

Bewertung der N-Effizienz des Gülle-Strip-Till-Verfahrens - Kombinierte Lysimeter- und Feldversuche als Grundlage zur Modellierung der Stickstoffkinetik in der ungesättigten Zone

Denise Bednorz^{1*}, Nadine Tauchnitz², Joachim Bischoff², Matthias Schrödter², Barbara Koblenz¹, Jan Rücknagel¹, Holger Rupp³, Frank Wiese⁴, Olaf Christen¹ und Ralph Meissner³

Zusammenfassung

Die Reduzierung von Stickstoff (N)-Austrägen aus landwirtschaftlichen Nutzflächen über Dränagen stellt eine wesentliche Maßnahme zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie dar. Deshalb soll im Rahmen eines von der DBU geförderten Forschungsvorhabens der Einfluss von unterschiedlichen Gülleapplikationsverfahren auf den unterirdischen Stoffaustrag untersucht werden. Im Mittelpunkt steht dabei die Untersuchung des Gülle-Strip-Till-Verfahrens im Vergleich zur konventionellen Gülleausbringung. Neben einem Praxisversuch auf einem Dränmessfeld wurden ergänzend Lysimeterversuche bezüglich des N-Auswaschungsverhaltens angelegt. Aufgrund verschiedener Vorbewirtschaftungen der Versuchsschläge und Lysimeter sowie unterschiedlichen geologischen Verhältnissen auf dem Untersuchungsgebiet waren zusätzliche Modellierungen zum Bodenwasser- und Stoffhaushalt in der ungesättigten Zone erforderlich. Bisherige Ergebnisse zeigen, dass die zu verzeichnenden Unterschiede bezüglich der abgeführten N-Frachten zwischen den Varianten nur zu geringen Teilen durch die aktuelle Bewirtschaftung resultieren und sich somit vorrangig aus den Vorbewirtschaftungen und der geologischen Situation ergeben.

Schlagwörter: Dränung, Lysimeter, Wasser- und Stoffmodellierung, Stickstoffkinetik

Summary

The reduction of nitrogen (N) -losses through drainages is an essential measure of the EU Water Framework Directive. Thus, within the scope of a research project, funded by the DBU, the influence of different manure application methods on the subsurface N-discharge has to be examined. The main focus of our investigations is the comparative evaluation of the manure-strip-till-practice and conventional tillage methods. So field trials as well as lysimeter studies for quantifying N-leaching in the subsurface got implemented. Because of different previous cultivations and the local geological situation in the investigation area, calculations related to the coupled water flow and solute transport in the unsaturated zone were performed. Preliminary results show, that differences in discharged N-loads mainly result from the different previous cultivation. They got only slightly influenced by the actual tillage practice.

Keywords: drainage, lysimeter, water- and solute transport - modelling, nitrogen dynamics

Einleitung

Die Reduktion der Einträge reaktiver Stickstoff (N) - Verbindungen in die ober- und unterirdischen Wasserkörper ist eine wesentliche Aufgabe im Rahmen der europäischen Gewässerschutzpolitik (EG-WRRL 2000/60/EG, 2006/118/EG). Da die auf landwirtschaftlichen Nutzflächen durchgeführten Bewirtschaftungsmaßnahmen eine Hauptquelle diffuser N-Einträge in Gewässer darstellen, ist es dringend erforderlich, die Effektivität der N-Ausnutzung zu verbessern und damit deren Verluste in die Umwelt zu reduzieren. Das Gülle-Strip-Till-Verfahren, welches die reduzierte Bodenbearbeitung mit der gezielten Applikation organischen

Düngers in die Wurzelzone kombiniert, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens hinsichtlich seines Potentials für eine erhöhte N-Effizienz untersucht. Dahingehend wurden in einem Praxisversuch in der nördlichen Altmark für zwei differenzierte Bewirtschaftungssysteme mit Maisfruchtfolge sowohl das Strip-Till-Verfahren (Schlag I) als auch die konventionelle Bodenbearbeitung (Schlag II) als Varianten realisiert. Die dort vorhandene Messtechnik ermöglicht auf beiden Praxis schlägen eine differenzierte quantitative und qualitative Erfassung der abgeführten Dränwässer. Analog zu dem Feldversuch erfolgte die Anlage von Lysimeterexperimenten an der Versuchsstation des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung- UFZ in Falkenberg. Die anfallenden

¹ Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Professur Allgemeiner Pflanzenbau / Ökol. Landbau, Betty-Heimann-Straße 5, D-06120 HALLE

² Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau, Strenzfelder Allee 22, D-06406 BERNBURG

³ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Bodenphysik, Falkenberg 55, D-39615 ALTMÄRKISCHE WISCHE

⁴ Agrargenossenschaft „Altmärkische Höhe Lückstedt e.G.“, Gageler Str. 2, D-39606 LÜCKSTEDT

* Ansprechpartner: MSc Denise Bednorz, denise.bednorz@landw.uni-halle.de



Sickerwässer werden auch hier kontinuierlich registriert und chemisch analysiert.

Sowohl Praxisschläge als auch Lysimeter wurden vor Versuchsanlage unterschiedlich bewirtschaftet. Daraus resultierend ist eine objektive und vergleichende Bewertung aktueller Bearbeitungsverfahren deutlich limitiert. Des Weiteren ergaben Auswertungen bestehender Meliorationsunterlagen und geologischer Karten, dass die bodenhydraulischen Eigenschaften der Praxisschläge aufgrund der vorhandenen geologischen Situation zu differenzieren sind.

Daraus resultierend war es für eine weiterführende Interpretation der Versuchsergebnisse erforderlich, numerische Simulationen zum Bodenwasserhaushalt und zur Stickstoffkinetik durchzuführen. Diese Modellierungen wurden mit der Software HYDRUS 2D/3D umgesetzt. Durch den Vergleich der modellierten Ergebnisse zu den real gemessenen Sickerwasser-/ Dränabflussmengen sowie den darin enthaltenen Stickstoffkonzentrationen ist eine objektive Bewertung der Verfahren möglich.

Material und Methoden

Standorte

Die Lysimeterstation des UFZ befindet sich in der Altmärkischen Wische (RW:4487464, HW:5858543), etwa 20 km östlich der Praxisschläge in Lückstedt (Landkreis Stendal).

Die für die Lysimeterexperimente verwendeten, nichtwägbar Gravitationslysimeter besitzen eine Grundfläche von 1 m² und sind 1,25 m tief. Detaillierte Angaben zum Aufbau der Lysimeter finden sich bei MEISSNER et al. (2010) sowie ergänzend in *Tabelle 1*.

Der Versuchsstandort Lückstedt setzt sich aus zwei, von der Agrargenossenschaft „Altmärkische Höhe e.G.“ bewirtschafteten Schlägen (52 ha und 85 ha) zusammen.

Detaillierte eigene bodenkundliche Untersuchungen und eine Auswertung von vorhandenen Meliorationsunterlagen aus dem Jahr 1975 ergaben einen vergleichbaren Aufbau der Schläge zu den Lysimetern bis in einen Meter Tiefe (vgl. *Tabelle 1*).

Aufgrund der relativ geringen Durchlässigkeiten der Böden wurde im Jahr 1975 eine systematische Dränung mit einer Entwässerungstiefe von 80 cm unter Flur und einem Abstand der Sauger von je 10 m zueinander durchgeführt. Durch die vorhandene Messtechnik im Gebiet werden separat für beide

Versuchsflächen die abgeführten Dränwässer kontinuierlich erfasst und analysiert (TAUCHNITZ et al. 2014). Der erfasste dränierte Bereich des Schlages I besitzt mit 23,8 ha eine vergleichbare Größe zum Schlag II mit 26 ha.

Die bodenhydraulischen Eigenschaften der Schläge sind aufgrund der quartärgeologischen Situation im Gebiet mit zunehmender Tiefe zu differenzieren. So werden zwar beide Schläge von einer saalezeitlichen Grundmoräne unterlagert, jedoch nimmt deren Mächtigkeit im Übergang zu Schlag I ab. Dadurch treten in diesem Areal ab etwa einem Meter Tiefe glazifluviatil abgelagerte Sande und Kiese mit erhöhten Durchlässigkeiten auf. Diese bestimmen wesentlich die bodenhydraulischen Eigenschaften des Schlages I.

Versuchsanlage

Im Februar 2014 wurden an zwei repräsentativen Bereichen der Praxisschläge bodenhydrologische Messplätze und Grundwassermessstellen errichtet. Bodenfeuchtesonden und Saugkerzen wurden in 35, 65 und 80 cm Tiefe eingebaut, um eine tiefenspezifische Registrierung des volumetrischen Bodenwassergehalts sowie die Entnahme von Proben aus der Bodenlösung zu ermöglichen.

Die Gülleausbringung erfolgte zeitgleich auf beiden Versuchsschlägen und den Lysimetern vom 12. bis 14. März 2014. Innerhalb des auf Schlag I umgesetzten Gülle-Strip-Till-Verfahrens (30 m³ Gülle, 2,7 kg N/t OS und 3 Liter des Nitrifikationsinhibitors Piadin / ha) wurde die Gülle 25 cm unter Flur in Reihe appliziert. Auf Schlag II wurde eine konventionelle ganzflächige Gülleausbringung (30 m³ Gülle/ ha) und sofortige flache Einarbeitung (6-8 cm tief) mittels Scheibenegge realisiert.

Die Lysimeterversuche mit den Varianten Gülle-Strip-Till ohne Piadin, Gülle-Strip-Till mit Piadin und konventionelle Bearbeitung (bei allen Varianten Güllemenge und entsprechende N_t-Gehalte analog zum Praxisversuch) wurden mit je einer echten Wiederholung angelegt.

Die Maisaussaat erfolgte am 30.04.2014 mit einer Aussaatstärke von 8 Pflanzen/m².

Numerische Simulationen

Zur numerischen Simulation von Bodenwasserhaushalt und Stickstoffkinetik wurde das Softwarepaket HYDRUS 2D/3D (SIMUNEK et al. 2012) verwendet.

Tabelle 1: Bodenkennwerte der Lysimeter und Praxisschläge.

	Bodentiefe in m	ρ_{trocken} in g/cm ³	n in %	Ks in m/d	Bodenart
Lysimeter	0-0.3	1,48	31,90	0,75	SI4
	0.31-1	1,84	32,00	0,19	SI2
	1.01-1.25 (Dränschicht)	-	-	-	-
Schlag I	0-0.3	1,42	45,27	0,79	Slu
	0.31-1	1,68	35,26	0,19	Su3
	1.01-1.25	1,73	33,34	0,16	SI3
Schlag II	0-0.3	1,60	38,48	0,31	Su4
	0.31-1	1,63	37,14	0,18	SI3
	1.01-1.25	1,76	32,49	0,06	SI4

Dabei wird zur Kalkulation der räumlichen Verteilung von Bodenfeuchte und Volumenfluss die modifizierte Richards-Gleichung numerisch gelöst.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(K \nabla h) - S_w, \text{ mit} \quad \text{Gl.1}$$

θ : Bodenfeuchte (-), h : hydraulisches Potential (m), t : Zeit (d), S_w : Wurzelwasseraufnahme (d⁻¹), K : ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit (m/d), ∇ - Nabla-Operator (räumlicher Gradient).

Die Wurzelwasseraufnahme kann mittels Feddes – Ansatz (FEDDES et al. 1978) als potenzialabhängiger Senkenterm bestimmt werden. Bodenhydraulische Kennwerte resultierten aus der Parametrisierung nach van Genuchten (1980). Die mathematische Beschreibung der Stickstoffkinetik implementiert die Simulation der N-Umsatzprozesse Mineralisierung, Nitrifikation sowie Denitrifikation nach NAKAMURA et al. (2007):

$$\frac{\partial \theta \cdot c_{Norg}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \cdot s_{Norg}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\theta \cdot D_{Norg} \cdot \frac{\partial c_{Norg}}{\partial z}) - \frac{\partial qc_{Norg}}{\partial z} - K_{min} \cdot \theta \cdot c_{Norg} - K_{min} \cdot \rho \cdot s_{Norg} \quad \text{Gl.2}$$

$$\frac{\partial \theta \cdot c_{NH4-N}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \cdot s_{NH4-N}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\theta \cdot D_{NH4-N} \cdot \frac{\partial c_{NH4-N}}{\partial z}) - \frac{\partial qc_{NH4-N}}{\partial z} + K_{min} \cdot \theta \cdot c_{Norg} + K_{min} \cdot \rho \cdot s_{Norg} - K_{nit} \cdot \theta \cdot c_{NH4-N} - K_{nit} \cdot \rho \cdot s_{NH4-N} \quad \text{Gl.3}$$

$$\frac{\partial \theta \cdot c_{NO3-N}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\theta \cdot D_{NO3-N} \cdot \frac{\partial c_{NO3-N}}{\partial z}) - \frac{\partial qc_{NO3-N}}{\partial z} + K_{nit} \cdot \theta \cdot c_{NH4-N} + K_{nit} \cdot \rho \cdot s_{NH4-N} - K_{den} \cdot \theta \cdot c_{NO3-N} \quad \text{Gl.4}$$

mit $c_{Norg, NH4-N, NO3-N}$: Konzentration in Lösung von N_{org}, NH₄-N und NO₃-N, $s_{Norg, NH4-N}$: adsorbierte Konzentration von N_{org} und NH₄-N, ρ : Dichte des Bodens (kg/m³); D : Dispersionskoeffizient (m), $K_{min, nit, den}$: Zerfallskonstante für Mineralisierung, Nitrifikation und Denitrifikation (day⁻¹) und q : volumetrische Flusssdichte (m/d).

Während Nitrat nur in Lösung vorliegt, ergibt sich für Ammonium und vor allem für organischen Stickstoff eine Adsorption an Bodenpartikeln. Dies lässt sich durch lineare Adsorptionsisothermen beschreiben:

$$s_{Norg} = k_{Norg} \cdot c_{Norg}, s_{NH4-N} = k_{NH4-N} \cdot c_{NH4-N} \quad \text{Gl.5}$$

Die Aufnahme von N durch Pflanzenwurzeln (Nu) wurde gemäß PLENET und LEMAIRE (2000) in Abhängigkeit vom Blattflächenindex (LAI) bestimmt.

$$Nu = 28.9 \cdot LAI \quad \text{Gl.6}$$

Modellaufbau

Die Lysimeter wurden zweidimensional mit einer Tiefe von 1,25 m und einer Breite von 1 m durch Finite Elemente beschrieben. Zur Definition des Modellraumes der

Praxisschläge wurden sowohl zweidimensionale Profilschnittkonstruktionen als auch 3D-Modelle konzipiert. Die mathematische Beschreibung der Dränagen als sog. „Openings“ ist jedoch nur innerhalb der 2D-Modellierung möglich. Zur zeitlichen Diskretisierung des Modellierungsprozesses wurden tägliche Werte verwendet.

Anfangs- und Randbedingungen

Die Implementierung des hydraulischen Potentials zu Beginn der Modellierungsperiode erfolgte unter Einbeziehung einer initialen Sättigung am unteren Lysimeterrand bzw. ab Entwässerungstiefe der Dränagen. Initiale Konzentrationen zur Beschreibung der N-Kinetik ergaben sich aus den Messergebnissen der gelösten N-Konzentrationen in Sickerwasser und Dränabfluss.

Die Definition des oberen Randes aller Modelle erfolgte durch eine atmosphärische Randbedingung. Aus den Daten der Wetterstation Falkenberg wurde deshalb die potentielle Evapotranspiration ETp nach FAO-Grasreferenzverdunstung (ALLEN et al. 1998) berechnet. Unter Einbeziehung von Blattflächenindex (LAI) und bestandspezifischem Extinktionskoeffizient $a = 0,463$ nach MEURER et al. (2013) erfolgte die Aufteilung der ETp in potentielle Evaporation (Ep) und potentielle Transpiration (Tp) nach RITCHI (1972):

$$Ep = ETp \cdot \exp(-a \cdot LAI) \quad Tp = ETp - EP \quad \text{Gl.7}$$

Der untere Rand der Lysimeter wurde ebenso wie die Dränagen (Sauger) der Versuchsschläge durch ein „Seepage face“ beschrieben. Aufgrund der geologischen Situation im Bearbeitungsgebiet ergibt sich des Weiteren für Schlag I ein rein gravitativer Fluss, während Schlag II am unteren Rand durch eine „No-Flow“-Randbedingung charakterisiert wird. Die „Concentration flux“-Randbedingung beschreibt unter Einbeziehung von Niederschlag und anfallender Sickerwasser-/ Dränabflussmenge die N-Kinetik in den verschiedenen Modellen.

Ergebnisse und Diskussion

Die durchgeführten Modellierungen zum Bodenwasserhaushalt und zur Stickstoffkinetik für Lysimeter und Praxisschläge umfassen einen Zeitraum vom 01.01.2014-30.09.2014. Die in *Abbildung 1* dargestellte ETp nach ALLEN et al. (1998) sowie der an der Wetterstation Falkenberg registrierte Niederschlag (P) charakterisieren die oberen Modellränder. Ep und Tp (vgl. *Abbildung 1*) ergaben sich nach Gleichung 7 aus den regelmäßig erhobenen Daten zum Bodenbedeckungsgrad und zur Pflanzenhöhe. Die Entwicklung der Pflanzenwurzeln wurde an vier verschiedenen Terminen ermittelt, wobei sich eine maximale Durchwurzelungstiefe von 0.7 m zu Beginn der Blüte (16.07.2014) ergab.

Aus den beschriebenen Daten konnten unter zusätzlicher Einbeziehung der Düngapplikation am Tag 71 der Modellierungen (12.03.2014) die in *Tabelle 2* real ermittelten Sickerwassermengen und NO₃-N-Frachten der Lysimeter rechnerisch nachvollzogen werden (*Abbildung 2*).

Im Mittel entsprechen die innerhalb der Vegetationsperiode anfallenden Sickerwassermengen der Varianten Strip-Till mit und ohne Piadin denen der konventionellen Bewirt-

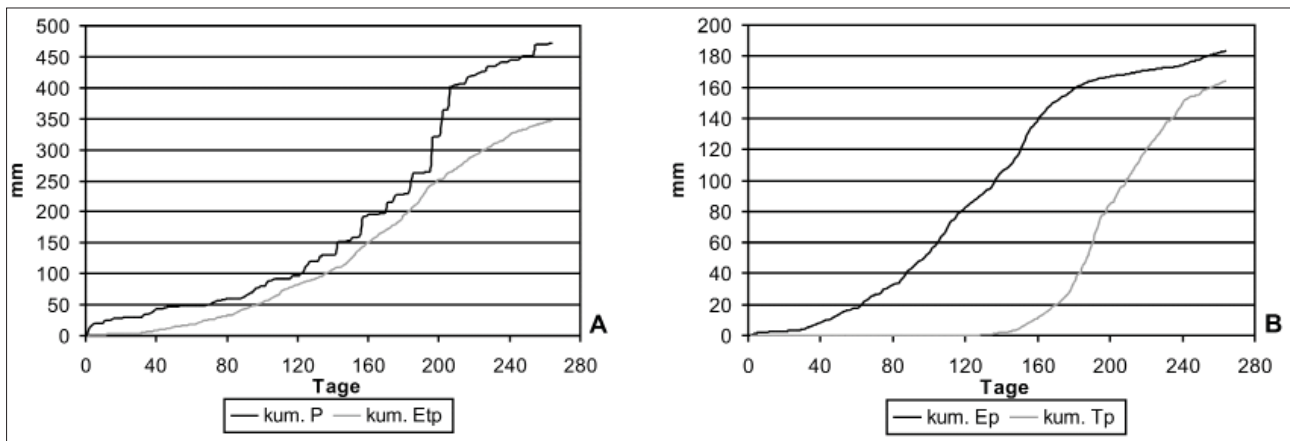


Abbildung 1: Definition des oberen Modellrandes; A: Kumulierter Niederschlag (P) sowie kumulierte potentielle Evapotranspiration (ETp); B: potentielle Evaporation (Ep) und Transpiration (Tp).

Tabelle 2: Monatliche Abflussmengen und $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten der Lysimeterexperimente.

2014	Strip-Till		Strip-Till mit Piadin		konventionell	
	mm	kgN/ha	mm	kgN/ha	mm	kgN/ha
Januar	33,0	15,8	26,3	14,4	23,9	12,7
Februar	15,0	6,4	10,9	5,7	12,0	7,9
März	7,0	2,5	4,2	1,8	5,2	2,8
April	3,5	1,1	3,0	1,1	3,2	1,7
Mai	1,7	0,6	1,5	0,5	2,1	1,1
Juni	11,6	2,9	11,8	3,2	9,1	3,5
Juli	4,5	0,7	0,6	0,1	4,1	1,0
August	1,4	0,1	-	-	-	-
September	-	-	-	-	-	-
Kum.*	19,3	4,3	13,9	3,8	15,2	5,6

* kumulierte Daten für den Vegetationszeitraum Mai bis September

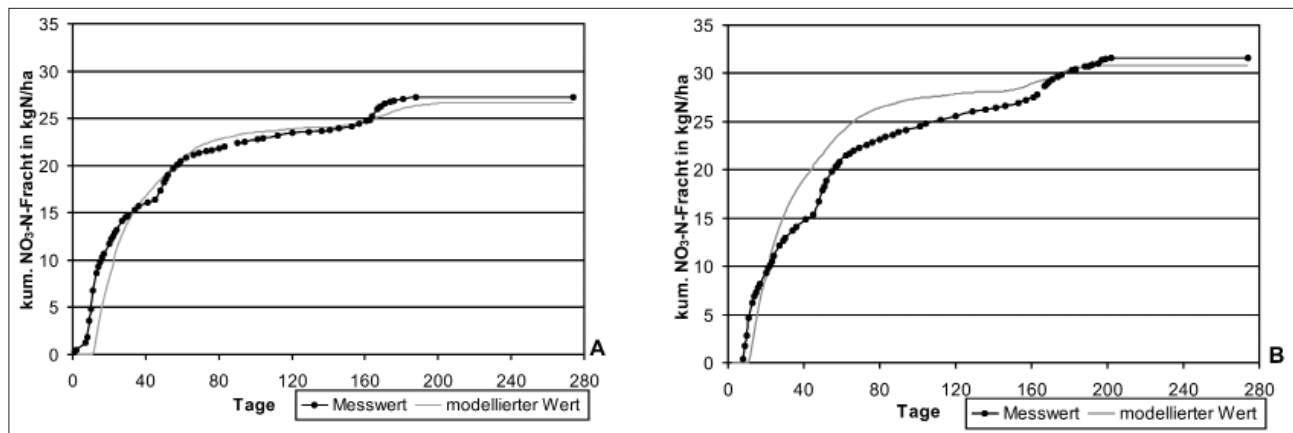


Abbildung 2: Kumulierte modellierte und reale tägliche $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten für die Untersuchungsperiode 01.01.2014 – 30.09.2014; A: Variante Strip-Till mit Piadin; B: konventionelle Bearbeitung.

schaftungsform. Gleichzeitig betragen die innerhalb der Strip-Till-Varianten ausgetragenen $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten nur 70% der durch konventionelle Bewirtschaftung ermittelten Austräge. Dies kann auf eine optimierte Nährstoffaufnahme der Pflanzenwurzeln mit einhergehender Reduzierung von N-Verlusten durch Anwendung des Strip-Till-Verfahrens hinweisen.

Zur objektiven Bewertung der Ergebnisse werden die durchgeführten Probenahmen und Analysen der Sicker-

wässer fortgesetzt. Gerade in den Wintermonaten ist durch die fehlende Vegetation mit erhöhten Sickerwassermengen und einer damit einhergehenden Nitratverlagerung in den Lysimetern zu rechnen.

Abbildung 2 zeigt vergleichend die real erfassten und modellierten, kumulierten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten der Lysimetervariante Strip-Till mit Piadin und der konventionellen Bearbeitung. Die Anfangskonzentrationen in beiden Modellen wurden gleichgesetzt. Durch Erhöhung von K_{\min} und K_{nit} (vgl. Gl. 2

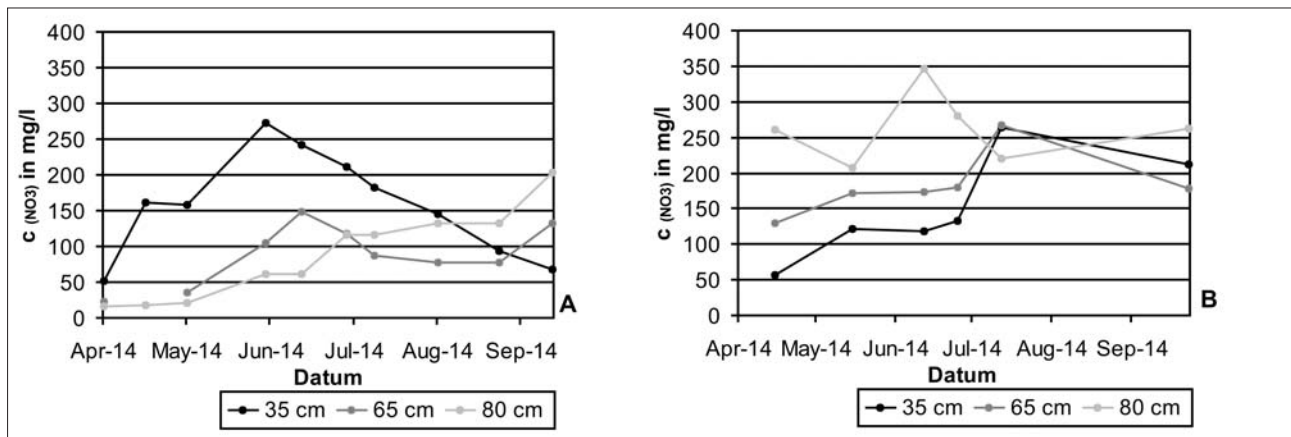


Abbildung 3: Tiefenspezifische Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung; A: bodenhydrologischer Messplatz Schlag I; B: bodenhydrologischer Messplatz Schlag II.

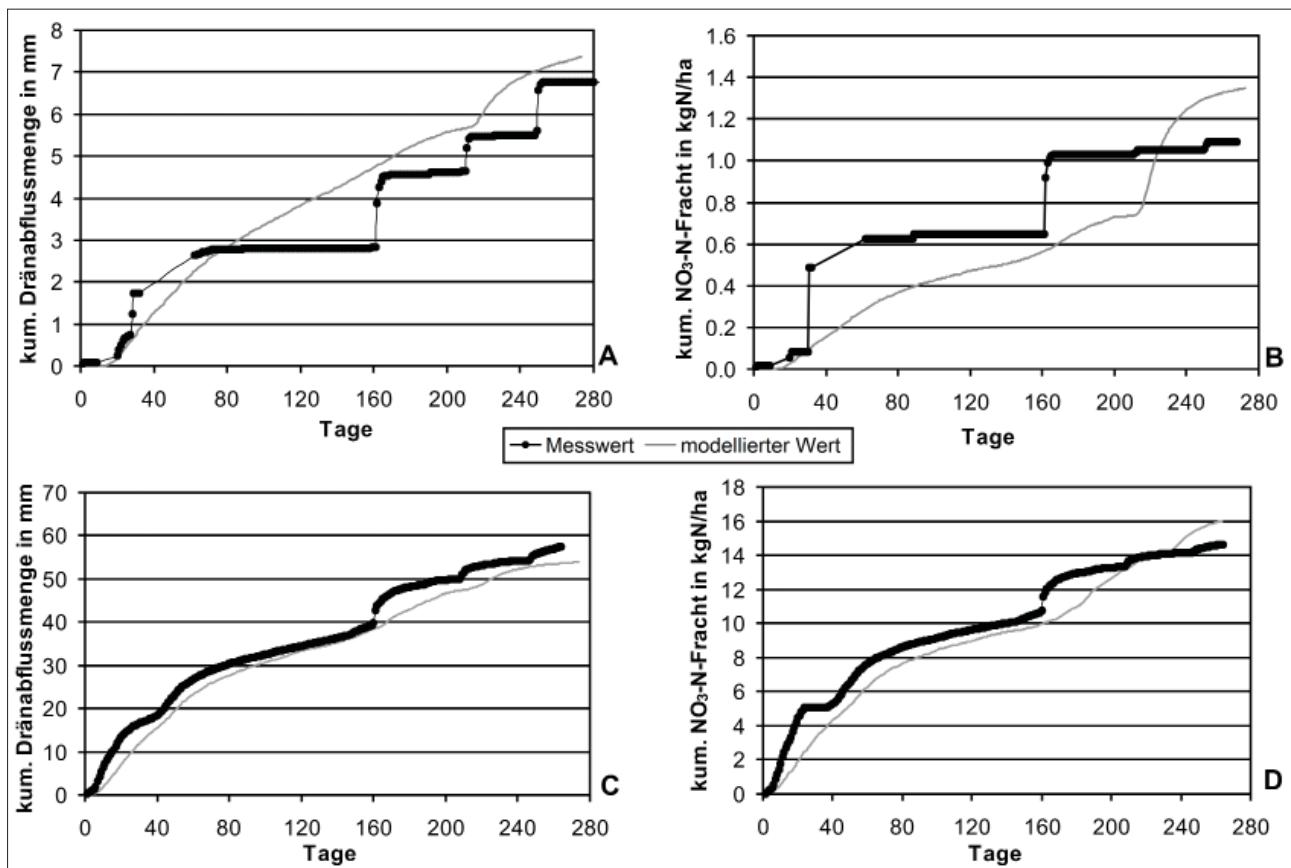


Abbildung 4: A- kumulierte Dränabflussmengen Schlag I; B- kumulierte N-Frachten Schlag I; C- kumulierte Dränabflussmengen Schlag II; D- kumulierte N-Frachten Schlag II - für 01.01.2014-30.09.2014.

& Gl. 3) innerhalb der konventionellen Variante gegenüber Strip-Till mit Piadin konnten die real erfassten Daten mit hoher Genauigkeit rechnerisch nachvollzogen werden.

Im Gegensatz zu den Lysimetern ergab sich innerhalb des Praxisversuches eine Nitratverlagerung infolge von Starkregenereignissen. Die in *Abbildung 3* dargestellten NO_3 -Konzentrationsverläufe der bodenhydrologischen Messplätze zeigen dahingehend einen sprunghaften Anstieg ab Mitte Juni. Gleichermäßen wird deutlich, dass beide Praxisschläge unterschiedliche NO_3 -Konzentrationen in

den jeweiligen Tiefen aufweisen. Dies resultiert neben der Vorbewirtschaftung vor allem aus der bereits beschriebenen geologischen Situation, welche auch die Menge der abgeführten Dränwässer und somit die ausgetragenen NO_3 -N-Frachten beeinflusst.

Die erfassten dränierten Flächen beider Versuchsschläge besitzen eine vergleichbare Größe. Die in *Abbildung 4* kumulierten Dränabflussmengen und NO_3 -N-Frachten zeigen jedoch, dass der Dränabfluss und damit auch die ausgetragene NO_3 -N-Fracht des Schlages II mehr als das

10-fache des Schlags I beträgt. Durch die vorhandene Grundmoräne unter Schlag II kommt es zu einem Anstau von Schichtenwasser und somit zu erhöhten Dränabflussmengen gegenüber Schlag I. Gleichermaßen resultieren dadurch auch erhöhte Nitratkonzentrationen im abgeführten Dränwasser sowie in der Bodenlösung (*Abbildung 3*), da diese auf Schlag II im Gegensatz zu Schlag I aus angestautem Schichtenwasser resultieren.

Die Implementierung der beschriebenen unteren Randbedingungen (Schlag I - gravitativer Fluss; Schlag II - No Flow) ermöglichte die mathematische Beschreibung der real erfassten Austräge mit hoher Genauigkeit (*Abbildung 4*).

Dabei zeigt der Bodenwasserhaushalt des Schlags II aufgrund der sehr geringen Durchlässigkeit des Untergrundes eine gute Übereinstimmung zu den Lysimeterexperimenten und kann im Wesentlichen durch diese beschrieben werden.

Der Einfluss der aktuellen Bewirtschaftungsvarianten auf die ausgetragenen NO_3 -N-Frachten konnte innerhalb der Modellierungen nicht nachgewiesen werden. Unter Einbeziehung unterschiedlicher initialer N-Konzentrationen konnten die real ermittelten N-Frachten nachvollzogen werden (*Abbildung 4*).

Fazit

Die vergleichende Bewertung des Strip-Till-Verfahrens zur konventionellen Bewirtschaftung kann innerhalb des Forschungsprojektes nur durch eine zusätzliche Modellierung von Wasser- und Stoffhaushalt umgesetzt werden. Neben der Vorbewirtschaftung beeinflusst vor allem die geologische Situation im Untersuchungsgebiet sowohl Wasser- als auch Stoffdynamik.

Somit sind die bis dato auftretenden Unterschiede bezüglich der NO_3 -N-Frachten zwischen den Varianten nicht allein auf eine höhere N-Ausnutzungseffizienz des Gülle-Strip-Till-Verfahrens zurückzuführen. Im Rahmen weiterführender Untersuchungen auf den Lysimetern und Praxisschlägen mit analoger Bodenbearbeitung und Fruchtfolge soll daher die Langzeitwirkung des Gülle-Strip-Till-Verfahrens auf die NO_3 -Austräge über Dränagen geprüft werden.

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Forschungsprojekt (Förderkennzeichen 31086) wurde mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

Literatur

- ALLEN, G., L.S. PEREIRA, D. RAES and M. SMITH, 1998: Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
- FEDDES, R.A., P.J. KOWALIK and H. ZARANDNY, 1978: Simulation of field water use and crop yield. John Wiley & Sons, New York, NY.
- MEISSNER, R., H. RUPP, J. SEEGER, G. OLLESCH and G.W. GEE, 2010: A comparison of water flux measurements: passive wick-samplers versus drainage lysimeters. *European Journal of Soil Science* 61, 609-621.
- MEURER, K., V. PRASUHN, S.C. IDEN und W. DURNER, 2013: Inverse Modellierung des Wassertransports in Großlysimetern der Forschungsstation Zürich-Reckenholz. *Gumpensteiner Lysimetertagung 2013*, 79-84.
- NAKAMURA, K., T. HARTE, M.C. MATHEWS, R.D. MEYER and D. GANDOIS, 2007: Fate of Liquid Dairy Manure Nitrogen in an Irrigated Double Crop Corn-Grain Rotation, California-Appendix H.-In: CHANG, A., HARTE, T., LETEY, J., MEYER, D., MEYER, R. D., MATHEWS, M. C., MITLOEHNER, F., PETTYGROVE, S., ROBINSON, P. & ZHANG, R. (Eds): *Groundwater Quality Protection: Managing Dairy Manure in the Central Valley of California*, University of California.
- PLENET, D. and G. LEMAIRE, 2000: Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops, Determination of critical N concentration. *Plant and Soil* 216, 65-82.
- SIMUNEK, J., M.Th. van GENUCHTEN and M. SEJNAS, 2012: The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical Manual 2.0, pp. 230.
- RITCHI, J.T., 1972: Model for predicting evaporation from a row with incomplete cover. *Water Resource Research* 8(5), 1204-1213.
- TAUCHNITZ, N., J. BISCHOFF, M. SCHRÖDTER und F. WIESE, 2014: Den Nährstoffaustrag regulieren. *Bauernzeitung* 55, 25-27.
- Van GENUCHTEN, M.Th., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America* 44, 892-898.
- Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG).
- Richtlinie zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung - Grundwassertochterrichtlinie (Richtlinie 2006/118/EG).
- GK 25: Geologische Karte 1: 25000-Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.
- VBK 50: Vorläufige Bodenkarte 1: 50000-Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.