

Grünland als Quelle und Senke für N₂O

N. Wrage

Georg-August-Universität Göttingen, Department für
Nutzpflanzenwissenschaften, Graslandwissenschaft, von-Siebold-Str. 8, 37075
Göttingen, nwrage@gwdg.de

Einleitung und Problemstellung

Lachgas (N₂O) gehört neben Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) zu den wichtigsten Treibhausgasen. Es hat ein Treibhauspotential, das über 100 Jahre gesehen 298 Mal so stark ist wie das von CO₂. Die Lebensdauer in der Atmosphäre beträgt 114 Jahre (IPCC, 2007). Der wichtigste Abbauweg für Lachgas ist die Reaktion mit atomarem Sauerstoff in der Stratosphäre, wobei NO entsteht, das am Ozonabbau in der Stratosphäre beteiligt ist (CRUTZEN, 1981; BLIEFERT, 1994).

Landwirtschaftliche Böden verursachen mehr als die Hälfte der anthropogenen Lachgasproduktion (SMITH et al., 2008). Hierbei sind vor allem gut mit Stickstoff versorgte Böden wichtige Quellen. Andererseits kann N₂O aber auch aus der Umgebungsluft in den Boden aufgenommen und dort weiter zu N₂ reduziert werden, so dass Böden auch eine Senke für N₂O sein können (CHAPUIS-LARDY et al., 2007).

Im Folgenden werden zunächst die mikrobiellen Prozesse und die Bedingungen näher erläutert, die zur Entstehung von Lachgas in Böden führen. Anschließend wird die Senkenfunktion von Böden für N₂O dargestellt. Im letzten Teil wird auf die Besonderheiten der Lachgasproduktion im Grünland eingegangen.

Entstehung von Lachgas – Prozesse und Bedingungen

N₂O kann im Boden durch unterschiedliche mikrobielle Prozesse entstehen (Abb. 1). Traditionell werden die Nitrifikation und Denitrifikation als die wichtigsten angesehen (GRANLI and BØCKMAN, 1994). Bei der Nitrifikation wird Ammoniak (NH₃) von zwei Gruppen von autotrophen Organismen, den Ammonium-Oxidierern und Nitrit-Oxidierern, über Nitrit (NO₂⁻) in Nitrat (NO₃⁻) umgewandelt. N₂O kann hier als Nebenprodukt der Oxidation von Hydroxylamin (NH₂OH) entstehen. Die Nitrifikation findet i.A. unter aeroben Bedingungen statt. Denitrifizierer reduzieren unter anaeroben Bedingungen NO₃⁻ und NO₂⁻ in mehreren Schritten zu N₂. Dabei ist N₂O ein Zwischenprodukt. Bei der Denitrifikation kann man noch nach der genutzten NO₃⁻-Quelle unterscheiden: Bei der gekoppelten Nitrifikation-Denitrifikation wird das in der Nitrifikation gebildete Nitrat denitrifiziert, bei der Dünger-Denitrifikation stammt das Substrat aus anderen Quellen, z.B. dem Düngerstickstoff (WRAGE et al., 2005).

Eine vermutlich noch unterschätzte Quelle von N₂O ist die Nitrifizierer-Denitrifikation, bei der autotrophe Nitrifizierer nach der Oxidation von NH₃ zu NO₂⁻ letzteres in mehreren Schritten reduzieren. Die Reaktionskette und die

genutzten Enzyme sind dabei denen der Denitrifikation ähnlich (CASCIOTTI and WARD, 2001; WRAGE et al., 2001; CHAIN et al., 2003).

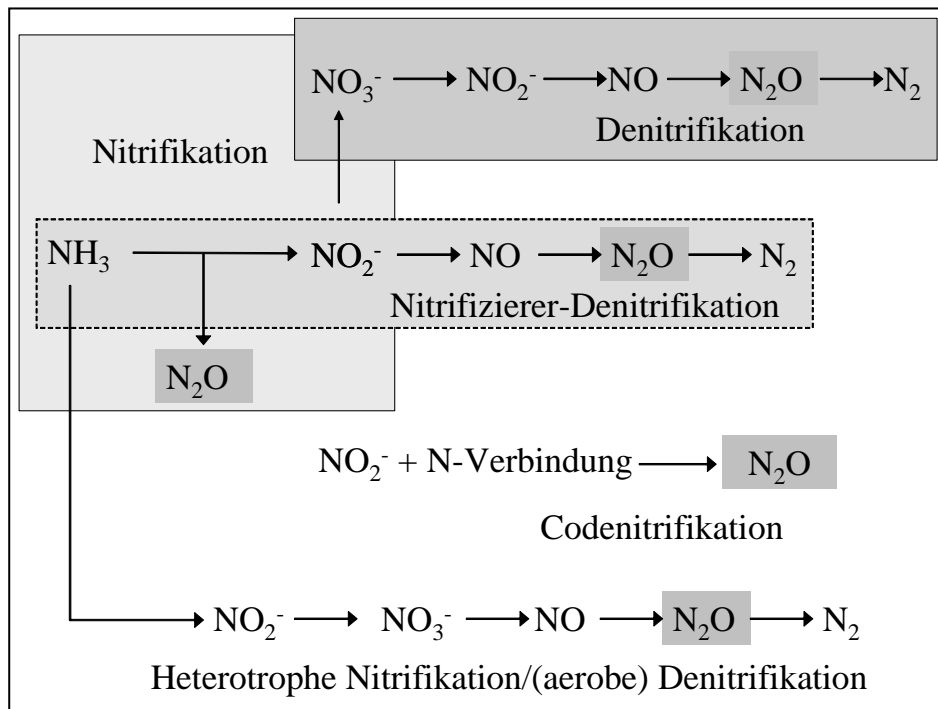


Abb. 1: Übersicht über Produktionswege von N₂O in Böden.

Außer den bisher genannten Produktionswegen für N₂O sind die heterotrophe Nitrifikation (PAPEN et al., 1989) und aerobe Denitrifikation (ROBERTSON et al., 1989) zu nennen, die annähernd den oben erläuterten Wegen entsprechen, aber von anderen Organismen unter anderen Bedingungen durchgeführt werden, die Codenitrifikation, bei der Pilze oder Bakterien organische N-Verbindungen mit NO₂⁻ zu N₂O umsetzen (LAUGHLIN and STEVENS, 2002), sowie die dissimilatorische Nitrat-Reduktion zu Ammonium (BLEAKLEY and TIEDJE, 1982). Bei der Chemodenitrifikation handelt es sich um nicht mikrobielle Reaktionen, bei denen N₂O entstehen kann (VAN CLEEMPUT and BAERT, 1984).

Wichtige Faktoren für die Entstehung und Freisetzung von N₂O aus dem Boden sind die verfügbare Menge an Substrat für die unterschiedlichen Reaktionen, der Wasser- und damit auch Sauerstoffgehalt sowie der pH-Wert. Häufig stammt die entstehende N₂O-Menge aus unterschiedlichen Prozessen, die in Mikrohabitaten nebeneinander ablaufen. Eine Unterscheidung zwischen diesen Quellen ist schwierig. Nachdem gezeigt wurde, dass die Nutzung von Inhibitoren keine zuverlässige Unterscheidung ermöglicht (BOLLMANN and CONRAD, 1997a, b; WRAGE et al., 2004b; WRAGE et al., 2004a), wurden Methoden weiterentwickelt, die auf der Nutzung stabiler Isotope beruhen (WRAGE et al., 2004c; WRAGE et al., 2005). Auch hier ergaben sich unerwartete Herausforderungen (KOOL et al., 2007; KOOL et al., 2009b; KOOL et al., 2009a), die zu einer Weiterentwicklung der Methoden Anlaß geben.

Böden als Lachgassenken

In Böden wird N_2O nicht nur produziert, sondern es kann auch weiter reduziert werden zu N_2 . Dies geschieht z.B. in der Denitrifikation und Nitrifizierer-Denitrifikation. Die aus dem Boden emittierte Menge an N_2O ist immer das Resultat von gleichzeitig stattfindenden Produktions- und Reduktionsprozessen. Unter bestimmten Bedingungen wird mehr N_2O reduziert als produziert, so dass der Boden zu einer Lachgassenke wird (CHAPUIS-LARDY et al., 2007). Die Bedingungen, unter denen dies geschieht, variieren von hohen zu niedrigen Temperaturen, Bodenwasser- und N-Gehalten. Generell scheinen Bedingungen, die die Diffusion von N_2O im Boden einschränken, die Senkenfunktion zu erhöhen. Hier besteht noch Forschungsbedarf, sowohl hinsichtlich der Messmethodik als auch in Bezug auf Einflussfaktoren und Größenordnungen.

Lachgasproduktion im Grünland

Für das Grünland sind die ganzjährige Vegetationsdecke sowie eine dichte Wurzelschicht kennzeichnend. N kann so während der gesamten Wachstumszeit von Pflanzen aufgenommen werden. Nitrifizierer und Denitrifizierer konkurrieren mit Futterpflanzen um den verfügbaren Mineralstickstoff (RECOUS et al., 1988). Eine schnelle Wachstumsrate der Pflanzen und damit verbundener erhöhter N-Bedarf verringert den Mineralstickstoffpool im Boden und damit die N_2O Emissionen (YAMULKI et al., 1995). Eine in Bezug auf Ort, Zeitpunkt und Menge bedarfsgerechte Düngung hilft daher, die N_2O Emissionen zu verringern. Im Grünland kann auch eine höhere Biodiversität eventuell zu einer effektiveren Stickstoffnutzung und damit einem Rückgang der N_2O Emissionen führen (NIKLAUS et al., 2006).

Die Höhe der Emissionen kann im Grünland erheblich variieren. Dobbie und Smith (2003) fanden in einer Studie in Großbritannien Emissionsfaktoren für Wiesen von 0,4 bis 6,5% des applizierten Stickstoffs, während die für Winterweizen und Wintergerste mit 0,6 bzw. 0,5% niedriger waren und der für Kartoffelanbau bei 1,5% lag. Die ausgebrachten Düngermengen waren für Grünland allerdings auch um ein Drittel bis um die Hälfte höher als für die Ackerstandorte. Generell scheint die Hintergrundemission aus Ackerböden höher zu sein als im Grünland, wo hingegen mehr N_2O pro applizierter Menge an N-Dünger gebildet wird. Dies vergrößert das Potential für den Landwirt, auf Grünlandflächen über die Düngung regulierend auf die N_2O Produktion zu wirken.

Auf Weiden findet im Gegensatz zu Wiesen der N-Eintrag an wenigen Stellen sehr konzentriert statt. Hier kann es zu hohen Verlusten von N_2O kommen (YAMULKI et al., 2001; WACHENDORF et al., 2008), insbesondere, wenn an der betreffenden Stelle Bodenverdichtung eine Rolle spielt (VAN GROENIGEN et al., 2005). Allerdings gibt es auch Inhaltsstoffe in den Exkrementen, die die Emissionen reduzieren können. So konnte für Hippursäure im Rinderharn eine

emissionsmindernde Wirkung festgestellt werden, da die Denitrifikation dadurch gehemmt wird (KOOL et al., 2006; VAN GROENIGEN et al., 2006).

Grünlandumbruch führt zu hohen Emissionen von N₂O (VELLINGA et al., 2004). Diese lassen sich verringern, wenn schnell wieder ein Pflanzenbestand etabliert wird. Daher sollte der Umbruch nach Möglichkeit im Frühjahr erfolgen.

Schlussfolgerungen

Die Quellen von N₂O im Boden sind vielfältig. Die Höhe der Emissionen wird vor allem über die Menge an C, N und den Wassergehalt des Bodens reguliert. Dabei resultiert die Menge an emittiertem N₂O aus Produktions- und Reduktionsprozessen im Boden. Wenn letztere überwiegen, kann auch N₂O aus der Umgebungsluft in den Boden aufgenommen werden. Im Grünland sind die Bedingungen, um Emissionen zu vermindern, gut, da die Hintergrundemissionen niedrig sind. Zu achten ist z.B. auf eine bedarfsgerechte Düngung und die Vermeidung von Bodenverdichtung an Stellen, wo Harn oder Kot eingetragen wird. Auch Grünlandumbruch sollte nach Möglichkeit reduziert werden.

Literatur

- BLEAKLEY, B. H., und J. M. TIEDJE. 1982. Nitrous oxide production by organisms other than nitrifiers or denitrifiers. *Applied and Environmental Microbiology* 44: 1342-1348.
- BLIEFERT, C. 1994. Oxide des Stickstoffs, Umweltchemie, 158-169. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, Tokyo.
- BOLLMANN, A., und R. CONRAD. 1997a. Enhancement by acetylene of the decomposition of nitric oxide in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 29: 1057-1066.
- BOLLMANN, A., und R. CONRAD. 1997b. Acetylene blockage technique leads to underestimation of denitrification rates in oxic soils due to scavenging of intermediate nitric oxide. *Soil Biology and Biochemistry* 29: 1067-1077.
- CASCIOTTI, K. L., und B. E. WARD. 2001. Dissimilatory nitrite reductase genes from autotrophic ammonia-oxidizing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology* 67: 2213-2221.
- CHAIN, P., J. LAMERDIN, F. LARIMER, W. REGALA, V. LAO, M. LAND, L. HAUSER, A. HOOPER, M. KLOTZ, J. NORTON, L. SAYAVEDRA-SOTO, D. ARCIERO, N. HOMMES, M. WHITTAKER, und D. ARP. 2003. Complete Genome Sequence of the Ammonia-Oxidizing Bacterium and Obligate Chemolithoautotroph *Nitrosomonas europaea*. *J. Bacteriol.* 185: 2759-2773.
- CHAPUIS-LARDY, L., N. WRAGE, A. METAY, J.-L. CHOTTE, und M. BERNOUX. 2007. Soils, a sink for N₂O? A review. *Global Change Biology* 13: 1-17.
- CRUTZEN, P. J. 1981. Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen, including nitrous oxide. In C. C. Delwiche [ed.], *Denitrification, nitrification and atmospheric nitrous oxide*, 17-44. John Wiley and Sons, Chichester, UK.
- DOBBIE, K. E., und K. A. SMITH. 2003. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology* 9: 204-218.

Vorträge

- GRANLI, T., und O. C. BØCKMAN. 1994. Nitrous oxide from agriculture. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences Suppl.* 12: 7-128.
- IPCC. neubearbeitet von S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, and M. T. a. H. L. Miller. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KOOL, D. M., E. HOFFLAND, E. W. J. HUMMELINK, und J. W. VAN GROENIGEN. 2006. Increased hippuric acid content of urine can reduce soil N₂O fluxes. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 1021-1027.
- KOOL, D. M., N. WRAGE, O. OENEMA, J. DOLFING, und J. W. VAN GROENIGEN. 2007. Oxygen exchange between (de)nitrification intermediates and H₂O and its implications for source determination of NO₃⁻ and N₂O: a review. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 21: 3569-3578.
- KOOL, D. M., N. WRAGE, O. OENEMA, D. HARRIS, und J. W. VAN GROENIGEN. 2009a. The ¹⁸O signature of biogenic nitrous oxide is determined by O exchange with water. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 23: 104-108.
- KOOL, D. M., C. MÜLLER, N. WRAGE, O. OENEMA, und J. W. VAN GROENIGEN. 2009b. Oxygen exchange between nitrogen oxides and H₂O can occur during nitrifier pathways. *Soil Biology and Biochemistry* in print.
- LAUGHLIN, R. J., und R. J. STEVENS. 2002. Evidence for fungal dominance of denitrification and codenitrification in a grassland soil. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1540-1548.
- NIKLAUS, P., D. WARDLE, und K. TATE. 2006. Effects of plant species diversity and composition on nitrogen cycling and the trace gas balance of soils. *Plant and Soil* 282: 83-98.
- PAPEN, H., R. VON BERG, I. HINKEL, B. THOENE, und H. RENNENBERG. 1989. Heterotrophic nitrification by *Alcaligenes faecalis*: NO₂⁻, NO₃⁻, N₂O, and NO production in exponentially growing cultures. *Applied and Environmental Microbiology* 55: 2068-2072.
- RECOUS, S., C. FRESNEAU, G. FAURIE, und B. MARY. 1988. The fate of labelled ¹⁵N urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. 1. Nitrogen transformations in the soil. *Plant and Soil* 112: 205-214.
- ROBERTSON, L. A., R. CORNELISSE, P. DE VOS, R. HADIOETOMO, und J. G. KUENEN. 1989. Aerobic denitrification in various heterotrophic nitrifiers. *Antonie van Leeuwenhoek* 56: 289-299.
- SMITH, P., D. MARTINO, Z. CAI, D. GWARY, H. JANZEN, P. KUMAR, B. MCCARL, S. OGLE, F. O'MARA, C. RICE, B. SCHOLES, O. SIROTENKO, M. HOWDEN, T. MCALLISTER, G. PAN, V. ROMANENKOV, U. SCHNEIDER, S. TOWPRAYOON, M. WATTENBACH, und J. SMITH. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363: 789-813.
- VAN CLEEMPUT, O., und L. BAERT. 1984. Nitrite: a key compound in N loss processes under acid conditions? *Plant and Soil* 76: 233-241.
- VAN GROENIGEN, J. W., V. PALERMO, D. M. KOOL, und P. J. KUIKMAN. 2006. Inhibition of denitrification and N₂O emission by urine-derived benzoic and hippuric acid. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 2499-2502.

Vorträge

- VAN GROENIGEN, J. W., G. L. VELTHOF, F. J. E. VAN DER BOLT, A. VOS, und P. J. KUIKMAN. 2005. Seasonal variation in N₂O emissions from urine patches: Effects of urine concentration, soil compaction and dung. *Plant and Soil* 273: 15-27.
- VELLINGA, T. V., A. VAN DEN POL-VAN DASSELAAR, und P. J. KUIKMAN. 2004. The impact of grassland ploughing on CO₂ and N₂O emissions in the Netherlands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70: 33-45.
- WACHENDORF, C., C. LAMPE, F. TAUBE, und K. DITTERT. 2008. Nitrous oxide emissions and dynamics of soil nitrogen under ¹⁵N-labeled cow urine and dung patches on a sandy grassland soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171: 171-180.
- WRAGE, N., G. L. VELTHOF, M. L. VAN BEUSICHEM, und O. OENEMA. 2001. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1723-1732.
- WRAGE, N., G. L. VELTHOF, O. OENEMA, und H. J. LAANBROEK. 2004a. Acetylene and oxygen as inhibitors of nitrous oxide production in *Nitrosomonas europaea* and *Nitrosospira briensis*: a cautionary tale. *FEMS Microbiology Ecology* 47: 13-18.
- WRAGE, N., G. L. VELTHOF, H. J. LAANBROEK, und O. OENEMA. 2004b. Nitrous oxide production in grassland soils: Assessing the contribution of nitrifier denitrification. *Soil Biology and Biochemistry* 36: 229-236.
- WRAGE, N., J. W. VAN GROENIGEN, O. OENEMA, und E. M. BAGGS. 2005. A novel dual-isotope labelling method for distinguishing between soil sources of N₂O. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 19: 3298-3306.
- WRAGE, N., J. LAUF, A. DEL PRADO, M. PINTO, S. PIETRZAK, S. YAMULKI, O. OENEMA, und G. GEBAUER. 2004c. Distinguishing sources of N₂O in European grasslands by stable isotope analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 18: 1-7.
- YAMULKI, S., K. W. T. GOULDING, C. P. WEBSTER, und R. M. HARRISON. 1995. Studies on NO and N₂O fluxes from a wheat field. *Atmospheric Environment* 29: 1627-1635.
- YAMULKI, S., S. TOYODA, N. YOSHIDA, E. VELDKAMP, B. GRANT, und R. BOL. 2001. Diurnal fluxes and the isotopomer ratios of N₂O in a temperate grassland following urine amendment. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 15: 1263-1269.