sind bekannt und in etlichen Labor- und Modellstudien untersucht worden. Daraus wurden Parametrisierungen abgeleitet, um die Aufnahme beziehungsweise Abgabe zu beschreiben. Diese werden beispielsweise für numerische Simulationen von regionalen Ozonverteilungen oder auch in Simulationen der globalen Klimaveränderung verwendet. Für Agrarökosysteme werden die Verluste oft auch als Prozentzahlen der ausgebrachten N-Düngermenge beschrieben. Diese Beschreibungen sind brauchbare Ansätze, um mittlere Austauschflüsse der aktuellen Situation zu beschreiben. Sie genügen jedoch nicht, um den Einfluss von Änderungen in der landwirtschaftlichen Praxis auf die Austauschflüsse zu beurteilen oder sogar Empfehlungen für den landwirtschaftlichen Alltag abzugeben.

Wir haben deshalb 1996 das Projekt Bidirektionale Stoffflüsse (FLUX) gestartet, welches zum Ziel hat, die räumliche und zeitliche Dynamik der Austauschflüsse der stickstoffhaltigen Gase NH_3 , NO und N_2O auf lokaler bis regionaler Skala zu erfassen. Als Untersuchungsgebiet wurde das Kerzersmoos im Seeland ausgewählt. Es ist eines der wenigen Gebiete in der Schweiz, wo Untersuchungen in dieser Art über-

haupt möglich sind (ebene Fläche, ausgeprägte Windrichtungen, grosse zusammenhängende und intensiv genutzte landwirtschaftliche Flächen).

Die Aufgaben sind zu vielfältig und zu komplex, als dass sie vom IUL alleine gelöst werden könnten. Deshalb wurde FLUX verknüpft mit dem schweizerische Projekt BAT (Biosphere Atmosphere Transfer), welches seinerseits in das Euro-trac-2 Subprojekt BIATEX-2 (Biosphere/Atmosphere exchange of pollutants) eingebettet ist.

NH_3 -Messungen im Winterweizenfeld

Erste Messungen während der Vegetationsperiode 1996 wurden in einem Weizenfeld (Arina/Tamaro-Mischung) durchgeführt. Mit neuen experimentellen Ansätzen kann die Dynamik der wichtigsten Prozesse detailliert aufgezeigt werden.

Für den NH_3 -Austausch sind die Prozesse im Weizenfeld selber entscheidend. Deshalb wurden kontinuierliche Profilmessungen auf vier Höhen im Feld durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die mittleren Tagesverläufe der NH_3 -Konzentrationen in einem Weizenfeld. Tagsüber ist die höchste gemessene Konzentration auf der Höhe der Ähren (110 cm). Die Konzentration 20 cm darüber ist deutlich tiefer. Die abnehmende Konzentration mit zunehmender Höhe zwischen 110 und 130 cm zeigt eine Emission an. Solange die Stomata geöffnet sind, das heisst bei aktiver Photosynthese, findet eine NH_3 -Abgabe statt. Nachts bei geschlossenen Stomata und Taubildung wird NH_3 auf die feuchten Oberflächen deponiert. Die so deponierte Menge kann am Morgen bei zunehmender Temperatur wieder verdampfen. Die Konzentrationen innerhalb des Bestandes nehmen gegen den Boden hin ab. Damit gibt es einen Fluss von den Ähren und dem Fahnenblatt in den unteren Teil des Weizenbestandes und auf den Boden. Dieser NH_3 -Fluss innerhalb des

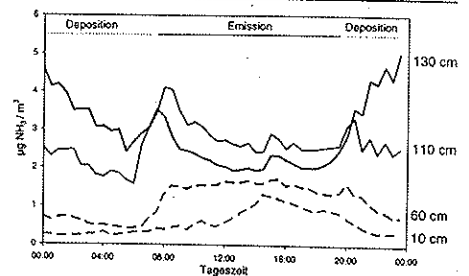


Abb. 3. Mittlerer NH_3 -Tagesverlauf gemessen auf vier Höhen in einem Weizenfeld. Die Zeitspanne umfasst die Zeit der Blüte bis zur Reifezeit (10. Juni bis 17. Juli 1996).

Weizenbestandes ist viel kleiner, als jener zwischen dem Weizenfeld und der Atmosphäre, denn der Pflanzenbestand vermindert den turbulenten Windaustausch stark. Erste Abschätzungen zeigen, dass das untersuchte Weizenfeld während der ganzen Vegetationsperiode zwischen 2 bis 20 kg N/ha als NH_3 abgibt, also einen erheblichen Prozentsatz des ganzen N-Gehaltes des Weizens. Diese Emissionen gehören zur N-Regulation der Pflanze. Ist die N-Versorgung reichlich oder sogar überreichlich, erhöht sich auch der Kompensationspunkt und die Emission von NH_3 . Hohe Kompensationspunkte haben eine ökologisch bedeutsame Konsequenz. Felder mit einer hohen Kompensationskonzentration nehmen kaum NH_3 aus der Luft auf. NH_3 wird somit vor allem auf Flächen deponiert, die einen tiefen Kompensationspunkt aufweisen. Dies sind überwiegend naturnahe Ökosysteme wie Wälder und Moore, deren Stickstoffhaushalt dadurch verändert wird.

NO - und N_2O -Konzentrationsmessungen im Boden

Konzentrationen von Spurengasen im Boden werden mittels vergrabener gaspermeabler Schläuche gemessen, durch die eine kleine Prüfgasmenge fließt. Über den diffusen Gasaustausch durch die Membran gleicht sich die Konzentration im Prüfgas der Bodenkonzentration an und kann mit geeigneten Geräten gemessen werden (Gut et al. 1997) (Abb. 4).

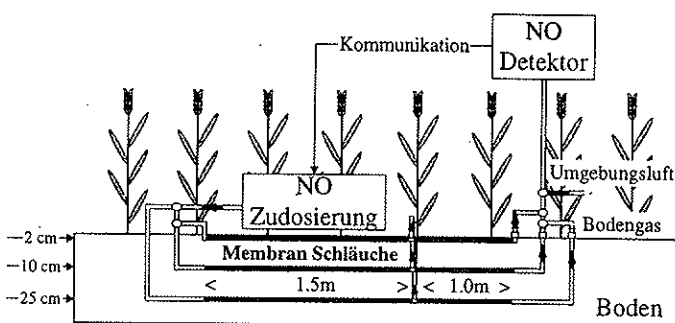


Abb. 4. Aufbau der NO -Bodengasmessung.

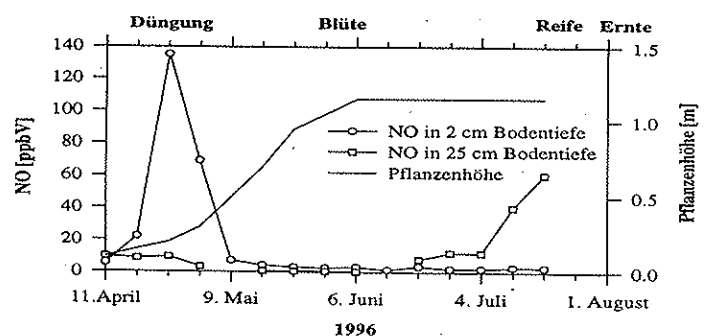


Abb. 5. Schematischer Verlauf der NO -Konzentrationen im Bodengas in 2 cm und 25 cm Tiefe.

Um eine systematische Ab- oder Anreicherung im Boden zu vermeiden, wird das eingespiessene Prüfgas der gemessenen Konzentration angepasst.

Abbildung 5 zeigt den generellen Verlauf der NO-Messungen im Porenvolumen in 2 und 25 cm Bodentiefe.

Die Produktion von NO im Boden wird durch N-Mineraldünger stimuliert, welcher auf die Oberfläche ausgebracht wird. Das «Gedächtnis» des Bodens für NO reicht nur einige wenige Millimeter tief (Galbally *et al.* 1989). Die kontinuierlich erfassten Bodenprofile zeigen, dass die NO-Konzentration in 2 cm Bodentiefe auf die Düngergabe reagiert, währenddem in 25 cm Tiefe keine Reaktion mehr ersichtlich ist. Überraschende Resultate ergaben die N₂O-Konzentrationsmessungen im Boden. Das Verlegen der Schläuche ist eine Störung des Bodens und zieht eine Verschiebung des N₂O-Kompensationspunktes nach sich, welche mehrere Wochen anhält. Abbildung 6 zeigt den Vergleich zweier unmittelbar benachbarten Bodenprofile in einem Kunstwiesenfeld.

Für das Profil A wurden die Schläuche Ende Oktober 1996 vergraben, für das Profil B am 18. März 1997. Bemerkenswert ist, dass die Konzentrationen von N₂O im Profil A, welches als weniger gestört betrachtet werden muss, tiefer als die atmosphärische Konzentration sind. Dies würde bedeuten, dass das untersuchte Kunstwiesenfeld eine Senke für N₂O darstellen könnte.

Ausblick

Für NH₃ wird eine neuartige Messtechnik eingesetzt, die sogenannte Relaxed Eddy Akkumulation Technik (REA). Dabei wird durch eine schnelle Ventilschaltung zwischen steigenden und sinkenden Luftwirbeln unterschieden. Diese Methode wird es uns erlauben den NH₃-Fluss besser zu beschreiben.

Flussmessungen sind sehr aufwendig und können für NO nur zu ausgewählten Zeitpunkten durchgeführt werden, während die Bodengasmessungen kontinuierlich vorliegen. Während der Vegetationsperiode 1997 konzentrieren wir uns darauf eine mathematische Beschreibung zu finden, welche es uns erlaubt, die Flüsse aufgrund der gemessenen Bodengaskonzentrationen zu schätzen. Für NO werden die Flüsse mit Kammern, welche den Boden bedecken, direkt bestimmt und parallel dazu der Verlauf der Bodenkonzentrationen in 2, 5 und 10 cm Bodentiefe gemessen. Bei den N₂O-Messungen richtet sich das Hauptaugenmerk auf die Frage, ob und falls ja unter welchen Umständen landwirtschaftlich genutzte Böden auch N₂O aufnehmen können.

LITERATUR

Conrad R., 1994. Compensation concentration as critical variable for regulating the flux of trace gases between soil and atmosphere. *Biogeochemistry* 27, 155-170.

Firestone M.K. and Davidson E.A., 1989. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. In: Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, edited by M.O. Andreae and D.S. Schimel, pp 7-21, John Wiley & Sons, New York.

Galbally I.E. and Johansson C., 1989. A model relating laboratory measurements of rates of nitric oxide production and field measurements of nitric oxide emissions from soils. *Journal of Geophysical Research* 94, 6473-6480.

Gut A., Blatter A., Fahrni M., Neftel A., Staffelbach T. and Lehmann B., 1997. A New membrane tube technique (METT) for continuous soil gas measurements. *Plant and Soil Science* (submitted).

Harper L.A., Sharpe R.R., Langdale G.W. and Giddens J.E., 1987. Nitrogen cycling in a wheat crop: soil, plant, and aerial nitrogen transport. *Agronomy Journal* 79, 965-973.

Keller J., Andreani-Aksoyoglu S. and Joss U., 1995. Inventory of natural emissions in Switzerland. In Proceedings of the 3rd international Conference «Air Pollution '95», *Comput. Mech. Public.*, pp. 339-346.

Neftel A., Blatter A., Gut A., Högger D., Meixner F.X., Ammann C. and Nathaus F.J., 1997. NH₃ soil and soil surface gas measurement - A contribution to determine the compensation point for NH₃. *Atmospheric Environment* (in press).

Sutton M. A., Schjoerring J.K. and Wyers G.P., 1995. Plant-atmosphere exchange of ammonia. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 351, 261-278.

Stadelmann F.X., Menzi H., Pfefflerli S. und Zimmermann A., 1996. Ammoniak-Emissionen Schweiz - Stand, Entwicklung, technische und betriebswirtschaftliche Möglichkeiten zur Reduktion, Empfehlungen. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW). Tänikon, 87pp.

Staffelbach T. and Neftel A., 1997, Relevance of biogenic emitted trace gases for the ozone production in the planetary boundary layer in Central Europe. *Schriftenreihe der FAL* 25, (in Vorbereitung).

RÉSUMÉ

Echange de composés azotés

Dans les sols agricoles, une quantité importante de matière organique est continuellement synthétisée et décomposée. L'offre en azote disponible pour les plantes est un important facteur réglant leur croissance. Des molécules azotées sont continuellement déplacées entre les compartiments sol-plante-régne animal. La limite entre la biosphère et l'atmosphère est une peau perméable aux gaz, au travers de laquelle ont lieu les échanges vitaux de l'énergie, de l'eau, de CO₂ et d'autres éléments nutritifs. Cet échange de composés azotés gazeux, comme le NH₃, le NO et le N₂O revêt une grande importance du point de vue écologique, allant de l'échelle régionale à l'échelle globale.

SUMMARY

Gaseous exchange of N-compounds

Intensively managed areas are characterized by a high turnover of organic material. N-containing compounds are cycled in the soil-plant-animal subsystems. Plant available N-compounds are an important factor for the growth of the plant. The three subsystems are all directly linked to the atmosphere. The interface between the three compartments and the atmosphere can be regarded as a semipermeable membrane where the vital exchange of energy, water, carbon dioxide and gaseous trace substances (NH₃, NO and N₂O) takes place. This exchange is ecologically important from the regional to the global scale.

KEY WORDS: biosphere-atmosphere exchange, NH₃, NO, N₂O

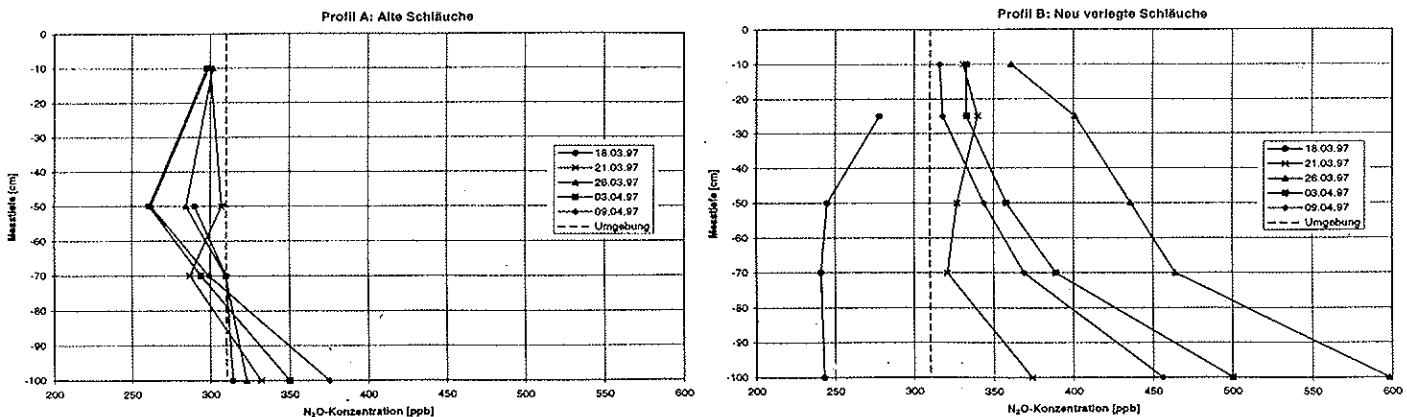


Abb. 6. N₂O-Bodengasprofile in einem Kunstwiesenfeld. Für das Profil A wurden die Schläuche sechs Monate früher eingegraben als für das Profil B.