

Einfluss des Grundwasserstandes auf Wasserhaushalt und Pflanzenertrag - Ergebnisse der Göttinger Löss- und Sand-Grundwasserlysimeter -

K.-W. BECKER

Abstract

This Report states results of 13 years of study using the groundwater lysimeters, established in Göttingen in 1980. They have a surface area of seven square meters each and are planted predominantly with maize. At an average annual rainfall of 644 mm, groundwater was evapotranspired in the fine sand lysimeter with water table at 0.80 m depth, but the water balance of plots with groundwater in 1,25 m and 2.25 m was influenced exclusively by rainfall. Plants in the loess lysimeters used groundwater from a depth up to slightly more than 3.50 m. The use of groundwater increased dry matter yield on sandy soil by nearly 50 %, that on loess (1.25 and 2.25 m water table) by less than 10 %, compared with the lower water tables. Water use, expressed as evapotranspiration in l per kg dry matter production, was more efficient for plants with groundwater use.

Chloride and nitrate anions from fertilizer in the seepage water formed distinct and very similar concentration peaks. The concentration curves of the lysimeters with shallow water table are not shown, because their shape is too much influenced by the feeding in of groundwater.

Because of preferential flow, significant anion concentrations were measured in the sand lysimeter with groundwater depth of 1,25 m long before the main peaks. A steep ascent of the concentrations was followed by a less abrupt descent. The asymmetry of the curve is more pronounced for the lysimeter with the deeper groundwater table. The decrease of the anion concentrations is followed by a long period with low concentrations. The very low concentrations from the start of the experiments are not reached during the observation period.

Concentration curves from chloride and nitrate seepage of the loess lysimeters are symmetrical and nearly ideally bell shaped, with smaller absolute peaks and broader bases at lower groundwater levels.

Die Lysimeteranlage

Die Lysimeteranlage dient vorrangig Zwecken der Lehre. So ist auch ihr nicht optimaler Standort auf dem Gelände des Instituts im Göttinger Stadtgebiet zu erklären. Es wird der Einfluss des Grundwasserstandes von Schluff- und von Sandböden auf das Wachstum von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen und auf die Neubildung von Sickerwasser geprüft. Zurzeit liegen keine Messungen zum Bodenwasservorrat vor. Deshalb sind Bilanzzeiträume für einzelne Jahre nicht sinnvoll. Unterschiedliche Wasservorräte zu Beginn und Ende des Jahres würden eine unsichere, aus Differenz zu ermittelnde Evapotranspiration ergeben. Deshalb werden hier nur für 13 Jahre gemittelte Wasserhaushaltsdaten vorgestellt. Fehler durch unterschiedliche Vorräte an Bodenwasser zu Beginn und zu Ende der Bilanzierung werden durch die Wahl des 1. Aprils als Stichtag gering gehalten. Zum Frühjahr kann man im Klimaraum Göttingens regelmäßig von einer Sättigung des Bodens bis zur Feldkapazität ausgehen.

Zusätzlich eignen sich die im Sickerwasser der Lysimeter gemessenen Chlorid- und Nitratgehalte zur Beschreibung des Austragsverhaltens dieser Stoffe aus den geprüften Böden.

Bauart

Die Lysimeteranlage besteht aus insgesamt 7 Kunstharzgefäßen mit 7 m² Oberfläche und Tiefen zwischen 1,50 und 5,00 m. Sie wurden zwischen 1977 und 1980 von Hand mit kalkhaltigem Rohlöss bzw. mit Feinsand gefüllt und dabei auf 1,5 g/cm³ verdichtet. Das Bodenmaterial liegt auf einer wenige cm mächtigen Dränschicht aus Kies und Grobsand. Im Füllmaterial der Gefäße wird jeweils 20 cm über der Dränschicht ein konstanter Grundwasserspiegel eingestellt. Sickerwasser fließt frei ab, bei Absinken des Grundwasserspiegels wird deionisiertes, mit CaCO₃ gesättigtes Wasser eingespeist. Füllmaterialien und Versuchsvarianten sind in *Tabelle 1* angegeben. Den obersten 25 cm des Sandes wurde entsprechend 1,6 % C Bunkererde (Hochmoor-Torfmaterial) beigemischt, die Befüllung mit Löss erfolgte vollständig mit dem Rohmaterial. Weitere Einzelheiten zum Bau der Lysimeter sowie zu Ergebnissen sind bei BIELERT (1999), EULENSTEIN u. MEYER (1993) und FREDE et al (1978) beschrieben.

Tabelle 1: Daten zum Aufbau der Göttinger Lysimeteranlage

Lysimeter	Grundwasser	Material	Korngrößenklassen in µm, Anteile in %						
Kürzel	Tiefe, m		630 355	355- 200	200- 63	63 -36	36 -20	20 -2	< 2
S0,80	0,80	Sand	0,3	4,5	95,2	0	0	0	0
S1,25	1,25	Sand	0,3	4,5	95,2	0	0	0	0
S2,25	2,25	Sand	0,3	4,5	95,2	0	0	0	0
L1,25	1,25	Löss	0	4,2	8,8	31,5	22,9	24,3	8,3
L2,25	2,25	Löss	0	4,2	8,8	31,5	22,9	24,3	8,3
L3,50	3,50	Löss	0	4,2	8,8	31,5	22,9	24,3	8,3
L4,75	4,75	Löss	0	4,2	8,8	31,5	22,9	24,3	8,3

Autor: Dr. Klaus-Wenzel BECKER, Institut für Bodenwissenschaften, Universität Göttingen, Von Siebold-Str. 4, D-37075 GÖTTINGEN

Bis 1988 wurden auf den Lysimetern verschiedene landwirtschaftliche Kulturen angebaut. Im Zeitraum 1989 bis 2002 wuchsen 1x Zuckerrüben, 2x Winterweizen, 1x Hirse und 9x Mais. Um den Aufwuchs zu sichern, ist auf den Sandlysimetern während der Jugendentwicklung eine gelegentliche Beregnung erforderlich. Dann erhielten alle Lysimeter einheitliche Regengaben.

Ergebnisse

Wasserhaushalt: Tabelle 2 bringt die Ergebnisse zum Wasserhaushalt. Im Jahresmittel des 13jährigen Versuchszeitraums fielen 644 mm Niederschlag. Das entspricht dem vieljährigen Mittel für Göttingen (1961-1990 = 647mm, Deutscher Wetterdienst). Minimum und Maximum für ein einzelnes Jahr sind 479 bzw. 881mm. Das Beregnungswasser dürfte die Sickerwasserrate nur geringfügig erhöht haben, da es ausschließlich in Zeiten stark abgetrockneten Bodens und hoher Verdunstungsraten zugeführt worden ist.

Von den Sandlysimetern hatte nur S0,80 Anschluss an das Grundwasser, schon aus 1,25 m Tiefe stieg kein Grundwasser mehr auf. Im Löß dagegen wurde Grundwasser aus bis zu mehr als 3,50 m Tiefe genutzt. Bei L1,25 und auch bei L2,25 stieg in jedem Jahr Grundwasser auf, bei L3,50 nur in 6 von 13 Jahren Beträge zwischen 1 und 53 mm. Nach unseren Vorstellungen ist der Aufstieg von Grundwasser in Lößböden des Göttinger Klimaraumes auf Tiefen von 2,5 bis maximal 3 m begrenzt. Der Unterschied zu den Lysimetern liegt in der Wasserleitfähigkeit des Unterbodens begründet. Im Freiland dominieren Parabraunerden, in denen durch die Prozesse der Kalkauswaschung und der Tonverlagerung charakteristische Horizonte ausgebildet sind, die für den kapillaren Wassertransport als Störzonen fungieren (BECKER, 1994). In Böden des mitteldeutschen Trockengebietes, in denen Schwarzerden dominieren, da die geringere Sickerwasserrate die Kalkauswaschung aus dem Löß bisher verhindert hat, kann Bodenwasser auch aus größeren Tiefen aufsteigen (HAFERKORN, 2000).

Tabelle 3 gibt Auskunft zu der Frage, wie sich der Aufstieg von Grundwasser auf

Tabelle 2: Wasserbilanz im Zeitraum 1.4.1989-31.3.2002 in mm (N=Niederschlag, B=Beregnung, SL=Sickerwasserlieferung, GA=Grundwasserverbrauch, ETI=Evapotranspiration+Interception, S=Netto-Grundwasserneubildung)

Lysimeter	N	B	SL	GA	N+B +GA	ETI	S
S0,80	644	31	400	80	755	355	320
S1,25	644	31	401	0	675	274	401
S2,25	644	31	438	0	675	237	438
L1,25	644	31	284	121	796	512	163
L2,25	644	31	237	41	716	479	196
L3,50	644	31	214	10	685	471	204
L4,75	644	31	195	0	675	480	195

Tabelle 3: Erträge, Verdunstung und Effizienz der Wassernutzung im Zeitraum 1.4.1989-31.3.2002 (TM = Trockenmasse, ETI = Evapotranspiration + Interception, ETK = Evapotranspirationskoeffizient)

Lysimeter	TM-Ertrag dt/ha	ETI mm	ETK l/kg TM
S0,80	104	355	341
S1,25	56	274	489
S2,25	68	237	349
L1,25	155	512	330
L2,25	146	479	328
L3,50	132	471	357
L4,75	136	480	353

den Wasserhaushalt, also auf die Höhe der Verdunstung und der Grundwasserneubildung und auch auf den Ertrag der Kulturpflanzen auswirkt.

Beim Sand S0,80 erhöht der Aufstieg von 80 mm Grundwasser die Transpiration in nahezu gleicher Größe. Um diesen Betrag ist auch die Grundwasserneubildung verringert. Die zusätzliche Wasserversorgung erhöhte den Trockenmasseertrag der vorwiegend angebauten Maispflanzen erheblich. Auch die Effektivität der Wassernutzung wird verbessert, was der Evapotranspirationskoeffizient (ETK) von 341 l Wasser je kg produzierter Trockenmasse zum Ausdruck bringt. Lysimeter S1,25 liefert gegenüber S2,25 niedrigere Erträge bei einem höheren Wasserverbrauch je kg Trockenmasse. Eine Erklärung für diese Beobachtung, die sich in jedem Einzeljahr wiederholte, fällt schwer. Möglicherweise gibt es in den beiden Lysimetern unterschiedliche Lagerungsstrukturen, die auf die Einfülltechnik zurückzuführen sind.

Beim Löß ermöglichen die beiden niedrigsten Grundwasserstände einen um gut bzw. knapp 10 % höheren Trockenmasseertrag. Gleichzeitig wird der ETK

leicht verringert. Das Zusammenwirken beider Effekte mildert die Auswirkung des Grundwasseraufstiegs auf die Wasserhaushaltsgrößen. Bei L1,25 wird die Grundwasserneubildung zwar verringert, aber bei 121 mm durchschnittlicher jährlicher Grundwassereinspeisung nur um knapp 40 mm (von ca. 200 auf 163 mm). Die 41 mm Grundwasseraufstieg bei L2,25 bleiben, verglichen mit L3,50 und L 475, trotz des leicht gestiegenen Ertrags ohne Auswirkung auf Verdunstung und Grundwasserneubildung.

Für die Sand- und für die Lösslysimeter gilt generell die Aussage, dass die ETK mit zunehmender Verbesserung der Wasserversorgung der Pflanzen geringer werden. Damit bestätigen die Lysimeterergebnisse die Angaben bei EHLERS (1996). Beim Vergleich der absoluten Zahlen ist allerdings zu bedenken, dass hier für die Evapotranspiration Jahresraten, bei EHLERS aber häufig nur Raten für die Vegetationsperiode berechnet worden sind.

Anfall von Sickerwasser im Jahresgang

Die Tagesraten der Grundwasserlieferung der Sand- und auch der Lösslysimeter mit geringer Grundwassertiefe variieren im Jahresverlauf deutlich und reagieren mehr oder weniger spürbar auf kurzzeitige Änderungen der Witterung. Der kapillare Aufstieg bei hohen Grundwasserständen bewirkt besonders in Trockenphasen eine geringere Austrocknung des Bodens und als Folge davon ein schnelleres Ansprechen der Sickerwasserabläufe nach Niederschlägen. Das gilt in besonderem Maß für Lysimeter S0,80 mit seiner geringen Kapazität zur Wasserspeicherung.

Dieses Bild ändert sich beim Löss mit zunehmender Grundwassertiefe. *Abbil-*

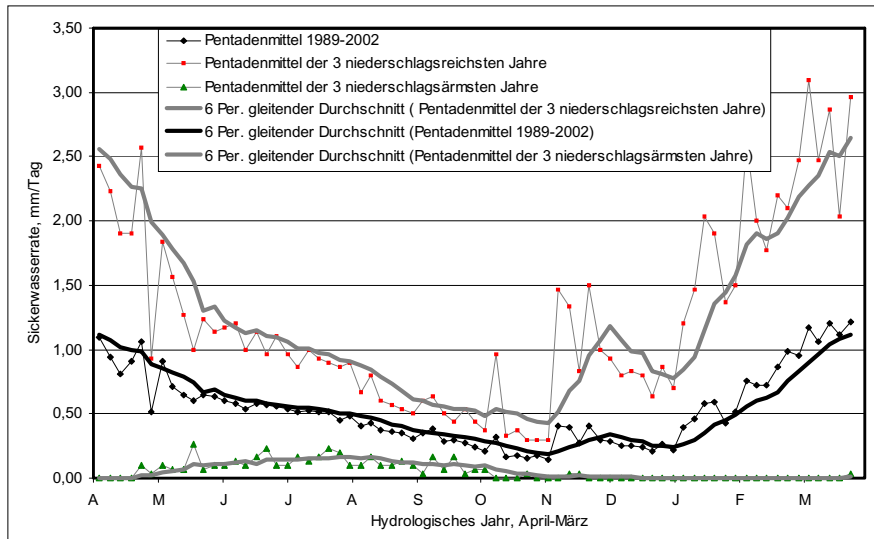


Abbildung 1: Zeitgang der Tagesrate des Sickerwasserablaufes aus Lysimeter L 4,75

Abbildung 1 veranschaulicht für L 4,75 den Zeitgang der Sickerwasserrate im Jahresablauf für das durchschnittliche Jahr und für die jeweils drei niederschlagsreichsten und niederschlagsärmsten Jahre. Um kurzzeitige Ausschläge zu dämpfen, sind Pentadenmittel angegeben, die in der Trendkurve durch gleitende Durchschnittswerte aus jeweils 6 Pentadenwerten geglättet wurden. Im Mittel der Jahre erreicht die Rate des Sickerwasserabflusses ihren niedrigsten Wert während der herbstlichen Aufsättigung des Oberbodens im Oktober. Sie steigt bis Ende März/Anfang April auf 1,1 mm je Tag an, um dann kontinuierlich bis Oktober auf den Ausgangswert zurückzugehen.

Niederschlagsreiche Jahre liefern bei etwa doppelt so hohen absoluten Werten einen ähnlichen Jahrestrend. Der Abfall der Sickerwasserrate im Dezember ist nicht typisch sondern das Ergebnis eines Einzeljahres, in dem der Dezember nach einem sehr nassen Herbst fast niederschlagsfrei blieb.

In niederschlagsarmen Jahren wird die ohnehin geringe tägliche Abflussrate ebenfalls während des Sommers kontinuierlich kleiner. Sie kommt im Oktober vollständig zum Erliegen. Wegen der geringeren Herbst- und Winterniederschläge sättigt sich der im Sommer stärker ausgetrocknete Boden langsamer auf, erst im Laufe des Aprils kommt es wieder zur Sickerwasserlieferung. Wichtig ist die Beobachtung, dass es seit Beginn der Messungen im Jahr 1979 bei L

4,75 in jedem Jahr zum Abfluss von Sickerwasser gekommen ist. D.h., man kann im Göttinger Klimaraum bei tiefgründigen Lössböden unter ackerbaulicher Nutzung auch in Trockenjahren regelmäßig mit der Auffüllung des im Sommer beanspruchten Bodenwasserspeichers bis zur Feldkapazität rechnen.

Extrapoliert man den Jahrestrend der Tagesraten der Sickerwasserlieferung in den Lösslysimetern auf mit Löss bedeckte Landschaften, ergibt sich folgendes Bild: Bei tief liegendem Grundwasserspiegel wird sich das Abflussverhalten mit zunehmender Lössmächtigkeit der in Abbildung 1 dargestellten mittleren Kurve annähern. Die Quellen werden während des ganzen Jahres Grundwasser liefern. Die geringsten Raten werden zwischen Oktober und Januar erreicht, mit maximalen Raten ist zwischen März und Mai zu rechnen. Geringe Lössmächtigkeiten sowie geringe Grundwasserflurabstände lassen eine stärkere Variation der Quellschüttungen innerhalb eines Jahres und auch zwischen Jahren mit unterschiedlich hohen Niederschlagsmengen erwarten.

Austrag von gelösten Stoffen

1989 erhielten die Lysimeter nach einer längeren Düngepause einheitliche Chlorid- und Nitrat-Gaben, die ausgeprägte Konzentrationspeaks im Sickerwasser zur Folge hatten. Die erste Düngung im Mai kam auf teilweise ausgetrockneten

Böden, die Verlagerung zum Grundwasser wird durch den Verbrauch und die Auffüllung des Bodenwasservorrates im Sommer 1989 geprägt. Bei der zweiten Düngung Ende November waren die Böden bis zur Feldkapazität gesättigt, alle Lysimeter lieferten Sickerwasser. Die Abbildungen 2 und 3 bringen die Chlorid- und Nitrat-Konzentrationen im ablaufenden Sickerwasser. Die Ergebnisse für S0,80 und L1,25 werden nicht mitgeteilt, da hier das Einspeisen von Grundwasser den Stoffaustrag wiederholt unterbrochen hat und der Kurvenverlauf entsprechend unruhig ist. Die Grundwasserstände haben keinen Einfluss auf die ausgetragenen Nitratmengen. Das lässt darauf schließen, dass das Grundwasser im Bereich zwischen 1,25 und 2,25 m Tiefe beim Sand und 2,25 und 4,75 m beim Löss keinen Einfluss auf die Höhe der Denitrifikation hatte. Beide Anionen zeigen einen weitgehend übereinstimmenden Verlauf. Die Beschreibung der Kurven wird deshalb auf das etwas ruhiger verlaufende Chlorid beschränkt.

Das Austragsverhalten der Sand- und der Lösslysimeter ist markant unterschiedlich. Beim Sand verursachen die beiden Düngegaben jeweils zwei deutlich voneinander unterscheidbare Konzentrationspeaks. Bei S1,25 steigt die Konzentration schon bald nach der ersten Düngergabe an. Pa` ist zwar undeutlich, das Niveau von ca. 25 mg/l Chlorid bleibt aber während des Ablaufs von ca. 200 mm Sickerwasser nahezu erhalten. Erst dann kommt es zu einem abrupten, steilen Konzentrationsanstieg und zur Ausbildung von Peak 1,25a. Es folgt ein langsames Abfallen, das durch den Peak S1,25b, eine Folge des zweiten Düngetermins, lediglich kurzzeitig unterbrochen wird. Bei S2,25 ist das Voreilen des Konzentrationsanstieg vor dem Peak S2,25a gering, ein Peak wird nicht gebildet. Erst die beiden Peaks 2,25a und 2,25b treten deutlich in Erscheinung, ihre Höhen sind etwas niedriger, als bei S1,25. Das Abfallen der Konzentration erfolgt langsamer. Die Chloridkonzentrationen im Sickerwasser beider Sandlysimeter fallen nicht auf das Ausgangsniveau von nahezu null zurück. Vielmehr werden über eine lange Austragsperiode hinweg Werte zwischen 10 und 20 mg/l

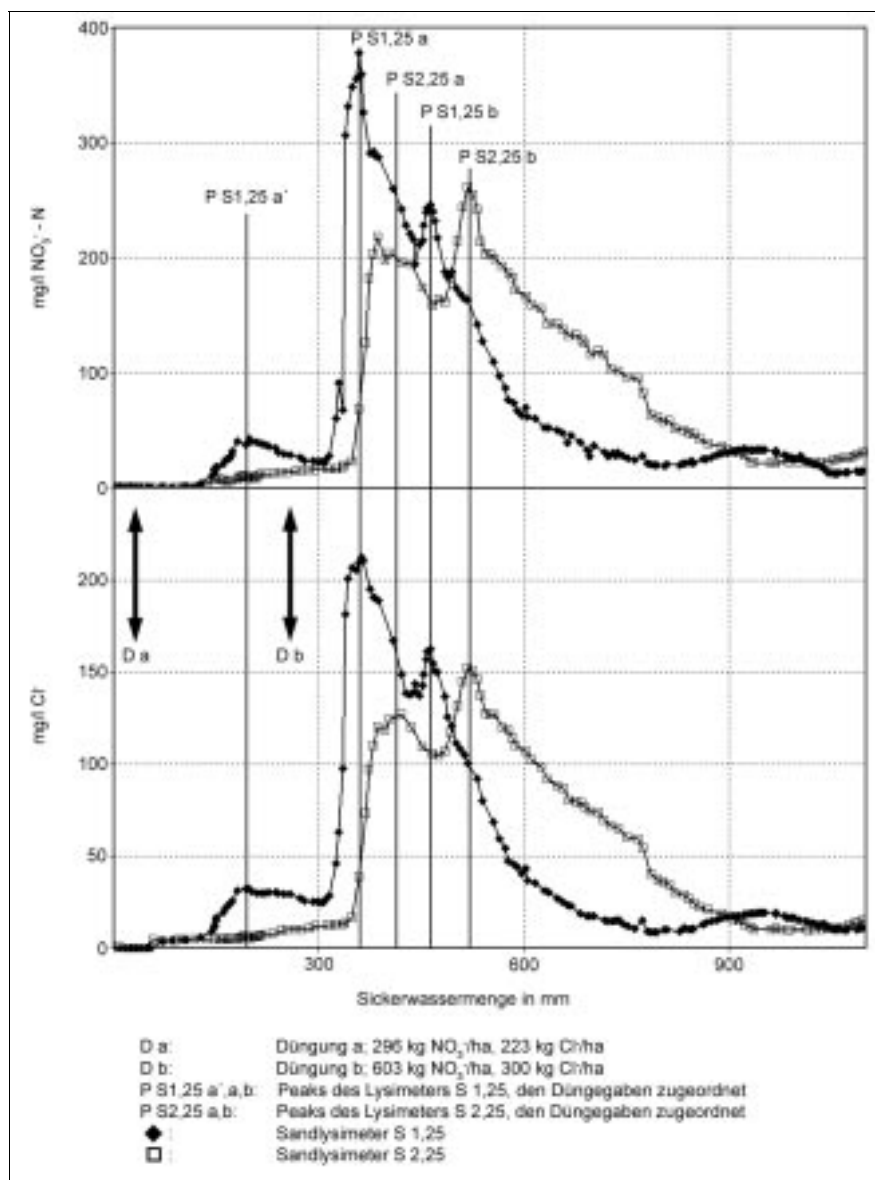


Abbildung 2: Nitrat- und Chlorid-Konzentration im Sickerwasserauslauf der Sandlysimeter S2,25

gemessen, die dann von späteren Düngemaßnahmen überprägt werden.

Die Lösslysimeter zeigen annähernd symmetrische Austragskurven. Dieses Bild wird durch abrupte Konzentrationsänderungen im abfallenden Bereich, in geringerem Ausmaß auch noch bei der Annäherung an die Grundlinie von L2,25 und L3,50, unterbrochen. Die Einbrüche fallen ausnahmslos mit der Einspeisung von Grundwasser zusammen. Die Lydimeter verbrauchen in Zeiten starker Verdunstung Grundwasser, das durch Nitrat- und Chlorid-freies Wasser ergänzt wird. Das erste Sickerwasser nach einer solchen Trockenperiode besteht dann aus einer Mischung von Einspeise- und Bodenwasser. Die maximale erreichte Höhe

der Konzentrationen fällt mit zunehmender Lydimertiefe und damit steigender Verweilzeit der Lösungsfracht im Sickerwasser ab. In dieser Reihenfolge sind auch die Peaks im oberen Abschnitt leicht, an der Basis etwas stärker verbreitert. Ähnlich wie bei den Sand-Lydimetern kommt es auch beim Löss nicht zum vollständigen Abfall der Konzentration auf das Ausgangsniveau. Typisch ist vielmehr ein langes Nachschleppen mit zwischenzeitlichem Abfall durch Grundwassereinspeisung, bis (hier nicht dargestellt) weitere Düngemaßnahmen das Bild überprägen.

Offen ist die Frage, ob der kurzzeitige, geringe Konzentrationsanstieg bei ca. 200 mm Sickerwassermenge eine direk-

te Folge der Tracer-Zufuhr ist. Einerseits fällt eine andere Erklärung schwer, andererseits wäre eine solch rasche Verlagerung, wie beim Sand, am ehesten bei den flachen Lydimetern und nicht, wie hier, bei L4,75 zu erwarten.

Tabelle 4 bringt die Abstände der Düng- und Peakereignisse, ausgedrückt im mm Sickerwasserablauf seit dem 1.4.1989. Die sommerliche Verdunstung verzögert die Verlagerung der gelösten Stoffe. Die beiden Düngetermine Anfang Mai und Ende November lassen diesen Effekt gut erkennen.

Bei den Sandlydimetern, bei denen die Sickerwasserlieferung im Sommer nicht völlig zum Erliegen kommt, wird der Abstand zwischen den Düngeterminen (231 bzw. 229 mm) auf 105 bzw. 97 mm zwischen den zugehörigen Peaks verkürzt. S2,25 benötigt zur Ausbildung der Peaks 63 (Pa) bzw. 55 (Pb) mm mehr Sickerwasser, als S1,25. Daraus lässt sich ableiten, dass bei dem hier vorliegenden Feinsand nach Erreichen der Feldkapazität im Wurzelraum bereits rund 60 mm Niederschlag ausreichen, um wesentliche Anteile eines an der Bodenoberfläche befindlichen gelösten Stoffes in 1,25 m Tiefe und damit aus dem Aufnahmebereich der meisten landwirtschaftlichen Kulturpflanzen zu verlagern.

Anders beim Löss. Da liegen zwischen den Düngeterminen nur zwischen 81 bis 97 mm Sickerwasserablauf. Die Düngung im Mai kann noch keinen Peak ausbilden, die beiden als getrennte Pulse verabreichten Tracer werden während des Sommers im Boden zusammengeführt und als gemeinsame Front verlagert und ausgetragen. Die höhere Wasserspeicherkapazität erfordert eine deutlich größere Sickerwassermenge. Für die Verlagerung des Peaks um 1,25 m werden 184 (L2,25-L3,50) bzw. 174 (L3,50-L4,75) mm Sickerwasser benötigt. Kalkuliert man für den Löss bei Feldkapazität einen Wasservorrat von 30 % Volumen, sind das im 1,25 m-Abschnitt 375 mm und nur die Hälfte der Wassermenge, die zur Peakverlagerung um diesen Betrag erforderlich ist.

Zusammenfassung

Es werden 13jährige Ergebnisse der seit 1977 betriebenen Göttinger Grundwasser-Lydimeteranlage mitgeteilt. Bei

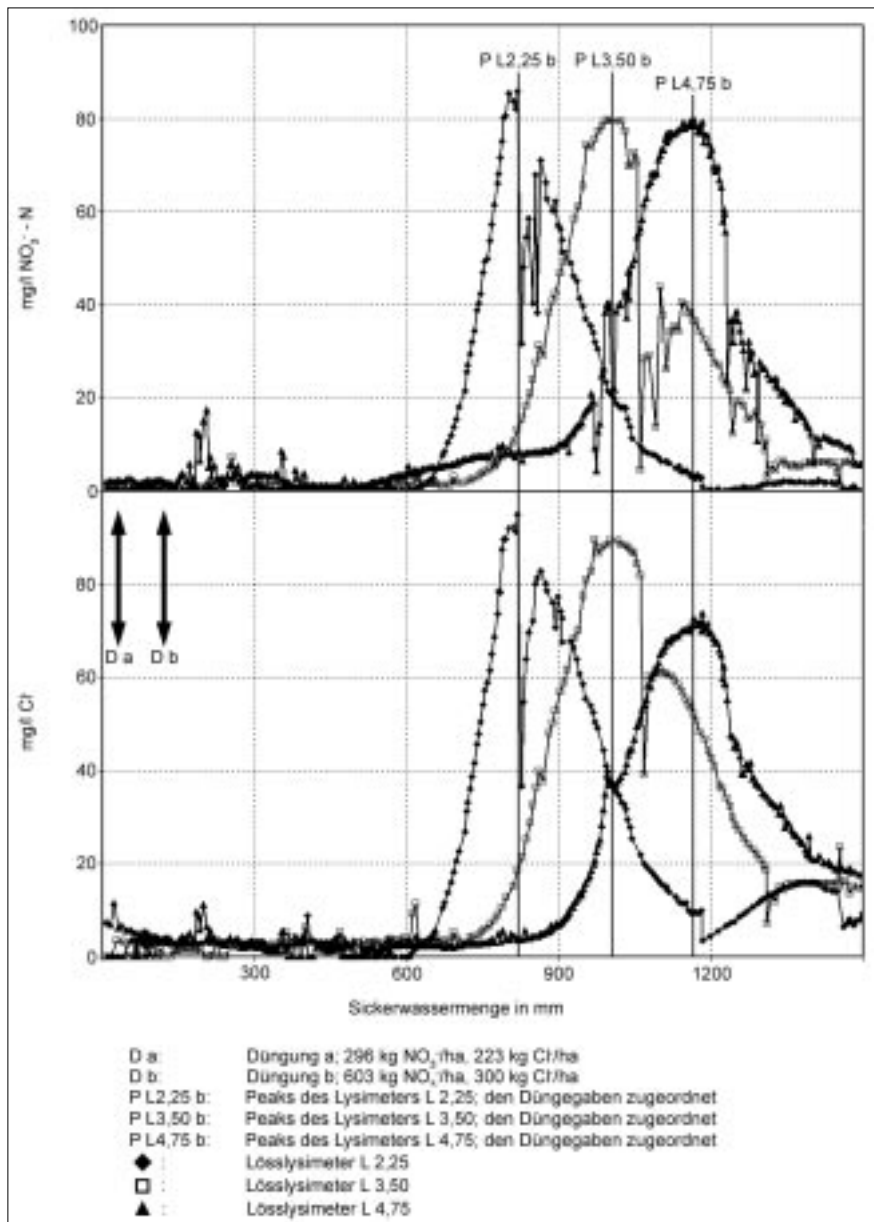


Abbildung 3: Nitrat- und Chlorid-Konzentration im Sickerwasserauslauf der Lösslysimeter

Tabelle 4: Peakabstände aus Abbildung 2 und 3 in mm Sickerwasser (Da, Db: 1. u. 2. Düngetermin; Pa` : 1. kleiner Peak nach Da; Pa: Hauptpeak nach Da; Db: Hauptpeak nach Db)

	Da	Db	Db-Da	Pa`	Pa	Pb	Pa`-Da	Pa-Da	Pb-Db	Pb-Pa
S 1,25	14	245	231	192	358	463	231	344	218	105
S 2,25	37	260	229	-	421	518	-	384	258	97
L 2,25	22	103	81	-	-	808	-	-	705	-
L 3,50	31	128	97	-	-	992	-	-	864	-
L 4,75	34	126	92	-	-	1166	-	-	1040	-

durchschnittlich 644 mm Jahresniederschlag wurde der Wasserhaushalt der Pflanzen (vorwiegend Mais) auf den Sandlysimetern bei 1,25 und bei 2,25 m Grundwassertiefe ausschließlich vom Niederschlagswasser bestimmt, bei 0,8 m Tiefe nutzten die Pflanzen zusätzlich

Grundwasser. Beim Löss lag diese Grenze bei etwas mehr als 3,50 m.

Der zusätzliche Verbrauch von Grundwasser verdoppelte den Trockenmasseertrag des Sandbodens nahezu. Beim Löss wurden bei 1,25 m Grundwassertiefe gegenüber 2,25 m und 3,5 m und

4,75 m ca. 10 % mehr an Trockenmasse geerntet. Der Evapotranspirationskoeffizient wurde durch die Einspeisung des Grundwassers bei Sand deutlich, bei Löss leicht verbessert.

Chlorid und Nitrat bildeten im abfließenden Grundwasser markante, sich einander stark ähnelnde Konzentrationspeaks. Die Kurvenverläufe der Löss- und der Sandlysimeter unterschieden sich dagegen deutlich. Beim Sand mit 1,25 m Grundwassertiefe trat vor Erreichen des eigentlichen Peaks eine deutliche, auf präferentiellen Fluss zurückzuführende Erhöhung der Konzentration auf. Einem steilen Peakanstieg folgte ein langsames Abfallen der Konzentration. Dieser asymmetrische Verlauf war beim tieferen Grundwasserstand besonders deutlich. Es folgte eine lange Schleppe mit geringen Konzentrationen. Die geringe Höhe der Ausgangswerte wurde im Berichtszeitraum nicht erreicht.

Beim Löss bildete der Austrag der Anionen nahezu symmetrische Glockenkurven, die mit zunehmender Lysimetertiefe eine geringere Höhe bei zunehmender Breite hatten. Das Nachschleppen geringer Konzentrationen zum Ende des Austrags der Tracer war weniger ausgeprägt als beim Sand.

Literatur

- BECKER, K.-W., 1994: Der klimatologische und pedohydrologische Vergleich Lysimeter - Freiland als Grundlage der Datenübertragung. Bericht über die 4. Lysimetertagung, BAL Gumpenstein.
- BIELERT, U., 1999: Hydrogeochemie von Spurenelementen in Sicker-, Grund- und Trinkwässern: von der Sickerwasserpassage bis zur Aufbereitung. Diss. Univ. Göttingen.
- EHLERS, W., 1996: Wasser in Boden und Pflanze, Eugen Ulmer Verlag Stuttgart, 272 S.
- EULENSTEIN, F. und B. MEYER, 1993: 10jährige Mittelwerte (1983-1992) des Wasserhaushaltes der Göttinger Lysimeterstationen. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 71, 123-126.
- FREDE, H.G., P. HUGENROTH und B. MEYER, 1978: Eine Grundwasser-Lysimeteranlage zur Erfassung der Bodenwasserhaushaltsbilanz und pflanzlichen Wasserversorgung bei unterschiedlichem Grundwasserstand. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 26, 83-92.
- HAFERKORN, U., 2000: Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes: Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis. Diss. Univ., Göttingen.

