

Nitrate leaching from animal manure - Insights from on-farm and greenhouse studies using ^{15}N labelled cattle slurry

Doctoral Thesis

Author(s):

Frick, Hanna

Publication date:

2022

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000545812>

DISS. ETH NO. 28183

**Nitrate leaching from animal manure –
Insights from on-farm and greenhouse studies
using ^{15}N labelled cattle slurry**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR of SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

HANNA MARGARETE FRICK
MSc. in Environmental Sciences
University of Copenhagen/University of Hohenheim

born 31.05.1991
Citizen of Germany

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Emmanuel Frossard, examiner
PD. Dr. Else K. Bünemann König, co-examiner
Dr. Astrid Oberson Dräyer, co-examiner
Dr. Peter Sørensen, co-examiner

2022

Summary

Animal manures are valuable multi-nutrient fertilizers, but their nitrogen (N) use efficiency (NUE) by crops is often low. Inefficient and untargeted use of animal manure can lead to N losses such as nitrate (NO_3^-) leaching, having adverse effects both on natural ecosystem and on the integrity of drinking water resources. In order to minimize N losses, a better understanding of N turnover dynamics of animal manure in the soil-plant system as well as actual measurements of NO_3^- leaching from animal manure under field conditions are needed. The overarching questions of this thesis were: Does animal manure cause higher NO_3^- leaching than mineral fertilizer? And how could N leaching losses be reduced? These questions were addressed by tracing the fate of ^{15}N labelled cattle slurry in comparison to ^{15}N labelled mineral fertilizer in the soil-plant system during an on-farm field study over 2.5 years. This study was conducted in the Gäu region, Canton Solothurn, Switzerland, which is characterized by elevated NO_3^- levels in the groundwater exceeding the Swiss quality criterion of $25 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$.

To this end, ^{15}N labelled cattle slurry was produced by feeding a heifer with ^{15}N labelled ryegrass (*Lolium multiflorum*) hay. The ^{15}N labelled cattle slurry (Slu) and the ^{15}N labelled mineral fertilizer (Min) were applied to microplots (1.5 m x 2 m) on two neighbouring fields on loamy soil in the Gäu region. Both fields followed the same crop rotation (grass-clover – silage maize – winter wheat), but shifted by one year. The ^{15}N labelled fertilizers were applied in 2018, according to common agricultural practice and at the same rate of mineral N. From 2019, fertilization was done with unlabelled fertilizers by the farmer.

The crops to which the ^{15}N labelled fertilizers had been applied, recovered 45 to 47 % of mineral fertilizer N, but only 19 to 23 % of cattle slurry N. Complementary, recoveries in soil at the end of the first season were greater for Slu (53 to 58 %) than for Min (28 to 32 %), despite greater ammonia emissions from Slu. Fertilizer recovery in the succeeding crops was small (< 4.6 % in the first and < 2.4 % in the second residual year, relative to applied fertilizer amounts) and similar for the two fertilizers.

These results relate well to the finding that 77 to 89 % of residual fertilizer N in soil after the first crop were recovered in the non-microbial organic N pool, irrespective of fertilizer type and of initial differences between them. Depth translocation of fertilizer N was marginal, and at the end of the 2.5 years lasting field study the majority of ^{15}N was still recovered in the top 30 cm. Partly, this might relate to exceptional dry weather conditions during summer 2018, with precipitation between April and October remaining 30 % below the long-term average. However, throughout the whole experimental period, average precipitation still reached approx. 1`000 mm year⁻¹ which is about 89 % of the long-term average and, thus, allowed for representative observations. Cumulated amounts of NO_3^- leaching over the three crops reached up to 205 kg $\text{NO}_3\text{-N ha}^{-1}$, but less than 5 % of this amount originated from direct leaching of the labelled fertilizers. Although low in absolute values, NO_3^- leaching losses were significantly higher for Slu (4.6 to 7.5 kg $\text{NO}_3\text{-N ha}^{-1}$) than for Min (2.3 to 3.7 kg $\text{NO}_3\text{-N ha}^{-1}$) cumulated over the whole duration of the study. The highest NO_3^- leaching occurred after termination of grass-clover ley and most of the leached NO_3^- originated from mineralization of soil N. This emphasizes the central role of soil organic N management for mitigating NO_3^- leaching.

In a follow-up experiment under greenhouse conditions, the same ^{15}N labelled fertilizers were applied to soil columns planted with ryegrass (*Lolium multiflorum*). The aim was to test the effect of treating ^{15}N labelled cattle slurry by anaerobic digestion, biochar and/or the nitrification inhibitor DMPP on NUE, NO_3^- leaching and slurry N turnover in soil. All slurry treatments were expected to reduce the NO_3^- leaching potential compared to untreated slurry. Anaerobic digestion increased crop NUE and decreased ^{15}N recovery in soil. However, this did not translate into lower leaching of residual N after 57 days of ryegrass growth compared to undigested slurry. Nevertheless, anaerobic digestion might decrease the long-term leaching potential of slurry, since N accumulation in soil would be lower with repeated applications of digested compared to undigested slurry. Biochar and DMPP had minor effects and are likely less promising strategies to reduce NO_3^- leaching.

The results of this thesis highlight that considering soil organic N turnover is key to understand and mitigate NO_3^- leaching. Crop N uptake originated only to a minor proportion from current fertilizer additions, while most of it came from soil organic N mineralization. In turn, most fertilizer N was rapidly incorporated into the soil organic N pool. This advocates that fertilization should not only target to directly nourish the crops, but also to (re-)fill these soil N reserves that in turn will provide N to the crops. Furthermore, termination of grass-clover was confirmed as the “hot moment” within the crop rotation, increasing soil N mineralization and being responsible for most NO_3^- leaching losses. Better management of these losses might require the introduction of cover crops as well as considering the mineral N release from soil and belowground residues of grass-clover leys, both in terms of amounts and temporal release dynamics, by accordingly reducing N fertilizer input after grass-clover termination.

Zusammenfassung

Hofdünger sind wertvolle Mehrnährstoffdünger, aber ihre Stickstoffausnutzungseffizienz (NUE) durch die Nutzpflanzen ist oft gering. Ineffizienter und ungezielter Einsatz von Hofdüngern kann zu Verlusten von Stickstoff (N) führen, zum Beispiel durch Nitratauswaschung. Nitratauswaschung gefährdet natürliche Ökosysteme und die Integrität von Trinkwasserressourcen. Um diese N-Verluste zu minimieren, sind ein besseres Verständnis der N-Umsatzdynamiken von Hofdüngern im Boden-Pflanze-System sowie eine Quantifizierung der tatsächlichen Nitratauswaschung aus Hofdüngern unter Feldbedingungen notwendig. Die übergeordneten Fragen dieser Dissertation waren: Führen Hofdünger zu höheren Nitratauswaschungsverlusten als Mineraldünger? Und wie können N-Auswaschungsverluste verringert werden? Zur Beantwortung dieser Fragen wurden ^{15}N markierte Rindergülle und ^{15}N markierter Mineraldünger im Boden-Pflanze-System über 2.5 Jahre in einem Feldversuch unter praxisüblicher Bewirtschaftung auf einem Landwirtschaftsbetrieb nachverfolgt. Der Versuch wurde in der Region Gäu, Kanton Solothurn, Schweiz, durchgeführt. Die Gäu-Region ist gekennzeichnet durch hohe Nitratgehalte im Grundwasser, die das Schweizer Qualitätsziel von $25 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ überschreiten.

Um ^{15}N markierte Rindergülle zu produzieren, wurde ein junges Rind mit ^{15}N markiertem Weidelgras-Heu (*Lolium multiflorum*) gefüttert. Die ^{15}N markierte Rindergülle (Slu) und der ^{15}N markierten Mineraldünger (Min) wurden auf Kleinstparzellen (1.5 m x 2 m) auf zwei benachbarten Feldern mit lehmigem Boden in der Region Gäu ausgebracht. Die beiden Felder folgten der gleichen Fruchtfolge (Klee gras – Silomais – Winterweizen), welche zwischen den beiden Feldern um ein Jahr versetzt war. Die ^{15}N markierten Dünger wurden in 2018 praxisüblich und in der gleichen Menge an mineralischem N ausgebracht. Ab 2019 erfolgte die Düngung mit unmarkierten Düngern durch den Landwirt.

Im Ausbringungsjahr der ^{15}N Dünger nahmen die Kulturen 45 bis 47 % des Mineraldünger-N auf, aber nur 19 bis 23 % des Gülle-N. Komplementär dazu war die

^{15}N Wiederfindung im Boden für Slu (53 bis 58 %) grösser als für Min (28 bis 32 %), obwohl die Ammoniakemissionen für Slu höher waren. Die Wiederfindung von Dünger-N in den nachfolgenden Kulturen war gering ($< 4.6\%$ im ersten und $< 2.4\%$ im zweiten nachfolgenden Jahr, relativ zur ausgebrachten N-Menge). Diese Ergebnisse passen gut zur Beobachtung, dass unabhängig vom Düngeverfahren und trotz anfänglicher Unterschiede zwischen Min und Slu, 77 bis 89 % des residuellen Dünger-N im Boden nach der Ernte der ersten Kultur im nicht-mikrobiellen organischen Boden-N-Pool wiedergefunden wurden. Die Tiefenverlagerung des Dünger-N im Boden war gering und zum Ende der 2.5 Jahre andauernden Versuchslaufzeit befand sich immer noch der grösste Teil des Dünger-N in den obersten 30 cm. Dies kann teilweise auf die ausserordentlich trockenen Wetterbedingungen im Sommer 2018 zurückgeführt werden, in welchem die Niederschläge zwischen April und Oktober 30 % tiefer waren als im langjährigen Mittel. Insgesamt lagen die durchschnittlichen Niederschläge während der gesamten Versuchslaufzeit aber bei 1000 mm Jahr^{-1} , was 89 % der langjährigen mittleren Niederschläge entspricht, und erlaubten dadurch trotz allem repräsentative Messungen. Die kumulierte Nitratauswaschung über die drei Kulturen lag bei bis zu $205\text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$. Allerdings stammten weniger als 5 % dieser Menge direkt aus den Düngern. Obschon die absoluten Auswaschungsverluste aus den Düngern gering waren, wurde während der gesamten Versuchslaufdauer mehr Gülle-N ($4.6\text{ bis }7.5\text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$) als Mineraldünger-N ($2.3\text{ bis }3.7\text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$) ausgewaschen. Die höchste Nitratauswaschung trat nach dem Umbruch der Klee graswiese auf und stammte zum grössten Teil aus der Mineralisierung von Boden-N. Dies unterstreicht die zentrale Rolle des Managements von organischem Boden-N, um Nitratauswaschung zu verringern.

In einem Folgeversuch unter Gewächshausbedingungen wurden die gleichen ^{15}N markierten Dünger auf mit Weidelgras (*Lolium multiflorum*) bepflanzen Bodensäulen ausgebracht. Der Versuch zielte darauf ab, den Effekt von anaerober Vergärung, Pflanzenkohle und dem Nitrifikationshemmstoff DMPP auf NUE, Nitratauswaschung und Gülle-N-Umsätze im Boden zu untersuchen. Es wurde

angenommen, dass alle getesteten Verfahren das Nitratauswaschungspotenzial gegenüber unbehandelter Gülle reduzieren. Anaerobe Vergärung steigerte die Pflanzen-NUE und verringerte die ^{15}N Wiederfindung im Boden. Allerdings resultierte dies nach der Kultivierung von Weidelgras für 57 Tage nicht in einer verringerten Nitratauswaschung des residuellen N verglichen mit unvergorener Gülle. Nichtsdestotrotz ist davon auszugehen, dass anaerobe Vergärung längerfristig das Nitratauswaschungspotenzial von Gülle reduziert, da sich bei wiederholter Ausbringung von anaerob vergorener Gülle weniger N im Boden anreichert als bei unvergorener Gülle. Pflanzenkohle und DMPP hatten nur geringe Effekte und ihr Einsatz zur Reduktion der Nitratauswaschung ist vermutlich weniger vielversprechend.

Die Resultate dieser Dissertation verdeutlichen, dass der Umsatz von organischem Boden-N zentral ist, um Nitratauswaschung zu verstehen und zu verringern. Nur ein kleiner Teil der Pflanzen-N-Aufnahme stammte aus den ausgebrachten Düngern, während der grösste Teil aus der Mineralisierung des organischen Boden-N stammte. Im Gegenzug wurde der meiste Dünger-N rasch in den organischen Boden-N-Pool eingebaut. Diese Ergebnisse sprechen dafür, mit der Düngung nicht nur auf die direkte Pflanzenernährung abzielen, sondern auch das Auffüllen der Boden-N-Pools zu berücksichtigen, welche wiederum die Pflanzen mit Nährstoffen versorgen. Der Umbruch der Klee graswiese wurde als entscheidender Moment innerhalb der Fruchtfolge bestätigt, welcher die Boden-N-Mineralisierung erhöht und verantwortlich ist für den grössten Teil der Nitratauswaschungsverluste. Um diese Verluste besser zu kontrollieren, sind Zwischenfrüchten sowie die Berücksichtigung der N Freisetzung aus dem Boden und der unterirdischen Pflanzenrückstände der Klee graswiese (sowohl in Bezug auf die Menge als auch auf die zeitlichen Dynamiken der N Freisetzung) durch eine Reduktion nachfolgender Düngergaben notwendig.