**Tagungsbeitrag zu:** Sitzung der Kommission IV S2.1 der DBG

**Titel der Tagung:** Erd-Reich und Boden-landschaften

**Veranstalter:** DBG, 24.08.-29.08.2019 in Bern

Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation)

<http://www.dbges.de>

**Stickstoff (N)-Dynamik und N-Verlustquellen bei der Harnstoff-Düngung auf einem Norm-Tschernosem**

Nadine Tauchnitz1, Florian Eißner2, Joachim Bischoff1, Florian Kurzius3, Olaf Christen2, Thomas Kreuter4

### Zusammenfassung

Mit dem Hintergrund, die umwelt- und klimapolitischen Ziele zu erreichen, sind Stickstoff(N)-Verluste bei der Düngung durch eine verbesserte N-Effizienz zu minimieren. Im vorliegenden Projekt soll eine Erhöhung der N-Effizienz bei der Harnstoffdüngung durch wurzelnahe Platzierung (Side-Dressing-Verfahren) und Stabilisierung des Dünger-N (Einsatz kombinierter Nitrifikations- und Ureaseinhibitor) erzielt werden.

Die Verfahren wurden in einem Fruchtfolgeversuch (Winterraps-Winterweizen-Wintergerste) auf ihr N-Verlustminderungspotential geprüft. Dabei wurden folgende Parameter berücksichtigt: Lachgas(N2O)- und Ammoniak(NH3)-Emissionen, Nmin-Dynamik im Boden, Erträge und N-Entzüge. Zudem wurden in begleitenden Laboruntersuchungen die Mineralisations- und Nitratabbauraten des Bodens bestimmt. Analysen der Stabil-isotopenverhältnisse (δ 15N und δ 18O) im

1 Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt, Strenzfelder Allee 22, 06406 Bernburg, nadine.tauchnitz@llg.mule.sachsen-anhalt.de

2 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Betty-Heimann-Str. 5, 06120 Halle (S.)

3 BGD Ecosax GmbH, Tiergartenstrasse 48, 01219 Dresden

4 SKWStickstoffwerke Piesteritz GmbH, Am Wieseneck 7, 04451 Borsdorf, OT Cunnersdorf

Dünger und im Boden dienten dazu, Informationen zur Herkunft der N-Verluste (organischer N-Pool, Dünger) und der ablaufenden N-Umwandlungsprozesse zu erhalten.

Im Versuchszeitraum (2016-2019) waren aufgrund der geringen Niederschläge und damit verbundenen niedrigen Erträge und N-Entzüge teilweise hohe N-Überschüsse und damit ein hohes N-Verlustpotential nachweisbar. Die N2O-N-Verluste in der gesamten Fruchtfolge Winterraps-Winterweizen-Wintergerste waren mit maximal 0,59 kg N/ha\*a auf einem sehr geringen Niveau. Die Injektionsvariante wies im Vergleich zu den anderen Varianten signifikant höhere N2O-Emissionen auf, die vermutlich durch die hohen Nmin-Konzentrationen im Boden nach der Düngung und die tiefere Ablage des Düngers begründet waren. Haupteinflussfaktoren auf die N2O-Emissionen waren die Nmin- bzw. NO3--Gehalte im Boden, die Bodenfeuchte und die Bodentemperatur in 1 cm Tiefe. In den Laborversuchen wurden hohe Mineralisations- und Nitratabbauraten des untersuchten Bodens erfasst. Die Stabilisotopenanalysen ergaben, dass der Dünger-N vollständig bis zur Ernte umgesetzt wurde und zum Zeitpunkt der Probenahme überwiegend im organischen N-Pool gebunden vorlag.

**Schlüsselworte**: Lachgas, Mineralisation, organischer N-Pool, Side-Dressing-Verfahren, N-Stabilisierung

### 1 Einleitung und Zielstellung

Mit dem Hintergrund, die umwelt- und klimapolitischen Ziele zu erreichen, sind Stickstoff(N)-Verluste bei der Düngung durch eine verbesserte N-Effizienz zu minimieren. Im von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) geförderten Projekt „N-**Sta**bilisierung und wurzelnahe **Pla**tzierung als innovative Technologien zur Optimierung der **Res**sourceneffizienz bei der Harnstoffdüngung (StaPlaRes)“ soll eine Erhöhung der N-Effizienz durch N-Stabilisierung (Einsatz von Urease- und Nitrifikationsinhibitoren) und wurzelnahe Platzierung des Düngers (Side-Dressing-Verfahren) erreicht werden. In Fruchtfolgeversuchen (Winterraps-Winterweizen-Wintergerste) wurden diese Verfahren an drei Versuchsstandorten (Bernburg, Cunnersdorf, Roggenstein) auf ihr N-Verlustminderungspotential geprüft. Im vorliegenden Beitrag werden bisherige Ergebnisse auf einem Lössboden (Tschernosem) für den Versuchsstandort Bernburg vorgestellt.

Folgende Arbeitsschwerpunkte wurden im Rahmen des Projektes bearbeitet:

1. Erfassung der Lachgas(N2O)-N-Verluste und relevanter Einflussfaktoren (Nmin-Gehalte im Boden, Bodenfeuchten, Bodentemperaturen)
2. Quantifizierung der Mineralisations- und Nitratabbauraten unter kontrollierten Bedingungen im Labor
3. Analytik der Stabilisotopenverhältnisse (δ 15N und δ 18O) im Dünger und im Boden zur Ermittlung der Herkunft der N-Verluste (organischer N-Pool, Dünger).

**2 Methoden**

**2.1 Versuchsstandort**

Der Versuchsstandort Bernburg befindet sich in Mitteldeutschland in der Lössregion Sachsen-Anhalts. Die klimatischen Verhältnisse sind durch niedrige Niederschläge von langjährig (1981-2010) 511 mm und Jahresdurchschnittstemperaturen von 9,7 °C charakterisiert. Der Boden ist ein Normtschernosem mit der Bodenart stark toniger Schluff (Ut4; 22 % Ton, 69 % Schluff, 9 % Sand). Der Oberboden (0-30 cm) weist organische Kohlenstoffgehalte von 1,24 (± 0,05) %, Gesamt-N-Gehalte von 0,12 (± 0,01) %, Gesamt-Kohlenstoffgehalte von 1,4 (± 0,07) %, pH-Werte von 7,4 (± 0,1) und eine potentielle Kationenaustauschkapazität von 18,9 (± 0,4) cmol+/kg auf.

**2.1 Fruchtfolgeversuch**

Im Parzellenversuch (Lateinisches Quadrat, 9 x 9 m, 4 Wiederholungen) wurden folgende Prüfglieder untersucht: 1. Kontrolle ohne Harnstoffdüngung (CONTR), 2. oberflächige Harnstoffausbringung (SURF), 3. Harnstoff-Injektion (INJEC), 4. Harnstoff-N-Stabilisierung (STAB). Gedüngt wurden 130 kg/ha zu Winterraps, 200 kg/ha zu Winterweizen und 160 kg/ha zu Wintergerste. Bei der stabilisierten Harnstoffdüngung wurde dem Dünger ein kombinierter Urease- und Nitrifikationsinhibitor zugesetzt. Die Ausbringung des Düngers (granulierter Harnstoff) erfolgte bei der Injektionsvariante durch Zwischenreihendüngung (Side-Dressing-Verfahren) platziert in 5 bis 7 cm Tiefe, beim Winterraps zwischen jeder Reihe (Einzelkornsaat, Reihenabstand 37,5 cm) und beim Wintergetreide zwischen jeder zweiten Reihe (Drillsaat, Reihenabstand 12,5 cm). Die N2O-Emissionen wurden mit Hilfe geschlossener Sammelhauben (0,56 m²) einmal wöchentlich bzw. nach der Düngung zweimal wöchentlich bestimmt. Die Gasproben wurden nach 0, 20, 40 und 60 Minuten Verschlusszeit entnommen und gaschromatographisch im Labor des TI (Braunschweig) analysiert. Parallel zu den N2O-Messungen wurden die Bodentemperaturen (1, 5, 10 cm), die Bodenwassergehalte gravimetrisch bei 105 °C und die Nmin-Gehalte des Bodens nach VDLUFA (2002) bis in 30 cm Tiefe ermittelt.

**2.2 Laborversuch**

Für den Laborversuch wurden im November 2018 Bodenproben (0-30 cm) von der SURF-Variante entnommen. Im Labor der BGD Ecosax GmbH wurden die Mineralisations- und Nitratabbauraten im Bodensättigungsextraktionsversuch (BSE) nach LfULG (2004) bestimmt. Die Analysen der Isotopensignaturen wurden am Stabilisotopenlabor der TU Dresden durchgeführt. Dabei wurde das Stabilisotopenverhältnis δ 15N (Gesamt-N) im Feststoff (Boden, Dünger) durch Verbrennung im Elementaranalysator (EA 3000, Eurovektor) zu N2 und nachfolgender Isotopenanalytik am Isotopenverhältnis-Massenspektrometer (IRMS) (MAT 253, Thermo Fisher Scientific) ermittelt. Im Porenwasser wurden die δ 15N-Werte von Ammonium (NH4+) nach Fällung als Ammoniumtetraphenylborat am EA-IRMS erfasst. Für die Bestimmung der Anteile des am Feststoff sorptiv gebundenen NH4+ wurde vor der Isotopenanalytik eine Bariumchlorid-Extraktion nach DIN EN ISO 11260 durchgeführt. Zur Bestimmung der δ 15N- und δ 18O- Werte des im Porenwasser gelösten Nitrats erfolgte eine Probenvorbereitung mittels Denitrifikationsmethode nach Sigman et al. (2001) und die Isotopenanalyse mit Hilfe einer GasBench II-IRMS-Kopplung (Thermo Fisher Scientific).

**2.3 Statistische Auswertung**

Die statistischen Auswertungen erfolgten mit SPSS (Vers. 22). Die Daten wurden auf Varianzhomogenität (Levene-Test) und auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) geprüft. Zur Prüfung signifikanter Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Tukey-Test (Tukey HSD, p<0.05, post hoc Test) durchgeführt. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die N2O-Emissionen wurden mit Hilfe einer Korrelations- und multiplen Regressionsanalyse ermittelt.

**3 Ergebnisse und Diskussion**

**3.1 Niederschlag, Bodenfeuchte und Nmin-Dynamik**

Im Versuchszeitraum wurden Niederschlagsmengen von 513 mm (2017), 372 mm (2018) und 228 mm (Januar bis Juli 2019) registriert. Im Vergleich zum langjährigen Mittel (1981-2010) waren insbesondere die Hauptvegetationszeiten (April bis Juli) der Jahre 2018 und 2019 sowie der Herbst 2016 ausgesprochen niederschlagsarm. Das anhand der Bodenwassergehalte berechnete wassergesättigte Porenvolumen (WFPS) lag im Bereich von 25 bis 70 %. Die höchste Bodenwassersättigung wurde in den Wintermonaten (v. a. Januar bis März) und die niedrigste in den Sommermonaten (Juni/Juli 2018 und 2019) gemessen. Die für eine relevante N2O-Bildung über die Prozesse der Nitrifikation und Denitrifikation erforderlichen Bodenfeuchtebedingungen (WFPS>50 %) nach Davidson (1991) waren fast ausschließlich nur in den Wintermonaten messbar.

Die höchsten Nmin-Gehalte von 9,2 mg/100 g TM wurden im Oberboden der INJEC-Variante im ersten Versuchsjahr erfasst (Abb. 1).



**Abbildung 1: Nmin-Dynamik im Oberboden (0-30 cm)**

Nach der Düngung war bei allen gedüngten Varianten ein deutlicher Anstieg der Nmin-Gehalte feststellbar. Dabei wurden im ersten Versuchsjahr im Vergleich zu den Folgejahren über einen längeren Zeitraum nach der Düngung noch hohe Nmin-Gehalte ermittelt. In allen Versuchsvarianten zeigte sich ein Anstieg der Nmin-Gehalte nach der Ernte in Verbindung mit der Bodenbearbeitung. Im Versuchsjahr 2018 waren die Nmin-Gehalte aufgrund der durch die Trockenheit bedingten geringen Erträge und N-Entzüge lange auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Erst mit den im Dezember 2018 einsetzenden höheren Niederschlägen (58 mm) war eine Abnahme der Nmin-Gehalte zu beobachten.

**3.2 N2O-Emissionen und Einflussfaktoren**

Die im Versuchszeitraum ermittelten N2O-Emissionen lagen im Bereich von -20 bis 68 µg m-² h-1 (Abb. 2).



**Abbildung 2: N2O-Emissionen im Versuchszeitraum**

N2O-Peaks waren bei allen Versuchsvarianten im Mai 2017 nach einem Niederschlagsereignis (19.05.2017: 28 mm/d) und nach der Ernte des Winterrapses in Verbindung mit der Bodenbearbeitung nachweisbar. Die Düngetermine zeigten mit Ausnahme der Injektionsvariante keinen unmittelbaren Einfluss auf die Höhe der N2O-Emissionen. Bei der INJEC-Variante war in den Versuchsjahren 2018 und 2019 jeweils nach dem ersten Düngetermin ein Anstieg der N2O-Emissionen feststellbar.

Die kumulierten jährlichen N2O-Emissionen waren mit maximal 0,59 kg N/ha auf einem geringen Niveau (Tab. 1). Signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren wurden bei der Kontrolle und oberflächigen Applikation ermittelt. Tendenziell waren bei allen Versuchsvarianten die höchsten N2O-Verluste im ersten Versuchsjahr nachweisbar. In den Versuchsjahren 2018 und 2019 zeigte die Injektion im Vergleich zu den anderen Varianten signifikant höhere Emissionen. Es ist zu vermuten, dass bei der Injektionsvariante aufgrund der hohen Nmin-Konzentrationen in Kombination mit der tieferen Ablage des Düngers die N2O-Bildung begünstigt wird. Ein ähnlicher Effekt wurde bei der Gülle-Depot-Düngung beobachtet (Zurheide et al., 2016). Die Emissionsfaktoren lagen mit maximal 0,2 % deutlich unter dem für landwirtschaftlich genutzte Böden angegebenem Default Emission Factor von 1 % (IPCC, 2007). Vergleichbar geringe N2O-Emissionen einer Schwarzerde nach 15NH4-Applikation bei ähnlichen klimatischen Bedingungen wurden von Russow et al. (2008) ermittelt und durch eine NH4-Fixierung aufgrund der hohen Sorptionskapazität der Böden und eine schnell ablaufende Nitrifikation begründet.

**Tabelle 1: N2O-N-Verluste der Versuchsvarianten, Unterschiede zwischen den Varianten pro Versuchsjahr (Kleinbuchstaben) und zwischen den Versuchsjahren pro Variante (Großbuchstaben), ANOVA, Tukey, p<0.05**

\*von Aussaat bis Aussaat Folgefrucht, 1bis 06/2019

Auf der Grundlage einer durchgeführten multiplen Regressionsanalyse kann abgeleitet werden, dass die Nmin- bzw. NO3--Gehalte im Oberboden, das WFPS und die Bodentemperatur in 1 cm Tiefe einen signifikanten Einfluss auf die N2O-Emissionen zeigten (Tab. 2). Dabei wurde bei der Injektionsvariante die beste Qualität des Regressions-Modells erreicht.

**Tabelle 2: Ergebnisse multiple Regressionsanalyse**

WFPS: water filled pore space, T1cm: Bodentemperatur in 1cm Tiefe

**3.3 Ergebnisse der Laborversuche**

Die Analysen der Stabilisotopenverhältnisse im NO3- des Porenwassers (Bodenprobe) ergaben Werte von +2,9 ‰ für δ 15N und + 4,5 ‰ für δ 18O (Tab. 3).

**Tabelle 3: Ergebnisse der Eingangsanalyse von Boden und Dünger**



Diese Werte liegen genau in einem Überlappungsbereich der beiden Quellen: Düngung und organischer N-Pool (Zhang et al., 2019). Somit kann nicht eindeutig die Herkunft des nach der Ernte im Boden befindlichen NO3- bestimmt werden. Die δ 15N-Werte des Gesamt-N in den Feststoffproben von Dünger und Boden unterschieden sich deutlich. Hieraus kann abgeleitet werden, dass der Dünger-N vollständig umgesetzt wurde. Die begleitenden Analysen zeigten, dass etwa 92 % des Gesamt-N im organischen Pool gebunden vorliegt. Eine in der Literatur diskutierte hohe Fixierung von Dünger-NH4 in den Kationenaustauschern im Boden (Russow et al., 2008) kann somit anhand vorliegender Untersuchungen nicht bestätigt werden. Der Anteil des austauschbar gebundenen NH4+ am Gesamt-N war mit 0,7 % sehr gering. Die ermittelten täglichen Mineralisationsraten von 0,10 (5 °C) und 0,13 (10 °C) mg NO3-N/kg TM sind als hoch einzuschätzen und würden einer Nachlieferung von etwa 67 kg N/ha in der Nacherntezeit bis zum Vegetationsende entsprechen. Vergleichbar hohe Netto-Mineralisationsraten für Schwarzerden von jährlich 75 bis 160 kg N/ha werden in der Literatur angegeben (Amberger, 1996). Die im Labor unter anaeroben Bedingungen nachgewiesenen NO3--Abbauraten von 0,21 mg NO3-N/kg TM (10 C°) zeigen, dass der untersuchte Boden ein hohes Abbaupotential besitzt, wenn die entsprechenden Voraussetzungen (d.  h. eine hohe Bodenfeuchte) gegeben sind.

**Schlussfolgerungen**

In vorliegenden Untersuchungen waren insgesamt sehr geringe N2O-Verluste bei allen Versuchsvarianten nachweisbar. Dabei wurden als Haupteinflussfaktoren auf die N2O-Emissionen die Nmin-Gehalte im Boden, das wassergesättigte Porenvolumen und die Bodentemperatur in 1 cm Tiefe identifiziert. Die Feldmessungen als auch die begleitenden Laborversuche zeigten, dass der untersuchte Boden ein hohes N-Nachlieferungspotential besitzt und Mineralisationsprozesse in Verbindung mit der Bodenbearbeitung zu höheren N2O-Emissionen führen können. Fortsetzende Untersuchungen zum Einfluss der N-Nachlieferung aus dem organischen N-Pool auf die N2O-N-Verluste sind geplant.

**Literatur**

Amberger, A., 1996: Pflanzenernährung. 4. Aufl., UTB Verlag Stuttgart, S. 158.

Davidson, E.A., 1991: Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. In: Rogers, J.E., Whitman, W.B. (eds.): Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides and Halomethanes. Washington (DC), American Society for Microbiology.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Climate Change. In: Synthesisreport of the fourth assessment report of IPCC, p. 49 (Chapter 3).

LfULG (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie), 2004: Materialienband zur Altlastenbehandlung. Musterleistungsbeschreibung/ Musterleistungsverzeichnis: Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose im Rahmen der Detailerkundung.

Russow, R., Spott, O., Stange, C.F., 2008: Evaluation of nitrate and ammonium as sources of NO and N2O emissions from black earth soils (Haplic Chernozem) based on 15N field experiments. Soil Biol. Biochem. 40, 380-391.

Sigman, D. M., Casciotti, K. L., Andreani, M., Barford, C., Galanter, M., Böhlke, J., 2001: A Bacterial Method for the Nitrogen Isotopic Analysis of Nitrate in Seawater and Freshwater. Anal. Chem. 73 (17), 4145–4153. DOI: 10.1021/ac010088e.

Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) (Hrsg.), 2002: Methode A 6.1.4.1, Bestimmung von mineralischem Stickstoff (Nitrat u. Ammonium) in Bodenprofilen (Nmin-Labormethode). In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch), Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

Zhang, Y., Shi, P., Song, J., Li, Q., 2019: Application of Nitrogen and Oxygen Isotopes for Source and Fate Identification of Nitrate Pollution in Surface Water: A Review. Appl. Sci. 9, 18.

Zurheide, T., Pralle, H., Westerschulte M., Federolf C.-P., Vergara M.-E., Trautz D., Olfs H.-W., 2016: Untersuchung von Lachgasemissionen bei Gülledepot-Applikation mit Zugabe von Nitrifikationshemmstoffen am Standort Osnabrück. VDLUFA-Schriftenreihe 72, 88-96.