

Lachgas und N₂-Emissionen intensiv bewirtschafteter Weiden in den australischen Subtropen

Johannes Friedl^{1*}, Katharina M. Keiblinger², Clemens Scheer³,
David W. Rowlings¹

Zusammenfassung

Niederschläge und Bewässerung können erhöhte Denitrifikationsverluste in der Form von Lachgas (N₂O) und Distickstoff (N₂) Emissionen von Weideböden zur Folge haben. Lachgas ist ein starkes Treibhausgas, während die gesamten N₂O und N₂ Emissionen einen Verlust von verfügbarem Stickstoff (N) im Boden darstellen. Trotz ihrer Bedeutung für die Stickstoff- und Treibhausgasbilanz von Agrarökosystemen gibt es nur sehr wenige *in-situ* Messungen von sowohl N₂O als auch N₂ Emissionen. Dieser Beitrag umfasst eine Serie von Feldstudien zu N₂O und N₂ Emissionen von Milchviehweiden in den australischen Subtropen. Im Besonderen wurde untersucht wie unterschiedliches Management bei Düngung und Bewässerung zur Verringerung von Denitrifikationsverlusten beitragen kann. Die gewonnenen Daten liefern die Grundlage für die Validierung von Simulationsmodellen, um Langzeitwirkungen landwirtschaftlicher Praxis auf Milchviehweiden auf klimaschädliche N₂O Emissionen abschätzen zu können.

Schlagwörter: Klimawandel, Denitrifikation, Benetzungs- und Trocknungszyklen, Boden-Gas Diffusivität, Abundanz funktioneller N-Gene

Summary

Rainfall and irrigation cause denitrification losses in the form of nitrous oxide (N₂O) and dinitrogen (N₂) emissions from pasture soils. Nitrous oxide is a potent greenhouse gas, while total N₂O and N₂ emissions represent a loss of available nitrogen (N) from the soil. *In situ* measurements of both N₂O and N₂ are rare, despite their importance to N budgets and the greenhouse gas balance of agroecosystems. This paper presents our research on N₂O and N₂ emissions from dairy pastures in the Australian subtropics. A series of field studies examined factors determining the temporal and spatial distribution and magnitude of denitrification rates. Furthermore, measures to reduce denitrification losses were investigated that include fertilisation and irrigation. The data obtained provide the basis for predictions using simulation models that examine the long-term effects of agricultural practices on dairy pastures.

Keywords: climate change, denitrification, wetting and drying, soil gas diffusivity, functional gene abundance

Einleitung

Niederschläge und Bewässerung erhöhen den Wassergehalt von Weideböden und verringern damit den Sauerstoffgehalt im Boden. Die Reduktion von verfügbarem Nitrat

¹ Centre for Agriculture and the Bioeconomy, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia; ² University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Department of Forest and Soil Sciences, Institute of Soil Research, Vienna, Austria; ³ Institute for Meteorology and Climate Research (IMK-IFU) Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Garmisch-Partenkirchen, Germany

* Ansprechpartner: Dr. Johannes Friedl, email: johannes.friedl@qut.edu.au

kann unter diesen Bedingungen zu erhöhten Lachgas (N_2O) Emissionen führen. Lachgas ist ein starkes Treibhausgas und trägt zum Ozonabbau in der Stratosphäre bei. Die weitere Reduktion von N_2O zu Distickstoff (N_2) über den mikrobiellen Prozess der Denitrifikation wandelt reaktiven Stickstoff (N) in atmosphärischen N um und schließt somit den N-Kreislauf. Lachgas und N_2 Emissionen werden durch komplexe Rückkopplungen zwischen N- und Kohlenstoff- (C) Substratverfügbarkeit, Temperatur, den pH-Wert und Sauerstoff- (O_2) Gehalt des Bodens und der physiologischen Reaktion der mikrobiellen Bodengemeinschaft auf diese Faktoren bestimmt. Der Wassergehalt des Bodens spielt dabei eine wichtige Rolle, da er sowohl Substratdiffusion als auch die Diffusion von Gasen innerhalb des Bodens und damit die mikrobielle Produktion und Diffusion von N_2O und N_2 im Boden bestimmt. Überdies beeinflusst die Bodenfeuchte den mikrobiellen O_2 Verbrauch, der ebenfalls Denitrifikation begünstigen kann. Diese Faktoren beeinflussen das Ausmaß, den zeitlichen Verlauf, sowie das Verhältnis von $\text{N}_2\text{O}:\text{N}_2$ der gasförmigen Verluste aus der Denitrifikation. In weidebasierten Milchviehbetrieben in den subtropischen Regionen von Queensland und dem nördlichen New South Wales sind hohe Bewässerungsmengen und N Düngergaben erforderlich, um die Produktion aufrechtzuerhalten. Gesamtverluste von ausgebrachtem Dünger auf subtropischen Weiden können bis zu 40 % betragen, was mehr als 125 kg N ha^{-1} pro Jahr⁻¹ entspricht. Diese N-Verluste werden aufgrund der hohen Niederschläge in der Region, und aufgrund mangelnder Evidenz für N-Auswaschung, vor allem Denitrifikation zugeschrieben (Rowlings et al. 2016). Direkte Messungen von N_2O und N_2 Emissionen unter *in-situ* Bedingungen sind jedoch aufgrund der methodischen Schwierigkeiten selten und das Ausmaß von Denitrifikationsverlusten und deren zeitliches Auftreten in Verbindung mit Bewässerung, Niederschlag und N Düngung, stellen eine wesentliche Unbekannte der N Budgets dieser Agrarökosysteme dar.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Forschungstätigkeit zu N_2O und N_2 Emissionen im Rahmen des Projekts „More Profit for Nitrogen“, gefördert von Dairy Australia, auf einem kommerziellen Milchviehbetrieb in Casino, New South Wales (28.865°E , 152.874°S). Der Boden am Standort ist ein Tonboden (Vertisol, WRB) mit > 50% Tongehalt, 4.2% organischem C und 0.4% Gesamtstickstoffgehalt. Das Klima ist feucht-subtropisch, mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 20°C . Die durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge beträgt 1045 mm, jedoch ist die Schwankungsbreite groß und Niederschläge, die den monatlichen Durchschnitt um 400 mm übersteigen, sind durchaus üblich. Der durchschnittliche Viehbesatz liegt bei 5 Rindern ha^{-1} . Im Durchschnitt weiden 210 Rinder alle 14-21 Tage 12 Stunden lang auf einer Fläche von $1,2 \text{ ha}^{-1}$. Die Felder werden in der Regel in einem zwei- bis dreiwöchigen Zyklus von Anfang Mai bis Mitte November beweidet und gedüngt, wobei die Bewässerung nach der Düngung erfolgt. Die N-Düngergaben liegen zwischen $1-2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Tag}^{-1}$ und werden als Harnstoff ausgebracht, was einem durchschnittlichen Düngemiteleinsatz von 340 kg N ha^{-1} pro Jahr⁻¹ entspricht. Die im Sommer dominierende Kikuyu-Weide (*Pennisetum clandestinum*) wird in der Regel Ende April gemulcht und mit einjährigem Weidelgras (*Lolium perenne*) eingesät.

Räumliche und zeitliche Variabilität von N_2O Emissionen

Messungen der N_2O Emissionen über drei Jahre zeigten durchschnittliche N_2O Verluste von $9.3 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$, was 2% des aufgebrauchten N Düngers entsprach. Die N_2O -Emissionen reagierten nicht linear auf die zunehmende Nitratverfügbarkeit im Boden und die Gesamtniederschlagsmenge. Unmittelbar nach der Beweidung wurden höhere N_2O -Emissionen beobachtet, was wahrscheinlich auf die vermehrte Deposition von Urin und Dung, die erhöhte Bodenverdichtung und die geringe N-Aufnahme durch Pflanzen zurückzuführen ist. Die räumliche Verteilung der N_2O -Flüsse und des Nitratgehalts im Boden spiegelte die Auswirkungen der Beweidung und der N-Deposition in der Form von Exkrementen wider, wobei die N_2O -Flüsse in der Nähe von Weidegattern 11-mal höher waren als auf der Weide (De Rosa et al. 2020). Auf Wegen, rund um Tränken

und in schattigen Bereichen kann die hohe Konzentration von Rindern zu vermehrtem N Eintrag und damit zu deutlich höheren N_2O Emissionen führen. Mitchell et al. (2021) zeigte, dass N_2O Emissionen von diesen „N Hotspots“ 9-mal höher waren als von der Weide und dass 3% der Betriebsfläche für 28% des Treibhausgas Budgets verantwortlich sind. Diese Studien unterstreichen die Notwendigkeit, die räumliche N- Variabilität in Milchviehweidesystemen zu berücksichtigen. Die Integration räumlichen Managements ist jedoch schwierig, da in der gängigen Praxis Bereiche mit hoher N Deposition und ohne N Pflanzenaufnahme unvermeidbar sind und herkömmliche Strategien wie Nitrifikationsinhibitoren nicht greifen.

Emissionen von N_2 und N_2O nach intensivem Regen

Ziel dieser Studie war es, Denitrifikationsverluste mittels der ^{15}N gas Fluss Methode abzuschätzen und die Wirksamkeit des Nitrifikationsinhibitors 3,4-Dimethylpyrazolosphat (DMPP) zur Verringerung von N_2 - und N_2O -Emissionen nach starken Niederschlägen zu untersuchen. Emissionen wurden über drei Wochen nach der Ausbringung von ^{15}N -Harnstoff ($36,8 \text{ kg N ha}^{-1}$) mit und ohne DMPP gemessen. 10 Tage nach der Düngung wurde ein intensives Niederschlagsereignis simuliert, um gesättigte Bedingungen im Oberboden zu schaffen. Das Niederschlagsereignis führte zu einem geringen Anstieg von N_2O -Emissionen, während im Gegensatz dazu N_2 -Flüsse von über $5 \text{ kg N}_2\text{-N ha}^{-1} \text{ Tag}^{-1}$ gemessen wurden. Das Hauptprodukt der kumulativen Denitrifikationsverluste war, mit mehr als 95%, N_2 . Diese Resultate zeigen, dass N_2O unter gesättigten Bedingungen kein robuster Indikator für Denitrifikationsverluste ist, da der hohe Wassergehalt im Boden die vollständige Denitrifikation hin zu N_2 begünstigt. Gesamtverluste von mehr als $21 \text{ kg N}_2\text{-N ha}^{-1}$ über einen Zeitraum von 21 Tagen zeigen, dass intensiv bewirtschaftete Weiden eine bedeutende Quelle für N_2 -Emissionen darstellen. Das Ausmaß und die zeitliche Variabilität der N_2 -Verluste spiegeln sowohl die verringerte Gasdiffusionsfähigkeit des Bodens und den mikrobiellen Sauerstoffverbrauch wider. Der Einsatz von DMPP verringerte N_2 -Verluste um mehr als 70% hatte jedoch keine Auswirkungen auf die N_2O -Emissionen. Damit konnte in dieser Studie erstmals anhand feldbasierter Daten nachgewiesen werden, dass DMPP N_2 -Emissionen erheblich verringern kann. Die Reduktion von agronomisch bedeutsamen N_2 -Verlusten unterstreicht das Potenzial von DMPP, die Auswirkungen erhöhter Niederschlagsintensität auf die Denitrifikationsverluste abzuschwächen und dadurch die N-Nutzungseffizienz intensiv bewirtschafteter Weiden zu verbessern (Friedl et al. 2017). Diese Resultate sind konsistent mit Ergebnissen von Rowlings et al. (2016): Diese Studie zeigte, dass 40% (125 kg N ha^{-1}) des aufgebrauchten N Düngers in einem Jahr dauerhaft verloren gingen. Durch die Kombination des Nitrifikationsinhibitors DMPP mit reduzierten N Düngergaben konnten diese Verluste um über 80 kg N ha^{-1} reduziert werden, ohne die Biomasse oder den N-Ertrag negativ zu beeinflussen.

Effekte von Bewässerungsfrequenz auf N_2O und N_2 Emissionen

Die negative Korrelation zwischen Boden-Gas Diffusivität (DP/DO) und N_2O (Clough et al. 2020) deutet darauf hin, dass Maßnahmen, die die Belüftung des Bodens, also DP/DO, erhöhen, die Bildung von anaeroben Bereichen in Böden reduzieren und damit N_2O - und N_2 -Emissionen begrenzen können. Wir untersuchten daher die Auswirkungen erhöhter Bewässerungsfrequenz, d. h. häufigere und kleinere Bewässerungsereignisse im Vergleich zu großen und seltenen Ereignissen, auf die Höhe und das relative Verhältnis von N_2O und N_2 Emissionen. Die Versuchsanordnung bestand aus drei Bewässerungsvarianten: Die Bewässerungsmenge wurde über die Evapotranspirationsrate bestimmt und auf einmal (niedrige Frequenz – LF), oder aufgeteilt in zwei (mittlere Frequenz - MF) oder vier separate Bewässerungsereignisse (hohe Frequenz - HF) über 20 Tage aufgebracht. In einem ersten Versuch wurden N_2O Emissionen von gedüngten Parzellen über 9 Monate mit



Abbildung 1: Versuchsanordnung auf einem Milchviehbetrieb in Casino, Northern New South Wales, Australien, mit einer vollautomatisierten Bewässerungsanlage, pneumatischen Treibhausgas Messkammern, Bodenfeuchtesensoren und schwenkbaren Dächern.

einem vollautomatisierten Treibhausgas Monitoring System in hoher zeitlicher Auflösung gemessen (Abbildung 1). Die aufgebrachten Wassermengen zielten auf unterschiedliche Frequenz bei gleicher kumulativer Bewässerung unter Berücksichtigung der Niederschläge ab. Erhöhte Bewässerungsfrequenz (MF und HF) reduzierte N_2O Emissionen um 40% gegenüber LF, ohne negative Effekte auf Biomasse oder N-Ertrag. Trotz signifikanter Unterschiede bei den Verlusten stand ein Großteil dieser Varianz nicht in direktem Zusammenhang mit einzelnen Bewässerungsereignissen, sondern war auf einen „Langzeit Effekt“ zurückzuführen, der während nachfolgender intensiver Niederschlagsereignisse beobachtet wurde (Mumford et al. 2019).

In darauffolgenden Versuchen in der Weidelgras Saison (Winter) wurden daher Dächer auf den Versuchsfeldern installiert, um den Effekt der Bewässerung isoliert zu untersuchen. Kumulative N_2O Emissionen über einen Zeitraum von 60 Tagen unter konventioneller Bewässerung, also niedriger Bewässerungsfrequenz (LF), betragen $0.96 \pm 0.4 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ von N gedüngten Parzellen und $1.7 \pm 0.6 \text{ kg N-N}_2\text{O}$ von Parzellen mit simulierter Urindeposition. Erhöhte Bewässerungsfrequenz (MF und HF) reduzierte N_2O Emissionen um 60% auf den N gedüngten Parzellen und um 35% auf den Parzellen mit simulierter Urindeposition. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Effekt aufgrund der hohen Streuung nur bei einem P Wert von 0.1 signifikant war, was die Signifikanz der Resultate in Frage stellt und auf Effekte hindeutet, die den physikalischen Effekt der Boden Gas Diffusivität (DP/DO) in Abhängigkeit der Bewässerungsfrequenz überlagern.

Am Ende der Weidelgras Saison wurde ein weiterer Versuch durchgeführt, der den Effekt von niedriger (LF) und erhöhte Bewässerungsfrequenz (HF) auf Denitrifikationsverluste, also N_2 und N_2O von gedüngten Parzellen, untersuchte. Um die Auswirkungen von Langzeitfolgen zu überprüfen, wurde am Ende des Versuchs ein großes Niederschlagsereignis simuliert (100 mm). Über einen Zeitraum von 15 Tagen wurden unabhängig von der Bewässerungshäufigkeit im Durchschnitt $7.9 \pm 2.7 \text{ kg N}_2+\text{N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ emittiert, wobei N_2O 25 % der Gesamtemissionen ausmachte. Wiederholte, kleine Bewässerungsmengen erzeugten die gleiche Menge an $N_2+\text{N}_2\text{O}$ -Verlusten wie ein einzelnes, großes Bewässerungsereignis. Das Niederschlagsereignis führte zu einem Anstieg der N_2O Emissionen, jedoch war die Zunahme bei hoher Bewässerungsfrequenz (HF) geringer als bei niedriger Bewässerungsfrequenz, wodurch sich das Verhältnis $N_2O/(N_2O+N_2)$ in Richtung N_2 verschob. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die verringerte Gasdiffusion im Boden in erster Linie die N_2O - und N_2 -Emissionen nach starken Nieder-

schlägen oder hohen Bewässerungsmengen bestimmt. Mikrobieller O_2 -Verbrauch scheint jedoch der bestimmende Faktor für N_2O - und N_2 -Emissionen nach kleinen, wiederholten Bewässerungs- oder Niederschlagsereignissen zu sein, vor allem in Weideböden mit hohem N-Umsatz. Die Häufigkeit von funktionellen Marker Genen für den N-Kreislauf unterschied sich nicht zwischen den Bewässerungsvarianten, was darauf hindeutet, dass die N- und C-Verfügbarkeit und nicht das Vorkommen der funktionellen N Gene das Ausmaß und die $N_2O:N_2$ -Verteilung nach Regenfällen bestimmt.

Die Ergebnisse der Bewässerungsversuche, wie auch die Resultate von parallelen ^{15}N Studien, die den Verbleib von ^{15}N Dünger im Boden und in der Pflanze untersuchten, deuten darauf hin, dass eine erhöhte Bewässerungshäufigkeit Treibhausgasemissionen in der Form von N_2O , nicht aber das Gesamtausmaß der N_2O - und N_2 -Emissionen von intensiv bewirtschafteten Weiden, verringern kann. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Reduktion von Denitrifikationsverlusten durch den Nitrifikationsinhibitor DMPP eine Verringerung der N-Düngermengen bei gleichbleibenden Weideerträgen. Dies kann den Preisaufschlag für DMPP (20%) ausgleichen und somit einen Anreiz bieten, N Austräge von intensiv bewirtschafteten Weiden mit schwerwiegenden agronomischen und ökologischen Folgen zu verringern.

Literatur

De Rosa D., Rowlings D.W., Fulkerson B., Scheer C., Friedl J., Labadz M., Grace P.R. (2020) Field-scale management and environmental drivers of N_2O emissions from pasture-based dairy systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 117, 299-315.

Friedl J., Scheer C., Rowlings D.W., Mumford M.T., Grace P.R. (2017) The nitrification inhibitor DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) reduces N_2 emissions from intensively managed pastures in subtropical Australia. *Soil Biology and Biochemistry* 108, 55-64.

Mitchell E., De Rosa D., Grace P., Rowlings D. (2021) Herd concentration areas create greenhouse gas hotspots. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 121, 15-26.

Mumford M.T., Rowlings D.W., Scheer C., De Rosa D., Grace P.R. (2019) Effect of irrigation scheduling on nitrous oxide emissions in intensively managed pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 272, 126-134.

Rowlings D.W., Scheer C., Liu S., Grace P.R. (2016) Annual nitrogen dynamics and urea fertilizer recoveries from a dairy pasture using ^{15}N ; effect of nitrification inhibitor DMPP and reduced application rates. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 216, 216-225.

