

DISS. ETH No. 25499

# **Mitigation of Greenhouse Gas Emissions from Intensively Managed Grassland**

A thesis submitted to attain the degree of

Doctor of Sciences of ETH Zurich

(Dr. sc. ETH Zurich)

by

**Kathrin Fuchs**

M.Sc. Global Change Ecology, University of Bayreuth

born 10<sup>th</sup> November 1986

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Nina Buchmann, examiner

Dr. Lutz Merbold, co-examiner

Prof. Dr. Klaus Butterbach-Bahl, co-examiner

2018

## Abstract

Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) is the dominant contributor to anthropogenic ozone depletion in the stratosphere. It is also the third most important anthropogenic greenhouse gas (GHG) with its atmospheric concentration still on the rise. This twofold impact makes it necessary to identify and assess N<sub>2</sub>O mitigation strategies. Currently, the agricultural sector contributes between 56 and 81% of the anthropogenic N<sub>2</sub>O emissions, mainly due to fertilizers. N<sub>2</sub>O is emitted as a consequence of mineral and organic fertilizer application to soils, and during storage of organic fertilizers. Thus, N<sub>2</sub>O originating from nitrogen (N) fertilizers needs to be addressed for N<sub>2</sub>O mitigation.

Grasslands extend on one fourth of the terrestrial surface and contribute 70% of agricultural lands. Grassland soils can sequester carbon (C) and accumulate large C stocks over time. However, C and N exchange in grasslands largely depend on management practices such as ploughing and the application of mineral and organic fertilizers. Intensive agricultural practices reduce C sink strength when considering on and off-site emissions and increase N<sub>2</sub>O emissions, resulting in a net GHG source to the atmosphere. Therefore, as introduced in **Chapter 1**, this doctoral thesis focuses on the mitigation of GHGs from grassland soils.

A potential mitigation strategy for N<sub>2</sub>O emissions from intensively managed grasslands is the partial replacement of fertilizer N with biologically fixed nitrogen (BFN) from legumes. The use of BFN is likely to provide a N supply for plants that is more synchronous to plant demand compared to occasional fertilizer N amendments. However, little is known about the effect of increased legume proportions on N<sub>2</sub>O emissions in grasslands which potentially offsets emissions spared by fertilizer reductions. The goal of **Chapter 2** was therefore to investigate the overall effect of this mitigation strategy on permanent grassland in an *in-situ* experiment at the ecosystem scale. Besides quantifying the net N<sub>2</sub>O exchange and biomass yields (in the following

only addressed as yield) in two differently managed grass-clover mixtures, I related the measured N<sub>2</sub>O fluxes to management and environmental drivers. The tested mitigation management reduced N<sub>2</sub>O emissions by 54 and 39% in 2015 and 2016, respectively, corresponding to 1.0 and 1.6 t CO<sub>2</sub>-equivalents ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. Still, annual yields were similar under the mitigation management and control, resulting in a reduction of N<sub>2</sub>O emission intensity from 0.42 to 0.28 g N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> DM over the two-year observation period. Thus, N<sub>2</sub>O emissions from fertilized grasslands were reduced without yield losses by increasing the clover proportion and reducing fertilization.

Conducting experiments across a range of potential combinations of legume proportions and fertilizer N input over a period of several years is difficult due to the large costs involved, the labor necessary to maintain such experiments as well as the time needed to evaluate long-term effects. These experimental constraints can be overcome by the use of biogeochemical process-based models that can easily vary legume-fertilizer combinations. These models further might be used for upscaling (spatially and temporally) GHG emissions for national inventories. However, simulating GHG fluxes, especially non-CO<sub>2</sub> GHG fluxes, challenges individual models and involves considerable uncertainties, raising the necessity for thorough evaluation. Thus, my objective in **Chapter 3** was to evaluate the performance of three process-based biogeochemical models (APSIM, DayCent, PaSim) for simulating N<sub>2</sub>O emissions using the site data gathered during the experiment described in Chapter 2. Every individual model predicted more accurate annual N<sub>2</sub>O emissions than the IPCC (Tier 1) estimate which was used as a baseline. The multi-model ensemble average reduced the error in predicted annual N<sub>2</sub>O emissions (annual RMSE) by more than 60% compared to the baseline. Best-performing models for the prediction of annual N<sub>2</sub>O emissions (DayCent; two versions) showed weaknesses in the prediction of daily N<sub>2</sub>O emissions whereas other models (APSIM; two versions) showed exactly the opposite pattern. In general, daily predictions challenged all individual models leading to both, over- and underprediction of N<sub>2</sub>O emissions. However, the ensemble average of all models performed much better and reduced the error in predicted daily N<sub>2</sub>O emissions by 24–46% (comparing the RMSE of the

ensemble to RMSE across models). Therefore, using multi-model ensembles could be a defensible approach for the upscaling of N<sub>2</sub>O emissions, while single-model predictions should be interpreted with caution as they comprise large uncertainties.

The legume-based N<sub>2</sub>O mitigation strategy requires effects of grass-legume mixtures with varying legume proportions and N fertilizer amounts on yields and BFN to be adequately reflected in models in order to assure valid conclusions about yield changes. However, state-of-the-art grassland models (i.e. DayCent, PaSim) poorly represent the effects of grass-legume mixtures on yields and BFN. Thus, further validation was necessary for enabling reliable simulations of the effects of various legume proportions and fertilizer amounts on yields, N<sub>2</sub>O emissions and the respective N<sub>2</sub>O emission intensities (unit N<sub>2</sub>O emissions per unit yield). Therefore, the study presented in **Chapter 4** validates the representation of yields and BFN in grass-legume mixtures for two specific process-based biogeochemical models, APSIM and DayCent, against a plot-scale experimental dataset. Moreover, a novel scheme to enable DayCent to represent key aspects of the grass-legume mixtures was developed and implemented. This interim step was necessary, as DayCent, without using such a scheme, was unable to adequately represent yields and BFN of grass-legume mixtures beyond 30% legume proportion.

Using the enhancement scheme presented in Chapter 4, in **Chapter 5** the process-based biogeochemical models APSIM and DayCent were applied in order to systematically assess the impact of mitigation management practices on yields and GHG emissions. The N<sub>2</sub>O mitigation strategy which was tested experimentally (Chapter 2 – partial substitution of fertilizer N with BFN from legumes), was investigated conducting a scenario modeling across the range of potential combinations of legume proportion and fertilizer N input. We ran the models not only for organic fertilizer, as in the experiment, but further included a set of mineral fertilizer scenarios. Two process-based biogeochemical models (APSIM and DayCent, each in two variants) were used to simulate the N<sub>2</sub>O mitigation potential and productivity of combinations of legume proportion and N fertilizer rate for five temperate grassland sites across the globe. “Golden datasets” from these sites were used for a previous model intercomparison and calibrated to the site data,

providing the basis for the scenario modeling (Chapter 5 and 6). All the models showed that partial substitution of fertilizer N by legumes could mitigate N<sub>2</sub>O emissions without losses in yield across a wide range of fertilizer-legume combinations. Models were relatively consistent in the magnitude of relative reductions in both, N<sub>2</sub>O emissions and N<sub>2</sub>O emission intensities. However, the models showed large variability of absolute N<sub>2</sub>O emissions and N<sub>2</sub>O emissions reductions. This indicates that absolute values of mitigation potentials entail large uncertainties, but that the overall relative reductions are more reliable. The overall agreement in the pattern of N<sub>2</sub>O emissions reductions under mitigation management, and the absence of evidence for increased N<sub>2</sub>O emissions at increased clover proportions provide enhanced confidence in the effectiveness of using legumes as a GHG mitigation strategy.

Another mitigation strategy for GHG emissions in grasslands is to decrease the livestock density in grazed pastures, separately as well as in combination with fertilizer reductions. In order to test this mitigation strategy, in **Chapter 6** we investigated the effects of reduced animal density alone as well as in combination with reduced N fertilization on the full GHG budget at the same five permanent grassland sites that were investigated in Chapter 5. The multi-model ensemble median predicted an increased C sink strength (negative net ecosystem C exchange) at reduced animal density and at reduced animal density combined with fertilizer N ( $-64 \pm 74$  and  $-81 \pm 74$  g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively) compared to the baseline of  $-31 \pm 70$  g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>. Reduced N fertilization diminished N<sub>2</sub>O-N emissions from  $0.34 \pm 0.22$  (baseline) to  $0.10 \pm 0.05$  g N m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> (no N fertilization). Grazing intensity effects on the N balance were minor.

As synthesized in **Chapter 7**, this doctoral thesis combined state-of-the-art eddy covariance flux measurements and model outputs in order to investigate overall GHG budgets and in particular N<sub>2</sub>O mitigation in intensively managed grasslands. N<sub>2</sub>O emissions were consistently reduced for the Swiss experiment and the model outputs. The results of this doctoral thesis contribute to tackle the urgent challenge of developing suitable measures for climate change mitigation in the agricultural sector.

## Zusammenfassung

Die vom Menschen verursachten Lachgasemissionen ( $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen) stammen zum Grossteil aus der Landwirtschaft. Lachgas ist nicht nur ein wichtiges Treibhausgas (THG), sondern führt auch zum Abbau der Ozonschicht. Aufgrund dieser beiden Umweltwirkungen ist es notwendig, Strategien zur Reduzierung von  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen zu identifizieren und zu evaluieren. Derzeit verursacht der Agrarsektor rund 56 bis 81% der anthropogenen  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen. Der Grossteil ist dabei auf Düngemittel zurückzuführen.  $\text{N}_2\text{O}$  wird sowohl nach der Ausbringung mineralischer und organischer Dünger aus Böden emittiert, als auch bei der Lagerung von Hofdüngern. Daher spielen bei der Reduktion von landwirtschaftlichen  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen Stickstoff (N)-Dünger eine maßgebliche Rolle.

Grünlandböden erstrecken sich über ein Viertel der Erdoberfläche und bedecken etwa 70% der landwirtschaftlichen Flächen. Grünlandböden können Kohlenstoff (C) binden und im Laufe der Zeit große Kohlenstoffvorräte akkumulieren. Der C- und N-Kreislauf im Grünland hängt jedoch weitgehend von landwirtschaftlichen Bewirtschaftungspraktiken wie dem Pflügen und der Ausbringung von mineralischen und organischen Düngemitteln ab. Intensive landwirtschaftliche Praktiken reduzieren die C-Senke und erhöhen die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen, wodurch diese effektiv zu Quellen von Treibhausgasen für die Atmosphäre werden. Aus diesem Grunde legt die vorliegende Arbeit ihren Fokus auf die Minderung von Treibhausgas-Emissionen aus Grünlandböden (siehe **Kapitel 1**).

Eine mögliche  $\text{N}_2\text{O}$ -Minderungsstrategie für intensiv bewirtschaftete Grünlandböden ist der Ersatz von Düngerstickstoff durch biologisch fixierten Stickstoff (BFN) mithilfe von Leguminosen. Die Nutzung von BFN dürfte zu einer Stickstoffversorgung führen, die zeitlich synchron zum Stickstoffbedarf der Pflanzen passiert. Im Vergleich dazu entsprechen die gelegentlichen, hohen Stickstoffgaben durch Düngerapplikation einer weniger kontinuierlichen Versorgung der Pflanzen mit Stickstoff. Es ist jedoch wenig über die Auswirkungen von erhöhten Leguminosenanteilen im Bestand auf  $\text{N}_2\text{O}$ -

Emissionen in Grünland bekannt. Erhöhte N<sub>2</sub>O-Emissionen aufgrund eines Stickstoffüberschusses durch BFN könnten die N<sub>2</sub>O-Emissionen, die durch Düngemittelreduktionen vermieden werden, möglicherweise wieder ausgleichen. **Kapitel 2** untersucht daher die Gesamtwirkung dieser N<sub>2</sub>O-Minderungsstrategie auf Dauergrünland mittels eines Feldexperimentes auf der Ökosystemebene.

Netto-N<sub>2</sub>O-Flüsse und Biomasserträge in zwei unterschiedlich bewirtschafteten Gras-Klee-Mischungen wurden verglichen. Zudem wurden die gemessenen N<sub>2</sub>O-Flüsse mit Management- und Umweltfaktoren in Bezug gesetzt. Die getestete N<sub>2</sub>O-Minderungsstrategie reduzierte die N<sub>2</sub>O-Emissionen in den Jahren 2015 und 2016 um 54 bzw. 39%, was 1,0 und 1,6 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro ha und Jahr entspricht. Der jährliche Ertrag war jedoch vergleichbar hoch zwischen der Experiment- und der Kontrollfläche, was über den betrachteten zweijährigen Zeitraum zu einer Reduktion der N<sub>2</sub>O-Emissionsintensität (N<sub>2</sub>O-Emission pro Ertrag) von 0.42 auf 0.28 g N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> DM führte. Es konnte also eine N<sub>2</sub>O-Reduktion ohne Ertragseinbußen durch Erhöhung des Kleeanteils und Verminderung der Düngung erzielt werden.

Die Durchführung von Experimenten über einen weiten Bereich an möglichen Klee-Anteilen und Düngermengen hinweg sowie über einen Zeitraum von mehreren Jahren gestaltet sich schwierig aufgrund der damit verbundenen Kosten, des immensen Arbeitspensums und aufgrund der grossen Zeitskalen die betrachtet werden müssen um Langzeiteffekte zu charakterisieren. Diese Einschränkungen können durch die Verwendung von biogeochemischen prozessbasierten Modellen überwunden werden, da in den Modellen Leguminosen-Dünger-Kombinationen leicht variiert werden können. Diese Modelle könnten darüber hinaus dazu genutzt werden, Treibhausgasemissionen für nationale Inventare (räumlich und zeitlich) hochzurechnen.

Jedoch stellt die Simulation von Treibhausgasflüssen einzelne Modelle vor grosse Herausforderungen und ist bisher mit erheblichen Unsicherheiten in den simulierten Variablen verbunden, sodass eine umfassende Validierung nötig ist.

Daher war das Ziel in **Kapitel 3**, die Vorhersagegenauigkeit von drei prozessbasierten biogeochemischen Modellen (APSIM, DayCent, PaSim) für die Simulation von N<sub>2</sub>O-Emissionen anhand der Messdaten des in Kapitel 2 beschriebenen Experiments zu bewerten. Jedes einzelne Modell prognostizierte genauere jährliche N<sub>2</sub>O-Emissionen als die IPCC (Tier 1) Schätzung, die als Referenz verwendet wurde. Der Ensemble-Mittelwert reduzierte den Fehler in den prognostizierten jährlichen N<sub>2</sub>O-Emissionen (jährlicher RMSE) um mehr als 60% im Vergleich zur Referenz. Die genauesten Modelle für die Vorhersage der jährlichen N<sub>2</sub>O-Emissionen (DayCent in zwei Versionen) zeigten Schwächen bei der Vorhersage der täglichen N<sub>2</sub>O-Emissionen, während andere Modelle (APSIM in zwei Versionen) das genau umgekehrte Verhalten zeigten. Im Allgemeinen stellten tägliche Vorhersagen alle Einzelmodelle vor Herausforderungen, und führten sowohl zu Über- als auch zu Unterschätzungen der gemessenen N<sub>2</sub>O-Emissionen. Der Ensemblemittelwert aller Modelle hingegen zeigte auf Tagesbasis eine wesentlich höhere Vorhersagekraft und reduzierte die Unsicherheit in der Vorhersage tagesbasierter N<sub>2</sub>O-Emissionen um 24-46% (Vergleich des RSME des Ensemblemittelwertes mit dem RSME einzelner Modelle). Daher könnte die Verwendung von Ensemble-Mittelwerten ein vertretbarer Ansatz für das Hochskalieren von N<sub>2</sub>O-Emissionen sein. Vorhersagen einzelner Modelle hingegen sollten mit Vorsicht interpretiert werden, da sie große Unsicherheiten aufweisen.

Die Strategie zur Reduktion von N<sub>2</sub>O-Emissionen durch Leguminosen soll mithilfe von prozess-basierten Modellen untersucht werden. Dies erfordert jedoch, dass die Auswirkungen von Gras-Leguminosen-Mischungen auf Erträge und BFN in den Modellen angemessen repräsentiert sind, damit gültige Schlüsse auf Ertragsänderungen bei variierenden Leguminosenanteilen und Düngermengen gezogen werden können. Einige Graslandmodelle (z. B. DayCent, PaSim) repräsentieren jedoch bisher die Auswirkungen von Gras-Leguminosen-Mischungen auf Erträge und BFN unzureichend.

Darum war es notwendig, weitere Validierungen durchzuführen um, um die Auswirkungen verschiedener Leguminosenanteile und Düngermengen auf den Ertrag, die N<sub>2</sub>O-Emissionen und die jeweiligen N<sub>2</sub>O -Emissionsintensitäten zuverlässig



simulieren zu können. Die in **Kapitel 4** vorgestellte Studie validiert die Simulation von Ertrag und BFN in Gras-Leguminosen-Mischungen für die zwei prozessbasierten biogeochemischen Modelle, APSIM und DayCent, gegen einen experimentellen Datensatz. Darüber hinaus wurde ein neues Schema entwickelt und implementiert, mit dem DayCent Schlüsselaspekte der Gras-Leguminosen-Mischungen repräsentieren kann. Dieser Zwischenschritt war notwendig, da DayCent ohne einen solchen Ansatz nicht in der Lage war, Erträge und BFN von Gras-Leguminosen-Mischungen über 30% Leguminosenanteil angemessen zu repräsentieren.

Unter Verwendung dieses in Kapitel 4 vorgestellten Schemas wurden in **Kapitel 5** die beiden prozessbasierten biogeochemischen Modelle APSIM und DayCent eingesetzt, um die Auswirkungen von Klimaschutzmaßnahmen auf Ertrag und Treibhausgasemissionen systematisch zu untersuchen. Die N<sub>2</sub>O-Mitigationsstrategie, die experimentell getestet wurde (Kapitel 2 - partielle Substitution von Dünger N mit BFN durch Leguminosen), wurde mittels Modellierung über die möglichen Kombinationen von Leguminosenanteilen und Düngermenge untersucht, sowohl für mineralische als auch für organische Dünger. Zwei prozessbasierte biogeochemische Modelle (APSIM und DayCent, jeweils in zwei Varianten) wurden verwendet, um das N<sub>2</sub>O-Minderungspotential und die Produktivität von Kombinationen aus Leguminosenanteilen und N-Düngermenge für fünf weltweit verteilte Grünlandstandorte zu simulieren. Die Modelle wurden in einer vorhergehenden Studie mithilfe der jeweiligen Standortdaten kalibriert, was die Grundlage für die Szenario-Modellierung in Kapitel 5 und 6 lieferte. Alle Modelle zeigten, dass eine Substitution von Düngerstickstoff durch Leguminosen die N<sub>2</sub>O-Emissionen ohne Ertragsverluste über einen weiten Bereich von Dünger-Leguminosen-Kombinationen reduzieren könnte. Die relative Reduzierung der N<sub>2</sub>O-Emissionen und der N<sub>2</sub>O-Emissionsintensitäten war verhältnismäßig konsistent, die absoluten N<sub>2</sub>O-Emissionen und N<sub>2</sub>O-Emissionsreduktionen zeigten jedoch eine große Variabilität zwischen verschiedenen Modellen. Das zeigt, dass absolute Minderungspotentiale große Unsicherheiten mit sich bringen, die relativen Reduktionen hingegen zuverlässiger sind. Die allgemeine

Übereinstimmung hinsichtlich des Trends der N<sub>2</sub>O-Emissionsreduktionen durch die N<sub>2</sub>O-Minderungsstrategie und das Ergebnis unveränderter N<sub>2</sub>O-Emissionen bei erhöhten Kleeblattanteilen deuten auf die Wirksamkeit der Verwendung von Leguminosen als eine THG-Minderungsstrategie hin.

Eine weitere THG-Minderungsstrategie für Grünland ist eine Verringerung der Tierdichte auf beweideten Flächen, sowohl als alleinige Massnahme als in Kombination mit der Reduktion von Düngemitteln. Um diese Strategie zu testen untersucht **Kapitel 6** die Auswirkungen verringerter Tierdichten (allein und in Kombination mit Düngemittelreduktion) auf das gesamte Treibhausgasbudget, auf den gleichen fünf Dauergrünlandstandorten wie in Kapitel 5. Der Modell Ensemble-Median prognostiziert eine erhöhte C Senke bei reduzierter Tierdichte alleine und kombiniert mit Dünger N ( $-64 \pm 74$  bzw.  $-81 \pm 74$  g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>) im Vergleich zur Referenz (ohne THG-Reduktion) von  $-31 \pm 70$  g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>. Die reduzierte Düngung verringerte die N<sub>2</sub>O-N-Emissionen von  $0.34 \pm 0.22$  (Referenz) auf  $0.10 \pm 0.05$  g m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> (ohne Düngung). Die Auswirkungen der Tierdichte auf die Stickstoffbilanz waren gering.

Wie in **Kapitel 7** zusammengefasst, kombiniert dies Dissertation Treibhausgasflussmessungen und Modellergebnisse, um die gesamten THG-Budgets und insbesondere die N<sub>2</sub>O-Minderung von intensiv bewirtschafteten Grünlandböden zu untersuchen. Sowohl im Schweizer Experiment als auch in den Modellsimulationen wurde gezeigt, dass die N<sub>2</sub>O-Emissionen effektiv reduziert wurden. Die Ergebnisse dieser Dissertation tragen dazu bei, die drängenden Herausforderungen im landwirtschaftlichen Sektor anzugehen, die sich uns bei der Entwicklung geeigneter Methoden zur Verminderung des Klimawandels stellen.