

Eignen sich einfach zu erstellende Lysimeter zur Messung des Stoffaustrages aus flachgründigen Böden?

K.-W. BECKER und M. SCHWIEDE

Problemstellung

Nitrat im Trinkwasser zwingt die Versorgungsunternehmen aufgrund strenger gesetzlicher Vorgaben nicht selten zu vielschichtigen und teuren Sanierungsmaßnahmen. Als Ursache für erhöhte Gehalte im Grundwasser sieht man heute neben gelegentlichen Punktquellen vor allem diffuse Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen (OBERMANN, 1981). Nicht von den Pflanzen aufgenommene Düngeranteile können als Nitrat mit dem Sickerwasser aus der Wurzelzone verlagert werden, ein Übertritt in das Grundwasser ist dann nur noch eine Frage der Zeit. Auf die Problematik eines denkbaren, aber nur unzureichend erforschten denitrifikativen Abbaus in der Dränzone, der zudem auf das Vorhandensein einer mikrobiell verwertbaren Energiequelle angewiesen ist, soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

Das Quantifizieren des Nitrats, das aus dem Wurzelraum landwirtschaftlich genutzter Pflanzen ausgewaschen wird, stellt für flachgründige Böden ein bisher ungelöstes Problem dar. Wegen des raschen Übergangs des Sickerwassers in das Grundwasser ist eine Erfassung unterhalb der Wurzelzone und die zeitliche Zuordnung zu Bewirtschaftungsmaßnahmen (DRECHSLER, 1992) nicht möglich. Deshalb haben wir die Eignung von Lysimetern zur Beantwortung dieser Fragestellung geprüft. Wir nehmen vereinfachend an, dass in vielen Fällen nur der Austrag aus der Ackerkrume während der vegetationsschwachen Winterperiode gemessen werden muss und dass das Bodenmaterial zumindest im gepflügten Ackerbau ohne gravierende Fehler in die Lysimeter eingefüllt werden kann. Wir haben Wert auf einfache Bautypen gelegt, die mit vertretbarem Aufwand auf einer größeren Zahl von Flächen eingesetzt werden können.

Methodik

1. Böden:

Geprüft werden **Auenböden** mit ca. 40 cm mächtiger Lehmedecke über Schottern, **Rendzinen** mit ca. 25 cm mächtigem A-Horizont über zersetztem Kalkstein, **Braunerden** mit 30 cm mächtiger steinfreier Ackerkrume aus verwittertem Buntsandstein über einer ca. 10 cm mächtigen Verwitterungsschicht, die dem klüftigen Buntsandstein aufliegt sowie **Pelosole** mit 25 cm mächtiger Ackerkrume über zersetztem, periglazial homogenisierten Tonstein.

2. Lysimeter:

Unterfang-Lysimeter: Von einem Graben aus wurde in 30 bis 40 cm Tiefe eine 33 cm x 100 cm große Messfläche unterhöhlt. Unter diese Fläche wurde eine Platte geschoben, die mit einem 3 cm hohen Steg umrandet war. Der Kontakt zwischen Platte und Messfläche wurde über eine Kiesschicht mit aufliegendem Feinsand hergestellt. Von der tiefsten Stelle der Platte führte ein Schlauch in einen Sammelbehälter.

Anionen-Austauscher: Nach Abräumen der Ackerkrume wurde auf einer 1 m² großen Fläche zwischen zwei Fleece-Schichten 45 kg Feinsand verteilt, dem 850 g mit Chlorid belegter Anionenaustauscher (Merck, Amberlite IRA-402) beigemischt waren. Darüber wurde die ursprüngliche Ackerkrume gefüllt.

Platten-Lysimeter: Nach Entfernen der Ackerkrume wurde das entnommene Bodenmaterial an derselben Stelle auf eine Platte mit Auffangvorrichtung für das ablaufende Sickerwasser gefüllt, wie sie für das Unterfang-Lysimeter beschrieben wurde.

Wannen-Lysimeter: Zwei Kunststoffwannen mit den Maßen 72,5 cm x 41,5 cm und leicht nach unten verjüngten Außenwänden von 31 cm Höhe wurden so ineinander gestellt, dass Abstandhalter ei-

nen 10 cm tiefen Raum zum Sammeln von Sickerwasser in der äußeren Wanne sicherten. Der siebartig durchlöcherete Boden der inneren Wanne wurde mit Fleece abgedeckt. Eine wasserdichte Folie wurde um die Wannen geschlagen und deren Ränder ca. 10 cm in die innere Wanne gelegt. Durch diese Anordnung konnte nur solches Wasser in die untere Auffangwanne gelangen, das das in die innere Wanne eingefüllte Ackerkrumenmaterial passiert hatte. Nach ebenerdigem Eingraben ragte lediglich ein Entnahmerohr für Sickerwasser, das durch den eingefüllten Boden in die untere Wanne führte, über die Oberfläche hinaus.

3. Versuchsanlage:

Die verschiedenen Lysimeter-Typen wurden im Herbst 1997, 1998 und 1999 zum Zeitpunkt der Getreideaussaat in 2 oder 4 facher Wiederholung eingebaut und jeweils während des folgenden Winters beprobt. Parallel wurde jeweils zu Beginn und Ende der Messperioden Nitrat im Wurzelraum in naher Umgebung der Lysimeter bestimmt. Es wurden Flächen mit Winterung (Weizen, Gerste und Raps) und mit Winterbrachen geprüft. In ca. 4 wöchigem Abstand wurden Niederschlagshöhe und Sickerlösung quantifiziert und auf Nitrat analysiert. Die Oberfläche und Umgebung einiger Lysimeter wurden zur Kontrolle der Herkunft der Sickerlösung gleichmäßig mit CaCl₂-Lösung als inertem Tracer gedüngt. Zum Ende der winterlichen Messperiode wurden im April auch die Ionenaustauscher entnommen, durch Sedimentation in Wasser vom Sand getrennt und das Nitrat vor der Analyse durch dreimaliges Schütteln mit je 3000 ml 0,01m CaCl₂-Lösung extrahiert. Es folgten sieben Extraktionen mit je 1000 ml Lösung.

4. Verdunstung:

Berechnung nach RENGGER et al. (1989).

Autoren: Dr. Klaus-Wenzel BECKER, Martin SCHWIEDE, Institut für Bodenwissenschaft, Von Siebold-Straße 4, D-37075 GÖTTINGEN

Ergebnisse

Niederschlagshöhen

Die Niederschlagshöhen im Winter 1997/98 und 1999/2000 waren etwa durchschnittlich. Sie reichten aus, um an den einzelnen Messorten das Bodenwasser der Lysimeter im Messzeitraum nach Erreichen der Feldkapazität etwa zwei- bis dreimal auszutauschen. Der außergewöhnlich regenreiche Winter 1998/99 führte zu einem vier- bis siebenfachen Wasseraustausch.

Sickerwasserbilanz

Tabelle 1 gibt für die verschiedenen Lysimeter-Bautypen Aufschluss darüber, wieviel vom erwarteten Sickerwasser tatsächlich in den Auffangbehältern gesammelt wurde. Da die im Winter ohnehin geringe Verdunstung bereits berücksichtigt ist, werden Werte um 100 % erwartet. Diesen Idealwert erreichen die Wannens-Lysimeter ausnahmslos. Die Platten- und auch die Unterflur-Lysimeter kommen nur in Einzelfällen an 100 % heran. Für sie ist eine Unterschätzung der Sickerwassermenge typisch, häufig wurden nicht einmal 25 % des erwarteten Sickerwassers gemessen.

Chlorid-Bilanz

Abbildung 1 bringt die Ergebnisse der an 10 Plattenlysimetern durchgeführten Tracerversuche. Erwartet werden Wiederfindungsanteile des ausgebrachten Chlorids in der Nähe der eingezeichneten Ausgleichsgeraden. Werte rechts dieser Geraden bedeuten, dass Wasser mit

Tabelle 1: Vergleich des gemessenen mit dem erwarteten, aus (Niederschlag minus Verdunstung) berechneten, Sickerwasserabfluss für verschiedene Lysimeter-Typen. Zahl einzelner Lysimeter in %-Klassen

Sickerwasser % (Niederschlag - Verdunstung)	Platten- Lysimeter	Unterflur- Lysimeter	Wannen- Lysimeter
0-25	4	7	0
26-50	1	8	0
51-75	1	7	0
76-110	2	4	10

überdurchschnittlich hoher Chloridkonzentration in das Sickerwasser gekommen ist. Das gilt für nur einen Fall, bei dem gleichzeitig die Sickerwassermenge um 20 % höher liegt, als aufgrund der Lysimeter-Fläche zu erwarten wäre. Häufiger findet sich deutlich zu wenig Chlorid im Sickerwasser bei gleichzeitig zu geringer Sickerwassermenge. Das Sickerwasser in diesen Auffangbehältern war also von Chlorid abgereichert.

Ionenaustauscher

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der drei mit Anionenaustauschern unterlagerten Lysimeter aufgeführt. Das Nitrat ließ sich unter den gewählten Bedingungen nur schwer von den Austauschern desorbieren. Erst nach 6 Extraktionsschritten waren mehr als 90 % des Nitrats in der Lösung. Mit gut 22 kg N/ha bei einer vertretbaren Streuung der Ergebnisse wurde unter Winterweizen ein N-Austrag in Höhe von etwa 50 % der Differenz zwischen Herbst- und Frühjahrs-Nmin in der Ackerkrume ermittelt. Dieser Messwert erscheint als zu niedrig, denn die Niederschlagsmenge hätte ausgereicht, um das Bodenwasser im Lysi-

Tabelle 2: Nitrat-Desorption von den Austauschern

Extraktionsschritt	kg N/ha	VK, ± %
1	8,2	0,8
2	6,4	12,7
3	3,5	2,0
4	1,0	0,2
5	1,0	4,3
6	0,8	0,9
7	0,7	1,0
8	0,5	1,1
9	0,3	1,4
10	0,2	1,0
Σ 1-10	22,4	9,1

meter dreimal vollständig auszutauschen, so dass etwa die als Nmin im Herbst gemessene, eventuell auch eine durch Nachmineralisation darüber hinaus erhöhte Nitratmenge als Austragsrate erwartet wurde. Die Versuchsanlage gibt keine Hinweise darauf, ob, wie bei den Platten- und den Unterfang-Lysimetern, Niederschlagswasser seitlich am Lysimeter vorbeigeflossen ist, was bei den jeweils 1 m² großen Flächen weniger wahrscheinlich, aber doch noch denkbar ist, oder ob Sickerwasser in groben Poren ohne ausreichenden Kontakt die Austauscher passiert hat.

Wannen-Lysimeter

In Tabelle 3 wird der Nitrataustrag aus den Wannen-Lysimetern mit den Nmin-Werten auf den Arealen in unmittelbarer Umgebung der Lysimeter verglichen. Die Differenz zwischen den Herbst- und den Frühjahrs-Nmin-Werten zeigt eine gute Übereinstimmung mit den direkt gemessenen Austrägen. Diese Übereinstimmung überrascht etwas, denn es gäbe gute Erklärungen für mögliche Abweichungen. Die Nmin-Messungen sind nur Momentaufnahmen und können keine N-Umsetzungen während der Versuchsperiode erfassen. Es fällt auf, dass die Krume im Frühjahr noch Nitrat enthalten, obwohl die knapp 300 mm Sickerwasser rechnerisch ausreichen, um

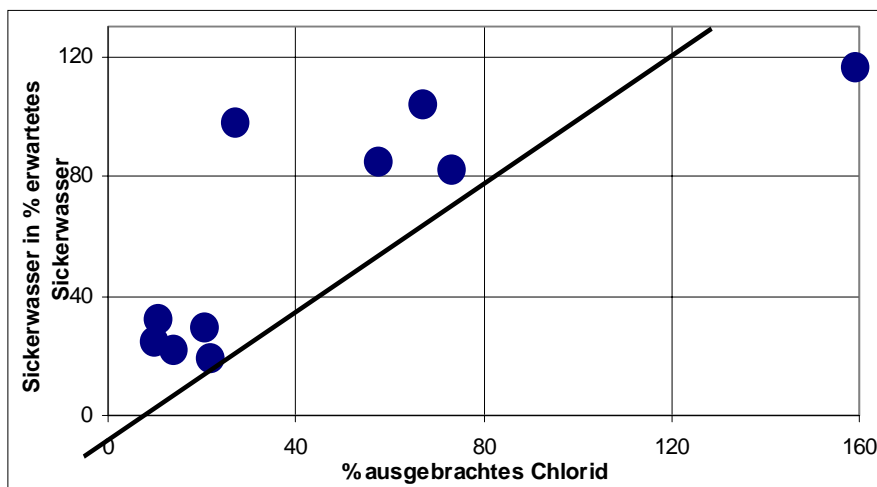


Abbildung 1: Beziehung der prozentualen Wiederfindung des auf der Fläche von 10 Plattenlysimetern ausgebrachten Chlorids zur Relation Sickerwasser (Niederschlag minus Verdunstung)

Tabelle 3: Nitrat- und Ammonium-N aus den Wannenlysimetern und Krümmen-Nmin-Werte in der Lysimeterumgebung in kg N/ha

Lysimeter-Nr.	Nmin Herbst	Nmin Frühjahr	Differenz	Lysimeter
101	47	15	32	41
102	100	15	85	73
103	57	15	42	42
104	29	13	16	35
105	76	17	59	36
106	52	8	44	46
107	39	9	30	24
108	32	12	20	19
109	35	7	28	23
110	29	7	22	18

das Bodenwasser dreimal auszutauschen. Dies könnte, wie in den Tracer- Versuchen belegt ist, mit Wasserabfluss in großen Poren ohne vollständigen Konzentrationsaustausch mit der Matrix oder durch Nachmineralisation erklärt werden. Insgesamt sind aber die N-Umsetzungen während des Winters so gering, dass sie weniger ins Gewicht fallen.

Diskussion

Für die Steuerung des Nitratreintrags in das Grundwasser flachgründiger Böden ist eine sichere Erfassung des Nitrat- austrags eine grundlegende Voraussetzung. Einerseits sind gerade diese Böden besonders austragsgefährdet, andererseits gibt es keine verlässlichen Kenntnisse über die Wirksamkeit Ausstrags- minderer Maßnahmen, wie sie in Niedersachsen in Wassereinzugsgebieten, z.B. über den Weg freiwilliger Vereinbarungen zwischen den Flächenbewirtschaftern und der Bezirksregierung, finanziell gefördert werden können.

Die Schwierigkeit der Austragsmessung bei diesen Böden ist in zwei Punkten begründet. Zum einen lässt sich wegen des klüftigen oder sehr grob strukturierten Unterbodens das Sickerwasser unterhalb der Wurzelzone nicht quantitativ erfassen. Zum zweiten neigen die Böden zu bevorzugtem Fließen der Sickerlösung in Leitbahnen unter Umgehung der feinen Poren. Das Homogenisieren der Ackerkrume durch die Bodenbearbeitung oder das Einfüllen in die Lysimeter konnte das bevorzugte Fließen von Wasser in Leitbahnen nicht verhindern, nicht einmal für die nur wenige Monate dauernde Messperiode. BECKER et al. (1997) belegen mit Messergebnissen, dass der präferenzielle Fluss auch für natürlich bewirtschaftete Sand-Ackerbö-

den gravierende Bedeutung hat. MEYER (2001) und GERNANDT und MEYER (2001) liefern weitere Messergebnisse für einen Modell-Sandboden und ein Erklärungsmodell für dieses Sickerverhalten. Diese Begründung könnte durchaus auch für die hier untersuchten Ackerkrumen aus Sand und aus stark aggregierten Tonen zutreffen.

Bei den Unterfang- und den Platten-Lysimetern wird der Fluss des Wassers zu den Auffang-Platten hin zusätzlich durch die Einbautechnik empfindlich gestört. Offensichtlich kann dieses Problem auch durch den Einbau der Platten in größerer Tiefe nicht gelöst werden. Während JÖRGENSEN und MEYER (1999) für zwei Unterfang-Lysimeter in einem Waldboden in 40 und in 70 cm Tiefe einer Muschelkalk-Verwitterung plausible Wasser- und Stoffbilanzen mitteilen, berichtet SIEBNER (2000) für seine Lysimeter, die er in 30 cm und jeweils um 10 cm steigend bis 90 cm Tiefe in Böden aus Ton-Verwitterung installiert hatte, über ein völlig unrealistisches Sickerverhalten.

Damit bleiben zur Beantwortung der hier gestellten Frage die Wannen-Lysimeter mit den Seitenwänden, die allein befriedigende Wasserbilanzen und auch Nitrat- austräge lieferten. Allerdings ist ihre Eignung auf die Winterperiode begrenzt. Mit Einsetzen des Pflanzenwachstums trägt der nur ein bis drei Dezimeter mächtige, lokal in seiner Mächtigkeit häufig stark variierende Übergang von der Ackerkrume zum Schotter oder Gestein wesentlich zum Wasser- und Stoffhaushalt der flachgründigen Böden bei. Eine Berücksichtigung dieses Übergangs in den Lysimetern wäre sehr aufwendig, da ein Einfüllen im Gegensatz zur ohnehin regelmäßig bearbeiteten Krume nicht zu rechtfertigen wäre.

Die Versuche mit den Anionenaustauschern befriedigen ebenfalls nicht. Im Gegensatz zu den Wannen-Lysimetern erfassten sie nicht annähernd den Nitrat- austrag, der aufgrund der Differenz zwischen Herbst- und Frühjahrs-Nmin zu erwarten war. KAUPENJOHANN und KUKOWSKI (1995, 1996) setzten eine mit Anionenaustauschern gefüllte Nitrat-Monitoring-Box mit nur wenigen Zentimetern Durchmesser in eine ungestörte Profilwand ein und quantifizierten darin ausgetragenes Nitrat. Auch für diesen Ansatz ist wegen der fehlenden Seitenwände ein unvollständiges Durchströmen der Lysimeter zu befürchten. Eine Kontrollmöglichkeit für das Ausmaß denkbarer Fehler besteht nicht.

Zusätzlich enttäuschte der erforderliche Aufwand für die Durchführung der Ionenaustauscher-Versuche. Die Kosten für die Austauscher waren bei der Fläche von 1 m² erheblich. Andererseits würde eine deutlich kleinere Messfläche zusätzliche Unsicherheiten bei den Ergebnissen zur Folge haben. Zuletzt erforderte das Trennen der Austauscher vom Sand sowie das wiederholte Desorbieren des Nitrats viel Zeit.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Es wurde die Eignung verschiedener Lysimeter-Typen zur Messung des Nitrat- austrags aus flachgründigen landwirtschaftlich genutzten Böden geprüft. Wegen der ohnehin regelmäßigen Bearbeitung der Ackerkrume wurde in der Störung der Lagerung des Bodens kein Nachteil gesehen. Die Beschränkung auf die Ackerkrume begrenzte die Messung zeitlich auf die winterliche Austragsperiode.

Die Lysimeter-Typen ohne Umgrenzung mit Seitenwänden lieferten häufig erheblich zu wenig Sickerwasser und können damit für die gestellten Aufgaben nicht empfohlen werden.

Es bleiben die Wannen-Lysimeter, die bei einem geringen Aufwand für Installation und Betreuung zuverlässige Sickerwasserbilanzen und plausible Nitrat- austräge liefern. In der hier gewählten einfachen Form muss ihr Einsatz aber auf regelmäßig gepflegte Ackerböden begrenzt werden. Ferner wird nur der Nitrat- austrag während der winterlichen Sickerperiode, nicht aber der während re-

genreicher Phasen in der Vegetationsperiode erfasst. Der dadurch bedingte Fehler dürfte aber vertretbar sein, da Niederschlagswasser den Wurzelraum auf flachgründigen Böden in solchen Fällen vorzugsweise in groben Leitbahnen verlässt, ohne dass es zu einem Konzentrationsausgleich mit der Bodenlösung kommt. Ein verstärkter Austrag des Nitrats ist erst nach Aufsättigung des Bodens im Herbst zu erwarten, nachdem die pflanzliche Aufnahme abgeschlossen ist und die Mineralisation von Wurzel- und Ernterückständen beginnt. Mit dieser Einschränkung können die Wannens-Lysimeter als kostengünstige Messeinrichtung für den Nitrataustrag empfohlen werden.

Literatur

- BECKER, K.-W., B. MEYER und W. MUCH, 1997: Versickerungsverhalten von Ackerböden auf glazialen Vorschüttungen - Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **85**, 63-66
- Drechsler, H., 1992: Reduktion des Stickstoffs aus dem Überschuss-N-Eintrag agrarischer Ökotope beim Transport durch die Böden ins Grundwasser - Diss. Univ. Göttingen
- GERNANDT, P. und B. MEYER, 2001: Horizontale Differenzierung des vertikalen Wasserflusses in groben Mittelsanden in einem Modell-Lysimeter, Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung, 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, (dieses Heft)
- JÖRGENSEN, R.G. und B. MEYER, 1999: Langzeit-Beobachtung des Elementflusses in und aus einer Terra Fusca Rendzina unter Rotbuche - Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **91**, 1241-1244
- KAUPENJOHANN, M. u. H. KUKOWSKI, 1995: Quantifizierung der Nitrat- und Schwermetallausträge aus sandigen Ackerböden mittels Ionenaustauscher - VDLUFA-Schriftenreihe **40**, Kongressband, S. 315-318
- KAUPENJOHANN, M. u. H. KUKOWSKI, 1996: Quantifizierung der Nitratausträge aus landwirtschaftlichen Flächen mit Hilfe der Ionenaustauschertechnik - Fachliche Ber. HWW (Hamburger Wasserwerke) **1**, 34-42
- MEYER, B., 2001: Kaskaden-Fluss in Böden und Folgen für die Anwendung der Lysimetertechnik, Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung, 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, (dieses Heft)
- OBERMANN, P., 1981: Hydrochemische/hydro-mechanische Untersuchung zum Stoffgehalt im Grundwasser bei landwirtschaftlicher Nutzung Bes. Mitt. Dtsch. Gewässerkundl. Jahrb. **42**, 217 S.
- RENGER, M., G. WESSOLEK, R. KÖNIG, F. SWARTJES, B. FAHRENHORST und B. KASCHANIAN, 1989: Modelle zur Ermittlung und Bewertung von Wasserhaushalt, Stoffdynamik und Schadstoffbelastbarkeit in Abhängigkeit von Klima, Bodeneigenschaften und Nutzung - Endbericht zum BMFT-Projekt 0374343, 138 S.
- SIEBNER, C.S., 2000: Wasserbewegung und Stofftransport in Pelosolen am Beispiel des Südniedersächsischen Röt, Oberer Buntsandstein - Diss. Univ. Göttingen