

Tagungsbeitrag zu: Postervorstellung
der Kommission IV

Titel der Tagung: Böden - eine endliche
Ressource

Jahrestagung der DBG 05. -13. Sept.
2009 in Bonn

Berichte der DBG (nicht begutachtete
online Publikation)

<http://www.dbges.de>

Entwicklung eines mechanistischen Modells zur Simulation der frostbedingten N₂O Emission aus Böden - Implementierung einer verzögerten N₂O-Reduktase-Aktivität

E.Höhne¹, O.Christen¹, C.F.Stange^{1,2}

Zusammenfassung

In dieser Arbeit ist ein einfaches Modell entwickelt worden, das sowohl eine vollständige Denitrifikation simulieren, aber auch auf die Einflüsse, die ein Frosterignis mit sich bringt, reagieren kann. Die Implementierung der verzögerten Aktivität der N₂O-Reduktase war in diesem Modell ein neuer Ansatz.

Schlüsselwörter

N₂O-Modell, Frost-Tau-Zyklen, ¹⁵N-N₂O

Einleitung

In vielen Untersuchungen z.B. von Röver et al. (1998), Flessa et al. (1995), Teepe et al. (2000), Ruser et al. (2001) wurde eine erhöhte N₂O-Emission bei Frost-Tau-Prozessen beschrieben

An nur wenigen Tagen können bis zu über 70% der N₂O-Gesamtjahremission während Frost-Tau-Ereignissen aus Böden emittieren (Röver et al., 1998). Die Klärung der Ursachen hinter diesem Phänomen ist noch bruchstückhaft und hypothetisch.

[1] *Institute of Agricultural and Nutritional Sciences, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg; eva.hoehne@landw.uni-halle.de*

[2] *Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Theodor-Lieser-Str.4, D-06120 Halle*

Versuche von Müller et al. (2003), Sehy (2004), Morkved et al. (2006) und Öquist et al. (2007), in denen mit dem stabilen Stickstoffisotop ¹⁵N gearbeitet wurde, identifizieren eindeutig die Denitrifikation als den zu Grunde liegenden Prozess.

Nach einer Literaturstudie wurden 5 Hypothesen zu den möglichen Ursachen der N₂O-Emissionen während der Frost-Tau-Phase erstellt und mit Hilfe des entwickelten Modells untersucht und bewertet.

Kurze Modellbeschreibung

Der Grundaufbau des Modells basiert auf dem Denitrifikationsmodell von Wild et al. (1995), in dem die Michaelis-Menten-Kinetik und die Substrathemmungen der Enzyme berücksichtigt werden. Dieses Modell beschreibt Denitrifikation in Abwässern und musste daher in vielen Parametern an die Bedingungen im Boden angepasst werden.

Das Modell für die Denitrifikation im Boden wurde mit dem Datensatz aus dem Versuch von Leffelaar und Wessel (1988) parametrisiert und mit der Mineralisation, der Nitrifikation und der bodenwassergehaltsabhängigen Konzentration der Substrate erweitert.

Um das Modell an den Ergebnissen der ¹⁵N-Versuche testen zu können, wurden zusätzlich die ¹⁵N-Flüsse abgebildet.

Hypothesen zur Ursache der N₂O Frostemissionen:

1. Das teilweise Gefrieren des Bodenwassers konzentriert die Substrate der Denitrifikation in der verbleibenden flüssigen Phase auf.
2. Durch den Bodenfrost kommt es zu einem teilweisen Absterben der mikrobiellen Biomasse, so dass leicht verwertbare C- und N-Verbindungen freigesetzt werden und sich die Verfügbarkeit an Substrat im Boden erhöht.
3. Die Gasdiffusion wird durch Eisbildung in den Bodenporen verringert,

so dass der Sauerstoffpartialdruck im Boden sinkt und gleichzeitig das N₂O nur vermindert entweichen kann und sich unter der Diffusionsbarriere anreichert.

4. Durch die Bildung von Eis und das Aufkonzentrieren von Ionen im Restwasser kommt es zum kapillarem Aufstieg von Wasser aus dem Unterboden, was wiederum ein reduzierendes Milieu begünstigt.
5. Verzögerte Aktivität der N₂O-Reduktase bei Einsetzen denitrifizatorischer Bedingungen und/oder die Denitrifikation während Frost-Tau-Phasen wird von Pilzen dominiert, die keine N₂O-Reduktase besitzen.

Die verzögerte N₂O-Reduktase Aktivität ist bedingt durch:

- Eine nicht-kompetitive Hemmung des Enzyms durch O₂ und NO₃⁻
- bei der Umstellung des Stoffwechsels auf N-Oxide wird es als letztes ausgebildet
- höhere Temperatursensitivität gegenüber niedrigen Temperaturen als die anderen Reduktase-Enzyme

Implementierung der Hypothese 5 in das Modell

- 1) Michaelis-Menten-Kinetik der gehemmten N₂O → N₂ - Reduktion (Enzymhemmung)

$$\frac{dN_2}{dt} = k * \frac{A_{N_2O}}{(A_{N_2O} + Km_{N_2O})} * \frac{I_{NO_3}}{(I_{NO_3} + S_{NO_3})} * \frac{I_{O_2}}{(I_{O_2} + S_{O_2})} * XH_III$$

- 2) Verzögerte N₂O-Reduktase Aktivität

$$\frac{XH_III}{dt} = k_{max} * XH_III * fT_DEN * (1 - XH_III)$$

- 3) Die Änderung der mikrobiellen Aktivität mit der Zeit in Abhängigkeit der Temperatur (nach vereinfachter stetiger Temperaturfunktion von Thornley (nach Müller 2000))

$$fT_Den = \frac{(T - T_{min})^{qT} * (T_{max} - T)}{(T_{opt} - T_{min})^{qT} * (T_{max} - T_{opt})}$$

(fT_Den: Werte zwischen 0-1)

$$qT = \frac{T_{opt} - T_{min}}{T_{max} - T_{opt}}$$

A	Ausgangssubstrat
S _i	Substrat, welches die Umsetzung inhibiert (es kann S _i = A sein)
I _s	Inhibitionskonstante
k	Reaktionskonstante N ₂ O → N ₂
K _m	Michaelis-Menten-Konstante
XH_III	mikrobielle Aktivität der N ₂ O-Reduktase
XH_II	mikrobielle Aktivität der NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ - Reduktase
k _{max}	Parameter, der den Anstieg der mikrobiellen Aktivität beschreibt
T _{opt}	30°C
T _{min}	-15°C
T _{max}	75°C

Sensitivitätsanalyse

Um zu erkunden, wie die simulierte N₂O-Emission des Modells auf sich verändernde Eingangsparameter (Umweltbedingungen) reagieren, wurde das Modell einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Die Modellläufe wurden mit Literaturdaten verglichen.

Diskussion der Hypothesen

Durch die Modellläufe und die Sensitivitätsanalyse kann angenommen werden, dass Hypothese 1 nicht der ausschlaggebende Faktor ist.

Hypothese 2 wurde im Labor (Sehy, 2004), jedoch bisher nicht in Freilandversuchen bestätigt. N₂O-Frostemissionen wurde bisher nur auf vorher schon gut mit C und N versorgten Flächen beobachtet.

Hypothese 3: Untersuchungen von Röver et al. (1998) und anderen zeigten, dass die N₂O-Emissionen schon aus einem noch gefrorenen Boden hoch sein können, nicht erst beim Auftauen. Beim Auftauen spielen die erhöhte Löslichkeit des N₂O bei niedrigeren Temperaturen und der Wassergehalt als Diffusionsbarriere eine Rolle. Andererseits besteht die Möglichkeit, dass das N₂O zu N₂ reduziert wird, während es nicht entweichen kann.

Hypothese 4 und hohe Niederschläge erklären die sehr hohen Wassergehalte der Böden im Winter. Hinzu kommt, dass eine potentielle Schneedecke während der Tau-Phase abtaut und somit dem Boden zusätzlich als Wasser zugeführt wird. Aulakh et al. (1992) folgern, dass der

Wassergehalt noch vor dem Gehalt an leicht verfügbarem organischen Material und Nitrat, die Denitrifikation eines Bodens am stärksten beeinflusst. Zusammen mit Hypothese 5 könnte dies auch die erhöhten N_2O -Emissionen nach Starkregenereignissen erklären.

Hypothese 5: Da in den Versuchen keinerlei Angaben zur Zusammensetzung und Quantität der mikrobiellen Biomasse gemacht wurden, konnte das Modell in dieser Hinsicht nicht mit Datensätzen verglichen werden. Mit der Einführung einer verzögerten N_2O -Reduktase-Aktivität mit Hilfe von geschätzten Werten war es dennoch überhaupt erst möglich die beobachteten N_2O -Peaks mit dem Modell nachzuvollziehen. (**Abb. 1**)

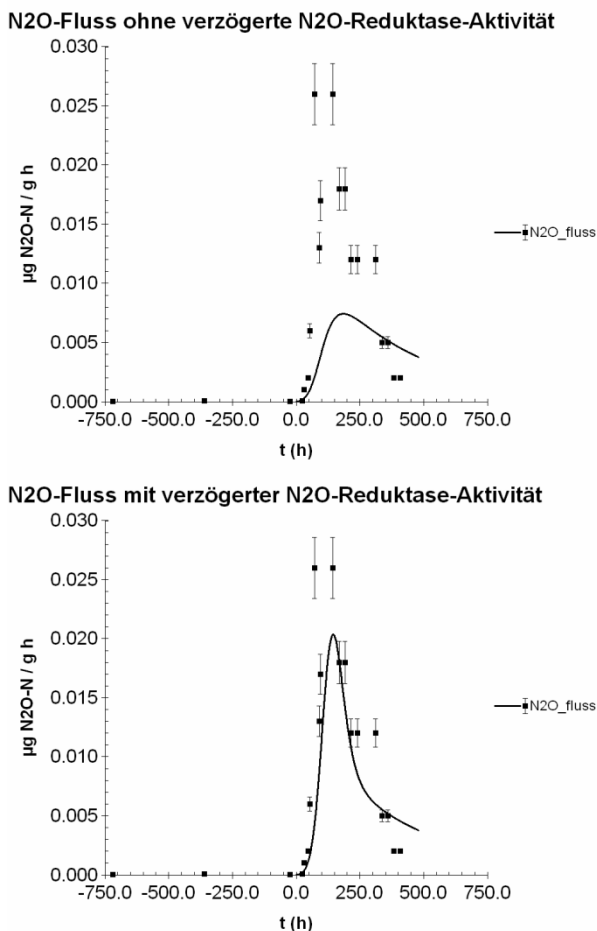


Abb1. Modelllauf mit und ohne verzögerter N_2O -Reduktase-Aktivität (Daten aus Sehy (2004))

Allgemeine Probleme und Ausblick

Viele Experimente werden durchgeführt, ohne an eine Verwendung für die Modellierung zu denken. Dabei gibt es sehr vie-

le Aspekte, die in Zukunft stärker berücksichtigt werden sollten. Die Prozesse, die bei Frost im Boden vor sich gehen, sind experimentell schwer zu erfassen, beeinflussen jedoch den Boden in vielerlei Hinsicht. Versuche zu Frost-Tau-Zyklen im Labor beachten oft nicht die Vorgänge in ihrer gesamten Komplexität. z.B., dass niedrige Lufttemperaturen nicht unbedingt tief den Boden eindringen, oder, dass es bei Eisbildung zum kapillaren Aufstieg von Wasser aus dem Unterboden kommen kann. Ein weiterer Aspekt, der intensiver zu beachten ist, ist das Verhalten der Mikroorganismen des Bodens. Es gibt einige Untersuchungen zu Bakterienarten in Permafrostböden, z.B. (Rivkina et al., 2000), aber nur eine Untersuchung (Sharma et al., 2006), die während eines Frost-Tau-Prozesses die mikrobielle Zusammensetzung in einem Boden des gemäßigten Klimas betrachtet, welcher zu hohen N_2O -Emissionen während Frost-Tau-Phasen neigt. Wie sehr sich die Zusammensetzung der mikrobiellen Biomasse zwischen zwei Standorten unterscheiden kann, zeigte Cavigelli und Robertson (2001). Nur 12 von 93 denitrifizierenden Bakterienarten auf dem einen Standort und 63 des anderen Standorts waren gleich. Die Sauerstoff-Sensitivität der N_2O -Reduktase der dominierenden taxonomischen Gruppen des jeweiligen Standorts unterschied sich dabei signifikant.

Abou Seada et al. (1985) untersuchten drei verschiedene Bakterienarten auf N_2O -Bildung bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalten. Die Ergebnisse zeigen wie verschieden sensibel die Bakterienarten auf die unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen reagieren. Sowohl quantitativ (N_2O+N_2 -Produktion) als auch qualitativ (N_2O/N_2 -Verhältnis) gab es große Unterschiede. Holtan-Hartwig et al. (2002) untersuchte Böden aus Schweden, Finnland und Deutschland in einem Experiment. Die drei Böden reagierten hinsichtlich der N_2O -Emission sehr verschieden auf Frost-Tau-Zyklen Die Bakterien zeigten eine Anpassung an ihre Umweltbedingungen, z.B wiesen die Bakterien des schwedischen Boden eine wesentlich größere Unempfindlichkeit ge-

genüber solchen Temperaturwechseln auf.

All diese Aspekte beeinflussen die N₂O-Emission in starkem Maße, müssten also bei der Modellierung berücksichtigt werden. Sie sind aber bisher nicht in ihrer Gänze in einem Frost-Tau-Experiment untersucht worden. Besonders dem Gebiet der fungalen Denitrifikation sollte in Zukunft mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Die vollständige Arbeit kann bei der Autorin per Mail erfragt werden.

Literatur

Abou Seada, M.N.I., J.C.G. Ottow, „Effect of increasing oxygen concentration on total denitrification and nitrous oxide release from soil by different bacteria”, *Biology and Fertility of soils* (1985) 1: 31-38

Aulakh, M.S., J.W. Doran, A.R. Mosier, „Soil Denitrification-Significance, Measurement, and Effects of Management”, in: *Advances in Soil Science*, Hg. Stewart, B.A., Volume 18, Springer-Verlag, 1992, S.1-57

Cavigelli, M.A., G.P. Robertson, „Role of denitrifier diversity in rates of nitrous oxide consumption in a terrestrial ecosystem”, *Soil Biology & Biochemistry* 33 (2001) 297-310

Flessa, H., P.Dörsch, F.Beese, „Seasonal variation of N₂O and CH₄ fluxes in differently managed arable soils in southern Germany”, *Journal of Geophysical Research* 100 NO.11 (1995) 23.115-23.124

Granli, T., O.C. Bockman, 1994, „Nitrous oxide from agriculture”, *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*. Band 12. 1-125

Holtan-Hartwig, L., P Dörsch, L.R. Bakken, „Low temperature of soil denitrifying communities: kinetics of N₂O production and reduction”, *Soil Biology & Biochemistry* 34 (2002) 1797-1806

Leffelaar, P.A., W.W.Wessel, „Denitrification in a homogeneous, closed system: experiment and simulation”, *Soil Science* 146 Nr.5 (1988) 335-349

Ludwig B., I. Wolf, R.Teepe, „Variability of CO₂ and N₂O emissions during freeze-thaw cycles: results of model experiments on undisturbed forest-soil cores”, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167 (2004.), 678-684

Morkved, P. T., P. Dörsch, T. M. Henriksen, L. R. Bakken, „N₂O emissions and product ratios of nitrification and denitrification as affected by freez-

ing and thawing”, *Soil Biology & Biochemistry* 38 (2006), 3411-3420

Müller, C., 2000, *Modelling Soil-Biosphere Interactions*, CABI Publishing, London

Müller, C., C. Kammann, J.C.G. Ottow, H.-J. Jäger, „Nitrous oxide emission from frozen grassland soil and during thawing periods”, *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166 (2003) 46-53

Öquist, M.G., K. Petrone, M. Nilsson, L. Klemedtsson, „Nitrification controls N₂O production rates in a frozen boreal forest soil”, *Soil Biology & Biochemistry* 39 (2007) 1809-1811

Rivkina, E.M., E.I. Friedmann, C.P.McKay, D.A. Gilichinsky, „Metabolic activity of permafrost bacteria below the freezing point”, *Environmental Microbiology* 66 (2000) 8: 3230-3233

Röver, M., O. Heinemeyer, E. A. Kaiser, „Microbial induced nitrous oxide emissions from arable soil during winter”, *Soil Biology & Biochemistry* 30 (1998), 1859-1865.

Ruser, R., [u.a.], „Effect of crop-specific field management and N fertilisation on N₂O emission from a fine-loamy soil” *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59 (2001) 177-191

Sehy, U., 2004, *N₂O-Freisetzung aus Ackerböden*. ökom verlag, München

Sharma, S., [u.a.], „Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil”, *Applied and Environmental Microbiology* 72-3 (2006) 2148-2154

Teepe, R., R. Brumme, F. Beese, „Nitrous oxide emissions from frozen soils under agricultural, fallow and forest land” *Soil Biology & Biochemistry* 32 (2000), 1807-1810

Wild, D., R. von Schulthess, W. Gujer, „Structured modelling of denitrification intermediates”, *Water Science and Technology* 31-2 (1995) 45-54