

Funktionsanalyse und Test großflächiger In-situ-Sickerwassersammler

Andre Peters¹ und Wolfgang Durner^{2*}

Zusammenfassung

In diesem Beitrag präsentieren wir ein neues modulares Rillenlysimetersystem, das den Einbau von großflächigen passiven Wasserauffangflächen in ungestörten Böden ermöglicht. Große Auffangflächen sind besonders dann notwendig wenn präferenzielle Fließwege am Wassertransport beteiligt sind. Um den Einfluss von diesen Sammelsystemen auf das natürliche Fließfeld im Boden zu untersuchen und somit auch die Repräsentativität der Messungen zu bewerten, wurde eine numerische 2D Simulationsstudie mit homogenen und heterogenen Böden durchgeführt. Die Studie zeigt, dass die Sammeleffizienz der Lysimeter stark von den bodenhydraulischen Eigenschaften, der Infiltrationsintensität und der Lysimetergröße abhängt. In homogenen Böden wird nur dann Wasser aufgefangen wenn die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit relativ gering ist. In homogenen Böden mit hoher gesättigter Leitfähigkeit können selbst sehr große Lysimeter mit einer Breite von 250 cm komplett umflossen werden. Außerdem steigt die Sammeleffizienz mit ansteigender Infiltrationsintensität und der Lysimetergröße. Heterogenitäten in den bodenhydraulischen Eigenschaften führen zu präferenziellen Fließwegen die kleine Beprobungsgeräte umfließen können. Eine Simulation mit einem inerten Tracer zeigt, dass der Durchbruch in das Lysimeter im Vergleich zum Durchbruch im unbeeinflussten Boden leicht verzögert erfolgt. Die Konzentrationen sind vergleichbar mit denen im unbeeinflussten Boden. Durch die Größe mittelt das Lysimeter die lokalen Durchbrüche, die in heterogenen Böden sehr unterschiedlich sein können. Um den Lysimetertypus unter realen Bedingungen zu testen, wurde ein Feldexperiment durchgeführt mit Lysimetern, die eine Fläche von 1,25 x 1,25 m hatten. Drei Lysimeter wurden direkt unterhalb einer 1,2 m mächtigen Schüttung installiert, vier weitere ca. 0,5 bis 1 m tiefer im ungestörten Boden. Die Lysimeter direkt unterhalb der Schüttung hatten eine Sammeleffizienz von ca. 45%. Ein Tracerexperiment zeigte, dass praktisch das gesamte aufgefangene Wasser aus präferenziellen Fließwegen stammte. Die anderen vier Lysimeter fingen kein Wasser auf, d.h. auch große wandlose Lysimeter können komplett umflossen werden, wenn nur Matrixfluss stattfindet.

Summary

We present a new modular plate system that allows installation of large zero tension lysimeter plates under undisturbed soils. Large sample devices are especially necessary if preferential flow paths are present. To investigate the influence of the lysimeter on the water flow field in the soil, and thus on the representativeness of the measurements, a numerical 2-D simulation study was conducted with homogeneous and heterogeneous soils. The study shows that the collection efficiency is highly dependent on the hydraulic functions, infiltration rate, and lysimeter size. If the soil is homogeneous, only in fine soils with relatively low saturated hydraulic conductivities, zero tension plate lysimeters are able to collect soil water. In homogeneous soils with high saturated conductivities even very large lysimeters (width 250 cm) perform very poor and can be bypassed completely by the soil water. Furthermore, the collection efficiency increases with increasing infiltration intensities and lysimeter sizes. Heterogeneities of soil hydraulic properties result into a network of flow channels that may bypass small sampling devices. Tracer transport simulations with an inert solute in a heterogeneous medium show that the solute breakthrough into the lysimeter occurs slightly retarded as compared to the free soil. Breakthrough concentrations are similar to the undisturbed soil. Due to its size, the lysimeter averages the local breakthrough curves, which can be considerably different at single points. To test the plate lysimeter performance under real conditions, a field study was conducted. The lysimeter size was 1,25 x 1,25 m. Three lysimeters were installed underneath a 1.2 m filling of contaminated silty sand. Four further lysimeters were installed in the undisturbed soils underneath the disturbed soil material. A tracer experiment with irrigation was conducted to investigate the collection efficiency of the lysimeters and the flow regime in the soil material. The three lysimeters directly underneath the filled soil material collected water regularly with a collection efficiency of 45%. The arrival of the tracers showed that almost all collected water came from preferential flow paths. The other four lysimeters did not collect any water. Thus, even large zero tension plate lysimeters can be completely circumvented if only matrix flow occurs.

Einleitung

Zur Bestimmung von Stofffrachten aus der ungesättigten Bodenzone ins Grundwasser ist es notwendig, sowohl die

chemische Zusammensetzung als auch die Sickerrate des Bodenwassers abzuschätzen. Die in Hinblick auf Menge und Qualität repräsentative Beprobung von Sickerwasser in einem ungestörten Boden ist bis heute ein ungelöstes

¹ Standortkunde und Bodenschutz, Institut für Ökologie, TU Berlin, Salzufer 11-12, D-10587 BERLIN

² Abt. Bodenphysik, Institut für Geoökologie, TU Braunschweig, Langer Kamp 19c, D-38106 BRAUNSCHWEIG

* Ansprechpartner: w.durner@tu-bs.de

Problem, da jeder Einbau von Erfassungsinstrumenten mit erheblichen Rückwirkungen auf den Zustand des Systems verbunden ist. In der Natur kommen häufig heterogene Böden mit präferenziellen Fließfeldern vor (FLURY 1994). Hier ist das Problem der repräsentativen Beprobung noch schwieriger als in homogenen Böden.

Zur Beprobung von Sicker- bzw. Bodenwasser gibt es eine große Anzahl von Geräten mit unterschiedlichen Strategien und Geometrien. Eine kostengünstige Strategie ist die direkte Bodenprobennahme. Diese Methode lässt keine Aussagen über die Flüsse zu (ZHU et al. 2002), und aufgrund der Destruktivität ist eine wiederholte Beprobung desselben Bodenraumes nicht möglich. Eine zweite Strategie ist, dem Boden das Wasser mit einer gewissen Saugspannung zu entziehen. Dies kann entweder aktiv mithilfe von porösen Materialien wie Saugkerzen (HAGEDORN et al. 1999) oder Sauplatten (KOSUGI und KATSUYAMA 2004) erfolgen oder passiv mithilfe von Dochtlysometern (BOLL et al. 1992). Am häufigsten werden Saugkerzen eingesetzt. Ein großer Nachteil der Saugkerzen ist ihre limitierte Größe, die dazu führt, dass das Wasser in strukturierten heterogenen Böden hauptsächlich an ihnen vorbeifließt (HAGEDORN et al. 1999). Weiterhin können die angelegten Saugspannungen unter Umständen zu einer erheblichen Beeinflussung des natürlichen Fließfeldes führen (WEIHERMÜLLER et al. 2007). Eine dritte Strategie ist der Einsatz freidrainender Systeme, wie Drainagerohre oder freidrainende Lysimeter. Bei Flächen, die mit einem Drainagesystem ausgestattet sind, kann die Beprobung des Drainagewassers Aufschluss über die Stoffflüsse im Sickerwasser geben. Allerdings können Teile des Drainagesystems umflossen und das Drainagewasser vom Grundwasser gespeist werden (BERGSTROM 1987), wodurch Stoffkonzentrationen und Mengen falsch eingeschätzt werden. Mit monolithischen Lysimetern lassen sich nicht nur Konzentrationen, sondern auch Wasser- und Stoffflüsse messen. Allerdings können die Lysimeterwände präferenzielle Fließwege erzeugen (CAMERON et al. 1979) und die hohen Kosten limitieren den Einsatz in vielen Fällen.

Passive Plattenlysimeter haben i.d.R. keine oder nur kleine Seitenwände und fangen nur dann Bodenwasser auf, wenn das Matrixpotenzial oberhalb der Lysimeterfläche größer oder gleich Null ist (ZHU et al. 2002). In allen anderen Fällen wird das Wasser zu den trockeneren Böden in die Umgebung der Lysimeter fließen, was zu einer sehr geringen Sammeleffizienz führen kann (JEMISON und FOX 1992). Um die Sammeleffizienz zu erhöhen, müssen entweder die Auffangflächen (RADULOVICH und SOLLINS 1987) oder die Wandhöhen (GEE et al. 2002) vergrößert werden.

Für den Einbau der Plattenlysimeter muss eine Grube gegraben werden, um von dort aus die Lysimeter als Ganzes einzusetzen. Hierfür muss zuerst ein horizontales Loch mit der Breite und Tiefe der Lysimeter gegraben werden. Aufgrund der Instabilität des darüber liegenden Bodenmaterials ist die Größe der Lysimeter limitiert. Daher ist es bis heute ein nicht gelöstes Problem großflächige Lysimeter in ungestörten Böden einzusetzen. ROBISON et al. (2004) lösten dieses Problem in dem sie ihre ca. 6 m² großen Platten mit einem Bulldozer von der Grube aus in den Boden schoben. Diese Methode ist allerdings kostenintensiv und aufgrund der großen Kräfte die bei der Installation ausgeübt werden bleibt es fraglich ob der darüber liegende Boden ungestört bleibt.

In diesem Beitrag präsentieren wir einen neuen freidrainenden wandlosen Lysimetertyp der manuell unter einen ungestörten Boden eingebaut werden kann. In einer numerischen Studie wurde die Abhängigkeit der Sammeleffizienz von folgenden Faktoren untersucht: (i) den bodenhydraulischen Eigenschaften, (ii) der Infiltrationsintensität, (iii) der Lysimetergröße, (iv) lokalen Heterogenitäten die zu präferenziellen Fließfeldern führen. Weiterhin wurde verglichen, wie ein Durchbruch eines konservativ verlagerten Stoffes mit einem Lysimeter erfasst würde im Vergleich zum tatsächlich stattfindenden Stoffdurchbruch im Boden. In einer Felduntersuchung wurde das Auffangverhalten der Lysimeter in einem realen Boden getestet.

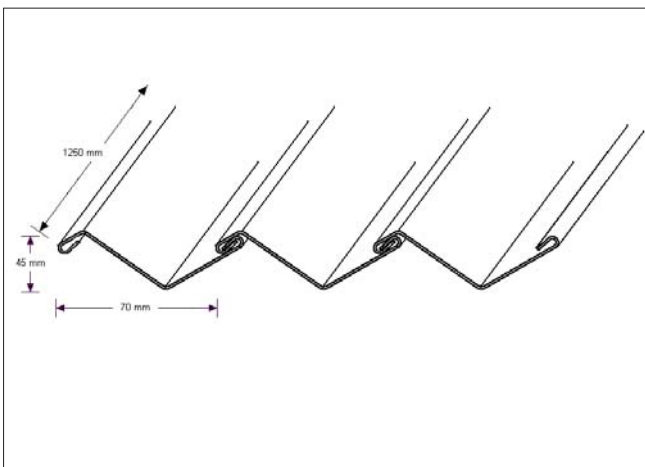


Abbildung 1: Links: Skizze der Auffangbleche für die Rillenlysimeter. Von diesen Auffangblechen wurden 18 Stück pro Lysimeter verwendet, so dass sich eine Auffangfläche von ca. 1,25 x 1,25 m ergab. Durch das modulare System konnten diese Lysimeter großflächig eingebaut werden ohne den darüber liegenden Boden zu entfernen. Rechts: Fertig eingebautes Rillenlysimeter im ungestörten Boden.

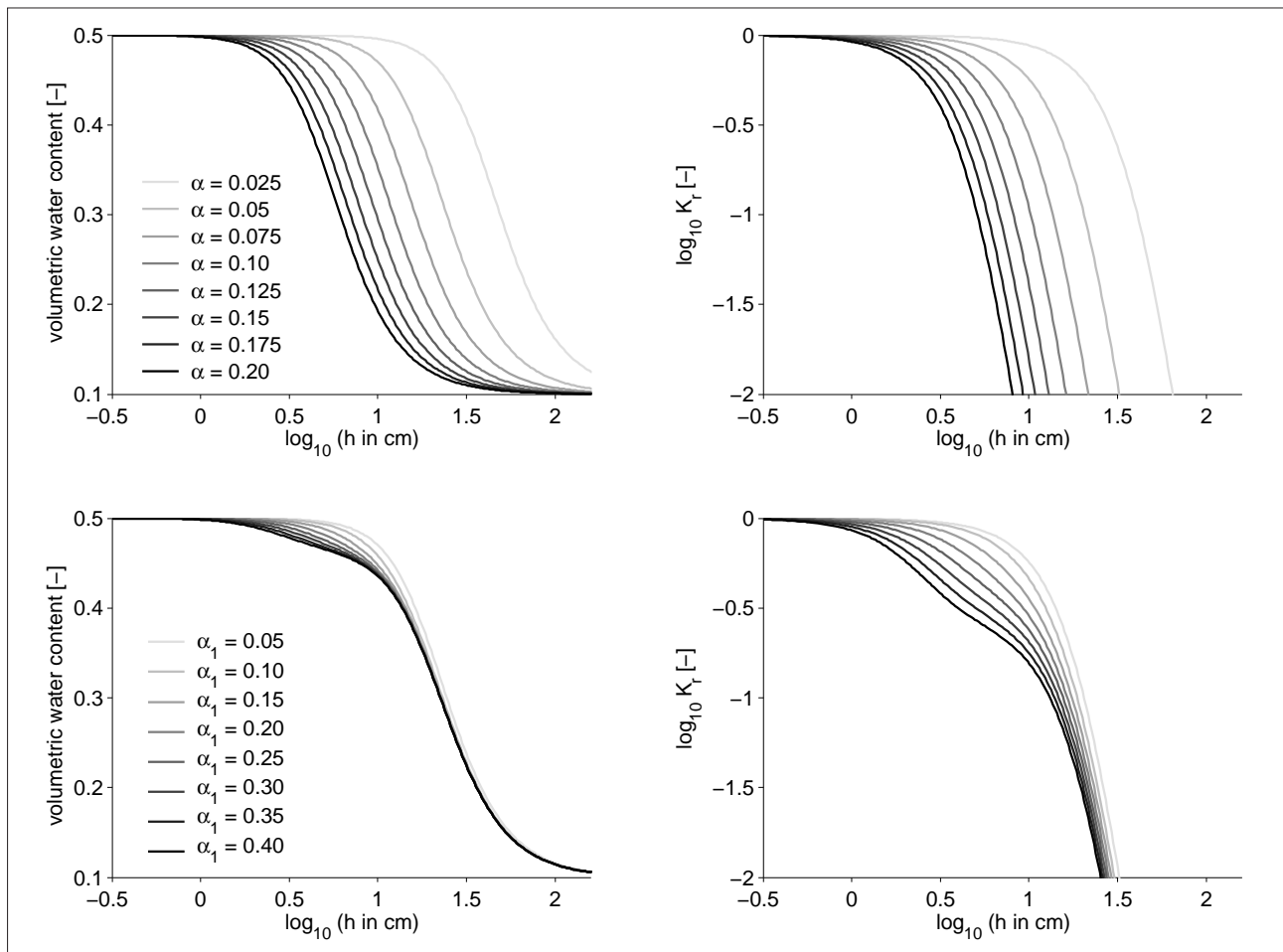


Abbildung 2: Hydraulische Eigenschaften die für die Simulationen verwendet wurden. Oben: Unimodale Funktionen; Unten: bimodale Funktionen. Größere Werte für α bzw. α_1 stehen für größere Materialien.

Material und Methoden

A) Lysimeterdesign

Die zur Sickerwassererfassung verwendeten Auffangbleche, die wir als „Rillenlysimeter“ bezeichnen, bestehen aus ineinandersteckbaren Einzelblechen (Rillen) aus V2a-Edelstahl, die sukzessive von einer Grube aus in den ungestörten Boden eingebaut werden (Abbildung 1). Für den Einbau der Bleche wurde mit einem vierkantigen Eisenrohr jeweils ein Loch für das erste Einzelblech in den Boden getrieben. Dann wurde mit einem Metallschaber, der an einem 2 m langen Eisenstab befestigt war, Platz für weitere Bleche geschaffen. Waren die ersten Einzelbleche eingebaut, wurden sie mit Quarzkies befüllt, so dass der darüber liegende Boden gestützt war. Der Quarzkies diente zusätzlich als Drainschicht. Durch dieses modulare System können relativ große Beprobungsflächen realisiert werden, welche in der Verlegerichtung beliebig ausgedehnt werden können. In dieser Studie wurden Lysimeter mit einer Fläche von 1,25 x 1,25 cm realisiert.

Von den Blechen gelangte das Sickerwasser in Auffangrinnen aus V2a-Edelstahl, und von dort in 30 Liter Edelstahlfässer. Vom Fassboden führte eine Steigleitung aus V2a-Edelstahl mit 4 mm Innendurchmesser zur Bodenoberfläche.

B) Numerische Studie

Die Sammeleffizienz wird definiert als die aufgefangene Wassermenge, bezogen auf die auf derselben Oberfläche netto infiltrierte Wassermenge. Die Sammeleffizienz der Lysimeter ist eine Funktion von der Lysimetergröße, der bodenhydraulischen Eigenschaften und der Infiltrationsintensität. Um diese Einflussgrößen systematisch zu untersuchen, wurde eine numerische Studie mit dem Finite-Elemente Modell HYDRUS-2D (SIMUNEK et al. 1999) durchgeführt, in welcher der Wasser- und Stofftransport berechnet wurde.

Für die numerische Studie wurde eine 2 m hohe und 3 m breite Domäne gewählt in deren Mitte ein 1,25 m breites Lysimeter implementiert wurde (Abbildung 3). Am oberen Rand wurde eine einfache Flussrandbedingung mit einer konstanten Infiltrationsintensität von 4 cm d^{-1} gewählt. Am unteren Rand wurde ein gravitationsbedingter Fluss aus dem Gebiet heraus mit einer Rate gleich der lokalen hydraulischen Leitfähigkeit angenommen.

Die Parametrisierung der hydraulischen Eigenschaften erfolgte nach dem uni- und bimodalen van Genuchten/Mualem-Modell (VAN GENUCHTEN 1980, DURNER 1994). Die verwendeten hydraulischen Funktionen sind in Abbildung 2 gezeigt.

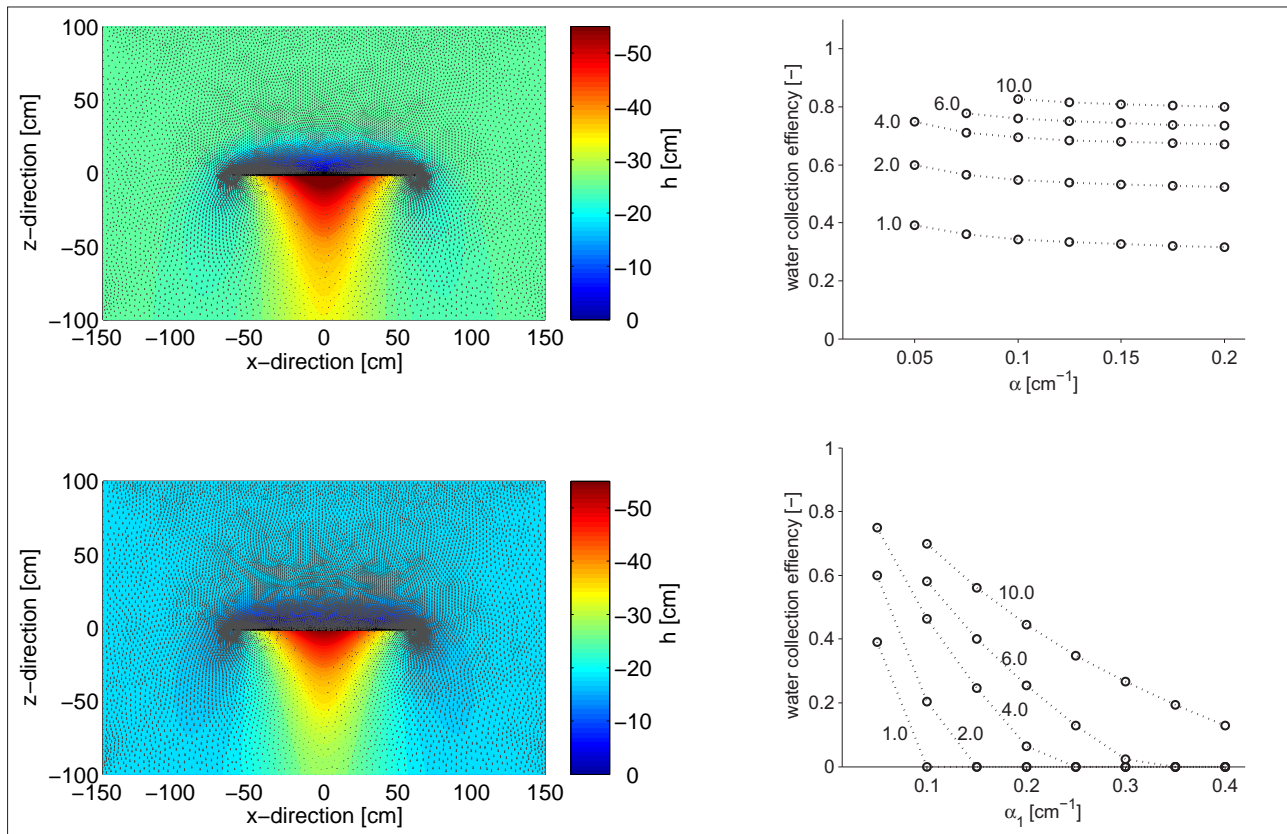


Abbildung 3: Links: Verteilung des Matrixpotenzials im 2D-Feld bei stationären Bedingungen. Pfeile geben Richtung und Größe des Wasserflusses an. Links oben: Potenzialverteilung für das unimodale Standardszenario ($\alpha = 0.05 \text{ cm}^{-1}$, $K_s = 100 \text{ cm d}^{-1}$); Links unten: Potenzialverteilung für den bimodalen Fall mit $\alpha_1 = 0.4 \text{ cm}^{-1}$ und $K_s = 100 \text{ cm d}^{-1}$. Infiltrationsintensität war in beiden Fällen 4 cm d^{-1} . Rechts: Sammeleffizienz als Funktion von hydraulischen Eigenschaften und Infiltrationsintensität (hier ist K_s mit α skaliert und hat den Wert 10 cm d^{-1} bei $\alpha = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ bzw. $\alpha_1 = 0.05 \text{ cm}^{-1}$). Rechts oben: Sammeleffizienzen für unimodale hydraulische Funktionen mit unterschiedlich großem Luftenritzungspunkt. Zahlen geben die Infiltrationsintensität an; Rechts unten: Dto., für bimodale hydraulische Funktionen mit unterschiedlich großem Luftenritzungspunkt. Zahlen geben die Infiltrationsintensität an.

Die numerische Studie wurde in 4 Teilen durchgeführt. Im ersten Teil wurde die Sammeleffizienz in Abhängigkeit von den bodenhydraulischen Eigenschaften bei homogenen Böden simuliert. Als Standardszenario wurde $\alpha = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ und $K_s = 10 \text{ cm d}^{-1}$ gesetzt. Der Parameter α wurde von 0.05 bis 0.2 cm^{-1} variiert und K_s entsprechend des Miller-Miller-Ähnlichkeitsansatzes (MILLER und MILLER 1956) quadratisch skaliert, so dass $K_s = 160 \text{ cm d}^{-1}$ bei $\alpha = 0.2 \text{ cm}^{-1}$. Die Skalierung der K_s -Werte mit α bildet ab, dass größere Materialien (größere Werte für α) höhere gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten besitzen. Im bimodalen Fall wurde der Parameter α_1 von 0.05 bis 0.4 cm^{-1} variiert, wobei K_s entsprechend von 10 cm d^{-1} bis 640 cm d^{-1} variierte. Die Dauer der Simulationen wurde so gewählt dass die Wasserbewegung stationär war.

Im zweiten Teil wurde die Sammeleffizienz in Abhängigkeit von der Lysimetergröße simuliert. Dabei wurde die Lysimeterbreite von 50 bis 250 cm variiert.

Im dritten Teil wurde der Einfluss von Heterogenitäten in den bodenhydraulischen Eigenschaften untersucht. Dazu wurden unterschiedlich stark ausgeprägte Heterogenitäten durch eine Miller-Miller-Ähnlichkeit realisiert (MILLER

und MILLER 1956). Die räumliche Verteilung der Eigenschaften wurde durch ein exponentielles Autokorrelationsmodell mit gleichen Korrelationslängen von $\Lambda_x = \Lambda_y = 10 \text{ cm}$ realisiert. Um repräsentative Ergebnisse zu erzielen wurden diese Simulationen jeweils in 400-facher Wiederholung mit zufälliger Verteilung der hydraulischen Eigenschaften durchgeführt.

Im vierten Teil wurde der Einfluss des Lysimeters auf den Transport eines inerten Tracers in einem heterogenen Boden untersucht. Dazu wurde ein Tracerpuls am oberen Rand appliziert und der Durchbruch der mit dem Lysimeter „gemessen“ wurde mit dem Durchbruch ohne Lysimeter verglichen.

C) Felduntersuchung

In einem Feldexperiment wurden drei Rillenlysimeter mit einer Seitenlänge von 125 cm unterhalb einer 120 cm mächtigen Aufschüttung von schwach mit PAK kontaminiertem schluffigen Sand installiert. Die 120 cm des original vorhandenen Bodens wurden vorher entfernt. Unterhalb der Schüttung lagen glaziale Lehme mit stark variierenden Texturen vor. Vier weitere Lysimeter wurden 50 bis 100

cm unterhalb der Schüttungen direkt in den ungestörten Boden eingebaut. Die Bodenoberfläche war horizontal und der Abstand der Lysimeter wurde so gewählt, dass die Fließfelder nicht von den jeweils benachbarten Lysimetern beeinflusst wurden.

Die Installation der Lysimeter erfolgte bis Februar 2003. Nach einer Langzeitmessung (Daten nicht gezeigt) wurde im Zeitraum von 11. bis 15. Oktober 2004 ein Beregnungsexperiment mit zwei applizierten Tracern durchgeführt. Ziel des Experiments war (i) Informationen über das Transportverhalten des Bodens besonders im Hinblick auf das Vorkommen von präferenziellen Fließwegen zu erhalten und (ii) die Sammeleffizienz durch erhöhte Infiltrationsraten zu verbessern. 0.5 cm einer Tracerlösung mit 8 g L⁻¹ Br als idealen Tracer und 0.35 g L⁻¹ Brilliant Blue (BB) als reaktiver Tracer wurden auf der Bodenoberfläche appliziert. Nach der Tracerapplikation wurde der Boden mit einer Intensität die leicht unterhalb der Infiltrationskapazität (ca. 2 cm d⁻¹) lag beregnet.

Ergebnisse

A) Studie unimodaler Boden

Abbildung 3 (links) zeigt die stationären Verteilungen von Matrixpotenzial und Fließfelder des Wassers für eine

Infiltrationsintensität von 4 cm d⁻¹. In beiden Fällen wirkt das Lysimeter als Barriere für den Wasserfluss, so dass das Matrixpotenzial direkt oberhalb des Lysimeters ansteigt und damit höher ist als auf gleicher Höhe in dem umgebenden Boden. Gleichzeitig ist das Potenzial direkt unterhalb des Bodens kleiner als in der Umgebung. Im bimodalen Szenario (Abbildung 3 (rechts, oben)) mit $\alpha_1 = 0.4 \text{ cm}^{-1}$ und $K_s = 640 \text{ cm d}^{-1}$ erreicht das Potenzial auf der Lysimeteroberfläche nicht den Wert Null, so dass das Lysimeter komplett umflossen wird. Im unimodalen Fall mit $\alpha = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ und $K_s = 10 \text{ cm d}^{-1}$ wird ein Potenzial von Null erreicht und Wasser tritt in das Lysimeter ein. Die Sammeleffizienz beträgt in diesem Fall ca. 75%.

Abbildung 3 (rechts) zeigt die Sammeleffizienzen aller Simulationen mit den homogenen Materialeigenschaften. Die oberen beiden Graphen zeigen die Abhängigkeit der Sammeleffizienz von den hydraulischen Eigenschaften und der Infiltrationsintensität für die unimodalen und bimodalen Fälle. Mit zunehmender Infiltrationsintensität steigt auch die Sammeleffizienz. In den unimodalen Szenarien ist die Sammeleffizienz annähernd identisch für die unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften. In den bimodalen Szenarien zeigt sich sehr deutlich, dass die Sammeleffizienz mit zunehmenden Werten für α bzw. α_1 und K_s abnimmt. Das kann damit erklärt werden, dass die gesättigte Wasserleitfähigkeit größer ist und somit der Wassertransport von

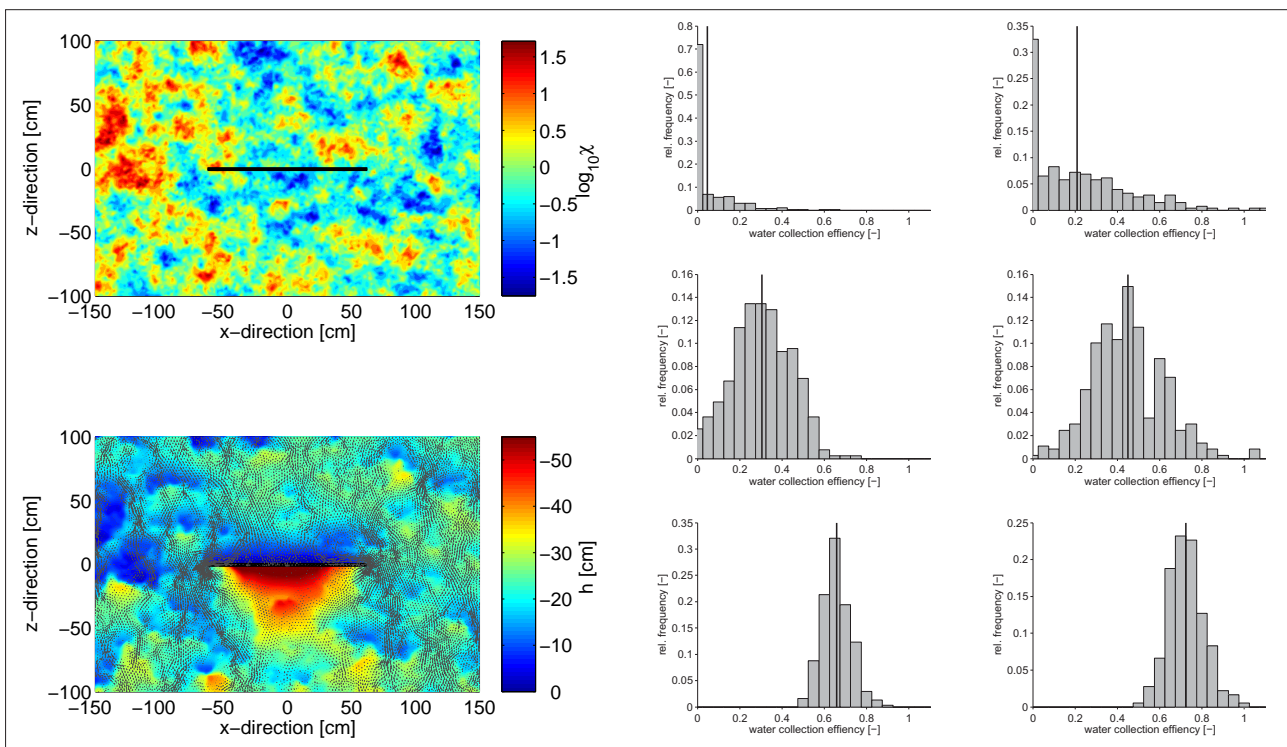


Abbildung 4: Links oben: räumliche Verteilung der bodenhydraulischen Eigenschaften dargestellt anhand des Skalierfaktors χ . Links unten: Dazugehörige stationäre Verteilung des Matrixpotenzials beim unimodalen Standardszenario ($\alpha = 0.05 \text{ cm d}^{-1}$, $K_s = 100 \text{ cm d}^{-1}$). Infiltrationsintensität war 4 cm d^{-1} . Rechts: Verteilung der Sammeleffizienzen als Ergebnis der Monte-Carlo-Simulationen für unterschiedliche Lysimetergrößen und unterschiedlichen Ausprägungen der Heterogenität. Erste Reihe: Lysimeterbreite ist 75 cm, zweite Reihe: Lysimeterbreite ist 125 cm, dritte Reihe: Lysimeterbreite ist 250 cm. Linke Spalte: Standardabweichung von $\log_{10}(\chi) = 0.5$. Rechte Spalte: Standardabweichung von $\log_{10}(\chi) = 0.75$. Schwarze Linien zeigen arithmetisches Mittel der Ergebnisse. Hydraulische Funktionen und Infiltrationsintensität wie links.

der Lysimeterfläche in den umgebenden Boden auch bei geringen Potenzialdifferenzen sehr ausgeprägt ist. Dieser Effekt wird überprägt durch eine rasche Abnahme der Leitfähigkeit nahe Sättigung bei größeren Materialien, also für größere Werte von α und α_1 (Abbildung 2), so dass der Fließquerschnitt oberhalb des Lysimeters bei den größeren Materialien kleiner wird. Diese Überprägung führt in den unimodalen Fällen dazu, dass die Sammeleffizienzen für die einzelnen Infiltrationsintensitäten nahezu gleich sind. In keinem dieser Fälle erreichte die Sammeleffizienz einen Wert von 1.

Auch die Vergrößerung der Lysimeterfläche und der Einsatz von Seitenwänden führen zu höheren Sammeleffizienzen (Daten nicht gezeigt). Allerdings können selbst Lysimeter mit einer Breite von 250 cm komplett umflossen werden.

B) Studie strukturierter Boden

Abbildung 4 (links oben) zeigt eine typische Realisierung der Verteilung des Miller-Skalierfaktors χ für einen heterogenen Boden. Die Standardabweichung σ von $\log_{10}(\chi)$ war 0,5 und die Korrelationslänge in beiden Raumrichtungen 10 cm. Für vertikale Wasserbewegungen führen heterogene Bodeneigenschaften zu einem Netzwerk von präferenziellen Fließwegen (ROTH 1995). Dies ist sehr gut an den Fließvektoren in Abbildung 4 (links unten) zu sehen. Die stationäre Potenzialverteilung ist weniger heterogen als die Verteilung von $\log_{10}(\chi)$ und ähnelt der Potenzialverteilung der homogenen Szenarien (Abbildung 3, links). Der Barriereneffekt des Lysimeters ist qualitativ ähnlich zum homogenen Fall. Im Gegensatz zum homogenen Standardszenario mit $K_s = 100 \text{ cm d}^{-1}$ (Daten nicht gezeigt) wird im heterogenen Fall Wasser aufgefangen, was durch das Fließfeld dargestellt ist. Die Sammeleffizienz betrug in diesem Fall ca. 42%.

Das Fließfeld in Abbildung 4 rechts ist eine einzelne zufällige Realisation. Um repräsentative Ergebnisse zu erzielen wurde die Generierung der χ -Verteilung und anschließender Simulation mit denselben Randbedingungen 400-fach

wiederholt. Diese Monte-Carlo-Simulationen wurden für 3 verschiedene Lysimetergrößen und 2 unterschiedliche Grade der Variabilität der hydraulischen Eigenschaften, ausgedrückt in der $\log_{10}(\chi)$, durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Monte-Carlo-Simulationen sind in Abbildung 4 (rechts) zusammengefasst. Wie erwartet ist die Sammeleffizienz größer für größere Lysimeterflächen. Da größere Lysimeter über größere Bodenvolumina mitteln, sinkt die Variabilität der „Messungen“ mit der Größe der Auffangflächen. Weiterhin steigt die Sammeleffizienz mit ansteigender Variabilität der Verteilung der bodenhydraulischen Eigenschaften. Dies ist bei den kleinen Lysimetern am meisten ausgeprägt, wo die Wahrscheinlichkeit, dass ein präferenzialer Fließweg das Lysimeter trifft am geringsten ist. Bei einer Lysimeterbreite von 75 cm und $\sigma(\log_{10}(\chi)) = 0,5$ wurde ca. 65% aller Lysimeter komplett umflossen. Mit den größeren Lysimetern wurde immer Wasser aufgefangen. Bei einer Lysimeterbreite von 250 cm hatte ein Anstieg von $\sigma(\log_{10}(\chi))$ auf 0,75 kaum noch einen Einfluss auf die Sammeleffizienz.

Abbildung 5 (links) zeigt die fließgemittelten Durchbruchkurven eines inerten Tracers, der als Puls auf die Bodenoberfläche bei der Simulation eines stationären Fließfeldes gegeben wurde. Die erste Simulation wurde mit dem Fließfeld durchgeführt, das in Abbildung 4 (links) dargestellt ist. Eine Referenzsimulation wurde mit der exakt gleichen Verteilung der hydraulischen Eigenschaften, aber ohne Lysimeter als Barriere durchgeführt. Der Durchbruch an den einzelnen Knoten in der Simulation ohne Lysimeter (gepunktete Linien) ist sehr unterschiedlich. Daraus folgt dass kleinskalige Messungen, z.B. mit Saugkerzen, in heterogenen Böden nicht zu repräsentativen Ergebnissen führen können. Dagegen unterscheidet sich der Durchbruch wie er im Lysimeter gemessen würde nur leicht vom „tatsächlichen“ Durchbruch im unbeeinflussten Boden. Die Lysimetermessung kann demnach für konservative gelöste Stoffe gute gemittelte Abschätzungen der realen mittleren Durchbrüche erbringen.

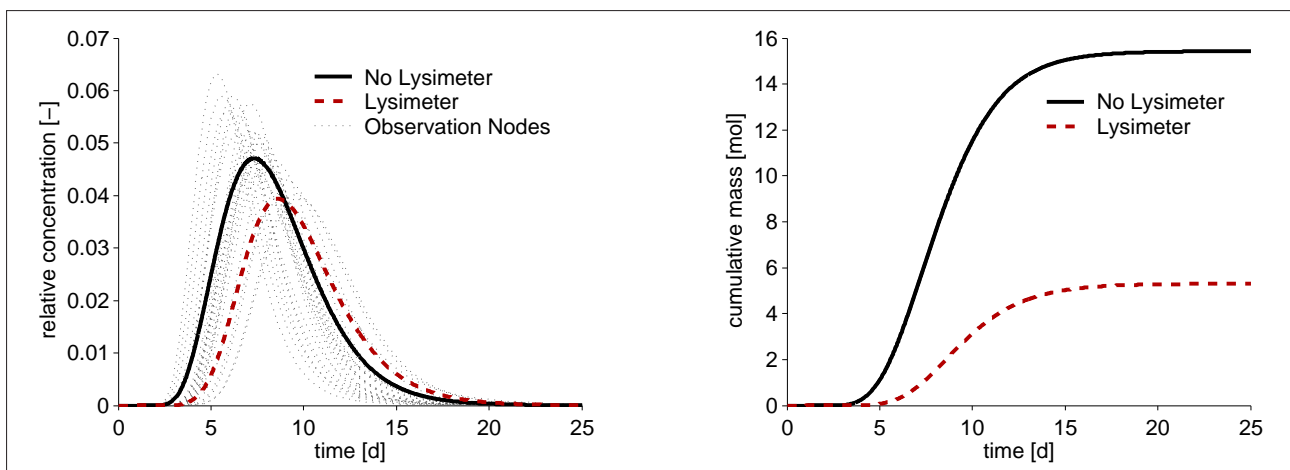


Abbildung 5: Links: Durchbruchkurve eines idealen Tracers, der als kurzer Puls auf die Oberfläche des Bodens gegeben wurde. Wassertransportszenario ist wie in Abbildung 4 links. Lysimeter: Durchbruch in das Lysimeter; No Lysimeter: Durchbruchkurve im gleichen Boden und gleichem Ort ohne Lysimeter; Observation Nodes: Punktuelle Durchbruchkurven in der Simulation ohne Lysimeter. Rechts: Die entsprechenden kumulativen Massen, welche ins Lysimeter eintreten bzw. in ungestörten Böden die entsprechende Fläche passieren.

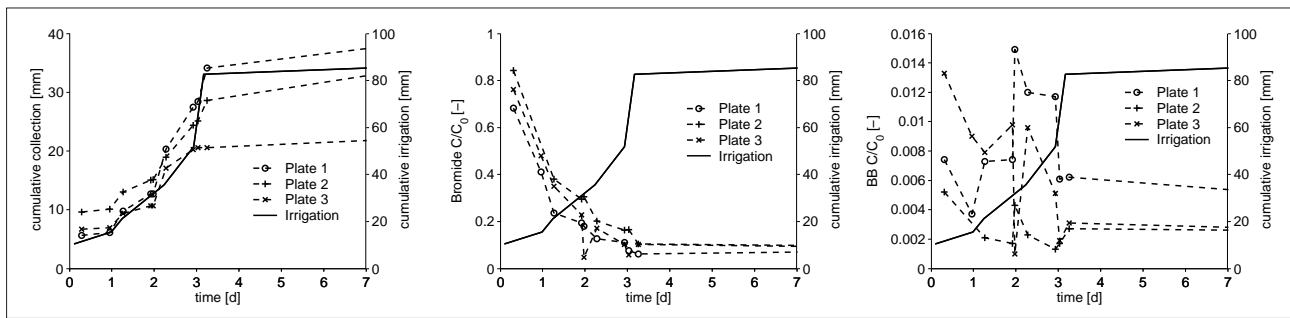


Abbildung 6: Ergebnisse der Feldmessung. Links: Kumulative Sickerwassergewinnung direkt unterhalb des aufgefüllten Bodenmaterials während des Beregnungsexperiments. Mitte: Zeitlicher Verlauf der Bromidkonzentration. Rechts: Zeitlicher Verlauf der BB-Konzentration.

Der leicht verzögerte Durchbruch mit Lysimeter kann durch den erhöhten Wassergehalt direkt oberhalb des Lysimeters erklärt werden. Dies führt bei der gleichen Flussrate, q , zu einer verringerten Porenwassergeschwindigkeit, $v = q/\theta$, im Vergleich mit dem Szenario ohne Lysimeter. Die stark unterschiedlichen kumulativen Massenflüsse (Abbildung 5, rechts) lassen sich durch die relativ geringe Sammeleffizienz des Lysimeters erklären. Das bedeutet, dass trotz der guten Wiedergabe der Konzentrationen anhand dieser Lysimetermessungen keine Aussagen über die auftretenden Massenflüsse gemacht werden können.

C) Feldmessung

Die Infiltrationskapazität des aufgefüllten Bodenmaterials im Feldexperiment war sehr gering, so dass in den fünf Tagen nur ca. 80 mm beregnet werden konnten. Die Variabilität der Beregnung wurde anhand kleiner Plastikfläschchen gemessen und war mit einem Variationskoeffizienten mit ca. 13% recht homogen. Die Lysimeter direkt unterhalb des aufgeschütteten Materials fingen regelmäßig Wasser auf und fingen ca. 45% des beregneten Wassers auf (Abbildung 6). Da die Verdunstung in dem Messzeitraum vernachlässigbar ist, kann das Verhältnis von aufgefangenem Wasser zum applizierten Wasser ungefähr mit der Sammeleffizienz gleichgesetzt werden. Der Variationskoeffizient zwischen den Lysimetern war 12%.

Der zeitliche Verlauf der relativen Bromid- und BB-Konzentrationen (Abbildung 6, Mitte und links), zeigt, dass diese Stoffe schon in der ersten Probe nach Beginn der Beregnung vorhanden waren. Darüber hinaus war die Bromidkonzentration zu Beginn mit ca. 80% der Ausgangskonzentration am höchsten und fiel danach kontinuierlich ab auf ca. 5% nach 80 mm Beregnung. Auch die BB-Konzentration war zu Beginn am höchsten. Allerdings war die maximale Konzentration weit unterhalb der Ausgangskonzentration (ca. 1% von C_0) und der Abfall des Konzentrationsverlaufes war irregulärer und langsamer als der der Bromidkonzentration.

Die frühe Ankunft beider Tracer und die sehr hohe Bromidkonzentration zu Beginn der Messung deuten darauf hin, dass praktisch das gesamte gewonnene Wasser aus präferenziellen Fließwegen stammt. Die starke Verdünnung eines reaktiven im Vergleich zu einem inerten Tracer bei vergleichbarer Transportzeit ist typisch für Stoffverlagerungen, die durch präferenzielles Fließen dominiert werden

(SCHWARZ und KAUPENJOHANN 2001). Die tiefer eingebauten Lysimeter fingen in dem Messzeitraum kein Wasser auf. Dieser Umstand zeigt, dass präferenzielles Fließen in diesem Unterboden keine bedeutende Rolle spielte.

Diskussion

Passive, wandlose Lysimeter fangen nur dann Wasser auf, wenn das Matrixpotenzial direkt oberhalb der Auffangfläche größer oder gleich Null ist. In allen anderen Fällen werden sie komplett umflossen. In homogenen Böden mit grober Textur, wo die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit sehr hoch ist, erreicht das Potenzial oberhalb des Lysimeters nur bei sehr hohen Infiltrationsraten Null.

Heterogenitäten in den bodenhydraulischen Eigenschaften führen zu präferenziellen Fließwegen und damit zu Sickerwassergewinnung, selbst wenn die mittleren hydraulischen Eigenschaften im homogenen Fall keinen Sickerwassergewinn erwarten lassen. Größere Heterogenitäten führen zu stärkerem präferenziellen Fluss und damit zu mehr aufgefangenem Wasser.

Größere Lysimeterflächen führen ebenfalls zu einem höheren Sickerwassergewinn. Zusätzlich wird die Variabilität zwischen den Einzelmessungen mit zunehmender Lysimetergröße kleiner. Das bedeutet, dass bei größerer Lysimeterfläche weniger Messwiederholungen nötig sind.

Der mit einem wandlosen Lysimeter gemessene Durchbruch eines inerten Tracers wird im Vergleich zum natürlichen mittleren Durchbruch nur leicht verzögert durch die Barrierenwirkung. Die Konzentrationen sind vergleichbar. Da die punktuellen Durchbrüche im heterogenen Fall recht unterschiedlich ausfallen, geben die Lysimeter eine gute Abschätzung des mittleren Stoffdurchbruchs in dem betreffenden Boden, vorausgesetzt der Stoff ist nichtreaktiv bzw. die chemische Reaktivität ist nicht abhängig von den hydrologischen Bedingungen wie z.B. dem Redoxpotenzial.

Obwohl die in der Feldstudie eingesetzten Lysimeter größer waren als die meisten in der Literatur beschriebenen Lysimeter, wurde nur relativ wenig Wasser aufgefangen. Dies mag dran liegen, dass die meisten der in der Literatur beschriebenen Lysimeter eine Art Seitenwand besaßen (RADULOVICH and SOLLINS (1987), JEMISON und FOX (1992), ZHU et al. (2002)).

Schlussfolgerungen

Wandlose flächige Lysimeter, die in den ungestörten Bodenkörper eingebracht werden können, sind hervorragend zum Auffangen von freidrainendem Sickerwasser aus präferenziellen Fließbahnen geeignet. Zum Erfassen von Sickerwasser, das in der ungesättigten Bodenmatrix transportiert wird, müssen dagegen Sauggeräte eingesetzt werden (vgl. PETERS et al. 2005).

Die numerische Studie zeigt, dass die Sammeleffizienz der Lysimeter stark von der Form der hydraulischen Eigenschaften abhängt. Besonders die Form dieser Eigenschaften nahe Sättigung spielt eine große Rolle. Dabei führen hohe gesättigte Wasserleitfähigkeiten zu geringeren Effizienzen und der starke Abfall der hydraulischen Leitfähigkeit nahe Sättigung zu höheren Effizienzen. Weiterhin führen größere Auffangflächen und höhere Infiltrationsintensitäten zu größeren Aufmengen.

Heterogenitäten in den bodenhydraulischen Eigenschaften führen zu einem Netz von präferenziellen Fließwegen, aus denen nur mit großflächigen Auffanggeräten repräsentative Proben genommen werden können. Größere Lysimeterflächen führen zu geringerer Variabilität in den Sammeleffizienzen. Das bedeutet, dass bei größeren Lysimeterflächen die Anzahl der Messwiederholungen geringer sein darf.

Stoffdurchbrüche werden durch den Einfluss des Lysimeters auf das natürliche Fließfeld leicht verzögert. Im Gegensatz zu punktuellen Messungen wie sie z.B. mit Saugkerzen gemacht werden, geben die hier beschriebenen Lysimeter repräsentativere Informationen über tatsächliche Transportvorgänge im natürlichen Boden.

In vielen natürlichen Böden spielen sowohl Matrix- als auch präferenzialer Wassertransport eine Rolle. Da es bis heute keine großflächigen Sauggeräte gibt, schlagen wir für diese Fälle eine Kombination von Lysimeter und Sauggeräte vor.

Literatur

- BERGSTROM, L., 1987: Nitrate leaching and drainage from annual and perennial crop in tile drained plots and lysimeters. *J. Environ. Qual.*, 16, 11-18.
- BOLL, J., T.S. STEENHUIS and J.S. SELKER, 1992: Fiberglass wicks for sampling of water and solutes in the vadose zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 701-707.
- CAMERON, D., C. KOWALENKO and C. CAMPBELL, 1979: Factors affecting nitrate and chloride leaching variability in a field plot. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 455-460.
- DURNER, W., 1994: Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.*, 30, 211-223.
- FLURY, M., H. FLÜHLER, W. JURY and J. LEUENBERGER, 1994: Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. *Water Resour. Res.*, 30 (7), 1945-1954.
- GEE, G., A. WARD, T. CALDWELL and J. RITTER, 2002: A vadose zone water fluxmeter with divergence control. *Water Resour. Res.*, 38 (8), doi:10.1029/2001WR000816, 2002.
- JEMISON, J. and R. FOX, 1992: Estimation of zero-tension pan lysimeter collection efficiency. *Soil Sci.*, 158, 85-94.
- HAGEDORN, F., J. MOHN, P. SCHLEPPI and H. FLÜHLER, 1999: The role of rapid flow paths for nitrogen transformation in a forest soil: A field study with micro suction cups. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1915-1923.
- KOSUGI, K. and M. KATSUYAMA, 2004: Controlled-suction period lysimeter for measuring vertical water flux and convective chemical fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 371-382.
- MILLER, E. and R. MILLER, 1956: Physical theory of capillary flow phenomena. *J. Appl. Phys.*, 27, 324-332.
- PETERS, A., K. GERMER and W. DURNER, 2005: Sickerwassererfassung – Ein Vergleich von Geräten unterschiedlicher Bauart. In: Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL), Bericht über die 11. Lysimetertagung am 5. und 6. April 2005, 61-66.
- RADULOVICH, R. and P. SOLLINS, 1987: Improved performance of zero-tension lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 1386-1388.
- ROBISON, W., E. STONE and T. HAMILTON, 2004: Large plate lysimeter leachate collection efficiency for water being transported from soil to groundwater. *Soil Sci.*, 169 (11), doi:10.1097/01.ss0000148736.81207.1a.
- SCHWARZ, A. and M. KAUPENJOHANN, 2001: Vorhersagbarkeit des Stofftransportes in Böden unter Berücksichtigung des schnellen Flusses (preferential flow). KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 48, 48-53.
- SIMUNEK, L., K. HUANG, M. SEJNA and M. T. VAN GENUCHTEN, 1999: The HYDRUS-2D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media, version 1.0.
- VAN GENUCHTEN, M.T., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- WEIHERMÜLLER, L., J. SIEMENS, M. DEURER, S. KNOBLAUCH, H. RUPP, A. GÖTTLEIN and T. PÜTZ, 2007: In situ soil water extraction: A review. *J. Environ. Qual.*, 36, 1735-1748.
- ZHU, Y., R. FOX and J. TOTH, 2002: Leachate collection efficiency of zero-tension pan and passive capillary fiberglass wick lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 37-43.